



数理化自学丛书

物 理

第 二 册

楊逢挺 叶秀中 編

数理化自学丛书

物 理

(第二册——分子物理学和热学)

楊逢挺 叶秀中 編

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书詳尽地介紹了分子物理学和热学的基础知識以及它們在各方面的应用。全书共分八章,先讲分子运动論、热和功、能的轉变和能量守恒定律,然后依次讲物体的热膨胀,气体、液体和固体的性质,物态的变化和热机。此外,书中还包括了大量的例題、习題和总复习題,并且在每章末了都附有复习提要,以供同学巩固之用。

本书可供具有相当于初中三年級以上文化水平的自学青年閱讀。

数理化自学丛书

物 理

(第二册——分子物理学和热学)

楊逢挺 叶秀中 編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海洪兴印刷厂印刷

新华书店上海发行所发行

开本 850×1168 1/32 印張 10 6/32 排版字數 252,000
1964 年 8 月第 1 版 1964 年 8 月第 1 次印刷 印數 1—30,000

統一書號 T 13119·571 定價(七) 0.86 元

出版者的話

在我們国家里，有千千万万青年人正在从事劳动和工作，他們都希望在祖国的社会主义和共产主义建設中貢獻出力量，迫切要求学习科学文化知識以适应国家建設日益发展的需要。

这套自学丛书的出版，就是为满足广大讀者学习数理化基础知識的需要。三門学科共出书十七册：数学有代数四册、平面几何二册，三角、立体几何、平面解析几何各一册；物理和化学各四册。具有高小毕业以上程度的讀者认真学好这套书，这三門学科的知識可基本上达到高中毕业的水平。

为照顾自学的特点，在編写中尽可能把重点、难点和关键性的內容讲深讲透；尽可能多举些例題，分析引导，使解題有所启发；尽可能把物理的、化学的現象描述得詳尽些以补缺少实验的不足。总之，想尽可能减少自学中的困难。

一个人自学的時間总是比在校学习的時間长得多，要自学有成就，必須多想多練，更要持之以恒，锲而不舍，也就是見到难处，抓住不放，不是知难而退。

学习必須从自己的实际水平出发。学一門学科要有一定的基础，选讀順序要根据前言的指导。希望循序漸进、踏踏实实地学习，一步不懂，不要跨第二步。刻苦自学，学有成就者不乏其人，愿广大讀者努力学好。

这套丛书由黃丹麓、楊荣祥、余元希、楊逢挺、桂君协等同志負責主編。由于这是新的工作，經驗不足，难免有缺点或錯誤，希望讀者批評指教！

一九六三年七月

編者的話

本书是数理化自学丛书物理部分的第二册，内容包括分子物理学和热学的基础知識以及这些知識在工农业生产和其他方面的应用。在閱讀本书之前，要求先学好第一册中讲过的力学知識。

本书共分八章，先讲分子运动論、热和功、能的轉变和能量守恒定律，然后依次讲物体的热膨脹，气体、液体和固体的性质，物态变化和热机。这样安排有利于充分利用分子运动論和能量的观点来闡述全部分子物理学和热学知識，使讀者对热現象的本质有比較深刻和全面的理解。

由于热机在工农业生产中有着广泛的应用，故本书对不同类型热机的构造、优缺点和应用范围作了初步介紹。通过对各种热机工作原理的叙述，使讀者对功、内能、热量等基本概念以及能的轉变和能量守恒定律有更为深刻的認識。

为了帮助讀者能更好地掌握分子物理学和热学的一些最重要最基本的知識，在取材和編写中我們避免平均使用力量，而把教材中的重点和关键性問題作了比較詳細的叙述，以便讀者能集中精力，把这些知識学好。一般教材对中心内容有巩固、扩大和加深的作用，也是讀者应该具备的知識，所以也不可忽視。用小字排印的教材是較深或次要的内容，初讀时可以不看。

在讲过重要的定律、公式以后，都附有一定数量的例題，目的在于說明有关知識在实际中的应用，告訴讀者进行物理計算的正确方法，对解題作业带有示范作用。

要牢固掌握物理知識并且能够灵活地运用它們，必須多做练

习而且要认真做好练习。解题时首先要弄清题目的内容，根据已知量和所求量找出所要应用的物理规律，应该作出必要的示意图来帮助自己思考，要能根据实际情况来判断所得结果是否合理。书中所附答案是为了便于对正，在沒有得到计算结果以前，不要先看答案。部分习题附有提示，读者应该按照提示所指的方向去思考。解题是发展逻辑思维和培养运算能力的重要措施，读者必须重视。

物理学是以实验为基础的科学，为此，读者必须仔细阅读书中描述的实验，了解实验的目的要求，应注意由实验数据获得结论的过程。利用简单的仪器装置来进行实验是物理学习中需要培养的基本技能。书中建议读者自己动手做实验，希望都能尽量想法去试试。

为了帮助读者系统地掌握物理知识，进一步了解教材间的联系，每章末了都附有复习提要，内容包括一章中讲述的概念、理论、定律、公式等等，这些都是一章中最重要的基础物理知识。

本书第一到第六章由杨逢挺同志执笔，七、八两章由叶秀中同志主稿。由于对自学书的编写工作还是初次尝试，既要体现自学书的特点，又要照顾篇幅，不能过于庞大，同时要把初、高中的物理教材贯通，一次交代清楚，在实践中的确感到不少困难。虽经编写组同志多次讨论，反复修改，但因时间匆促和限于编者水平，不免有错误和不妥当的地方，希望读者随时提出意见，加以指正，以便有再版机会时进行修改，使本书更符合自学读者的要求。

1963年12月

目 录

出版者的話

編者的話

第一章 分子运动論.....1

- § 1.1 物质的結構..... 1
- § 1.2 分子的大小和质量..... 3
- § 1.3 分子間的空隙..... 6
- § 1.4 分子間的相互作用力..... 8
- § 1.5 气体、液体和固体中的扩散現象.....12
- § 1.6 布朗运动.....14
- § 1.7 热运动, 温度.....18
- § 1.8 气体、液体和固体中分子的热运动.....19
- 本章提要.....20
- 复习題一.....21

第二章 热和功23

- § 2.1 分子的动能和势能, 物体的內能.....23
- § 2.2 物体內能的改变.....26
- § 2.3 热傳遞的三种方式.....30
- § 2.4 热量, 热量的单位.....42
- § 2.5 物体的热容量, 物质的比热.....44
- § 2.6 量热器, 比热的測定.....48
- § 2.7 燃料的燃燒值.....54
- § 2.8 热功当量.....57
- § 2.9 能的轉变和能量守恒定律.....61
- 本章提要.....64
- 复习題二.....65

第三章 物体的热膨脹67

- § 3.1 物体的热脹冷縮.....67
- § 3.2 温度和溫度計.....71
- § 3.3 固体的綫膨脹.....76
- § 3.4 固体的体膨脹.....82
- § 3.5 固体的綫脹系数和体脹系数之間的关系.....83
- § 3.6 热膨脹在技术上的意义.....85
- § 3.7 液体的热膨脹.....89
- § 3.8 物体的密度和温度的关系.....93
- § 3.9 水的膨脹特点.....94
- 本章提要.....96
- 复习題三.....97

第四章 气体的性质99

- § 4.1 气体的状态, 压强.....99
- § 4.2 温度不变时气体的体积和压强的关系, 玻意耳-馬略特定律..... 102
- § 4.3 温度不变时气体的密度和压强的关系..... 107
- § 4.4 压强不变时气体的体积和温度的关系, 盖·呂薩克定律..... 110
- § 4.5 体积不变时气体的压强和温度的关系, 查理定律... 115
- § 4.6 理想气体..... 120
- § 4.7 絕對温标..... 122
- § 4.8 压强不变时气体的密度和温度的关系..... 125
- § 4.9 理想气体的状态方程 (气态方程) 127
- § 4.10 气体在迅速膨脹和压缩时

温度的变化——絕热变化.....	132	§ 7.2 熔解热.....	199
§ 4.11 气体在技术上的应用.....	134	§ 7.3 熔解和凝固时体积的变化.....	204
本章提要.....	135	§ 7.4 影响熔点的几个因素.....	205
复习題四.....	137	§ 7.5 金属的鑄造.....	207
第五章 液体的性质.....	139	§ 7.6 蒸发.....	209
§ 5.1 液体的特征.....	139	§ 7.7 飽和汽和飽和汽压.....	211
§ 5.2 液体的表面层.....	141	§ 7.8 飽和汽的性质.....	213
§ 5.3 表面能.....	143	§ 7.9 未飽和汽.....	218
§ 5.4 表面張力.....	145	§ 7.10 沸騰.....	221
§ 5.5 表面張力系数.....	147	§ 7.11 汽化热.....	227
§ 5.6 表面張力系数跟温度的关系.....	153	§ 7.12 临界温度.....	233
§ 5.7 浸潤現象.....	154	§ 7.13 气体的液化.....	237
§ 5.8 毛細現象.....	157	§ 7.14 液态气体的应用.....	239
本章提要.....	162	§ 7.15 空气的湿度.....	241
复习題五.....	162	本章提要.....	250
第六章 固体的性质.....	164	复习題七.....	252
§ 6.1 晶体和非晶体.....	164	第八章 热机.....	254
§ 6.2 晶体的空間点陣.....	167	§ 8.1 气体膨脹做功.....	255
§ 6.3 固体的形变.....	170	§ 8.2 鍋炉.....	262
§ 6.4 彈性形变和范性形变.....	172	§ 8.3 蒸汽机.....	265
§ 6.5 彈性形变的基本类型.....	174	§ 8.4 蒸汽在汽缸內膨脹做功.....	271
§ 6.6 胡克定律.....	178	§ 8.5 热机的組成部分. 热机的效率.....	273
§ 6.7 固体形变时能量的变化.....	184	§ 8.6 內燃机.....	280
§ 6.8 强度和安全系数.....	184	§ 8.7 蒸汽輪机.....	293
§ 6.9 硬度.....	188	§ 8.8 燃气輪机.....	296
§ 6.10 固体材料性能的应用.....	190	§ 8.9 空气噴气发动机.....	298
本章提要.....	192	§ 8.10 火箭噴气发动机.....	302
复习題六.....	193	本章提要.....	303
第七章 物态的变化.....	194	复习題八.....	306
§ 7.1 熔解和凝固.....	194	总复习題.....	308
		习题答案.....	314

第一章 分子运动論

§ 1.1 物质的結構

大約在 2300 年以前，就产生了一种学說，认为一切物体都是由极小的微粒組成的，这些微粒在不断地运动着和相互作用着。近代科学研究証实了这一学說，并且进一步把它发展成为物理学中的一个重要理論——分子运动論。利用这种理論能够說明很多物理現象和物质的性质。在这一章中，我們將初步介紹一下有关这一学說的基本知識。

許多观察和实验的結果告訴我們，任何物体都可以分割成为极小的微粒。例如，倒在桌子上的一滴乙醚或香水，可以使人們在容积达数百立方米的房間里到处都能聞到它們的气味。如果在屋子里放上几块樟脑，那么，在屋子里的人就能够長時間地嗅到它的气味。我們知道，只有物质作用到人的嗅觉器官时，我們才能够聞到它的气味。在屋子里的任何地方都能够嗅到某种物质的气味，这一点表明了在屋子里到处都有这种物质存在。由于少量物质的气味能够傳到很远的地方，因此証实了整个物体是可以分割成为极小的微粒的。

任何物体都能够分割成为极小微粒的这种性质，叫做物质的可分割性。在日常生活中，我們还能够举出許多例子来証实物质的可分割性。

例如，一块糖可以分割成为許多碎粒，碎粒还可以搗成粉末，这些粉末仍然是甜的，这說明粉末里面仍具有糖的特性。坚硬的鋼鉄也可以銼成細微的碎屑，碎屑里面的每一个微粒都具有鋼鉄

的特性。

許多固体能够溶解于水或其他液体中，这时它們就分成了很小的微粒。例如，把 0.1 毫克的紅色顏料溶解在 1 升的水里后，虽然在每一厘米³ 的水中只含有万分之一毫克的顏料，但这一点点顏料就能够使水呈现出紅色。不仅固体可以分割成为很小的微粒，液体也是一样，例如，把一小滴墨水滴入一杯水中，水就会全部被染上墨水的顏色。

因此，我們可以得出結論：任何物质，不論处于什么状态(固态、液态或气态)，都可以分割成为极小的微粒。

但是，进一步研究上面这些現象后，就会很自然地产生这样的問題：既然物质可以分割成为极小的微粒，那么，这样的分割是否可以无限制地进行下去呢？

为了回答这个問題，我們来做下面的实验。把一小滴油滴到表面积很大的清洁水面上，这时油就在水面上逐渐地向四处扩展开来，同时油层不断地变薄。但是，在油还没有布满整个水面之前，就不再扩展了；也就是說，虽然油还有扩展的余地，但油层已不能进一步变薄了。这个現象說明，油层在厚薄方向上已經达到了分割的极限。这种分割的极限就叫做分子。

分子是构成物质的、而且具有这种物质特性的最小微粒。

现代科学的研究結果告訴我們，一切物体——固体、液体和气体都是由分子組成的。

虽然采用一般机械方法不能把分子繼續进行分割，但是，通过化学过程，却可以把分子再行分割成为更小的微粒，这种微粒叫做原子。例如，食盐的分子是由一个鈉原子和一个氯原子組成的；盐酸的分子是由一个氢原子和一个氯原子組成的；水的分子是由两个氢原子和一个氧原子組成的。原子是用通常的化学方法不能再行分割的最小的微粒。

近代物理学揭露了原子内部的复杂結構，并且进一步发现原

子原来是由更微小的基本粒子所组成的。关于这方面的問題，我們将在第四册中进行討論。

从上面所讲的内容中，我們已經初步看到物质的结构是非常复杂的。那么我們究竟怎样来进行研究呢？显然，如果我們企图在一开始就同时研究所有的問題，那么物质结构的复杂性就会难倒我們，使我們无从着手。但是，我們可以循序漸进，由简单到复杂，逐步地来了解物质的结构。我們先不考虑分子的结构而来研究分子的运动和相互作用，以及由此而产生的热現象；其次研究分子的结构；最后再研究原子的结构。在分子物理学和热学的研究中，我們可以把分子当做彈性小球来看待。

习 題 1·1

1. 什么叫做物质的可分割性？举些例子来说明固体和液体的可分割性。
2. 什么叫做分子？分子是不是构成物质的最小微粒？

§ 1·2 分子的大小和质量

我們已經知道，要保持物质的特性，就不能无限制地分割下去。一定有人会問：要把物体分割到什么程度才能看見分子呢？这个問題的回答也許不能令人滿意，因为無論把物体怎么样分割下去，我們用肉眼永远也不可能直接看到分子。非但如此，即使用最好的光学显微鏡也不能看到分子，而在用显微鏡所能看到的极为微小的顆粒中，也包含着大量的分子。

为了对分子的大小有一个初步的認識，我們先来看看下面的数据。

鋼块可以做成 0.003 毫米薄的鋼片。金块可以做成 0.0001 毫米薄的金箔，这种金箔能够透过光綫。一滴油在水面上可以散开成 0.000001 毫米的薄层。这些物质的分子的大小当然比上面的数据还要小。

通过这几个实例,我們已經可以看到:物质不同,分子的大小也不同;可是一切物质的分子都是非常小的。

但是这些例子还只能告訴我們:金的分子比一万分之一毫米还要小,油的分子比一百万分之一毫米还要小……。而分子究竟有多大呢?

科学研究的結果,肯定地回答了这个问题。現在已經能够精确地测出各种物质分子的大小。前面已經讲过,在本书中,都将分子看成是彈性小球来討論;因此,我們就可以用直徑来表示它的大小。例如,氢分子的直徑是 2.5×10^{-8} (即是 $2.5 \times 1/10^8 = 0.000000025$) 厘米,水分子的直徑是 4.0×10^{-8} 厘米。一般分子的直徑都在 10^{-8} 厘米左右。因此,如果把一千万个分子一个挨一个地排列起来,也不过是几毫米长。

科学家用种种方法(这些方法我們現在还不能介紹)确定了:一个克分子的任何物质所含的分子数都是 6.023×10^{23} 个^①;在标准状况下(即在 0°C 和 760 毫米高水銀柱的压强下),每立方厘米的任何气体所含的分子数也是相同的,大約有 2.7×10^{19} 个。

为了設想这些数字有多么大,我們来看几个例子。

有一只容器的容积为 1 立方厘米,假設它原来是絕對真空,也就是連一个分子也沒有。如果在器壁上钻一个小孔,使得在 1 秒钟里可以有 1 亿个空气分子进入容器,試問要經過多少時間,容器中的空气才能够达到它在标准状况时的密度呢?答案是:要經過九千年,就是九十个世紀!

如果把 0°C 和标准大气压下 1 立方厘米中的气体分子一个挨一个地排列起来,那么可以排成 8,100,000 公里长,也就是沿着赤道圍繞地球 203 圈。

如果把同样数目的磚头紧密地砌筑在一起,它們就会盖滿地

^① 这个数字叫做阿伏伽德罗常数,是物理和化学中最重要的常数之一,應該牢記。

球上所有的陆地,而高度可以达到 120 米,这个高度大约相当于三层楼房高度的十二倍.

物质的分子虽然这样小,可是它们都具有一定的质量.分子的质量可以用两种方法来计算,下面就来介绍一下.

(1) 知道了一个克分子物质的质量和它所含的分子数,我们就可以很方便地计算出一个分子的质量.

在化学课本中我们已经知道,所谓一个克分子的物质就是指质量的克数等于它的分子量的那部分物质.例如氧的分子量为 32,则 32 克氧就是一个克分子氧,又如 18 克的水, 98 克的硫酸等都是一个克分子物质.

用氢气作例子来说明.一个克分子氢气的质量是 2.016 克,里面含有 6.023×10^{23} 个氢分子,所以,一个氢分子的质量

$$\begin{aligned} m_{\text{H}_2} &= \frac{2.016}{6.023 \times 10^{23}} = \frac{20.16}{6.023 \times 10^{24}} = \frac{20.16}{6.023} \times 10^{-24} \\ &= 3.3 \times 10^{-24} \text{ 克.} \end{aligned}$$

由于 1 个氢分子是由 2 个氢原子所构成,因此,一个氢原子的质量只有 1.65×10^{-24} 克.

(2) 知道了气体在标准状况下的密度和 1 厘米³ 体积中所含的分子数,同样也可以计算出一个分子的质量.

还是以氢气作为例子.氢气在标准状况下的密度是 0.00009 克/厘米³, 1 厘米³ 里的分子数是 2.7×10^{19} 个.因此,氢分子的质量

$$\begin{aligned} m_{\text{H}_2} &= \frac{0.00009}{2.7 \times 10^{19}} = \frac{9 \times 10^{-5}}{2.7 \times 10^{19}} = 3.3 \times 10^{-5} \times 10^{-19} \\ &= 3.3 \times 10^{-24} \text{ 克,} \end{aligned}$$

答案和上面一样.

习 题 1.2

1. 月球和地球的平均距离是 384,400 公里,太阳和地球的平均距离是

14,950 万公里，如果用鉄的分子一个紧挨一个地排列起来，从地球筑成通往月球和太阳的“分子大道”，試問这两条大道各需要多少个分子？质量各是多少？設鉄分子的直徑为 3×10^{-8} 厘米，分子量为 55.85。

[提示：55.85 克的鉄含有 6.023×10^{23} 个分子。地球通向月球的“分子大道”大約需要 1.281×10^{18} 个鉄分子，这些分子的质量是 1.18×10^{-4} 克，也就是 0.118 毫克。通往太阳的“分子大道”大約需要 5×10^{20} 鉄分子，它們的总质量約为 0.046 克，还不到 50 毫克。]

2. 計算下列各元素一个分子的质量：

氢(分子量为 4)，氮(分子量为 14)，氧(分子量为 16)，金(分子量为 197)。

3. 計算水(H_2O)、氯化鈉($NaCl$)和氧化鉄(FeO)的分子质量。

[提示：分子的质量等于組成分子各原子质量之和。以水为例，一个水分子由两个氢原子和一个氧原子組成，而氧分子的质量为氢分子质量的 16 倍。一个氧分子又由两个氧原子組成，故得水分子的质量为

$m_{H_2O} = 3.3 \times 10^{-24} + 8 \times 3.3 \times 10^{-24} = (1+8) \times 3.3 \times 10^{-24} = 2.97 \times 10^{-23}$ 克，同理算得 $m_{NaCl} = 9.57 \times 10^{-23}$ 克， $m_{FeO} = 1.19 \times 10^{-22}$ 克。]

4. 一滴露水中含有 19.71×10^{15} 个水分子。如果每秒钟能数出 1,000,000 个分子，那么，要多少年才能数完这滴露水的全部分子？

5. 1 克分子的任何气体在标准状况下的体积約为 22.4 升。計算在标准状况下每 1 厘米³气体所含的分子数。

6. 1 厘米³鉄中含有多少个鉄分子？

7. 已知某种物质的密度 D 和分子量 μ ，試分別計算单位质量中所含該物质分子数的公式以及单位体积中所含該物质分子数的公式(阿伏伽德罗常数用 N 来表示)。

§ 1.3 分子間的空隙

既然一切物体都是由分子組成的，那么我們要問：分子在物体中是怎样排列的呢？分子是紧密地靠在一起中間毫无空隙，还是它們之間有空隙存在呢？通过观察和实验，就能够回答这个问题。

气体很容易被压缩；用較大的压强能够使气体的体积缩小到原来的百分之一或更小一些。

液体和固体虽然不象气体那样容易地被压缩，但是它們也是

可以壓縮的。例如，水在 40,000 大氣壓的壓縮下，體積減為原來的 $\frac{1}{3}$ 。

氣體、液體和固體能夠被壓縮的事實說明了分子間是有空隙的。當物體被壓縮時，分子間的空隙縮小，因而物體的體積變小。

我們可以用下面的實驗來證明液體的分子之間存在着空隙。在長約 1 米，直徑約為 2 厘米一端開口的玻璃管里，裝上一半水，再沿管壁慢慢地注入帶有顏色的酒精（圖 1.1），這時可以清楚地看到水和酒精的分界面。在玻璃管上做一記號，標出酒精頂面的位置。然後把管塞蓋緊，上下顛倒幾次，使水跟酒精混合在一起，這時就可以看到，混合後液體的頂面比混合前要低一些，也就是說，混合後液體的體積比混合前兩種液體的總體積要小一些。這個現象的解釋是：經過混合後，分子開始重新分布，而且排列得比以前更為緊密，其中一部分分子間的空隙被另一些分子所佔據，於是總的體積減小。

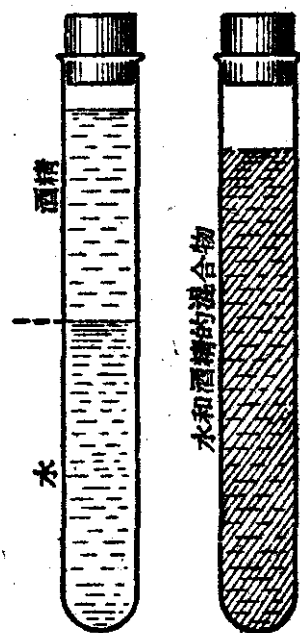


圖 1.1 水和酒精混合時總的體積減小

科學家曾經用 20,000 大氣壓的壓強壓縮厚壁鋼筒中的油，雖然鋼筒壁沒有任何裂縫或其他損壞，但是結果發現油能夠透過筒壁而滲透出來，這說明象鋼這樣堅固的物質的分子間也存在着可以讓油分子通過的空隙。

以上事實有力地證明：在任何物質中，分子間都有空隙存在。物質不同，分子間空隙的大小也不同。對於同一種物質來說，分子間的空隙在氣態時最大，液態時次之，固態時最小。

分子間雖然有空隙存在，但是即使用很好的顯微鏡也不能看到。平常我們眼睛所能看到的物體上的小孔或縫隙跟分子間的空隙比較起來，不知要大多少倍。

习 题 1·3

1. 为什么压缩气体比压缩液体和固体容易?
2. 一般物体受热后体积开始膨胀, 试问这时物体分子间的空隙发生了什么样的变化?
3. 1 厘米³ 水中含有 3.4×10^{23} 个分子, 1 厘米³ 空气中含有 2.7×10^{19} 个分子. 试问 1 厘米³ 水的分子数比 1 厘米³ 空气的分子数大几倍?

§ 1·4 分子间的相互作用力

既然任何物体都是由彼此之间有空隙的分子组成的, 那么, 为什么液体和固体的体积都很难改变, 而且固体还能保持自己原来的形状呢? 如果分子之间没有相互联系, 那么, 为什么物体不会自动地分成为一个一个的分子呢? 大家知道, 切割金属, 拉断绳子, 劈开木柴, 都要用很大的力. 这些现象说明, 组成物体的分子间有引力的作用. 每一个分子都吸引它邻近的分子, 同时每一个分子也受到它邻近分子的吸引.

少数分子间的相互吸引力是觉察不到的. 但是, 当大量的分子相互作用时, 它们总的吸引力就十分显著. 分割固体或液体, 就是要让这些物体的分子彼此离开, 因此我们必须克服分子间的引力.

但是, 分子间的引力只有当它们很接近的时候, 才能显示出来. 把破碎的玻璃片拼在一起, 并不能使它们成为完整的玻璃, 这是因为我们只是使少数的分子相互接近, 而其余的分子彼此间还保持着相当的距离, 因此, 总的吸引力是非常小的. 如果把玻璃片加热, 使它变软, 这时就有大量分子彼此接近到分子间的引力发生作用的距离, 因而显示出很大的相互吸引力, 这样就能够把破碎的玻璃片接合起来.

取一个分子作为球心, 以分子引力能够作用到的最大距离作为半径, 画一个球, 那么, 凡是在这个球里面的分子, 都能和处于球心的分子相互吸引; 而在这个球外面的分子, 实际上和处于球心的

分子沒有相互作用。按照这样規定画出的球叫做**分子作用球**。根据实验結果，可以計算出分子作用球的半徑，这个半徑的数量級^①是 10^{-7} 厘米。

在一定的范圍內，分子間的距离越小，它們之間的相互吸引力就越大；因此，同一种物质由于所处的物态不同，分子間的吸引力也不同。

在固态时，分子間的距离最小，所以分子間的吸引力最大。这就是固体能够保持自己的体积和形状的原因。下面的实验可以証实固体分子間存在着巨大的吸引力。

在实心鉛制圓柱体的两端，装上两个环，把圓柱体切断，然后使切开的这两部分相接触，并且用力压紧它們，以便使这两部分尽可能地紧密靠攏。于是，由于分子吸引力的作用，这两部分就連接成一整块。把鉛柱的一个环挂在架上(图 1.2)，再在下面的环上挂上相当重的砝碼，这时，圓柱体的两部分也不会被拉开。

在液态时，分子間的距离比固态时大，所以分子間的引力比固态时小。因而液体沒有一定的形状，具有流动性，并且在分割时所需要用的力也較小。但是，液体分子間的吸引力已經足以使液体分子聚集在一起而不致于飞散；因此，液体也具有一定的体积。

两滴水銀相互接近时能够自动地結

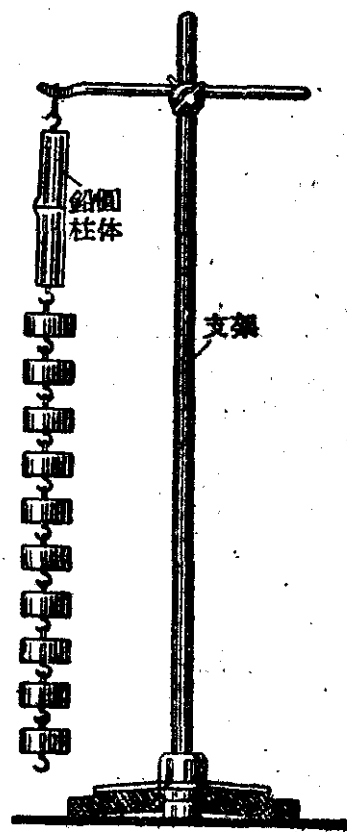


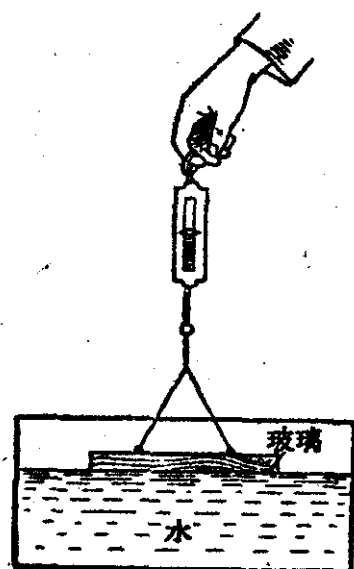
图 1.2 两块鉛圓柱体由于分子引力的作用而結合在一起

^① 数量級是量度或估計物理量的大小常用的一种概念。例如地球的赤道半徑是 6378 公里，可以写成 6.378×10^3 公里，于是，我們說它的数量級是 10^3 公里；真空中的光速約为 3×10^{10} 厘米/秒，它的数量級就是 10^{10} 厘米/秒；又如氫分子的质量約为 3.3×10^{-24} 克，它的数量級就是 10^{-24} 克。

合成为一滴的现象，就是液体分子间具有吸引力的表现。

，我们可以通过简单的实验来看一下液体分子间的吸引力有多大。

在弹簧秤的下端水平地悬挂一块玻璃，使玻璃片接触水面，这时



时玻璃片就粘附在水面上(图1·3)。当玻璃片脱离水面时，弹簧秤的读数会有明显的增大。玻璃片脱离水面以后，可以看到玻璃片朝下的一面沾有薄薄的一层水。这一点说明，玻璃片脱离水面时使两层水发生了分裂，而使玻璃片离开水面所用的力，就是用来克服两层水分子间的吸引力。

图1·3 在液体层之间有吸引力

在不同的物质中，分子间的吸引力大小是不同的。大家知道，铜丝比钢丝容易折断，水比水银容易分割。

上面我们所讨论的都是同一种物质分子间的吸引力。实际上，不同物质的分子间也存在着吸引力。在上述实验中，玻璃片朝下的一面沾有薄薄的一层水就说明了水分子和玻璃分子间是存在着吸引力的。平时我们用胶水或浆糊来粘贴东西，用锡来焊接金属器件，也都是利用不同物质分子间的吸引力。因此，分子的吸引力可以分为两种：同一种物质分子间的吸引力，叫做内聚力；不同物质分子间的吸引力，叫做附着力。

固体不仅不容易折断和伸长，而且很难被压缩。液体同样也是很难被压缩的。因此，我们很自然地就会想象到，物体分子间不仅存在着吸引力，同时还存在着排斥力。

初看起来，这一点好象很难理解：分子间既然存在着吸引力，怎么又会有排斥力呢？利用下面的简单模型可以帮助我们理解分子间的相互作用情形。图1·4中的两个小球代表两个分子，小球用弹簧和橡皮带连接起来，弹簧是受压缩的，而橡皮带是受拉伸

的。彈簧的斥力和橡皮帶的拉力平衡時，兩個小球相隔一定的距離，這相當於固體和液體

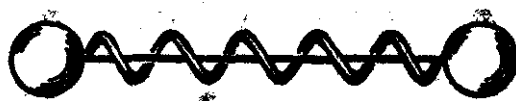


圖 1·4 分子間相互作用的模型

不受外力的壓縮或拉伸時分子間相互作用的情況。如果受到外力的壓縮，那麼小球間的距離將縮短，這時彈簧的斥力超過橡皮帶的拉力，因此小球之間的相互作用力是斥力；如果受到外力的拉伸，那麼小球間的距離將增加，這時橡皮帶的拉力超過彈簧的斥力，因此小球間的相互作用力是吸引力。

但是，我們必須注意，這個簡單的模型只是象徵地用來使我們初步了解分子間的相互作用，實際上分子間並不存在什麼彈簧和橡皮帶。

實驗和理論一致表明，分子間既存在着吸引作用，也存在着推斥作用，當分子間的距離等於某一數值時（此數值隨分子的不同而略有差異），它們之間的引力和斥力恰好平衡；當分子間的距離稍大於這一數值時，它們的相互作用表現為吸引力；稍小於這一數值時，它們的相互作用表現為斥力。

根據研究知道，兩個分子間的距離小於幾個埃（1 埃 = 10^{-8} 厘米）的時候，它們之間的作用是相互排斥；當兩個分子間的距離大於幾個埃而小於分子作用球半徑的時候，它們之間的作用是相互吸引。

由於分子間相互作用的現象十分複雜，不可能在這裡進行詳細的討論，我們只要知道它是起源於物質的電性結構就夠了。

以上我們討論了固體和液體中分子間的相互作用，最後，我們來討論一下氣體中的情況。

氣體的密度比固體和液體要小得多。例如，在 100°C 和 1 個大氣壓時的水蒸氣的密度大約只有在同樣條件下水的密度的 $1/1670$ 。所以，氣體中分子間的距離比固體和液體中大得多。因此，氣體分子間的作用力很小，在一般情況下可以略去不計，而認

为气体的分子間是完全沒有任何联系的。这就是气体既沒有一定的体积又沒有一定的形状的原因。

习 題 1.4

1. 什么叫做內聚力？什么叫做附着力？举例說明它們的作用。
2. 固体和液体都很难被压縮，气体压縮到一定程度时也很难繼續压縮，試說明其原因。
3. 用粉笔在黑板上写字和用鉛笔在紙上画图时，各留下字和图的痕迹，試問这是由于什么力的作用？
4. 說出下列各个数值的数量級： 6.023×10^{23} ， 2.7×10^{19} ，水分子的直徑 4×10^{-8} 厘米，氫分子的质量 3.3×10^{-24} 克。
5. 什么叫做“分子作用球”？它的半徑的数量級是多少？
6. 橫截面是 1 厘米²的鉛棒，受到 160 公斤力的作用时被拉断；橫截面相同的鋼棒，受到 14,000 公斤力的作用时才被拉断。这两种物质分子間的吸引力那一个大？
7. 既然木材的分子間存在着相互吸引力，那么，为什么折断的鉛笔不能合而为一？
8. 为什么拉断一張紙所用的力要比撕开一張紙大？
9. 汽車开过干燥的道路时会揚起灰尘，而开过潮湿的道路时就沒有灰尘，試說明其原因。

§ 1.5 气体、液体和固体中的扩散現象

現在我們来研究这样一个問題：当物体本身不作机械运动时，組成物体的分子是靜止不动的呢？还是在作相对运动的呢？

下面的几个实验使我們确信組成一切物质的分子都在不停地作无規則运动。

在一个玻璃圓筒的底面上滴上几滴溴，用玻璃片盖住筒口。这时可以看到褐色的溴蒸汽开始緩慢地上升，并且向四面弥散。我們知道，溴的蒸汽比空气重，而較重的溴汽不需要任何外力作用就能够自发地上升，渗入空气中。这一現象說明，气态物质的分子

是向四面八方运动的,其中也有克服重力向上运动的分子。

两种不同的物质相互接触时自发地相互掺混的现象叫做扩散。

气体的扩散是一种最常见的现象, § 1.1 中所举的几个例子也都是气体的扩散现象。

在液体中也存在着扩散现象。在高的玻璃圆筒里先灌入一半水,然后把一根长的玻璃管接在漏斗下面,使管的下端触到筒底,慢慢地往管里注入硫酸铜溶液,开始时无色的水和蓝色的硫酸铜溶液的界面非常清楚(图 1.5)。把玻璃圆筒放在稳固的桌子上,不要使它受到震动。圆筒虽然处于静止状态,但是经过一定的时间后,界面上的水就逐渐变蓝,而界面下的溶液的颜色就逐渐变淡,并且界面逐渐模糊起来;经过较长的时间后,这种颜色的变化便由界面开始不断地扩大;再经过一段很长的时间以后,圆筒内的全部液体就变成颜色均匀的混合液体,这时界面也完全消失了。这一现象说明,较重的液体分子会自动地向上迁移,而较轻的液体分子会自动移向下部。

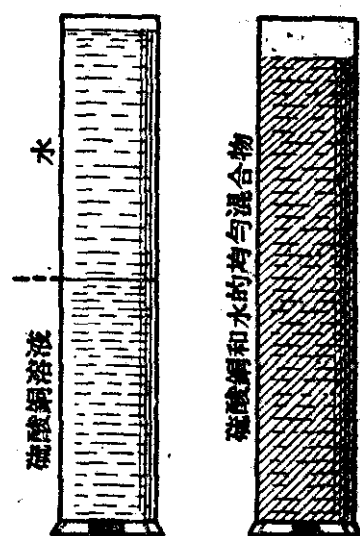


图 1.5 液体的扩散现象

我们不但可以发现液体之间和气体之间存在着扩散现象,同样地还能够发现固体之间存在着扩散现象。曾经作过这样的实验,把一块铅和一块金磨光后紧压在一起,在普通室温(约 20°C)下放置四、五年,结果金和铅就连接在一起了,它们互相渗入 0.5~1 厘米深。大家知道,在室温下,金和铅是不会熔解的;因此,在这个实验里,它们之所以在接触处形成一层均匀的合金,显然是由于这两种金属分子扩散的结果。

扩散现象是物质分子运动的直接证明。由于相互接触的物体的分子是在无规则地运动着,所以,这些分子自然就会越过物体的

接触面而彼此渗入，形成扩散现象。

由实验知道，随着参加扩散的物质的温度升高，扩散也将加快。这是因为温度升高时，分子无规则运动的速度增大，因而扩散也随着加快。

在自然界中扩散现象起着很大的作用。它使地球表面附近的大气保持相同的成分。土壤内所含有的各种盐类溶液通过扩散现象能够迅速地促进植物的生长。

习 题 1.5

1. 举一些气态物质扩散的例子。扩散的快慢跟温度有什么关系？试说明理由。

2. 在长期放煤的墙角落处，地面和墙角相当厚的一层染上了黑色，说明这种现象。

3. 有同样的两只玻璃杯，一只盛着冷水，另一只盛着热水，在两个杯子的水中同时滴下一滴墨水，试比较两个杯子中水和墨水掺和的快慢，并说明引起这种差别的原因。

4. 放一些粗粒食盐到一杯水里，食盐就沉到水底，并开始溶解。食盐溶液的比重大于水的比重，可是过了一段时间，整杯的水都变成了咸的。这是什么缘故？

5. 咸鱼放在水里泡一段时间后，就会淡一些，这是什么原因？

6. 为什么菜要腌好几天才有咸味，而煮时，只要十几分钟菜就有咸味了？

§1.6 布朗运动

英国科学家布朗在 1827 年所发现的现象直接证明了物体内部的分子是在进行着无规则的运动，这种运动是自发的和永不停息的。因为即使用放大倍数很高的显微镜也看不到分子，所以分子的运动不可能直接观察到。但是，通过间接的观察，可以确信分子是在不断地运动着。

把一种非常小的物质颗粒（例如花粉）放在不能溶解这种物质的液体（如水）里，再放在 600 倍以上的显微镜下面来观察（图

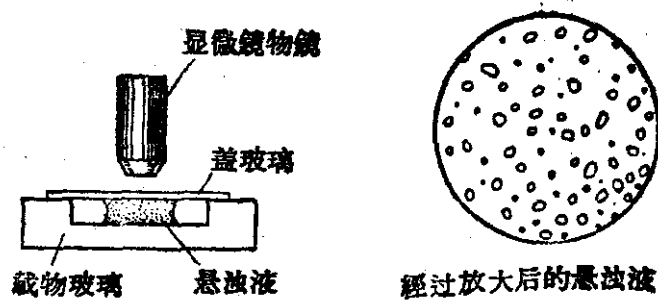


图 1.6 观察布朗运动的装置的示意图(左);
右面是在显微镜里看到的运动中的微粒

1.6). 当玻璃上的液体处于完全静止的时候, 我們通过显微镜可以看到这些小颗粒是在不停地运动着. 每一个小颗粒的运动方向和速度的大小都改变得很快. 如果我們注意其中的某一个颗粒, 那么就可以看到它好象在某种突然的推动下跳动, 又好象碰到了什么而突然暂时停止; 就这样, 不断地作短促的跳跃. 如果比較两个小颗粒的运动情况, 我們会发现它们的运动軌迹間没有什么共同之点. 因此, 这些小颗粒的运动是紊乱的和沒有規則的. 颗粒越小, 它的运动也就越激烈. 这种运动就叫做布朗运动.

要观察布朗运动, 必須把足够小的固体颗粒攪和在液体中. 例如, 把一小滴墨汁滴入水中, 使它变得很淡, 取一滴这样的液体放在放大倍数为 800 到 1000 倍的显微镜下面来观察, 就可以看到布朗运动.

悬浮在静止气体中的灰尘、烟雾等也是在作布朗运动.

从观察的结果知道, 布朗运动是永远不会停止的. 如果把含有固体小颗粒的溶液放在封閉的浅皿里, 那么, 不論是白天还是黑夜, 冬天还是夏天, 我們总可以看到布朗运动. 如果我們連續地观察好几天、好几个月甚至好几年, 也决不会看到小颗粒的运动停止. 液体的温度越高, 布朗运动也就进行得越激烈.

起初, 大家认为这种运动是由于外界的影响(例如振动, 流体的流动)而引起的, 但是后来在尽量避免一切外界干扰的情形下作多次精确的实验后指出, 布朗运动仍然存在.

那么产生布朗运动的原因究竟是什么呢？

每一个作布朗运动的小颗粒是具有一定的质量的，它的运动服从力学定律。因此，它的不断跳跃说明了一定有其他的物体对它作用。

在显微镜下看起来是透明、均匀和连成一片的，似乎是完全静止不动的液体，实际上是由许许多多不规则运动着的分子组成的。分子的大小只有作布朗运动的小颗粒大小的几千分之一。分子在运动时跟小颗粒相互碰撞，每一个小颗粒同时受到来自四面八方的许多分子的碰撞；但是因为分子的运动是紊乱的，所以它们对小颗粒的碰撞并不是完全彼此平衡的。有时小颗粒在某一方向受到的碰撞多一些，小颗粒就向这个方向运动。有时在另一方向受到的碰撞多一些，小颗粒又向新的方向运动。结果小颗粒也就这样地作无规则的运动。

图 1.7 是作布朗运动小颗粒的位移图线。图中画出了小颗粒每隔 30 秒钟所在的位置，然后用直线依次把这些位置连接起来。因此，图中的每一段小直线是作布朗运动的小颗粒在 30 秒钟内的

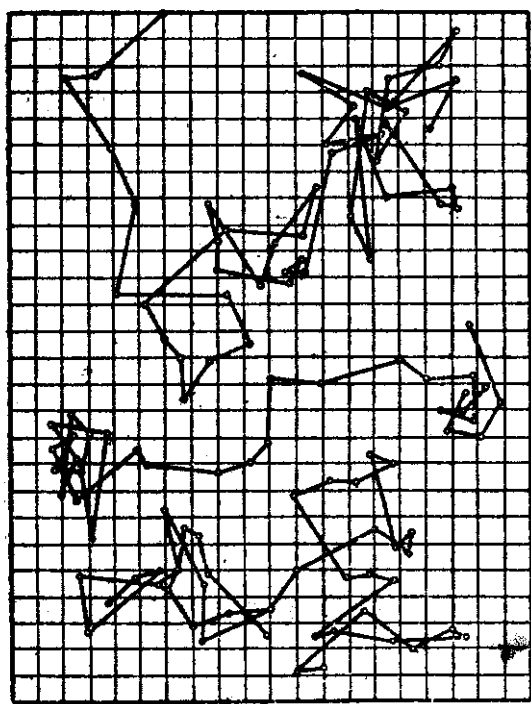


图 1.7 作布朗运动的小颗粒的位移图线

位移，但并不是小颗粒运动的轨迹。实际上，如果时间间隔取得更短（例如每隔 3 秒钟），那么每一段直线将被更复杂的折线所代替。

从图 1.7 中可以看出：(1) 各个小颗粒的运动情况是不相同的；(2) 同一个小颗粒在相等的时间内所经过的位移是不相等的。这一点说明，分子的运动是极不规则的。

由此可见，产生布朗运动

的唯一原因是小顆粒所在的那个媒质(液体)分子始終不停的紊乱运动。

如果把較大的顆粒放入液体中，它虽然也要受到液体分子的碰撞，但是，由于顆粒較大，它在任一瞬时所受到的来自各个方向的碰撞次数就較多，而各个方向上的碰撞次数相差无几，基本上相等，于是液体分子对顆粒的作用几乎相互抵消，因此就不能产生布朗运动。

实验告訴我們，液体的温度越高，放入其中的小顆粒的布朗运动就越激烈。但是布朗运动是液体分子无規則运动的結果。由此，我們可以推想到，温度越高，液体分子运动的速度就越大。

我們應該明了，作布朗运动的顆粒虽然很小，但它并不是单一的分子，每一个小顆粒都含有千百万个分子；因此，小顆粒的布朗运动只是間接地揭露了分子的运动，而并不就是分子的运动。个别分子的运动我們是看不見的。

通过扩散現象和布朗运动的討論，我們完全可以确信，不論气体、液体和固体的分子都是在不停地和无規則地运动着。

扩散現象和布朗运动还間接地証實了分子間存在着空隙。事实上，如果物体的分子是紧密地靠在一起的，那么，分子只能作轉动，而不能自由地从一个地方移到另一个地方去。这样，就既不可能有扩散現象，也不可能有什么布朗运动了。

习 題 1.6

1. 布朗运动是怎样产生的？布朗运动的剧烈程度跟温度有什么关系？試說明其理由。

2. 为什么說，布朗运动間接地显示了物质分子处于自发的和永恒的混乱运动中？

3. 作布朗运动微粒的直徑約为 10^{-3} 毫米，如果微粒过大，就不会显示布朗运动，这是什么道理？

4. 为什么悬浮在液体中的顆粒越小，它的布朗运动就越显著？

§1.7 热运动. 温度

前面已經提到,随着温度的升高,扩散的速度或布朗运动的激烈程度便会增加.这表示,物体的温度和分子无規則运动的速度有关.增加物体的温度,就是增加分子运动的速度.反过来说,如果我们用某种方法来增加分子无規則运动的速度,那么,物体的温度就要上升.

热水和冷水是由相同的分子組成的,它們之間的区别只是分子运动的速度不同.可見,分子运动的速度决定了物体的热状态,所以我们把气体、液体和固体里分子的无規則运动叫做热运动.

物体里的所有分子都参加热运动,但是这些分子的运动速度并不是完全相同的,因此它們的动能也不都相等.物体分子运动速度的平均值,叫做分子的平均速度.分子动能的平均值,叫做分子的平均动能.

研究分子运动論后我們知道,物体的温度与分子的平均动能有密切关系.分子的平均动能越大,物体的温度就越高;分子的平均动能越小,物体的温度也就越低.

因此,从分子运动論的观点来看,温度是分子平均动能的标志.温度的升高或降低,标志着分子平均动能的增大或减小.

如果一种气体的分子平均动能和另一种气体的分子平均动能相等,那么,这两种气体的温度就相同.从另一方面来看,如果有一瓶由几种气体組成的混合物,例如空气,那么,当混合物各部分的温度均衡时,組成混合物的各种气体分子的平均动能是相等的.

在一定的温度下,物质分子的平均动能也是一定的,而和物质所处的聚集态^①无关.例如,0°C的冰分子的平均动能和0°C的水分子的平均动能是相等的;100°C的水分子的平均动能和100°C

^① “聚集状态”的簡称,亦称“集态”或“物态”,指物质分子集合的状态.通常有三种,即气态、液态和固态,合称为“物质三态”.

的水蒸汽分子的平均动能也是相等的。

习 题 1.7

1. 什么叫做热运动? 物体温度的高低决定于什么?
2. 0°C 的冰和 0°C 的水, 它们分子的平均动能哪一个比较大? 为什么?
3. 0°C 的铁和 0°C 的冰, 它们分子的平均动能是否相等? 它们分子的平均速度是否相等?
4. 试比较 0°C 时氢分子和氧分子的动能。已知 0°C 时氢分子的速度是 1840 米/秒, 氧分子的速度是 460 米/秒; 两者的质量之比为 1:16。

[提示: 应用动能公式 $E_{\text{动}} = \frac{1}{2}mv^2$.]

§ 1.8 气体、液体和固体中分子的热运动

气体、液体和固体中分子热运动的共同点是: 分子运动都是永不停止和无规则的。但是, 由于在气体、液体和固体中分子间的相互作用力不相同, 因此, 分子运动又各有自己的特点。

气体中分子间的距离很大, 相互作用力是微不足道的, 因而我们可以认为气体分子除了跟器壁或其他分子碰撞以外不受任何力的作用(可以不考虑重力的作用)。如果在某一时刻有一个气体分子正在朝某一方向运动, 那么, 它将一直朝这一方向作匀速运动, 只有当它和器壁或其他分子碰撞时, 才改变它运动的方向和速度的大小。由于气体分子的这种运动方式, 才使气体总是充满它能够达到的全部空间。

实验结果表明, 气体分子运动的速度是很大的, 一般达到每秒几百米, 这一点初看起来似乎令人感到奇怪。而且一定有人会问, 既然气体分子运动的速度是这样的快, 为什么香气的扩散并不是在瞬时就完成了的呢? 这是因为气体分子在运动中要跟大量的其他气体分子相碰撞, (在标准状况下, 1 厘米³ 的气体中有 2.7×10^{19} 个分子!) 从而不断地改变自己的运动速度(快慢和方向)。因此, 它

們一忽儿向这一方向运动,一忽儿又向另一方向运动;尽管在两次碰撞之間运动速度很大,可是它們在任何一个确定方向上的前进总是很慢的。

液体中分子間的距离比較小,相互作用力是相当大的,因而液体的分子就不能象气体的分子那样自由地作直綫运动。研究指出,每一个液体分子在周圍分子的作用下,能够作沒有一定方向和沒有一定周期的无規則振动,也能够其他分子間作移动。正是因为液体分子間可以相互移动,因此,液体和气体一样具有流动性。

固体中分子間的距离更小,相互作用力也就比液体中还要大,因而固体中的絕大多数分子都处于一定的位置,这些位置叫做平衡位置。分子只能在平衡位置附近作沒有一定方向和沒有一定周期的无規則振动。只有极少数动能特別大的分子,才能在其他分子間作无規則的移动。

由此可見,气体、液体和固体中分子热运动的特征有着很大的差别,就分子热运动的特征来看,液体介于气体和固体之間。

分子热运动的特征决定了分子的分布情况。在气体中,分子的分布是完全无規則的;在固体中,分子在整个体积中都排列得很有規則;液体的分子既不象气体分子那样完全无規則地分布,又不象固体分子那样按严格的規則排列,而只是在很小的範圍內保持有規則的排列。

本章提要

1. 分子运动論 用物质分子的运动和分子間的相互作用来解釋物质性质的学說叫做分子运动論。

2. 分子运动論的要点

(1) 自然界的一切物体都是由大量分子組成的。某种物质的分子,是具有这种物质特性的最小微粒。可以把分子看做是彈性小球,一般分子直徑的数量級为 10^{-8} 厘米。一切分子都处于永不停止的无規則运动中,所以分子本身都具有动能。扩散現象和布朗运动显示了分子运动的特征。

(2) 組成物质的分子間有一定的距离，气态物质分子間的距离最大，所以气体最容易压缩。液态和固态物质分子間的距离比較小，所以液体和固体不容易压缩。

(3) 分子間有相互作用力，这种力有时表现为引力，有时表现为斥力。当分子間的距离等于或小于分子作用球的半径时，分子間的作用才显著表现出来，分子作用球半径的数量級为 10^{-7} 厘米。

(4) 大量分子的混乱运动叫做热运动。分子热运动的平均动能决定了物体的温度。温度升高就标志着分子热运动平均动能的增加，温度降低就表示分子热运动平均动能的减少。

3. 气体、液体和固体中分子运动的特征 分子的无規則运动有使分子向四处扩散的趋势，而分子間的吸引力則倾向于使分子相互靠攏，使它們聚集在尽可能小的体积里。这两种相反的倾向同时起着作用，决定了物质的各种性质，主要表现在处于不同的聚集态。

在气体中，分子向四处扩散的倾向占主要地位。分子間的相互作用力在一般情况下可以不加考虑。气体中的扩散現象进行得最快。

在液体中，分子間的相互作用力已經占有相当重要的地位，分子聚集得相当紧密，所以液体具有一定的体积。液体中的分子除了作无規則的振动以外，还可以在其他分子間移动，所以液体又具有流动性。液体中的扩散进行得比固体中快，但比气体中慢。

在固体中，分子間的相互作用力占主要地位，这种作用力不仅使固体具有一定的体积，而且使固体具有一定的形状。固体中除了极少数动能特別大的分子能在其他分子間作无規則的移动外，絕大多数的分子只能在平衡位置附近作无規則的振动，所以在固体中，扩散进行得十分緩慢。

复 习 題 一

1. 为什么盐在热水中比在冷水中溶解得快？
2. 腌蔬菜、魚、肉是利用哪一种分子現象？
3. 在气球里一般充以氫气，为什么經過一段時間后球就不能在空气中上升？
4. 1 克鋁含有多少个分子，已知鋁的分子量为 26.98。
5. 1 厘米³的水里有多少个分子？
6. 在 10 米深、面积是 10 公里²的湖里，投入 1 克的盐。如果盐均匀地溶解在湖水里，那么每厘米³的水里有多少个盐分子？

7. 假使1克水在1昼夜中全部蒸发完, 求平均每秒内由水面逸走的分子数.

8. 氧分子的直径约为 3×10^{-8} 厘米, 如果把1毫克氧气中含有的分子一个紧挨一个地排列成一直线, 那会有多长? 这个长度等于从地球到月亮距离(约 3.8×10^5 公里)的多少倍?

9. 计算一个硫酸分子(H_2SO_4)、一个氢氧化钠分子($NaOH$) 和一个硝酸银分子($AgNO_3$)的质量.

第二章 热 和 功

“热和功”是物理学的一个重要部分，它是研究物态变化（如熔解、汽化等）和热力工程的理论基础。本章除了引入一些在今后学习中将得到广泛应用的有关热和功的基本概念，如内能、热量、热功当量等以外，还对能的相互转变和能量守恒定律作了较为详尽的介绍。

在学习本章之前，最好先复习一下第一册“机械能”一章中“功”和“能量”的概念，同时回忆一下下面的几个问题：

(1) 什么叫做机械能？机械能有哪几种？它们各决定于哪些因素？它们的数学表达式是怎样的？式中各个符号的物理意义又是怎样的？

(2) 如果采用厘米·克·秒制，式中各物理量应该用什么单位？如果用米·公斤·秒制，式中各物理量的单位又是什么？

(3) 功和能量为什么可以用同一单位来表示？怎样进行不同单位之间的换算？

(4) 外力对物体做功时，物体的机械能发生怎样的改变？物体克服阻力做功时，物体的机械能又将发生怎样的改变？

(5) 在什么情况下物体的机械能才是守恒的？

§ 2.1 分子的动能和势能. 物体的内能

1. 分子的动能 学习机械能一章后，我们知道，一切运动着的物体都具有动能。动能的大小决定于物体的质量和它的运动速度。质量越大，速度越快，它的动能也就越大。分子运动论的研究

告訴我們，組成物體的分子都在不停地作無規則運動，因此，一切分子也都具有動能。

分子作無規則運動所具有的動能，叫做分子的動能。

因為各個分子的運動速度一般說來是不同的，所以分子的動能也各不相同，而它們的平均值，就叫做分子平均動能。

在前一章中我們已經講過，物體的溫度是大量分子熱運動劇烈程度的表征；分子熱運動越劇烈，物體的溫度就越高。也就是說，分子平均動能大，物體的溫度就高；分子平均動能小，溫度就低。反過來說：物體的溫度越高，分子平均動能就越大；物體的溫度越低，分子平均動能也就越小。因此，從分子運動論的觀點來看，溫度是分子平均動能的標志。溫度的升高或降低，標志着分子平均動能的增加或減少。

我們知道，物體的動能是一種機械能，它只跟物體的機械運動有關，而跟物體內部分子的無規則運動無關。所以分子動能和整個物體的動能是完全不同的兩回事，千萬不要把它們混為一談。

舉一個例來說，靜止在地面上的足球，我們說它沒有動能，因為相對於地面來講，它沒有機械運動。可是組成足球的分子依然具有動能，因為它們都在永不停息地作無規則運動。當足球開始運動的時候，除了分子的動能以外，整個足球由於它的機械運動也有了動能。

2. 分子的勢能 我們知道，地面上的物體，由於它跟地球相互作用而具有勢能。在舉起物體的時候，克服重力做功，物體的勢能增加；相反地，當物體下落時，重力做功，物體的勢能減少。拉長或壓縮彈簧時，都要反抗彈力做功，使彈簧各部分之間的相對位置發生變化，增加了彈簧的勢能。

實際上，除了地面上的物體具有重力勢能，發生形變的彈簧具有彈性勢能外，一切相互作用的物體也都具有由它們的相對位置或物體內部各部分之間的相對位置所決定的勢能。如果物體之間

的相互作用力是引力,那么,当它们的距离增大时,必须反抗引力做功,使物体的势能增加;在距离缩小时,引力做功,势能减小.如果物体之间的相互作用力是斥力,则情况恰好相反,在距离增大时,物体的势能减少;在距离缩小时,物体的势能增加.

在前一章中我们已经讲过,分子间也存在着相互作用力,并且随着距离的不同,有时表现为引力,有时表现为斥力.因此,分子也具有由它们的相对位置所决定的势能.

由于分子间的相互作用而具有的势能,叫做分子的势能.

3. 物体的内能 物体分子无规则运动的动能和由分子间相对位置所决定的势能的总和,叫做物体的内能.

一切物体都是由相互作用着的而且不断运动着的分子构成的,所以任何物体都具有内能.

物体在具有内能的同时,也可以具有别种形式的能量.例如,正在围绕地球运行的卫星,除了内能以外,还有机械能,那就是卫星的动能、卫星跟地球及其他星球之间相互作用的势能.

由于一切物体都具有内能,所以内能是一个极为重要的概念.内能是同物体内部状态有关的能量,它取决于分子的运动情况和分子间的相对位置.不论物体本身的位置和运动速度怎样,它都具有内能,也就是除了跟物体的速度和物体间的相对位置有关的机械能(动能和势能)外,物体还具有跟内部状态有关的内能.

我们已经知道,物体的动能和势能都跟它的质量有关,那么物体内能的大小,究竟跟哪些因素有关呢?它同物体质量的关系究竟是怎样的呢?

从上面的叙述中可以明了,物体内能的大小跟分子的数目有关.物体的质量越大,也就是分子数目越多,它的内能也越大.内能中的分子动能还跟物体的温度有关,温度越高,物体的内能也越大.此外,物体的内能还跟它的聚集态(固态、液态或气态)以及物体是整块的还是分散(变成粉末、碎片等)的状态有关.

从能量的观点来看,研究热现象时,我们只限于讨论物体的内能部分,也就是只讨论跟分子的无规则运动有关的动能和跟分子之间相对位置有关的势能。

对于气体来说,内能基本上只有分子的动能;内能的变化实际上也就是分子动能的变化。因为气体分子间的距离很大,相互作用力极小,所以分子间相互作用的势能和分子势能的变化,都可以不加考虑。

在固体和液体中,分子间的相互作用力相当大,分子间距离的改变会使分子的势能发生显著的变化。所以对于固体和液体来说,考虑内能的变化时,必须同时考虑分子无规则运动的动能的变化和分子间相互作用的势能的变化。

§ 2.2 物体内能的改变

我们主要讨论物体由一个状态^①过渡到另一个状态时由于物体内部分状态的变化所引起的内能的变化,而不去追究物体内能的绝对值或内能的总数量。和研究机械能一样,具有实际意义的只是内能变化的多少。

物体的内能,在哪些情况下才发生变化呢?

温度升高时,物体的内能随之而增加,这是因为一方面分子动能在增加,另一方面一般物体受热时体积开始膨胀,使分子间的距离变大,于是分子势能也就增加。相反,温度降低时,物体的内能也随之而减少,这是因为一方面分子动能在减少,另一方面一般物体冷却时体积开始缩小,使分子间的距离变小,于是分子势能也就减少。

把整块物体分裂成粉末或碎片的现象叫做物体的分散,它是

^① 物体的状态是指它所处的情况。物体的状态由一组物理量来确定,例如物体的机械运动状态是指它的位置和速度;一定质量气体的热学状态由它的温度、压强、体积这三个物理量中的任意两个量来确定;物体的状态也指它的聚集态(固态、液态、气态)是整块的还是分散的。

物体状态变化中一种很重要的概念。例如，水从喷雾器中喷出；用粉笔在黑板上写字；用铅笔在纸上绘图；把麦子放在磨盘里磨成面粉；车刀从加工件上切削下金属碎屑等都是分散的例子。物体分散时，分子间的平均距离有了增加，这就需要克服分子间的引力做功。所以分子相互作用的势能就要增加。

物态变化也伴随有物体内能的变化。在熔解、蒸发、沸腾等过程中，物体的内能增加；相反地，在凝固、液化等过程中，物体的内能减少。

通过怎样的物理过程才可以改变物体的内能呢？我们现在就来讨论这个问题。

物体内能改变的第一种方式——做功。大家都熟悉，当运动物体克服摩擦力或媒质阻力做功时，物体总是要变热，甚至从一种物态转变为另一种物态。例如：刹车时，制动部分要变热；锯木时，锯条和被锯的木块要变热；进行切削加工时，车刀和金属碎屑要变热；用锤子多次锤击金属块后，锤子和金属块都要变热；反复弯折金属线后，弯折的地方要变热；摩擦冰块可以使它熔解等等。

在上述例子中，物体的内部状态发生了变化，如温度有了升高，或者是固体变成了液体，总的说来是物体的内能有了增加。这种变化是克服摩擦力做功的结果，使机械能转变为物体的内能。

下面我们做两个简单的实验来进一步说明通过做功可以改变物体的内能。

【实验一】 在一个薄铜管里装上大约一半的乙醚，用软木塞盖紧，把铜管固定在底座上(图 2·1)，用牢固的软绳在管子上绕一圈，再用两只手很快地牵动绳子，让绳子跟管子摩擦，于是管子就渐渐变热，最后管子里的乙醚开始沸腾，而产生的蒸汽会把塞子冲开。这是因为我们克服摩擦力做了功，使管子和乙醚的温度升高，内能增加。

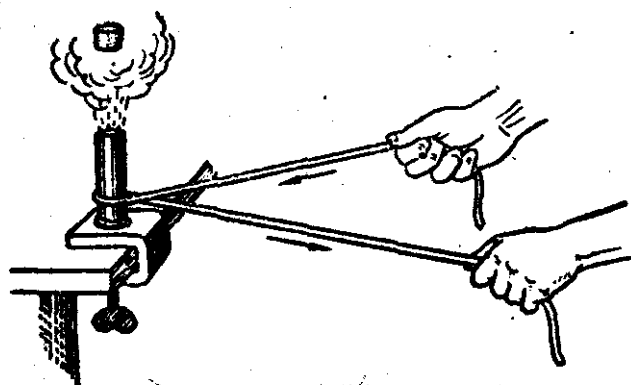


图 2.1 做功增加了内能

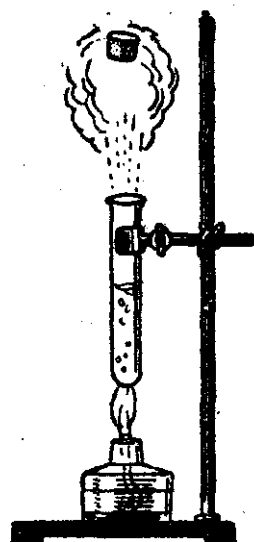


图 2.2 蒸汽做功后内能减少

【实验二】 在试管里注入少量的水，用软木塞盖紧。加热后使水达到沸腾状态，于是蒸汽会把塞子冲开，使塞子获得了动能。蒸汽做功后温度降低，内能减少(图 2.2)。

物体内能改变的第二种方式——热传递。我们不当认为，只有在做功时内能才会发生变化。例如用熨斗熨衣服时，衣服的温度升高，内能增加，同时熨斗的温度降低，内能减少。这时，衣服内能的增加是由于熨斗内能的直接减少，而不是由于做功的缘故。这种过程叫做热传递。不仅相互接触的物体之间会发生热传递(如上例中的熨斗和衣服)，而且在相隔一段距离的物体之间也会发生热传递(如炉子和它周围的物体之间，太阳和地面物体之间)。

应该注意，在热传递过程中，物体的温度并不一定发生变化。例如，当冰熔化成水时，热传递只改变物体的聚集态(由固态的冰变成液态的水)，它的温度保持不变。

为了要量度热传递过程中物体内能的改变，我们引入热量的概念。

在热传递过程中物体内能改变的多少，叫做热量。当我们说“物体获得或放出多少热量”的时候，我们的意思就是说“由于热传递的结果，物体增加或减少了多少内能”。

由此可見，能够改变物体内能的物理过程有两种：做功和热传递，当然也可能有这两种方式同时起作用的情形，例如对铁块加热，同时用锤打击它。

物体内能的增加表示它从别的物体那儿得到了一定数量的能量，物体内能的减少表示它把自己的一部分能量传给了别的物体。

物体内能的变化如果是由于做功的结果，那么内能变化的多少可以用功的数量来量度；如果不是由于做功，而是由于热传递的结果，那么内能变化的多少就不能用功，而必须用热量来量度。

下面的例子进一步说明了做功和热传递使物体内能发生改变的等效性。

(1) 金属块用锤子打击时会变热，这是由于做功的结果。不做功而把金属块和高温物体相接触，金属块同样也会变热。

(2) 当开动蒸汽机时，汽缸里的蒸汽由于做功而开始冷却。但是，如果将汽缸的活塞固定，再把汽缸放在冷水里，这时蒸汽虽然没有做功，它的温度也会降低。

不难想象，也有一些内能变化的过程，只有对物体做功才能完成，例如把整块物体变成粉末、碎屑，切削或磨光工件，拉伸或轧制金属等。

和处于重力场中某一位置的物体只可能具有一个完全确定的势能值，以及处于某一运动速度的物体只可能具有一个完全确定的动能值一样，处于一定状态的物体，也只可能具有一个完全确定的内能值。如果物体在一定的状态下同时具有不同的内能值 U_1 和 U_2 ，那么我们可以从物体中取出能量差值 $U_1 - U_2$ 而保持物体的状态不变。于是，我们就可以在物体本身不发生任何变化的情况下，用它作为做功的能源。显然这是直接违反能量守恒定律的，所以也是绝对不可能的。

读者还应该了解，分子物理学所研究的现象，只与分子的无规则运动和分子之间的相对位置有关，而不考虑分子内部所发生的变化，它们将在电学、光学和原子结构各部分中进行讨论。实际上，在一般温度下所进行的物理过程中，分子内部的变化是可以忽视的。

通过討論，我們知道了物体由一个状态轉变到另一状态时內能变化的情况。但是我們並沒有涉及物体內能的总的数量是多少的問題。这一問題沒有多大意义，因为和势能一样，我們所感兴趣的只是它的变化而已。

习 題 2·2

1. 什么叫做物体的內能？它的組成部分是哪一些？
2. 比較物体的机械能和它的內能。
3. 物体內能的大小跟哪些因素有关？关系怎样？
4. 质量相同而温度不同的水，哪一种具有較大的內能？温度相同而质量不同的两杯水，那一杯水具有更大的內能？质量相同温度也相同的一块冰和一杯水，那一个具有較大的內能？（回答时要說明理由。）
5. 使物体內能发生变化的方式有哪几种？举例說明。
6. 根据內能的变化來說明“摩擦生热”和“钻木取火”的物理意义。
7. 质量相等、温度相同的鉄块和鉄屑，哪一个具有更多的內能？为什么？
8. 1克水和1克蒸汽，温度都是 100°C ，哪一个具有更大的分子势能？哪一个具有更大的分子动能？哪一个具有更大的內能？为什么？
[提示：1克蒸汽的体积約为1克水的1600倍。]
9. 为什么說，气体的內能就是指分子无規則运动的动能？气体內能的改变也就是分子热运动动能的改变？对于液体和固体，这种說法是否也适用？說明道理。

§ 2·3 热傳递的三种方式

从 § 2·2 的学习中，我們已經知道，物体內能的改变，可以通过做功和热傳递两种方式来完成。在第一册中已經詳細地讲过功的概念，現在我們来討論热傳递的几种方式，以及它們在自然界中的作用和在工程技术上的一些应用。

在上一节中已經指出，热傳递实质上就是內能的傳递。

一般地讲，如果一个物体的温度升高，我們就說它得到了某些內能；温度降低，我們就說它失去了某些內能。一个物体內能的减

少引起别的物体内能的增加，于是我们就说内能从前一个物体传递到后一个物体上去了。

在日常生活中，我们可以经常遇到一些有关内能从一个物体传递给其他物体的现象。

例如，放在热汤里的金属调羹，从热汤里获得了内能，因而温度升高了。放在火炉上的水壶里的水从正在燃着的燃料中不断地得到内能；如果把水壶从火炉上取下，放在地上，它就逐渐冷下来，这时水的一部分内能就传给了周围的物体（空气等）。

这些例子说明，当冷热程度不同的物体放在一起时，温度高的物体放出内能，温度降低；而温度低的物体得到内能，温度升高。

内能不仅可以从一个物体传递给另一个物体，而且也能在同一物体的不同部分之间进行传递。例如，把铁棒的一端放在火上，另一端就会逐渐地变热而发烫。

内能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到同一物体邻近部分的过程，叫做热传递。

实验指出，内能永远自发地从温度高的物体向温度低的物体传递。在其他条件都相同的情况下，两个物体的温度相差越大，内能的传递也就进行得越快。当冷热程度不同的物体相互接触时，热传递要进行到它们的温度相等时才会停止，也就是说这些物体达到了热平衡。同样地，如果一个物体的不同部分的温度有差别，热传递在物体内部也要进行到各处的温度完全一致才停止。

热传递的方式有三种：对流、传导和辐射。我们就分别来加以叙述。

1. 对流 把手放在火炉上或者点燃着的煤油灯上，我们立刻就会感到有温暖的气流上升。同样，装在煤油灯玻璃罩上方的小风轮，因为受到上升热空气的推动而旋转起来（图 2·3）。挂在火炉上面的手帕，由于上升气流的影响而飘动起来。

为什么会发生这些现象呢？这是因为火炉和煤油灯附近的空

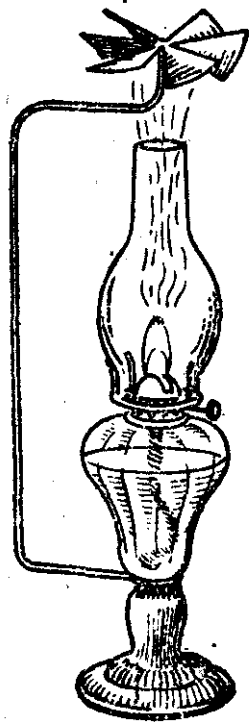


图 2·3 煤油灯上方的气流

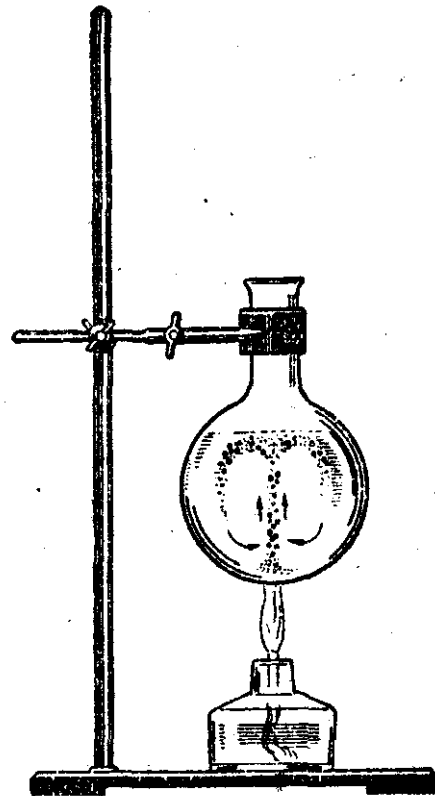


图 2·4 液体受热时发生运动

气, 受热后开始膨胀, 结果使密度变小而上升; 周围冷空气的密度大, 就下降。于是形成了空气的流动。

对液体进行加热时, 也可以看到这种现象。

液体的较热部分密度较小, 所以上升; 而冷的液体密度较大, 所以下降, 来填补上升液体原来的位置。冷的液体受热以后又开始上升, 同时上面温度较低的液体则又下降, 热液体和冷液体的不断循环, 能使整瓶液体很快地热起来。在图 2·4 装置的烧瓶中放一些水和高锰酸钾晶体, 就很容易看出液体受热时的运动情况。

依靠液体或气体本身的流动而实现的热传递过程叫做对流。

由此可以看出, 对流的特点是伴随有大量物质分子的定向运动——热的流体向上运动, 冷的流体向下运动。

冬天, 在生火炉的房间里, 全室的空气就是由于对流作用而逐渐温暖起来的 (图 2·5)。

地球大气层中的空气, 由于在赤道地区和两极地区受热程度

不同而产生了强大的对流运动，结果就形成了信风。赤道处的热空气上升并流向两极；在大气的低层，较冷的空气流向赤道。海洋中的潮流也跟海水的对流有关。

在沿海地区可以看到由于空气受热的不同而形成的风。白昼，陆地比海水容易晒热，陆地上的空气受热以后开始上升，从海面上流来的冷空气就填充了它的位置。因此，白昼的风从海洋吹向陆地。晚间则恰好相反，陆地表面比海水冷却得快，海面上的空气比陆地上的空气热，风就由陆地吹向海洋。

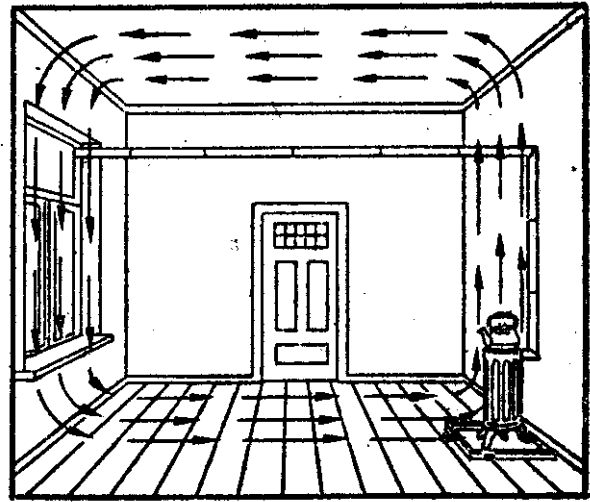


图 2·5 空气在有火炉的房间中的对流情形

对流在工程技术上的应用

(1) 通风 因为炉子烟道中热烟气的密度比周围冷空气的密度小，所以烟囱中热烟气柱的重量比同样高度的冷空气柱的重量轻。炉门处冷空气的压强大于热烟气的压强，使周围的冷空气进入炉中，同时烟道中的热烟气上升，形成通风。烟气的温度越高、烟囱的高度越大，则热烟气柱和周围空气柱的重量差就越大，通风也就越强烈；进入炉子中的新鲜空气越多，燃料燃烧得也越充分。

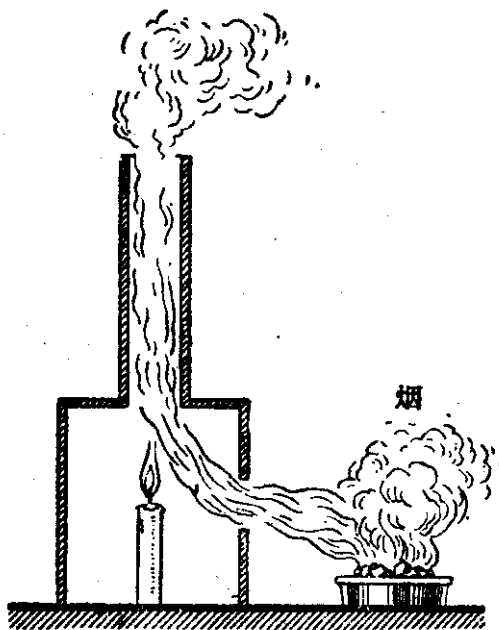


图 2·6 形成通风的实验

离开圆筒。在工厂里，为了保证锅炉中的燃料能够很好地燃烧，都装有很高的烟囱。

(2) 热水暖室装置 在现代化的大型建筑物中常装有这种取暖设备。

在房屋的地下室里装着锅炉 A(图 2·7(a)),水就在这里加热。锅炉上面有竖直的管子通到顶楼上的膨胀箱 B。它之所以叫做膨胀箱,是因为水在受热时要膨胀,而使一部分多余的水被排入箱中。

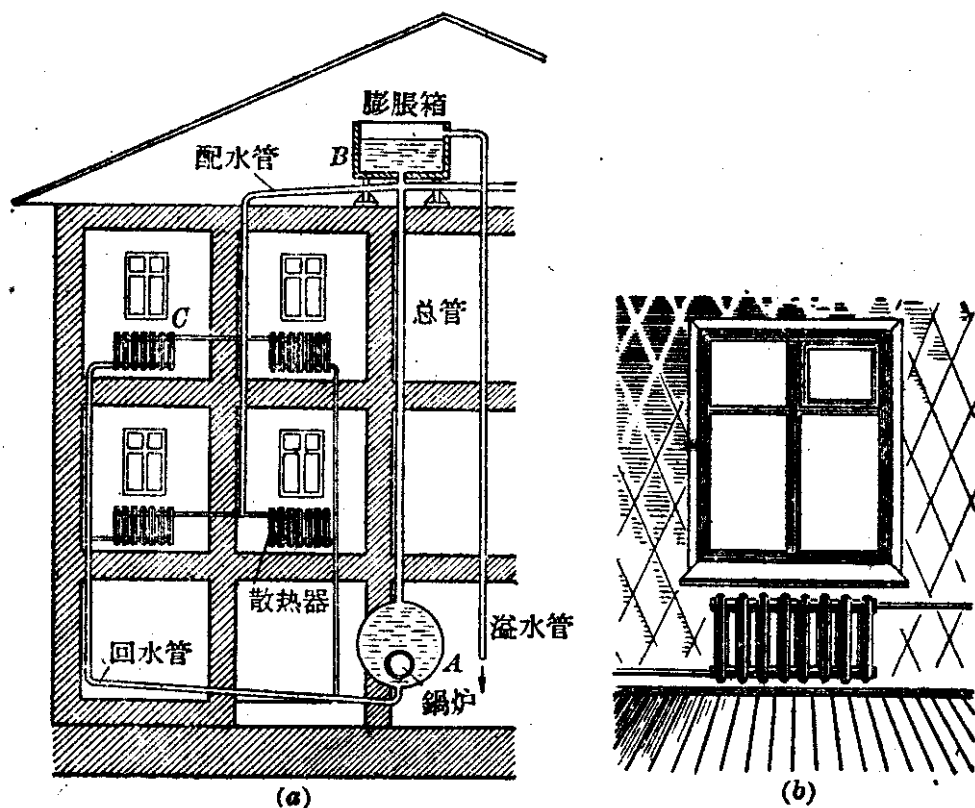


图 2·7

(a) 热水暖室装置简图; (b) 散热器

在紧靠膨胀箱底部的竖直管子上,沿着顶楼有一些支管,这些支管垂直地穿过各个屋子并与散热器 C 相连接。散热器是由一些很宽的铁管连接而成的(图 2·7(b)),一般放在窗户下面。

散热器下面另外有管子通入地下室,和锅炉下部的回水管连接在一起。整个装置的各个部分都充满了水。

水在锅炉中受热后,就顺着竖直管子升到支管和膨胀箱里,再从每条支管流到各个屋子的散热器里。

热水把自己的一部分内能传递给散热器,使它变热,而本身变冷,再顺着下面的管子通过回水管进入锅炉,重新加热。这样,当锅炉工作的时候,水就能不断地在整个装置中循环流动,把内能从锅炉传递给散热器。如果膨胀箱中的水太多了,就会从上面的管子流出,到下水道去。

由此可以看出,在这种装置中,水的循环是依靠水的对流进行的。散热

器使室内空气变热的过程是依靠空气的对流来达到的。

在大型建筑物中,水的循环有时是利用水泵来强制进行的。

房间要求保持的温度越高,所装的散热器就要越多,或者是将散热器做成有更多数目的散热片。这样能够增加空气跟散热器接触的面积,好让热水的内能较快地传递给室内的空气。

散热器上都装有开关,可以用来调节流进散热器里的热水量,从而调节室内空气的温度。

(3) 汽车和拖拉机发动机的冷却 发动机工作的时候,由于燃料的燃烧,汽缸内部的温度要达到 $1800 \sim 2000^{\circ}\text{C}$ 。汽缸壁过热就不能保证发动机正常工作,因此,必须进行冷却。

在汽车和拖拉机的发动机中,经常采用水来冷却。在严寒的季节中,为了降低它的冰点,要掺入其他的一些液体。

在汽缸壁跟发动机外壳之间装满了水(图 2·8),形成一个“水套”。散热器是由带棱片的薄管和两根连接管组成的。在较简单的装置中,水就依靠对流来进行冷却。和汽缸壁接触的水因受热后密度变小,沿着上部连接管向上流动;而散热器里的水较冷,密度较大,经过下部连接管来填补它的空位。这样,水就在不断的循环中把发动机中无用的内能传递出去。散热器中的水还可以用通风机产生的气流来进行冷却。

在现代化的发动机中,冷却装置里的水是用小水泵来强迫循环的,小水泵和通风机安装在同一根轴上。

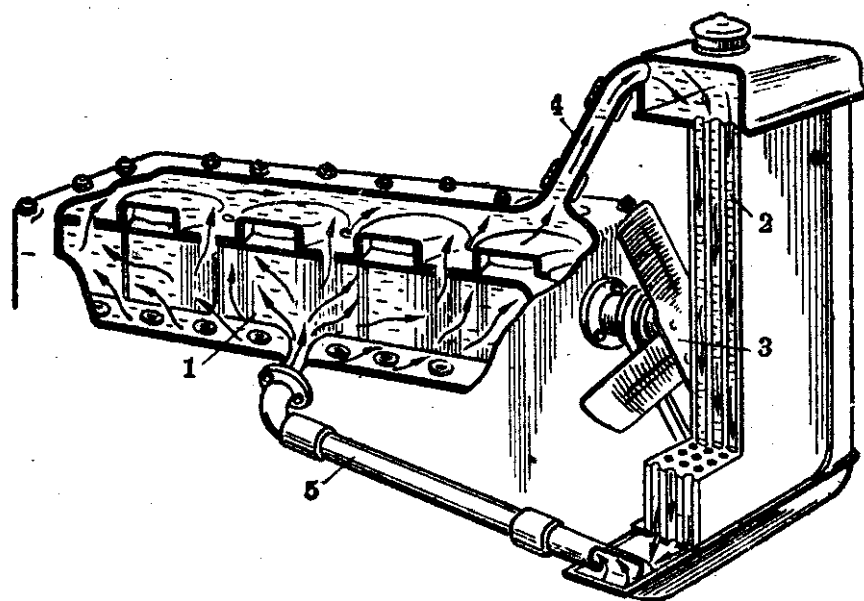


图 2·8 内燃机的冷却系统

1—水套; 2—散热器; 3—风扇; 4,5—连接管

习 題 2·3(1)

1. 热傳遞的实质是什么？
2. 热傳遞有哪几种方式？对流具有什么特点？
3. 在濱海地区，为什么白昼的风往往从海面吹来，而到了晚間却往往从陆地吹向海面？
4. 說明对流形成的原因。燒水时水壶里的水是怎样变热的？

2. 傳导 我們把金属調羹放进热湯里后，很快就感到調羹的把手发烫了，这表示放在湯里的調羹所获得的內能是沿着金属傳遞过来的。很明显，这种热傳遞的方式跟对流并不相同。以对流方式进行热傳遞时伴随着有气体或液体本身的流动，而現在調羹內部的金属并没有流动，內能却还是傳遞过来了。

如果把一块冷的金属和一块热的金属相互接触，那么冷的金属块会逐渐变热，热的金属块会逐渐变冷，这时有內能的傳遞，却看不到物质的迁移。

內能由物体的一部分傳遞給另一部分，或者从一个物体傳遞給另一个物体，而同时并没有物质的迁移，这种过程就叫做傳导，也称为热傳导。

从分子运动論的观点来看，这种傳热方式实质上是物质的分子在相互碰撞时傳遞动能的过程。物体較热部分的分子具有較大的平均动能，这些分子在运动中由于碰撞而把本身的一部分动能傳給了較冷部分的分子，这样，剧烈的分子运动就在物体中傳播开来，使物体較冷部分逐渐变热。

下面我們通过实验分別来討論固体、液体和气体中这种热傳遞方式的特点。

把木柴的一端放在火中燃燒时，手拿的那一头还是冷的。这說明木头是不善于导热的。

拿一根小玻璃棒的一端放在酒精灯上加热，不需要多少时间，这一端就会燒得发紅，甚至会熔解，而此时另一端却并不烫手。这

說明玻璃也是不善于导热的。

如果我們把火鉗的一头放在火中燃燒，那么过了不久，整个火鉗就会变得很热，甚至燙得使手不可能再握住它的另一端。这說明鉄是善于导热的。

把銅条和鉄条的一头插在軟木塞中，而把它們的另一头紧靠在一起，然后象图 2·9 那样把它們装置起来。

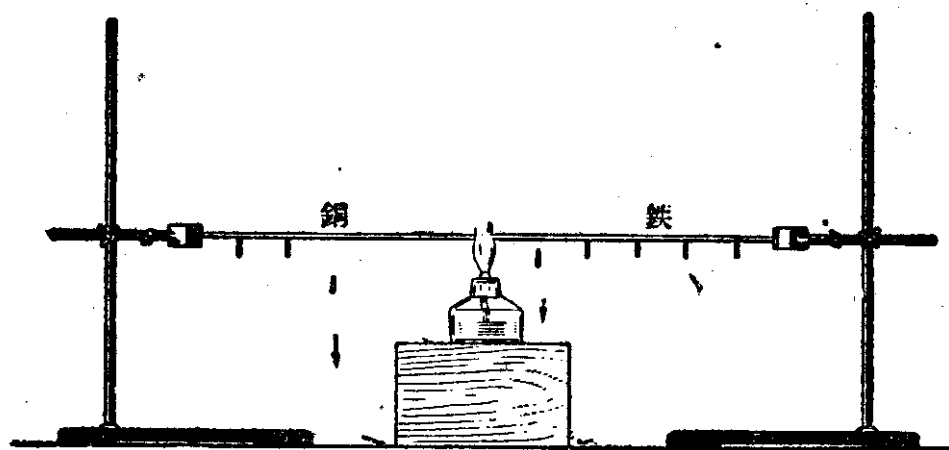


图 2·9 銅和鉄导热性能的比较

在銅条和鉄条上用蜡或凡士林豎直地粘上几根火柴，并且加热銅条和鉄条相互接触的那头。过一会儿我們就会看到，最先掉下去的是离火最近处的火柴，接着是离火远一点点的火柴，最后才是靠近軟木塞那一头的火柴。同时我們还可以看到，銅条上的火柴先开始掉下去，而且最先掉完，鉄条上的火柴后开始掉下去，而且最后掉完。这个实验告訴我們下列两点：1) 在物体内部，內能是从較热部分逐漸向較冷部分傳遞的。这証明了上面提到的，热傳导是物体内部分子的平均动能逐漸趋向均匀的过程。2) 銅和鉄都是善于导热的物质，而銅比鉄的导热本領更强。

現在我們来研究液体中的热傳导。

在一只試管里面装上水，然后将靠近水面的部分进行加热(图 2·10)。这时表面上的水很快地就沸騰了，而底下的水还是冷的。如果在管底放一些冰(为了不使冰浮起来，在冰上拴一块小石头)，則

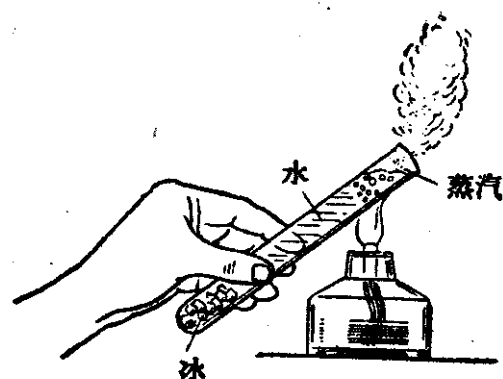


图 2·10 水是不善于导热的物质

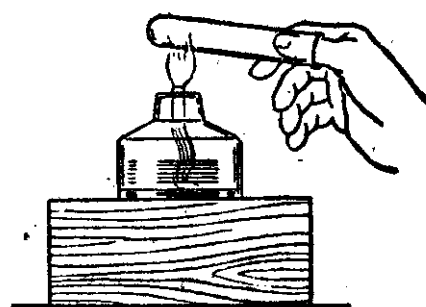


图 2·11 空气是不善于导热的物质

当上面的水已经沸腾时，冰才稍微熔化一点。这表明水也象木头和玻璃一样，是不善于导热的。

我们再来研究气体的导热性能。

图 2·11 的实验可以证明空气是不善于导热的。把一只干试管套在手指上，让管底向上，然后进行加热，可是手指几乎感觉不到热。

上面的这些实验告诉我们，各种物质的导热性能是不同的，有的善于导热，有的不善于导热。固态物质中金属是善于导热的，其中又以银和铜的导热性能为最好。木头、玻璃、皮革、陶瓷是不善于导热的。最不容易导热的是羊毛、头发、羽毛、纸、棉花、石棉、软木和其他松软的物质。

液体除了水银和熔化了的金属以外，都不善于导热。气体的导热性能比液体更差。

羊毛、棉花、毛皮不容易导热的原因是由于在它们的纤维中间存在着不流动的空气。在我国一些比较寒冷的地区，一般的房子里都装着双层玻璃窗，因为两层玻璃中间存在着不流动又不善于导热的空气层。这样在冬天，室内的空气就不容易被冷却，所以能使室内保持温暖。

真空——抽出空气的空间，是最不善于导热的。这是因为热传导是依靠分子的碰撞来实现的，而在分子很少的空间中，热传导几乎完全不能进行。

习 题 2·3(2)

1. 说明热传导的特点,它跟对流有什么不同?
2. 从分子运动论的观点来说明热传导的实质.
3. 热传递在流体中主要依靠哪种方式来进行? 在固体中主要依靠什么方式来实现?
4. 外形相同的一根木棒和一根铁棒,分别用纸紧紧地包起来,同时放在火里. 为什么木棒上的纸会先烧起来?
5. 室外的单杠(铁制),在夏天烈日的照耀下,为什么会热得烫手,而在严冬的早晨,会冷得冻手? 又处于相同气温下的双杠(木制),为什么不会给我们这样强烈的冷热感觉呢?
6. 为什么水壶、饭锅都是用金属做的,它们的把手却都是用木料做的?
7. 举一些例子来说明,水和空气都是不善于导热的.

3. 辐射 我们再来研究热传递的第三种方式. 先做一个实验. 拿一只外面涂有煤烟的小烧瓶(图 2·12), 瓶口用插有玻璃管(弯成直角)的软木塞盖紧. 在玻璃管的水平部分装进一滴红色的水. 水平管旁附有一个刻度尺, 这样,我们就制成了一只验温器.

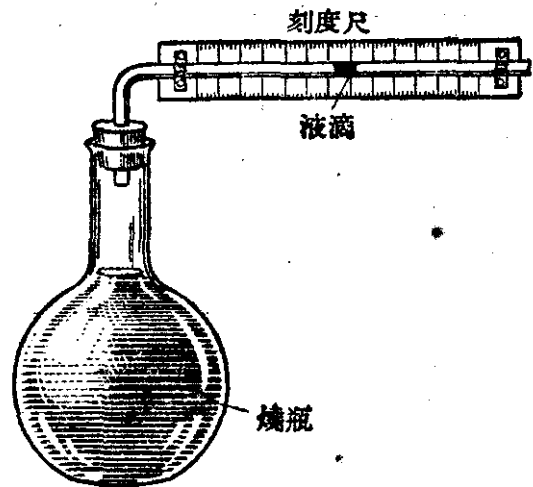


图 2·12 验温器

在离验温器约 1 米远的地方,放一只烧得非常热的 2~5 公斤重的铁砧. 这时,我们可以看到,验温器管子里的水滴向右逐渐移动. 显然,这表示瓶里的空气受热后开始膨胀. 可以肯定,这种膨胀是由于大量的内能从砧码传到了验温器的结果.

砧码的内能是怎样传递到验温器上去的呢? 上面已经讲过,空气是不善于导热的,也就是说热传导在这里不起作用. 同时,砧码放在验温器的旁边,被砧码烤热的空气是向上升的,所以也不是对流的作用. 因此,我们所遇到的是一种新的热传递方式.

大家知道，太阳和地球之間有很长一段真空地区，但是地球还是从太阳那里得到大量的能量。这些能量是依靠太阳光（可見的和不可見的）傳遞过来的。类似地，在上面的实验中，驗温器所得到的能量就是依靠从鉄砧碼发出的不可見的光傳遞过来的。以后我們会学到，一切可見的和不可見的光都是各种波长不同的电磁波。

这种既不是依靠气体或液体的流动，又不是依靠分子之間的碰撞，而是借助于不同波长的各种电磁波來傳遞內能的方式，称为輻射。

如果在驗温器和鉄砧碼中間放一块厚紙板或木片，那么，液滴很快就会回到原来的位置。这証明，从物体輻射出去的能量是沿直綫方向傳播的。

表面明亮而光滑的物体远不及表面黑暗而粗糙的物体善于吸收来自輻射的能量。利用简单的实验就能够說明这一点。如果将驗温器的一面涂黑，另一面不涂黑，当把涂黑的一面对着砧碼时，液滴移动得很快，而把不涂黑的一面对着砧碼时，液滴就移动得很慢。

表面黑暗粗糙的物体，不但能够迅速地和大量地吸收来自輻射的能量，而且也能迅速地和大量地輻射出能量。例如，表面光亮的茶杯与表面黑暗的茶杯相比，保持水温的时间要长些。

傳导和輻射在工程技术上的应用

(1) **安全灯** 如果把細銅絲网放在煤气灯或酒精灯的上面，用火柴在网下面点火，那么只在网下面有火焰(图 2·13)。如果在上面点火，則只有上面有火焰(图 2·14)。这是因为銅絲网非常善于导热；它能够把所得到的內能很快地散布开来，使网另一面的气温不能达到着火点。

矿井里用的安全灯就是根据这个原理制成的。矿井里常常存在着一些易燃的气体。如果把灯用銅絲网圍起来，那么，网里的灯火就不致于使网外的可燃气体着火而引起爆炸。所以这种灯被叫做安全灯(图 2·15)。

(2) **保温瓶** 把开水装在保温瓶(普通称为热水瓶)里，可以使开水的温度在一个相当长的时间内保持不下降。如果把冰盛在保温瓶里，也可以使冰在一个相当长的时间内保持不融化。保温瓶为什么能够起这样的作用呢？这

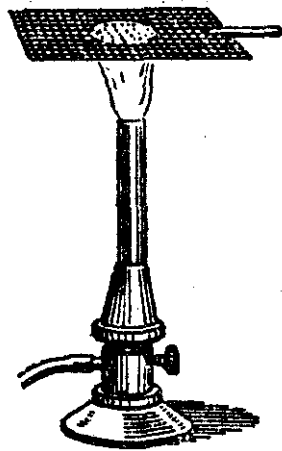


图 2·13 火焰在銅絲網下面燃燒

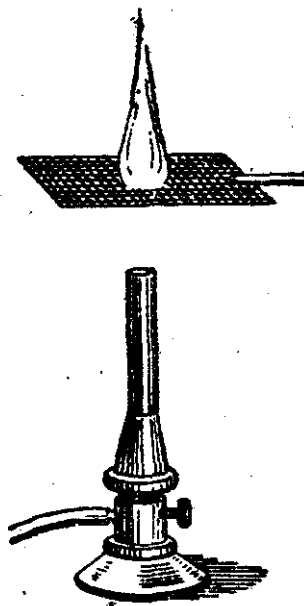


图 2·14 火焰在銅絲網上面燃燒

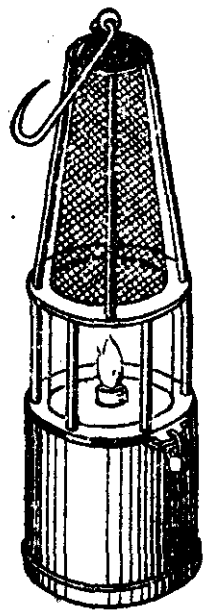


图 2·15 安全灯



图 2·16 保温瓶

需要用它的构造上的特点来说明。

图 2·16 所示的是盛液体的保温瓶。它是一个由双层玻璃做成的瓶子。在夹层里的玻璃壁上镀上一薄层银，夹层里差不多抽成真空。瓶口用软木塞盖住。由于玻璃和软木塞都是不善于导热的，在真空的夹层里对流不可能发生，以及镀银的光亮面能够把辐射出去的内能反射回来，因此，保温瓶把传导、对流和辐射三种作用都尽可能地减少了，从而起到了保温作用。为了保护它，我们通常把它放在一只用白铁或竹子做成的外壳里。

习 题 2·3(3)

1. 为什么阳光照在鏡子上时,鏡面只略微发热?
2. 夏天人們一般都喜欢穿淺色的衣服,为什么?

§ 2·4 热量. 热量的单位

在 § 2·2 中曾經讲过, 物体内能的改变, 可以通过做功和热傳遞两种方式来完成. 当运动物体克服摩擦力或媒质阻力做功时, 总是要引起物体内部状态的某种变化——温度升高、物态变化、物体的分散等——这时运动物体的机械能轉变为物体和周圍媒质的内能. 如果所做的功完全用来增加物体的内能, 那么, 物体内能的增量就可以用做功的多少来量度. 例如, 沿着水平方向作匀速运动的刀具, 从加工零件上切下金属屑. 这时, 动力所做的功既沒有增加刀具的动能 (因为刀具在作匀速运动), 也沒有增加它的势能 (因为沿着水平面运动), 而只是使刀具和加工零件的内部状态发生了变化, 即它們都变热了, 也就是說, 它們的内能增加了. 如果内能絲毫沒有散失, 那么, 内能的增量就等于动力 (切削零件的力) 所完成的功.

由此可見, 通过做功使物体的内能改变时, 总伴随有机械能向内能的轉化, 轉化的数量可以用做功的多少来量度. 功总是在能量轉化的过程中完成的, 沒有能量的轉化就談不上功. 功不是能量, 而是能量变化的一种量度. 我們只可以說“物体做了多少功”或“对物体做了多少功”, 而不能說“物体中含有多少功” (但是可以說物体含有多少能量).

把冷热程度不同的物体放在一起时, 热的物体会逐漸冷下来, 同时, 冷的物体会逐漸热起来, 这种内能由高温物体向低温物体的轉移一直要进行到它們达到同一温度时才会停止. 这时候我們說, 热的物体放出了若干热量, 冷的物体获得了若干热量. 因此,

热量也是量度物体内能改变的物理量，它表示在热传递过程中物体内能改变的数量。应该注意的是，只有物体内能通过热传递的方式发生变化时，才谈得上热量。如果说：“某物体含有多少热量”或“物体在高温时含有更多的热量”，那是完全错误的。

由于热量是物体内能变化的一种量度，所以，和功一样，也可以采用能量的各种单位：如尔格、焦耳、公斤·米等来作为热量的单位。可是，在历史上，当能量的单位还没有形成以前，就已经引用了热量的单位。

使1克纯水温度升高 1°C 所需要的热量叫做1卡路里，简称1卡，有时亦称为1小卡。

由于工业上要计算大量的热量，卡这个单位太小，用起来不很方便，所以通常用千卡或大卡作为热量的单位。

1千卡或1大卡是使1公斤的纯水温度升高 1°C 时所需要的热量。很显然：

$$1 \text{ 千卡} = 1000 \text{ 卡}, \quad 1 \text{ 卡} = 0.001 \text{ 千卡}.$$

精密的量度发现，使1克纯水温度升高 1°C 所需要的热量，随着水的初温度不同而略有差异。例如，把1克纯水从 1°C 加热到 2°C 时所需要的热量，比把它从 31°C 加热到 32°C 时所需要的热量大约多1%。所以，在精密的测定中，是把1克纯水从 19.5°C 加热到 20.5°C 所需要的热量规定为1卡。

在一般计量中，我们不考虑这种差别，而把1克水温度升高 1°C 所需要的热量都称作为1卡。所以：

使1克水升高 10°C 所需要的热量是10卡。

使10克水升高 1°C 所需要的热量是10卡。

使10克水升高 10°C 所需要的热量是100卡。

实验证明，物体冷却时放出的热量，跟把它恢复到原来的温度时所需要吸收的热量相同，因此：

1克水降低 1°C 时，放出的热量是1卡。

质量为 m 公斤的水降低 1°C 时放出的热量是 m 千卡。

m 公斤的水降低 $t^{\circ}\text{C}$ 时放出的热量是 mt 千卡。

习 题 2.4

1. 质量为 m 克的水升高 $t^{\circ}\text{C}$ 时需要多少千卡的热量?
2. 5 公斤的水从 20°C 加热到 100°C 需要吸收多少千卡的热量?
3. m 公斤的水从 $t_1^{\circ}\text{C}$ 降低到 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时要放出多少千卡的热量?
4. 有人說：“物体在高温时比在低温时含有更多的热量”，这样的讲法对不对呢？应该怎样說才是正确的？
5. 什么叫做热量？它跟內能有什么关系？
6. 能不能用尔格、焦耳、公斤·米等作为热量的单位？为什么？

§ 2.5 物体的热容量，物质的比热

物体温度的改变是物体內能改变的一种表现。物体温度的升高表明它的內能在增加；通常我們讲，物体由于获得了热量，所以它的温度升高。相反地，如果物体的温度降低，則表明它的內能在减少；这时物体由于放出了热量，所以温度降低。

一般地讲，使不同的物体升高相同温度所需要的热量是不同的。那么所需要的热量究竟跟哪些因素有关呢？

(1) 它跟物体的质量有关。例如要把原来温度相同而质量不同的两个熨斗加热到同一温度，大熨斗放在火炉上的時間要比小熨斗长一些。也就是說，把由同一种物质組成的物体升高同样的温度时，质量越大，所需要的热量就越多。

(2) 它跟物质的性质有关。有两只相同的燒杯，一只装有 200 克水，另一只装有 100 克水和 100 克鉛。用同样的酒精灯同时进行加热。这时可以看到，单装水的热得慢，装水和鉛的热得快。这意味着，使质量相同的水和鉛升高同一温度时，鉛所需要的热量比水少。也就是說，使质量相等的不同物质升高同一温度时，所需的热量也是不同的。

为了表征物体的吸热和放热本领，物理学上引用了“热容量”的概念。

使物体温度升高 1°C 所需要的热量，称为该物体的热容量。

实验证明，使物体冷却 1°C ，它放出同样多的热量。使物体的温度升高 $t^{\circ}\text{C}$ 所需要的热量是使它升高 1°C 所需要的热量的 t 倍；如果再使物体冷却 $t^{\circ}\text{C}$ ，这时它所放出的热量就等于它的温度升高 $t^{\circ}\text{C}$ 时所吸收的热量。因此，知道了物体的热容量，我们就能计算出它在温度改变时所吸收或放出的热量。

物体的热容量跟它的质量成正比，并跟组成物体的物质有关。因此，当我们比较由不同物质组成的物体的热容量时，应当采用相同的质量。为了标志物质的热性质，物理上通常采用每单位质量，例如 1 克物质的热容量，称为物质的比热。

由某种物质组成的单位质量的物体的热容量，叫做这种物质的比热。

假定由某一物质组成的物体的质量是 m ，使它的温度从 $t_1^{\circ}\text{C}$ 升高到 $t_2^{\circ}\text{C}$ 所需要的热量是 Q 。为了求出该物质的比热 c ，就要用物体的质量 m 和温度差 $t_2^{\circ}\text{C} - t_1^{\circ}\text{C}$ 去除热量 Q 。这样，

$$c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}.$$

因此，比热也就是使单位质量的物质温度升高 1°C 所需要的热量。

常用的比热单位是卡/克·度和千卡/公斤·度。

水的温度由 19.5°C 上升到 20.5°C 时，它的比热等于 1 卡/克·度。在其他温度时，水的比热跟 1 卡/克·度略有出入。但是，这种差别很小，因此，在以后的讨论中，我们不再考虑这个差别。

不仅对水来讲，在不同的温度时比热的数值略有差别，任何其他的物质在温度改变时，它的比热的数值也都有微小的变化。通常在计算时所采用的是物质比热的平均值。下表列举的就是一些

物质的比热的平均值,单位是卡/克·度.

氢(压强不变)	3.41	氮(压强不变)	1.26
水	1.0	酒精	0.58
乙醚	0.56	煤油	0.51
冰	0.50	空气(压强不变)	0.24
干泥土,沙	0.20	铁	0.11
玻璃	0.19	银	0.055
铜	0.09	汞	0.03
铝	0.21	铅	0.03
锌	0.09		

知道了物质的比热以后,就可以根据公式

$$Q = c m (t_2 - t_1)$$

计算出物体变热时所需要的热量,或冷却时放出的热量.

测量的结果表明,水的比热比任何其他固态和液态物质的比热要大得多,水的这种特性具有重要的意义.在§2.3中曾经提到,在暖室装置中用水来供暖和在发动机的冷却系统中用水来进行冷却,都是因为水具有很大的比热的缘故.水的这种性质也是沿海地区气温变化较小的原因.

由上表还可以看出,冰的比热只有水的一半.实际上,其他物质在固态时的比热也跟在液态时的比热不同.

例1. 铝锅的质量是0.3公斤,里面装有10°C的水2公斤,问要把水烧开需要多少千卡的热量?

【解】 按题意: 水

$$\begin{cases} m_1 = 2 \text{ 公斤} \\ c_1 = 1 \text{ 千卡/公斤·度} \\ t_1 = 10^\circ\text{C}, \end{cases}$$

铝锅

$$\begin{cases} m_2 = 0.3 \text{ 公斤} \\ c_2 = 0.21 \text{ 千卡/公斤·度} \\ t_2 = 10^\circ\text{C}, \end{cases}$$

水和铝锅的末温度 $t = 100^\circ\text{C}$.

水需要的热量

$$Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1),$$

鋁鍋需要的热量

$$Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2) = c_2 m_2 (t - t_1),$$

需要的总热量

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 = c_1 m_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_1) \\ &= (c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - t_1) = (1 \times 2 + 0.21 \times 0.3) \times 90 \\ &= 2.063 \times 90 = 185.67 \text{ 千卡}. \end{aligned}$$

例 2. 0.8 公斤的冰在获得 2 千卡的热量后温度升高到 -4°C . 求冰的初温度.

【解】 按題意: $Q = 2$ 千卡, $m = 0.8$ 公斤,
 $c = 0.5$ 千卡/公斤·度, $t = -4^\circ\text{C}$.

冰获得的热量

$$Q = cm(t - t_1),$$

因而得

$$t - t_1 = \frac{Q}{cm},$$

$$t_1 = t - \frac{Q}{cm} = -4 - \frac{2}{0.5 \times 0.8} = -4 - 5 = -9^\circ\text{C}.$$

习 题 2.5

1. 什么叫做物质的比热?
2. 物体的热容量和物质的比热有什么区别?
3. 怎样计算对物体加热时所需要的热量?
4. 在热水暖室装置和发动机的冷却装置中, 为什么不用其他的液体而用水?
5. 把 5 公斤 20°C 的水放在 0.6 公斤的鋁鍋中, 要将水燒开需要多少热量?
6. 把一块鉄从 15°C 加热到 815°C 需要的热量是 17.6 千卡, 求鉄块的质量.

7. 問 0.2 公斤的水吸收了 8 千卡的热量后, 温度要升高几度?
8. 把两个大小相同的銅球加热到同样高的温度, 然后将其中的一个放进盛水的杯子里, 另一个放进盛煤油的杯子里. 如果水和煤油原来的温度相同、质量也相等, 那么哪一个杯子里的温度升得高一些? 为什么?
9. 体积相同的銅块、鉛块和鋁块, 哪一个的热容量最大? 哪一个的最小?
10. 一間屋子的容积是 60 立方米, 空气的比重是 0.0013 克/厘米^3 , 空气的比热是 $0.24 \text{ 卡/克}\cdot\text{度}$. 把这間屋子里的空气从 0°C 加热到 22°C , 需要多少热量?
11. 如果在 500 克的水中投入 500 克的銅, 銅的温度从 80°C 降低到 20°C , 問水的温度升高了几度?
12. 把 5 公斤的磚块从 10°C 加热到 35°C 需要 80 千卡的热量, 求磚块的比热.

§ 2.6 量热器. 比热的測定

用来測量各种物质的比热的仪器叫做量热器, 亦称卡計. 它的主要組成部分是一只磨光的薄壁金属杯 A (图 2.17), 这个杯子放在另一只較大的带盖的金属杯 B 中, 底上用軟木塞支住. 这样装置的目的是为了尽量避免杯 A 和周圍媒质进行热傳遞. 下面我們討論測定一种固态物质比热的方法.

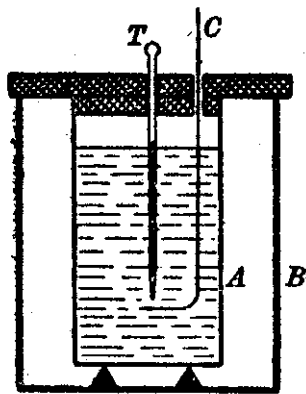


图 2.17 简单的量热器
 A 和 B 分别是內外的金属杯, T 是温度计,
 C 是攪拌器

在杯 A 中装入一定量的水, 用温度计測出水的温度. 对由待測物质組成的物体加热, 使它的温度升高到某一数值 (例如, 放在沸水中加热, 那末它的温度就是 100°C), 然后把这个物体輕輕地放进杯 A 的水中, 立即将盖子盖好, 并用攪拌器輕輕地攪动水, 直到量热器中的温度达到均匀为止 (这时, 水、杯 A 和投入的物体都达到相同的温度). 用温度计測出这一温度.

因为量热器中的所有物体在实验过程中跟周圍媒质 (空气) 沒有发生显著的热傳遞, 所以, 在实验过程中, 量热器中所有物体的总

內能可以认为是沒有改变。也就是說，高温待測物体内能的减少，等于水、量热器和攪拌器內能的增加（溫度計的內能变化很小，可以略去不計）。

設量热器中水的质量为 m_1 ，比热是 c_1 ；量热器的质量（連攪拌器）是 m_2 ，比热是 c_2 ；水和量热器起始的溫度是 t_1 ，待測物体的质量，比热和投入水中以前的溫度分別是 m 、 c 和 t_2 ，最后穩定的溫度（簡称末溫度）是 t 。

由于待測物体在量热器中沒有做任何功，所以它的內能的减少等于 $cm(t_2-t)$ 卡。水的內能增加为 $c_1m_1(t-t_1)$ 卡；量热器的內能增加为 $c_2m_2(t-t_1)$ 卡。因为总的內能保持不变，所以

$$cm(t_2-t) = c_1m_1(t-t_1) + c_2m_2(t-t_1).$$

这个式子通常叫做**热平衡方程式**。从这个方程中可以求出

$$c = \frac{c_1m_1(t-t_1) + c_2m_2(t-t_1)}{m(t_2-t)} = \frac{(c_1m_1 + c_2m_2)(t-t_1)}{m(t_2-t)}.$$

所以已知水的比热 c_1 和組成量热器的材料的比热 c_2 ，量出 t_1 、 t_2 、 t 和 m_1 、 m_2 、 m 后，我們就可以从上式求得待測物质的比热 c 。

应当指出，热傳遞不仅发生在待測物体跟水和量热器之間，而且也发生在它們跟周圍的物体之間。所以在精密的測量中，必須尽可能地减少量热器中物体内能的散失。

量热器除了用来測定物质的比热以外，还可以用来測定火炉、酒精灯的火焰的溫度，而这些物体的溫度是不可能利用普通溫度計（例如水銀溫度計）来測量的。

例 3. 鋼齒輪的质量是 500 克，加热后，投入溫度为 10°C 、质量为 2 公斤的油中，最后穩定时的溫度为 50°C 。求齒輪的初溫度。油的比热为 0.45 卡/克·度。（不考虑容器吸收的热量和其他热量的散失。）

【解】 按題意：鋼： $m_1=500$ 克， $c_1=0.11$ 卡/克·度，

油： $m_2=2000$ 克， $c_2=0.45$ 卡/克·度，

$$t_2 = 10^\circ\text{C}, \quad t = 50^\circ\text{C}.$$

齒輪放出的热量

$$Q_1 = c_1 m_1 (t_1 - t),$$

油得到的热量

$$Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2),$$

列出热平衡方程式

$$Q_1 = Q_2,$$

$$c_1 m_1 (t_1 - t) = c_2 m_2 (t - t_2),$$

$$c_1 m_1 t_1 - c_1 m_1 t = c_2 m_2 (t - t_2),$$

$$c_1 m_1 t_1 = c_2 m_2 (t - t_2) + c_1 m_1 t,$$

$$\begin{aligned} \therefore t_1 &= \frac{c_2 m_2 (t - t_2) + c_1 m_1 t}{c_1 m_1} \\ &= \frac{0.45 \times 2000 (50 - 10) + 0.11 \times 500 \times 50}{0.11 \times 500} \\ &= \frac{38,750}{55} = 704.5^\circ\text{C} \text{ (鋼齒輪的初溫度)}. \end{aligned}$$

例 4. 9°C 的水 10 公斤, 40°C 的水 20 公斤和 100°C 的水 6 公斤, 求它們混合以后的穩定溫度.

分析 很明显, 混合液的温度必然低于 100°C 而高于 9°C . 但初温度为 40°C 的水究竟是放出热量还是吸收热量, 就不容易肯定. 这里可能有两种不同的假定, 但得出的結果是一致的, 讀者可自行驗算.

【解】 按題意: $m_1 = 10$ 公斤, $t_1 = 9^\circ\text{C}$,
 $m_2 = 20$ 公斤, $t_2 = 40^\circ\text{C}$,
 $m_3 = 6$ 公斤, $t_3 = 100^\circ\text{C}$,
 $c_1 = c_2 = c_3 = c = 1$ 千卡/公斤·度.

10 公斤的水得到的热量

$$Q_1 = c m_1 (t - t_1),$$

20 公斤的水得到的热量

$$Q_2 = cm_2(t - t_2),$$

6 公斤的水放出的热量

$$Q_3 = cm_3(t_3 - t),$$

列出热平衡方程式

$$Q_3 = Q_1 + Q_2,$$

$$cm_3(t_3 - t) = cm_1(t - t_1) + cm_2(t - t_2),$$

$$m_3t_3 - m_3t = m_1t - m_1t_1 + m_2t - m_2t_2,$$

$$m_3t_3 + m_2t_2 + m_1t_1 = m_1t + m_2t + m_3t,$$

$$t = \frac{m_1t_1 + m_2t_2 + m_3t_3}{m_1 + m_2 + m_3} = \frac{10 \times 9 + 20 \times 40 + 6 \times 100}{10 + 20 + 6}$$

$$= 41.4^\circ\text{C} \text{ (混合液的末温度).}$$

例 5. 在质量为 100 克的铜质量热器中, 盛有 20°C 的水 200 克, 投入质量为 100 克、温度为 100°C 的金属物体. 稳定后的温度为 24°C . 求金属的比热. 从比热表中查一下, 它是哪一种金属?

【解】 按题意: 量热器 $\begin{cases} m_1 = 100 \text{ 克} \\ c_1 = 0.09 \text{ 卡/克}\cdot\text{度} \\ t_1 = 20^\circ\text{C}, \end{cases}$

水 $\begin{cases} m_2 = 200 \text{ 克} \\ c_2 = 1 \text{ 卡/克}\cdot\text{度} \\ t_2 = 20^\circ\text{C}, \end{cases}$ 金属物体 $\begin{cases} m_3 = 100 \text{ 克} \\ t_3 = 100^\circ\text{C}, \end{cases}$

末温度 $t = 24^\circ\text{C}$.

量热器得到的热量

$$Q_1 = c_1m_1(t - t_1),$$

水得到的热量

$$Q_2 = c_2m_2(t - t_2),$$

金属物体放出的热量

$$Q_3 = c_3m_3(t_3 - t),$$

列出热平衡方程

$$\begin{aligned}
 Q_1 + Q_2 &= Q_3, \\
 c_1 m_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_2) &= c_3 m_3 (t_3 - t), \\
 (c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - t_1) &= c_3 m_3 (t_3 - t), \\
 \therefore c_3 &= \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - t_1)}{m_3 (t_3 - t)} \\
 &= \frac{(0.09 \times 100 + 1 \times 200) (24 - 20)}{100 \times (100 - 24)} \\
 &= \frac{209 \times 4}{100 \times 76} = 0.11 \text{ 卡/克} \cdot \text{度}.
 \end{aligned}$$

从比热表中查得这种金属是铁。

例 6. 把灼热的煤块从火炉中钳出，立即投入质量为 100 克的铜量热器中，量热器里装有 15°C 的水 250 克。水温最后稳定在 40°C 。煤块的质量是 50 克（实验以后用天平称出），煤的比热是 0.25 卡/克·度。求火炉的温度。

【解】 按题意：水

$$\begin{cases} m_1 = 250 \text{ 克} \\ c_1 = 1 \text{ 卡/克} \cdot \text{度} \\ t_1 = 15^\circ\text{C}, \end{cases}$$

量热器

$$\begin{cases} m_2 = 100 \text{ 克} \\ c_2 = 0.09 \text{ 卡/克} \cdot \text{度} \\ t_2 = t_1 = 15^\circ\text{C}, \end{cases}$$

煤块

$$\begin{cases} m_3 = 50 \text{ 克} \\ c_3 = 0.25 \text{ 卡/克} \cdot \text{度}, \end{cases}$$

末温度 $t = 40^\circ\text{C}$ 。

煤块冷却时所放出的热量

$$Q_3 = c_3 m_3 (t_3 - t),$$

水变热时吸收的热量

$$Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1),$$

量热器吸收的热量

$$Q_2 = c_2 m_2 (t - t_2),$$

列出热平衡方程式

$$Q_3 = Q_1 + Q_2,$$

$$c_3 m_3 (t_3 - t) = c_1 m_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_2),$$

$$c_3 m_3 t_3 - c_3 m_3 t = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - t_1),$$

$$c_3 m_3 t_3 = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - t_1) + c_3 m_3 t,$$

$$\therefore t_3 = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - t_1) + c_3 m_3 t}{c_3 m_3}$$

$$= \frac{(1 \times 250 + 0.09 \times 100) (40 - 15) + 0.25 \times 50 \times 40}{0.25 \times 50}$$

$$= 558^\circ\text{C} \text{ (火炉的温度).}$$

本題說明，可以利用量热器来探測灼热物体的温度。这样的高温，用一般温度计是不可能直接測得的。

习 題 2·6

1. 說明列出热平衡方程式的依据和步驟。
2. 有一只最高刻度为 50°C 的温度計，用什么方法可以用它来測量更高的温度？
3. 把质量为 15 公斤和温度为 20°C 的水与质量为 5 公斤和温度为 90°C 的水混合在一起，求混合液的末温度。
4. 在量热器中盛有 15°C 的水 2 公斤。如果投入一只质量为 500 克、初温度为 100°C 的黄銅砝碼，問水的温度将升高到几度？黄銅的比热为 0.088 千卡/公斤·度。（量热器所吸收的热量可以不計。）
5. 为了測定煤油的比热，在质量为 120 克的銅量热器中盛有 20°C 的煤油 100 克，然后向里面投入质量为 200 克和温度为 96°C 的鉄砝碼，最后煤油的温度升高到 40°C ，求煤油的比热。
6. 在质量为 5 公斤和温度为 7°C 的水中投入一块加热到 540°C 的鉄，如果最后水温升高到 40°C ，求鉄块的质量。
7. 一个鋼球的质量是 10 克，把它放在炉子里燒了一段相当长的時間以后，取出来立刻放进 10°C 的水中，結果水的温度升高到 25°C 。如果水的质量是 50 克，鋼的比热是 0.12 卡/克·度，求炉子里的温度。
8. 在质量为 100 克的黄銅量热器中盛有 18°C 的水 200 克，投入一块质

量为 50 克加热到 90°C 的铝。水温最后升高到 21.6°C ，求铝的比热。

9. 在质量为 2 公斤和温度为 20°C 的容器中注入 86°C 的水 3 公斤。水的最后温度变为 50°C ，求容器的热容量。

10. 房间的体积是 5 米 \times 4 米 \times 3 米。将室内空气温度升高 5°C ，需要多少热量？这些热量能使多少水升高同样的温度？

§ 2.7 燃料的燃烧值

能够在炉灶里燃烧并且可以从自然界中大量获得的物质，统称为燃料。燃料可以是固体、液体或气体。固体燃料有烟煤、无烟煤、褐煤、泥煤、木柴、木炭等，液体燃料有石油以及它加工后的产品，气体燃料有沼气和各种煤气等。

燃料燃烧时释放出的大量能量（化学能）是通过热传递的方式传给别的物体，使它们的温度升高。因此，一般就说，燃料燃烧时放出热量。为了比较各种燃料的发热本领，必须知道一定质量（例如 1 公斤）的某种燃料完全燃烧时所放出的热量。

1 公斤的某种燃料完全燃烧时所放出的热量，叫做这种燃料的燃烧值。

各种燃料的燃烧值(千卡/公斤)

干木柴	3000	无烟煤	7500
木炭	8000	石油	11,000
泥煤	3500	煤油	11,000
褐煤	4000	汽油	11,000
烟煤	7000	酒精	7000

为了比较时方便起见，在实际计算中，将各种燃料折合成标准燃料。标准燃料的燃烧值定为 7000 千卡/公斤。例如，1 公斤的泥煤折合半公斤的标准燃料。

用 q 表示某种燃料的燃烧值，那末质量是 m 公斤的这种燃料燃烧时放出的热量是：

$$Q = qm.$$

科学研究证明，任何燃料中所含有的化学能都是由太阳的能

量轉化而來的。

1. 燃燒裝置的效率 在各種燃燒裝置中，燃料燃燒時所放出的熱量，並不是能夠完全用於有效的目的。例如，在汽車發動機中，只有 21% 的熱量用來做有用功，還有 79% 的熱量都散失到周圍空氣中去了。為了比較各種燃燒裝置工作的情況，需要知道它們的效率。

有用的熱量跟燃料完全燃燒時所放出的總熱量之比，叫做燃燒裝置的效率，它用百分數來表示。

如果有用的熱量是 Q_1 ，燃料完全燃燒時所放出的熱量是 Q ，那麼燃燒裝置的效率是

$$\eta = \frac{Q_1}{Q} 100\%.$$

例 7. 燃燒 200 克的煤油可以燒開 20°C 的水 11 公斤，求煤油爐的效率。

【解】 按題意：水 $\begin{cases} m_1 = 11 \text{ 公斤} \\ c_1 = 1 \text{ 千卡/公斤}\cdot\text{度} \\ \text{初溫度 } t_1 = 20^\circ\text{C}, \end{cases}$

末溫度 $t_2 = 100^\circ\text{C}$,

煤油 $\begin{cases} m = 0.2 \text{ 公斤} \\ q = 11,000 \text{ 千卡/公斤}. \end{cases}$

有效的熱量(燒開 20°C 、11 公斤水所需的熱量)

$$Q_1 = c_1 m_1 (t_2 - t_1),$$

煤油燃燒時放出的熱量

$$Q = qm,$$

煤油爐的效率

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Q_1}{Q} = \frac{c_1 m_1 (t_2 - t_1)}{qm} = \frac{1 \times 11 \times (100 - 20)}{11,000 \times 0.2} \\ &= \frac{880}{2200} = 0.4 = 40\%. \end{aligned}$$

例 8. 煤油炉的效率为 40%，用它来把 5 公斤的水烧开，水装在质量为 2 公斤的铜锅里，水和锅的初温度是 10°C，试问要用掉多少煤油？

【解】 按题意：水 $\begin{cases} m_1 = 5 \text{ 公斤} \\ c_1 = 1 \text{ 千卡/公斤,} \end{cases}$

铜锅 $\begin{cases} m_2 = 2 \text{ 公斤} \\ c_2 = 0.09 \text{ 千卡/公斤,} \end{cases}$

水和铜锅的初温度 = 10°C，水和铜锅的末温度 = 100°C，

煤油 $q = 11,000$ 千卡/公斤， $\eta = 40\% = 0.4$ 。

水吸收的热量

$$Q_{\text{水}} = c_1 m_1 (t - t_1),$$

铜锅吸收的热量

$$Q_{\text{锅}} = c_2 m_2 (t - t_1),$$

燃料燃烧时放出的热量

$$Q = qm,$$

有效的热量

$$Q_1 = Q \cdot \eta = qm \cdot \eta,$$

列出热平衡方程式

$$Q_1 = Q_{\text{水}} + Q_{\text{锅}},$$

$$qm \cdot \eta = c_1 m_1 (t - t_1) + c_2 m_2 (t - t_1),$$

$$qm \cdot \eta = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - t_1),$$

$$\therefore m = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2) (t - t_1)}{q \cdot \eta} = \frac{(1 \times 5 + 0.09 \times 2) \times (100 - 10)}{11,000 \times 0.4}$$

$$= 0.106 \text{ 公斤 (或消耗煤油 0.212 斤).}$$

习 题 2.7

1. 什么叫做燃料？它有哪些形式？各举例说明。
2. 什么叫做燃料的燃烧值？它的单位是什么？

3. 什么叫做标准燃料?
4. 什么叫做燃烧装置的效率?
5. 为了得到 2750 千卡的热量, 需要消耗多少煤油?
6. 在效率为 40% 的煤油炉中烧掉 0.2 公斤的煤油, 问能烧开多少 20°C 的水?
7. 在煤油炉上烧开 4.4 升 10°C 的水, 用去 90 克煤油, 求煤油炉的效率?
8. 效率是 40% 的煤油炉, 每分钟烧去 2.8 克煤油. 问要多少时间才能烧开 2.5 升 8°C 的水?

§ 2.8 热功当量

在 § 2.2 中已经谈过, 物体内能的改变可以通过两种方式来达到: 做功和热传递.

当物体反抗摩擦力做功时, 就会变热, 这时内能亦相应地增加. 当传递热量给物体时, 物体的内能也会增加. 于是我们要问: 使物体的内能增加同一数值时, 所做的功跟传递的热量在数值上有什么关系? 物理学家已经通过了许多不同的实验对这一数量关系进行了精确的测定.

英国物理学家焦耳在 1840~1849 年首先进行了这种实验. 图 2.18 是他测量时所用的装置的示意图. 量热器 A 里装着水, 重物 P 和 P' 悬挂在一根跨过定滑轮的绳子上. 重物下降时, 带

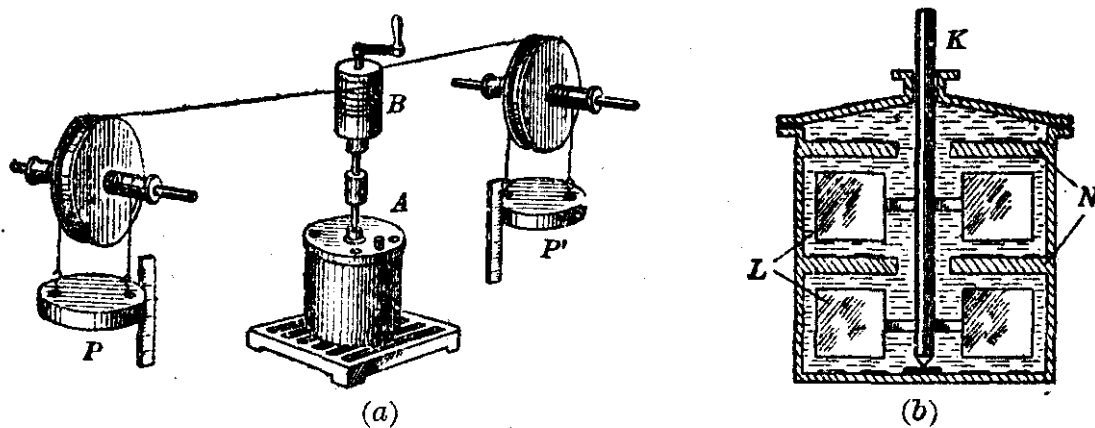


图 2.18

(a) 焦耳测定热功当量的实验装置; (b) 量热器的纵截面图

动穿在 A 中的轴 K 转动。轴 K 上安装着叶片 L ，轴转动时，叶片迫使量热器中的水同时运动。量热器内壁上装有固定叶片 N ，安装这些叶片是为了阻碍液体的运动，因而增大了一层水和另一层水之间的摩擦。由于摩擦，使水和量热器变热。

根据重物的质量和下落的高度 h ，可以计算出这两个重物下落时所做的功： $W = 2Mgh$ 。在实验终了时，仪器的各部分——重物、叶片、水都跟在实验前一样，仍旧是静止的，即它们在实验前后的动能没有改变。重物势能减少所做的功，全部用来增加水和量热器的内能，使它们的温度从 $t_1^\circ\text{C}$ 升高到 $t_2^\circ\text{C}$ 。

如果改用热传递的方式，同样可以使水和量热器的内能增加相同的数值。使水和量热器的温度从 $t_1^\circ\text{C}$ 升高到 $t_2^\circ\text{C}$ 所需要的热量 $Q = (mc + m_1c_1)(t_2 - t_1)$ 。式中 c 、 c_1 、 m 和 m_1 分别表示水和量热器的比热和质量。因此，从使物体内能改变的效果来看，热量 Q 就相当于功 W 。

相当于单位热量的功的数量，叫做热的功当量，简称热功当量。
在焦耳实验中，所求得的热功当量 J 为：

$$J = \frac{W}{Q} = \frac{2Mgh}{(mc + m_1c_1)(t_2 - t_1)}$$

焦耳一再改变实验的条件，例如改变水的质量、重物的质量和下落的高度等，但是，不论怎样改变实验条件，所得到的热功当量的值总是相同的： $J = 427$ 公斤·米/千卡，即使 1 公斤水的温度升高 1°C ，必须做 427 公斤·米的功。也就是说，1 千卡的热量相当于 427 公斤·米的功。

焦耳用水银代替水，并用金属块在量热器中的摩擦代替水的摩擦，重复上述实验后所测得的结果仍然相同。经过许多科学家采用更为精密的方法来进行测定，证明热功当量 J 是一个恒量。

现在热功当量的公认值是：

$$J = 4.18 \text{ 焦耳/卡} = 427 \text{ 公斤·米/千卡。}$$

知道了热功当量,我們就可以用功的单位来表示热量:

$$1 \text{ 卡} = 4.18 \text{ 焦耳};$$

$$1 \text{ 千卡} = 427 \text{ 公斤} \cdot \text{米}.$$

例 9. 电車刹車时做了 128,100 公斤·米的功. 問它放出了多少热量?

【解】 按題意: $J = 427 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{千卡}$, $W = 128,100 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$.

由公式 $J = \frac{W}{Q}$ 可得

$$Q = \frac{W}{J} = \frac{128,100}{427} = 300 \text{ 千卡}.$$

例 10. 內燃机在 1 小时内消耗了 30 公斤石油. 如果发动机的效率是 25%, 求发动机的功率.

【解】 按題意: $m = 30 \text{ 公斤}$, $q = 11,000 \text{ 千卡} / \text{公斤}$,
 $\eta = 25\% = 0.25$, $J = 427 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{千卡}$,
 $t = 1 \text{ 小时} = 3600 \text{ 秒}$.

石油燃燒时放出的热量

$$Q = qm,$$

有效的热量

$$Q_1 = Q \cdot \eta = qm \cdot \eta,$$

有用的功

$$W = Q_1 \cdot J = qm \cdot \eta \cdot J,$$

发动机的功率

$$N = \frac{W}{t} = \frac{qm \cdot \eta \cdot J}{t} = \frac{11,000 \times 30 \times 0.25 \times 427}{3600}$$

$$\approx 9810 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{秒} \approx 131 \text{ 馬力}.$$

例 11. 一辆机車的功率是 2500 馬力, 行駛了 5 小时 50 分, 求它所消耗的标准燃料. 机車的效率是 20%.

【解】 按題意: $N = 2500 \text{ 馬力} = 187,500 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{秒}$,

$$\eta = 20\% = 0.2, \quad t = 5 \text{ 小时 } 50 \text{ 分} = 21,000 \text{ 秒},$$

$$J = 427 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{千卡}, \quad q = 7000 \text{ 千卡} / \text{公斤}.$$

有用功

$$W = N \cdot t,$$

有效热量

$$Q_1 = \frac{W}{J},$$

总热量

$$Q = \frac{Q_1}{\eta} = qm,$$

∴ 所消耗的燃料为

$$\begin{aligned} m &= \frac{Q_1}{\eta \cdot q} = \frac{W}{\eta \cdot q \cdot J} = \frac{N \cdot t}{\eta \cdot q \cdot J} = \frac{187,500 \times 21,000}{0.2 \times 7000 \times 427} \\ &= 6624 \text{ 公斤}. \end{aligned}$$

例 12. 汽车发动机的功率是 40 马力, 效率是 25%. 行驶 200 公里消耗汽油 50 公斤. 求它运动的平均速度. 已知汽油的燃烧值为 11,200 千卡/公斤.

【解】 按题意: $m = 50$ 公斤, $q = 11,200$ 千卡/公斤,
 $\eta = 25\% = 0.25$, $N = 40$ 马力 = 3000 公斤·米/秒,
 $J = 427$ 公斤·米/千卡, $s = 200$ 公里 = 200,000 米.

汽油燃烧时放出的热量

$$Q = qm,$$

有效的热量

$$Q_1 = Q \cdot \eta = qm \cdot \eta,$$

有效的功

$$W = Q_1 \cdot J,$$

有效功率

$$\begin{aligned} N &= \frac{W}{t}, \quad t = \frac{s}{v}; \\ N &= \frac{W \cdot v}{s} = \frac{qm \cdot \eta \cdot J \cdot v}{s}. \end{aligned}$$

$$\therefore \bar{v} = \frac{N \cdot s}{qm \cdot \eta \cdot J} = \frac{3000 \times 200,000}{11,200 \times 50 \times 0.25 \times 427}$$

$$= 10 \text{ 米/秒} = 36 \text{ 公里/小时.}$$

习 题 2·8

1. 什么叫做热功当量？常用的数值有哪些？它的单位是什么？
2. 7000 千卡的热量相当于多少功？
3. 拖拉机的功率是 60 馬力，效率是 30%。求它工作八小时所消耗的煤油。
4. 飞机在 20 小时内消耗了 7.5 吨汽油，发动机的效率是 40%。求飞机发动机的平均功率，設 $q = 12,000$ 千卡/公斤。
5. 汽車以 54 公里/小时的速度行駛。汽油的儲备量是 20 公斤。如果发动机的功率是 50 馬力，效率是 30%，求它能行駛的路程，設 $q = 11,000$ 千卡/公斤。
6. 飞机以 720 公里/小时的速度飞行了 1800 公里。发动机的功率是 1600 馬力，效率是 30%。求飞机所消耗的汽油，設 $q = 12,000$ 千卡/公斤。
7. 汽車以 108 公里/小时的速度行駛时的功率为 140 馬力。如果它行駛 1 公里消耗汽油 0.3 公斤 ($q = 11,000$ 千卡/公斤)，求发动机的效率。
8. 根据功和热量在使物体内能改变方面的等效性来说明热功当量的物理意义。

§ 2·9 能的轉变和能量守恒定律

当物体克服摩擦力和媒质阻力作功时，其内部状态要发生变化。这时，机械能轉变为与物体内部状态有关的能量——内能。

在本章的前几节中，我們已經詳細地討論了内能的概念，并且研究了内能和机械能相互轉变的各种情况。讀者自然会产生这样的問題：在机械能与内能相互轉变的过程中，它們的量值是否有确定的关系？为了說明这个問題，讓我們仔細地討論一下焦耳实验。

在焦耳实验中，下落重物的势能先变为旋轉叶片和水的动能；

由于水层間的摩擦,动能又轉变为水的內能.这里我們遇到了一种形式的能量轉变为另一种形式能量的情形.下落重物的势能轉变为水的內能,功 W 或相当的热量 Q 就是所轉变成能量的量度.实验証明,做了 4.18 焦耳的功总会使 1 克水的温度升高 1°C . 因此,势能轉变为內能时能的总值沒有改变.

那么,动能轉变为內能时,数值上是否也守恒呢?

設质量为 m 的枪彈以速度 v 飞行,它的动能等于 $\frac{mv^2}{2}$. 当枪彈击中某一物体而陷在里面时,枪彈的动能轉变为枪彈和物体的內能,增加的內能可以用公式 $Q = cm(t_2 - t_1)$ 来計算. 假使在轉变的过程中沒有能量的散失,那么应该符合下列关系:

$$\frac{mv^2}{2} = J \cdot Q.$$

实验証实了这一結論:动能轉变为內能时,能量的总值保持不变.

由上面的討論可以得出結論:机械能轉变为內能时,能量是守恒的.

那么內能轉变为机械能时的情况又是怎样的呢?

在蒸汽机中,蒸汽膨脹推动活塞而做功,这时蒸汽的內能轉变为机械能.精确的測量指出,消耗 1 千卡的內能总能得到 427 公斤·米的功.这表示,內能轉变为机械能时也是守恒的.

大家知道,当电流通过导綫时,导綫会变热,此时,电能轉变为內能.实验証明,消耗一定量的电能总可以得到一定量的內能.这說明电能轉变为內能时也是守恒的.

不仅机械能轉变为內能、內能轉变为机械能、电能轉变为內能时能量的总值保持不变,事实上,任何形式的能量轉变为其他形式的能量时都是守恒的.

在自然界里所发生的一切过程中,能量既不会消灭,也不会創生,它只能从一种形式轉变为另一种形式.

这就是能的转变和能量守恒定律。由于这个定律是普遍适用的，因此被广泛地用来分析和研究各种自然现象，并且成为人们认识自然的重要依据。

这个定律在十八世纪为俄国学者罗蒙诺索夫首先发现。十九世纪又为德国科学家迈尔、亥姆霍兹和英国物理学家焦耳等人相继发展和确定。

正是由于各种形式的能量能够相互转变，才构成了自然现象的丰富性和多种多样性。

让我们从下述例子中来看看这个自然定律的重要作用。

太阳光的能量在照射地面时转变为土壤的内能，使土壤温度升高。土壤又把这些内能传给它表面的空气，热空气上升后形成了风。这样，太阳光的能量又转变为空气的动能，而另一部分太阳光的能量被地面上植物的叶子所吸收，并在植物中引起了复杂的化学反应，反应的结果生成有机化合物，于是太阳光的能量转变为植物的化学能。太阳光照在水面上，使一部分水蒸发、上升，在天空中形成云，再以雨、雪等形式落回地面，然后通过江河流入海洋。这样，太阳光的能量就转变为水的机械能。

这些机械能和化学能又在风力发电站、水力发电站和火力发电站中转变为电能。在工厂、矿山和家庭中，这些电能又转变为所需要的机械能（例如在各种机床中）、内能（例如在电炉中）和光能（例如在电灯中）。

近年来，人们已经掌握了把原子核能转变为所需要的能量的方法，从而获得了巨大的能源。

能的转变和能量守恒定律是自然界中最基本和最重要的定律之一，它是人类对自然现象长期观察和研究的经验总结。这一定律包括定性和定量两个方面，在性质上它确定了能量形式的可变性，在数值上肯定了自然界能量总和的守恒性。一种能量的减少，总是伴随某种能量的增加，一减一增，数值相等。各种不同形式的运动

(机械运动、热运动、电磁运动等等)都具有相应的能量,所以能量就自然地成为它们的共同量度. 正确地掌握这一定律是学好物理学的关键,也是研究其他问题的基本依据.

本章提要

1. 热的概念 热是物质的一种运动形态,它表示了物质微粒(分子、原子、电子等)的混乱运动. 这一概念起源于人们对物体冷热的感觉. 从现代观点来看,“热”和“内能”有不可分割的联系. 物体变热,表示它的内能在增加,变冷表示它的内能在减少. 对物体加热,表示用热传递的方式使它的内能增加.

2. 内能 物体的内能是分子无规则运动的动能和由分子之间相对位置所决定的势能之和. 内能的大小决定于物体的质量、聚集态(固态、液态、气态)、整块的还是分散的以及它的冷热程度.

3. 内能的变化 能够改变物体内能的物理过程有两种:做功和热传递.

4. 热传递的三种方式

(1) 对流——依靠液体或气体的流动来传播内能的方式.

(2) 传导——由于大量分子、原子的相互碰撞,使物体的内能由高温部分传至低温部分的过程. 传导是固体中传递内能的唯一方式.

(3) 辐射——物体发射的能量以光的速度沿直线向周围传播的过程. 依靠辐射可以把能量通过真空从一个物体传给别的物体. 太阳传给地球的热量就是以热辐射方式通过宇宙空间而来的.

在实际过程中,这三种方式往往是伴随出现的.

5. 热量 热量是由于温度差别所引起的内能转移的量度. 热量总是从高温物体向低温物体传递或由同一物体的高温部分向低温部分传递,直到温度差别完全消失为止.

6. 热量的单位:卡和千卡

(1) 卡——使1克纯水温度升高 1°C 时所需要的热量.

(2) 千卡——卡的一千倍,亦称大卡.

7. 物体的热容量 表征物体吸热或放热性能的物理量,它等于使物体温度升高 1°C 所需要的热量.

8. 物质的比热 单位质量的物质,温度变化 1°C 时吸收或放出的热量. 常用单位是卡/克·度和千卡/公斤·度.

9. 热平衡方程式 列出热平衡方程式的依据是温度不同的物体放在一起时要发生内能的传递, 如果它们跟外界不发生能量交换, 则它们内能的总和保持不变. 此时, 高温物体放出的热量, 就等于低温物体吸收的热量.

10. 热功当量 由于做功和热传递同样能够引起物体内能的变化, 因而根据使物体内能发生改变的程度来衡量跟单位热量相当的功, 叫做热功当量. 常用的热功当量为:

$$J = 4.18 \text{ 焦耳/卡} = 427 \text{ 公斤} \cdot \text{米/千卡}.$$

11. 焦耳实验 历史上最早测定热功当量的实验. 它对能的转变和能量守恒定律的建立, 具有极为重要的意义.

12. 能的转变和能量守恒定律 能量既不能消灭, 也不能创生, 它只能由一种形式转变为另一种形式. 它是自然界最普遍和最基本的定律之一.

复 习 题 二

1. 试举例说明在什么情况下物体的动能会变成内能.
2. 跳伞运动员在张开降落伞后, 他的运动很快地由加速降落变为匀速降落, 此时重力势能的减少转变为哪一种能量?
3. 温度相等的两杯水的质量各为 50 克和 100 克, 试问哪一杯水具有更多的内能? 哪一杯水的分子平均动能大? 为什么?
4. 杀虫药剂从喷雾器射出时, 变成为分散的雾状液沫, 假使温度保持不变, 药剂的内能有没有变化? 如果有的话, 是哪一部分内能起了变化?
5. 冰箱里的冰块, 为什么放在箱的顶部而不放在它的底部?
6. 在阳光照射下的雪面上撒一些煤灰, 煤灰下面的雪就融化得快一些, 为什么?
7. 使质量 m 克的物体温度升高 $t^{\circ}\text{C}$ 时, 需要热量 Q 卡. 求物体的热容量和比热.
8. 把温度为 $t_1^{\circ}\text{C}$ 和比热为 c_1 的物体 m_1 克放进温度为 $t_2^{\circ}\text{C}$ 和比热为 c_2 的液体 m_2 克中, 求混合体的末温度 t .
9. 根据下列实验数据, 计算出银的比热.

银的质量	10.2 克	水的质量	84.0 克
银的初温度	102°C	水的初温度	11.08°C

银投入水中后稳定时的末温度 11.69°C
10. 质量相等的三种不同液体 a 、 b 、 c 的初温度顺次为 15°C 、 25°C 和 35°C . a 和 b 混合后的末温度为 21°C ; b 和 c 混合后的末温度为 32°C . 试

求 a 和 c 混合后的末温度是几度?

11. 为了得到 36°C 的浴水 550 升, 把 11°C 的冷水和 66°C 的热水掺和起来, 问各需要多少升?

12. 怎样用量热器来测定炉子的温度?

13. 为了测定热功当量, 在实验室里采用了这样的一种方法: 在一个一端封闭的厚纸筒里装进一些铅丸后, 把筒的另一端也封起来, 记下室温 (即铅丸的初温度). 然后把纸筒迅速颠倒 100 次, 每一次都使铅丸从筒的一端落到另一端, 再测出铅丸的温度.

用这种方法得到下面的数据:

铅丸的质量	0.5 公斤
铅丸的初温度	10.5°C
每一次降落的高度	0.85 米
铅丸的末温度	17°C

从这些数值中计算出热功当量.

14. 重 10 吨的气锤从 2.5 米的高处落下, 打在质量为 200 公斤的铁块上. 要使铁块的温度升高 40°C , 气锤应该下落多少次? (假使气锤所做的功有 60% 转变为铁块的内能, 使它的温度升高.)

15. 拖拉机的功率是 100 马力, 每小时消耗石油 20 公斤, 求内燃机的效率.

16. 速度为 100 米/秒的铅弹射入木板里后, 它的动能全部转变为木板和铅弹本身的内能, 其中动能的一半用于使铅弹的温度升高, 求铅弹的温度升高多少度.

17. 如果把水滴在灼热的水平铁板上, 水可以保持相当长的时间而几乎不汽化. 如果把水滴在温热的水平铁板上, 水发出响声并很快蒸发掉. 这是什么道理?

第三章 物体的热膨胀

§ 3.1 物体的热胀冷缩

日常生活的经验告诉我们，一般物体受热时体积略为胀大，冷却时略为缩小，这就是所谓热胀冷缩现象。下面我们分别就气体、液体和固体三种情况来进行讨论。

拿一个烧瓶，用软木塞盖好，瓶塞中插入一根弯成直角的玻璃管，在玻璃管的水平部分里预先装一滴带有颜色的水，水滴最好在水平管的中间。如果用手握住瓶子(图 3.1)，使瓶中的空气受热，就可以看到玻璃管里的小水滴向左移动。这说明空气变热时，体积就会增大。然后把瓶放在桌子上，松开手后，我们会发现水滴又逐渐回到原来的位置。这说明空气变冷时，体积就会缩小。如果瓶中装的不是空气，而是任何一种别的气体，结果也是一样的。于是，我们得到下面的结论：

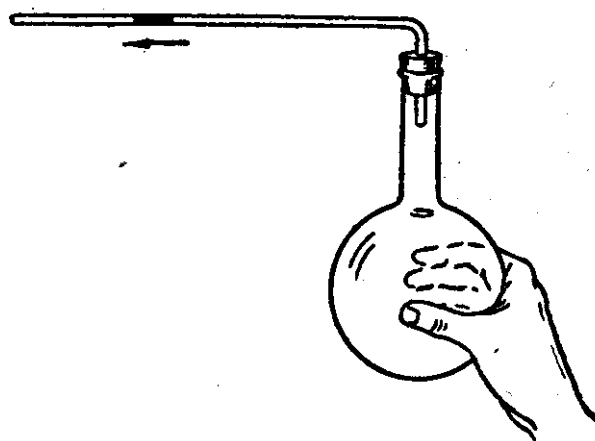


图 3.1 瓶中空气的热膨胀

一切气体受热的时候就膨胀，变冷的时候就收缩。

再拿两个同样大小的试管，里面分别装满带有颜色的水和煤油，两个试管都用插有同样粗细的细玻璃管的软木塞盖好，并且让玻璃管中的液面一样高。然后把两个试管同时竖直地放进盛有热水的杯子里(图 3.2)。几分钟后，水和煤油都因受热而开始膨胀，从液面的高低可以看出，煤油比水膨胀得多一些。然后将它们取

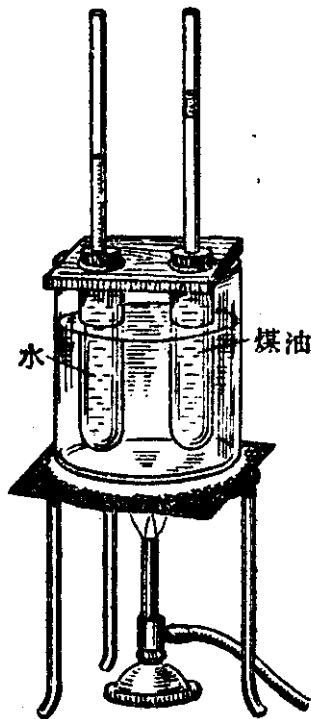


图 3·2 液体和气体
热膨胀的比较

出,让試管中的液体慢慢地冷却,于是液面又都回到原来的位置. 这說明,液体受热的時候就膨脹,变冷的时候就收縮;体积相同和受热情况一样时,不同液体的膨脹程度是不同的.

我們还可以比較液体和气体的热膨脹情况. 和上面一样,在两个同样大小的試管里,一个装满带有顏色的酒精或煤油,另一个装的是空气. 在装有液体的試管里,盖上軟木塞后,液面升到玻璃管里. 在盛空气的試管的玻璃管中預先装入一小滴带有顏色的水,并且让水滴和另一玻璃管中的液面同样高. 然后把这两个試管一起放到盛着热水的杯子里.

根据液面上升和水滴移动的程度,可以知道液体比气体膨脹得少.

在图 3·3 的装置中,将鉄棒的一端固定,另一端压在小針上,針下面垫一块玻璃板,針尖穿过一条厚紙(或一根麦秆). 鉄棒向右端伸长时,会使針和穿在針尖上的紙条发生轉动. 当对鉄棒进行加热时,可以看到紙条发生轉动,即鉄棒正在膨脹. 让鉄棒冷却,紙条就向反方向轉动. 用別的金属棒来做实验,結果也是一样.

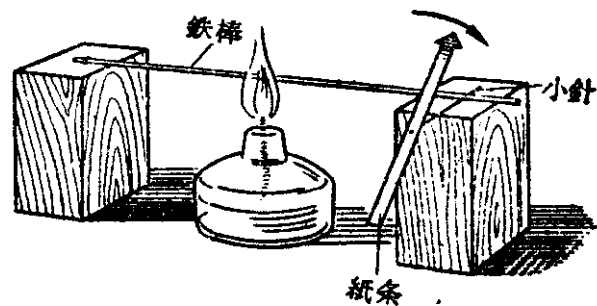


图 3·3 观察固体热膨胀的装置

因此,固体跟气体、液体一样,也是热脹冷縮的.

把細长的薄銅片和薄鉄片用釘密合起来,成为一个复棒(叫做双金属片). 对复棒进行加热时,它的自由端就向鉄片那一边弯曲,成了如图 3·4(a)中所示的样子. 这說明在同样的受热情况下,

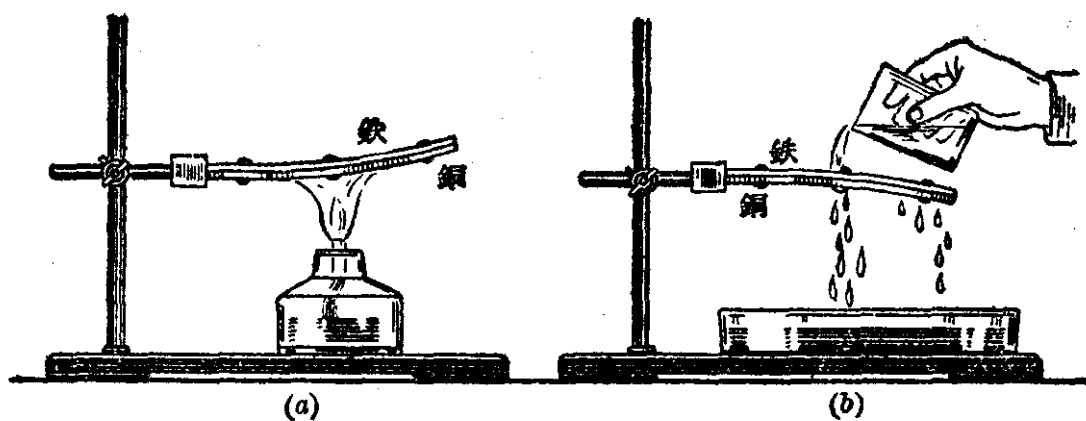


图 3·4 双金属片的膨胀

銅片比鐵片膨脹得多。如果用冰水澆在复棒上面，使它冷却，那末銅片就比鐵片收縮得多一些，因而复棒向銅片那边弯曲，成了如图 3·4(b)所示的样子。由此可見，在同样的情形下，不同固体的热脹冷縮程度是不同的。

如果在一個燒瓶中裝滿帶有顏色的水，瓶口用插有細玻璃管的軟木塞蓋好(图 3·5(a))，那么液面就升到玻璃管中。然后对燒瓶很快地进行加热，这时，管子里的液面先是稍微降低一些(图 3·5(b))，随后才开始上升(图 3·5(c))。这是什么原因呢？原来瓶子先受热膨脹，它的容积增大了，液面就自然要降低，但是等到液

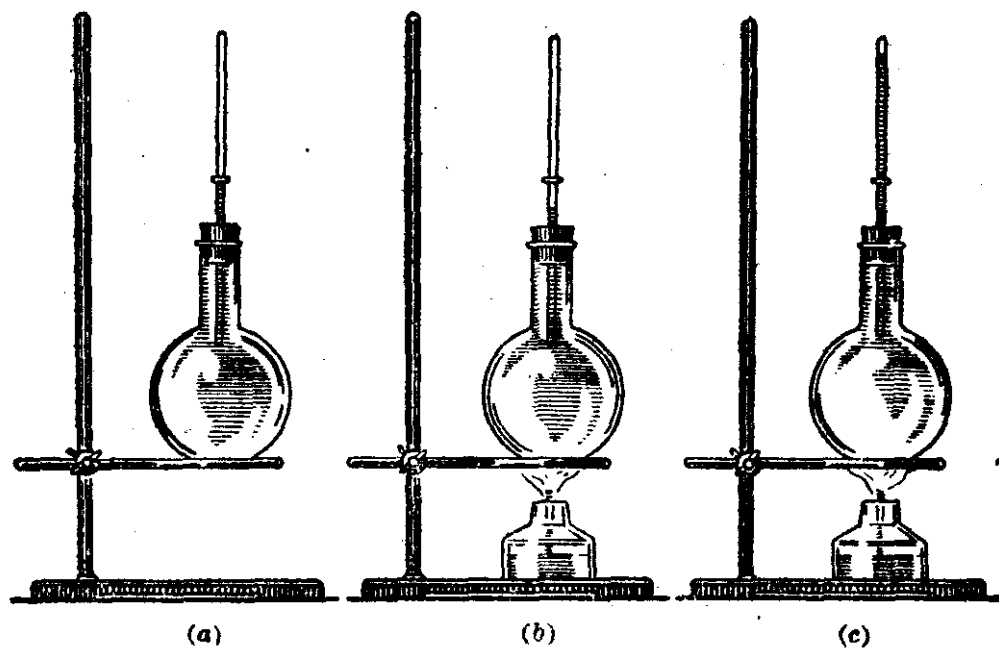


图 3·5 液体和固体膨脹的比較，橡皮圈表示膨脹前液面的高度

体也受热以后，液面会升到比原来还高的位置上去。这个现象告诉我们，在同样的情形下，液体的膨胀比固体的膨胀大。

从上面的研究中，我们得出下面的结论：

一般物体都是受热时膨胀，冷却时收缩。在同样的情形下，气体膨胀最大，液体膨胀次之，固体膨胀最小。

也有一些物质在一定的条件下不呈现出热胀冷缩的现象，例如，水从 4°C 降到 0°C 时，它的体积不是缩小而是增大。关于这个问题将在后面再进行讨论。

习 题 3·1

1. 被踩瘪的乒乓球，怎样使它重新恢复原来的形状？说明道理。

2. 把很热的玻璃杯倒放在盛有冷水的盘里(如图)，几分钟后，杯里的水面会比盘里的水面高一些，这是什么缘故？

3. 细颈瓶里装着煤油，用橡皮圈套在瓶颈上表示油面的高度。如果把瓶放到热水里，就可以看到油面先行下降，再开始上升。怎样解释这种现象？

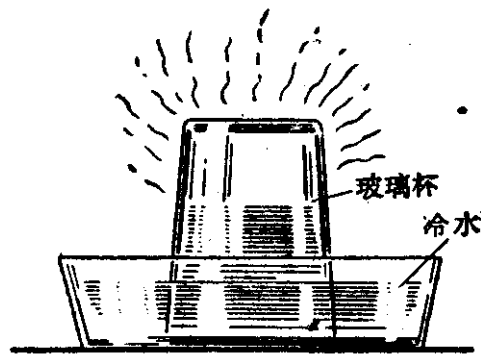
4. 玻璃瓶上的玻璃塞如果嵌得过紧而很难取出时，只要把瓶颈放在火上烘热，就能把瓶塞拔出，这是什么道理？

[提示：注意玻璃不善于导热，而瓶颈受热在先。]

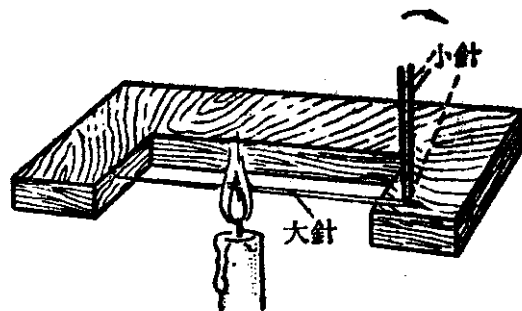
5. 举出一些说明液体和固体热胀冷缩的例子。

6. 如果冬天在室外将汽油装入汽油筒中，然后拿到室内存放，问装油时是否可以装满？为什么？

7. 拿一块如图所示的木板。把一个大针的针尖插在木块的左内侧面上，针眼那一头平放在右边的横头上。穿过大针的针眼竖直地插上一根小针到木板上，再在大针针眼的外面竖直地插上另一根小针。用蜡烛焰烧这一根大针时，可以看到，插在大针针眼中的那一根小针逐渐向右倾斜(见图



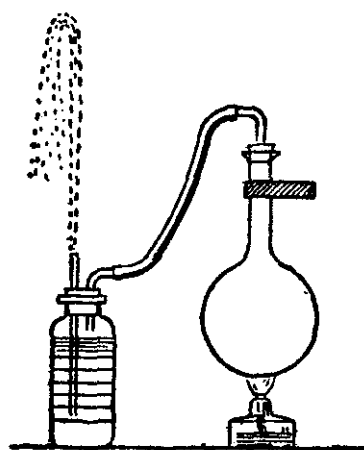
(第2题)



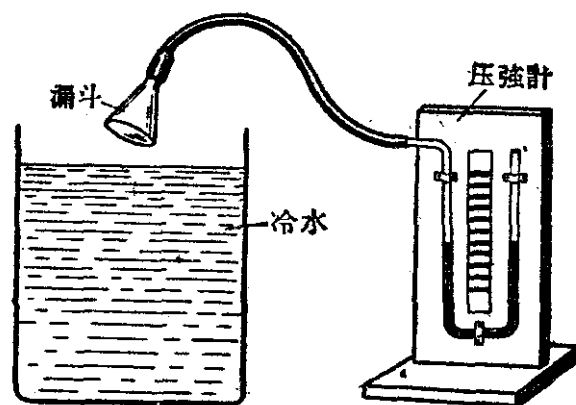
(第7题)

中的虛綫)。根据 § 3.1 中学到的知識来解釋这一現象。

8. 在夏天安装电灯綫或电话綫时,是否可以把綫拉紧?为什么?
9. 如果一个气压計的讀数在冬季某一天和夏季某一天都是 760 毫米高水銀柱。試問:两者的实际气压是否相等? 哪一个大一些?
10. 說明图中所示的“小噴泉”的作用原理。



(第 10 題)



(第 11 題)

11. 图中压强計兩側的液面高度原来是相等的。現在如果把包有橡皮薄膜的漏斗放在冷水中,試問兩側液面高度是否还保持相等? 如果將漏斗放入热水中又会产生什么現象?

§ 3.2 温度和溫度計

在第一章中,我們已經讲过,物体的温度是組成物体的分子平均动能的标志。現在我們进一步來說明如何測量物体的温度。

用手摸沒有生火的炉子,我們觉得它是冷的。如果炉子里生起火来,它就漸漸变热,从冷变暖再变成灼热以致燙手。在日常生活中,我們习惯于用手来接触各种物体,并且用冷的、凉的、湿的、热的、燙的这些形容詞来表示物体冷热的程度。物体冷热的程度,叫做物体的温度。例如热火炉的温度比冷火炉的高;冬天室外的气温比夏天的低。

显然,直接凭皮肤的感觉来判別物体的温度是不可靠的。譬如在冬天,我們从寒冷的室外走入室内时,把手放在温度等于室温的一盆水里,会觉得水是温暖的,但是当我們在火炉旁边把手烤热

以后,再把它放进同一盆水里,就会觉得水是凉的了. 这一点说明单凭感觉来判别物体的温度常常是靠不住的. 在不少情况下,甚至不可能凭感觉来判别物体的温度,例如比较两只炉子中火焰的温度.

因此,为了精确地测量物体的温度,就要使用一种特制的仪器,这种仪器叫做温度计.

前面说过,当物质的温度发生变化时,它的一系列物理性质都将随之而变化,这样,我们就可以根据不同的原理制成各种温度计. 下面只介绍最常用的一类温度计.

这类温度计是根据液体热胀冷缩的性质制成的. 日常用的有水银温度计和酒精温度计两种.

水银温度计是由一根孔径均匀的玻璃管制成的,它的管孔非常细小,管的下端有一个小玻璃泡. 把水银倒入玻璃管泡内,并且加热到超过开水的温度时,水银受热而发生膨胀,使多余的水银从管的上端开口处流出. 这时封闭管口. 待冷却后,因为水银的收缩比玻璃管的收缩厉害得多,水银柱就开始下降,使管内水银面的上部成了真空.

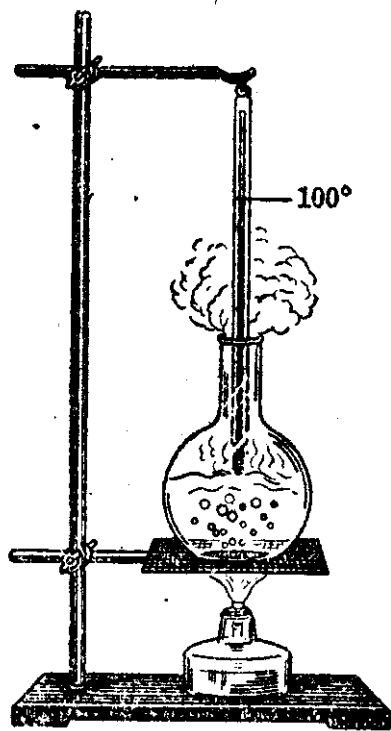


图 3·6 沸点的测定

把这样做成的仪器放在沸水的蒸汽里(图 3·6). 过一会儿,它的温度就跟蒸汽的温度相同,这时管中的水银柱上升到某一高度. 在玻璃管上或管后的木板上作一记号以标明水银面的位置,并在旁边注上数字 100. 再把这一仪器放到冰水混合物中(图 3·7),等它的温度跟冰水的温度一样时,水银柱下降到某一位置,也作一记号来标明这个位置,旁边注上数字 0.

然后把 0 和 100 之间的长度等分成

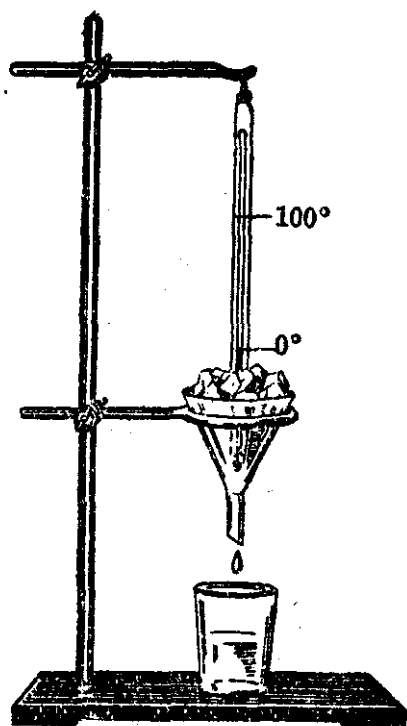


图 3·7 冰点的测定

一百等分，每一等分叫做一度，用记号“°”来表示。100° 以上和 0° 以下部分同样用上述的等分距离来刻度。这样就制成了温度计。0° 和 100° 叫做温度计的两个定点。0° 是水的结冰温度，叫做冰点；100° 是水的沸腾温度，叫做沸点。

用上面的分度法所定的温标叫做百分温标或摄氏温标，它是为了纪念首先创立这种温标的瑞典科学家摄氏而命名的。采用摄氏温标刻度的温度计叫做摄氏温度计。

它已经被普遍地应用在日常生活和科学技术上^①。

低于 0° 的温度要加上一个“负”字或记号“-”。例如 -25° 读作“负 25°”或“零下 25°”。

用摄氏温度计测出的温度数后面都要加一个拉丁字母 C，如 20°C，这个 C 字代表摄氏温标。

根据不同的用途，温度计的刻度范围也不同。图 3·8 是一般实验室用的温度计，最高的温度可以达到 140°C。家庭用的温度计（通常称为寒暑表）最高刻度到 50°C 就够用了。

温度计中不仅可以采用水银，还可以采用其他液体，象酒精等。因为水银在 -39°C 时就要凝结成固体，所以不能用它来测量很低的温度。在这种场合下，可以利用酒精温度计，因为酒精的凝固温度是 -114°C。但是，酒精在 80°C 时就要沸腾，所以使用

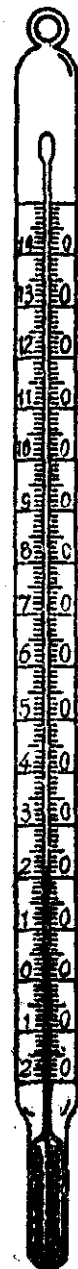


图 3·8 实验室用温度计

① 另一种华氏温度计目前在英、美等国，仍广泛地应用。

酒精溫度計不能測量高於 80°C 的溫度。

家庭用的多半是酒精溫度計。為了容易看清酒精液面起見，往往使酒精着上紅色或藍色。

溫度計只能指出跟它的玻璃泡相接觸的物體的溫度。因此我們在測量液體溫度的時候，不可以把它從液體中拿出來，否則溫度計的讀數就要發生變化。

測量室內空氣的溫度時，不可以把溫度計掛在靠近火爐的地方。測量室外空氣的溫度時，應當把溫度計放在空氣流通的陰暗處，不能讓陽光直接照在溫度計上。這是為了避免由於火爐或太陽對溫度計的直接輻射而使溫度計的讀數偏高。

最後，我們介紹測量人體溫度的醫用溫度計，又叫做體溫計（圖3·9）。這是一種水銀溫度計。體溫計的刻度範圍是從 34°C 到 42°C ，相當於人體溫度的變動範圍。健康人的體溫是 37°C 左右。體溫計管泡的容積要比上面的細管孔的容積大得多，管泡只要稍微受熱，管中水銀柱的長度就會發生顯著的變化。又每度的距離也比普通溫度計大得多，一般把它分成十等分，使體溫的測量能夠精確到十分之一度。

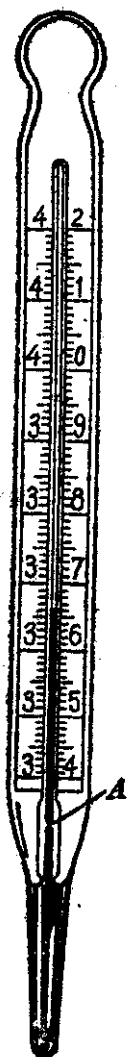


圖3·9 醫用溫度計

體溫計中的水銀柱上升後不能自動地退回到泡里去。這是因為管孔在A點附近做得非常細，當水銀膨脹的時候，很容易通過這裡升到上面的細管中去。當體溫計離開人體冷卻時，泡里的水銀一收縮，水銀就在A點處斷開，於是上面的水銀柱就退不回去了。所以體溫計在離開人體後所表示的溫度仍是人體的最高溫度。為了讓上面的水銀再回到泡里，必須拿着體溫計的上部，用力往下甩几下（注意：不是醫用溫度計可千萬不能甩）。

最高溫度計和最低溫度計是气象台为了測量某一段時間內（例如一晝夜）空氣的最高溫度和最低溫度所使用的兩種特制的溫度計。圖 3-10(a) 是最高溫度計，圖 3-10(b) 是最低溫度計。這兩種溫度計都是水平放置的。

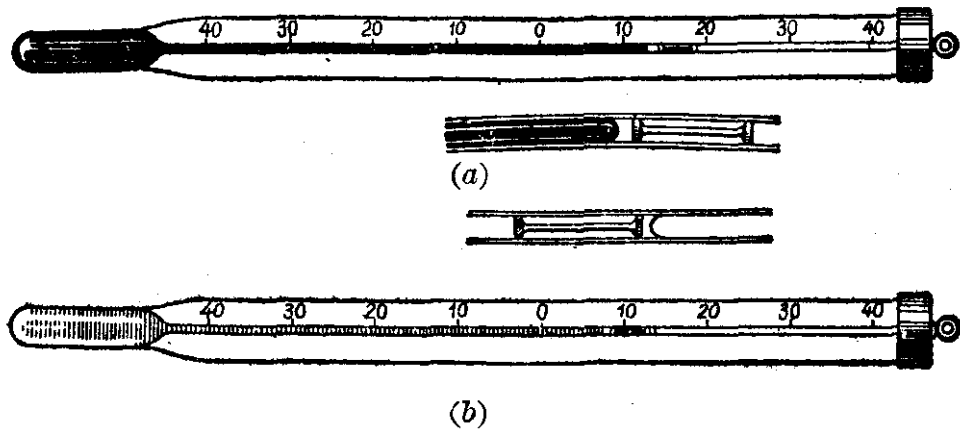


圖 3-10

(a) 最高溫度計； (b) 最低溫度計

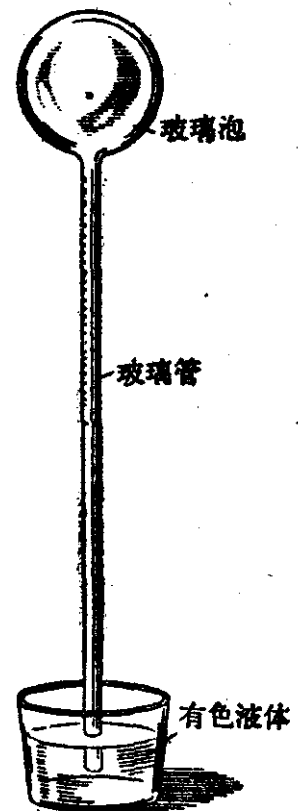
最高溫度計的管中裝着水銀，其右端有一根小鐵棒。溫度升高時，水銀柱膨脹，把小鐵棒推向右側。溫度降低時，水銀柱縮短，小鐵棒却留在原處。因此，小鐵棒的最右端位置就指示出這段時間內曾經達到過的最高溫度。

最低溫度計中裝的不是水銀，而是酒精。在管中也有一根玻璃小棒。當溫度下降時，酒精柱收縮，帶着小玻璃棒向左移動。當溫度升高時，酒精能自由地穿過玻璃棒和管壁之間的隙縫，而玻璃棒並不改變它的位置。因此，小玻璃棒的最左端位置就指示出兩次觀察之間這段時間中曾經達到過的最低溫度。

如果要用最高或最低溫度計來進行一次新的測量，那麼，只要把溫度計傾斜過來，並輕敲溫度計而使小棒滑向左側（對最高溫度計）或右側（對最低溫度計）就可以了。

習題 3-2

1. 普通溫度計是根據什麼原理制成的？
2. 什麼叫做溫度計的定點？它們是怎樣選定的？
3. 有兩個溫度計，它們的泡里裝有同樣多的水銀，但是玻璃管的內徑粗細不同。試問：當把它們同時放在蒸汽中時，兩水銀柱上升的高度是否相等？



(第 4 題)

4. 如图所示的是历史上第一个温度计,它是由伽利略在十六世纪发明的. 它的构造很简单,是一个带有细长玻璃管的玻璃泡,玻璃管的下端开口插在有色的液体中. 当加热玻璃泡时,有一部分空气从玻璃管中跑出.(为什么?) 等玻璃泡冷却后,有色液体就沿玻璃管上升到某一高度.(为什么?)

试问: 这个温度计是利用什么来指示温度的升高或降低的? 这个温度计的主要缺点是什么?

[提示:考虑大气压强的影响.]

5. 没有甩过的医用温度计的读数是 37.8°C . 用它来测量两个病人的体温,如果他们的体温分别是 37.4°C 和 38.2°C , 那么, 这个温度计上的读数将各是多少?

[提示:注意温度计构造上的特点.]

6. 如果温度计玻璃管的粗细是不均匀的, 那么温度计的刻度还能保持均匀吗? 为什么?

§ 3.3 固体的线膨胀

从这一节起我们将进一步从数量上来研究物体的热胀冷缩现象. 我们先讨论固体,再讨论液体,至于气体,由于情况比较复杂,所以留在第四章中再来讨论.

固体有一定的形状,因而也有一定的线度(球的直径,矩形梁的长、宽、高). 在一定的温度下,固体各个线度是一定的. 当固体受热后使温度升高时,它的各个线度都要增长. 这个现象叫做固体的线膨胀.

固体的线膨胀究竟跟哪些因素有关呢?

前面已经谈过,由不同物质组成的固体,即使它们原来的长度和升高的温度都相同,它们的线度的增长也不完全相同,有的增长得比较多,有的增长得比较少. 所以,固体的线膨胀首先跟组成固体的物质有关.

根据量度知道,尽管升高的温度相同,只要初温度不同,同一物体线度的增长也是不同的,高温时的线度增长要比低温时大一些,但是这种差别并不显著. 例如,1米长的铜棒,温度由 0°C 升

高到 1°C 时,增长0.0105毫米;由 100°C 升高到 101°C 时,增长0.0115毫米;由 200°C 升高到 201°C 时,增长0.0130毫米.因此,当温度变化不太大时,可以认为温度升高 1°C 时,物体长度的增长是一个定值.也就是说,物体长度的增长和温度的升高成正比.

如果把几根长度不同的铜棒都从 0°C 加热到 1°C ,在量出它们的伸长后,可以看出,原来较长的铜棒伸长得较多,原来较短的铜棒伸长得较少.精确的测量证明,当温度的升高相同时,固体长度的增长跟它们原来的长度成正比.

那么怎样来比较不同物质的膨胀特性呢?我们先讨论下面的例子.设有一根长1.5米的铁棒,在温度由 0°C 升高到 20°C 时伸长0.36毫米;而另一根长1.2米的铜棒,在温度由 0°C 升高到 15°C 时伸长0.31毫米.我们知道,直接根据0.36毫米和0.31毫米这两个数值是不能比较这两种物质的膨胀特性的,因为两根棒原来的长度不同,温度的升高也不同.但是,假如我们取相同长度的铁棒和铜棒,研究它们在升高相同温度时长度的增长,就可以比较它们的膨胀特性了.现在我们来计算一下,当温度升高 1°C 时,铁棒和铜棒每1米的伸长是1米的几分之几:

$$\text{铁棒} \quad \frac{0.00036 \text{ 米}}{1.5 \text{ 米} \times 20 \text{ 度}} = 0.000012 \frac{1}{\text{度}};$$

$$\text{铜棒} \quad \frac{0.00031 \text{ 米}}{1.2 \text{ 米} \times 15 \text{ 度}} = 0.000017 \frac{1}{\text{度}}.$$

计算的结果表示固体由于温度上升 1°C 所引起的长度增长跟它在 0°C 时的长度之比,这个比值叫做线胀系数.由此可以看出,铜的线胀系数大于铁的线胀系数.

温度下降 1°C 所引起的长度的缩短跟它在 0°C 时的长度之比,也等于线胀系数.

可以按下面的方法来测定固体的线胀系数:先测出固体在

0°C 时的长度 l_0 ，再测出它在 $t^\circ\text{C}$ 时的长度 l_t 。 $l_t - l_0$ 是温度上升 $t^\circ\text{C}$ 时固体的伸长。假定温度升高 1°C 时固体长度的增长是均匀的，那末 $\frac{l_t - l_0}{t}$ 就是温度升高 1°C 时固体的伸长。如果用 α 来代表綫脹系数，那么

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 t} \quad (3.1)$$

如果 $t = 1^\circ\text{C}$ ， $l_0 = 1$ 个单位长度，那么 $\alpha = l_t - l_0$ 。也就是说，綫脹系数的数值等于单位长度的固体从 0°C 升高到 1°C 时的伸长值。

由上式看出，綫脹系数 α 的单位是 $1/\text{度}$ 。

下表所列是一些物质在通常温度范围内的綫脹系数。

物 质	綫脹系数(1/度)	物 质	綫脹系数(1/度)
铝	0.000024	黄 铜	0.000019
錫	0.000004	銀	0.000019
鉄	0.000012	鋼	0.000011
殷 鋼	0.0000015	玻 璃	0.000004~0.000010
銅	0.000017	水 泥	0.000014
錫	0.000027	生 鉄	0.000029
石 英 玻 璃	0.0000005		0.000010
鉑	0.000009		

必須注意，殷鋼和石英的綫脹系数很小，这使它們具有很大的实用价值。殷鋼可以用于精密的仪器中，例如用来制造标准时钟的摆，就可以使时钟的快慢不受温度变化的影响。其他如精密量度用的标准尺，也是由殷鋼制成的。

公式(3.1)也可以写成下面的形式：

$$l_t - l_0 = \alpha l_0 t; \quad l_t = l_0 + \alpha l_0 t; \quad \text{或} \quad l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (3.2)$$

式中的 $(1 + \alpha t)$ 叫做綫脹二項式，它表示固体在 $t^\circ\text{C}$ 时的长度同它在 0°C 时长度的比值。

如果知道了固体在 0°C 时的长度和它的綫脹系数，就可以很

容易地根据这个公式计算出它在任意温度下的长度。

但是通常我們所知道的不是物体在 0°C 时的长度 l_0 ，而是在 $t_1^{\circ}\text{C}$ 时的长度 l_1 ，那么应当怎样计算它在温度 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时的长度呢？

当然，我們可以利用 (3.2) 式先求出物体在 0°C 时的长度 l_0 ，再求出它在 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时的长度 l_2 ，但是考虑到这样进行计算比較麻煩，因而一般都采用另外一个近似的公式。

根据公式 (3.2)，我們有

$$l_1 = l_0(1 + \alpha t_1),$$

和

$$l_2 = l_0(1 + \alpha t_2).$$

两式相除得

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{l_0(1 + \alpha t_2)}{l_0(1 + \alpha t_1)} \quad \text{或} \quad \frac{l_2}{l_1} = \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1}.$$

上式的右端可以化成

$$1 + \alpha t_2 - \alpha t_1 + \frac{\alpha^2 t_1^2 - \alpha^2 t_1 t_2}{1 + \alpha t_1}.$$

最后的分式項可以忽略不計，因为綫脹系数已經很小，它的平方就更小了。

于是，我們近似地得到

$$l_2 = l_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]. \quad (3.3)$$

例 1. 銅綫在 0°C 时的长度是 50 米。問温度降到 -20°C 时它的长度将发生怎样的变化？

【解】 按題意： $\alpha = 0.000017/\text{度}$ ， $t = -20^{\circ}\text{C}$ ，

$$l_0 = 5000 \text{ 厘米}.$$

由式 (3.1) 可得

$$l_t - l_0 = \alpha l_0 t = 0.000017 \times 5000 \times (-20) = -1.7 \text{ 厘米}.$$

銅綫縮短 1.7 厘米。

例 2. 鉄棒在 0°C 时的长度是 40 厘米。将它放入火炉中，伸长了 4 毫米，求火炉的温度。

【解】 按題意： $\alpha=0.000012/\text{度}$ ， $l_0=40$ 厘米，

$$l_t - l_0 = 0.4 \text{ 厘米.}$$

由式(3.1)可得

$$t = \frac{l_t - l_0}{\alpha l_0} = \frac{0.4}{0.000012 \times 40} = 833^\circ\text{C}.$$

例 3. 在 30°C 时，用鋼制游标卡尺測得零件的直徑是 9 厘米。如果游标卡尺是在 20°C 时进行刻度的，求測量的絕對誤差。

【解】 按題意： $\alpha=0.000011/\text{度}$ ， $t_1=20^\circ\text{C}$ ，

$$t_2=30^\circ\text{C}, \quad l_1=9 \text{ 厘米.}$$

因为一般測量时的温度都是 20°C ，所以游标卡尺在这一温度下刻度。現在在 30°C 下进行測量，則标尺的每一分度都要伸长，于是，測量就有誤差。

由公式(3.3) $l_2=l_1[1+\alpha(t_2-t_1)]$ ，可得測量誤差为：

$$\begin{aligned} l_2 - l_1 &= l_1 \alpha (t_2 - t_1) = 9 \times 0.000011 \times (30 - 20) \\ &= 0.001 \text{ 厘米.} \end{aligned}$$

零件的真实直徑要比測量到的值大 0.001 厘米。

例 4. 在車床上加工用生鐵制成的滑輪时，滑輪的温度上升到 150°C ，此时它的直徑是 48 厘米。求它在 20°C 时的直徑。

【解】 按題意： $\alpha=0.00001$ ， $t_1=20^\circ\text{C}$ ，

$$t_2=150^\circ\text{C}, \quad l_2=48 \text{ 厘米.}$$

問題是已知滑輪在 150°C 的直徑，要求它在 20°C 时的直徑。

由公式(3.3) $l_2=l_1[1+\alpha(t_2-t_1)]$ ，可得

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{l_2}{1+\alpha(t_2-t_1)} = \frac{48}{1+0.00001 \times (150-20)} \\ &= 47.9 \text{ 厘米.} \end{aligned}$$

例 5. 钟摆振动的周期由公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 决定，式中 T 是周期， l 是摆长， g 是重力加速度。如果钟本来是准确的，当温度升高 20°C 时，它是否还能指示出准确的时刻？如果不能，試問它在一

昼夜里快还是慢几秒钟？設摆杆是鉄制的，它的綫脹系数是 $0.000012/\text{度}$ 。

【解】 当温度升高时，由于膨脹的結果， l 将要伸长一些。因此，摆的周期变长，而且在一定時間內（例如一昼夜）的振动次数要减少，所以钟也就走得慢一些。很明显，在一定的時間內钟摆的振动次数跟它的周期成反比。

設钟准确时其摆长为 l_1 ，一昼夜的振动次数为 n_1 （为了計算方便起見，可以假定其为秒摆，这样 $n_1=86,400$ 次）。温度升高 20°C 后，設摆长变为 l_2 ，則 $l_2=l_1(1+\alpha t)=l_1(1+0.000012\times 20)=1.00024l_1$ ，一昼夜的振动次数为 n_2 ，則

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}} = \sqrt{\frac{1}{1.00024}},$$

因得
$$n_2 = n_1 \sqrt{\frac{1}{1.00024}} = 86,389.6 \text{ 秒,}$$

所以一昼夜要慢

$$86,400 - 86,389.6 = 10.4 \text{ 秒.}$$

习 題 3.3

1. 对金属环进行加热时，它的內徑发生怎样的变化？为什么？
2. 銼床上銼着一个鉄的圓柱体，在 120°C 时，它的直径是 160 毫米，試問冷却到室温 (20°C) 时，它的直径是多少？
3. 有一根銅尺和一根鉄尺，在任何温度下，这两根尺的长度总是相差 l ，問它們在 0°C 时的长度各等于多少？

[提示：設銅尺和鉄尺在 0°C 时的长度分別为 l_0 和 l'_0 ，在 $t^\circ\text{C}$ 时的长度各为 l_t 和 l'_t ，則 $l'_t - l_t = l$.]

4. 黃銅球在 20°C 时的直径为 4 厘米，要使这个球不能从內半径为 20.1 毫米的圓环中穿过，必須使它的温度升高到几度？

5. 玻璃瓶的玻璃塞直径为 25 毫米，为了要把塞子拔出，必須对瓶頸进行加热，当瓶頸热到 150°C 时，瓶塞只热到 50°C 。这时瓶頸和瓶塞之間的空隙有多大？（設 $\alpha=0.000044/\text{度}$ ）

6. 有一根实心棒和一根空心管，由同一种材料制成，直径和长度完全一样。问受热时，它们尺寸的改变是否相同？
7. 钢琴中的弦张紧在钢的框上。问温度变化时，弦的张紧程度是否会改变？
8. 如果对原来平衡的灵敏天平的一臂加热，是否还能保持平衡？那一边下垂？
9. 钟摆的杆由黄铜制成，线胀系数为 $0.000019/\text{度}$ ，在 25°C 时钟恰好正确，问在 0°C 时一天要差几秒钟？是走得快还是走得慢？

§ 3.4 固体的体膨胀

固体受热时，它的各个线度都要增长，因此，它的体积也增大。这种增大的现象叫做固体的体膨胀。

跟线胀系数相似，我们可以用体胀系数来表明不同物质的体膨胀特性。实验指出，象线膨胀一样，当温度变化范围不太大时，也可以认为固体体积的增大跟温度的升高成正比。

由于温度上升 1°C 所引起的固体体积的增大跟它在 0°C 时的体积之比，叫做体胀系数。

温度下降 1°C 时固体体积的缩小跟它在 0°C 时的体积之比，也等于体胀系数。

设固体在 0°C 时的体积为 V_0 ，在 $t^\circ\text{C}$ 时的体积为 V_t ，则 $V_t - V_0$ 是温度升高 $t^\circ\text{C}$ 时固体体积的增大， $\frac{V_t - V_0}{t}$ 是温度升高 1°C 时固体体积的增大。如果用 β 表示体胀系数，那么

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t} \quad (3.4)$$

体胀系数的单位也是 $1/\text{度}$ 。

当 $V_0 = 1$ 个单位体积和 $t = 1^\circ\text{C}$ 时， $\beta = V_t - V_0$ 。也就是说，体胀系数的数值等于单位体积的固体从 0°C 升高到 1°C 时体积的增长值。

公式(3.4)还可以写成：

$$V_t - V_0 = \beta V_0 t; \quad V_t = V_0 + \beta V_0 t;$$

或

$$V_t = V_0(1 + \beta t). \quad (3.5)$$

因此,只要知道固体在 0°C 时的体积和它的体脹系数,就能够根据这个公式计算出它在任意温度下的体积. 上式中的 $(1 + \beta t)$ 称为体脹二項式,它表示固体在 $t^\circ\text{C}$ 时的体积同它在 0°C 时体积的比值.

与§3.4中的討論相似,由于固体的膨脹很小,所以在一般計算中可以用溫度 $t_1^\circ\text{C}$ 时的体积 V_1 来代替公式(3.5)中的 V_0 ,用溫度的变化 $(t_2 - t_1)$ 来代替 t . 于是溫度 $t_2^\circ\text{C}$ 时的体积 V_2 可以由下面的近似公式来表示:

$$V_2 = V_1[1 + \beta(t_2 - t_1)]. \quad (3.6)$$

§ 3.5 固体的綫脹系数和体脹系数之間的关系

我們知道,固体受热或冷却时体积的变化是由各个綫度的变化决定的,因此,体脹系数和綫脹系数之間必然有一定的关系. 現在我們来看看它們之間到底存在什么关系.

設有一个立方体,在 0°C 时每边的长度是1厘米(图3.11). 如果在溫度发生变化时,它在各个方向上长度的变化也相同,即当溫度升高 1°C 时,每边长度变为 $(1 + \alpha)$. 这时立方体的体积 V_t 等于:

$$V_t = (1 + \alpha)^3 = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3.$$

从体脹系数的角度来看,立方体的体积 V_t 可以按下式計算:

$$V_t = 1 + \beta \cdot 1 = 1 + \beta.$$

因此,我們得到

$$1 + \beta = 1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3.$$

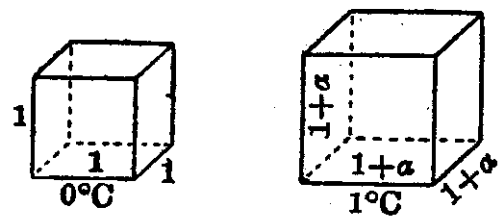


图3.11 推导綫脹系数和体脹系数之間关系的輔助图

由于 α 的数值已经很小, 所以 $3\alpha^2$ 和 α^3 的数值更小, 可以忽略不计, 因而得到下列的近似关系:

$$\beta = 3\alpha.$$

固体的体胀系数等于它线胀系数的三倍, 例如铁的线胀系数为 $0.000012/\text{度}$, 则它的体胀系数等于 $0.000036/\text{度}$.

一般在计算中只给出线胀系数, 此时固体的体胀公式可以写成:

$$V_t = V_0(1 + 3\alpha t)$$

以及

$$V_2 = V_1[1 + 3\alpha(t_2 - t_1)].$$

例 6. 铝制容器在 20°C 时的容积是 100 米^3 . 当温度升高到 70°C 时, 试问它的容积增加多少?

【解】 按题意: $V_1 = 100 \text{ 米}^3$, $t_1 = 20^\circ\text{C}$,

$$\alpha = 0.000024/\text{度}, \quad t_2 = 70^\circ\text{C}.$$

由公式 $V_2 = V_1[1 + \beta(t_2 - t_1)]$, 可得

$$V_2 - V_1 = V_1\beta(t_2 - t_1).$$

但 $\beta = 3\alpha$, 因此

$$\begin{aligned} V_2 - V_1 &= V_1 3\alpha(t_2 - t_1) = 100 \times 3 \times 0.000024 \times (70 - 20) \\ &= 0.36 \text{ 米}^3. \end{aligned}$$

例 7. 黄铜片在 0°C 时长 20 厘米, 宽 15 厘米, 求它在 80°C 时的面积, 已知黄铜的线胀系数为 $0.000019/\text{度}$.

黄铜片在 80°C 时的面积, 应该等于它在 80°C 时的长和宽的乘积, 所以得到

$$\begin{aligned} A_{80} &= [20(1 + 0.000019 \times 80)][15(1 + 0.000019 \times 80)] \\ &= 20 \times 1.00152 \times 15 \times 1.00152 \\ &= 300.912 \text{ 厘米}^2. \end{aligned}$$

习 题 3.5

1. 有一块长 60 厘米和宽 50 厘米的铜板, 把它从 20°C 加热到 600°C

时,它的面积增大了多少?

2. 对 0°C 时体积等于60厘米 \times 20厘米 \times 5厘米的铁梁加热,问它得到了400千卡的热量后体积增加了多少?

3. 要使 0°C 时长100米和横截面积为20厘米²的铁轨在加热后伸长0.6厘米,需要几千卡的热量?

4. 如果固体的膨胀程度在不同方向上并不一致,在三个相互垂直方向上的线膨胀系数分别为 α_1 、 α_2 和 α_3 ,那么它的体膨胀系数 β 将近似地等于 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$,试加以证明.

5. 为什么浇铸金属的铸模总是要比铸件的尺寸大一些?

6. 受热时,容器的容积将如何改变?

7. 将搪瓷的器具放在火上烧过后,为什么表面上会出现裂纹?

8. 为了将生锈的螺栓旋下来,只要用烙铁将它加热,等它冷却后,就可以很容易地把它旋出,试说明其理由.

9. 为什么金属在温度变化很剧烈时,不会产生裂纹,而石块在同样的条件下就会产生裂纹?

§ 3.6 热膨胀在技术上的意义

从§ 3.3的表中我们看到,固体的线膨胀系数是非常小的,因而温度改变时固体长度的变化也很小.但是,这种微小的膨胀现象却会产生很大的作用力,以致使固体发生裂纹或破坏.例如,冬天将开水倒入厚的玻璃杯时,常常会引起杯子的破裂.这是由于玻璃的导热性能差,它的内壁受热和膨胀得比外壁快,因而产生了很大的向外膨胀的力,使杯子破裂.

我们已经知道,1米长的钢棒,当温度升高 40°C 时,就会伸长到1.0005米.而实验证明,如果要使这根横截面是1厘米²、长是1.0005米的钢棒缩短为1米,就要对它施加1000公斤的压力.根据牛顿第三定律,这时钢棒对阻碍它膨胀的物体所施加的力也是1000公斤.

如果在工程技术上没有考虑到固体膨胀时所产生的巨大的

力，缺乏适当的防护措施，结果会使各种建筑物遭受严重的损坏。例如，铺设铁轨的时候，两根铁轨接头的地方不是紧贴着的，而要留出一定的空隙(图 3·12)。这样，受热膨胀时，铁轨还有伸长的余地。又如，长的桥梁只有一端固定，另一端是架在滚子上的(图 3·13)，这样就使得桥梁能够自由伸缩，从而不受到膨胀的影响。其他如电线都不是张得很紧的，这是为了避免在冬天被拉断；蒸汽管道或煤气管道上都装有如图 3·14 所示的伸缩管，导管在受热伸长或冷却缩短的时候，只改变伸缩管的弯曲程度，而不会影响其他的部分，这样可以保护管道不致于受到损坏。

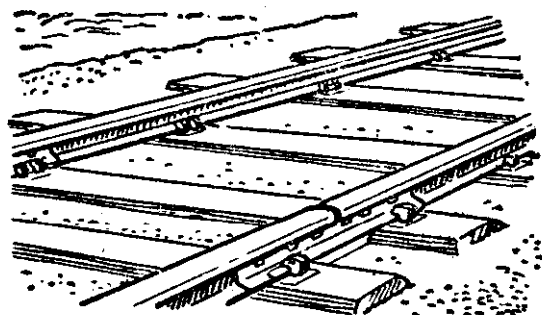


图 3·12 铁轨间的缝隙

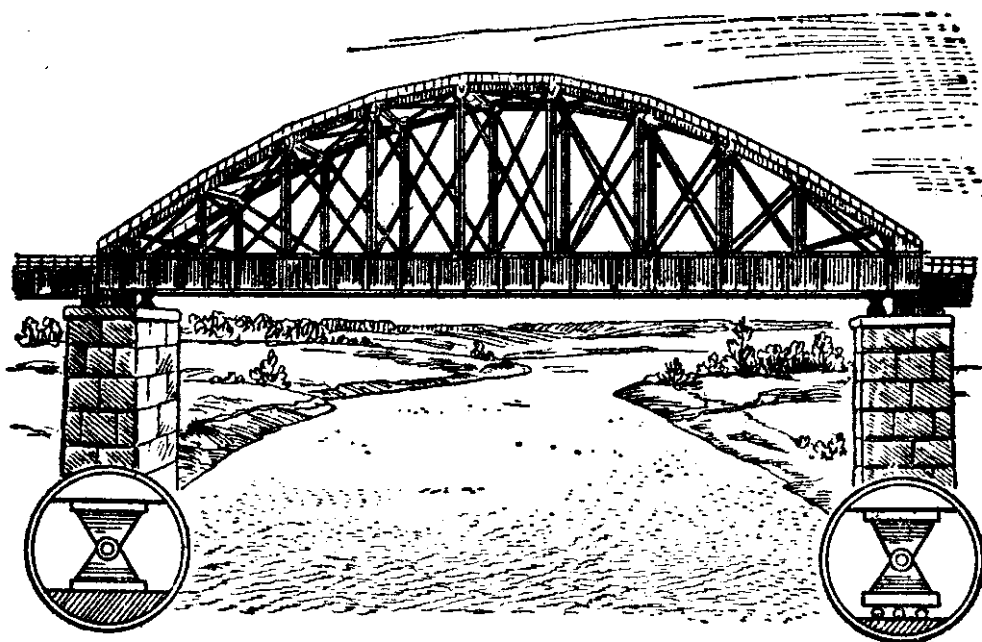


图 3·13 铁桥的一端支架在滚子上

在进行精密的量度时，必须考虑到热胀冷缩的现象。在前面的例题中，我们已经知道，如果量具（例如卡尺或刻度尺）本身的长度随着温度的改变而发生显著的变化，那么用它来进行量度就达不到所需要的精确度。为了避免这种误差，被量度的制品应该在早一些的时候拿到进行量度的地方，使它们的温度同量具相等。进行精密量度的各种量具，都要用膨胀系数极小的材料来制造。殷钢就是一种膨胀系数极小的材料（它的膨胀系数是 $0.0000015/度$ ）。

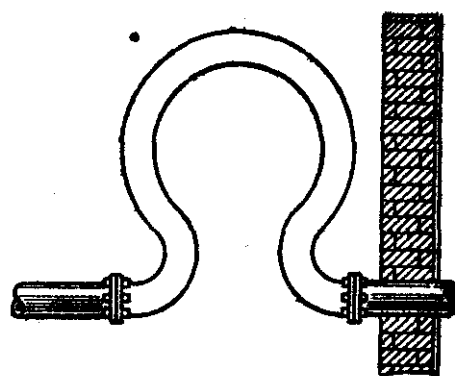


图 3·14 蒸汽管道中的补偿装置

从前面的表中可以看出，石英玻璃的膨胀系数比殷钢的还要小。因此，用石英玻璃制成的容器，在冷热变化非常剧烈（例如把它烧红以后立刻放入冷水里）的时候，也不会破裂。正是因为这个缘故，需要经受剧烈温度变化的仪器常常用石英玻璃来制造。

各种建筑物、机器和仪器通常都是用不同的材料制成的。在选择这些材料时必须考虑到使它们的膨胀系数尽量相等。例如，焊接在电灯泡玻璃中的那部分金属导线的膨胀系数必须跟玻璃的相等^①，这样，当温度发生变化时，金属导线和玻璃之间的接合就不会松开，同时玻璃也不会被导线胀破。

由于铁和混凝土的膨胀系数相等，所以在建筑物中广泛地采用了钢筋混凝土的构件。当温度改变时，在这种构件中不会产生任何使建筑物变得不坚固的有害的作用力。

另一方面，在工程技术上也常常利用固体的热膨胀。例如，火车车轮的轮箍就是利用热胀冷缩的原理装在车轮上的。轮箍是用硬质钢材制成的，它的内径稍小于车轮的外径。对轮箍进行加热，使它膨胀后的内径大于车轮的外径，然后再把车轮嵌进去。这样，

^① 目前都用铁和锡的合金（称为“假铂”）来代替贵重的铂。

原书缺页

时, M 遇到接触点 K ; 当 C 更加弯曲时, M 离开 K 。如果把 M 和 K 串联在电热器的电路 AA_1 中, 那么 M 和 K 接触时, 电路接通, 电热器开始加热, 使双金属片 C 的温度升高。当温度达到某一定值时, 由于 C 更加弯曲, M 离开 K , 电路断开, 电热器停止加热。当温度再一次降低时, C 又伸展使电路接通。这样, 就可以自动地保持恒定的温度。

(3) 钟摆的补偿装置 它是由三根黄铜棒和两根放在它们中间的锌棒组成(图 3-17)。温度升高时, 铜棒伸长, 使摆锤下降, 但同时锌棒伸长, 使摆锤上升。因此, 温度改变时, 摆的周期仍保持不变。

习 题 3·6

1. 为什么钢筋混凝土结构的强度不受温度变化的影响?
2. 用于耐高温的玻璃容器的器壁为什么一定要做得很薄?
3. 能不能用铜丝来代替电灯泡里的铁镍合金丝? (后者的膨胀系数和玻璃一样)。
4. 在飞机引擎内压入衬套时, 以往是将笨重的引擎外壳加热, 现在却采用了一种更为简便的方法。试根据学过的知识推想这种新方法的大致内容。
5. 为什么在用于精密测量的量具上都注有测量时的标准温度?
6. 在铺水泥路面时, 总是要将路面划成一格一格。说明这种做法的用意何在。

§ 3·7 液体的热膨胀

液体没有一定的形状和长度, 但是却有一定的体积, 所以对于液体来说, 有意义的只是体胀系数。液体的体胀系数比固体的要大得多。实验证明, 液体的体积与温度的关系和固体的相同, 可以用同一个公式来表示。

如果液体在 0°C 时的体积是 V_0 , 则它在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的体积为:

$$V_t = V_0(1 + \beta t),$$

式中 β 是液体的体胀系数。

液体的体胀系数可以用图 3-18 所示的仪器来测定。这种仪器是一个带有细口长颈的烧瓶, 它的容积是已知的。在测定某种

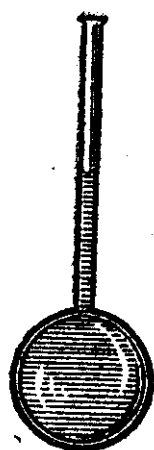


图 3-18 测定液体体
胀系数的
仪器

液体的体胀系数时，先把 0°C 的液体装在烧瓶中，一直装满到颈口为止。然后将烧瓶加热到某一温度 t ，这时有一部分液体从瓶中溢出。再把它放在冰水混合物中使它冷却到 0°C ，这时，由于液体的体积缩小，液面由颈口处下降，于是瓶中空出来的那部分容积就是液体由 $t^{\circ}\text{C}$ 降低到 0°C 时所缩小的体积，也就是等于液体由 0°C 升高到 $t^{\circ}\text{C}$ 时所增大的体积。知道了温度的变化 t ，量出了这部分空出的容积，就能够求出液体的体胀系数。

但是我们知道，由于烧瓶本身受热时也要膨胀，冷却时也要收缩，这样测出来的体胀系数显然比液体真正的体胀系数要小一些，它等于液体真正的体胀系数跟固体的体胀系数之差，我们把它叫做视体胀系数。要求出液体真正的膨胀系数，必须在上面对应的数值上加上固体的体胀系数。可是由于固体的体胀系数要比液体的体胀系数小得多，因而在一般的计算中可以略去不计，即把液体的视体胀系数当作液体真正的体胀系数。当然，为了减小测量的误差，烧瓶应该用膨胀系数非常小的物质（例如石英玻璃）来制造。

下表中列出了几种液体的体胀系数的数值。

物 质	体胀系数(1/度)	物 质	体胀系数(1/度)
水	0.00018	乙 醚	0.00166
煤 油	0.00100	甘 油	0.00050
酒 精	0.00110	硫 酸	0.00056

例 8. 煤油在 0°C 时的体积是 40 米^3 ，问它在 -25°C 时的体积是多少？

【解】 按题意： $V_0 = 40 \text{ 米}^3$ ， $\beta = 0.001/\text{度}$ ，
 $t = -25^{\circ}\text{C}$ 。

煤油在 -25°C 时的体积由下式求出：

$$\begin{aligned}V_t &= V_0(1 + \beta t) = 40[1 + 0.001 \times (-25)] \\ &= 40(1 - 0.001 \times 25) \\ &= 39 \text{ 米}^3.\end{aligned}$$

例 9. 圆柱形的大贮油铁筒在 0°C 时的高为 4 米，底的直径为 8 米，内装石油，油面离桶口 10 厘米，问温度为多少时石油恰好充满铁桶？

【解】 按题意： $d=8$ 米， $H_1=4$ 米， $H_2=3.9$ 米，
 $\alpha=0.000012/\text{度}$ ， $\beta=0.001/\text{度}$ 。

铁桶在 0°C 时的容积

$$V_0 = \frac{\pi d^2 H_1}{4},$$

石油在 0°C 时的体积

$$V'_0 = \frac{\pi d^2 H_2}{4},$$

铁桶在受热到 $t^{\circ}\text{C}$ 时的体积

$$V_t = V_0(1 + 3\alpha t) = \frac{\pi d^2 H_1}{4} (1 + 3\alpha t),$$

石油在受热后的体积

$$V'_t = V'_0(1 + \beta t) = \frac{\pi d^2 H_2}{4} (1 + \beta t),$$

按题意有

$$V_t = V'_t,$$

即

$$\frac{\pi d^2 H_1}{4} (1 + 3\alpha t) = \frac{\pi d^2 H_2}{4} (1 + \beta t),$$

$$H_1(1 + 3\alpha t) = H_2(1 + \beta t),$$

$$H_1 + 3\alpha t H_1 = H_2 + \beta t H_2,$$

$$H_1 - H_2 = \beta t H_2 - 3\alpha t H_1,$$

$$H_1 - H_2 = t(\beta H_2 - 3\alpha H_1),$$

因此,

$$t = \frac{H_1 - H_2}{\beta H_2 - 3\alpha H_1} = \frac{4 - 3.9}{0.001 \times 3.9 - 3 \times 0.000012 \times 4} \\ = 26.6^\circ\text{C}.$$

例 10. 球形玻璃容器在 0°C 时的容积是 100 厘米³, 此时球中盛有 96 厘米³ 的水銀. 加热到 270°C 时, 水銀恰好充滿整个的容器. 已知玻璃的綫脹系数是 $0.000009/\text{度}$, 求水銀的体脹系数.

【解】 按題意: $V_0 = 100$ 厘米³, $V'_0 = 96$ 厘米³,
 $t = 270^\circ\text{C}$, $\alpha = 0.000009/\text{度}$.

球受热后的体积

$$V_t = V_0(1 + 3\alpha t),$$

水銀受热后的体积

$$V'_t = V'_0(1 + \beta t),$$

按題意有

$$V_t = V'_t,$$

即

$$V_0 + 3\alpha V_0 t = V'_0 + \beta V'_0 t;$$

$$V_0 + 3\alpha V_0 t - V'_0 = \beta V'_0 t;$$

因此,

$$\beta = \frac{V_0 - V'_0 + 3\alpha V_0 t}{V'_0 t} = \frac{100 - 96 + 3 \times 0.000009 \times 100 \times 270}{96 \times 270} \\ = 0.00018/\text{度}.$$

习 題 3.7

1. 在容积为 10 升的鉄桶里裝滿了 5°C 的煤油, 如果要把鉄桶移到 20°C 的房間里, 将会有多少立方厘米的煤油流出来? 鉄桶的膨脹略去不計.

2. 水銀的体脹系数为 $\frac{1}{5550}/\text{度}$, 設水銀溫度計球部的容积为 0.5 厘米³, 細管的橫截面积为 0.05 毫米², 在 0°C 时, 水銀恰好充滿球部; 試問在 100°C 时, 水銀面将升高几厘米? 玻璃的膨脹略去不計.

3. 在 0°C 时玻璃容器内装满质量为 1.36 公斤的水银, 已知玻璃的体胀系数为 $0.000025/\text{度}$, 水银的体胀系数为 $0.000182/\text{度}$, 当温度升高到 100°C 时, 有多少立方厘米的水银被排出?

4. 在其他条件都相同时, 酒精温度计和水银温度计那一个更为灵敏?

5. 如果温度计中液体的体胀系数和玻璃的体胀系数相等, 那么这一温度计是否能用来测量温度?

6. 在天平的两端放两只同样大小、同样质量的玻璃杯, 其中一杯盛热水, 另一杯盛冷水(水的体积相同), 问天平是否能保持平衡?

7. 连通器中装有液体. 如果将一个容器加热, 而保持另一容器的温度不变, 问温度不变的那一个容器中的液面高度是否会改变? 分别讨论下列两种情况: 容器本身的膨胀很小; 容器本身的膨胀比较显著.

§ 3.8 物体的密度和温度的关系^①

物体的密度就是单位体积的物体所具有的质量. 如果质量为 m 的物体在 0°C 时的体积是 V_0 , 则 0°C 时该物体的密度是:

$$D_0 = \frac{m}{V_0}.$$

物体的质量不随温度而改变, 但是物体的体积却随温度而变化, 所以物体在受热或冷却时密度也要发生改变. 由于在 $t^{\circ}\text{C}$ 时物体的密度是

$$D_t = \frac{m}{V_t} \quad \text{或} \quad D_t = \frac{D_0 V_0}{V_t},$$

物体的体积是 $V_t = V_0(1 + \beta t)$, 因此得到:

$$D_t = \frac{D_0}{1 + \beta t}.$$

上式表示, 任意温度下物体的密度, 等于 0°C 时物体的密度除以体胀二项式.

例 11. 水银在 0°C 时的密度是 13.6 克/厘米³, 它的体胀系数是 $0.00018/\text{度}$. 求 200 克水银在 100°C 时的体积是多少?

① 这里讨论的只是固体和液体的密度和温度的关系.

【解】 按題意： $m=200$ 克， $D_0=13.6$ 克/厘米³，
 $t=100^\circ\text{C}$ ， $\beta=0.00018/\text{度}$ 。

在 100°C 时的密度

$$D_t = \frac{D_0}{1 + \beta t},$$

在 100°C 时的体积

$$V_t = \frac{m}{D_t}$$

或

$$V_t = \frac{m}{\frac{D_0}{1 + \beta t}} = \frac{m(1 + \beta t)}{D_0} = \frac{200(1 + 0.00018 \times 100)}{13.6} \\ = 15 \text{ 厘米}^3.$$

例 12. 煤油在 0°C 时的密度是 0.8 克/厘米³，求 500 厘米³ 煤油在 30°C 时的质量。

【解】 按題意： $t=30^\circ\text{C}$ ， $D_0=0.8$ 克/厘米³，
 $V_t=500$ 厘米³， $\beta=0.001/\text{度}$ 。

30°C 煤油的密度为

$$D_t = \frac{D_0}{1 + \beta t},$$

煤油的质量为

$$m = D_t V_t = \frac{D_0 V_t}{1 + \beta t} = \frac{0.8 \times 500}{1 + 0.001 \times 30} \approx 388 \text{ 克}.$$

§ 3.9 水的膨脹特点

水是地球表面分布得最为广泛的一种物质，它受热时的膨脹情况跟其他液体受热时的情况不同。实验証明，当水从 0°C 加热到 4°C 时，它的体积不但不增大，反而縮小。当水的温度高于 4°C 时，它的体积才会随着温度的升高而膨脹。因此，水在 4°C 时的体

积最小,密度最大,等于1克/厘米³.图3·19表示水的密度随温度的变化情况.

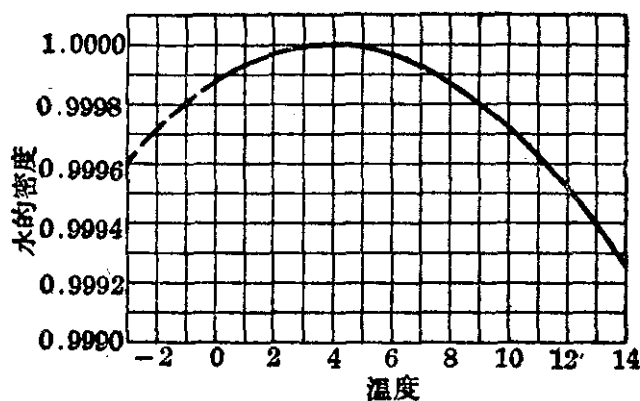


图3·19 水的密度随温度的变化

知道了水的这种膨胀特性,就能够解释为什么比较深的池塘、湖泊里的水的表面,在冬天会冻结,而底部则不会冻结.在4°C以上时,上层的水冷却,体积缩小,密度变大,于是下沉到底部,而下层的暖水就升到上层来.这样,上层的冷水跟下层的暖水不断地交换位置,使整个水的温度逐渐降低.但是这种对流现象只能进行到所有水的温度都达到4°C为止.

温度降低到4°C以下时,上层的水反而膨胀,密度减小,于是冷水层就停留在上面继续冷却,直到温度降到0°C时,上面的冷水层结成了冰为止.此后水的冷却就完全要依靠水的热传导来进行.由于水的导热性能很差,所以底部的水的温度仍可保持在

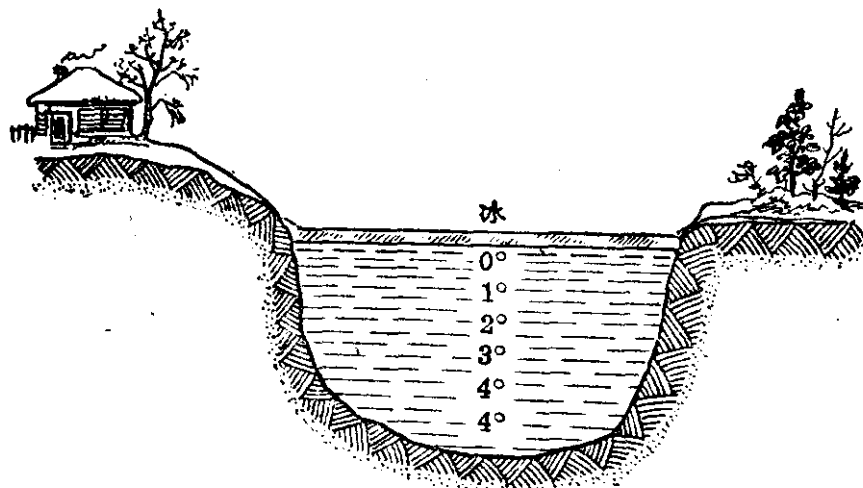


图3·20 冬季深水池中水的温度分布

4°C 左右。图 3·20 表示冬季深水池中水的温度分布。

水的这种特性保证了水中的动物和植物在寒冷季节内的生存。

除了水以外,还有一些物质具有反常膨胀的特点。例如,浇制工件时,因为液态的铁在凝固过程中体积要膨胀,所以工件能够和模型紧密地吻合,呈现出明显的条纹。

习 题 3·9

1. 说明水的膨胀特点对水属生物的重要意义。
2. 计算 100 克水银在 200°C 时的体积, 已知水银在 0°C 时的密度为 13.6 克/厘米³。
3. 在 100°C 时水银的密度是多少?
4. 摄氏温度计上的刻度是由 -10°C 到 110°C, 其间相隔 25 厘米, 已知管的内部直径为 0.15 毫米, 玻璃的线胀系数为 0.000008/度, 水银的体胀系数为 0.00018/度。求球部在 -10°C 时的容积。
[提示: 当温度由 -10°C 升到 110°C 时, 水银膨胀的体积恰好充满 -10°C 和 110°C 之间的管中.]
5. 想一想, 如果把温度计中的水银换成水, 那么, 在使用这种温度计时有些什么不方便?
6. 用来浇铸铅字和硬币的金属应具有什么特性?

本 章 提 要

1. 物体的热胀冷缩 一般物体受热时膨胀, 冷却时收缩。气体的膨胀最大, 液体次之, 固体最小。

2. 温度和温度计 物体冷热的程度叫做温度, 它是物体分子热运动平均动能的标志。用来测量温度的仪器叫做温度计, 它是根据物体热胀冷缩的性质制成的。分别以水的冰点为零度、沸点为一百度的温度计叫做摄氏温度计。

3. 固体的热膨胀 一般固体的膨胀都很小, 温度变化相同时不同固体的膨胀程度不同。表征固体线度膨胀的物理量叫做线胀系数, 它在数值上等于单位长度的固体从 0°C 升高到 1°C 时的线度增长值。一般金属的线胀系

数约为十万分之几或更少一些。由于固体膨胀时会产生很大的作用力，因此在实际问题中要充分考虑到这一点。

4. 物体的体膨胀 对于液体和气体，只有体膨胀才有意义。表征物体膨胀的物理量叫做体膨胀系数，在数值上它等于单位体积的物体从 0°C 升高到 1°C 时体积的增大值。固体的体膨胀系数约等于它线膨胀系数的三倍。由于温度升高时物体的体积增加而质量不变，所以物体的密度随温度的升高而减少。

5. 水的膨胀特点 水在 4°C 时的体积最小，密度最大，这一特性对水属生物的生存具有重要的意义。

复 习 题 三

1. 对于液体和气体，为什么只谈体膨胀而不讲线膨胀？固体的体膨胀系数跟线膨胀系数有什么关系？

2. 如果已知物体在 0°C 和 $t^{\circ}\text{C}$ 时的体积，怎样求它在这一段温度范围内的平均体膨胀系数？如果已知物体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的体积和它的体膨胀系数，怎样求它在 0°C 时的体积？

3. 固体在 0°C 的密度为 D_0 ，它的体膨胀系数是 β ，那么在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的密度近似地等于 $D_0(1 - \beta t)$ ，试证明之。

4. 说明线膨胀系数和体膨胀系数的物理意义。

5. 根据什么实验可以知道不同金属具有不同的线膨胀系数？又根据什么实验或现象可以判断液体的体膨胀大于固体的体膨胀？

6. 如果固体在 $t_1^{\circ}\text{C}$ 时的体积为 V_1 ， $t_2^{\circ}\text{C}$ 时的体积为 V_2 ，那么 V_2 近似地等于 $V_1[1 + (t_2 - t_1)\beta]$ ；而 V_1 也近似地等于 $V_2[1 - (t_2 - t_1)\beta]$ ，试证明之。如果把这些近似的关系式用于液体，所得的结果是否也跟用于固体时同样的正确？试说明理由。

7. 钢桥在 0°C 时长 1082 米，当温度从 -10°C 升高到 20°C 时，它的长度变化了多少？

8. 温度在 30°C 时，水银气压计的读数是 765 毫米，已知水银在 0°C 时的密度为 13.6 克/厘米³，求此时的大气压强。

9. 有人说，我们观察到的液体在容器中的膨胀叫做视膨胀，它要比液体的实际膨胀小一些。这句话对不对？为什么？

10. 视体膨胀系数跟哪些体膨胀系数有关？关系怎样？你能不能加以证明？

11. 一个固体在空气中重 45.6 克，在 10°C 和比重为 1.21 克/厘米³ 的

液体中重 29.9 克；在 95°C 和比重为 1.17 克/厘米^3 的同一液体中重 30.4 克。求这一固体的线胀系数。

[提示：必须先计算出固体在 10°C 和 95°C 时的体积，这样就可以求得它的体胀系数，再根据体胀系数跟线胀系数的关系，求出固体的线胀系数。]

12. 玻璃块在空气中重 46.75 克，在 4°C 的水中重 31.29 克，在 60°C 的水中重 31.51 克。已知玻璃的线胀系数为 $0.000008/\text{度}$ ，求水的体胀系数。

第四章 气体的性质

在第一册中，我們已經学过一些液体和气体所共同遵守的定律。

我們知道，气体和液体对浸入其中的物体都施有压力。液体和气体都没有一定的形状，而且都很容易流动，所以往往把它们統称为流体。正是因为液体和气体具有上述的共同特性，所以它們都遵循反映这些特性的規律，如确定流体浮力大小的阿基米德定律，表征流体传递压强的巴斯噶定律等。

但是，由于气体分子的分布和运动情况跟液体中的分子不一样，气体还具有一些不同于液体的性质，因此，也有一些定律只适用于气体而不适用于液体。本章所要討論的就是这些定律。

§ 4.1 气体的状态。压强

大家都熟悉，对固体施加压力，很不容易使它的体积縮小；对液体也是这样，只是程度有所不同而已。对固体或液体加热，使它們的温度升高，体积的膨胀也很小。这说明，在不大范围内的压强变化和温度升降，对于固体和液体的体积或密度的影响并不显著。

但是对于气体来说，情况就不是这样的了，压强和温度的变化对它的体积具有十分显著的影响。当我们用力压挤小橡皮球的时候，受压挤的地方就凹下去，这是由于压强增加使球里空气的体积縮小了。在上一章中，我們也已經看到，气体受热时体积的膨胀要比固体和液体大得多。不仅压强和温度对气体的体积有很大的影

响,实际上,气体的压强、体积和温度是密切联系着的。如果把小橡皮球拿到火炉上面烘一下,它就会变得更硬一些,这说明温度的升高引起了球里空气压强的增加。又如把稍微有些瘪的乒乓球放到沸水里泡一泡,它会重新鼓起来;这说明球里的空气受热后体积膨胀而且压强也增加,所以才会鼓起来。给篮球或车胎打气的时候,我们都觉察到,打气筒里气体的体积缩小,压强增加,而且从打气筒的剧烈变热,可以知道气体的温度也升高了。

从上面的一些例子中可以看到,对于一定质量的气体来说,它的压强、温度和体积这三个量中只有一个量改变而其余两个量都不改变的情况是没有的。气体的压强、温度和体积表明了气体的状态。对一定质量的气体来说,如果这三个量都不改变,我们就说气体处于一定的状态中。如果这三个量中有二个量改变或者三个量都改变,我们就说气体的状态改变了。

下面我们先来研究一定质量的气体只有两个量改变时的情况,然后再研究这三个量都改变的情况。

为了使同学们在学习中能够掌握问题的本质,有必要从分子运动论的观点来阐述一下这三个物理量的意义。

前面已经讲过温度是分子热运动平均动能的标志。物体温度的升高或降低,标志着分子平均动能的增加或减少。

我们知道,由于气体分子间的相互作用力很小,所以热运动使分子充满了所能够达到的全部空间。因此,处于某一容器里的气体,它的体积实际上就是指这个容器的容积。我们必须注意,气体的体积跟它的分子体积的总和是完全不同的两回事。举例来说,在标准状况下^①,气体分子的总体积只占气体体积的万分之四;即有体积为10公升的气体,其分子的总体积只有4厘米³,其余的9996厘米³都是空隙。当我们压缩气体时,减少的只是气体分子之间的空隙和平均距离,分子本身的体积是不能被压缩的。如果把

^① 指温度为0°C、压强为76厘米高水银柱的状况。

气体的体积从 10 公升压缩到 100 厘米³，那么分子之间的空隙就减为 96 厘米³，而分子的体积就占气体体积的百分之四了。

最后我们来谈一下气体压强的概念。气体对容器内壁的压强，是由于运动着的气体分子撞击器壁而产生的。虽然每一个气体分子对器壁的撞击是不连续的，而且作用力也很小，但是由于气体分子的数目非常大，它们不停地撞击器壁就产生了持续的、数值相当大的压强。又因为气体分子都在作无规则的运动，平均地讲，对器壁任何一处的碰撞次数和碰撞作用是一样大的，所以气体对器壁各方面的压强就完全相等。

气体对容器内壁所施加的压强的大小，究竟跟哪些因素有关呢？我们知道，压强是单位面积上所受的垂直于这个面积的作用力，它的常用单位是达因/厘米²、大气压、厘米高水银柱、公斤/厘米²等。不难想象，单位面积的器壁在 1 秒钟内所受到的撞击次数越多，每一次撞击时所产生的作用力越大，压强也就越大。这就是说，决定气体压强大小的因素有两个：第一，压强跟气体的压缩程度有关，也就是跟单位体积内的分子数或气体的浓度有关。例如，往车胎里多打进一些空气，或者把封闭的车胎压扁一些，我们就会感觉到，胎中空气对胎壁的压强增大了一些。第二，气体的压强跟它的温度有关。因为温度的升高标志着气体分子运动速度的增加，速度大了，分子撞击器壁的次数也随之而增加，而且每一次撞击所产生的作用力也增大。例如，在夏天烈日下行驶后的自行车，它的轮胎会变得更硬一些。因此，我们可以说，单位体积内所含有的分子数越多，气体温度越高，那么，气体对容器内壁所施加的压强也就越大。

习 题 4.1

1. 什么叫做压强？它的常用单位有哪些？76 厘米高水银柱的压强相当于多少克/厘米²，相当于多少达因/厘米²？

2. 气体对容器内壁的压强是怎样产生的? 这个压强的大小跟哪些因素有关? 试扼要说明理由。

3. 在夏天烈日下行驶的车辆, 如果车胎里的气打得太足, 有时车胎会发生爆裂, 这是什么道理?

4. 玩具气球里装的是空气, 如果把它放在火炉上面烘一会儿, 它就会向上升起, 等一忽儿, 它又会下降, 试说明这种现象。

5. 你能不能举出一些事例来说明气体的体积随压强的变化?

§ 4.2 温度不变时气体的体积和压强的关系。

玻意耳-馬略特定律

在这一节中, 我们先研究温度不变时一定质量气体的压强随着它的体积而变化的情形。这种变化过程, 由于温度保持不变, 所以叫做等温变化或等温过程。

日常经验告诉我们, 当一定质量气体的体积缩小时, 它的压强就要增加。例如, 当我们用手指压挤橡皮球时, 就会感觉到其中空气的压强在增加。

为了确定等温变化中气体的体积和压强的数量关系, 可以利用类似图 4.1 所示的装置来进行实验。

M 是附有刻度标记的直立支架, 上面安装有玻璃管 A 和 B , A 和 B 由橡皮管联接成一个连通器, 里面都装有水银。 B 管的上端是开口的, A 管的上端则带有一个管门。把管门旋紧, A 管里就封闭着一定质量的空气, 此时 A 、 B 两管里水银面的高度是一样的 (图 4.1(a))。也就是说, A 管里空气的压强跟周围的大气压强相等。记下气体的体积和压强: 体积 $V_1 = 10$ 厘米³, 压强 $P_1 = 75$ 厘米高水银柱。

现在把 B 管慢慢地提高 (图 4.1(b))。可以看到, 两个管里的水银面都将升高, 但程度并不一致, B 管里的水银面总是比 A 管里的高一些。等到两个管里的水银面相差 75 厘米时, 再记下 A 管中气体的体积和压强: 体积 $V_2 = 5$ 厘米³, 压强 $P_2 =$ 大气压强 + 75

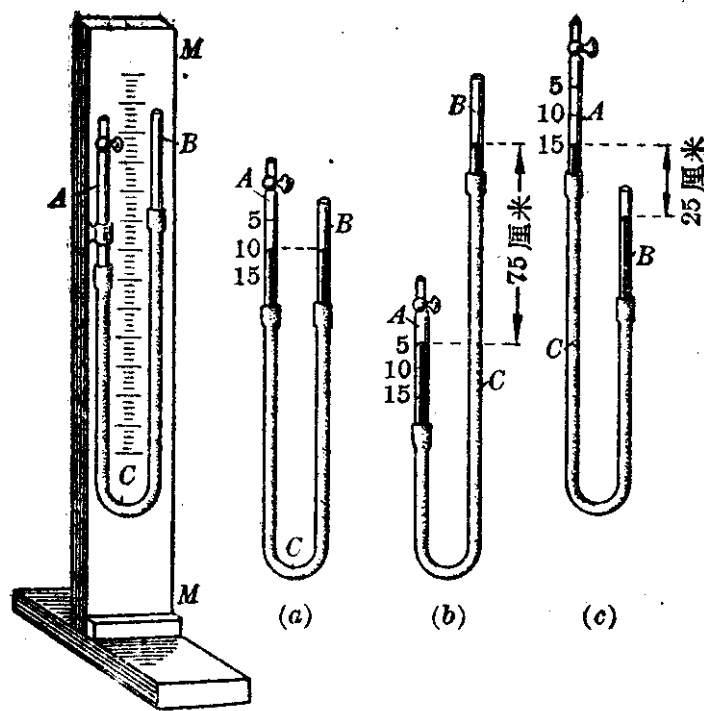


图 4·1 用来研究气体压强和体积关系的装置

厘米高水銀柱 = 150 厘米高水銀柱。也就是体积减为原来的一半时,压强增加到原来的两倍。

如果把 B 管徐徐地向下移动(图 4·1(c)),那么两个管里的水銀面都将下降,但 B 管里的水銀面比 A 管里的要降低得多一些。等到两个管中的水銀面相差 25 厘米时,记录 A 管中气体的体积和压强:体积 $V_3 = 15$ 厘米³,压强 $P_3 =$ 大气压强 - 25 厘米高水銀柱,(为什么?)即等于 50 厘米高水銀柱。也就是体积变成 (a) 中的 $\frac{3}{2}$ 而压强则变成 (a) 中的 $\frac{2}{3}$ 。

把以上的实验结果列成下表:

图	压强(厘米高水銀柱)	体积(厘米 ³)	压强和体积的乘积
(a)	$P_1 = 75$	$V_1 = 10$	$P_1 V_1 = 750$
(b)	$P_2 = 150$	$V_2 = 5$	$P_2 V_2 = 750$
(c)	$P_3 = 50$	$V_3 = 15$	$P_3 V_3 = 750$

不论怎样改变 B 管的位置(每改变一次都记下 A 管中空气的体积,并计算出它的压强),我们总会发现,一定量的空气的体积

减小到原来体积的多少分之一，它的压强就增加到原来压强的多少倍；反过来，如果体积增大到原来体积的多少倍，它的压强就减小到原来压强的多少分之一。当然在这些实验中，空气的温度必须保持不变。

如果换用其他气体来重做这个实验，所得到的结论也是一样的。

英国科学家玻意耳(1627~1691)和法国科学家马略特(1620~1684)通过实验各自独立地发现了下面的定律：

当温度不变时，一定质量的气体的压强和它的体积成反比。

为了纪念他们，就把这个定律叫做玻意耳-马略特定律，简称玻-马定律。

假使一定质量气体的温度保持不变，并设：

压强为 P_1 时气体的体积是 V_1 ，

压强是 P_2 时的体积是 V_2 。

根据玻意耳-马略特定律，就可以写成：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1} \quad (4.1)$$

即

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (4.2)$$

这是玻意耳-马略特定律的另一种表示式，它的物理意义是：当温度不变时，一定质量气体的压强和它的体积的乘积是一个不变量。

在物理学中，经常应用图线来表明气体的压强和它的体积之间的关系。现在就来作这种图线，在横轴上标明气体的体积，在纵轴上标明气体的压强。

设某一质量的气体在体积等于 1 米^3 时，压强等于 12 大气压。气体的这个状态在图中由 A 点表示(图 4.2)。根据玻意耳-马略特定律，当它的体积增大到 2 米^3 时，它的压强将减小到 6 大气压，这样就得到 B 点。如果使气体的体积增大到 4 米^3 、 8 米^3 ，它的压

强将相应地减小到 3 大气压、1.5 大气压, 于是得到 C 点和 D 点。还可以使气体的体积等于其他许多不同的数值, 并计算出相应的压强数值, 从而得到其他许多点。把这些点连接起来就成为一条曲线。这条曲线表明了温度不变时气体的压强和体积的变化情况, 通常称为等温线。

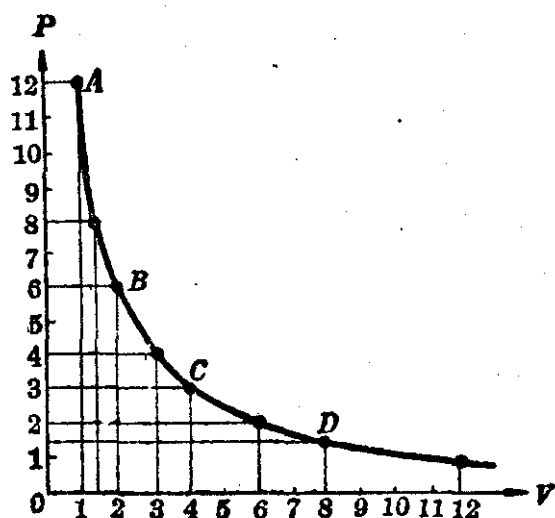


图 4·2 表明玻意耳-马略特定律的图线

玻意耳-马略特定律的实质可以用分子运动论来说明。

在 § 4·1 中我们已经讲过, 气体的压强跟单位体积内的分子数目以及分子的速度有关。温度保持不变, 气体分子的速度也不变。当一定质量的气体的体积减小到原来体积的 $1/5$ 时, 每单位体积里的气体分子数就增大到原来的 5 倍 (也就是说气体的密度增大到原来密度的 5 倍)。因此, 每单位面积的容器内壁在每秒钟内受到的气体分子的撞击次数增加到原来的 5 倍, 压强也增大到原来压强的 5 倍。气体的体积增大时所发生的情况恰好和上面所讨论的相反。

例 1. 一定质量气体的体积等于 15 升时压强是 75 厘米高水银柱, 求它的体积是 12 升时压强有多大? 气体的温度不变。

【解】 按题意: $V_1 = 15$ 升, $P_1 = 75$ 厘米高水银柱,
 $V_2 = 12$ 升。

根据玻意耳-马略特定律,

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1},$$

$$\therefore P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{15 \times 75}{12} = 93.75 \text{ 厘米高水银柱.}$$

例 2. 一个足球的容积是 2.5 升。用打气筒给这个足球打气时，每一次把 1 大气压的空气打进去 125 厘米³。如果在打气以前足球里是没有空气的，那么打了 40 次以后，足球内部空气的压强有多大？（假定空气的温度不变）

【解】 按题意：

空气在打进球以前的总体积 $V_1 = 40 \times 125 = 5000$ 厘米³，压强 $P_1 = 1$ 大气压，打进球以后的体积 $V_2 = 2.5$ 升 = 2500 厘米³。

根据玻意耳-马略特定律，

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2},$$

因此

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{1 \times 5000}{2500} = 2 \text{ 大气压.}$$

例 3. 在一端封闭的均匀玻璃管中，有一段长 8 厘米的水银柱。当管竖直放置而开端向上时，水银和闭端之间的空气柱长 4 厘米；当管竖直放置而开端向下时，空气柱长 5 厘米。试求大气压强。（请读者自作示意图。）

【解】 按题意： $h = 8$ 厘米水银柱， $l_1 = 4$ 厘米，

$$l_2 = 5 \text{ 厘米.}$$

已知玻璃管的横截面 s 和温度 t 均不变。

开端向上时管中空气柱的体积

$$V_1 = l_1 s,$$

开端向上时管中空气的压强

$$P_1 = H + h,$$

开端向下时管中空气柱的体积

$$V_2 = l_2 s,$$

开端向下时管中空气的压强

$$P_2 = H - h,$$

根据玻意耳-马略特定律，

$$P_1 V_1 = P_2 V_2,$$

即

$$l_1 s (H + h) = l_2 s (H - h),$$

或

$$l_1 (H + h) = l_2 (H - h),$$

$$l_1 H + l_1 h = l_2 H - l_2 h, \quad l_1 h + l_2 h = l_2 H - l_1 H,$$

$$H = \frac{h(l_1 + l_2)}{l_2 - l_1} = \frac{8 \times (4 + 5)}{5 - 4} = 72 \text{ 厘米高水銀柱.}$$

本題的裝置可以用來驗證玻意耳-馬略特定律，其中大氣壓強可以直接由氣壓計測得。

§ 4.3 溫度不變時氣體的密度和壓強的關係

我們知道，單位體積內氣體的質量叫做氣體的密度。因此，一定質量的氣體，當它的體積發生改變時，它的密度也將跟着而改變。體積變大時密度減小，體積縮小時密度增加。

設質量為 m 的氣體溫度保持不變，當壓強為 P_1 、體積為 V_1 時，其密度為 D_1 ；當壓強為 P_2 、體積為 V_2 時，其密度為 D_2 。

那麼

$$D_1 = \frac{m}{V_1}; \quad D_2 = \frac{m}{V_2}.$$

或

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{V_2}{V_1} \text{ (即密度跟體積成反比).}$$

而根據玻意耳-馬略特定律，有

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2},$$

於是，我們得到

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{P_1}{P_2}. \quad (4.3)$$

也就是說，當溫度不變時，氣體的密度跟它的壓強成正比。

这个重要的結論可以认为是玻意耳-馬略特定律的更简单和直接的表示式。因为气体的体积与所取气体的多少有关，所以提到气体的体积时一定要說明它的质量是多少；而密度跟压强一样，能够直接用来表示气体的状态，并且与所取气体的多少无关。

例 4. 已知氧气在标准状况下的密度等于 1.43 公斤/米³。求 0°C、50 大气压下，容积是 60 升的容器中氧气的质量。

【解】 按題意： $D_0=1.43$ 公斤/米³， $P_0=1$ 大气压，
 $t=0^\circ\text{C}$ ， $P_1=50$ 大气压， $V_1=0.06$ 米³。

(1) 根据玻意耳-馬略特定律，有

$$P_0V_0=P_1V_1,$$

因此，标准状况下的体积

$$V_0=\frac{P_1V_1}{P_0}.$$

(2) 氧气的质量

$$m=D_0V_0=\frac{D_0P_1V_1}{P_0}=\frac{1.43\times 50\times 0.06}{1}=4.29 \text{ 公斤}.$$

例 5. 容器中盛有 0°C 和 40 大气压的二氧化碳 7.88 公斤，求容器的容积。标准状况下二氧化碳的密度为 1.97 公斤/米³。

【解】 按題意： $m=7.88$ 公斤， $D_0=1.97$ 公斤/米³，
 $P_0=1$ 大气压， $P_1=40$ 大气压。

(1) 标准状况下二氧化碳的体积

$$V_0=\frac{m}{D_0},$$

(2) 根据玻意耳-馬略特定律，有

$$\frac{V_1}{V_0}=\frac{P_0}{P_1},$$

因此，容器的容积

$$V_1 = \frac{P_0 V_0}{P_1} = \frac{P_0 m}{P_1 D_0} = \frac{1 \times 7.88}{40 \times 1.97} = 0.1 \text{ 米}^3 = 100 \text{ 升.}$$

习 题 4.3

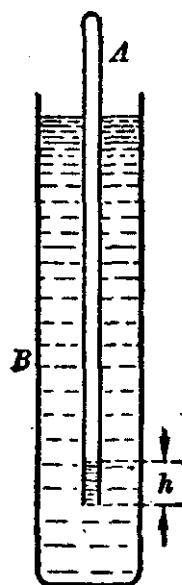
1. 容积为 100 升的鋼筒里装有压强为 20 大气压的氧。如果温度保持不变,把鋼筒的开关打开后,这些氧的体积有多大?

2. 在上題中,如果原先鋼筒里氧的密度是 0.0286 克/厘米^3 ,試問打开开关后,氧的密度变成多大?

3. 在下端封閉、截面积为 0.1 厘米^2 的豎直玻璃管中,有一段 4 厘米高的水銀柱,被水銀封閉在管里的空气的体积为 6 厘米^3 。如果再向管中灌入 27.2 克的水銀使水銀柱增高,这时空气柱的高度是多少? 假定大气压强为 76 厘米高水銀柱。

[提示: 管里的封閉空气就是我們要研究的对象。解題时压强用厘米高水銀柱表示比較方便,这样 $P_1 = \text{大气压强} + \text{管内水銀柱的高度} = 80 \text{ 厘米高水銀柱}$, $V_1 = 6 \text{ 厘米}^3$ 。从灌入水銀的重量計算出管中水銀柱的高度,从而求出 P_2 ,再根据玻意耳-馬略特定律計算 V_2 和空气柱的高度。]

4. 附图所示是用来驗証玻意耳-馬略特定律的簡單装置。A 是上端封閉的长玻璃管, B 是高 1 米左右和直徑为 4~5 厘米的玻璃筒,筒內盛水。把 A 管豎直地插入 B 筒內的水中,水将进入 A 管内,为什么? A 管浸入水中越深,进入 A 管內的水也越多,为什么? 如果大气压强为 760 毫米高水銀柱, A 管长 1 米,当 A 管浸入水中的深度为 80 厘米时,水进入 A 管中的高度 h 是多少?



(第 4 題)

5. 两端封閉的細玻璃管中装有一水銀柱。当玻璃管水平放置时,水銀柱适在管的中央,两头空气柱的长度相等,压强均为 76 厘米高水銀柱。当玻璃管豎直放置时,水銀柱上部空气柱的长度恰为下部空气柱的两倍。求水銀柱的长度。

[提示: 当管豎直放置时,下部空气的压强等于上部空气的压强加上水銀柱的压强。]

6. 足球的容积是 2.8 升。假如球內原先完全沒有空气,打气筒每次打入空气 200 厘米^3 。問打气筒需要打几下才能使球內空气的压强达到 1.8 大气压? 打气时空气温度保持不变,大气压强为 760 毫米高水銀柱。

§ 4.4 压强不变时气体的体积和温度的关系。

盖·吕萨克定律

现在我们来研究压强保持不变时一定质量气体的体积跟温度的关系。当一定质量的气体受热而温度升高时，如果使它的压强保持不变，它的体积就要增大，也就是要发生热膨胀。气体的热膨胀非常显著，只要温度稍微升高，就能觉察出来。根据分子运动论知道，气体受热而温度升高时，它的分子运动的速度增加，分子的平均动能增大，对于每单位器壁的撞击次数也增多，同时每一次撞击的作用力加强，以致压强增大。如果盛气体的容器的体积能够自由改变（例如，带有可以移动的活塞的气缸），那么气体将一直膨胀到它的压强等于外界压强为止。由此可见，当气体受热时要保持压强不变，它的体积一定要膨胀。

气体在压强不变的条件下所发生的变化叫做等压变化，亦称等压过程。

这种过程的特点可以用下面的简单实验显示出来。

把装有干燥气体的烧瓶和水平的玻璃管连接在一起，管子上附有刻度尺和一段很短的水银。将所研究的气体与外面的空气隔开，如图 4.3(a) 所示。先把烧瓶放在冰和水的混合物中，经过一段时间以后，烧瓶中气体的温度跟冰水混合物的温度一样。量出此时气体的体积（到水银滴 A 为止），并用 V_0 表示。这时，烧瓶中气体的压强等于大气压强。然后，再把烧瓶放在某一温度的热水中，使里面的气体受热膨胀，于是水银滴移动到位置 B ，如图 4.3(b) 所示；这时烧瓶中气体的压强并未改变，即仍等于大气压强。烧瓶内气体的温度（即水的温度）可以由插在水中的温度计测出。量出这时气体的体积（到水银滴 B 为止），并用 V_1 表示。

可以发现，在压强不变的条件下，一定质量气体体积的增大是跟它的温度的升高成正比的。用不同容积的烧瓶来做这个实验，

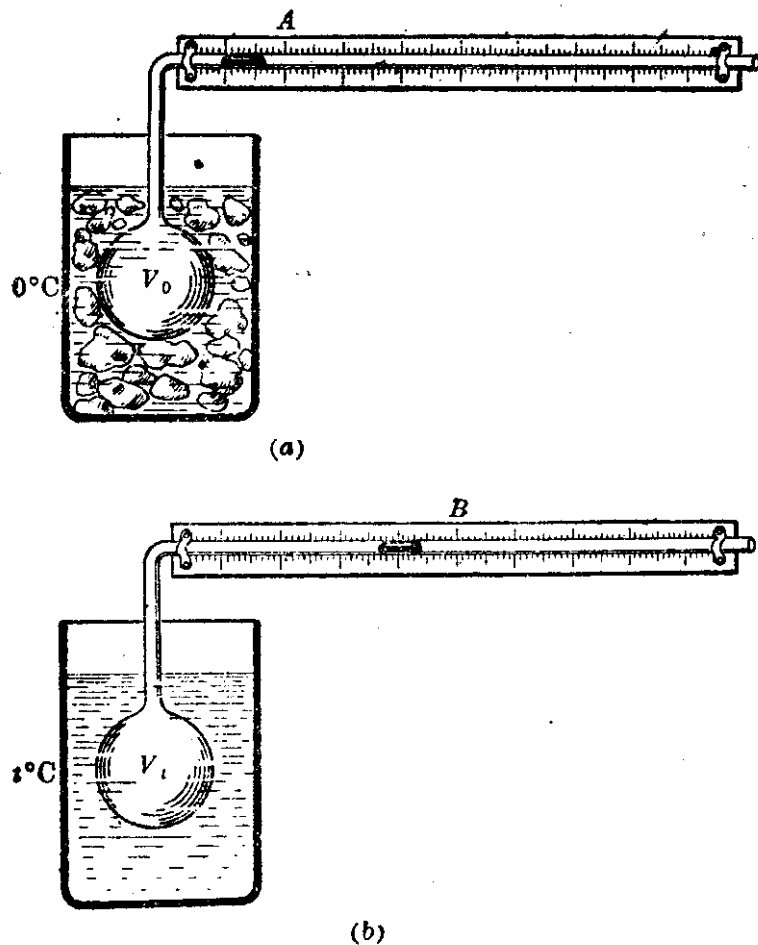


图 4·3 观察气体热膨胀的装置

还可以看到,虽然温度的升高相同,但是体积的增大不同;0°C时的体积越大,所增加的体积也越大;0°C时的体积越小,所增加的体积也越小.即气体体积的增大跟它在0°C时的体积成正比.因此,气体的热膨胀,也和液体、固体一样,可以用体膨胀系数 β 来表示:

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}, \quad (4.4)$$

由此可得

$$V_t - V_0 = \beta V_0 t.$$

法国科学家盖·吕萨克(1778~1850)通过与上述相似的实验,研究了各种气体的热膨胀,并且在1802年发现:一切气体在压强不变时的体膨胀系数都相等,都等于 $1/273 = 0.00367$.

气体的体膨胀系数不随它们的化学成分而改变,这是气体的热膨胀跟固体、液体不同的地方.

在公式(4.4)中,以 $t=1^{\circ}\text{C}$, $\beta=\frac{1}{273}$ 代入,得到

$$V_t = V_0 + \frac{1}{273} V_0,$$

它表明,压强不变而温度升高 1°C 时,一定质量气体体积的增加等于它在 0°C 时体积的 $1/273$.

这个定律就叫做盖·吕萨克定律.

如果知道了一定质量气体在 0°C 时的体积 V_0 , 那末由公式(4.4)就可以求出在压强不变的条件下这些气体在 $t^{\circ}\text{C}$ 时的体积 V_t :

$$V_t = V_0(1 + \beta t) = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right). \quad (4.5)$$

无论温度高于 0°C 或低于 0°C , 都可以应用公式(4.5)来进行计算. 只是在后一种情况, t 是负的.

现在我们来作出压强不变时气体的体积和温度的关系图.

假定 0°C 时气体的体积是 3 米³, 则根据公式 $V_t = V_0(1 + \beta t)$, 可以计算出 91°C 、 182°C 、 273°C 时气体的体积, 并列如下表.

V	3	4	5	6
$t^{\circ}\text{C}$	0	91	182	273

用横坐标表示温度的数值, 纵坐标表示体积的数值, 然后在图

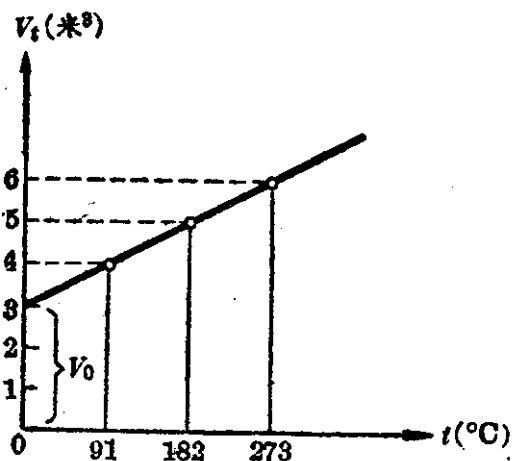


图 4.4 气体的体积和温度的关系图线

上找出各组对应数值的点. 把这些点连接起来就成一条直线(图 4.4), 它是压强不变时气体的体积随温度而变化的关系图, 也就是等压变化过程的图, 因此叫做等压线. 这条直线与纵坐标的交点是气体在 0°C 时的体积 V_0 .

例 6. 一定质量的气体, 如果保持它的压强不变, 问在什么

温度下它的体积将为在 0°C 时体积的两倍,三倍, $\dots n$ 倍?

【解】 根据盖·吕萨克定律:一定质量的气体,当温度升高 1°C 时,它的体积的增加等于 0°C 时该气体体积的 $1/273$. 如果 0°C 时的体积为 V_0 ,那么, 1°C 时的体积应为 $V_0\left(1+\frac{1}{273}\right)$;同样, $t^{\circ}\text{C}$ 时的体积为 $V_0\left(1+\frac{t}{273}\right)$. 显然,当 $t=273^{\circ}\text{C}$ 时,气体的体积将是它在 0°C 时体积的两倍. 根据同一理由,可以推得,温度为 $2\times 273=546^{\circ}\text{C}$ 时,体积为 0°C 时的三倍, \dots 温度为 $(n-1)\cdot 273^{\circ}\text{C}$ 时,体积为 0°C 时的 n 倍.

例 7. 一定质量气体在 273°C 时的体积是10升. 求它在 546°C 时的体积,假定压强相同.

【解】 按题意: $V_{t_1}=10$ 升, $t_1=273^{\circ}\text{C}$,

$$\beta=\frac{1}{273}, \quad t_2=546^{\circ}\text{C}.$$

根据气体热膨胀的特征,必须以 0°C 时的体积为标准来进行计算,所以先从公式 $V_{t_1}=V_0\left(1+\frac{1}{273}t_1\right)$ 中,求出 V_0 ;

$$V_0=\frac{V_{t_1}}{\left(1+\frac{1}{273}t_1\right)}=\frac{10}{2}=5 \text{ 升}.$$

在 t_2 时的体积

$$V_{t_2}=V_0\left(1+\frac{1}{273}t_2\right)=5\left(1+\frac{1}{273}\times 546\right)=15 \text{ 升}.$$

从例 1 的论证中,也可以直接得出 546°C 时的体积应为 0°C 时体积的三倍,即 15 升.

例 8. 在固体线膨胀的计算中,我们可以从温度 $t_1^{\circ}\text{C}$ 时固体的长度 l_1 ,用近似式 $l_2=l_1[1+\alpha(t_2-t_1)]$ 来计算它在 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时的长度 l_2 ,式中 α 是固体的线膨胀系数;在处理固体体膨胀的问题时,也可以应用式子 $V_2=V_1[1+\beta(t_2-t_1)]=V_1[1+3\alpha(t_2-t_1)]$ 来计算 $t_2^{\circ}\text{C}$ 的体积 V_2 . 问在处理气体热膨胀的问题时,我们能不能这样做? 为什么?

【解】 在固体热膨胀的问题中，因为线胀系数和体胀系数都很小(十万分之几)，应用近似式

$$l_2 = l_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \text{ 和 } V_2 = V_1 [1 + \beta(t_2 - t_1)]$$

来计算长度和体积时，不致引起多大的误差，所以一般是允许这样做的。气体的体胀系数要比固体的大得多（如气体的体胀系数约为铁的一百倍），而气体的膨胀规律是每当温度升高 1°C 时，体积的增加等于它在 0°C 时的 $1/273$ ，所以在计算中必须以 0°C 的体积为起点，而不能运用 $V_2 = V_1 [1 + \beta(t_2 - t_1)]$ 来进行计算。从例 1、2 中可以看到，如果气体在 0°C 的体积为 V_0 ，则在 $t_1 = 273^\circ\text{C}$ 时的体积为 $V_1 = 2V_0$ ，按照 $V_2 = V_1 [1 + \beta(t_2 - t_1)]$ 来计算，那么 $t_2 = 546^\circ\text{C}$ 时的体积

$$V_2 = V_1 [1 + \beta(t_2 - t_1)] = 2V_0 \left[1 + \frac{1}{273} (546 - 273) \right] = 4V_0,$$

而实际上应该是 $3V_0$ ，这样大的误差显然是不能允许的。还有一点必须明确的，那就是盖·吕萨克定律只适用于压强不变时气体的热膨胀；对固体和液体来说，它们的热膨胀就很少受外界压强变化的影响。

习 题 4.4

1. 气体的热膨胀与液体和固体的热膨胀比较，具有哪些特点？试就体胀系数的量值来加以说明。
2. 一定质量的气体，如果保持它的压强不变，在什么温度下它的体积将是 0°C 时体积的 $1/2$ 、 $1/3$... $1/n$ ？
3. 一定质量的气体在 182°C 时的体积为 V 。如果要将它的体积减少到 $\frac{2}{5}V$ ，应该冷却到几度？
4. 在回答问题中，有一位同学把盖·吕萨克定律叙述为：“一定质量的气体，当压强不变时，温度每升高 1°C ，它的体积的增加等于它原来体积的 $1/273$ 。”这样的叙述是否正确？应该怎样说才是正确的？
5. 当气体受热而温度升高时，如果保持它的体积不变，气体的压强将起怎样的变化？其原因是什么？如果要保持它的压强不变，气体的体积应该怎

样变化?

[提示: 温度升高时, 气体分子的运动速度变快, 每一次撞击器壁的作用力增强, 要是体积保持不变, 分子对容器内壁的撞击将益趋频繁, 这样压强就必然增加. 如果要保持压强不变, 那就只有让它的体积膨胀, 降低分子的浓度^①, 使分子对器壁的撞击次数减少, 从而抵消每一次撞击器壁时平均作用力的增长. 所以气体在等压情况下受热时, 体积必然增加.]

§ 4.5 体积不变时气体的压强和温度的关系. 查理定律

一定质量的气体受热而温度升高时, 如果体积保持不变, 它的压强就将增大. 气体在体积不变的情况下所发生的变化称为等体积变化, 也叫等体积过程, 习惯上称为等容过程. 这种过程可以通过下面的实验来说明.

取一只烧瓶, 用一根弯曲的玻璃管和一段橡皮管把它跟一个水银压强计连接在一起(图4.5). 然后把烧瓶放进盛着冰水混合物的容器里. 根据压强计两管中水银面的高度差和大气压强, 可以求出烧瓶中气体的压强 P_0 . 用记号标出压强计左侧管中水银面的位置.

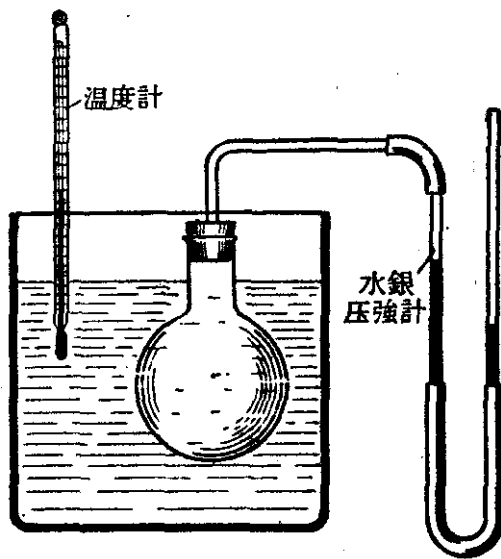


图 4.5 观察气体的压强随温度的变化而变化的实验装置

再把烧瓶放进盛有 $t^{\circ}\text{C}$ 热水的容器中, 移动压强计的右侧开管, 使左侧管中的水银面恢复到原先记下的位置. 略去烧瓶在加热后体积的膨胀, 这样就可以认为烧瓶中气体的体积没有变化. 从压强计中水银面的高度差可以知道, 这时气体的压强增加了. 计算出这时的压强 P_t .

① 单位体积内的分子数, 叫做浓度. 它是跟密度有紧密联系的物理量.

不論怎样改变容器中热水的温度,我們总是可以发现,体积不变时,一定质量气体压强的增加跟温度的升高成正比。

从实验中还可以看到,如果温度的升高相同,气体压强的增加跟它在 0°C 时的压强成正比。

为了表示气体压强随温度而变化的特性,我們引进气体的压强系数 γ ,根据上述实验的结果,可以写出:

$$\gamma = \frac{P_t - P_0}{P_0 t}. \quad (4.6)$$

1787年,法国科学家查理(1746~1823)对气体的压强随温度而变化的问题作了初步的研究。盖·吕萨克更仔细地研究了这个问题,结果发现,一定质量的任何气体在体积不变时的压强系数都等于 $1/273$ 。

由式(4.6),可以得到:

$$P_t = P_0(1 + \gamma t). \quad (4.7)$$

在式(4.7)中,代入 $\gamma = \frac{1}{273}$, $t = 1^{\circ}\text{C}$, 得到 $P_t = P_0 + \frac{1}{273}P_0$ 。

由此可见,在体积不变的情况下,一定质量气体的温度每升高 1°C ,它的压强的增加就等于 0°C 时压强的 $1/273$ 。

习惯上就把这个定律叫做查理定律。

可以看出,气体的体胀系数 β 跟压强系数 γ 是一致的。这种一致性并不是偶然的。从玻意耳-马略特定律可以导出, β 和 γ 应当彼此相等。下面就来说明这个问题。

設某一定质量的气体被封闭在带有活塞的汽缸里,如图4.6(a)所示,假定它的初始状态是温度 0°C 、体积 V_0 、压强 P_0 。在体积不变的情况下(也就是使活塞 AB 固定不动)将气体加热到 $t^{\circ}\text{C}$ (图4.6(b))。这时,按照查理定律,它的压强为 $P_t = P_0(1 + \gamma t)$ 。

另一方面,我們允許活塞自由移动(即保持气体压强不变),把气体加热到 $t^{\circ}\text{C}$ (图4.6(c))。根据盖·吕萨克定律,这时它的体积为 $V_t = V_0(1 + \beta t)$ 。

由此可见,在温度 $t^{\circ}\text{C}$ 下,如果一定量的气体体积是 V_0 ,它的压强就是 $P_t = P_0(1 + \gamma t)$;如果体积是 $V_t = V_0(1 + \beta t)$,压强就是 P_0 。根据玻意耳-

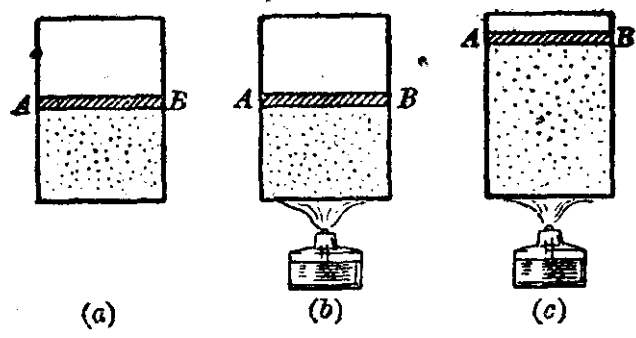


图 4.6 证明气体的体胀系数和压强系数相等的附图

(a) 初始状态: 0°C 、 V_0 、 P_0 ; (b) 状态: $t^{\circ}\text{C}$ 、 V_0 、 $P_t = P_0(1 + \gamma t)$;
 (c) 状态: $t^{\circ}\text{C}$ 、 $V_t = V_0(1 + \beta t)$ 、 P_0 .

馬略特定律, $V_t P_0 = P_t V_0$, 也就是說

$$P_0 V_0 (1 + \gamma t) = P_0 V_0 (1 + \beta t);$$

由此得出

$$\gamma = \beta.$$

現在我們來作出体积不变时气体的压强跟温度的关系图綫, 并用横坐标表示温度的数值, 纵坐标表示压强的数值.

假定 0°C 时压强 $P_0 = 3$ 大气压, 按式 $P_t = P_0(1 + \gamma t)$ 可以計算出温度 91°C 、 182°C 、 273°C 时的压强, 并列下下表:

P	3	4	5	6
$t^{\circ}\text{C}$	0	91	182	273

在图上找出代表各組对应数值的点. 把这些点連接起来就成一条直綫(图 4.7), 它与纵坐标的交点就是 0°C 时气体的压强. 这就是表示体积不变时气体的压强随温度而变化的图綫, 叫做等体积綫.

在 § 4.4 中, 我們已經說明过体积不变时气体的压强随温度而变化

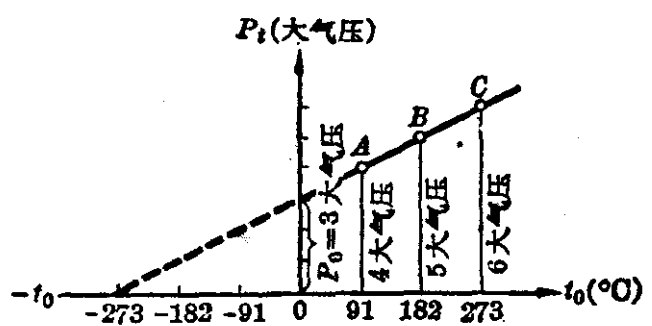


图 4.7 体积不变时气体的压强和温度的关系图綫

的原因. 根据分子运动論, 气体分子的速度是随着温度的升高而增大的. 因此, 当一定质量的气体在一定容积的容器內受热而使

温度升高时，它的分子在1秒钟内对1厘米²器壁的撞击次数增多，同时在每一次撞击时传给器壁的动量也增大，这两个因素都引起了压强的增大。

以上我們已經利用分子运动論的概念，討論了气体在各种变化过程中处于不同状态时参量之間的关系。現在我們从能量的观点来研究这些变化过程。

我們先来讲等温过程。在这种变化过程中，气体的温度保持不变，也就是分子的平均动能保持不变。在第二章中我們已經讲过，气体的内能就是气体分子的平均动能（分子势能很小，可以略去不計），因此，气体作等温变化时，它的内能保持不变。如果气体受到等温的压缩，那么，对气体做功就要增加它的内能，然而，由于我們要求它的内能保持不变，所以，要让它不断地以热传递的方式将这部分增加的内能传递给周圍物体。总的來說，等温压缩气体时，外界不断对气体做功，同时气体也不断地放出热量。同理，气体作等温膨胀时，气体本身对外界做功，并且为了保持它的内能不变，必須不断地从外界得到热量。应该附带地指出：为了使气体能够来得及跟周圍物体进行热传递，等温变化过程一定要进行得很慢，否則气体的温度就不能保持不变。关于这一点在§4·10中还要进行詳細的討論。

在等容变化过程中，由于体积保持不变，因此，气体既沒有对其他物体做功，相反，其他物体也沒有对气体做功。所以，在等容加热时，气体所得到的热量全部用来增加它的内能，从而使温度升高；在等容冷却时，气体只以热传递的方式将本身的内能传递给周圍的物体，从而使温度降低。

在§4·4中，我們曾經分析过，气体受热时，如果压强保持不变，那么，体积一定要膨胀。这时，气体得到的热量，一部分用来对外界做功，另一部分增加了气体的内能，使气体温度升高。在等压压缩时，其他物体对气体做了功，同时气体又放出热量，根据分子

运动論的分析(希望讀者自己分析), 温度一定要降低, 因此, 气体的內能减少. 由此可見, 等压膨脹时, 气体得到的热量大于它对外界所做的功; 而在等压压缩时, 气体放出的热量大于外界对它所做的功.

例 9. 一定质量的气体在 0°C 时的压强等于 780 毫米高水銀柱, 求它在 273°C 时的压强. 設气体的体积保持不变.

【解】 按題意: 0°C 时的压强 $P_0 = 780$ 毫米高水銀柱,

$$\text{气体的压强系数 } \gamma = \frac{1}{273}, \quad t = 273^{\circ}\text{C}.$$

根据查理定律, 当一定质量气体的体积保持不变时, 温度每升高 1°C , 压强的增加等于它在 0°C 时压强的 $1/273$. 現在温度由 0°C 升高到 273°C , 所以气体的压强将增加一倍, 也就是变为 0°C 时压强的两倍, 即 $780 \times 2 = 1560$ 毫米高水銀柱.

例 10. 一定质量的气体在 273°C 时的压强为 5 大气压, 求它在 546°C 时的压强. 設气体的体积保持不变.

【解 1】 按題意: $t_1 = 273^{\circ}\text{C}$, $P_1 = 5$ 大气压,

$$\gamma = \frac{1}{273}, \quad t_2 = 546^{\circ}\text{C}.$$

根据查理定律, 气体压强的变化必須以 0°C 时的压强为标准进行計算. 由上題可知, 因为 273°C 的压强为 5 大气压, 所以 0°C 时的压强应为 2.5 大气压, 546°C 的压强为

$$P_2 = P_0 \left(1 + \frac{t_2}{273} \right) = 2.5 \left(1 + \frac{546}{273} \right) = 2.5 \times 3 = 7.5 \text{ 大气压}.$$

【解 2】 首先根据公式 $P_t = P_0(1 + \gamma t)$ 求出 0°C 时的压强

$$P_0 = \frac{P_1}{1 + \gamma t_1} = \frac{5}{1 + \frac{273}{273}} = 2.5 \text{ 大气压},$$

再从 P_0 根据公式 $P_2 = P_0(1 + \gamma t_2)$ 求出 P_2 为 7.5 大气压.

例 11. 假使气体的体积保持不变, 要冷却到什么温度时它的压强才会变成 0°C 时压强的 $1/10$.

【解】 設所求的溫度為 t ，則 $P_t = \frac{1}{10} P_0$ ，代入公式

$$P_t = P_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right), \quad \frac{1}{10} P_0 = P_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right), \quad \text{解之，得}$$

$$t = -245.7^\circ\text{C}.$$

所求的溫度為攝氏零下 245.7 度。

· 習 題 4.5

1. 你認為掌握查理定律主要應該明確哪些關鍵問題？

[提示：考慮這一定律的適用對象，壓強系數的量值和以什麼溫度下的壓強為標準.]

2. 試根據分子運動論的觀點對查理定律作出定性的解釋。

3. 有一位同學用下面的方法解答了本節中的第二個例題。

$$t_1 = 273^\circ\text{C}, P_1 = 5 \text{ 氣壓}; t_2 = 546^\circ\text{C}, P_2 = ?$$

$$P_2 = P_1 \left[1 + \gamma(t_2 - t_1)\right] = 5 \left[1 + \frac{546 - 273}{273}\right] = 5 \times 2 = 10 \text{ 大氣壓}.$$

他這樣做是否正確？為什麼？從這個問題中你能夠得出什麼結論？

4. 如果氣體壓強的變化完全嚴格遵循查理定律，那麼，把氣體冷卻到什麼溫度時，它的壓強將等於零？就氣體分子運動論的觀點來看，這一溫度具有什麼意義？

§ 4.6 理想氣體

精確的實驗表明，一切實際氣體都只是近似地遵守玻意耳-馬略特定律。例如，假定在 1 大氣壓下，表中所列的各種體積的體積都是 1 升，也就是說，它們的 PV 值都等於 1；但是，在 2 大氣壓下，它們的體積並不恰好等於 1/2 升，也就是說，它們的 PV 值都不再準確地等於 1 了，而是象下表所示。

氣 體	空 氣	氫 氣	一氧化碳	二氧化碳
2 大氣壓下的 PV 值	0.99977	1.00026	0.99974	0.99720

壓強越高，氣體的濃度越大（也就是單位體積里的分子數越

多), 这种偏离也就越显著. 当压强达到几百或几千大气压时, 玻意耳-馬路特定律就完全不再适用了.

同样, 盖·呂薩克定律和查理定律也只是近似地反映了实际气体的性质. 下表中列出了各种气体的体脹系数和压强系数. 从表中可以看出, 不同气体的 β 值是不同的, γ 值也是不同的; 而且同一种气体的 β 和 γ 值也并不相等.

气体 (0°C, 760 毫米水銀柱)	β	γ
氢 气	0.0036600	0.0036613
氦 气	0.0035820	0.0036601
氮 气	0.0036732	0.0036744
二氧化碳	0.0037414	0.0037262
空 气	0.0036760	0.0036750

精确的测量还指出, 每一种气体的 β 和 γ 值都不是固定不变的, 而是跟测量时的温度和压强有关. 但是由于这些差别十分微小, 在一般的计算中都不加以考虑.

虽然实际的气体都不严格符合这三个定律, 但是, 为了研究方便起见, 可以假定有一种严格符合这三个定律的气体, 这种气体就叫做理想气体.

有许多实际气体, 例如氢气、氧气、氮气、空气、氩气、氦气等, 在通常的温度和压强下, 能够较好地符合这三个定律(从上面的表中可以看出偏差很小), 因此, 可以把它们当作理想气体来处理; 这样处理所得到的结果, 不仅与实际情况相符合, 而且还使问题大大地简化了.

根据分子运动论, 可以说明实际气体不严格符合三个定律的原因. 我们就以玻意耳-馬路特定律为例来进行分析.

当压强很小时, 气体分子间的距离比较大, 这时可以忽略分子间的相互吸引力. 但是, 当压强很大时, 分子比较接近, 分子间的相互吸引力也增强. 这样, 就减小了气体分子朝器壁方向运动的速度, 使气体对器壁的压强比不存在分子间的吸引力时来得小一些.

此外，在劇烈壓縮的氣體中，分子本身的大小已經可以跟分子間的距离相比較，因此分子運動的自由空間也就比氣體所占有的容積小，這樣，分子到達器壁的飛行距離縮短，對器壁撞擊的次數增多；因而壓強要比根據玻意耳-馬路特定律計算得出的更大一些。以上兩種因素都使實際氣體在壓強較大時不能很好地符合玻意耳-馬路特定律。

實際氣體所以不能很好地符合上述三個定律的根本原因是：(1) 分子本身占有一定的空間，(2) 分子之間有相互吸引力。因此，作為理想氣體必須符合下列條件：(1) 分子具有質量而沒有體積；(2) 分子之間除了在碰撞時有相互作用力以外，在任何其他情況下都沒有相互作用力。正是因為實際上根本不存在這種氣體，所以把這種氣體稱為理想氣體。

§ 4.7 絕對溫標

到現在為止，我們使用的都是百分溫標，它的零度是和冰的熔點一致的。從 §4.5 中可以看出，在體積不變時，氣體的壓強並不跟攝氏溫度成正比。

例如，在 91°C 時氣體的壓強等於 4 大氣壓，而在 182°C 時氣體的壓強則等於 5 大氣壓。這裡按攝氏溫標氣體的溫度增加了一倍，而氣體的壓強卻只增加了 $1/4$ 倍。事實上這並不奇怪，因為攝氏溫標是任意規定的，完全跟氣體的性質無關。但是我們也可以利用氣體定律來規定一種溫標，下面就用查理定律為例來說明。

設在溫度 t_1 時，氣體的壓強等於 P_1 ，依據查理定律，

$$P_1 = P_0 \left(1 + \frac{t_1}{273} \right) = P_0 \left(\frac{273 + t_1}{273} \right).$$

在溫度 t_2 時，氣體的壓強等於

$$P_2 = P_0 \left(1 + \frac{t_2}{273} \right) = P_0 \left(\frac{273 + t_2}{273} \right).$$

將上面兩式相除，得到

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{273 + t_1}{273 + t_2}.$$

我們把 $273 + t$ 當做這種新的溫標的溫度數值。可以看出，這種溫標的分度法和攝氏溫標相同，即在那種溫標上相差 1 度時，攝

氏温标上也相差 1 度；但是它的零度却在冰点以下 273 度，也就是在摄氏温标零下 273 度。

英国物理学家威廉·汤姆孙(开耳芬)首先引用了这种温标。我们把它称为绝对温标或开氏温标；它的零度，即 -273°C ，叫做绝对零度。

绝对温标的温度通常用 T 来代表，并且在温度的度数后面加上一个 K 字，例如绝对温度 373 度记作 373°K 。由此可见，绝对温标跟摄氏温标的关系如下：

$$T = t + 273;$$

$$t = T - 273.$$

如果应用绝对温标，那么在一个标准大气压的条件下，冰的熔点就是 $T_0 = 273^{\circ}\text{K}$ ，水的沸点就是 $T = 373^{\circ}\text{K}$ 。

根据上面所讲：

$$P_1 = P_0 \left(\frac{t_1 + 273}{273} \right) = P_0 \frac{T_1}{273},$$

$$P_2 = P_0 \left(\frac{t_2 + 273}{273} \right) = P_0 \frac{T_2}{273},$$

将两式相除得

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (4.8)$$

它表示，一定质量的气体在体积不变的条件下，它的压强跟绝对温度成正比。这是查理定律的新的表达形式。

对盖·吕萨克定律的公式进行类似的讨论后，我们也能够得到盖·吕萨克定律新的表达形式：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (4.9)$$

这就是说，一定质量的气体在压强不变的条件下，它的体积跟绝对温度成正比。

例 12. 设钢筒中的气体在 $t_1 = 25^{\circ}\text{C}$ 时的压强为 $P_1 = 40$ 大气压，求当温度 $t_2 = 35^{\circ}\text{C}$ 时的压强是多少？

【解】 按題意： $t_1 = 25^\circ\text{C}$ ， $P_1 = 40$ 大气压，

$$t_2 = 35^\circ\text{C}.$$

鋼筒的容积可以认为沒有变化，所以气体的体积不变。

首先要把摄氏温度化为相应的绝对温度。

气体的绝对温度分别是：

$$T_1 = 273 + 25 = 298^\circ\text{K};$$

$$T_2 = 273 + 35 = 308^\circ\text{K}.$$

应用查理定律：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2};$$

$$\therefore P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 40 \times \frac{308}{298} = 41.3 \text{ 大气压}.$$

例 13. 設某一定量的气体在 17°C 时的体积为 320 厘米³。
如果气体的压强不变，問在 -13°C 时的体积是多少？

【解】 按題意： $t_1 = 17^\circ\text{C}$ ， $V_1 = 320$ 厘米³，

$$t_2 = -13^\circ\text{C}.$$

已知气体的压强不变，所以适用盖·呂薩克定律。

先把摄氏温度化为绝对温度。

$$T_1 = 273 + 17 = 290^\circ\text{K};$$

$$T_2 = 273 - 13 = 260^\circ\text{K}.$$

由盖·呂薩克定律

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

$$\therefore V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 320 \times \frac{260}{290} = 287 \text{ 厘米}^3.$$

习 題 4.7

1. 什么叫做理想气体？从分子运动論的观点来看，理想气体必須滿足哪些条件？

2. 濃度小的气体接近理想气体呢？还是濃度大的气体接近理想气体？

为什么?

3. 实际气体在怎样的压强和温度下比较接近理想气体? 为什么?
4. 什么叫做绝对温标? 它跟摄氏温标的关系怎样? 区别在哪里?
5. 写出把摄氏温度化为绝对温度的表达式; 又怎样把绝对温度化为对应的摄氏温度? 将下列摄氏温度化为绝对温度: (1) 4°C , (2) 100°C , (3) 368°C , (4) -39°C ; 将下列绝对温度化成摄氏温度: (1) 300°K , (2) 272°K , (3) 20°K , (4) 0.5°K .
6. 怎样用绝对温度来表示盖·吕萨克定律? 说出这个表达式的物理意义.
7. 一定质量的气体, 当压强保持不变时, 在什么温度它的体积将是 0°C 时体积的 2 倍、3 倍、 $1/2$ 、 $1/3$? 试用绝对温标表示.
8. 一定质量的气体, 当体积保持不变时, 它的压强跟绝对温度有怎样的关系?

§ 4.8 压强不变时气体的密度和温度的关系

在压强不变时, 温度的变化对气体的密度将产生什么影响呢? 因为气体的质量是一定的, 所以温度升高时, 体积增大, 密度减小; 温度降低时, 体积缩小, 密度增大. 密度减小或增大的倍数等于气体体积增大或缩小的倍数.

假设气体的质量是 m , 在压强不变的条件下, 温度 T_1 时的体积是 V_1 , 密度是 D_1 ; 温度 T_2 时的体积是 V_2 , 密度是 D_2 . 可以写出:

$$D_1 = \frac{m}{V_1}; \quad D_2 = \frac{m}{V_2}.$$

由此得到

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

但是, 根据盖·吕萨克定律的绝对温标表达式:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

于是, 我们得到

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

它表示,当压强不变时,气体的密度跟它的绝对温度成反比.这一关系在实际生活中起着很重要的作用.空气受热后因为密度减小,比较轻,所以向上升.这就是大气层中空气运动以及烟囱能起通风作用的原因.

例 14. 有一个质量为 140 克的纸球,容积是 1.75 米³,附有漏气小孔.如果在四周空气温度是 15°C 时,把球中的空气加热到 50°C,问这个纸球会上升吗? 已知 0°C 时空气的密度为 0.0013 克/厘米³,纸球的容积保持不变.

【解】 按题意: $D_0 = 0.0013$ 克/厘米³, $t_1 = 15^\circ\text{C}$, $t_2 = 50^\circ\text{C}$.

球内空气受热膨胀,一部分空气由小孔逸出,于是球内空气密度减小.而纸球能否上升,就要看纸球内外空气的密度差所引起的上举力是否超过纸球的重量.

15°C 时空气的密度

$$D_1 = D_0 \frac{T_0}{T_1} = \frac{273}{288} D_0 \approx 0.94 D_0,$$

50°C 时空气的密度

$$D_2 = D_0 \frac{T_0}{T_2} = \frac{273}{323} D_0 \approx 0.84 D_0,$$

根据阿基米德原理,纸球所受向上的举力

$$\begin{aligned} Q &= V(D_1 - D_2)g = 1.75 \times 10^6 \times (0.94 - 0.84) \times 0.0013 g \\ &= 228 g \text{ 达因} = 288 \text{ 克}. \end{aligned}$$

纸球受到的上举力大于它的重量,所以纸球能够上升.

例 15. 某房间的容积是 200 米³.如果大气压强等于 77 厘米高水银柱,那么当气温从 10°C 升高到 25°C 时,房间里空气的质量减少多少? 设空气在标准状况下的密度为 1.3 公斤/米³.

【解】 按题意: $D_0 = 1.3$ 公斤/米³, $V = 200$ 米³,

$t_1 = 10^\circ\text{C}$, $t_2 = 25^\circ\text{C}$, $P = 77$ 厘米高水银柱.

10°C 时的密度

$$D_1 = 1.3 \times \frac{77}{76} \times \frac{273}{283}.$$

25°C 时的密度

$$D_2 = 1.3 \times \frac{77}{76} \times \frac{273}{298}.$$

$$\begin{aligned} \Delta m &= V(D_1 - D_2) = 200 \times \frac{77}{76} \left(\frac{273}{283} - \frac{273}{298} \right) \\ &= 200 \times 1.013(0.965 - 0.916) \\ &= 200 \times 1.013 \times 0.049 = 12.88 \text{ 公斤}. \end{aligned}$$

§ 4.9 理想气体的状态方程(气态方程)

上面我們分別討論了表示气体状态的三个量(体积、压强和温度)中有一个量保持不变时的情况。

对一定质量的气体來說，玻意耳-馬略特定律只反映了温度不变时压强跟体积的关系；盖·呂薩克定律只反映了压强不变时体积跟温度的关系；查理定律只反映了体积一定时压强跟温度的关系。

可是在自然界和生产的实际过程中，这三个量往往是同时发生变化的。例如，地面附近的空气受热后向高空上升时，它的体积、压强、温度同时发生变化；又如內燃机汽缸里的燃料和空气的混合物爆发时，蒸汽机汽缸中的蒸汽在推动活塞做功时，这三个物理量都同时发生变化^①。

因此，确定一定质量气体的体积、压强、温度在同时变化的情形下的相互关系，是十分重要的。下面我們就来研究这个问题。

設有一定质量的气体，初始状态时的体积、压强和绝对温度分别等于 V_1, P_1, T_1 (图 4.8(a))；在最終状态时又分别等于 V_2, P_2, T_2 。可以設想气体从初始状态变化到最終状态的过程是分成两个

^① 这些问题我們将在第八章中詳細討論。

阶段进行的①。在第一阶段中，温度 T_1 保持不变，体积由 V_1 变为 V_2 ，这时压强从 P_1 变化到 P_0 (图 4·8(b))，即气体由初始状态变化到中间状态。在第二阶段中，体积 V_2 保持不变，温度从 T_1 变为 T_2 ，这时压强从 P_0 变化到 P_2 (图 4·8(c))，即由中间状态变化到最终状态。下面我们吧气体状态的变化和它适用的定律列成表：

状 态	体 积	压 强	温 度
初 始	V_1	P_1	T_1
中 间	V_2	P_0	T_1
最 终	V_2	P_2	T_2

} 玻意耳-馬略特定律
 } 查理定律

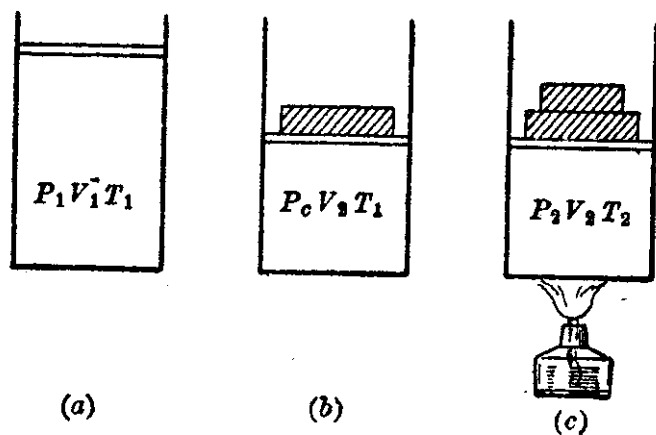


图 4·8 导出气态方程的附图

在第一阶段的变化中，应用玻意耳-馬略特定律，可以写出

$$P_1 V_1 = P_0 V_2,$$

或

$$P_0 = \frac{P_1 V_1}{V_2}.$$

在第二阶段的变化中，应用查理定律，可以写出

$$\frac{P_0}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

把 P_0 代入该式，经过整理后就得到

① 这两个阶段可以任意选择，例如，可以从初始状态经过等容过程变化到中间状态，再由中间状态经过等压过程变化到最终状态；也可以先经过等压过程，再经过等温过程等等。

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (4.10)$$

这就是理想气体的状态方程，简称为气态方程。

这一方程表明：一定质量理想气体的压强和体积的乘积跟它的绝对温度成正比；或者说一定质量理想气体的压强和体积的乘积被它的绝对温度来除所得的商，在状态变化中恒定不变。

在一般温度和压强下，许多实际气体都可以近似地应用这个方程。

在解题时，经常要根据一定质量的气体在某一温度及某一压强下的体积来求出气体在标准状况下的体积。根据式(4.10)可以得到

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0 V_0}{273},$$

因此，

$$V_0 = \frac{273 \cdot PV}{P_0 T}.$$

式(4.10)还可以用来确定气体在任意状态下的密度。用气体的质量 m 与密度 D 的比来代替气体的体积，则式(4.10)可以写成

$$\frac{P \cdot \frac{m}{D}}{T} = \frac{P_0 \cdot \frac{m}{D_0}}{273},$$

整理后得到

$$D = D_0 \frac{273 \cdot P}{T \cdot P_0}.$$

很明显，只要知道气体在标准状况下的密度 D_0 就可以计算出气体在任意温度 T 和压强 P 下的密度 D 。

例 16. 在容积为 25 升的容器中，盛有温度为 37°C 、压强为 62 大气压的氮。求它在标准状况下的体积和质量。在标准状况下氮的密度是 0.00018 公斤/升。

【解】 按题意： $t = 37^\circ\text{C}$ ， $P = 62$ 大气压，

$V = 25$ 升， $P_0 = 1$ 大气压，

$$t_0 = 0^\circ\text{C}, \quad D_0 = 0.00018 \text{ 公斤/升.}$$

气体的绝对温度

$$T = 273 + t = 310^\circ\text{K},$$

标准状况下的体积:

$$V_0 = \frac{273 \cdot PV}{P_0 T} = \frac{273 \times 62 \times 25}{1 \times 310} = 1365 \text{ 升.}$$

$$m = D_0 \cdot V_0 = 0.00018 \times 1365 = 0.2457 \text{ 公斤.}$$

例 17. 在容积为 40 升的容器中, 盛有二氧化碳 3.96 公斤. 如果容器能承受的压强不超过 60 大气压, 那末在什么温度下容器有爆炸的危险? 二氧化碳在标准状况下的密度是 0.00198 公斤/升.

【解】 按题意: $V = 40$ 升, $P = 60$ 大气压, $m = 3.96$ 公斤,
 $D_0 = 0.00198$ 公斤/升, $P_0 = 1$ 大气压.

标准状况下的体积

$$V_0 = \frac{m}{D_0},$$

爆炸时的绝对温度 T 由下式求得

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0 V_0}{273},$$

由此可得

$$T = \frac{273 \cdot PV}{P_0 V_0} = \frac{273 P V D_0}{P_0 m} = \frac{273 \times 60 \times 40 \times 0.00198}{1 \times 3.96} \\ \approx 327.6^\circ\text{K}.$$

$$t = T - 273 = 327.6 - 273 = 54.6^\circ\text{C}.$$

例 18. 图 4.9 所示是炮上所用的复座装置(使炮在发射后恢

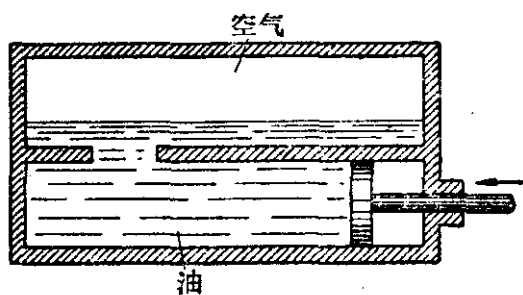


图 4.9

复原位的装置)。其中的空气在 17°C 和 50 大气压下的体积等于 8 升. 求在炮反冲終了时装置中空气的压强. 此时空气的体积为 2 升, 温度为 127°C .

【解】 按题意: $V_1 = 8$ 升,

$P_1=50$ 大气压, $t_1=17^\circ\text{C}$, $V_2=2$ 升, $t_2=127^\circ\text{C}$.

空气在反冲前后的绝对温度分别是

$$T_1=t_1+273=290^\circ\text{K},$$

$$T_2=t_2+273=400^\circ\text{K},$$

由下面的公式中求出最终压强

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2},$$

因此,

$$P_2 = \frac{P_1V_1T_2}{T_1V_2} = \frac{50 \times 8 \times 400}{290 \times 2} = 276 \text{ 大气压}.$$

例 19. 某房间的容积为 60 米^3 , 处在 20°C 和 0.99 大气压的条件下, 求其中空气的质量. 已知空气在标准状况下的密度等于 0.00129 公斤/升.

【解】 按题意: $V=60 \text{ 米}^3$, $t=20^\circ\text{C}$, $P=0.99$ 大气压,
 $P_0=1$ 大气压, $D_0=1.29$ 公斤/米³.

(1) 室内空气的绝对温度

$$T=273+20=293^\circ\text{K},$$

(2) 空气在标准状况下的体积

$$V_0 = \frac{273PV}{TP_0},$$

(3) 空气的质量

$$m = D_0V_0 = \frac{D_0 273 PV}{TP_0} = \frac{1.29 \times 273 \times 0.99 \times 60}{293 \times 1} \\ = 71.48 \text{ 公斤}.$$

习 题 4.9

1. 写出理想气体的状态方程, 并说明它的含义. 实际气体在什么情况下才能比较正确地符合这一方程?

2. 试就理想气体的状态方程 $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$ 导出玻意耳-马略特定律、盖·吕萨克定律和查理定律.

3. 有人认为：对一定质量的气体来说，如果它同时符合三个定律（玻意耳-馬略特定律、盖·呂薩克定律和查理定律）中的任意两个，那么它也必然符合第三个定律。这种讲法对不对？为什么？

[提示：如果同时遵守任意两个定律，就可以证明它符合气态方程。讀者可以假定这部分气体从初始状态经过等容变化到中间状态，再经等压变化到最终状态。]

4. 当温度是 10°C 、压强是 78 厘米高水銀柱时，容积是 8 米 \times 5 米 \times 4 米的房間內含有空气多少公斤？

5. 当压强等于 72 厘米高水銀柱、温度等于 127°C 时，空气的密度是多少？

6. 鋼筒的容积为 20 升，內装氧气，当温度为 16°C 时，氧的压强为 100 大气压，求它在标准状况下占有的体积。

§ 4.10 气体在迅速膨胀和压缩时 温度的变化——絕热变化

实验证明，气体被迅速地压缩时，它的温度会升高；而在迅速地膨胀时，温度却又会降低。

例如，先在一个厚壁玻璃圆筒的底上放一块被乙醚稍微沾湿的棉花，使筒内产生具有爆发性的乙醚和空气的混合物。然后把活塞很快地从筒口向筒底推下去（图 4.10）。这时，我们将看到，筒内发生了小小的爆炸，棉花开始燃烧起来。这种现象告诉我们，当筒内的混合物被很快地压缩时，温度急剧地上升。

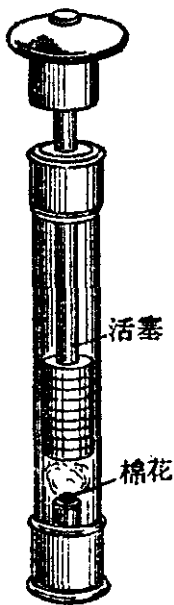


图 4.10 筒内的混合物受到很快压缩时，温度升高，使筒底的棉花燃烧起来

这一原理已经在技术上得到了广泛的应用。例如在狄塞耳内燃机里，汽缸中的空气被迅速压缩时，温度急剧升高，使喷入汽缸中的液体燃料达到燃点而燃烧起来（关于这种内燃机的工作情形，将在第八章中进行讨论）。

那么怎样来解释这种现象呢？我们知道，

物体温度的改变是跟内能的改变相互联系着的(見 §2·2)。当气体被迅速地压缩时,它的温度开始升高,这表明气体的内能增加了。而气体内能的增加是由于外力对气体做了功的缘故。

气体迅速膨胀时的温度降低现象也可以从下面的实验中看出。把水汽充入一个玻璃瓶里,瓶口用塞子塞紧,再把空气打入瓶中。当瓶内气体的压强增加到某一限度时,里面的空气就会推开塞子冲出来。这时瓶中的水汽开始冷却而凝成了雾(图 4·11)。由此可见,当气体迅速膨胀时,它本身做了功,因而内能减少,温度降低。

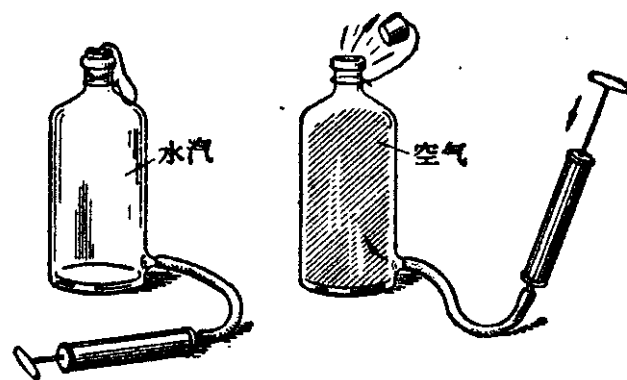


图 4·11 瓶内的压缩空气由于膨胀而冷却,使水汽变成雾

显然,气体被迅速地压缩时的变热和膨胀时的冷却现象,都是能量守恒定律的一种表现。

利用气体迅速膨胀时温度的急剧降低现象,可以制取液态气体,关于这一点将在第七章中加以叙述。

日常生活的经验告诉我们,一个物体跟周围物体以热传递的方式交换内能的过程是需要一段时间的。例如把水壶放在火炉上烧开水,或者使杯里的热水冷却,都要经过一段时间。如果时间太短,那么,物体之间的热交换实际上还来不及进行。当我们迅速地压缩气体或让气体迅速地膨胀时,气体状态的变化进行得如此地快,以致来不及跟周围的物体以热传递的方式交换内能^①,这种过程叫做绝热过程。

^① 一般就說“沒有热量的交换”。

由于这时气体跟周围物体没有热量的交换,因此,对气体做功时,气体的内能增加;而当气体本身做功时,内能减少。

一般说来,气体状态进行得很快的变化都可以当作是绝热过程。

根据分子运动论,我们能够更清楚地解释气体在迅速压缩时的发热现象和迅速膨胀时的冷却现象。

气体分子向静止不动的器壁撞击并从它上面弹回时,分子的速度和动能值在撞击前后是相等的。如果分子向朝着它们运动的活塞撞击,那么它们从活塞弹回时的速度和动能就要比撞击前大一些(这跟乒乓球碰在朝它打来的球拍上以后速度增大的情形类似),因为朝着气体分子运动的活塞把附加的能量传给了跟它发生碰撞的分子。因此,气体在受压缩时内能会增大。相反,如果分子向离开它们移动的活塞撞击,那末弹回时的速度和动能就要比撞击前小一些,因为这时分子推动活塞使之后退,把自己的一部分动能传给了活塞。所以说,膨胀时气体的内能减少。

§ 4.11 气体在技术上的应用

气体在工业上有着极为广泛的应用。例如,利用液体燃料燃烧时产生的高温气体使内燃机工作;利用爆炸性物质爆炸时产生的高温气体的巨大膨胀力来开掘矿井和打通山中的隧道。

普通的枪炮都是利用高温气体的膨胀力来发射子弹或炮弹的。自动武器更是利用发射时气体的高压来补充子弹。装在炮上的复位器(见图4.9)也是利用被压缩的高温气体的膨胀力使炮筒在射击后返回到原来的位置。

除了高温的压缩气体以外,在很多场合下还要应用一般温度(室温)下的压缩气体。例如,汽水厂里要用压缩的二氧化碳;机械厂里要用压缩的可燃气体焊接或切割金属。又如各种风动工具:风镐、风钻、空气铆钉锤等等也是利用压缩空气来工作的。风动工具的使用可以大大地减轻劳动强度和提高了劳动效率。

此外,压缩空气也被广泛地应用在喷漆装置上,从这种装置中射出的气流把油漆喷射在墙壁或汽车的表面上。其他如农业上用的喷雾器就是利用压缩空气来喷洒药剂的。有些电车和公共汽车的车门也是利用压缩空气来控制开关的。在风动输送设备里,还利用压缩空气来输送各种粉末的物料,如煤末、水泥、谷物、沙子等等。

在各种运输工具,如有轨电车、无轨电车和火车的制动装置中,一般都是用压缩空气来控制刹车的。

用来制备压缩气体的装置叫做压气机。压气机可以分为两种类型:一种是离心式(跟第一册中介绍过的离心式抽机相类似),另一种是活塞式。下面我们简单地介绍一下活塞式压气机的工作原理。

图 4·12 是这种压气机工作的示意图。

压气机有一个带活塞的圆筒和两个阀;其中一个吸气的,另一个是排气的。活塞向下运动时(图 4·12(b)),吸气阀(右侧)打开使气体被吸入圆筒;活塞向上运动时(图 4·12(a)),吸气阀关闭,已吸入圆筒的气体被活塞压缩,达到一定压强后冲开排气阀进入贮存压缩气体的钢筒内。

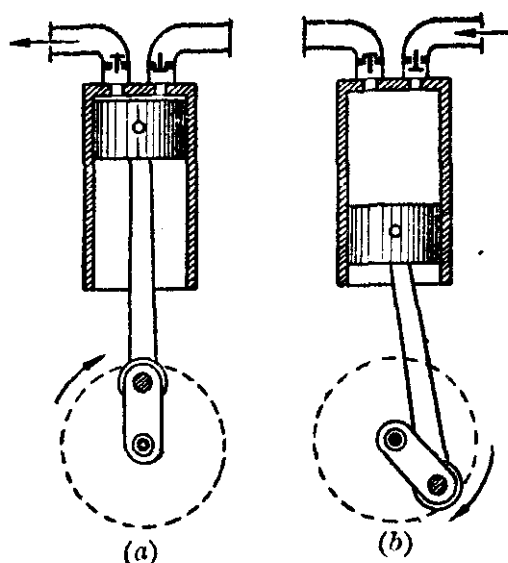


图 4·12 活塞式压气机工作示意图

本章提要

1. 气体的状态 气体没有固定的体积和形状。由于分子热运动的结果,气体能够自发地充满任何容器。气体分子间的距离较大,所以容易被压缩,并且分子间的相互作用力可以略去不计。大量分子不断地撞击器壁就产生压强;气体的浓度越大,温度越高,压强也就越大。对于一定质量的气体来说,压强、体积和温度表明气体的状态;如果这三个量中的任何两个发生变化,或者是三者同时改变,那么气体的状态就发生了变化。

2. 气体的压强、体积和温度 这三个量中只有两个量发生变化时的情况:

✓ [等温变化] 当温度不变时,一定质量的气体的体积跟它的压强成反比,即 $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$ 或 $P_1V_1 = P_2V_2$ ——玻意耳-马略特定律。

✓ [等压变化] 当压强不变而温度每升高 1°C 时,一定质量的气体体积的增加,等于它在 0°C 时体积的 $1/273$ ——盖·吕萨克定律。

由此可见,气体的热膨胀要比固体和液体大得多,而且不同气体的体胀系数都接近于相等。

✓ [等容变化] 当体积不变而温度每升高 1°C 时, 一定质量的气体压强的增加等于它在 0°C 时压强的 $1/273$ ——查理定律。

以上三个定律在压强不太大和温度不太低的情况下, 对一般气体都近似地正确。因此应用时必须注意到定律中规定的条件。

3. 理想气体 以上三个定律都只是近似地反映了气体的性质。能够严格地符合这三个定律的气体, 叫做理想气体, 它是为了研究方便起见而假设的一种气体。从分子运动论的观点来看, 理想气体要符合两个条件——分子没有体积和分子间完全不存在相互作用力。

4. 绝对温标 以摄氏零下 273 度为零度而分度并与摄氏温标相同的温标, 叫做绝对温标或开氏温标。绝对温标和摄氏温标上的度数存在着下列关系:

$$\text{绝对温标上的度数} = \text{摄氏温标上的度数} + 273$$

$$\text{即 } T = t + 273 \text{ 或 } t = T - 273.$$

利用绝对温度表示时,

盖·吕萨克定律可以写成

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

即当压强不变时, 一定质量气体的体积跟绝对温度成正比。

由此得到

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{T_2}{T_1},$$

即当压强不变时, 一定质量气体的密度跟绝对温度成反比。

查理定律可以写成

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

即当体积不变时, 一定质量气体的压强跟绝对温度成正比。

5. 气态方程 它是表示一定质量气体的压强、体积和温度同时发生变化时三者之间的关系方程, 它指出压强和体积的乘积跟绝对温度的比值在变化过程中是一个不变量。气态方程的表达式是

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}.$$

玻意耳-马略特定律、盖·吕萨克定律和查理定律都是气态方程的特殊情况。

6. 绝热变化 迅速压缩气体或让气体迅速膨胀, 使它来不及跟周围物

体交换热量,这种过程叫做絕热过程. 气体在絕热压缩时,由于外力对它做了功,所以內能增加,温度升高. 气体作絕热膨胀时,它反抗外力做功,所以內能减少,温度降低.

复习題四

本章中心内容为理想气体的状态方程(題中的气体都可以当作理想气体).

1. 設一定质量的气体在初始状态时的压强、体积和絕对温度分别为 P_1 、 V_1 和 T_1 ;先通过一个等压变化,再通过一个等容变化,在最終状态时的压强、体积和絕对温度分别为 P_2 、 V_2 和 T_2 . 試由此导出气态方程

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

(参見 § 4.9 的推导).

2. 表明一定质量的气体状态的三个量——压强、体积、温度——如果其中的两个量保持不变,問第三个量是否发生变化? 为什么? 如果有一个量保持不变,其余两个量的变化各遵循什么規律? 如果三个量同时发生变化,它們又遵循什么規律?

3. 一定质量的气体,当温度不变时,它的密度跟压强有什么关系? 又当压强不变时,它的密度跟温度有什么关系?

4. 內徑均匀的玻璃管长 1 米,两端开口,今将其垂直地插入水銀槽中,待浸入水銀中 90 厘米时,用大拇指紧封其上口,然后漸漸提起,使管长的 90 厘米露出槽內水銀表面. 設大气压强为 75 厘米高水銀柱,求管內外水銀面的高度差.(假定温度沒有变化.)

5. 上題中如果管內密封空气柱的长度恰好是 30 厘米,那么管頂要高出槽內水銀面多少厘米?

6. 水銀气压計的管高 85 厘米(从槽中水銀面到管頂的高度),由于管內水銀柱上端的空間留有少許空气,所以气压計变得不准确. 当实际气压为 77 厘米高水銀柱时,这个气压計的讀数是 76 厘米. 如果它的讀数是 75 厘米时,实际气压應該是多少?

7. 在压强不变的情况下,必須使气体的温度升高到几度才能使它的体积变为它在 273°C 时体积的 2 倍?

8. 在 20°C 时气体的压强是 1 大气压. 如果使它的体积保持不变,当温度升高到 50°C 时,它的压强等于多少? 又降低到 -7°C 时,它的压强等于

多少?

9. 某房間的容积是 100 米^3 , 如果大气压强是 77 厘米高水銀柱, 那么当温度从 10°C 升高到 25°C 时, 这个房間里空气的质量减少了多少? 在标准状况下空气的密度为 0.001293 克/厘米^3 .

10. 用温度为 20°C 、压强为 75 厘米高水銀柱的氫气充滿容积为 300 米^3 的气球. 如果从貯气筒內每秒进入气球的气球质量为 2.5 克, 那么要用多少時間才能把气球充滿? 氫气在标准状况时的密度为 $0.00008987 \text{ 克/厘米}^3$.

11. 在等体积变化和等压变化中, 单位体积中的分子数跟绝对温度有什么关系?

12. 在等温变化中, 单位体积中的分子数跟压强有什么关系?

第五章 液体的性质

§ 5.1 液体的特征

液体在自然界中的分布很广（地球表面的十分之七为水所复盖），并且在工程技术中得到了广泛的应用。因此，除了已经学过的液体和气体共同具有的力学性质以外，还必须初步认识一下液体所特有的一些性质。

在本书的第一章中已经讲过，液体的性质介于气体和固体之间。它的主要特征是：具有大致固定的体积，富于流动性，并具有自由表面。

由于液体的各部分在受到很小的力作用时也很容易移动，所以，只有当液体表面和它所受到的作用力垂直时，液体才能静止不动。事实上，如果在某一瞬时，作用于液面上的力 F （少量液体 A 的重量）跟液面成某一角度，那么可以把此力分成为两个分力（图 5.1），一个是垂直于液面的分力 F_1 ，另一个是沿液面切线方向上的分力 F_2 。

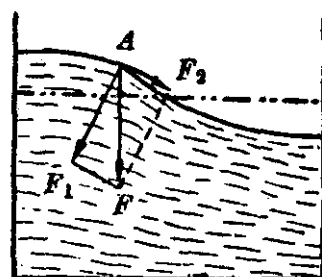


图 5.1

力 F_2 无论怎样小，总是可以使液体 A 沿液面移动，从而改变液面的形状，直到 F_2 消失时，也就是作用力跟液面垂直时才停止。

大湖和海洋的水面都是弯曲并呈球形表面，或者更确切地说，是椭球形表面。这是因为与作用于水面上各点的重力相垂直的面是椭球形的缘故。通常容器中的液体，因为受到竖直的重力作用，所以表面为水平面。

但是，如果没有重力和任何其他外力作用时，液面将会产生怎

样的一种现象呢？我们知道，小液滴往往呈球状，例如荷叶上的小水珠、树叶上的露珠都接近于球状。

在水平的玻璃板上，大的水银滴呈扁平形状，而小的水银滴却是球形的（图 5·2）。这是因为大的水银滴的重量比较大，它的形状受到重力的影响也比较显著，因而成为扁平形状；而小的水银滴的重量很小，它的形状几乎不受重力的影响，所以成为球状。如果在小水银滴上放一块玻璃片，那么，小水银滴由于受到了玻璃片重量的影响也会变成扁平的。相反，如果我们设法消除液体的重量对它本身所固有的形状的影响，那么可以预料，即使是大量的液体，它的形状也会成为球状。让我们来看一下下面的实验。



大的水銀滴是扁平的 小的水銀滴成球形

图 5·2

把水和酒精混合在一起，使混合液的比重和橄欖油的比重相等。然后把橄欖油滴入混合液中，这时可以看到，混合液里的橄欖油形成球状。而且非但小油滴形成球状，连由小油滴结合而成的大油滴也形成球状（图 5·3）。

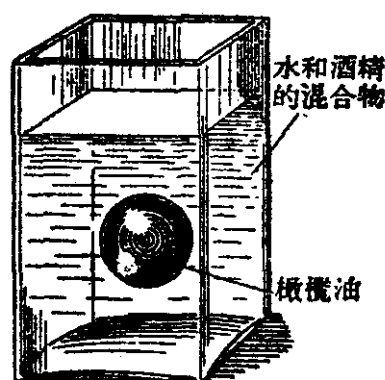


图 5·3 水和酒精混合液中的橄欖油滴

根据阿基米德定律，油滴所受的浮力等于它所排开混合液的重量。现在由于混合液的比重等于橄欖油的比重，所以油滴本身的重力和它所受的浮力恰好平衡。这样，我们就消除了重力对油滴形状的影响。

因此，当我们说：“液体没有一定的形状”时，仅对主要受到重力作用的大量液体而言。少量的液体，或不受重力影响的大量液体，在本身内力的作用下都具有一定的形状，那就是球状。

几何学告诉我们：体积相同而形状不同的物体以球形物体的表面积为最小。由此可见，液体的自由表面有收缩到最小面积的趋势。

为什么会产生这种现象呢？下面我们根据“分子运动论”的基本原理来加以说明。

习 题 5·1

1. 液体的最基本的特征是什么？
2. 为什么大量液体的表面总是呈水平面形状的？
3. 如果我们能够消除重力对液体的影响，那末液体将呈现出怎样的形状？这一现象显示了液体表面的什么特性？

§ 5·2 液体的表面层

我们早已知道，液体中分子间的距离比气体中分子间的距离小得多。在1个大气压和 100°C 时，水的密度大约是水蒸汽密度的1670倍。因此，液体分子运动的特征以及液体的许多性质都是由分子间的相互作用力来决定的。

在§1·4中已经讲过，分子间的相互吸引力只有在很短的距离内才能发生作用，这个距离不超过0.0000006厘米(或 6×10^{-7} 厘米)。由于分子引力在各个方向上都是一样大的，因而分子引力

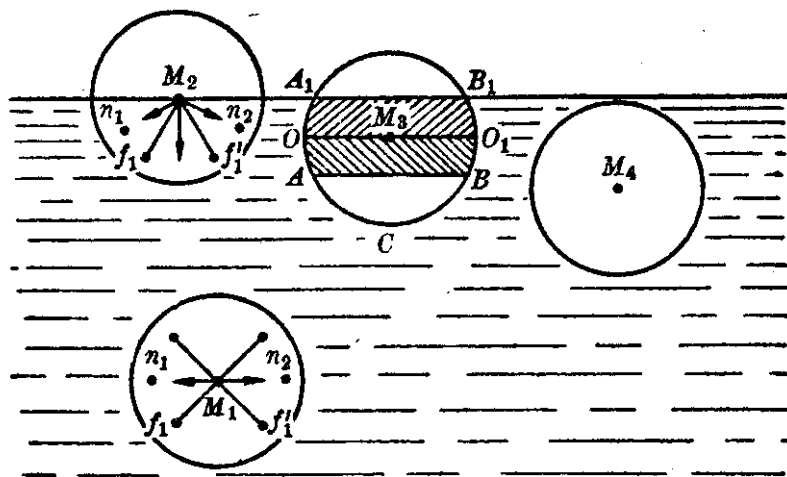


图 5·4 作用在液体内部的分子和液体表面层的分子上的力

作用的範圍可以认为是一个半徑不超过 6×10^{-7} 厘米的球。这个球叫做分子作用球(图 5·4)。

下面我們分別討論处于不同地位的液体分子所受的作用力。

在液体内部任意取一个分子 M_1 ，那么，以它为中心的分子作用球就处在液体内部。在球内的某一个分子 n_1 以力 f_1 作用于 M_1 ，而以 M_1 为对称中心跟 n_1 对称的另一个分子 n_2 也以同样大小的力 f'_1 作用于 M_1 ，但是，作用的方向恰好相反。所以，这两个对称的分子对 M_1 的作用恰好互相抵消。球内的所有分子都对 M_1 有作用，但是因为球内的液体分子是均匀分布的，且对 M_1 來說都是两两对称的，因此，球内所有分子对 M_1 的作用力的合力等于零；或者說 M_1 所受到的分子引力是互相平衡的。

但是，在液体表面上的分子，例如分子 M_2 的情形就不同了。以这个分子为中心的分子作用球，只有一半在液体内部，另一半在气体中。作用球上半部的气体分子，比起下半部的液体分子来要少很多，所以它們对 M_2 的吸引力比液体部分对 M_2 的吸引力小很多，甚至可以忽略不計。这样，我們可以认为只有作用球下半部分的液体分子对 M_2 有作用。

作用球下半部的某一个液体分子 n_1 ，以力 f_1 作用于 M_2 ，而以豎直半徑为对称軸跟 n_1 对称的分子 n_2 以同样大小的力 f'_1 作用于 M_2 。 f_1 和 f'_1 分別位于豎直半徑的兩側，它們跟豎直半徑的夹角是相等的。以 f_1 和 f'_1 为邻边所作的菱形的对角綫表示这两个力的合力，它的方向豎直朝下，指向液体内部。在作用球下半部的所有其他液体分子，对于豎直半徑也都是两两对称的，所以它們对 M_2 作用力的合力，也是豎直朝下的。由此可見，作用球下半部的所有分子对 M_2 的作用力的合力，方向跟液面垂直而指向液体内部。

图中象 M_3 那样的分子跟液面的距离小于分子作用球的半徑，它的情形和 M_2 相类似。对称层 $OA_1B_1O_1$ 和 AOO_1B 里的分子对 M_3 的作用互相抵消，所以只剩下弓形 ACB 里的那些分子对 M_3

有作用。显而易见，这些分子对 M_3 作用力的合力，方向也是竖直朝下的，但是在数值上要比作用在 M_2 上的合力小一些。

对于 M_4 来说，由于它跟液面的距离等于分子作用球半径，因此球内各分子对它的作用力的合力也就等于零了。

从上面的讨论中可以看出，在跟气体交界并且厚度等于分子作用球半径的液体薄层中的所有分子，都受到指向液体内部力的作用。液体表面的这一薄层叫做表面层。

液体表面层中的分子，在指向液体内部的引力作用下，有从液体表面层进入液体内部的趋势，因而液体要尽可能地缩小它的表面面积。

在下一节中，我们将从能量的观点来解释液体表面的收缩趋势。

习 题 5.2

1. 什么叫做分子作用球？它的半径具有什么意义？大约等于多少？
2. 什么叫做液体的表面层？处于这一层里的分子受力情况怎样？
3. 应用分子作用球的概念，比较处于液体内部的分子和处于表面层中的分子的受力（分子力）情况。并说明为什么表面层中的分子总有向液体内部移动的趋势？

§5.3 表 面 能

由于表面层里的分子都受有指向液体内部的拉力作用，因此，如果要把液体分子从内部移到表面层去，就必须克服这个拉力做功。这个力从分子通过表面层的下界面（此界面离液面的距离等于分子作用球的半径）时开始发生作用，并随着分子接近液面而逐渐增大。反抗这个力所做的功转变成分子的势能，正如把石块从地面上举起时，反抗重力所做的功转变成石块的势能一样。因此，位于液体表面层中的每一个分子，比起液体内部的分子来，也就具

有較大的势能。这就好象被举起的石块要比它在地面时具有較大的势能一样。表面层中全部分子所具有的額外的势能的总和，叫做表面能，它是內能的一种形式。液体的表面越大，具有較大势能的分子数也越多，因此，表面能也越大。当一定质量的液体的表面增加时（例如把水分散成許多小水滴），液体的內能也增加。这就是我們曾經在 § 2·3 中讲过的物体内能改变的一种情况。

在力学中我們已經学过，一个物体在穩定平衡时，势能最小。例如，被举高的物体，如果沒有力支持它，便会向低处下落，也就是向势能較小的位置移动。这个原理不仅适用于力学，而且具有普遍的意义。根据这个原理，表面层中的分子，同样也有向势能較小位置移动的傾向。因此，一定质量的液体处于穩定平衡时，它的表面能总是处于一切可能值中的最小值。但是，只有在液体的表面积减小时，它的表面能才可能减少。因此，液体的表面要尽可能地收縮，直到表面积最小时为止。而且几何学告訴我們，包圍一定体积的各种表面，以球面的面积为最小。所以，除了液体內部的分子相互作用力以外，如果沒有外力作用，液体都将形成球状。大量液体总是依照盛着它的容器的形状分布，这是因为重力和容器壁起主要作用的緣故。少量液体如露珠和小水銀滴則呈現球状，这是因为分子力的作用已处于主要地位。

习 題 5·3

1. 为什么說，处于液体表面层中的分子，比起液体內部的分子来具有較多的势能？
2. 把大块液体分散为許多小液滴时，液体的內能发生了什么变化？为什么？
3. 为什么液体表面有自发收縮的趨勢？为什么小液滴总呈現球状？
4. 棉花沾水后体积会发生怎样的改变？說明这一現象。
5. 为什么头发浸在水中时向四面分开，而离开水面后会立即粘在一起，并紧貼在头上？

6. 將細金屬絲放在火焰上鍛燒后，它的熔化端會成球形。這是什麼原因？

7. 製造鉛丸時，我們把熔化的鉛在高處由細孔中滴入水中。當鉛在水中下沉時，逐漸冷卻，同時凝成球形。解釋這種現象。

§ 5.4 表面張力

在 § 5.2 ~ § 5.3 中，我們已經從力的角度和能量觀點解釋了液體表面的收縮趨勢。為了更清楚地認識液面的這種性質，可以用肥皂膜來做下面的實驗。

在用金屬絲制成的圓環的兩點（近乎是直徑的兩端）上系一根棉綫（綫不要綑緊），然後把環浸入肥皂水里，使環上形成一層肥皂水的薄膜。這時棉綫在薄膜的中間是鬆弛的（圖 5.5(a)）。但是，如果用熱針戳破棉綫左側的薄膜，那麼，薄膜右側的表面會立即收縮，於是棉綫就彎向右面，成為如圖 5.5(b) 所示的弧形；同樣，如果戳破棉綫右側的薄膜，那麼，棉綫就被左側的薄膜拉緊，成為如圖 5.5(c) 所示的弧形。

這些現象表明棉綫段的各部分都有力的作用，力的方向到處跟綫段垂直（圖 5.5(d)）。這種表現為使液面自動收縮的力叫做表面張力。當環上的薄膜完整時，由於棉綫各段所受兩側薄膜的拉力大小相等、方向相反，所以棉綫在環中的任何位置都能保持平衡。又因為這些力到處跟綫段垂直，所以當一側的薄膜被刺破時，棉綫被另一側的薄膜拉緊成圓弧狀，而不是其他的形狀。

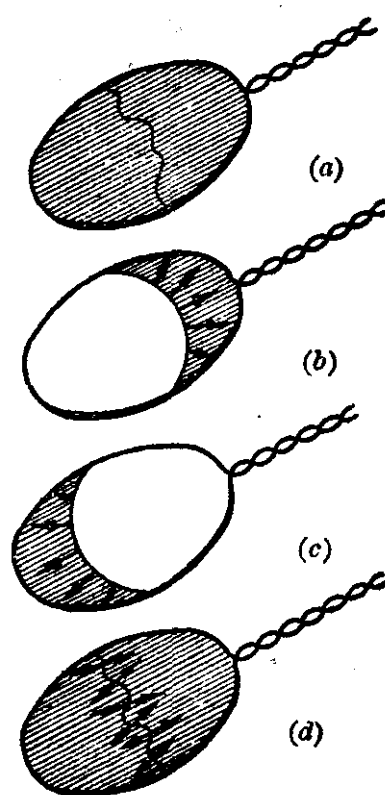


圖 5.5 說明液體表面張力的實驗

同样地,下面的实验也能够证明上述解释的正确性.

把浸湿后的棉线圈放在金属丝环的肥皂膜上(图 5·6),这时,棉线圈是松弛的,可以采取任意形状. 如果用热针戳破棉线圈内部的肥皂膜,那么,由于棉线圈外部肥皂膜的收缩,线圈就被拉成圆形^①. 这一结果说明,表面张力是均匀的,而且垂直地作用在线段的各部分.

如果使不同几何形状的几个金属框上布满肥皂水的薄膜(图 5·7),那么每一个框上的薄膜只能有一种确定的形状,这时薄膜的面积,对于每一个框来说都是最小的. 这是因为在表面张力的作用下,薄膜都要收缩,使面积尽可能地小.

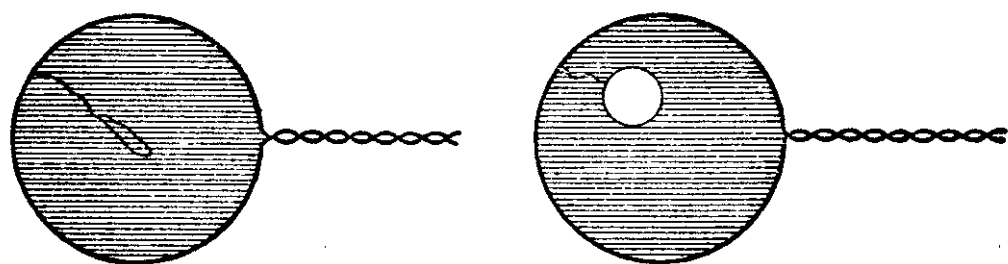


图 5·6 表面张力均匀而垂直地作用在线段的各部分

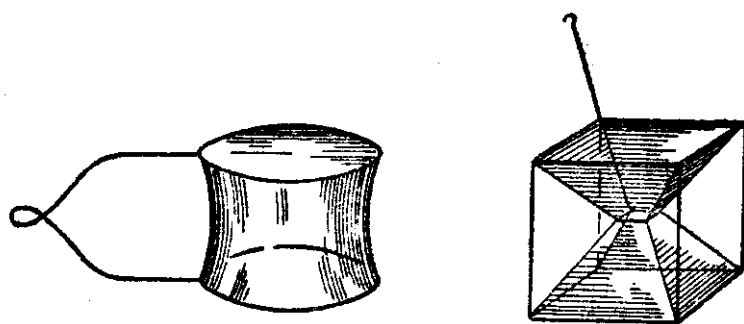


图 5·7 薄膜收缩而采取尽可能小的面积

通过上面的实验和讨论,我们可以得出结论:由于表面张力的作用,液体的表面都有收缩到最小面积的趋势. 同时,还应该看到,表面张力是跟液面相切的. 如果液面是平面,例如图 5·5 和

^① 几何学告诉我们,长度一定的周界所包围的面积,以圆的面积为最大. 因此,当棉线圈成圆形时,金属环中薄膜的面积为最小.

5.6 中的实验，那么，表面张力就出现在这个平面内；如果液面是曲面（这种情况我们在后面将要学到），那么，表面张力将出现在这个曲面的切面内。

习题 5.4

1. 水比沙轻。但是，为什么沙漠中的风能刮起大量沙子，而海洋上的风却只带有少量的水沫？
2. 新的布料落水后都要收缩。如何说明这一现象？
3. 系在两棵树之间的绳子，淋雨后是更下垂呢还是张得更紧？为什么？

§ 5.5 表面张力系数

在 § 5.4 中，我们曾经讲到液体的表面对它的边界（例如图 5.6 中的棉线）有拉力的作用，这些拉力称为表面张力，它的作用方向总跟分界线垂直。在本节中我们将讨论怎样来测定液体的表面张力。

把一根弯成如图 5.8 所示形状的金属丝悬挂在灵敏弹簧测力计的下端。然后将盛着液体的杯子放在金属丝下面，使金属丝垂直地浸入液体中。这时如果把测力计慢慢地向上移动，让金属丝的水平部分从液体里露出来，就可以看到，金属丝和液面之间出现了一层液体的薄膜，同时金属丝本身也被薄膜包围着。由于表面张力的作用，薄膜向下拉引金属丝，而使测力计的弹簧伸长。继续向上移动测力计，直到金属丝和液面之间的薄膜刚要断开为止。设此时测力计的读数是 F ，则 F 应等于金属丝的重量 mg 跟薄膜向下拉引金属丝的张力之和。因为液膜有两个表面，每一边的向下拉力为 f 。所以得到式

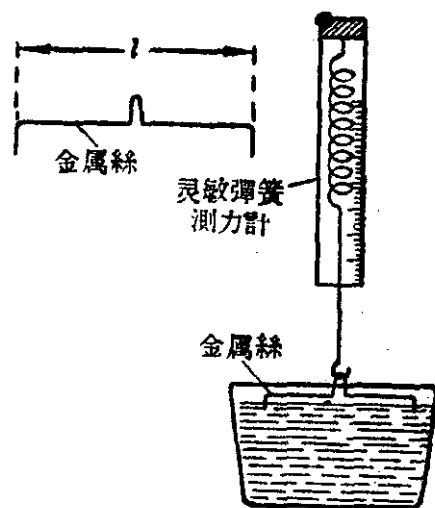


图 5.8 表面张力系数的测定

$$F = mg + 2f,$$

移項整理后得到

$$f = \frac{F - mg}{2},$$

f 是作用在长 l 的液膜边界上的張力 (l 是金属絲两脚之間的距离), f 跟 l 的比值就等于液面对单位长度边界綫的作用力, 叫做液体的表面張力系数, 一般用 σ 来表示.

因此, 我們就得到

$$\sigma = \frac{f}{l} = \frac{F - mg}{2l}.$$

如果力的单位用达因, 长度的单位用厘米来表示, 那么, 表面張力系数的单位就是达因/厘米.

利用上述的實驗方法, 可以粗略地測得各种不同液体的表面張力系数. 以后我們还要介紹一些表面張力的精密測量方法.

表 5.1 所列的是几种液体的表面張力系数.

表 5.1 几种液体的表面張力系数(达因/厘米)

液 体	測量时的 温度(°C)	σ	液 体	測量时的 温度(°C)	σ
水	20	72.6	液态的鉄	1267	963
肥皂液	20	40	液态的鉛	336	442
酒精	20	22	液态的鉑	2000	1819
乙 醚	20	17	液态的氫	-253	2.1
水 銀	20	470	液态的氮	-269	0.12

我們来分析一下表中所列的数据.

首先, 表中注明了測量时的温度, 这就表示液体的表面張力系数是跟它的温度有关的. 这个問題在下一节再詳細討論.

其次, 表面張力系数跟液面的大小无关. 也就是說, 在一定温度下的某种液体, 不論其液面事先是否受到拉伸, 液面多大, 它的

表面張力系数总是一定的。

同时,还可以看出,容易蒸发的液体(如乙醚、酒精)的表面張力系数要比不易蒸发的液体(如水銀)的表面張力系数来得小;液态气体的表面張力系数极小,这是因为它們分子之間的內聚力很小(只要温度稍有升高就会变成气体);而熔融的金属的表面張力系数却很大。

必須指出,在測量表面張力系数时,都應該用化学上純淨的液体,因为少量的杂质会显著地改变液体的表面張力系数(在大多数情况下是使它减小)。下面的实验可以用来証实这一点。

如图 5·9(a) 所示,先在盘里的水面上撒一层粉笔灰,然后在它上面滴一滴肥皂液(或乙醚)。这时,可以看到,粉末将从滴入肥皂液的地方向四周散开(图 5·9(b))。这一点表明,沾有肥皂液的水,它的表面張力系数比洁淨的水小(图 5·9(c))。也就是說,洁淨水的表面具有更大的收縮趨勢。

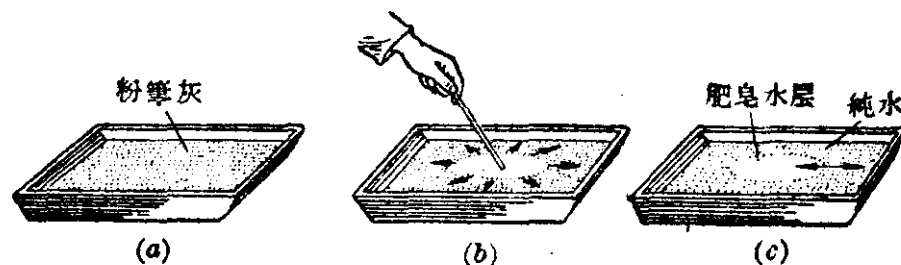


图 5·9 杂质对液体表面張力的影响

如果在水面上放一些樟脑碎屑,我們就会看到这些碎屑在水面上作紊乱和复杂的运动(回轉和奔跑)。发生这种运动的原因是什么呢?这是因为樟脑溶入水中后,就会减小水的表面張力系数;樟脑溶解得越多,表面張力系数减小得越多。同时由于樟脑的形状是不規則的,而且它的各个側面在水中的溶解快慢不同,因而在各个側面,水的表面張力系数也不相等,于是樟脑就向表面張力系数較大的一側运动。正是因为樟脑的运动过程中,它的各个側面的水的表面張力系数仍在不断地发生变化,因此,就引起了樟脑

的紊乱运动。

例 1. 图 5.10 所示是布满了肥皂膜的金屬框。AB 是活动边,长 3 厘米,重量可以不計。如果不考虑摩擦,AB 将朝哪一个方向运动? 作怎样的运动? 已知肥皂膜的表面張力系数为 40 达因/厘米。又 AB 边上所受到的作用力 F 有多大?

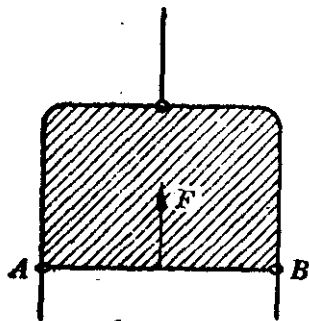


图 5.10

【解】 由于液体的表面有收缩的趋势,并且对它的边界产生拉力作用,因而活动边 AB 受表面張力的作用被拉向布满肥皂膜的一侧(向上)。因为表面張力系数跟

液体表面的大小无关,作用在 AB 边上的力的大小保持不变,所以 AB 边作匀加速运动。

表面張力系数在数值上等于液面作用在单位长度边界上的力。AB 长 3 厘米,肥皂膜有两个表面,因此,使 AB 产生运动的力为

$$F = \sigma \cdot 2l = 40 \times 6 = 240 \text{ 达因.}$$

例 2. 如果在上题中有一个向下的力 F 作用在活动边 AB 上,力的大小恰好等于向上的表面張力。試問使 AB 向下移动 2 厘米需要做多少功? 所做的功用来增加什么形式的能量?

【解】 在上题中,已知 $F = 240$ 达因。

使 AB 向下移动所做的功 $A = F \cdot s = 240 \times 2 = 480$ 尔格。

所做的功用来增加液体的表面能,也就是使更多的液体分子进入表面层,这些分子比它们在液体内部时具有更大的势能。

例 3. 如图 5.11 所示,已知滴管中滴下 50 滴液体,液体共重 1.65 克,滴管的內徑为 1.35 毫米^①。試根据这些数据求出这种液体的表面張力系数?

① “內徑”一般是指內部直徑。有必要指明半徑时,我們用“內半徑”。

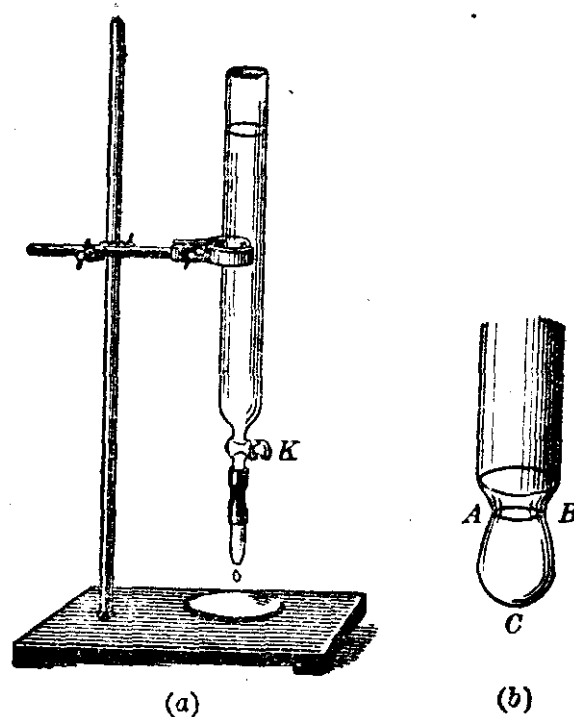


图 5.11

分析 本題所介紹的是另一种測定液体表面張力系数的方法。我們先來說明一下应用这种方法的根据。

滴管中所盛的液体用开关 K 来調节,使它从管中緩慢地流出(图 5.11(a)). 可以看到形成液滴的过程是:液体徐徐地流向管口,先形成类似小袋的形状,然后逐漸增大,下部突出。在液滴脫落之前,它的上部形成一个狭窄的頸部(見图 5.11(b) 中的 AB),頸部越变越細,直到液滴 C 离开管口时为止。

假定頸部的直徑等于滴管的內徑 d 。这时作用在液滴上的力有两个,一个是液滴的重量 P ,另一个是沿 AB 周界向上的表面張力 F ;在液滴脫落之前,这两个力是相等的,也就是

$$F = P, \text{ 或 } \pi d \cdot \sigma = P,$$

从而得到

$$\sigma = \frac{P}{\pi d}.$$

知道了液滴的数目以及它們的总重量后,就能够計算出每一滴液体的平均重量 P 。然后根据上式便可以求得液体的表面張力系数 σ 。

【解】 每一个液滴的重量 $P = \frac{1.65}{50} = 0.033$ 克,

因此,液体的表面張力系数

$$\sigma = \frac{P}{\pi d} = \frac{0.033 \times 980 \text{ 达因}}{3.14 \times 0.135 \text{ 厘米}} = 76.4 \text{ 达因/厘米}.$$

习 题 5.5

1. 液体的表面張力是怎样产生的？它的作用方向怎样？大小跟哪些因素有关？

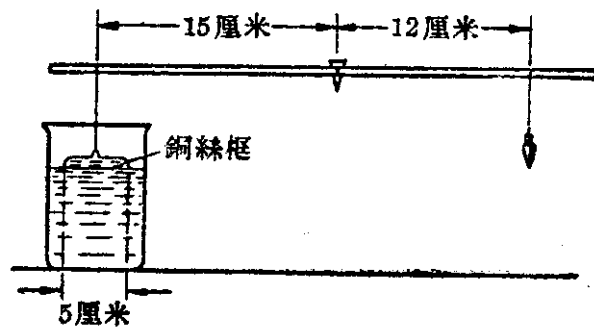
2. 小孩用两头开口的竹笔管吹肥皂泡，当他輕輕吹气时，肥皂泡就变大；当他用手指塞住吹气口时，肥皂泡維持原状；如果他松开手指，肥皂泡就縮小，試解釋这种現象。

3. 为什么肥皂泡总是形成球状？如果一个肥皂泡的大圓周长是5厘米，試問在 20°C 时，以大圓为分界面的两个半球相互吸引的表面張力是多少？

[提示：肥皂膜有內外两个表面.]

4. 在盘中的水面上平行地安放两根火柴梗。如果把一小块肥皂接触火柴梗之間的水面，火柴梗将彼此远离；如果在火柴梗之間的水面上放一小块糖，則火柴梗会相互接近。試解釋上述現象。

5. 如附图所示，利用輕而均匀的杆秤測定肥皂液的表面張力系数。杆秤的支点在杆的中央，秤錘重1克，銅絲框重0.4克，銅絲框两脚之間的距离是5厘米；当銅絲的水平部分和液面之間的肥皂膜剛要分开时，杆上系銅絲框的点和支点相距15厘米，挂秤錘的点离支点12厘米。試从这些数据計算出肥皂液的表面張力系数。



(第5題)

6. 滴管的內徑是1毫米，求在 20°C 时由它滴出的每一滴水滴的重量。

7. 求密度为 0.91 克/厘米^3 的油的表面張力系数。已知滴管的內徑是1.2毫米，由这一滴管滴出的304滴油的体积为 4 厘米^3 。

8. 由两个內徑相等的滴管中滴出相同质量的水和酒精，求二者的液滴数之比。

9. 两个滴管的內徑分別是1.2毫米和0.8毫米。如果从此两滴管中滴出体积相等的同一种液体，求液滴数之比。

§ 5.6 表面張力系数跟温度的关系

前面已經提到,液体的表面張力系数跟温度有关,这可以用同 § 5.5 相似的实验来证实.

在盘中水面上撒一层粉笔灰,然后把一个灼热的金属物体(棒或小球)跟液面某处相接触,使该处的水面受热而温度升高.这时,我们会看到,粉末从灼热物体向四周散开.这表明,温度高的水的表面張力系数要比温度低的水的表面張力系数小一些.也就是说,水的表面張力系数随温度的升高而减小.对于一切液体来说,这一结论也是同样正确的.

表 5.2 列出了水在不同温度时的表面張力系数值.

表 5.2 水的表面張力系数跟温度的关系

温 度 (°C)	0	20	35	60	75	90	100
表面張力系数(达因/厘米)	75.34	72.6	70.24	67.10	64.26	61.31	59.25

为什么所有液体的表面張力系数都毫无例外地随着温度的升高而减小呢? 如果我们对面張力产生的原因有清楚的認識,就不难理解这一点. 下面我们就来分析一下.

我們已經知道,表面張力是液体表面层收縮趋势的表现;表面层收縮的趋势越大,液体的表面張力系数也就越大,而液体表面层的收縮趋势是由表面层中分子的特殊受力情况所决定的. 表面层中的分子,一方面受到液体内部分子的吸引,另一方面又受到气体分子和蒸汽分子(在第七章中将要学到,跟液体相邻的气体中含有这种液体的蒸汽)的吸引. 由于后一种作用比前一种小,因而表面层中的分子有被拉进液体内部的趋势,结果就引起了液面的收縮. 当温度升高时,液体的密度减少而蒸汽的密度增加,因而表面层中分子所受两方面分子引力的差值减少,表面張力也就随之减少.

基于上述原因，一切液体的表面張力系数都随温度的升高而减小，并且随温度的降低而变大。

习 題 5.6

1. 根据表 5.2 的数据，作出水的表面張力系数随温度而改变的关系图綫（以 σ 为纵坐标， t 为横坐标），并从图綫上求出水在 10°C 、 30°C 、 50°C 、 80°C 时的表面張力系数。由图中可以看出，水的表面張力系数随温度的升高而减小的規律为： $\sigma = \sigma_0(1 - bt)$ ， b 是液体表面張力系数的温度系数。按表 5.2 的数据求出水的 b 值。[提示：从图綫中求出的表面張力系数如下]

温 度($^{\circ}\text{C}$)	10	30	50	80
表面張力系数(达因/厘米)	74	71	67	63

2. 从 § 5.5 例 3 的滴管中滴出同一种液体的液滴，問它是在温度高时重呢还是在温度低时重？

3. 同样质量的水由同一个滴管滴出，当水温为 8°C 时得到 40 滴，而水温升到 80°C 时得到 48 滴。如果认为水的密度不变，問在这两种温度下，水的表面張力系数的比值为多少？

§ 5.7 浸 潤 現 象

前面曾經談到，如果液体的表面跟气体（空气）相邻，那么，在液体表面层中的分子都受到一个指向液体内部的力的作用，而使液体的表面趋向于收縮，这种現象是沒有例外的。在这一节中，我們要討論液体跟固体接触面上的一些現象。跟固体接触的液体薄层叫做附着层。

在 § 5.1 中，我們已經看到，放在玻璃板上的小水銀滴是呈球形的。也就是說，跟玻璃接触时，水銀接触面具有收縮的趨勢。然而是不是放在固体表面上的液滴总是能够成为球形的呢？如果我們用稀硫酸把鋅板擦干淨后，再在板上放一滴水銀，我們将会看到，水銀慢慢地沿鋅板散开，而不再呈球形。这时，水銀跟鋅板的

接觸面并不是在减小,而是在增大。

放在玻璃板上的水滴也会慢慢地沿玻璃板散开;而放在石蜡板上的小水滴却能够成为球形。

由此可見,当液体跟固体接触时,会出现两种不同的现象:液滴成为球形,即液体跟固体的接触面有收缩的趋势;液滴沿固体表面散开,即液体跟固体的接触面有扩大的趋势。我们把第一种情形叫做液体不浸润固体,第二种情形叫做液体浸润固体。

在上面的例子中,我们看到,某种液体能够浸润一种固体而不能浸润另一种固体。例如水银能够浸润洁净的锌,却不能浸润玻璃;水能够浸润玻璃,却不能浸润石蜡。

怎样来解释这种差别呢?我们记得,液体表面分子所以力图进入液体内部而使液体表面层收缩,这是由于气体分子对表面层中的液体分子几乎没有吸引力的缘故。

而当液体跟固体接触时,附着层中的液体分子,一方面受到液体内部分子的作用(内聚力),另一方面受到固体分子的作用(附着力)。液体分子跟固体分子之间的附着力是非常显著的,因此,液体是否浸润固体要看内聚力和附着力那一个大来决定。如果内聚力大于附着力,那么,液体不浸润固体,而在固体表面上的小液滴呈球形;相反,如果附着力大于内聚力,那么,液体浸润固体,液滴将沿固体表面散开。

我们可以用实验来证实上述结论的正确性。把一根玻璃棒插入水银中,然后将它抽出,这时可以看到,脱离水银后的玻璃棒是完全干净的,并不沾有水银。这表示玻璃分子跟水银分子之间的附着力小于水银分子之间的内聚力。因此,水银不浸润玻璃。

如果把玻璃棒插入水中,那么当玻璃棒从水中抽出时,我们会看到棒被水沾湿了。这表示水和玻璃之间的附着力大于水分子之间的内聚力。所以,水能够浸润玻璃。

下面我们来讨论液体跟固体器壁接触处液面的形状。我们已

經知道,在較大的容器中,离器壁稍远处的液面总是水平的.然而,

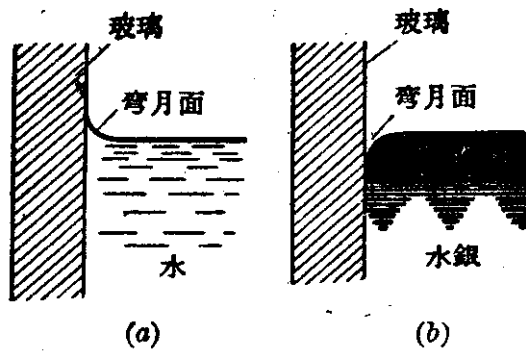


图 5-12 液体跟器壁接触处液面的两种不同形状

器壁附近的液体表面却总是呈弯曲的形状,至于向上弯还是向下弯,則要看液体是否浸潤器壁.

如果液体能够浸潤器壁,那么,由于液体分子跟固体器壁分子之間的附着力大于液体分子之間的內聚力,因而液体紧附在器壁上,并有沿器壁展开的趋势,这时接触处的液面向上弯曲(图 5-12(a)),如水和玻璃容器接触处的情况.

如果液体不能浸潤器壁,例如将水銀放在玻璃容器中时,液面在容器附近的形状如图 5-12(b) 所示,是向下弯曲的.这是因为水銀分子之間的內聚力大于水銀分子跟玻璃器壁分子之間的附着力,因而水銀有离开器壁而收縮的趋势.

在大的容器中,只有在器壁附近才能看到液面的弯曲現象;但是,在很小的容器中,这种現象就十分显著,以致整个液面形成凹形(液体浸潤器壁)或凸形(液体不浸潤器壁)(图 5-13).这种凹形液面或凸形液面叫做弯月面.

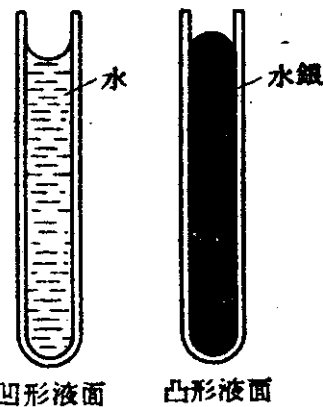


图 5-13 小容器中,浸潤液体呈凹弯月面,不浸潤液体呈凸弯月面

习 題 5.7

1. 能不能用鋼笔在油紙上写出字来? 为什么?
2. 为什么絲綢不能拭干湿的手?
3. 在盛煤油的鉄罐的外表面上为什么总是复有一薄层煤油?
4. 为了把液体灌入細口瓶中去,我們可以将一根洁淨的玻璃細棒插入

瓶中,然后使液体沿着細棒流入瓶內. 說明这种方法的依据. 是否对所有液体都能采用这种方法?

5. 焊接金属物件时,为什么必須先将金属表面用焊液清除干淨?

6. 潤滑剂是否一定要能够浸潤相互摩擦着的金属表面? 試說明理由.

7. 人造地球卫星里的容器中所盛的液体,如果它浸潤器壁,会发生什么現象? 如果它不浸潤器壁,又将发生什么現象?

[提示:注意人造地球卫星中物体的失重現象.]

8. 能否根据玻璃滴管滴下的滴数来計算水銀的重量? 为什么?

§ 5.8 毛細現象

通常把內徑等于或小于1毫米的管子叫做毛細管.

如果把几根玻璃毛細管的下端插入帶有顏色的水里,我們就可以看到,水将沿管壁上升,使管中的水面高出容器里的水面. 管子的內徑越小,管中的水面就升得越高(图 5.14). 如果把这些細玻璃管浸入水銀里,那么所发生的現象恰好相反;这时,管中的水銀面要比容器中的水銀面低. 管子的內徑越小,水銀面也就下降得越显著(图 5.15).

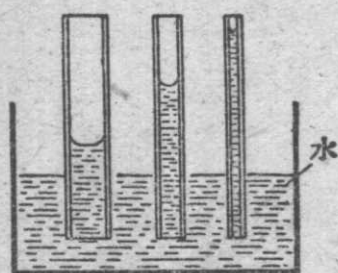


图 5.14 水在毛細管中上升

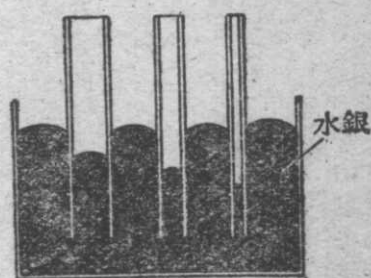


图 5.15 水銀在毛細管中下降

浸潤管壁的液体在毛細管中上升和不浸潤管壁的液体在毛細管中下降的現象叫做毛細現象.

毛細現象究竟是怎样产生的呢? 在 § 5.7 中我們已經讲过, 在內徑很小的容器中,液面总是弯曲的; 浸潤管壁的液体,液面呈凹月形(如玻璃細管里的水面); 不浸潤管壁的液体液面呈凸月形(如玻璃細管里的水銀面). 事实上,由于弯月面的形成,使得沿液

面切面方向作用的表面張力的合力,在凸弯月面时,指向液体内部(图 5·16(a));在凹弯月面时,指向液体外部(图 5·16(b)). 这个合力的作用,就使弯月面下液体的压强发生了改变,也就是对液体产生了一个附加的压强. 可以看出,凸弯月面下液体的压强大于水平液面下液体的压强,而凹弯月面下液体的压强小于水平液面下液体的压强. 根据我们在第一册中学过的流体静力学的基础知识,在盛着同一液体的连通器中,同一高度处各点的压强都是相等的. 因此,当毛细管里的液面是凹弯月面时,液体不断地上升,直到上升液柱的静压强抵消了附加压强为止;同样地,当液面呈凸月面时,毛细管里的液体也有一定程度的下降.

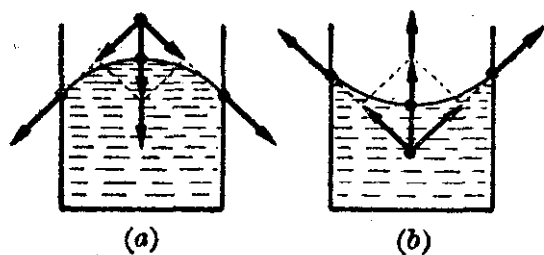


图 5·16 液面是弯月面时的表面张力

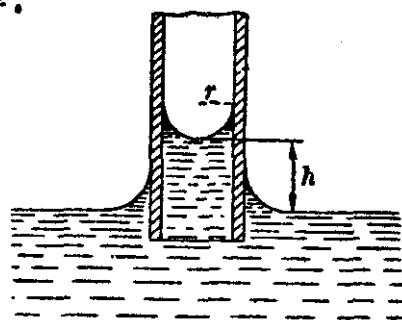


图 5·17 导出液体在毛细管中上升高度公式的附图

液体在毛细管里的上升或下降程度跟哪些因素有关呢? 怎样来计算这一高度? 让我们利用图 5·17 来进行研究. 它表示放大的毛细管.

为了简化起见,假定液体能够很好地浸润管壁,以致跟管壁接触的液面是竖直的. 这时,表面张力的合力也是竖直向上的. 如果毛细管的内半径是 r , 液体的表面张力系数是 σ , 那么, 沿着周界 $2\pi r$ 作用的表面张力的合力等于 $2\pi r\sigma$.

当液面停止上升时, 这个作用力恰好跟毛细管中液体柱的重量相平衡. 如果液体上升的高度是 h , 液体的密度是 D , 那么, 可以得到

$$2\pi r\sigma = \pi r^2 h D g.$$

因而液柱上升的高度

$$h = \frac{2\sigma}{rDg} \quad (5.1)$$

应用这个公式时，必須掌握下列几点：

(1) 它表示液体在毛細管中上升的高度跟液体的表面張力系数成正比，而跟毛細管的內半徑和液体的密度成反比。

(2) 这一公式不仅适用于液体浸潤毛細管的情形，也适用于液体不浸潤毛細管的情形，只是当管中液面降低时，公式中的 h 是負的，它表示液体在毛細管中的下降程度。

(3) 应用这一公式可以求出液体的表面張力系数 σ 。将上式改写后，得到

$$\sigma = \frac{hrDg}{2} \quad (5.2)$$

因此，只要正确地量出毛細管的內半徑 r 和液体在管中的上升(或下降)高度 h ，知道了液体的密度 D 和重力加速度 g 后，就能够求出液体的表面張力系数 σ 。中学里的物理实验，就是利用这种簡便方法来測定液体的表面張力系数的。

液体的表面張力、浸潤現象和毛細現象，在自然界、工程技术和日常生活中都起着非常重要的作用。我們着重介紹一下毛細現象的各种应用。

在日常生活中，我們經常遇到一些具有許多細孔的物体，例如：紙張、毛巾、土壤、木材、磚块等。如果液体接触到这种物体，那么，它們会把液体吸入。这就是用手巾拭汗、灯芯吸油、粉笔吸墨水的道理。

毛細現象对植物的生长具有很重要的意义，它們所需要的养分就是由根和莖里的小管凭借毛細現象从土壤中吸上来的。

在工程技术中，通常利用毛細現象来潤滑机器以及对皮革和布匹染色。

有时也要設法防止由于毛細現象而产生的害处，例如建筑樓

房的时候，要在砌磚的地基上鋪一层涂过煤焦油的厚紙。如果不鋪这层紙，地下的水分就会沿着牆壁上升，使楼房容易受潮。

毛細現象在农业生产上也有非常重要的意义。由于土壤里有很多毛細管，因此地下的水分就可以沿着它們上升到地面来蒸发掉。要保証植物的根部能够从地下吸收足够的水分，就必须設法破坏地面附近土壤中的毛細管。把地面的土层鋤松，就能达到这个目的。特别是干燥的土地，更必須及早耕种，而且要耕得深一些。相反，如果需要把地下水引到地面上来，那么，不仅要保持土壤中的毛細管，还要使它們变得更細。因此，就要用滾子来压紧土壤。

例 4. 水的表面張力系数是 74 达因/厘米，求它在內徑为 0.1 毫米的毛細管中的上升高度。

【解】 可以直接应用公式(5.1)

$$h = \frac{2\sigma}{rDg};$$

其中 $\sigma = 74$ 达因/厘米, $r = 0.05$ 毫米 = 0.005 厘米,
 $D = 1$ 克/厘米³, $g = 980$ 厘米/秒².

則

$$h = \frac{2 \times 74}{0.005 \times 1 \times 980} = \frac{148}{4.9} = 30.2 \text{ 厘米.}$$

例 5. 在两个內徑不同的毛細管中，水的液面差是 2.6 厘米。如果其中盛酒精时，酒精的液面差是 1 厘米。已知水的表面張力系数为 74 达因/厘米，求酒精的表面張力系数。（酒精密度为 0.8 克/厘米³）

分析 假定这两个毛細管的內半徑分别是 r_1 和 r_2 ($r_1 < r_2$)。則液体在內半徑是 r_1 的毛細管中的升高为

$$h_1 = \frac{2\sigma}{r_1 D g};$$

液体在內半徑是 r_2 的毛細管中的升高为

$$h_2 = \frac{2\sigma}{r_2 D g}.$$

因此,我們得到两个不同內徑的毛細管中液面的高度差为

$$\Delta h = \frac{2\sigma}{r_1 D g} - \frac{2\sigma}{r_2 D g} = \frac{2\sigma}{D g} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

从上式中可以看出,將两个內徑不同的毛細管同时插入不同的液体中时,液面的高度差与液体的表面張力系数有关,液体的表面張力系数越大,在两个毛細管中的液面高度差也越大.

【解】 把这两个毛細管插入水中时,

$$\Delta h_{\text{水}} = \frac{2\sigma_{\text{水}}}{D_{\text{水}} g} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = 2.6;$$

把这两个毛細管插入酒精中时,

$$\Delta h_{\text{酒精}} = \frac{2\sigma_{\text{酒精}}}{D_{\text{酒精}} g} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = 1.$$

将上述两式相除,得到

$$\frac{\sigma_{\text{水}} \cdot D_{\text{酒精}}}{\sigma_{\text{酒精}} \cdot D_{\text{水}}} = 2.6,$$

或

$$\sigma_{\text{酒精}} = \frac{\sigma_{\text{水}} \cdot D_{\text{酒精}}}{2.6 \cdot D_{\text{水}}} = \frac{74 \times 0.8}{2.6} = 22.8 \text{ 达因/厘米}.$$

习 題 5.8

1. 什么叫做毛細現象? 举几个日常生活中应用毛細現象的例子.
2. 怎样的液体在毛細管里上升? 怎样的液体在毛細管里下降?
3. 液体在毛細管里上升或下降的程度,跟哪些因素有关?
4. 能不能用絲綫来做酒精灯的灯芯? 为什么?
5. 人在潮湿的泥土上走过以后,地面上的脚印里会渗出水来. 試說明这一現象.
6. 在內半徑为 0.2 毫米的細管中,汽油的上升高度等于 3 厘米,已知汽油的比重为 0.7 克/厘米³,求汽油的表面張力系数.
7. 20°C 的酒精在毛細管中上升了 12 毫米. 求毛細管的內半徑.
8. 如果衣服染上了蜡或油脂,只要把两层吸墨水紙放在染污部分的上面和下面,然后用熨斗輕压污处就可以將它們除尽. 說明这种方法的原理.
9. 將毛細管插入热水中,当热水冷却后,管中的水面高度將发生怎样的变化?

10. 如果把干粉笔放在湿海绵上, 粉笔就会受潮; 而将干海绵放在湿粉笔上, 海绵仍能保持干燥。试说明上述现象。

11. 某种液体在内半径为 0.5 毫米的毛细管中上升到 11 毫米的高度。已知该液体的表面张力系数是 22 达因/厘米。求它的密度。

12. 两个毛细管的内半径分别是 0.5 毫米和 2 毫米, 水银在这两个毛细管中的液面高度差为 10.5 毫米。求水银的表面张力系数。

本章提要

通过本章的学习, 应该达到下列要求。希望读者根据这些要求自己进行检查, 如有不足之处, 应再次钻研课文。

(1) 了解分子作用力的含义; 懂得处于液体表面层中的分子为什么受有指向液体内部的分子力的作用。

(2) 能够根据液体表面层中分子的受力情况和平衡状态跟势能大小的关系, 来理解液体表面的收缩趋势, 以及说明小液滴成球状的理由。

(3) 了解表面能和表面张力的概念。知道常用的测定表面张力的方法以及影响表面张力的主要因素。

(4) 了解内聚力和附着力的意义。能够就内聚力和附着力的作用来解释浸润现象和不浸润现象。

(5) 能够说明什么叫做毛细现象以及产生毛细现象的原因。了解液体在毛细管中升高和下降的程度跟哪些因素有关, 以及毛细现象的一些重要应用。

复习题五

1. 计算: (a) 酒精在内径是 0.3 毫米的毛细管中上升的高度, 酒精的比重是 0.8 克/厘米³; (b) 水在内半径为 0.2 毫米的毛细管中上升的高度。温度都是 20°C。

2. 在内半径是 0.5 毫米的玻璃管里, 水上升到 30.05 毫米的高度。试求出水的表面张力系数。

3. 肥皂液的表面张力系数是 40 达因/厘米, 如果要把肥皂膜的表面扩大 1 厘米², 为什么必须做功? 需要做多少功?

[提示: 扩大液体的表面之所以需要做功, 是因为扩大液面就是增加表面层的面积, 而处于表面层中的分子, 比起液体内部的分子来具有更大的势

能(表面能);扩大液面的过程就是把一部分原先处于液体内部的分子转移到表面层中去,所做的功就用来增加这些分子的势能.由于液体的表面张力系数是作用在液面1厘米长度边界线上的力,所以把皂膜的表面扩大1厘米²时,按照功的定义,功=力×在力的作用方向上所通过的路程=40达因/厘米×1厘米²=40尔格.]

4. 扩大液体的表面积和拉开一张橡皮膜都需要做功,试就两种情况中的作用力的变化情形和能量转换关系,作一比较.

[提示:扩大液体的表面积是克服它的表面张力做功,如果温度不变,表面张力也不改变.使液面扩大1厘米²所需的功(用尔格表示)在数值上总是等于它的表面张力系数(用达因/厘米²表示),而跟表面积的扩大程度无关.拉开橡皮膜的情况就不同,由于作用力跟面积扩大的程度有关,橡皮膜的面积拉得越大,作用力也就越大;扩大一定面积所需的功,随面积的变大而增加.扩大液体表面积所做的功转变为表面层中分子的势能,拉开橡皮膜所做的功,转变为膜的弹性势能.]

5. 在20°C时吹成一个直径是10厘米的肥皂泡,需要做多少功?假使肥皂液原来的表面积很小,跟肥皂泡的面积相比,可以略去不计.

[提示:肥皂泡有内外两个表面层.从几何学中知道,半径为 R 的球,它的面积是 $4\pi R^2$.]

6. 一个水银滴的半径是3毫米,把它分成10个体积相同的小滴,需要做多少功?(温度是20°)

第六章 固体的性质

在前两章中，我們分別討論了气体和液体的性质，并且已經知道气体很容易压缩，而液体却很难压缩，使液体的体积发生很小的改变，就需要很大的作用力；另一方面，气体和液体又都具有流动性，因此，气体和液体的外形都随着容器的形状而改变。

在第一册中，我們已經学过一些关于固体的基本性质。现在，我們将对固体的性质作进一步的研究。首先看一下固体在外表特征上与气体和液体有什么区别。固体的体积很不容易压缩，这一点是跟液体相似的。而跟液体不同的地方是，使固体的形状发生很小的改变也需要用一定的力。因此，我們把具有一定体积和一定形状的物体叫做固体。例如把各种金属、石块、冰、砂糖、玻璃、蜡、松香等都称为固体。但是，由于它們性质上的差别，固体又可以分为晶体和非晶体两类。

§ 6.1 晶体和非晶体

在常見的固体中，食盐、明矾、云母、硫酸銅等都是晶体；玻璃、松香、瀝青、电木、蜂蜡等都是非晶体。

在一般情况下，晶体的外表都具有有規則的几何形状。有些大的晶体我們用肉眼就能够看出，例如食盐、砂糖、硫酸銅、石英、金剛石等等；有些小的晶体要用显微镜才能看出，例如銅、鉄以及其他金属。非晶体在外形上就沒有这种特征，它們沒有一定的形状。

晶体的外形是多种多样的，从最简单的立方体（食盐）到非常

复杂的多面体。图 6·1 所示是水晶的晶体群。

晶体有时也会失去它的有规则的外形，这时就无法从外形上来判断它是不是晶体了。但是，不论晶体的外形怎样，它在各个方向上的物理性质（导热性、热膨胀、导电性、强度等等）是不同的。晶体的这种性质叫做各向异性。各向异性是晶体最基本的特征。

晶体的各向异性在工程技术中已经得到了广泛的应用，例如硫化铅（PbS）晶体（俗称矿石）只允许电流沿一个方向通过，在相反的方向上电流就不能通过。这种晶体可以用在矿石收音机上，把天线接收到的交变电流转变成单向电流。

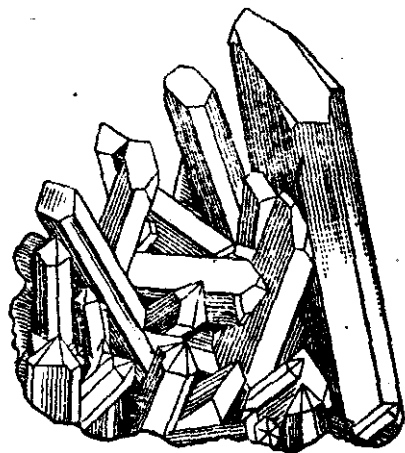


图 6·1 水晶的晶体群

通过下面的实验，我们能够清楚地看到晶体的这种特征。

在一张云母片上，涂一层很薄的石蜡，拿一根烧红了的钢针的尖端接触云母片的反面。这时我们会看到，石蜡从接触点开始向周围熔化，熔化的石蜡呈椭圆形（图 6·2），而不是圆形。这说明云母片晶体在各个方向上的导热性^①不相同。

如果用薄的玻璃片代替云母片重复上面的实验，我们就会看到，被熔化的石蜡是呈圆形的（图 6·3）。这说明非晶体在各个方向上的导热性是相同的。实际上，不仅导热性，非晶体的一切物理

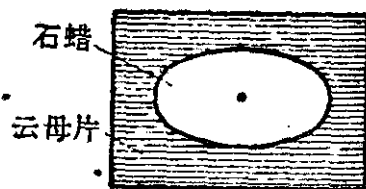


图 6·2 在云母片上，石蜡熔化的地方呈椭圆形

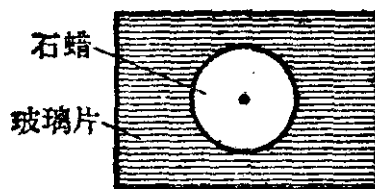


图 6·3 在玻璃片上，石蜡熔化的地方呈圆形

① 更精确地讲，应该说传递内能的快慢在不同方向上是不一样的。

性质在各个方向上都是相同的。非晶体的这种特征叫做各向同性。

晶体的另一个重要的特征是有一定的熔点；非晶体就没有一定的熔点。这一问题在下一章中要详细地讨论。

有时整个物体就是一个晶体，例如砂糖的小粒。这种物体叫做单晶体。大的单晶体的重量，如水晶可以达到几公斤以上。如果整个物体是由许多杂乱无章排列着的小晶体（晶粒）组成的，这样的物体就叫做多晶体。例如，所有的金属都是多晶体。用显微镜观察磨光了的金属材料的断面，就能够看到晶粒的杂乱排列。可是，有时晶粒是这样的细小，即使在倍数很高的显微镜下也不能看到。

在多晶体里，由于晶粒的排列很不规则，所以在各个方向上的物理性质是相同的。这一点与非晶体相似。但是，多晶体仍有确定的熔点。

虽然非晶体在某些方面是跟晶体相似的，例如松香被锤击时也会象晶体一样碎成许多小颗粒。但是，经过仔细的观察后发现，有些非晶体也具有液体的典型特征——流动性。例如，瀝青块会很慢地沿着水平面流动；放在容器里的瀝青块，经过较长的时间后会按照容器的形状分布。倒在漏斗里的许多小松香块，经过足够长的时间，就会并成一大块，形成一个水平表面，并且从漏斗孔里缓慢地流出。把重的物体（如铅丸）放在松香表面上，会慢慢地沉进松香里面去。放在松香内部的轻的物体（如软木塞）能够从下面浮起来。由于瀝青、松香等非晶体具有这些性质，我们可以把它们看成是很粘厚的液体。

有些非晶体，例如玻璃也具有一定的强度和硬度，但是利用伦琴射线对它们所进行的研究告诉我们，一切非晶体的分子构造与液体的分子构造相同。关于晶体的内部结构将在 § 6·2 中详细讨论。

近几年来,用途越来越广的各种塑料也是非晶体。

常常出现这样的情况,同一种物质,在一定的条件下是晶体,在另一些条件下却变成了非晶体。例如,天然的石英是晶体,但经过熔融的石英(叫做熔凝石英或石英玻璃)就是非晶体。砂糖粒是晶体,而熔融后做成的水果糖就是非晶体。但是,所有这些非晶体物质都要逐渐显示出混浊现象(透明度减弱),这种混浊现象是由于石英玻璃和水果糖内部产生了细小的晶体的缘故。

如果把晶体的硫加热,使之熔化,并且使它的温度超过 300°C ,然后倒入冷水里,它就会变成柔软的非晶体硫。但经过一段时间后,非晶体硫又要变成晶体了。

这些现象说明,非晶体是不稳定的,在适当情况下它会变成晶体。

习 题 6.1

1. 固体的外表特征是什么?你能不能从物质的微粒结构来说明这些特征?
2. 从物理性能来看,晶体和非晶体的最基本的特征是什么?
3. 什么叫做单晶体和多晶体?它们在物理性质上有哪些相同和不同之点?
4. 为什么说非晶体是不稳定的?
5. 物质的非晶体能自动地转变为晶体,而晶体却不能自动地转变为非晶体。试问对同一种物质来说,处于非晶体时的能量大还是处于晶体时的能量大?

§ 6.2 晶体的空间点阵

怎样来说明晶体和非晶体之间性质上的区别呢?在十九世纪中叶,人们根据晶体有规则的外形这一事实,提出了一种假说,认为晶体是由物质微粒有规则地排列而形成的。1912年以后,应用伦琴射线对晶体结构进行研究的結果证明这种假说是正确的。

組成晶体的微粒(分子、原子或离子),依照一定的規律在空間彼此相隔一定的距离,排成整齐的行列,这种有規則的行列叫做晶体的空間点陣。如果用直綫将这些物质微粒連結起来,就能够得到若干組彼此相交的平行綫,物质微粒就在这些平行綫的交点上。当然,物质微粒并不是在这些交点上靜止不动的,而是圍繞这些交点作无規則的振动。这些交点是微粒的平均位置,叫做空間点陣的节点。

組成晶体的微粒如果是离子,那么,这类晶体就叫做离子晶体。无机化合物的晶体都属于这一类。氯化鈉(食盐)的空間点陣是离子晶体空間点陣的最简单的例子,图 6·4 是它的示意图。

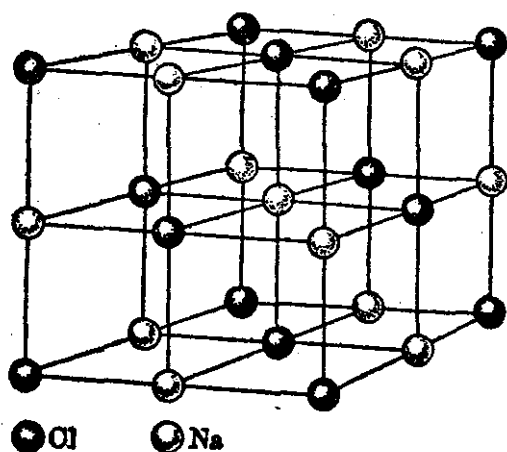


图 6·4 食盐晶体的空間点陣

离子晶体空間点陣的最简单的例子,图 6·4 是它的示意图。

食盐的晶体是由鈉离子和氯离子組成的,这些离子等距离地、交錯地排列在三組互相垂直的平行綫上,每一个带正电的鈉离子周圍是六个带負电的氯离子,同样,每一个带負电的氯离子也被六个带正电的鈉离子包圍着。由

两个原子所組成的許多盐类(例如溴化銀、氯化銀、碘化鉀等等)也具有相似的空間点陣。

由原子組成的原子晶体(如金剛石)和由分子組成的分子晶体(如冰)也是很常見的。各种晶体中物质微粒的排列,并非和 NaCl 这一类晶体一样都成正方形的点陣。大多数的空間点陣都具有非常复杂的形状,例如下面图示的金剛石和石墨的点陣。

因为物质微粒排列得很有規則,所以晶体总是具有确定的形状;由于不同晶体的空間点陣不同,因此,各种晶体的外形也不同。

有些物质能够形成几种不同形状的空間点陣,因此也就能够产生几种不同种类的晶体,这种性质叫做多形性。例如,碳原子如

果按照图 6.5 所示的空間点陣排列起来,就成为金剛石,如果按照图 6.6 所示的那樣排列起来,就成为石墨.但是,我們知道,石墨的性质与金剛石完全不同,石墨的比重小于金剛石;石墨軟得可以作鉛笔芯,而金剛石硬得可以用来切割玻璃.因此,虽然物体的化学成分相同,但是如果它們的空間点陣不同,物理性质也就完全不同.物质的物理性质是跟它的物质微粒所构成的空間点陣有关的.

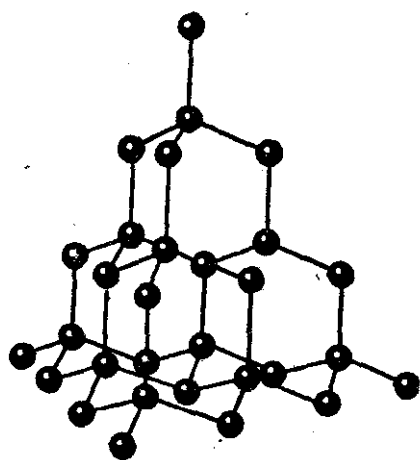


图 6.5 金剛石的空間点陣

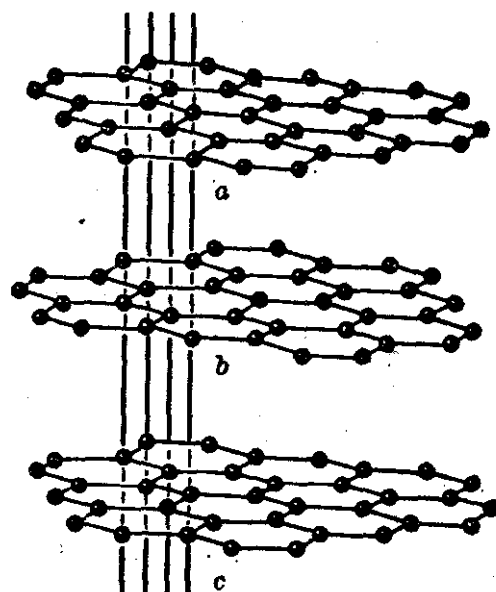


图 6.6 石墨的空間点陣

究竟怎样来解釋晶体的各向异性呢?

以石墨作为例子.从图 6.6 中我們可以看到,石墨的空間点陣有这样一个特点,在 a 、 b 、 c 等平面內的原子之間的距离比 a 和 b (或 b 和 c) 平面之間原子的距离要小.根据第一章中讲过的分子力的特性, a 、 b 、 c 等平面內原子間的相互吸引力比平面間原子的相互吸引力大,所以石墨容易沿着和 a 、 b 、 c 这些平面平行的方向断开.

由此可見,晶体外形的規則性和它的各向异性都是晶体內部結構規則性的表現.

习 題 6.2

1. 什么叫做空間点陣? 說明节点的意义.

2. 为什么石墨和金刚石的化学成分相同,但物理性质却不同?
3. 什么叫做晶体的多形性? 试举例说明.
4. 在食盐的空间点阵中,两相邻离子之间的平均距离为 2.77×10^{-8} 厘米. 问 1 厘米³ 食盐包含多少离子?

§ 6.3 固体的形变

在力学中,我们曾经指出,当两个物体互相接触并具有形状或体积的变化(形变)时,它们彼此之间以一定的力相互作用着. 由于形变通常很小,对于解决有关物体的平衡或运动的问题可以认为没有影响. 因此,在力学中,我们所感兴趣的只是形变时所产生的力,而并不注意物体本身的形状和体积的变化.

但是,在实际工程技术中,就不能不考虑到物体的形变. 下面就来研究这个问题.

首先,我们来看一下固体的形变跟哪些因素有关.

用两个支座把一根细木尺水平地架起来,这时木尺是挺直的. 如果在尺的中央放一个重物,尺就会向下弯曲;重物越重,尺弯曲得越厉害.

如果把重量不同的物体分别悬挂在相同的橡皮筋上,就会发现,物体越重,橡皮筋被拉得越长.

从这两个实验中知道,物体的形变程度跟外力的大小有关.

如果用同样重量的物体使粗木尺和细木尺弯曲或使粗橡皮筋和细橡皮筋伸长,就可以发现,细木尺比粗木尺弯曲得厉害,细橡皮筋比粗橡皮筋伸得更长.

再用细木尺来做实验,把一个重物放在尺上不同的地方,我们会发现,随着放置重物的位置不同,尺的形变也会不同.

如果拿大小相同的钢尺来代替木尺,重复上面的实验,可以看出,物体的形变还跟组成这个物体的材料有关.

上面的实验表明：物体的形变跟物体的尺寸、形状、外力的大小和力的作用点，以及组成这个物体的材料有关。在 §6.5 中，我们将看到，物体的形变还跟外力的作用方向有关，例如，同样大小的力由于作用方向不同，可以引起物体的拉伸形变或压缩形变。

固体发生形变时，它的内部结构会产生怎样的变化呢？

正象液体中的分子结构一样，组成固体的微粒之间，既存在着吸引力，又存在着排斥力。图 6.7 表明晶体物质微粒相互作用的模型。当固体不受外力作用时，微粒之间的吸引力和排斥力恰好平衡。这相当于图 6.7 中连结小球的弹簧处于自由状态。

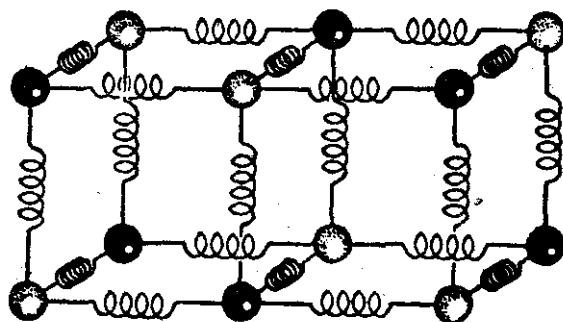


图 6.7 晶体中微粒间相互作用的简单模型

当固体受到外力作用时，物质微粒之间的平衡就被破坏，同时相对位置发生了改变，因而固体的形状或体积也要发生改变，即固体发生了形变。

如果外力的作用是使物质微粒间的距离变大，那么微粒间的吸引力开始起作用，并且随着距离的增大而加强^①。当引力的作用大到跟外力相等的时候，微粒间的距离不再变大，于是固体的形变也就停止。如果外力的作用是使物质微粒间的距离缩小，那么微粒间的排斥力随着距离缩小而增大，当排斥力的作用大到跟外力相等的时候，固体的形变也就停止。

由此可见，固体在外力作用下发生形变时，内部要产生反抗外力作用的内力，这种力叫做弹力。弹力是物质微粒之间相互作用的表现。固体的形变越大，弹力也越大；形变消失时，弹力也随着而消失。

^① 指在一定的范围内，当微粒之间的距离过大时，吸引力反而减小，见 §1.4。

习 题 6·3

1. 物体的形变跟哪些因素有关？试举例说明。
2. 固体发生形变时它的内部结构有什么变化？
3. 什么叫做弹力？它是怎样产生的？

§ 6·4 弹性形变和范性形变

我們已經知道，物体形变的大小跟构成物体的材料有关。

材料最重要的性质是弹性和范性。为了进一步了解这两种性质，我們再简单地复习一下。

有一根木尺，用手把它稍微折弯一些，松开手后木尺会完全恢复原来的形状。这个现象说明，木尺受到外力作用时产生了形变，但是当外力停止作用后，由于物质微粒之间的相互作用，木尺就恢复原状，而形变也开始消失。这种在外力停止作用后能够立即完全消失的形变，叫做弹性形变。

构成物体的材料在外力停止作用后形变完全消失的性质叫做弹性。

重复上面的实验，但这时手对尺所施加的力一次比一次大。于是我們可以看到，当所加的力大到一定的程度时，在外力取消后，木尺虽然会伸直一些，却不能象原来一样的直了，也就是形变不再完全消失。这种在外力撤除后仍然保留下来的形变，叫做范性形变。

材料能够产生范性形变的性质叫做范性（又叫做受范性或塑性）。

由此可見，木材既具有弹性又具有范性。如果用同样大小和形状的鋼尺进行上面的实验，可以看到，鋼尺也会发生弹性形变和范性形变，不过使鋼尺发生范性形变所需要的力要比使木尺发生范性形变所需要的力来得大。类似的实验表明，一切固体材料都

具有彈性和范性。

不同材料在性質上的差別在於：使不同材料產生范性形變所需要的力的大小不同。這可以从下面的實驗看出。

取兩個粗細相同的彈簧，一個是鋼的，一個是鉛的。先在鋼制彈簧的下端懸掛砝碼，這時可以看到，當砝碼重量相當大時，除去砝碼後，彈簧會完全恢復原來的形狀，即彈簧的形變還是彈性的；只有當砝碼過重時，彈簧才會產生范性形變。再用鉛制彈簧重複這個實驗，這時可以看到，只有在所懸掛的砝碼很輕時，除去砝碼後，彈簧才會恢復原來的形狀，即鉛在較小的外力作用下也能表現出彈性；而當砝碼稍微重一些時，彈簧就會產生范性形變。

我們常常說容易產生范性形變的材料彈性差，不容易產生范性形變的材料彈性好。但是，究竟根據什麼客觀標準來區分材料彈性的好壞呢？

我們先來引入一個新的物理量——肋強。肋強是物體的單位截面積上所承擔的作用力，通常用公斤/毫米²或公斤/厘米²作為它的單位。使物體發生范性形變所需的最小肋強，叫做構成這一物體的材料的彈性限度。從上面的實驗中可以看出，鋼的彈性限度比鉛的大。

下表中列舉了幾種材料的彈性限度。

材 料	彈 性 限 度 (公斤/毫米 ²)	材 料	彈 性 限 度 (公斤/毫米 ²)
鋼(鍛造的)	18.6	鉛	0.25
鋼(軋制的)	25.7	橡木(順纖維)	2.5
鐵(拉制的)	31.6		

通常根據材料的彈性限度的大小把材料分成彈性材料和范性材料。鋼、橡皮等彈性限度大的材料叫做彈性材料。鉛、石蠟等彈性限度小的材料叫做范性材料。

還應指出，即使是同一種材料，其彈性限度也不是固定不變

的,而是随着温度的升高而降低的。也就是说,温度升高时,弹性减弱,范性变大。例如,普通温度下弹性很大的钢,在加热到 1000°C 以上时,也变成了范性很大的材料。这一点对金属的加工具有重要的意义。

习 题 6.4

1. 说明弹性形变和范性形变的区别。
2. 用拉伸橡皮筋的实例来说明弹性和弹性形变以及范性和范性形变。
3. 钢的弹性限度是 18.6 公斤/毫米², 橡木的弹性限度是 2.5 公斤/毫米², 说明这两个数字的物理意义。
4. 说明下面这句话的物理意义:“钢的弹性限度是铝的 2.5 倍”。

§ 6.5 弹性形变的基本类型

由于物体受力的情况是多种多样的,因此,产生的弹性形变也是多种多样的。

弹性形变可以分为四个基本类型:拉伸(或压缩)形变,切变,扭转形变和弯曲形变。下面我们就来分别研究一下。

1. 拉伸形变和压缩形变 如果两个大小相等、方向相反的力 P 沿着棒的纵轴向外作用在棒 AB 的两端(图 6.8 (a)), 那么这时所引起的形变就叫做拉伸形变。也可以把棒的 A 端固定不动,在 B 端施加一个沿着棒的纵轴向外作用的力(图 6.8 (b))来产生拉伸形变。

作用力 P 越大,棒被拉伸得越长。

在橡皮带上画上一组小方格,拉伸橡皮带时,我们看到,它在纵的方向上伸长,同时在横的方向上缩短(图 6.9)。

起重机的钢索或链条、列车各车皮之间的挂钩等在工作时都要产生拉伸形变。

如果两个大小相等、方向相反的力 P 沿着棒的纵轴向内作用于棒 AB 的两端(图 6.10),那么这时所引起的形变叫做压缩形变。

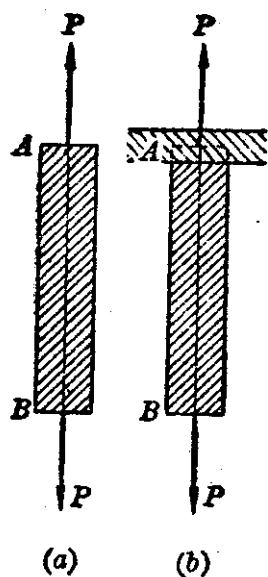


图 6.8 使棒产生拉伸形变的作用力

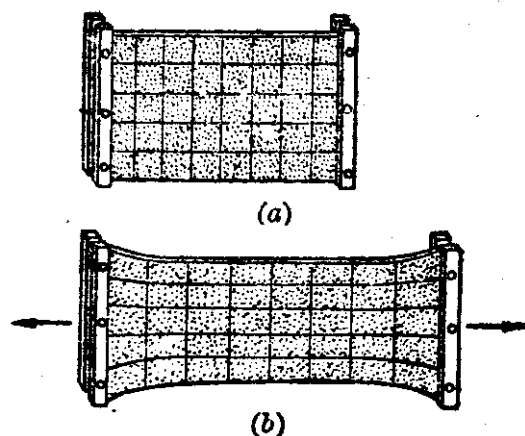


图 6.9
(a) 画有方格的薄橡皮带;
(b) 拉伸时,方格拉成长方形

棒被压缩时,纵向尺寸缩短,同时横向的尺寸增大. 这一现象可以从压缩画有方格的软橡皮时看出 (图 6.11).

不难理解, 压缩形变和拉伸形变是恰好相反的.

柱子、墙壁、桌、椅的腿等都要产生压缩形变.

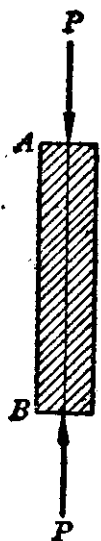


图 6.10 使棒产生压缩形变的作用力

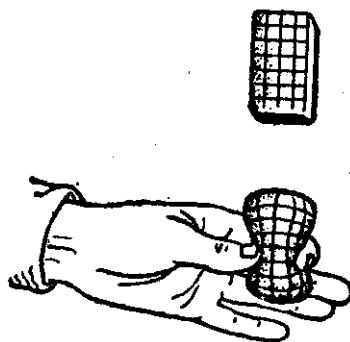


图 6.11 受压缩的软橡皮

2. 切变 上面已经讨论过物体的纵向拉伸和纵向压缩. 现在我们来讨论在两个相距很近、大小相等、方向相反的平行力作用下, 物体所产生的形变. 这种形变就叫做切变.

把一本厚的精装书平放在桌子上, 使它下面的书皮固定不动,

用平行于桌面的力来推动上面的书皮，这时书所产生的形变就是切变。从书里纸页的相对位置的改变，我们可以推想到，物体发生切变时，各层物质发生了相对移动（图 6·12）。

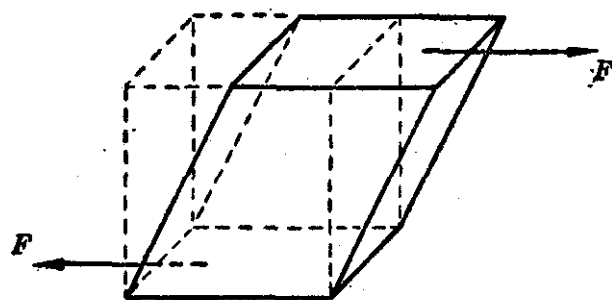


图 6·12 切变

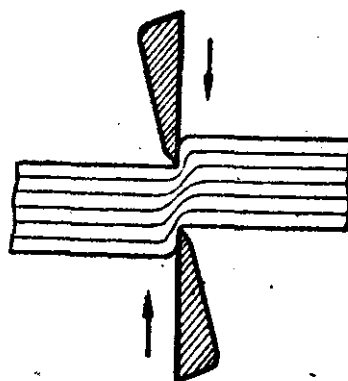


图 6·13 剪断

使物体发生切变的力足够大时，物体就要断裂（图 6·13）。用剪刀剪东西时就属于这种情形。

切变是一种很普遍的形变。所有相互摩擦的固体都要发生切变，例如，用一个水平力推或拉



图 6·14 两块铆接的铁板受拉时
铆钉所受的切变

放在粗糙平面上的物体时，就要发生切变。连接金属的铆钉（图 6·14）、螺栓、焊缝等都要发生切变。

3. 扭转形变 如果棒的一端是固定的，另一端作用着一个位于垂直于纵轴平面中的力偶，这时棒所产生的形变叫做扭转形变。如果扭转前在棒的表面上画上许多小方格，那末我们可以看到，扭转后，这些小方格变成了平行四边形。这说明物体在扭转时各层之间仍保持平行，只是发生了相对转动（图 6·15）而已。

扭转也是一种常见的形变。机器上的传动轴，汽车方向盘下面的转向轴以及螺帽扳头的形变（图 6·16）都是扭转形变。

4. 弯曲形变 使棒保持水平而把它的一端固定，另一端悬挂重物，这时棒就要弯曲，棒的这种形变叫做弯曲形变（图 6·17 (a)）。如果用两个支座把棒的两端支架起来，并在支点之间悬挂

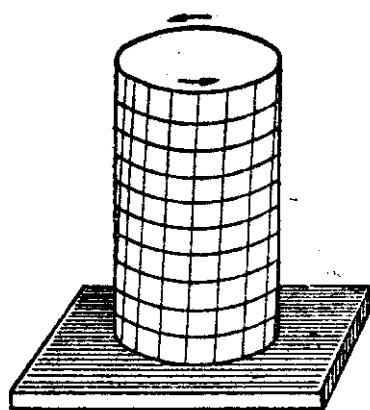


图 6·15 扭轉时物体的各层間作相对轉动

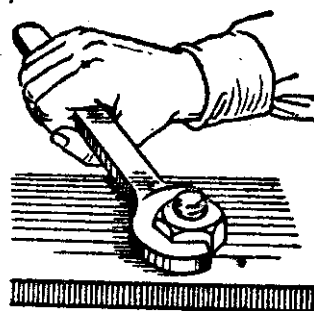


图 6·16 扭轉的实例

重物,那么棒也要产生弯曲形变(图 6·17(b)).

弯曲形变是由三个平行力所产生的. 这三个平行力也可以看成是两个力偶,它們的力矩大小相等、方向相反(图 6·18).

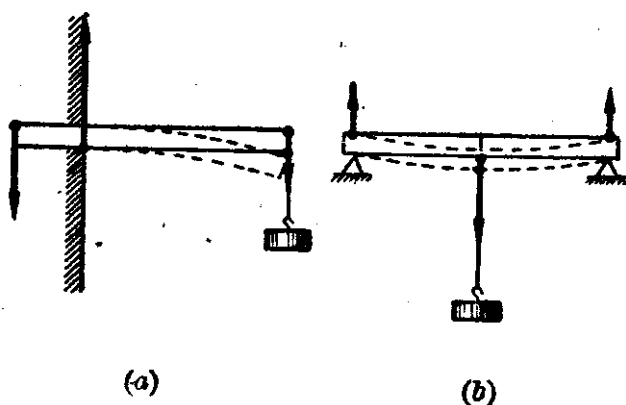


图 6·17 弯曲形变

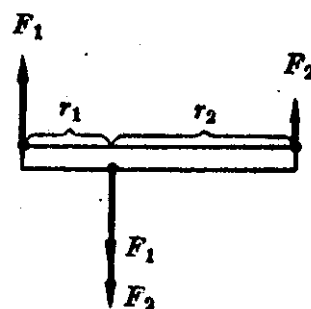


图 6·18 弯曲形变是由两个大小相等、方向相反的力偶 F_1r_1 和 F_2r_2 所产生的

在工程技术中,弯曲形变是一种常常遇到的形变. 铁路上的鋼軌、建筑物上的梁、天平上的橫杆等,都要发生弯曲形变.

物体发生弯曲形变时,各部分所起的变化可以从下面的实验看出. 取一根橡皮棒和一些长針,象图 6·19(a) 那样把这些长針垂直地插在棒上. 棒沒有弯曲时,这些針是平行的;棒弯曲后,这些針就变成象图 6·19(b) 那样. 这表明,在发生弯曲形变的物体中,靠近凸面的物质层伸长了,而靠近凹面的物质层縮短了. 不难想象,在伸长的物质层和縮短的物质层之間一定有既不伸长也不縮短而只改变形状的一层,这个层称为中立层.

由于中立层附近的物质几乎是既不伸长也不縮短,因而也几

乎不产生反抗形变的弹力；所以，如果把它除去，物体承担弯曲形变的性能也并不会受到什么影响。根据这个道理，工程上就利用管棒来代替实心棒（例如自行车的车架），用工字梁（图 6·20 (a)）来代替矩形截面（图 6·20 (b)）的梁。这不仅节省了材料，还减轻了物体的重量。

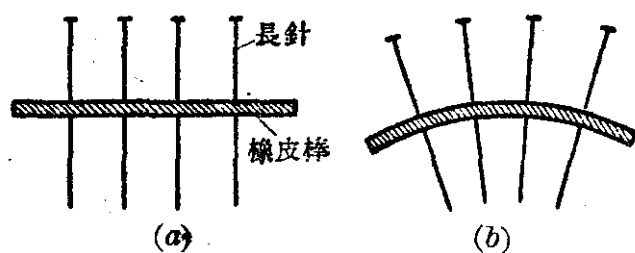


图 6·19 针的位置表示弯曲的物体的一边伸长了，而另一边缩短了

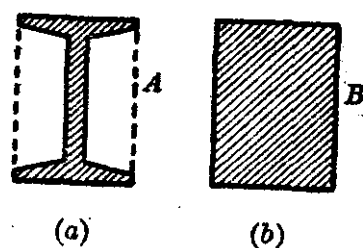


图 6·20 截面积分别是 A 和 B 的梁，反抗弯曲的作用几乎是相等的

在自然界中，植物的茎和动物的骨骼也都是管状的结构。总的说来，虽然实际上我们看到的形变往往是复杂的，但是它们总可以看作是由上述这些基本形变中的某几种组成的。例如，钻头工作时的形变是由压缩形变和扭转形变组成的；传动轴除了受扭转形变以外，还有轴本身的重量和轴上轮子的重量所引起的弯曲形变。

习 题 6·5

1. 弹性形变有哪几种基本类型？说明物体在产生各种形变时的受力情况。
2. 把一本练习簿平放在两个支座上，把另一本卷成圆筒形后放在相同的支座上，问它们受到同样大小的负载时所产生的弯曲情形有何不同？为什么？
3. 自行车的车架为什么不用实心铁杆而用空心铁管做？
4. 下列各物体主要发生什么形变：
桥墩，乐器的弦，起重机的钢索，车床的车刀，轮船的螺旋桨，开门的钥匙，测力计的弹簧，铆钉，天花板的梁，绞车的轴。

§ 6·6 胡克定律

前面已经讲过，只有在形变不过分大，经过时间不过分长的情况

况下，物体的形变才是弹性形变。我們又知道，在外力的作用下，物体的形变跟外力的大小有关。但是外力跟物体的弹性形变之間究竟有怎样的关系呢？英国科学家胡克(1635~1703)回答了这个问题。胡克通过实验发现：

在弹性限度內，物体的形变跟引起形变的外力成正比。这个关系，叫做胡克定律。

这个定律对于§6.5中所讲的四种类型的弹性形变都是适用的。例如，棒所受的拉力(或压力)越大，伸长(缩短)得就越多；梁所承担的負載越重，弯曲得就越厉害；等等。

下面我們詳細地研究一下拉伸形变的情形。

象图6.21那样，在金属綫的自由端悬挂一个重物 P 。

設 L_0 是金属綫的原长， L 是形变后的长度。 $L-L_0$ 叫做绝对伸长。

实验指出，当 P 一定时， $L-L_0$ 的大小与金属綫的原来长度、截面积和組成它的材料有关。因此，绝对伸长不能作为物体拉伸形变的量度。

如果两根金属綫的材料相同，截面积相等，但长度不同，則在同样大小的外力作用下，它們的绝对伸长 $L-L_0$ 是不同的。原来的长度 L_0 越长，绝对伸长 $L-L_0$ 也就越大。但是它們单位长度的伸长 $\frac{L-L_0}{L_0}$ 却总是一样的。这个量叫做相对伸长。

如果金属綫横截面的面积是 S ，那么金属綫的胁强(用 σ 表示)就是 $\frac{P}{S}$ ，

$$\sigma = \frac{P}{S}. \quad (6.1)$$

用綫状或棒状物体来做拉伸形变的实验結果表明，对于任何

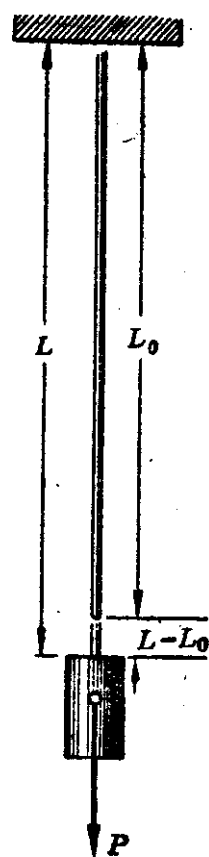


图 6.21

材料的物体來說，它的相对伸长 $\frac{L-L_0}{L_0}$ 跟所受的胁强 σ 总是成正比的。相对伸长跟胁强的比值，对于用同样材料做成的不同物体來說，都是一样的；但是，对于用不同材料做成的物体來說，一般是不相同的。

上述的研究結果可以写成如下的公式：

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \alpha\sigma. \quad (6.2)$$

这个公式中的比值 α 叫做材料的伸长系数。

公式(6.2)就是胡克定律在拉伸形变中的表达形式。因此，在拉伸形变中，胡克定律可以更具体地表述为：在弹性限度内，物体的相对伸长跟它所受的胁强成正比。

如果 $\sigma = 1$ 公斤/毫米²，则 $\alpha = \frac{L-L_0}{L_0}$ ，也就是說，伸长系数在数值上等于物体在受到单位胁强时的相对伸长。

只要知道了物体原来的长度、截面积、所受的外力以及材料的伸长系数，就能够利用公式(6.2)计算出它的绝对伸长：

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \alpha \frac{P}{S}, \quad \text{或} \quad L-L_0 = \alpha \frac{P \cdot L_0}{S}.$$

由此可见，绝对伸长跟外力的大小，物体原来的长度及組成物体的材料的伸长系数成正比，而跟横截面积成反比。

在工程上，一般不用伸长系数 α ，而用它的倒数 $\frac{1}{\alpha} = E$ 来进行計算；这个量叫做弹性模量或楊氏模量。引入了这个量后，(6.2)式可以改写成：

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \frac{1}{E} \frac{P}{S}. \quad (6.3)$$

弹性模量究竟有什么物理意义呢？让我们来討論一个具体例子。金属綫的长度是5米、截面积是2毫米²，在40公斤的拉力作用下，伸长了5毫米。求金属綫的伸长系数和弹性模量。

根据公式 $L-L_0 = \frac{\alpha P L_0}{S}$ ，我們得到

$$\alpha = \frac{(L - L_0) \cdot S}{PL_0} = \frac{5 \times 2}{40 \times 5000} = \frac{1}{20,000} \text{ 毫米}^2/\text{公斤},$$

$$E = \frac{1}{\alpha} = 20,000 \text{ 公斤/毫米}^2.$$

通过这个例子，我們可以看到，截面积是1毫米²的金属綫受到1公斤力的拉伸时，伸长了它原来长度的 $\frac{1}{20,000}$ 。那么，当它受到20,000公斤的力时，則伸长一倍，即绝对伸长等于原长。这說明，假定物体受到拉伸时始終处于彈性形变状态，彈性模量就表示使物体长度伸长一倍时所需要的胁强。实际上，除了橡皮以外，任何材料在远远小于这样大的胁强时就已經被拉断，当然，更不用說还保持彈性形变了。

下表中列举了几种材料的彈性模量。

材 料	E (公斤/毫米 ²)
鋼	$2.0 \times 10^4 \sim 2.2 \times 10^4$
銅	1×10^4
鑄 鐵	$0.75 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^4$
鋁	0.7×10^4
鉛	1.7×10^4
木材(順纖維)	$0.4 \times 10^3 \sim 1.8 \times 10^3$
橡 皮	0.8

例 1. 直徑是2厘米、长是16米的鋼筋，受3.6吨的拉力作用，問胁强是多少？伸长多少？（鋼的彈性模量等于 2.0×10^4 公斤/毫米²。）

【解】 按題意： $d = 2$ 厘米 = 20 毫米， $L_0 = 16$ 米
 $= 16,000$ 毫米， $P = 3.6$ 吨 = 3600 公斤。

鋼筋的橫截面积

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = 314 \text{ 毫米}^2,$$

胁强为

$$\sigma = \frac{P}{S} = \frac{3600}{314} = 11.5 \text{ 公斤/毫米}^2,$$

根据胡克定律

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \frac{1}{E} \cdot \sigma,$$

因此, 鋼筋的伸长

$$L-L_0 = \frac{L_0 \cdot \sigma}{E} = \frac{16,000 \times 11.5}{2.0 \times 10^4} = 9.2 \text{ 毫米}.$$

所以鋼筋的压强为 11.5 公斤/毫米², 伸长 9.2 毫米.

例 2. 导綫长 12 米, 横截面积是 0.36 毫米², 在 12 公斤的拉力作用下伸长 4 毫米, 求組成导綫物质的彈性模量. 查对上表, 看一下导綫是用那一种金属制成的?

【解】 按題意: $L_0 = 12 \text{ 米} = 1200 \text{ 毫米}$, $S = 0.36 \text{ 毫米}^2$,
 $P = 12 \text{ 公斤}$, $L - L_0 = 4 \text{ 毫米}$.

根据胡克定律, 有

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \frac{1}{E} \frac{P}{S},$$

因此, 組成导綫的物质的彈性模量

$$E = \frac{L_0 \cdot P}{(L-L_0) \cdot S} = \frac{1200 \times 12}{4 \times 0.36} = 10^4 \text{ 公斤/毫米}^2.$$

組成导綫物质的彈性模量为 10^4 公斤/毫米². 查表可知, 导綫是用銅制成的.

例 3. 在 0°C 时鉄棒紧紧地嵌在两堵牆壁之間. 当温度上升到 20°C 时棒要伸长, 如果两壁完全阻止住棒的伸长, 問壁所受的压强增加多少? 鉄的彈性模量是 2×10^4 公斤/毫米².

【解】 温度升高时, 由綫膨脹公式 (3.3) 可知棒的长度将增加 $\Delta L = \alpha L_0 \cdot \Delta t$. 为了使它縮小到原来的长度, 必須对它施加一个力, 力的大小由胡克定律确定.

因为

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \frac{1}{E} \sigma,$$

即

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1}{E} \sigma,$$

所以壁上所受的压强增加了：

$$\sigma = \frac{\Delta L \cdot E}{L_0},$$

将 $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta t$ 代入，得

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot \Delta t \cdot E}{L_0} = \alpha \cdot \Delta t \cdot E = 0.000012 \times 20 \times 2 \times 10^4 \\ &= 4.8 \text{ 公斤/毫米}^2. \end{aligned}$$

由此可見，壁所受压强的增加只跟棒的材料、温度的升高有关，而跟棒的原长无关。

习 题 6·6

1. 什么叫做压强？它的单位跟哪一个物理量的单位相同？
2. 什么叫做伸长系数？说明它的物理意义。
3. 试述胡克定律。
4. 弹性压缩形变的大小和引起这一形变的力之间有什么关系？
5. 说明弹性模量的物理意义。钢的弹性模量是 2×10^4 公斤/毫米²，表示什么意思？
6. 长 1.5 米、截面积 3 毫米² 的铜线，在 20 公斤的拉力作用下伸长了 0.9 毫米。求铜的弹性模量。
7. 在长 1.8 米、直径 0.5 毫米的铁丝下端悬挂重 1.5 公斤的物体，问它将伸长多少？已知铁的弹性模量是 2×10^4 公斤/毫米²。
8. 有一高 2.4 米和横截面积为 15 分米² 的铸铁圆柱体，当在它顶上放置 10 吨重的物体时将缩短多少？铸铁的弹性模量是 8000 公斤/毫米²。
9. 有一半径为 0.5 毫米的弹性线，重量可以不计。在其下端悬挂重 100 克的物体时，长度为 20 厘米；当悬挂重 200 克的物体时，长为 30 厘米。求线的原长（没有悬挂重物时的长度）及弹性模量，用达因/厘米² 来表示。
10. 用四根木圆柱支架一个 200 吨重的平台，每根圆柱的直径是 20 厘米，长 2.5 米，求每根圆柱缩短多少。木材的弹性模量为 10^3 公斤/毫米²。
11. 尺寸完全相同的铁丝和铜丝垂直悬挂着，下端用一根棒相連，棒上

不悬挂任何东西时,棒是水平的。試問:如果在棒的正中悬挂一重物时,棒是否还能保持水平?

§ 6·7 固体形变时能量的变化

前面已經讲过,当固体发生形变时,物体内部总是要产生反抗形变的彈力,这时固体从沒有形变状态轉变到有形变状态。所以,为了改变固体的形状或体积就需要反抗彈力做功,这部分功轉变为形变物体的內能,也就是用来增加跟固体内部微粒排列有关的势能。例如,被压缩或被拉伸的彈簧都具有这种势能,当它們恢复原状时又能依靠彈力对外做功。

如果固体的形变是彈性形变,那么使固体产生形变所做的功就都用来增加物体微粒之間的势能,外力停止作用时,这部分附加能量就以做功的形式显示出来,因此,产生彈性形变时,固体的温度不会升高。这是固体跟气体不同的地方(气体在受压缩时温度是要上升的)。

但是,当固体发生范性形变时,外力所做的功只有一部分用来增加物体微粒之間的势能,而另一部分則用来增加物体微粒无規則运动的动能。因此,物体的温度将有所升高。金属綫反复折弯时温度的上升以及鉛块受錘击时温度的上升,都是这种变化的实例。

习 題 6·7

1. 分別說明物体在彈性形变和范性形变时內能的变化。

2. 彈簧測力計伸长 10 厘米时的讀数是“5 公斤”。求彈簧內能的增加。

[提示:彈簧內能的增加等于使彈簧伸长所做的功。因为伸长跟作用力成正比,所以在伸长过程中所施加的平均力为 2.5 公斤。]

3. 如果拉伸彈簧測力計时做了 1.6 焦耳的功,測力計的讀数是“4 公斤”,求彈簧的伸长。

§ 6·8 强度和安系数

强度是材料受力时抵抗破坏的能力。在选择适当的材料来做建筑物的构件或机器的零件时,最主要的要求就是材料的强度。

使材料破坏所需要的最小形变,叫做极限强度。极限强度越大,材料越坚固。

材料的极限强度除了决定于本身的性能外，还跟作用力的种类有关。例如，棒被压缩时比被拉伸时容易断裂，因为在前一情况下，它可能弯折而被压断，而在后一情况下，它只能被拉断。

下表中列举了几种材料的极限强度。

材 料	极限强度 (公斤/毫米 ²)	
	拉 伸	压 缩
鋼 (含 0.14% 碳)	50	40
工具鋼 (含 0.94% 碳)	95	67
鋼 纜	80	—
鑄 鐵	10~22	37~88
銅	24	42
鉛	1.3~2.2	—
橡 木	7	7
松 木	7	2
磚	0.2	0.6

显然，为了安全起见，建筑物的各种构件所承担的胁强在任何情况下都不应当等于或接近极限强度。实际上允许承担的胁强（或者叫做实用胁强）只应当是极限强度的若干分之一。

极限强度跟实用胁强的比叫做安全系数。

安全系数过小，建筑物或机器就不可能坚固耐用，并且可能由于意外的负载而断裂，以致发生不必要事故。安全系数过大就会浪费材料，很不经济，同时也增加了建筑物或机器的重量。所以，确定安全系数在工程技术设计上是一个很重要和很复杂的问题，因为既要考虑到技术因素，又要考虑到经济因素。各种类型建筑物的安全系数，一般是由国家有关部门统一规定的。例如，钢制的梁，安全系数应当在 2.5~4 之间；如果是铸铁制的，应当在 6~8 之间；如果是木制的，应当在 8~10 之间。

安全系数的大小不仅决定于材料本身的性质，还跟构件所承担的负载的性质有关。以上列举的都是指负载不变时的安全系

數。如果构件承担的負載是冲击性的，由于冲击性負載产生的作用力比負載不变时要大得多，所以安全系数也必須相应地加大；通常增加到負載不变时的两倍左右。

例 4. 直徑为 50 毫米的螺栓是否允許承担 20 吨的拉力？螺栓材料的資用肋强是 12 公斤/毫米²。

【解】 按題意： $P=20$ 吨 $=20,000$ 公斤， $d=50$ 毫米，
 $\sigma_{\text{資}}=12$ 公斤/毫米²。

螺栓的橫截面积

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

螺栓所受的肋强

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{P}{S} = \frac{4P}{\pi d^2} \\ &= \frac{4 \times 20,000}{3.14 \times (50)^2} \approx 10 \text{ 公斤/毫米}^2. \end{aligned}$$

因为 $\sigma < \sigma_{\text{資}}$ ，所以螺栓可以承担 20 吨的拉力。

例 5. 起重机吊鈎的杆子所承担的最大負載是 8 吨，如果安全系数必須等于 8，求杆的直徑。組成杆的材料的强度极限为 60 公斤/毫米²。

【解】 按題意： $P=8$ 吨 $=8000$ 公斤，安全系数 $n=8$ ，
 $\sigma_{\text{限}}=60$ 公斤/毫米²。

資用肋强

$$\sigma_{\text{資}} = \frac{\sigma_{\text{限}}}{n} = \frac{60}{8} = 7.5 \text{ 公斤/毫米}^2,$$

因为

$$\sigma_{\text{資}} = \frac{P}{S} = \frac{P \cdot 4}{\pi d^2},$$

所以

$$d = \sqrt{\frac{P \cdot 4}{\pi \cdot \sigma_{\text{資}}}} = \sqrt{\frac{8000 \times 4}{3.14 \times 7.5}} \approx 37 \text{ 毫米}.$$

例 6. 直徑 3 厘米的鋼索能悬挂多重的負載？如果安全系数

是 10, 鋼的極限強度為 70 公斤/毫米²。

【解】 按題意： $d=3$ 厘米 = 30 毫米， $n=10$,

$$\sigma_{\text{極}} = 70 \text{ 公斤/毫米}^2.$$

資用肋強

$$\sigma_{\text{資}} = \frac{\sigma_{\text{極}}}{n} = 7 \text{ 公斤/毫米}^2,$$

又因為

$$\sigma_{\text{資}} = \frac{P}{S},$$

所以鋼索能夠懸掛的負載為

$$P = \sigma_{\text{資}} \cdot S = \sigma_{\text{資}} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 7 \cdot \frac{\pi (30)^2}{4} \approx 4950 \text{ 公斤}.$$

例 7. 如圖 6.22 所示, 在 B 點懸掛一個重 300 公斤的物體. 求杆 AB 和 CB 的橫截面積, 假定安全係數為 5. 杆的材料強度極限拉伸時為 8 公斤/毫米², 壓縮時為 4 公斤/毫米².

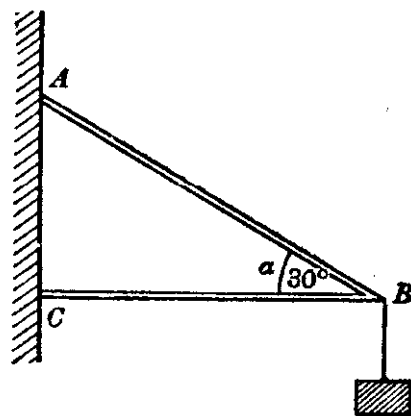


圖 6.22

根據杆受力的分析, 我們知道杆 AB 受拉力, 杆 CB 受壓力. 並且有

$$P_{AB} = \frac{300}{\sin 30^\circ} = 600 \text{ 公斤};$$

$$P_{CB} = \frac{300}{\tan 30^\circ} \approx 520 \text{ 公斤}.$$

【解】 按題意： $P_{AB}=600$ 公斤， $\sigma_{\text{極}(AB)}=8$ 公斤/毫米²，

$$P_{CB}=520 \text{ 公斤}, \sigma_{\text{極}(CB)}=4 \text{ 公斤/毫米}^2, n=5.$$

$$\sigma_{\text{資}(AB)} = \frac{\sigma_{\text{極}(AB)}}{n} = \frac{8}{5} = 1.6 \text{ 公斤/毫米}^2.$$

又因為

$$\sigma_{\text{資}(AB)} = \frac{P_{AB}}{S_{AB}},$$

所以

$$S_{AB} = \frac{P_{AB}}{\sigma_{容(AB)}} = \frac{600}{1.6} = 375 \text{ 毫米}^2,$$

$$\sigma_{容(CB)} = \frac{\sigma_{板(CB)}}{n} = \frac{4}{5} = 0.8 \text{ 公斤/毫米}^2,$$

又因为

$$\sigma_{容(CB)} = \frac{P_{CB}}{S_{CB}},$$

所以

$$S_{CB} = \frac{P_{CB}}{\sigma_{容(CB)}} = \frac{520}{0.8} = 650 \text{ 毫米}^2.$$

习 题 6·8

1. 銅的拉伸极限强度是 24 公斤/毫米², 試說明这个数字的物理意义.
2. 鋼索的极限强度是 60 公斤/毫米², 安全系数不能小于 5, 問資用肋强應該是多少?
3. 两根金属綫除了长度不同以外, 其他完全相同. 其中一根长 150 厘米, 另一根长 300 厘米. 第一根綫在悬挂重物 12 公斤时被拉断, 試問: 要拉断第二根綫的物体重量應該是多少?
4. 金属綫的横截面积为 0.00258 厘米², 当作用力是 22.7 公斤时被拉断, 求它的极限强度.
5. 某种金属的拉伸极限强度是 32 公斤/毫米², 比重是 7.8 克/厘米³, 問悬挂这种金属絲时, 由于本身重量而断裂的最短长度是多少?
6. 用压缩时的极限强度是 60 公斤/厘米²的磚砌水塔, 水塔的安全系数应当等于 10, 問水塔的最大高度是多少? 磚的密度是 1.8 克/厘米³.
7. 鋼索的直徑是 2 厘米, 极限强度是 80 公斤/毫米². 如果安全系数是 5, 求鋼索允許承担的最大重量.
8. 鋼帶寬 16 厘米, 厚 1.2 厘米, 受 20 吨力的拉伸. 如果鋼的极限强度是 42 公斤/毫米², 試問鋼帶在工作时的安全系数是多少? 如果鋼的彈性限度是 18 公斤/毫米², 求保証鋼帶不发生范性形变的最小安全系数.

§ 6·9 硬 度

在前面几节中, 我們已經分別討論了固体材料的几个重要的

力学性质——弹性、范性和强度。在本节中，我們再介紹材料的另一个重要的力学性质——硬度。材料的硬度是它抵抗其他物体刻划或压入其表面的能力。

用两种材料彼此刻划时，如果其中一种擦伤另一种，那末我們說前者是比較硬的。例如，用玻璃片的边缘沿銅片擦过，我們可以看到伤痕。相反，用銅片的边缘沿玻璃面擦过，在玻璃片上沒有任何伤痕。因此，玻璃比銅硬。

在选择建筑材料和制造切削工具(钻头、銑刀等)时，都必須考虑到材料的硬度。显然，用来加工金属的切削工具或钻孔工具，必須比被加工的金属硬度大。

測定材料硬度的方法很多，上面所讲的用两种材料彼此刻划，根据有无划痕来判定材料硬度的方法，叫做划痕法。但是，在工程技术上应用得最为普遍的是下面的方法。把一个很硬的鋼珠放在被試驗的材料上，用一定大小的力將鋼珠压入，根据材料表面上留下的凹弯月面形印痕的大小来确定材料的硬度(图 6·23)。凹痕的面积越大，材料的硬度越小。这种方法叫做压入法。

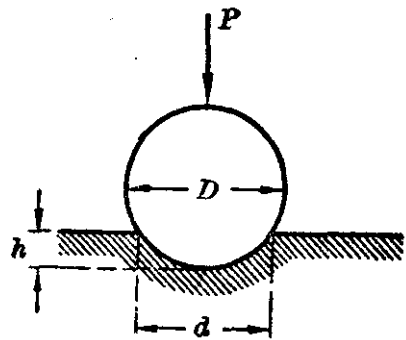


图 6·23 測定材料硬度的示意图

如果用 P 表示鋼珠所受的压力(以公斤作为单位)， S 表示凹痕的面积(以平方毫米作为单位)，那么硬度 H_B 就可以用下式来表示：

$$H_B = \frac{P}{S} \text{ 公斤/毫米}^2.$$

作硬度測定的試件，它的大小、厚度都应当比凹痕的直径(d)、深度(h)大，否則得不到任何結果。因此，当試件較小时，要采用小直径的鋼珠，并且用小的压力来进行。

在天然矿物中以金剛石为最硬。目前特殊合金的硬度已經接近金剛石的硬度。

下表中列举了几种材料的硬度。

材 料	硬度(公斤/毫米 ²)	材 料	硬度(公斤/毫米 ²)
鋼	150~300	軋 制 的 鋁	45
硬 鋼	达 850	銅	60
鑄 鐵	130~300	白色金属(作軸承用)	20~28

习 題 6·9

1. 在測定硬度的試驗中,用 3000 公斤的力压迫小球所得到的凹痕的面积为 10 毫米²,根据上述数据求被测金属的硬度。

§ 6·10 固体材料性能的应用

跟其他材料相比,金属具有較大的极限强度,所以机器的零件和建筑物的构件一般都用金属材料来制造。

切削工具和其他工具是用特殊的工具鋼制造的。这种鋼里含有鉻、鎳、鉬、錳等元素,并且具有很高的极限强度和硬度。

材料的彈性在机器制造业中有着极为重要的意义。机器工作时,它的零件受到各种力的作用,并产生各种形变。显然,这些形变都只能是彈性形变而不能是范性形变,否則机器的正常工作就要受到破坏。

金属的范性被广泛地应用在金属的压力加工中。主要的压力加工方法有鍛造、拉制和軋制。

利用压力来使金属改变形状的加工方法叫做鍛造。鍛造又分为自由鍛造和模型鍛造(又叫做冲压)。一般用手工来制造农具的方法就是自由鍛造的一种。

1. 冲压 用金属板来制造各种零件或制品时常常采用冲压法。图 6·24 是冲压法的示意图。先将金属板放在冲模和底模之間,然后用水压机或其他压力机把冲模压下,这时金属板弯曲,发生范性形变,成为所需要的形状。

可以进行冲压的材料有：鋼、銅、鋁、塑料等。用冲压法能够制造形状相当复杂的制品：象鋁鍋、表的齒輪、汽車和飞机的外壳等等。

为了充分利用金属的范性，减少冲压加工时的困难，在冲压比較厚（8毫米以上）的金属板之前，先要把金属板加热到較高的温度。这种冲压方法叫做热冲压。在普通温度下进行的叫做冷冲压。

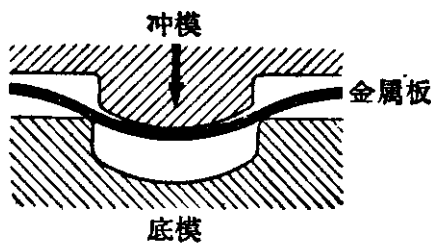


图 6·24 冲压示意图

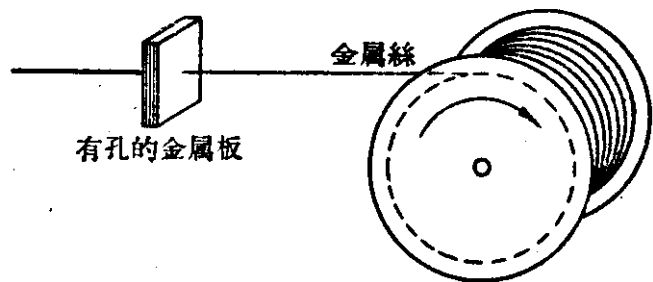


图 6·25 拉制示意图

2. 拉制 在这种加工方法中，要加工的金属被拉引着通过一系列在金属板（拉模）上的小孔，这些孔一个比一个小，所以金属綫的直徑可以变得很細。这种孔是由很硬的鋼或硬质合金制成的，一般做成圓錐形，叫做拉模孔。

用拉制的方法可以制造各种金属綫、小直徑的管子和各种截面的棒状材料（尺寸精确的）。

图 6·25 是拉制的示意图和拉模孔的簡图。

3. 軋制 利用这种加工方法可以把鋼、有色金属以及合金的錠制成金属板或各种橫截面的金属材料（例如丁字梁、鉄軌等等）。

軋制的产品除了上述制成品以外，还可以作为进行下一步加工的毛坯。

軋制方法的原理是使金属毛坯从两个轉动方向相反的軋輥中通过，这时金属毛坯的形状改变，截面积减小，长度增加。图 6·26 是軋制金属板的示意图。

为了便于軋制过程的进行，实际上絕大多数的金属坯都是在

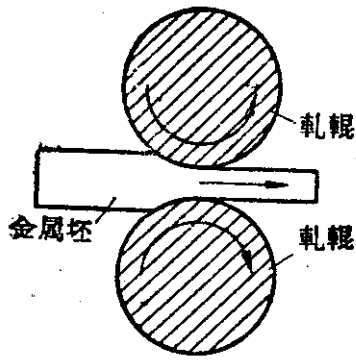


图 6·26 轧制金属板的示意图

热状态下进行轧制的。

木材也是一种非常有用的建筑材料，它的优点是比重小、极限强度较大，缺点是耐久性差，而且一般木材的结构都比较笨重。

近几年来塑料已经得到了广泛的应用。塑料制品的主要加工方法是压制。塑料受热时，有很大的范性；冷却后却很坚固。

习 题 6·10

1. 材料的弹性和范性对于材料在工程技术中的应用各有什么意义？
2. 说明材料在各种加工方法中发生什么形变。

本 章 提 要

本章内容主要包括固体的结构，固体的力学性质以及弹性和范性的应用三部分。通过本章的学习，应当达到下列要求，读者可以根据这些要求，逐条进行检查。

(1) 掌握两大类型固体（晶体和非晶体）的主要特征。通过晶体微观结构的学习，明确固体的物理性质决定于它的结构。结合第一章学过的“分子运动论”，初步了解固体分子运动的特点，并能用它来说明为什么固体既有一定的形状又有一定的体积。

(2) 明确固体发生形变的原因和决定形变的种类及程度的因素。了解固体发生形变时其内部微粒相互作用的情况。

(3) 了解固体两种重要的力学性质——弹性和范性。明确屈服强度和弹性限度的物理意义。

(4) 清楚地理解固体因受力情况不同而产生不同的形变，掌握各种弹性形变的特点和所遵循的规律。能够正确地运用胡克定律来处理伸长和压缩形变的问题。

(5) 认识在工程技术中使用极限强度和安全系数的意义。了解固体的弹性和范性的不同应用。

复习题六

1. 用铅笔在一块长方形的大橡皮上画一组面积等同的小方格，使各组的直线和边缘平行，当橡皮受到拉伸、压缩和发生扭转形变和弯曲形变时，小方格的形状发生了什么变化？描出各种变化，并作比较。

2. 绳索上悬挂重 1.5 吨的物体，绳索材料的极限强度为 50 公斤/毫米²，安全系数为 4，求绳的截面积。

3. 在长 40 米的钢索中央悬挂一个 100 公斤重的物体，绳索中央的下垂不能超过 1 米。绳索由直径为 1.5 毫米的钢丝绞成。钢丝的极限强度为 80 公斤/毫米²，安全系数为 6，问钢索应由几根钢丝绞成？

[提示：从钢索的原长、悬挂重量及下垂程度，按力的平衡可以求出钢索的张力，这个张力的 6 倍等于钢丝的极限强度和钢索截面积的乘积；由钢索的截面积和每根钢丝的面积就可以求出钢丝的根数。]

4. 自行车上脚踏的曲杆在自行车转动时产生了哪些形变？

5. 铝线在拉伸时的弹性限度为 5 公斤/厘米²。有一根铝线，截面积为 5 毫米²，求使它不发生剩余形变的最大拉力。

6. 运货站的最大负载是 200 吨，下面用木桩支撑着。每根木桩的直径是 27 厘米，如果它的实用压缩压强为 35 公斤/厘米²。问至少需要用几根木桩来支撑站台？

7. 如果要使钢棒的伸长等于从 0°C 加热到 100°C 时的线膨胀，那么拉伸压强应该为多大？

8. 铜棒在 0°C 时紧嵌在两壁之间。如果铜棒膨胀时两壁完全阻止它的伸长。问温度升高到 40°C 时，棒对两壁的压强增加了多少？已知铜的弹性模量为 10⁴ 公斤/毫米²。这一压强变化跟棒的原长是否有关？试说明其理由。

9. 长 10 米、截面积为 0.75 毫米²的金属丝，受到 10 公斤的拉力时伸长了 1 厘米，求它的压强和弹性模量。

10. 一根细铁丝吊在天花板下面，下端悬挂一个重 18 公斤的甲物体，甲物体下面再吊一根细铜丝，铜丝下端悬挂一个乙物体。铁丝和铜丝的原长和截面积相等，重量可以忽略不计。如果铁丝和铜丝的绝对伸长相等，求乙物体的重量。已知铜丝的弹性模量为 1.9×10^4 公斤/毫米²，铜丝的弹性模量为 10⁴ 公斤/毫米²。

11. 一根金属丝，当悬挂 P_1 公斤的重物时，长度为 L_1 厘米，当悬挂 P_2 公斤的重物时，长度为 L_2 厘米。求金属丝的原长。

第七章 物态的变化

在前面三章中，我們根据分子运动論討論了气体、液体和固体的一些性质，并且对某些現象作了說明。但是所讲解的还仅仅是物质处于某一种状态下的性质，而沒有涉及到物质如何从一种状态过渡到另一种状态的問題。事实上，我們知道物质三种状态的主要区别是在于它們分子間的距离，分子間相互作用力的大小，和热运动方式的不同。因此在适当的条件下，物体能从一种状态轉变为另一种状态。比如在冬天，气温下降时水要結成冰，天气轉暖时冰要化为水；雨后地面上的水会慢慢地干掉变成水汽等等，这些都是物态变化的例子。

在这一章中，我們就从固态和液态的轉化——熔解和凝固，液态和汽态的轉化——汽化和液化，以及空气的湿度等三方面来讲解物态变化的基本規律，并且还将告訴讀者人們如何利用这些規律来为工农业生产和科学研究服务。

§ 7.1 熔解和凝固

早晨的霜慢慢地化成为水；冬天温度下降时，水又冻結成为冰；熔鉄炉里的鉄块受热后熔化成为鉄水；鉄水澆鑄在模型里，漸漸冷却，又凝固成为坚固的零件。这一些都是我們通常所看到的固体和液体相互轉化的現象。

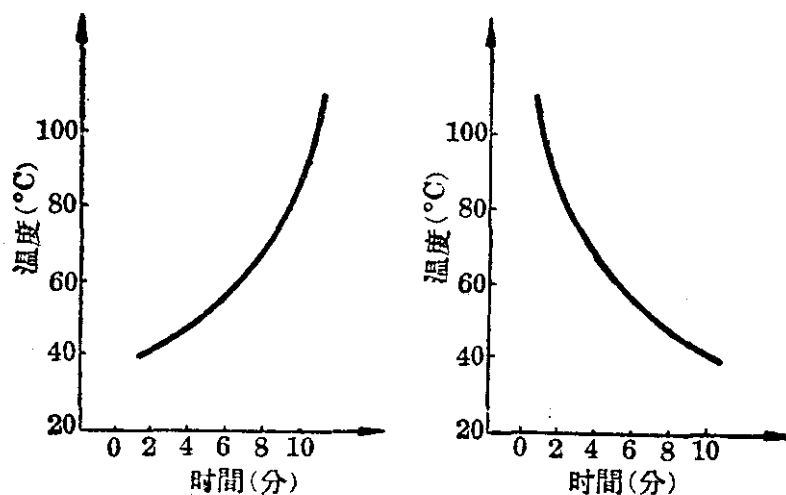
物质从固态变成液态的过程叫做熔解，从液态变成固态的过程叫做凝固。

在前一章中我們已經讲过，固体可以分为晶体和非晶体两大

类型。这两种类型的物质在熔解和凝固的过程中有没有区别呢？这是我们要研究的主要问题。

先拿一些非晶体来做实验。把一些松香放在试管里，在松香中插入一个温度计，用它来测量松香的温度变化。当对松香进行加热时，我们发现松香块都在逐渐地变软直到变成液体为止，同时温度计所指示的温度也在不断地上升。在高温下，这种液体的流动性比较大，粘滞性比较小。接着将试管放在冷水里，让它逐渐冷却下来，这时从温度计上可以看到，在冷却过程中，松香的温度在不断降低，而液态松香的粘滞性却在逐渐增大，最后又结成为固体。如果我们将松香在受热和冷却过程中温度随时间变化的情况记录下来，就能够得到如图 7.1 所示的图线。不仅松香具有这种性质，其他物体也具有这种性质，例如我们平时常常看到修马路时，工人惯常将融化了的沥青一勺一勺地浇在马路上，随着温度渐渐下降，沥青的粘滞性也逐渐增大，最后和碎石块一起结成坚硬的固体，做成路面。可是每当夏天太阳照在沥青路面上的时候，沥青的温度升高，同时变软，软化程度随着温度上升的高低不同而不同，这时我们走在它的上面会有柔软的感觉。

又如我们把玻璃放在火焰里加热，随着温度的升高，会看到玻



松香的熔解图线

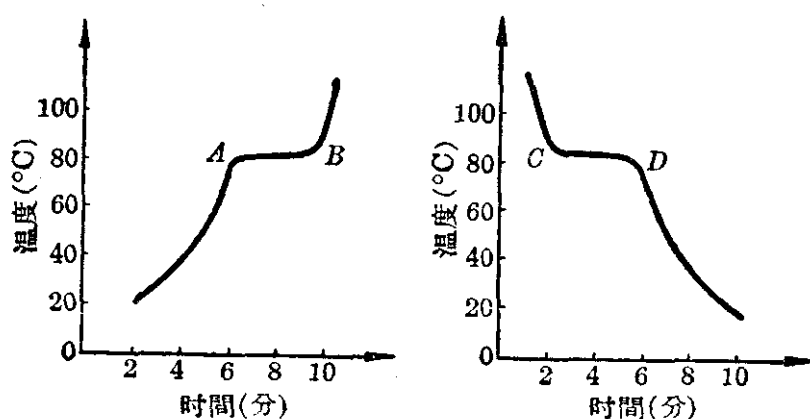
松香的凝固图线

图 7.1 松香在熔解和凝固时温度改变的情形

璃也是先变軟然后变成液体。利用玻璃的这种性质，我們可以把玻璃熔軟，抽成很細的玻璃絲；也可以把玻璃管熔軟，再吹成各种不同形状的玻璃容器。

对这些非晶体进行观察后，我們发现非晶体的熔解和凝固过程是随着温度的改变而逐漸完成的。它的液态和固态之間沒有明显的界限。固体受热后先全部变軟，再熔化成为液体。液体散热以后先凝固成为軟块，再結成固体。

再用晶体来做实验，观察它在熔解和凝固时的特点。把純粹的萘粉(樟腦粉)放在容器里，对容器均匀加热。在萘粉中插入一个溫度計，用来测量萘的温度变化的情况，开始时，温度是逐漸升高的。当加热到某一温度(80°C)时，可以看到有第一滴液态的萘形成。从这时开始在一个相当长的时间里，虽然继续对它进行加热，但萘的温度却并不上升，而傳入的热量都用在使固态萘变成液态萘上去了。热量的多少，只能影响熔解的快慢，而不能影响熔解温度的高低，直到全部萘都熔解后，温度才继续上升。将萘受热过程中温度随時間而变化的情况記下，可以得到如图 7.2 所示的图綫。图中的水平綫段 AB 表示萘在熔解的过程中温度不发生变化。



萘的熔解图綫

萘的凝固图綫

图 7.2 萘在熔解和凝固时温度改变的情形

这时如果停止加热，萘就要向四周散热而逐漸冷却，于是温度也就逐漸下降，当降到某一温度(80°C)时，就能够看到有凝固的小

萘块出現。此后萘虽然繼續放热,但是在一个相当长的时间里,温度却保持不变,如图中的 CD 部分。最后要等到萘全部凝固后温度才繼續下降。如果用常見的錫、鉛、冰或其他晶体来做实验,也可以得到同样的結果。这說明晶体在熔解和凝固的过程中具有共同的特征——温度保持不变。

比較图 7.1 和图 7.2, 就可以看到图 7.1 中的曲綫是逐漸上升或下降的, 而图 7.2 中的曲綫却有一段平直部分, 它們表示了温度不发生变化的过程。这就是說, 晶体在熔解和凝固过程中保持一定的温度。晶体的液态和固态之間有明显的界限。

为什么晶体和非晶体在熔解和凝固时有这样的区别呢?

在前一章中已經讲过, 晶体的分子是按一定的規則排列成为空間点陣的。分子只能在平衡位置附近不停地振动, 因此, 它具有动能; 同时, 在空間点陣中, 由于分子之間相互作用, 它又同时具有势能。

晶体在开始熔解之前, 从热源获得的能量, 主要是轉变为分子的动能, 因而使物质的温度升高。但在熔解开始时, 热源傳遞給它的能量, 是使分子的有規則的排列发生变化, 分子之間的距离增大以及分子离开原来的平衡位置移动。这样加热的能量就用来克服分子之間的引力做功, 使分子結構渙散而呈現液态。也就是說, 在破坏晶体空間点陣的过程中, 热源傳入的能量主要轉变为分子之間的势能, 分子动能的变化很小, 因此, 物质的温度也就沒有显著的改变。所以熔解过程是在一定温度下进行的。

相反, 在凝固过程中, 分子之間的距离縮小, 分子由杂乱无章的位置变成有規則的排列, 它的势能减小, 向外傳遞热量, 但动能却沒有改变。这样, 在凝固时, 温度也是不变的。

非晶体物质的分子結構跟液体相似, 它的分子排列是混乱而沒有規則的, 即使由于它的粘滯性很大, 能够保持一定的形状, 但是实际上它并不具有空間点陣的結構, 热源傳遞給它的能量, 主要

是轉变为分子的动能。所以在任何情况下,只要有能量輸入,它的温度就要升高。因此它沒有一定的熔解温度,并且在熔解过程中,温度是不断上升的。

晶体熔解时的温度叫做熔解温度,簡称熔点。晶体凝固时的温度叫做凝固温度,也叫做凝固点。对于同一物质来讲,它的凝固点就是它的熔解点。在熔点时固体和液体是可以共存的。所以我們也可以这样讲:固体与液体共存时的温度叫做熔解温度。溶解时,輸入的热量用于使固体熔解。在凝固过程中,液体轉变为固体,同时放出热量。所以物质的温度高于熔点时,将处于液态;低于熔点时,就处于固态。

从实驗中知道各种物质的熔点相差很大。純鉄的熔点是 1525°C ,金是 1064°C ,冰是 0°C ,而固态的氫在 -257°C 时就熔解了。

表 7.1 是几种物质在标准大气压下的熔点。

表 7.1

物 质	熔点($^{\circ}\text{C}$)	物 质	熔点($^{\circ}\text{C}$)	物 质	熔点($^{\circ}\text{C}$)
氫	-272.2	水 銀	-39	白鑄鉄	1200
氫	-259	海 水	- 2.5	鋼	1300~1400
臭 气	-251.4	冰	0	鎳	1455
氟	-248.6	鈉	97.7	純 鉄	1525
乙 醚	-117	硫	112.8	铂	1767
酒 精	-114	銻	630.5	鎢	3370
氯	-101	黄 銅	1000	碳	3500
氨	- 77.7	銀	961		

熔点对于生产技术具有很大的意义,在某些生产部門中,就是利用物质熔点不同这一特点来进行操作的。如在焊接金属时,用作焊条的金属的熔点,必須比被焊金属的熔点低才行;为了炼鋼,必須使炉温保持在鋼的熔点以上,而熔鉄炉里的耐火磚的熔点就應該比鉄的熔点高,鎢的熔点甚至达到 3357°C ,所以可以用来制成白熾电灯的灯絲。

§ 7.2 熔 解 热

从 § 7.1 中我們已經知道晶体有一定的熔点，当温度达到熔点时，如果繼續加热，这些热量就将用来反抗分子引力做功，增加分子的势能。也就是說，这时物质所吸收的热量是用来使分子的运动状态起质的变化——从固态的分子热运动轉变成液态的分子热运动，同时改变了物质的状态。所以晶体不仅有固定的熔点，而且还需要吸收一定数量的热量来实现熔解。

又由于不同物质的晶体空間点陣結構不同，因此尽管它們的质量相同，在熔解时所吸收的热量却是不同的。为了表明物质的这一特性，我們引入一个新的物理量——熔解热。

单位质量的某种固态物质在熔点时完全熔解成同温度的液态物质所需要的热量，叫做該物质的熔解热。 熔解热的单位是卡/克或千卡/公斤。

表 7.2 是几种物质的熔解热。

表 7.2

(在标准大气压下，单位：卡/克或千卡/公斤)

物 质	熔 解 热	物 质	熔 解 热	物 质	熔 解 热
氮	0.82	金	16	鈹	39
汞	2.8	溴	16	銅	42
氧	3.3	灰鑄鉄	23	錫	46
黄 磷	5	銀	25	鉄	66
鉛	6.3	鉑	27	冰	80
硫 酸	10.35	鈉	27.5	鋁	92.4
錫(白色)	14	白鑄鉄	33	鎂	720

相反，在凝固时物质就要放出熔解热，并将热量傳給四周的物体。

測定熔点較高的物体的熔解热是比較困难的，但是对于熔点較低的物体，例如冰就可以用量热器来測定。具体的測量方法我

們将通过例題 1 来进行說明。

如果用 λ 表示物质的熔解热, m 表示物质的质量, Q 表示熔解时所需要吸收的热量, 那么,

$$Q = \lambda m.$$

例 1. 設量热器的质量为 120 克, 比热为 0.09 卡/克·度. 容器中盛 15°C 的水 250 克, 投入 0°C 的冰, 冰全部熔解, 最后稳定温度为 8°C , 此时称得量热器和水的总重量为 390.7 克, 求冰的熔解热.

【解】 按題意: 冰的质量 $m_1 = 390.7$ 克 $- 120$ 克 $- 250$ 克 $= 20.7$ 克. 冰的温度为 0°C , 量热器的质量 $m_2 = 120$ 克, 量热器內水的质量 $m_3 = 250$ 克, 量热器和水的初温度 $t_1 = 15^{\circ}\text{C}$, 末温度 $t_2 = 8^{\circ}\text{C}$.

0°C 的冰熔解为 0°C 的水所吸收的热量:

$$Q = m_1 \lambda_{\text{冰}} = 20.7 \lambda_{\text{冰}},$$

0°C 的水升至 8°C 时所吸收的热量:

$$Q_1 = m_1 \times c_{\text{水}} \times (t_2 - 0) = 20.7 \times 1 \times 8;$$

量热器由 15°C 降至 8°C 时所放出的热量:

$$Q_2 = m_2 \times c_{\text{器}} \times (t_1 - t_2) = 120 \times 0.09 \times (15 - 8),$$

量热器內的水由 15°C 降至 8°C 时所放出的热量:

$$Q_3 = m_3 \times c_{\text{水}} \times (t_1 - t_2) = 250 \times 1 \times (15 - 8);$$

因为

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3$$

所以

$$20.7 \lambda_{\text{冰}} + 20.7 \times 8 = (250 + 120 \times 0.09) (15 - 8),$$

解上式, 得

$$\lambda_{\text{冰}} \approx 80 \text{ 卡/克.}$$

例 2. 为了使 6 公斤、 -20°C 的冰变成 30°C 的水, 需要多少热量?

【解】 按題意：冰的质量 $m=6$ 公斤，
 冰的初温度 $t_1=-20^{\circ}\text{C}$ ，
 水的末温度 $t_2=30^{\circ}\text{C}$ ，
 由表查知 $c_{\text{冰}}=0.5$ 千卡/公斤·度，
 $\lambda_{\text{冰}}=80$ 千卡/公斤，

求需要的总热量 Q 。

在計算熔解凝固問題列出热平衡方程时，必須考虑到下列三个过程：(1) 固态物质温度升高到熔点的吸热过程；(2) 在熔点，由固态变成液态的吸热过程；(3) 液态物质温度升高的吸热过程。所以本題也要分为三步来解：

先求 -20°C 的冰变成 0°C 的水时需要吸收的热量 Q_1 ，

$$Q_1 = mc_{\text{冰}}(t_0 - t_1) = 6 \times 0.5 \times [0 - (-20)] = 60 \text{ 千卡}；$$

再求 0°C 的冰熔化成 0°C 的水时需要吸收的热量 Q_2 ，

$$Q_2 = \lambda_{\text{冰}}m = 80 \times 6 = 480 \text{ 千卡}；$$

最后求由冰熔化而成的水从 0°C 升至 30°C 时需要吸收的热量 Q_3 。

$$Q_3 = mc_{\text{水}}(t_2 - t_0) = 6 \times 1 \times (30 - 0) = 180 \text{ 千卡}；$$

于是 -20°C 的冰变成 30°C 的水时需要吸收的热量：

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 60 + 480 + 180 = 720 \text{ 千卡}。$$

例 3. 量热器的质量是 200 克，比热是 0.1 卡/克·度，內装 20°C 的水 100 克。如果把 50 克 0°C 的冰放进水里，求混合后的共同温度。

【解】 按題意：冰的质量 $m_1=50$ 克，冰的温度为 0°C ，量热器的质量 $m_2=200$ 克，量热器的比热 $c_{\text{器}}=0.1$ 卡/克·度，量热器內水的质量 $m_3=100$ 克，量热器和水的初温度 $t_1=20^{\circ}\text{C}$ 。

我們仍旧依照例題 1 的方法来計算 t_2 ：

0°C 的冰熔解为 0°C 的水所吸收的热量：

$$Q = m_1\lambda_{\text{冰}} = 50 \times 80 = 4000 \text{ 卡}，$$

0°C 的冰所熔化而成的 0°C 的水升至 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时所吸收的热量:

$$Q_1 = m_1 \times c_{\text{水}} \times (t_2 - 0) = 50 \times 1 \times t_2 = 50t_2,$$

量热器由 20°C 降至 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时所放出的热量:

$$Q_2 = m_2 \times c_{\text{器}} \times (t_1 - t_2) = 200 \times 0.1 \times (20 - t_2) = 400 - 20t_2,$$

量热器内的水由 20°C 降至 $t_2^{\circ}\text{C}$ 时所放出的热量:

$$Q_3 = m_3 \times c_{\text{水}} \times (t_1 - t_2) = 100 \times 1 \times (20 - t_2) = 2000 - 100t_2,$$

因为

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3,$$

所以

$$4000 + 50t_2 = 2400 - 120t_2,$$

$$t_2 = -9.4^{\circ}\text{C}.$$

从计算中得到 $t_2 = -9.4^{\circ}\text{C}$. 这一结果是不是合理呢? 我们要仔细考虑一下, 在这种情况下, 水温降低时所放出的热量, 必然使冰的温度升高. 所以混合后的温度必定高于冰原来的温度, 而现在 0°C 的冰和 20°C 的水混合后, 反而全部冻结, 使温度降到 0°C 以下, 这一结果显然是不合理的. 为什么会出现这种情况呢? 这是由于在计算时错误地认为冰会全部熔解所造成的. 因此, 在着手解这种类型的题目时, 应该先估计一下各有关量的大小以及冰是否会全部熔解.

50 克的冰全部熔解需要 $50 \times 80 = 4000$ 卡的热量.

量热器与水从 20°C 降到 0°C (这是最低温度) 全部放出的热量是 $200 \times 0.1 \times (20 - 0) + 100 \times 1 \times (20 - 0) = 400 + 2000 = 2400$ 卡的热量.

显然, 冰不能全部熔解. 混合物是处于水和冰共存的状态. 所以混合物的温度是 0°C .

那么究竟有多少冰熔解成为水呢?

设有 m 克熔解成水

则

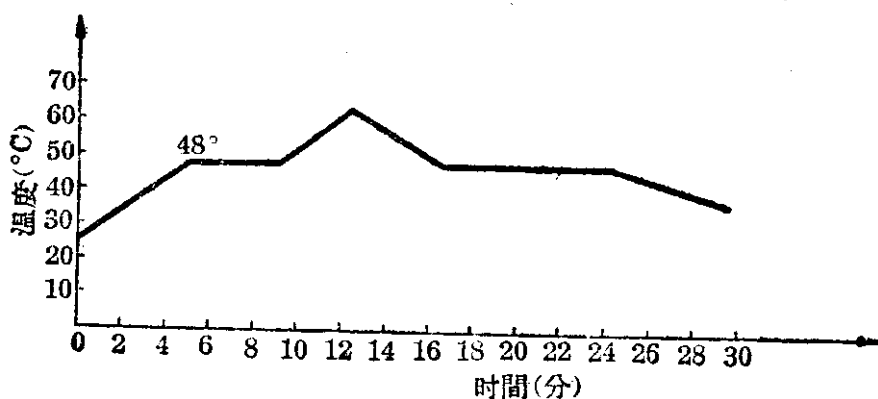
$$80m = 2400,$$

$$m = 30 \text{ 克.}$$

还有 20 克的冰不能熔解。混合的结果是 20 克冰和 $100 + 30 = 130$ 克的水，温度都是 0°C 。因此这一例题正确的答案应该是混合后的温度为 0°C 。

习 题 7.2

1. 下图表示的是在硫代硫酸钠的熔解和凝固过程中温度随时间而变化的曲线。试根据图线回答下列的问题：(1) 硫代硫酸钠的熔点是多少度？(2) 从 20°C 加热到熔点要用多长时间？(3) 熔解过程继续多长时间？(4) 硫代硫酸钠的温度最高升至多少度？(5) 硫代硫酸钠的凝固点是多少度？



(第 1 题)

2. 把锡扔在已经熔解的铅里，锡是不是可以熔解？
3. 在极冷的地区，为什么不用水银温度计而要用酒精温度计来测量空气的温度？
4. 晶体在熔解时，温度并不升高，但是为什么还需要吸收热量？
5. 非晶体是否有一定的熔点和一定的熔解热？为什么？
6. 要使原来温度是 10°C 、质量是 1000 公斤的铁在化铁炉里熔解，需要多少千卡的热量？(铁的比热是 0.11 千卡/公斤·度.)
7. 量热器筒的质量是 200 克，比热是 0.1 卡/克·度。筒里装有 30°C 的水 280 克。如果把 50 克的 -20°C 的冰放进水里，混合后的温度是 12.8°C ，求冰的熔解热。
8. 把 327°C 熔解的铅 500 克倒入 1000 克 19.5°C 的水中，混合后的温度是 28°C ，求铅的熔解热。
9. 量热器内筒里装着 40°C 的水 200 克。如果把 300 克的 -20°C 的冰

放进水里，混合以后的温度是多少度？（量热器内筒的质量是 200 克，比热是 0.1 卡/克·度。）

10. 霰弹（猎枪用的铅弹）的制法，是使熔化了的铅一滴一滴地落入水中经过冷却后凝固成小珠。如果我们制造 50 千克霰弹，而用 20 升 10°C 的水来使它冷却，那末水的末温度是多少？设铅的初温度就是它的熔点。

11. 如果已知火油炉的效率是 30%，想用火油炉将 5 千克 17°C 的铅熔解，需要准备多少火油？

§ 7.3 熔解和凝固时体积的变化

在日常生活中我们都有这样的经验，冬天必须用稻草把自来水管包扎好，这样就能防止管内的水冻结成冰。因为当水冻结成冰时，水管就要被胀裂。在严寒时，盛满水的瓶子有时也会因冻结而破裂。河水结冰时，冰又总是浮在水面上的（图 7.3）。这都说明了水变成冰时，它的体积要膨胀，密度要变小。



图 7.3 冰浮于水面

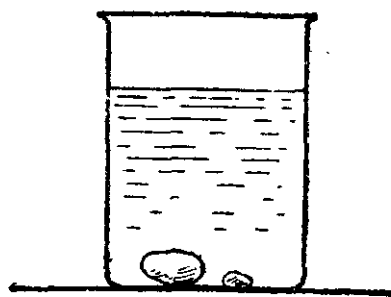


图 7.4 小石蜡块沉在石蜡熔液底部

那么其他一些物质在凝固时体积又将发生怎样的变化呢？我们可以做这样一个实验，拿一小块固体石蜡投进熔解的液体石蜡里，就会看到它要下沉到底部（图 7.4）。这说明固态石蜡的密度比液态石蜡大。在熔解时，石蜡的体积要增大，密度要变小。这和冰熔解成水的情况恰好相反。我们还可以看到当把液态的钢或铅倾倒在模子里时表面是平的，可是当凝固成钢锭或铅锭后，表面就不

是平的,而是呈凹形的. 这說明它們和石蜡一样在凝固时体积縮小.

从上面两个例子中,我們知道物体从固态熔解成液态,或者从液态凝固成固态时,体积和密度通常是要发生变化的. 实验又告訴我們,大多数物质在凝固时体积要縮小,在熔解时体积要变大,如石蜡、銅、鋅、錫等. 这是因为在晶体內分子有規則排列时所占的体积要比在液体內分子杂乱无章排列时所占的体积小些.

但是也有少数物质例外,它們在凝固时体积反而变大,熔解时体积反而縮小. 例如冰、鉍和銻等就有这样的性质. 冬天农作物要防止霜冻,也就是因为水結冰时体积膨脹,結果將植物的細胞脹裂而使植物死亡. 雨水流入岩石的縫隙深处,在天寒結冰时,可以使岩石裂开;这是形成自然界中岩石风化的一个原因. 此外如在制作印刷用的活字版时,常常要在鉛中加入一些鉍、銻等金属,因为在凝固时它們要膨脹,結果就压入模型的細微深处,以保証字型沒有缺陷.

§ 7.4 影响熔点的几个因素

在前面做晶体熔点的实验中,我們假定萘、錫等物体所受的外界压强是保持不变的. 如果外界压强发生变化,熔点也将随着而改变. 一般物质的熔点不仅与外界压强有关,还和它是否純淨,含有杂质的种类和多少有关. 在这一节中我們就分別来討論这些因素对熔点的影响.

1. 压强对熔点的影响 在 § 7.3 中已經讲过物质在熔解时体积要发生变化,正是由于这一个原因,当外界的压强发生变化时,物质的熔点就要随着而改变. 現在我們分两种情况来研究物质的熔点和它所受的压强的关系:

第一,熔解时体积膨脹的物质,在压强增加时熔点就要升高. 因为增加压强能够起压缩物体体积的作用,因此,在这种情况下,

就要阻碍物体熔解时体积的胀大。为了使物质熔解后体积能够胀大，就必须继续加热，使物质的分子振动得更激烈，也就是使物体的温度升得更高。例如水银的熔点在1大气压下为 -39°C ，而在15,000大气压下为 10°C 。这类物质在压强减小时熔点就下降。

第二，熔解时体积缩小的物质，在压强增加时熔点就要降低。因为，在这种情形下，压强的增加会促使物质体积的缩小，因此温度不必升高到原来的熔点就能够熔解。例如，冰在1大气压下的熔点是 0°C ，而当外界压强每增加1个大气压，它的熔点就要下降 0.0075°C 。

从下面的实验中可以观察到冰的熔点随着压强而变化的现象。

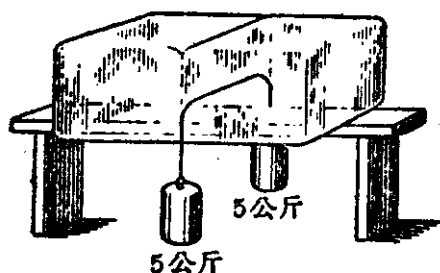


图 7·5 复冰现象

如图 7·5 所示，把一根钢丝压在一块冰上，钢丝的两端各悬挂 5 公斤的砝码。在钢丝下面的冰由于受到很大的压强，因此熔点降低，原先是固体的冰现在开始熔解成水了。熔解的水处在钢丝的上面，一

方面由于压强减小，另一方面由于钢丝下面的冰熔解时吸取它的热量，所以又结成为冰。结果是钢丝穿过冰块，而冰块并没有分裂为两块。这个例子很好地说明了冰的熔点是随着压强的增大而降低的。这个现象我们称为复冰现象。

2. 物质中含有杂质对熔点的影响 当液体中含有溶质时，它就不容易凝固，因而熔点要降低。例如水里含有蔗糖时，它的熔点就要降低。又从实验知道水中含有的有机物越多，它的熔点也降低得越快。我们有这样的经验，在冰上撒一把盐，冰就更容易熔解了。所以说当水中含有盐碱和酸等物质时，它的熔点要降低。

由几种不同的金属按一定比例所组成的合金，它的熔点也往往比其中熔点最低的那一种金属的熔点还要低一些。例如锡在

232°C 熔解,鉛在 327°C 熔解,而錫与鉛的合金,在 170°C 左右就熔解了。由鉍、錫、鉛、鎳組成的合金的熔点在 70°C 左右。这两种合金都可用作焊錫或保險絲。因此,工业上常常用各种不同的金属,按照需要的熔点和硬度来配制各种合金。

但是也出現这样的一种情况:非常純淨沒有杂质的液体有时在冷却到熔点以下若干度时,仍能保持液态而并不凝固,这种現象叫做液体的过度冷却。例如完全熔解的純硫代硫酸鈉,就很容易发生这种現象。硫代硫酸鈉的熔点是 48°C。但是如果将純淨的硫代硫酸鈉装在試管里进行加热,使它完全熔解以后,让它漸漸地冷却下来,那么当温度降至 30 多度时,它仍旧可以保持着液态。这时只要把一小块硫代硫酸鈉結晶投入試管里,或者搖动一下試管,它就会立刻开始結晶,同时放出熔解热使温度上升到熔点。

在自然界中,我們也可以看到純洁的沒有任何微尘的水的过度冷却現象。如在很冷的冬天,空气中的小雾滴可以冷到 -30°C 还不冻结,但是当飞机飞进这样的小雾滴中时,由于飞机振动空气和噴出大量烟气,使小雾滴結冰,这时飞机的机翼上也可能結冰,这对飞机是很危险的。

习 題 7.4

1. 在熔解和凝固时,物体的体积有何变化?
2. 在很冷的日子里,如果汽車长久停着不用,就必须把它的散热器水箱里的水放出,为什么?
3. 由于物体所受的压强增加,有些物质的熔点升高,有些則降低,这是什么原因?
4. 将两块 0°C 的冰压在一起,它們将会熔接成一块,为什么?
5. 在企图得到 0°C 以下温度的冷却装置中,冷却管里装的是濃食鹽溶液,为什么不用淡水呢?

§ 7.5 金属的鑄造

在生产中我們普遍地利用了熔解和凝固的知識,金属鑄造的过程就是先

对鑄鉄或其他金属加热，使它熔解成为液态金属，然后澆注到預先做好的模子里去；当它冷却凝固后，就成为所需要的机器零件。

鑄造的方法很多，目前工业上广泛采用的有：砂型鑄造、压力鑄造、硬模鑄造等等。图 7·6 是砂型鑄造的过程：(a) 是用木料或者金属做成的机件鑄型(模子)；(b) 是將它放在砂型里；(c) 是將砂压紧后，再取出模子，就在砂型里留有型腔。

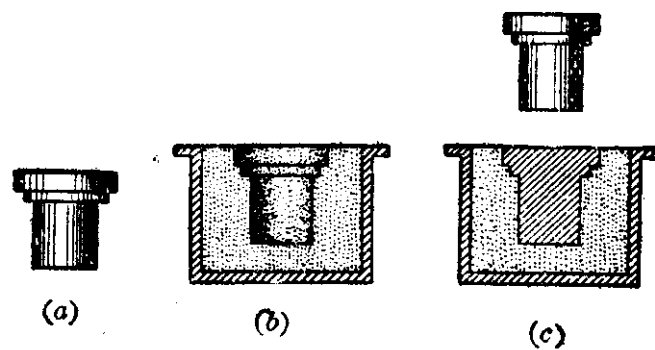


图 7·6 砂型鑄造

图 7·7 是澆鑄的过程：(a) 是已做好的砂模型腔；(b) 是將液态金属澆注到型腔中去的情况。图中 1 是澆口，液态金属由这里注入；2 是出气口，空气由这里排出；(c) 是金属凝固后拆开砂型取出的鑄件；(d) 是敲去澆口和出气口后的固体金属，就成为和模子一样的鑄件，再經過金属加工就是机器的零件。

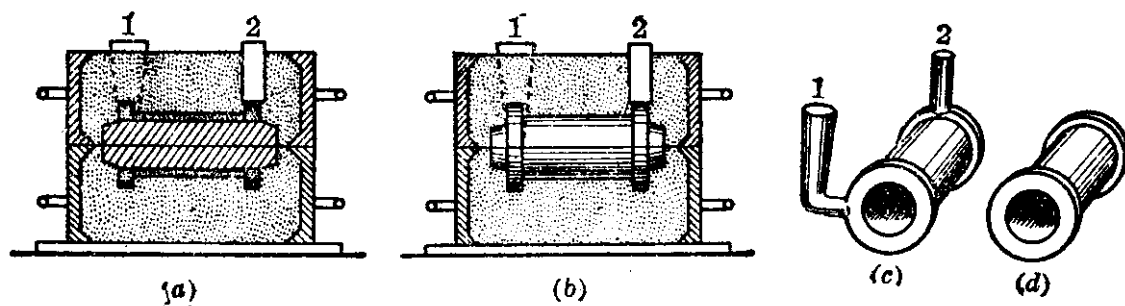


图 7·7 澆鑄过程

因为液态金属从高温降低到凝固点，以及固态金属从凝固点降低到通常室温时，都有显著的收縮，所以模型总是要比实际零件大一些。

如果是用生鉄来澆鑄模型，由于它凝固时体积膨脹，能够压入到模型的細微深处，使制品的条紋清晰得和模型完全一致。如果是用其他凝固时不膨脹的金属澆注，則要用压力帮助它流到細微处，才能使鑄件做得更好。日常生活中的一些用品如剪刀、鎖、鍋等等都是利用鑄造方法做成的。一般机器上的許多零件也都是用鑄造方法制造的。例如內燃机里的汽缸、汽缸盖、活塞、活塞环和飞輪等都是鑄件。特别是有些零件的形状十分复杂，只能采取

鑄造方法来制造。目前科学家正在研究用 3000°C 以上的高温来熔解石头，然后利用鑄造方法制造出人们所需要的石料物体。

§ 7.6 蒸 发

在前几节中，我們已經讲过物体的固态和液态之间的轉化，实际上在自然界中还普遍存在着液态和气态的轉化。江面的水变成水汽，水汽上升后又凝結成为云雾形成了雨……这些过程在不断地重复进行着。从液体轉变成气体的过程叫做汽化，从气体轉变成液体的过程叫做液化。汽化有两种形式：蒸发和沸騰，这里我們先讲蒸发现象。

我国沿海有着大片的盐田，将海水引入田中后，經過日晒风吹，不久水就逐漸干掉，析出亮晶晶白色的盐来。又如水稻田需要不断地灌水，否則就要受到干旱而使水稻不能生长。那么这些水都到哪里去了呢？我們說，水面上的水漸漸地变成为水汽而散逸到空气中去了。

液体表面的汽化現象叫做蒸发，蒸发在任何温度下都能够进行。

然而是否所有的液体都能够蒸发呢？是的，日常生活經驗告訴我們，不仅水能够蒸发，酒精、乙醚、汽油和煤油等也都能够蒸发。各种液体蒸发的快慢不同，有一些液体例如乙醚、汽油、酒精蒸发得很快，而另一些液体如水和煤油蒸发得比較慢，至于水銀則蒸发得更慢了。

不仅液体会蒸发，有些固体也会直接变成气体，例如冬天結在湿衣服上的冰、萘和樟脑等都会直接变成气体。固体物质不經過液态阶段而直接变为气态的过程叫做升华。

夏天烈日当空，气温很高的时候，田里的水分干得很快。晾晒谷物时要將它們攤散在地面上，并且注意通风，才容易晒干而不致于受潮发霉。从这些日常生活的經驗中，我們可以得出下列几点：

- (1) 液体在任何温度下都能够蒸发；温度越高，蒸发得越快。
- (2) 液体的表面越大，蒸发得越快。
- (3) 液面上的汽排除得越快，蒸发也就越快。

那么液体的蒸发现象是怎样产生的呢？

我們可以用分子运动論来进行解釋：液体中的分子都是在不停地作无規則运动。它們的平均动能的大小是跟液体本身的温度相适应的。由于分子的无規則运动和相互碰撞，在任何时刻总有一些分子具有比平均动能还大的动能。这些具有足够大动能的分子，如果处在液面附近，就会克服分子之間的引力，飞出液面，变成这种液体的汽，这就是蒸发现象。

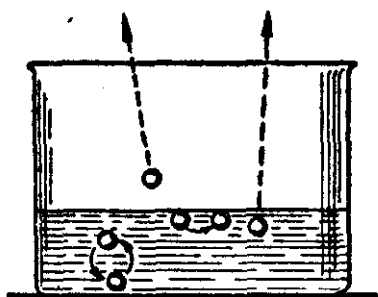


图 7·8 蒸发现象示意图

無論在什么温度，液体中总有一些速度很大的分子能够飞出液面成为汽分子 (图 7·8)，所以液体在任何温度下都可以蒸发。如果液体的温度升高，分子的平均动能就增大，因此，能够从液面飞

出的分子数也就增多，所以液体的温度越高，蒸发得越快。如果液体的表面增大，那么，处于表面附近的分子数目增加，因而在相同的时间里，从液面飞出的分子数就增多，所以液面增大，蒸发就加快。飞入空气里的汽分子和空气分子或其他汽分子发生碰撞时，有可能碰回到液体中来。如果把液面上的汽很快地排除出去，那么，汽分子被碰回液体中的机会就减少了，因此，蒸发也就更快了。

在其他条件都相同的情况下，为什么不同液体的蒸发快慢会有很大的差别呢？这必須从液体分子之間內聚力的大小来理解。有些液体 (例如水銀) 分子之間的內聚力很大，只有极少数动能足够大的分子才能从液面逸出，这种液体就蒸发得很慢。而另一些液体 (例如乙醚) 分子之間的內聚力很小，能够逸出液面的分子数比較多，所以就蒸发得快。

除了上述的例子外，我們还有这样的一些常識。穿着湿衣服

会感到冷一些，尤其是在有风吹着的时候感到更冷。夏天高温車間的屋面上通常装有噴水管，将水澆在屋面上，这时水就会很快地蒸发掉，这样就降低了車間里的温度，使人感到很凉爽。这一点又告訴我們，当液体蒸发时是要从周圍物体中吸取热量的。湿衣服上的水蒸发时，吸取了人身上的热量，使人感到发冷。屋面上的水蒸发时吸取了車間里空气的热量，使人感到凉爽。

为什么液体蒸发时要吸取热量呢？原来液体蒸发时，从液体里跑出来的分子，要克服液体表面层的分子对它們的引力而做功。这些分子所以能够做功，飞出液面，是因为它們具有足够大的动能。既然从液体里飞出去的是速度很大的分子，留下的分子的平均动能就要变小，因此它的温度就要降低，这时，它就要通过热傳遞方式从周圍物体中吸取热量，这也就是蒸发时冷却的原因。

习 題 7·6

1. 蒸发的快慢和哪些因素有关？
2. 試根据分子运动論來說明液体的蒸发现象。
3. 当液体蒸发时，如果不給它热量，它的温度将发生怎样的变化？为什么？
4. 为了确定风的方向，我們可以把手指在水中浸一下再举起来，手的那一面感到凉，风就是从那一面吹来的。說明它的理由。
5. 冬天在臉上或手上涂上点油脂就会觉得暖和一些，为什么？
6. 固体是否也会发生蒸发现象？

§ 7·7 飽和汽和飽和汽压

盛在盘子里的水，由于不断蒸发的緣故，不久就会干掉。但是，如果把水盛在封閉的瓶子里，水就不会减少，这是什么道理呢？

我們知道，敞口容器里的液体进行蒸发时，由于空气流动的关系，有大部分的汽分子被分散到周圍空間中去，但是也有小部分汽分子由于相互碰撞而被碰回到液体中来。但是在单位時間內，飞

出液面的分子数总是多于回到液体中来的分子数。所以，容器中的液体就会逐渐蒸发掉。

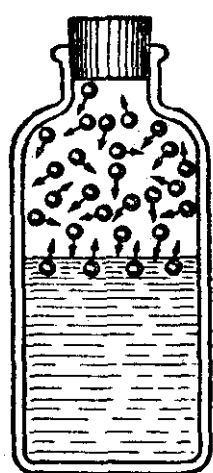


图 7.9 密闭容器的蒸发情况

如图 7.9 所示，把液体盛在密闭的容器里的情况就不同了。在开始时，飞出液面的分子数总是多于回到液体中来的分子数。液体逐渐减少，容器中汽的密度就要逐渐变大。汽的密度变大后，由于汽分子相互碰撞以及汽分子与器壁碰撞而回到液体中的分子数就要增多。最后，当从液面飞出的分子数等于回到液体中来的分子数时，液面上的汽的密度就不再增加了。于是液体不再减少。这时的汽叫做

饱和汽。因此，在饱和状态时，并不是液体分子不再飞出液面，而是单位时间内从液面飞出的分子数等于飞回液体的分子数。汽和液体之间达到了**动态平衡**。所以更确切地说，只有汽跟产生它的液体处于动态平衡时，这个汽才叫做**饱和汽**。例如在盖紧的酒或汽油的瓶子里，酒面上或汽油面上的汽都是饱和汽。饱和汽所具有的压强叫做**饱和汽压**。

现在我们就利用图 7.10 所示的实验来研究液体的饱和汽压。左管上连有小漏斗，漏斗下有活门 S，右管是开口管，管里装有水银。实验时先打开活门，提高右管以排出左管水银面上的空气，关上活门后左管水银面上成为托里拆利真空，于是左右两管的水银面高度差就表示大气压强。将乙醚盛在小漏斗里，打开活门，让少量的乙醚滴入托里拆利真空后立即关闭活门，使乙醚开

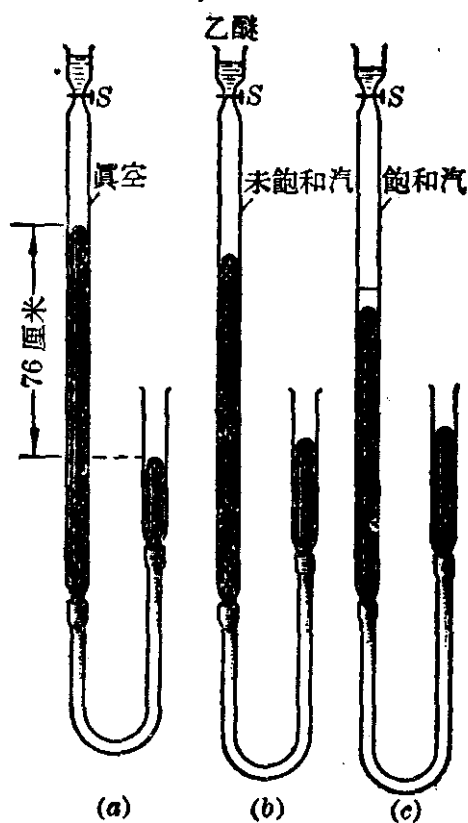


图 7.10 研究液体饱和汽压的装置

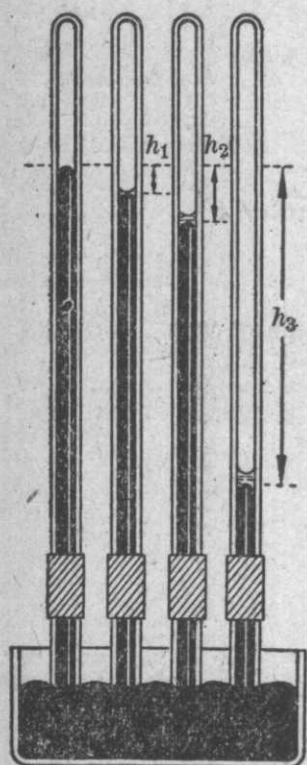
始蒸发。这时左管的水銀面漸漸下降，右管的水銀面漸漸上升，两管水銀面高度差的减小說明左管水銀面上的乙醚汽产生了压强。高度差越小說明汽的压强越大，高度差越大說明汽的压强越小。繼續由小漏斗加入乙醚直到乙醚不再蒸发，两管水銀面高度达到稳定为止，这时左管里的乙醚汽已达到飽和状态，两管水銀面的高度差更小了。两水銀柱高度差的变化，就是乙醚的飽和汽压，它可以这样来求：比如左管上成托里拆利真空时左右两管水銀柱高度差是 76 厘米，当左管上是乙醚飽和汽时，左右两管水銀柱高度差是 32 厘米，高度差的变化是 44 厘米，这时乙醚飽和汽压就是 44 厘米水銀柱。如果在小漏斗里装入其他液体，我們就会得到其他液体的飽和汽压强。

§ 7·8 飽和汽的性质

在 § 7·7 中已經讲过飽和汽的压强，現在我們要問飽和汽的性质和气体的性质是否相同以及是否遵循一般的气体定律呢？飽和汽的体积、温度和压强之間的关系又是怎样的呢？下面我們就从三方面来进行研究。

1. 液体的飽和汽压跟液体种类的关系 在 § 7·7 中，我們已从实验求得乙醚的飽和汽压。采用同样的方法，我們可以得到其他液体的飽和汽压。将每一次实验所得到的飽和汽压的数值記錄下来，就可以看到各种液体的飽和汽压是不同的。为了进行更明显的对比，我們也可以作下面的实验。把四根长约 80 厘米一端封閉的玻璃管各分为两段，用长约 6 厘米的橡皮管連接在一起。在这四根长玻璃管中装满了水銀，然后倒立在一个水銀槽里，使管子的上部形成托里拆利真空（这种情况跟我們做大气压强的实验相同）。让左边第一根管子的上部保持真空，作为气压計。然后用注射器吸水，将注射器的針头扎入管子下端的短橡皮管里，并将少量水注入左边第二根管子。由于水的比重比水銀小，水就很快地升到水

銀柱的上面,并在托里拆利真空中全部蒸发掉. 这样,原来是真空的管子里就有了水汽压,于是水銀柱的高度开始下降. 从第一与第二根管子水銀柱的高度差,可以知道水汽压的数值. 继续注入



水,直到水銀柱的上端留有不再蒸发的水为止. 这时水銀柱上面空间里的水汽已经达到饱和状态. 它的饱和汽压用水銀柱下降的高度表示. 再用注射器将酒精和乙醚分别注入第三根和第四根管子里,这时管里的水銀柱都会下降,可是它们下降的高度却不相同. 实验的结果正如图 7.11 所示,从对比中可以明显地看到乙醚的饱和汽压最大,酒精较小,水最小. 在整个实验的过程中,四根管子是处在同一温度下的(实验过程很快,室温变化不大),所以我们说,每一种液体在一定温度下有一定的饱和汽压,而不同种类液体的饱和汽压却不相同.

图 7.11 测定水、酒精和乙醚的饱和汽压的装置

为什么饱和汽压和液体种类有关呢? 这也要从分子内聚力的大小来理解,液体分子内聚力越小,飞出液面的分子数就越多. 因此,为了要使飞回液体的分子数和飞出液面的分子数相等,即达到动态平衡,液面上的汽的密度就必须比较大,可是当液面上汽的密度比较大时,它的压强也就较大了. 乙醚的内聚力最小,所以它的饱和汽压就最大. 表 7.3 是几种液体在 20°C 时的饱和汽压.

表 7.3

乙醚	437 毫米高水銀柱
酒精	44.5 毫米高水銀柱
水	17.5 毫米高水銀柱
二硫化碳	47 毫米高水銀柱
水銀	0.0018 毫米高水銀柱

2. 在一定的温度下，同一种液体的饱和汽压跟它体积的关系

系 我們再来做图 7·10 所示的实验。我們記得图 7·10 (c) 里是飽

和的乙醚汽，这一次我們还可以多加一些乙醚，让它留在水銀面上。保持温度不变，慢慢地提高或降低右管的位置，使左管中水銀面也随着升高或降低，因而乙醚汽的体积也縮小或变大。仔細观察实验过程，并做好记录（正如图 7·12 所示）。这时，我們可以清楚地看到下列两个现象。第一，不管是乙醚飽和汽的体积变大还是縮小，两管水銀面的高度差总是保持不变，也就是說乙醚的飽和汽压保持一个定值。第二，

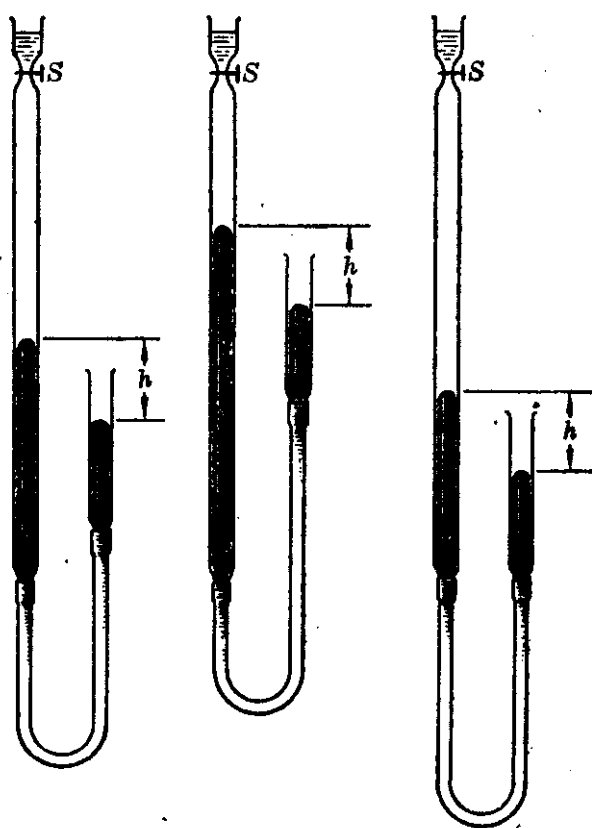


图 7·12 在一定温度下，同一种液体的飽和汽压和体积无关

水銀面上一直保留有乙醚液体，只是数量有所增减，乙醚汽所占的体积大时乙醚液体余量少；而体积小时乙醚液体余量多。

这些现象說明了在一定的温度下，同一种液体的飽和汽压和飽和汽所占的体积没有关系。因为在一定温度下，如果飽和汽的体积增大，則汽的密度就要变小。因此，单位時間內飞回液面的分子数就要少于飞出液面的分子数。这样，汽就处于未飽和状态，于是，液体又要繼續蒸发，直到汽处于飽和状态，即达到动态平衡为止。也就是說，汽的体积增大时，由于繼續蒸发，汽的质量增加了，而汽的密度却保持不变。反过来，在一定温度下，减小飽和汽的体积时，汽的密度变大，单位時間內飞回液面的分子数多于飞出液面的分子数。这样，一部分汽就开始凝結，直到恢复了原有的飽和值

时才停止。所以总的来说,在一定的温度下,增大或减小饱和汽的体积时,它的质量也随着增加或减少,而它的密度却保持不变,所以它的饱和汽压也就保持不变。回忆一下在讲气体定律时,我们曾经指出气体的质量是一定的,而在研究饱和汽时,它的质量却在不断地改变,这样我们就很容易理解气体定律并不适用于饱和汽。饱和汽受压缩时,凝结成液体,同时饱和汽压并不发生变化;但一定质量气体被压缩时,压强却可能发生变化。

3. 同一液体的饱和汽压强跟温度的关系

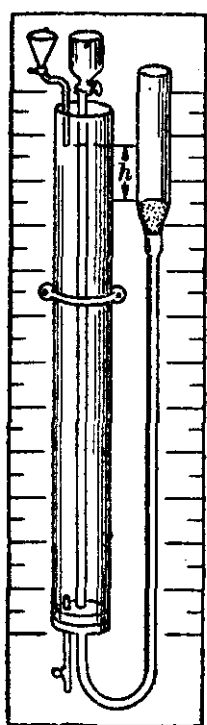


图 7·13 研究饱和汽压和温度关系的装置

的实验改变一下。在图 7·10(c) 的左管外边套上一个粗玻璃管,如图 7·13 所示,管内流通着一定温度的水。首先使左管内仍装着乙醚的饱和汽,水银面上留着一薄层液态的乙醚。在粗管内灌入温度高于室温的热水后,将看到乙醚迅速蒸发,水银面随着下降,同时左右两管内水银面的高度差也随着而减小(这时仍然维持左管内有乙醚的液体薄层)。如果水的温度更高,那么,两管水银面的高度差将更小。这说明温度越高,饱和汽压越大。如果灌入冷水,那么,两管水银面的高度差就要变大,这说明温度越低,饱和汽压越小。如果改用其他液体作同样的实验,也得到类似的结果。由此可知,液体的饱和汽压随温度的升高而变大。

表 7·4 是乙醚、酒精和水在不同温度下的饱和汽压数值。

图 7·14 是水的饱和汽压跟温度的关系图线。从表里的数值可以看到,当温度从 0°C 升到 10°C 时,水汽饱和压强增加到 0°C 时的 2 倍;从 0°C 升到 20°C 时,增加到 0°C 时的 3.8 倍。这和气体的查理定律——气体温度每升高 1°C , 体积只增加 0°C 时的 $\frac{1}{273}$ ——相差很远。为什么饱和汽压会随着温度升高而变大呢? 而且为什么会增加得这么快呢? 原来饱和汽体的压强也是跟它单位体积内的

表 7.4 飽和汽压表

(单位: 厘米水銀柱高)

温 度	乙 醚	乙 醇	水
0	18.6	1.3	0.458
10	29	2.4	0.921
20	44	4.5	1.754
30	64	7.9	3.1
35	76	—	—
40	92	13.4	5.5
50	127	22	9.2
60	174	35	14.7
70		56	23.2
78		76	—
80		83	35.3
90		120	52.4
100		167	76
120			2 大气压
150			4.7 大气压
200			15.2 大气压

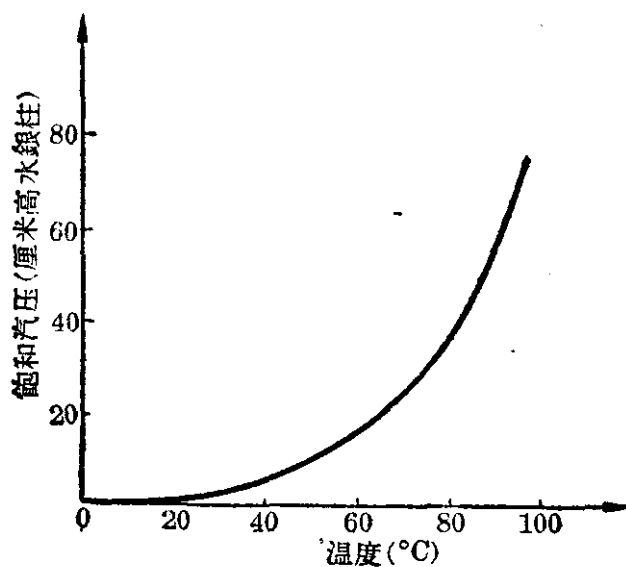


图 7.14 水的飽和汽压跟温度关系的图线

汽分子个数以及汽分子速度有关。在液体温度升高的时候，液体分子的平均动能变大，每秒钟飞出液面的分子数增多，因而飽和汽的密度变大，单位体积空间内飽和汽的质量也增加了。同时由于

温度的升高, 汽分子运动的平均速度也变大. 这就使饱和汽每秒撞击液面或器壁的次数增多, 每次撞击的作用加强. 正是由于这个双重的原因, 使饱和汽压随着温度的升高而变大.

归纳以上三方面的研究, 可以得到下列结论: 饱和汽压的大小, 与物质的性质有关, 并随着温度的升高而增大, 但是跟饱和汽的体积无关.

§ 7.9 未饱和汽

如果在一定的空间里的汽还能够增多, 也就是说它还没有达到饱和状态, 那么这种汽就叫做未饱和汽. 天气晴朗时, 在屋里晾着的湿毛巾上的水会很快地蒸发掉, 也就是说, 屋里的水汽还能够继续增多, 因此屋内的水汽是未饱和汽.

未饱和汽的性质又是怎样的呢? 它和饱和汽有什么不同呢? 它是否遵循气体定律呢? 怎样才能将未饱和汽变成饱和汽呢?

下面我们就从实验着手来研究这些问题.

首先在一个充有未饱和汽的密封容器里加入足够数量的液体, 液体就会继续蒸发, 使容器里汽的密度增大直到容器内充满饱和汽为止. 这就是说在一定的温度下, 饱和汽的密度大于未饱和汽的密度; 同时, 饱和汽的压强也必定大于未饱和汽的压强.

接着再用图 7.10(b) 的仪器来做未饱和汽的压强和体积关系的实验. 在水银面上没有出现液体时, 管内液面上方的汽是未饱和汽.

保持温度不变, 并降低右管使未饱和汽的体积增大, 那么左右两管水银面的高度差就变大, 这表示在一定的温度下, 未饱和汽的压强随着体积的变大而减小. 当举高右管以使汽的体积缩小, 则两管水银面的高度差也变小, 这表示未饱和汽的压强增加了. 详细记下相对应的压强和体积的数值, 并根据数值作出温度不变时未饱和汽的压强和体积图线(图 7.15). 从图中可以看到 AB 部分

是等温曲线,这说明未饱和汽近似地遵循玻意耳-马略特定律。

继续提高右管到一定程度时,我们会看到,水银面上出现了液体,这表示原来的未饱和汽现在已经变成饱和汽了。由此可见,在温度不变时,如果增加对未饱和汽的压强,同时减小它的体积,那么它的密度就要随着而增加。当压强大到一定的程度时,未饱和汽就要变成饱和汽。

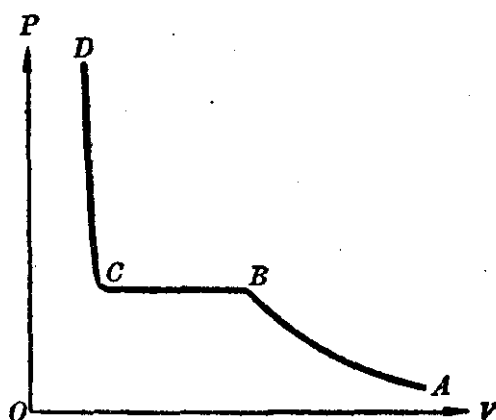


图 7·15

如果再继续升高右管以减小汽的体积,那么我们会看到水银面上的乙醚量越来越多,而两水银面的高度差却没有变化,如图中BC部分。这就是前面所讲的饱和汽压跟体积没有关系,它不遵守玻意耳-马略特定律。到C点时全部汽都被液化了,图中CD部分表示尽管对液体施加很大的压强,它的体积却发生很小的变化,这是液体的性质。

这个实验不仅使我们清楚地了解到未饱和汽和饱和汽在压强和体积关系上的区别,同时也知道在一定的温度下,增加压强和减小体积,可以使未饱和汽变为饱和汽。

最后再用图7·13的仪器来做未饱和汽压和温度关系的实验。保持未饱和汽的体积不变,并且改变粗管里热水的温度,于是可以看到:它的压强是近似均匀地随着温度的升高而增加,遵循着查理定律。

如果在管里灌有冷水,使未饱和汽的温度降低,那么当温度降到一定的程度时,就会看到水银面上有液体出现,这时原来的未饱和汽已经变成饱和汽了。

这就告诉我们,温度越低,饱和汽的密度也越小。某一密度的汽,在高温时是未饱和汽,在较低温度下却成为饱和汽了。所以当我们保持一定量的未饱和汽的体积不变(即密度不变),而使它的

温度降到某一数值时，处于原来温度下的未饱和汽就可能变成了这一温度下的饱和汽了。

从这时开始，如果继续降低左管的温度就会看到汽的压强很快地下降，这和前面所讲的饱和汽的性质相同。它不遵循查理定律。

现在我们又知道了饱和汽和未饱和汽在温度变化时的区别，在保持一定的体积和密度时，温度降低可以使未饱和汽变成饱和汽。

从上面的研究中，我们可以得到这样两个结论：

1. 有关未饱和汽的性质 未饱和汽跟实际气体一样，它的压强、体积跟温度的相互关系近似地遵循理想气体的定律，并且离饱和状态愈远，它与气体定律就符合得越好。而饱和汽的体积、压强、温度变化是完全不遵循理想气体定律的，这也就是未饱和汽和饱和汽在性质上不同的地方。

2. 把未饱和汽变成饱和汽的方法 可以用增加汽的压强（减小它的体积），或降低汽的温度使未饱和汽变成饱和汽。反过来，也可以用减小汽的压强（增加它的体积），或增高汽的温度，把饱和汽变成未饱和汽。

习 题 7·9

1. 饱和汽，饱和汽密度和饱和汽压的意义各是什么？
2. 试用分子运动论来说明饱和汽的分子运动情况。
3. 在同一温度下，饱和汽的压强为什么比未饱和汽的压强大？
4. 在一定的温度下，当饱和汽的体积改变时，它的压强为什么保持不变？
5. 怎样用分子运动论来解释饱和汽随着温度的升高而增大的现象？
6. 一个有活塞的密闭容器内盛有饱和汽与少量的水。
 - (1) 如果温度保持不变，慢慢地推进活塞，容器内将发生什么变化？压强会发生变化吗？

(2) 如果温度保持不变,慢慢地拉出活塞,容器内又将发生什么变化? 压强怎样?

(3) 如果不移动活塞而将容器放在沸水中,容器内将发生什么变化? 压强怎样?

(4) 如果不移动活塞而将容器放在致冷剂里,容器内将发生什么变化? 压强怎样?

7. 未饱和汽具有什么特征? 怎样才能使未饱和汽变成饱和汽?

8. 在降低未饱和汽的温度时,如果改变它的体积而保持它的压强不变,能不能使它变成饱和汽? 为什么?

§ 7.10 沸 騰

前面已经讲过,蒸发是液体汽化的一种方式. 现在我们来讲,液体汽化的另一种方式——沸腾.

让我们通过实验来仔细观察沸腾现象.

把水装在烧瓶里加热,就可以看到在瓶底和瓶壁上产生许多小气泡. 这些小气泡是瓶内壁所吸附的空气分离出来的. 由于小气泡周围都是水,水就要向气泡里不断地蒸发. 小气泡的体积很小,里面的汽很快就达到了饱和状态,所以气泡里除了空气以外还有饱和的水汽. 如图 7.16 所示,当水的温度继续升高,小气泡里的饱和汽压也就逐渐增大,于是它的体积也随着而增大. 这时由于水对气泡的浮力作用,小气泡就会脱离瓶底和瓶壁而上升(图 7.16(a)). 同时,遗留在底面上的少量空气,重新又生成一个

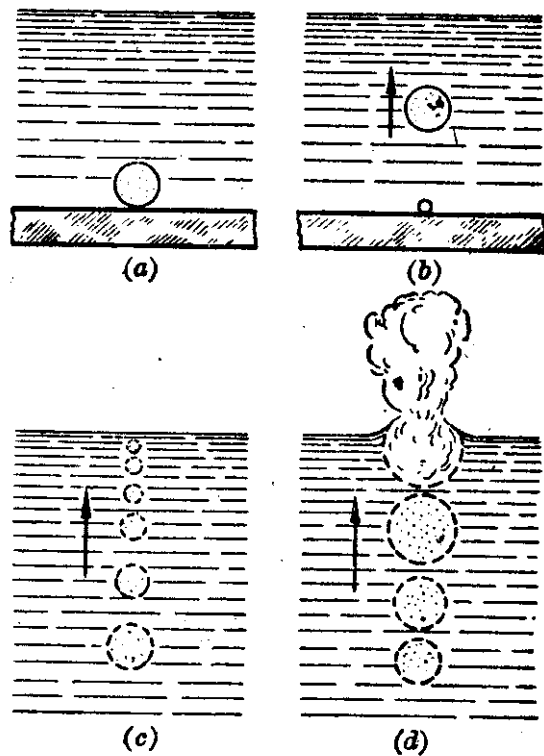


图 7.16 沸腾过程示意图

新的小气泡(图 7·16(b)), 这个小气泡也会逐渐变大而上升, 而且它的变化过程比前一个小气泡还要快。因为水的温度越来越高, 所以水向气泡里蒸发的速度也就越来越快了。

当这些气泡脱离器壁或器底上升以后, 它们的体积又会重新减小(图 7·16(c)), 因为这些气泡里所含有的水汽, 在上升到温度较低的上层水层时, 又要凝结成水, 于是气泡的体积就缩小。烧水时常常听到“呼呼”的响声, 就是由于气泡体积交替着膨胀和缩小所发出的。

加热时间越长, 水的温度越高, 气泡里的饱和汽压也越大。等到水的温度升高到一定的程度时, 气泡内的饱和汽压会升高到与外部压强相等, 这时整个水层已处在同一温度下, 于是气泡在上升过程中就不会再发生水汽凝结和体积缩小的现象。同时由于温度升高, 周围的水迅速地向泡里蒸发, 气泡的体积在上升过程中就不断地增大(图 7·16(d))。最后升到水面时裂开, 放出大量蒸汽, 这时瓶里全部的水就上下翻腾, 滚动不息。这种现象就是沸腾。

根据观察结果可以知道, 沸腾是一种液体表面和内部同时进行的汽化现象。液体在沸腾的时候, 它的饱和汽压跟外部压强相等。

在饱和汽的性质中, 我们已经讲过液体的饱和汽压随着温度的改变而改变。因此, 任何一种液体只有在一定的温度下才能沸腾, 也就是说只有在它的饱和汽压与外部压强相等时, 才会沸腾。我们通常把液体沸腾时的温度叫做这种液体的沸点。各种液体有一定的沸点。

对液体沸点进行的研究具有很大的实际意义。下面我们就来讨论一些有关液体沸点的問題。

1. 沸点与压强的关系 我们已经知道液体的沸点跟外部压强有关。因此, 我们很容易想到: 当液体所受的压强增大时, 它的沸点升高; 压强减小时, 沸点降低。

我們也可以通过实验来证明这一事实。

如图 7.17 所示，把一杯温度在 80°C 左右的水放在抽气机的玻璃罩里，当罩里的空气被抽到一定程度时，杯里的水开始沸腾了。这说明，当罩里的气压降低时，水能够在比 100°C 低得多的温度下沸腾。

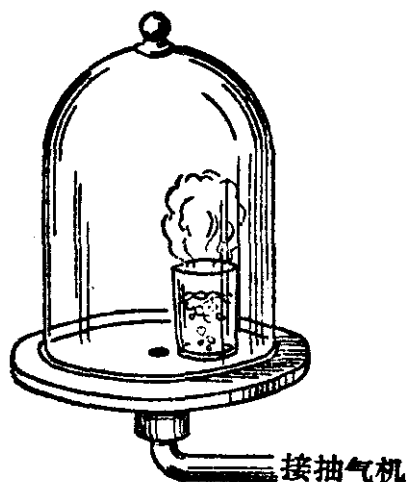


图 7.17 压强减小, 沸点降低



图 7.18 复沸腾现象

我們也可以这样来做实验。在图 7.18 的装置里，当水沸腾后，取去酒精灯，沸腾现象就停止了。然后取下烧瓶，用橡皮塞塞紧瓶口，倒置在架上，用冷水浇瓶底，就会看到烧瓶里的水又沸腾起来。这是因为瓶里的水汽凝结后，压强减少，水的沸点也就降低了。这个现象也称为复沸腾现象。从上面的两个实验中，可以证实，当外部压强减小时，液体的沸点就会降低。相反，当外面的压强增大时，液体的沸点就会上升，例如蒸汽锅炉里的蒸汽压强，可以有几十个大气压，锅炉里的水的沸点可以在 200°C 以上。实验室中常用一种压力锅来提高沸点，它的外

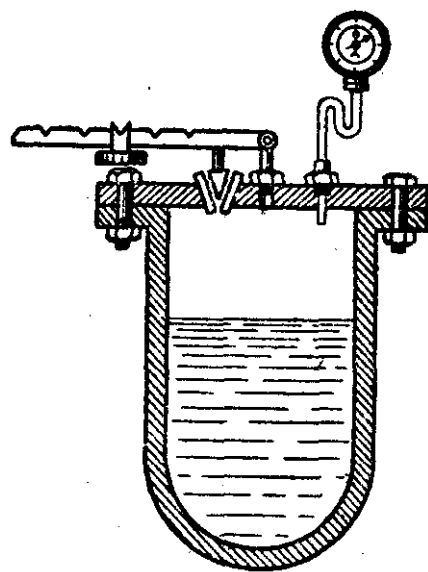


图 7.19 压力锅

形如图 7·19 所示。鍋用厚銅板制成，它的盖用螺絲釘旋紧，盖上連有一个安全閥。在鍋內盛水后，旋紧鍋盖，并在鍋下加热。因为水汽不能泄出，所以沸騰温度就要提高。医院中也常常使用高压消毒鍋来消毒杀菌。

我們又知道在山上蒸飯，水容易沸騰，而飯不容易熟。这是由于大气压随着地勢的升高而逐漸减小，所以水的沸点也随着高度的升高而逐漸下降。譬如在拔海 1900 米的地方，大气压强約为 600 毫米高水銀柱，水的沸点是 93.5°C 。所以在高山頂上燒飯，水虽然容易沸騰，而飯却不容易煮熟。为了煮熟食物，山地居民經常在紧密的鍋盖上加添大石头，使鍋內的汽压增加，从而提高水的沸点。

从具体測量中知道，水的沸騰点每降低 1°C ，相应地压强降低了 27 毫米高水銀柱，也就是相当于从海平面豎直上升了 297 米左右。

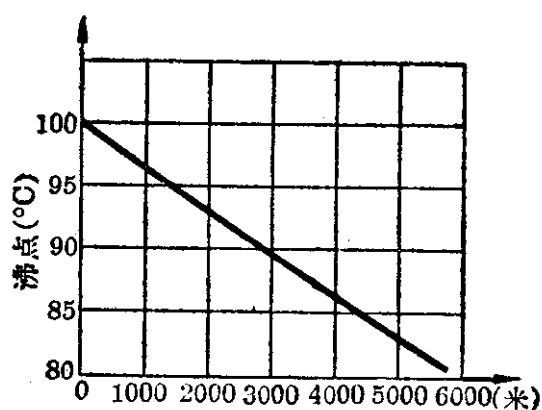


图 7·20 水的沸点距离海平面的高度的关系

图 7·20 的图綫表示水的沸点跟距离海平面高度的关系。这样，我們就得到了測量大气压强和高度的新方法。只要先測出液体的沸点，就能够計算出大气压强和高度。沸点測高器就是应用这个原理制成的。

物质的沸点随着外部压强的变化而变化的規律在生产技术上也起着很大的作用。在化学工业中，如果在高温下蒸餾某些物质，就会引起这些物质分解。这时要采用减压蒸餾或真空蒸餾的方法，也就是减小液面上的压强，使沸点降低，从而使液体很快地汽化的方法。真空蒸餾是一种使液面的气压小到接近于真空的方法。在食品工业中，例如奶粉厂，要想把牛奶中的水分通过蒸发过程来干燥，但又要不破坏奶粉中的营养成分，就必须采用真空蒸餾的方法。这样在較低的温度下，就可以把水分蒸发干了。在冶金工业

中，也常常采用所謂真空冶炼方法。采用这个方法不仅可以使冶炼温度降低好几百度，还可以大大地改善金属的性能，使可能包含在金属中的气体跑出来，从而得到沒有汽孔的金属。

2. 各种物质的沸点不同 在相同的大气压下，各种液体的沸点差别很大，这可以从表 7.5 中看出。

表 7.5 物质的沸点
(在标准大气压下)

物 质	沸点(°C)	物 质	沸点(°C)	物 质	沸点(°C)
液 态 氢	-268.9	酒 精	78	氯化钾	1416
液 态 氩	-252	水	100	液态铈	1635
液 态 氮	-245.9	醋 酸	118.3	液态铅	1755
液 态 氧	-196	松节油	160	液态铝	1800
液 态 空气	-193	萘	218	液态铜	2360
液 态 氧	-183	磷	280.5	液态铁	2450
液 态 氮	-34	甘 油	290	液态金	2500
液 态 氢	-33	水 银	357	液态钨	5900

为什么各种物质的沸点相差这么大呢？在前面的討論中，我們已經知道飽和汽的压强和液体的种类有关。在一定的温度下，各种液体的飽和气压也是一定的。例如乙醚在 20°C 时飽和气压为 44 厘米高水銀柱，比大气压的一半还要大，因此只要将温度略微升高，就能使乙醚的飽和气压与大气压强相等，所以乙醚加热到 35°C 时就沸騰了。但是有些物质在室温时，它的飽和气压很小。例如水銀在 20°C 时，飽和气压为 0.0018，要到 357°C 时，它的飽和气压才能跟大气压相同，也就是說要在 357°C 时它才沸騰。正是由于这个原因，所以各种物质的沸点不同。

各种物质具有不同的沸点这一事实，在化学工业上也有很大的用处。例如，石油中含有汽油、火油和其他較重的矿物油，怎样才能把它們彼此分开呢？我們就对石油进行加热，这时首先汽化出来的是沸点低的汽油，然后才是火油、柴油、重油等。这样就可以把汽

油和其他較重的矿物油分离开来,这种方法叫做石油分餾法。酒精的提純,也是根据酒精和水的沸点不同这一原理来进行的。

3. 液体中含有的杂质对液体沸点的影响 杂质对液体沸点的影响和对熔点的影响情况很相似。液体中含有溶质后它的沸点要比純淨的液体高。这是由于存在溶质后,液体分子之間的引力增加了,液体就不容易汽化,飽和汽压也比較小。要使飽和汽压达到大气压强,就必须提高沸点。从实验知道液体中所含的有机物越多,沸点也越高。如果在液体中加入一些酸碱盐类,它的沸点就要升得更高一些。煮食物时,加一些盐,沸点提高,食物就容易煮熟、煮烂。

但是也有这样的情况,在我們观察沸騰的时候,可以看到液体中的空气泡是沸騰开始时的中心。周圍的水要向气泡內蒸发,使它的体积逐漸增大,引起沸騰。如果液体非常純洁,里面沒有任何杂质和空气泡,或者經過長時間的沸騰后,它里面的空气已經放尽,那么,即使加热到 100°C 以上,它可能还不开始沸騰,或者停止沸騰。因为这时已經沒有空气泡了,而且水也不能再向小气泡里蒸发。这种液体叫做过热液体。过热液体是否再也不沸騰呢?实验指出:过热液体虽然缺少小气泡,但是有的分子具有足够的能量,能够彼此相推,在分子間形成极小的气泡,这种小气泡的体积只比液体分子間距离稍大,因此它內部的汽压很小,但是,当对过热液体繼續加热,使温度高于沸点时,小气泡中的飽和汽压就迅速增大,气泡也迅速膨脹,过热液体就要驟然沸騰。同样,在过热液体中投入一些附有空气的固体微粒或攪动液体,液体也会立刻沸騰起来。过热液体沸騰时,其势非常猛烈,温度仍回到 100°C ;这种沸騰通常叫做暴发沸騰。暴发沸騰是非常危險的,有时甚至会引起蒸汽鍋炉的爆炸,因此要經常注意防止暴发沸騰。为了防止暴发沸騰,在一些有机物进行蒸餾时,經常在鍋炉里預先投入一些附有空气的固体碎粒,如玻璃碎片或其他碎屑以避免产生过热現象。

习 题 7·10

1. 沸騰与蒸发有什么区别？
2. 在很高的山上为什么不能用普通的水壶煮熟馬鈴薯？在气压是60.5厘米高水銀柱的山頂上，水的沸点是多少？
3. 在糖果厂里，必須在 100°C 以下的温度把糖浆里的水分蒸发掉（不然糖就要燒焦），这需要用什么方法才行？
4. 什么叫做減压蒸餾？它在工业技术上有什么实际应用？
5. 沸点为什么与所受的压强有关？
6. 什么叫做过热液体？什么叫做暴发沸騰？怎样来防止液体的过热現象？
7. 石油蒸餾是应用什么原理来进行的？

§ 7·11 汽 化 热

前面已經讲过，在任何温度下液体都能进行蒸发，但是蒸发的結果是使液体本身冷却。因此为了維持液体的温度不变，必須給液体一定的热量。在液体沸騰过程中我們又看到，虽然对它繼續加热，但是它的温度并不升高。这些現象都說明液体汽化时是需要吸收热量的。

为什么液体汽化时需要吸收热量呢？这一情况跟晶体在熔点熔解成液体的情况相类似，因为当液体汽化时，它的分子热运动的状态也要发生质的变化，也就是說要从液态分子的热运动状况轉变成气态分子的热运动状况。液体分子要掙脫其他分子对它的引力而飞离液体表面，同时分子之間的距离要增大，这样就必須克服分子之間引力做功，增加分子之間的势能。而且，液体汽化时，它的体积要扩大好多倍，所以它还要反抗外部的压强做功。做功就必须消耗能量。因此，液体蒸发时就要消耗本身的分子动能，降低温度，或者要依靠从外界吸收热量来补充。而在沸騰时，液体从热源吸收热量，但是，由于这时所增加的内能仅仅是分子的势能部

分,分子的动能并没有增加,因此沸腾时它的温度保持不变。

由于各种液体分子的内聚力大小不同,所以克服分子之间的引力而飞离液面所需要做的功也不相同。因此不同的液体在相同的条件下汽化时所需要的热量也是不同的。为了说明物质的这一性质,我们引入一种新的物理量——汽化热。

物理学中规定,在一定的温度下单位质量的某种液态物质完全变成同温度的汽态物质所需要的热量,叫做这种物质的汽化热。

汽化热的单位是卡/克或千卡/公斤。

不难理解,汽化热只是用来使液体转化成汽体,而并不能使它的温度升高。一部分汽化热用来增加汽体的内能,而另一部分汽化热就消耗在对外做功上。因此,如果用 L 来表示汽化热, U 表示内能的增加, W 表示反抗大气压所做的功,则 $L=U+W$ 。

如果有 m 克质量的液体完全汽化,那么它所需要的热量就是 $Q=Lm$ 。表 7.6 列出物质汽化热的值。

表 7.6 物质的汽化热

(在标准大气压下沸腾时,单位:卡/克或千卡/公斤)

物 质	汽化热	物 质	汽化热	物 质	汽化热
氢	6	液态二氧化硫	95	水	539
碘	41	醋	97	银	556
氮	47.6	硫酸	122	钨	956
氧	51	铅	203	铜	1146
氯	69	酒精	204	铝	2409
乙 醚	84	液态氨	327	金刚石	11907

同一种物质的汽化热又随着温度的变化而有所不同。它是温度的函数。例如水的汽化热在 0°C 时是 597 卡/克,而在 100°C 时是 539.1 卡/克。温度越高,汽化热越小。这是因为:温度升高时,液体的体积膨胀,分子之间的距离增大,因此分子之间的引力也就减小。同时,又由于汽体的饱和汽密度也随着温度的升高而变大,因此液面上的汽体分子对将要飞离液面分子的引力也增加了。由

于这两种原因，液体分子脱离液面汽化时所需要的功也就相应地减小了。所以汽化热随着温度的升高而减小。从表 7.7 中可以清楚地看到这一点。

表 7.7 水在不同温度下的汽化热

温度(°C)	汽化热 (卡/克或 千卡/公斤)	温度(°C)	汽化热 (卡/克或 千卡/公斤)	温度(°C)	汽化热 (卡/克或 千卡/公斤)
0	595	100	539	220	450
10	590	120	526	250	408
20	584	150	506	300	330
50	568	180	482	374	0
80	551	200	468		

从能量守恒定律知道，当汽凝结成液体时要放出热量，它所放出的热量，跟等量的液体在同一温度汽化时所吸收的热量是相同的。

根据这一点，我们可以用下面的方法来测定汽化热。图 7.21 是测定水的汽化热的装置。1 是沸水壶，2 是液汽分离管，3 是量热器，其中盛有一定质量的温水。水在沸水壶里煮沸后，水蒸汽从皮带管经过试管再到量热器里。液汽分离管的

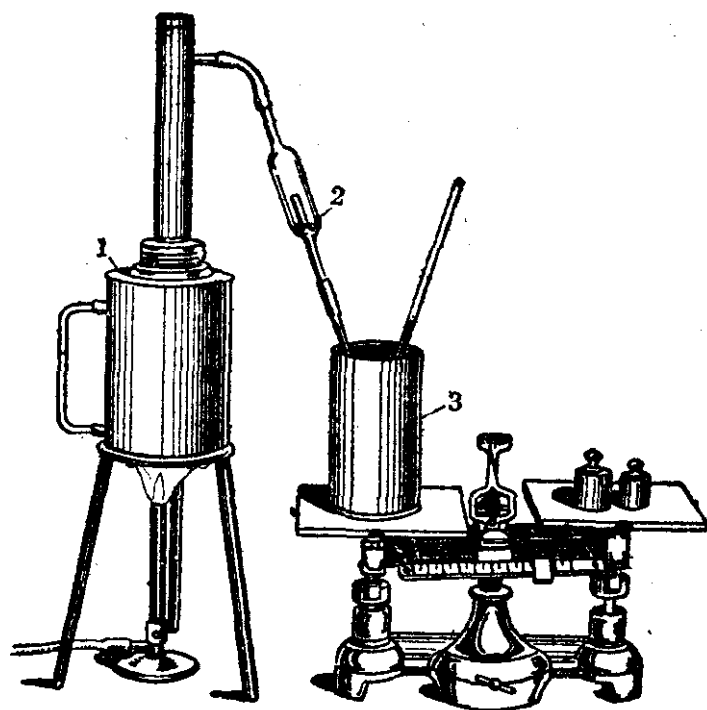


图 7.21 测定水的汽化热的装置

作用是将蒸汽里含有的小水滴留下来，以免它被蒸汽带到量热器中，蒸汽到了量热器内就要凝结成水，同时放出热量，使量热器温度升高。到一定数量的蒸汽凝结后，量热器中水的温度也升高了若干度，这时停止通入蒸汽。量出量热器和水的末温度。用天平

秤出通入蒸汽前后量热器里水的质量。从而可以计算出它的质量差，即所通入的蒸汽质量。在实验过程中，蒸汽凝结成水，并且从 100°C 降到末温度所放出的总热量，等于量热器和水从原来的温度升到末温度时所吸收的总热量。列出热平衡方程式，就可以求出水的汽化热。

例 4. 在质量为 200 克的铜制量热器小筒里，装有 500 克 8°C 的水，然后通入 17 克 100°C 的水蒸汽，结果水的温度升到 28°C 。求水的汽化热。

【解】 设水的汽化热是 L (卡/克)， 100°C 的蒸汽凝结成 100°C 的水，再降到 28°C 所放出的总热量就是

$$17L \text{ 卡} + 17 \times 1 \times (100 - 28) \text{ 卡} = 17L \text{ 卡} + 1224 \text{ 卡}.$$

从比热表中查出铜的比热是 0.093 卡/克·度，所以量热器小筒里原有的水和小筒本身温度升高时所吸收的总热量是

$$500 \times 1 \times (28 - 8) \text{ 卡} + 200 \times 0.093 \times (28 - 8) = 10,372 \text{ 卡}.$$

根据热平衡方程式，以上两项热量应该相等，所以

$$17L \text{ 卡} + 1224 \text{ 卡} = 10,372 \text{ 卡},$$

$$L = 538 \text{ 卡/克}.$$

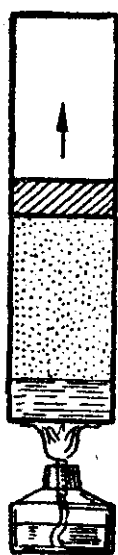


图 7·22

例 5. 将水盛在圆筒形的容器里，筒上有一个轻的活塞，如图 7·22 所示，对液体加热，在标准大气压下，当温度升到 100°C 时水开始沸腾，水面上的汽能够反抗大气压做功，推动活塞上升。设活塞的面积是 100 厘米²，大气压强是 1.033 公斤/厘米²。求(1)活塞上升 10 厘米时，汽反抗大气压强所做的功是多少？需要多少热量？(2) 当有一克汽形成时反抗大气压强所做功是多少？需要多少热量？

【解】 (1) 作用在活塞上的力是 1.033 公斤/厘米² $\times 100$ 厘米² = 103.3 公斤。

活塞上升 10 厘米所做的功是 103.3 公斤 $\times 0.1$ 米 = 10.33 公

斤·米。

$$\text{活塞反抗大气压做功所需要的热量} = \frac{10.33}{0.427} = 24.2 \text{ 卡。}$$

(2) 在第一步计算的情形下,生成汽的体积有 $100 \times 10 \text{ 厘米}^3 = 1000 \text{ 厘米}^3$ 。

饱和汽在 100°C 时的密度是 0.000597 克/厘米^3 , 因此, 汽的质量等于 $0.000597 \text{ 克/厘米}^3 \times 1000 \text{ 厘米}^3 = 0.597 \text{ 克}$ 。当有 1 克汽形成时, 反抗大气压强所做的功相当的热量是 $\frac{24.2}{0.597} \text{ 卡} = 40.5 \text{ 卡}$ 。

1 克的水在 100°C 时变成水汽时所需要的汽化热 L 是 539 卡的热量。在我们的计算中反抗外压强所做的功 W 是 40.5 卡, 因此剩下 $U = 539 \text{ 卡} - 40.5 \text{ 卡} = 498.5 \text{ 卡}$ 是转变为内能所需的热量, 也就是 1 克饱和水汽比 1 克水所增加的内能。

这个例题的计算使我们知道, 当水汽化时, 大部分的汽化热是消耗在改变内能方面, 只有小部分热量是消耗在对外压强做功上面。

例 6. 蒸汽机的锅炉里盛有 20°C 的水, 为了要产生质量是 1000 公斤, 温度是 280°C 和压强是 12 大气压的过热蒸汽, 需要多少热量。(水在 12 大气压下的沸点是 186.9°C , 这时水的汽化热是 478.2 千卡/公斤, 水蒸汽的比热是 0.5 千卡/公斤·度。)

【解】 水从 20°C 升到 186.9°C 所需要的热量为

$$Q_1 = 1000 \times 1 \times (186.9 - 20) \text{ 千卡} = 166,900 \text{ 千卡,}$$

在 186.9°C 时汽化所需要的热量为

$$Q_2 = 1000 \times 478.2 = 478,200 \text{ 千卡。}$$

186.9°C 的汽温度升到 280°C 时所需要的热量为

$$Q_3 = 1000 \times 0.5 \times (280 - 186.9) \text{ 千卡} = 46,550 \text{ 千卡。}$$

(这里应该注意: 水的比热是 1 千卡/公斤·度, 而汽的比热是 0.5 千卡/公斤·度, 因此同一物质在不同状态下, 比热是可能不相同的。)

所以一共需要的热量为

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 166,900 + 478,200 + 46,550 = 691,650 \text{ 千卡.}$$

例 7. 如果用火油炉加热质量是 100 克、温度是 -20°C 的冰,使它变成 150°C 的过热蒸汽(蒸汽的比热是 0.4 卡/克·度),问需要多少火油? 容器的热容量是 20 卡/克,火油炉的效率是 40%,火油的燃烧值是 10,000 卡/克.

【解】 在计算时要考虑到下列五个过程: (1) 固态时温度升高至熔点的吸热过程; (2) 在熔解温度时,由固态变成液态的吸热过程(在这个过程中温度不变); (3) 液态时温度升高至沸点的吸热过程; (4) 在沸腾温度时由液态变成气态的吸热过程(在这个过程中温度保持不变); (5) 变成蒸汽后温度再升高(如过热蒸汽)的吸热过程. 同时还要注意,同一种液体在不同温度时的汽化热是不同的,以及在一般情况下同一种物质在不同状态时的比热也是不同的,例如冰和水的比热并不相同.

现在就分为下面的步骤来解.

(1) 求 -20°C 冰 $\rightarrow 0^\circ\text{C}$ 冰所需要的热量.

$$\begin{aligned} Q_1 &= c_{\text{固}} m (t_0 - t_1) \\ &= 0.5 \times 100 \times 20 = 1000 \text{ 卡.} \end{aligned}$$

(2) 求 0°C 冰 $\rightarrow 0^\circ\text{C}$ 水所需要的热量.

$$Q_2 = \lambda m = 80 \times 100 = 8000 \text{ 卡.}$$

(3) 求 0°C 水 $\rightarrow 100^\circ\text{C}$ 水所需要的热量.

$$\begin{aligned} Q_3 &= c_{\text{液}} m (t_q - t_0) \\ &= 1 \times 100 \times 100 = 10,000 \text{ 卡.} \end{aligned}$$

(4) 求 100°C 水 $\rightarrow 100^\circ\text{C}$ 水汽所需要的热量.

$$Q_4 = Lm = 539 \times 100 = 53,900 \text{ 卡.}$$

(5) 求 100°C 汽 $\rightarrow 150^\circ\text{C}$ 汽所需要的热量.

$$Q_5 = c_{\text{汽}} m (t_2 - t_q) = 0.5 \times 100 \times 50 = 2500 \text{ 卡.}$$

(6) 求容器: $-20^\circ\text{C} \rightarrow 150^\circ\text{C}$ 所需要热量

$$Q_6 = c_1 m_1 (t_2 - t_1) = 20 \times 170 = 3400 \text{ 卡},$$

$$Q_{\text{吸}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

总共需要的热量 $Q_{\text{吸}} = 78,800$ 卡,

設用去火油 m 克放出的热量

$$Q_{\text{放}} = qm = 10,000m,$$

$$Q_{\text{吸}} = Q_{\text{放}} \times 0.4 = 10,000m \times 0.4,$$

$$78,800 = 10,000m \times 0.4,$$

$$m = 19.7 \text{ 克}.$$

习 题 7.11

1. 汽化热的定义是什么? 試用分子运动論来解釋汽化热.
2. 温度升高时, 汽化热为什么要减少?
3. 被 100°C 的热水和 100°C 的水蒸汽燙伤时, 那一种受伤比較严重? 为什么?
4. 在炎热的夏天, 为什么在房間里洒一些水就会覺得凉爽一些?
5. 为什么燒湿木柴所产生的热量比燒干木柴所产生的热量少?
6. 把 12 克处于沸点的乙醚汽通入 250 克 16°C 的水中, 結果水的温度升到 20.7°C , 求乙醚的汽化热.
7. 把 40 克 100°C 的水蒸汽通入 800 克 20°C 的水中, 混合后的温度是多少度?
8. 使 20 克 20°C 的水变成 100°C 的水蒸汽需要的热量是多少卡?
9. 有一双壁容器, 內盛 20°C 的水 8 千克. 两壁中儲液态氨, 欲使器內的水全部結冰; 問需要蒸发液态氨多少克? (氨的汽化热是 500 卡/克.)
10. 使 10 克 -5°C 的冰变成 110°C 的水蒸汽, 需要吸收多少卡的热量? (冰和水蒸汽的比热都是 0.5 卡/克 $^\circ\text{C}$.)

§ 7.12 临界温度

还在十九世紀初, 科学家們就进行了气体液化的研究, 他們从实验着手, 用降低温度加大压强的方法来使气态物质变成液体. 图 7.23 所示的是英国科学家法拉第当初用来液化氯的装置. 在曲

管 A 端放进干燥的氯的水化物, 将管封闭, 对它进行加热, 就有气

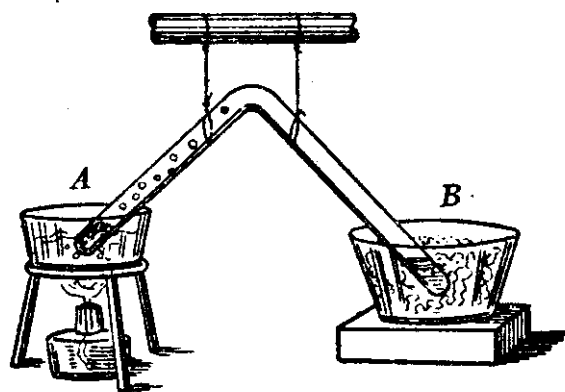


图 7·23 法拉第液化氯的实验

态的氯放出; 将曲管 B 端放在冷却剂中, 就可以得到液态的氯。在法拉第液化氯的实验的同时, 许多科学家都对液化气体进行了研究, 他们几乎液化了当时所了解的各种气体。但是氧、氮、氢、一氧化碳、一氧化氮和甲烷

等六种气体, 即使在 3000 大气压和 -110°C 的情况下, 也还不能液化, 于是人们以为这些气体是永远不能液化的, 而把它们称作永久气体。

从实验中观察到: 当封闭的容器内贮有一定量的液体时, 一部分液体就要蒸发, 并在液体上面的空间出现饱和汽。汽的压强跟密度和温度有关。在同一温度时, 汽的密度通常要比液体的密度小得多。当温度上升时, 液体的密度减小, 而饱和汽压和汽密度都增大。表 7·8 分别列出了不同温度时, 水与饱和水汽的密度。图 7·24 表示同一数据的图线。

表 7·8 在不同温度时水与饱和水汽的密度

温度($^{\circ}\text{C}$)	饱和水汽的压强 (毫米高水银柱)	水的密度 (克/厘米 ³)	水汽的密度 (克/厘米 ³)	汽化热 (卡/克)
15	13	1	0.000073	587
50	92	0.998	0.000083	568
100	760	0.96	0.000597	539
150	3570	0.92	0.00254	506
200	11660	0.86	0.00784	464
300	64450	0.70	0.0469	330
370	157700	0.44	0.208	99
374	165500	0.32	0.32	0

从表上可以看到, 在每一温度下可以有两种状态——气态和

液态同时存在。例如，在 150°C 时水的密度是 0.92 克/厘米³，汽的密度是 0.00254 克/厘米³。从表中还可以看到，温度越高，液体的密度越小，而它的饱和汽的密度越大，因而它们之间的差别也越小。当温度达到 374°C 时，水和水汽的密度相等。也就是说，这时水和水汽已经沒有区别了，水不再以两种状态存在，而只能以气体状态存在。

液体的密度和它的饱和汽的密度相等时的状态，叫做物质的

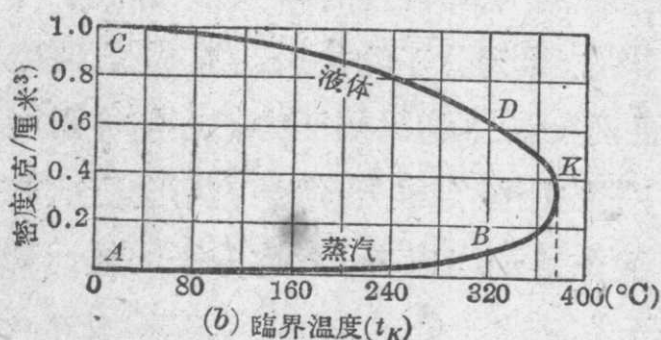
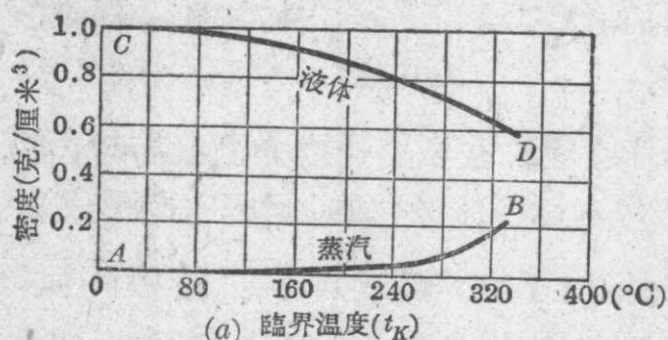


图 7.24 表明温度对水和水汽的密度的关系图

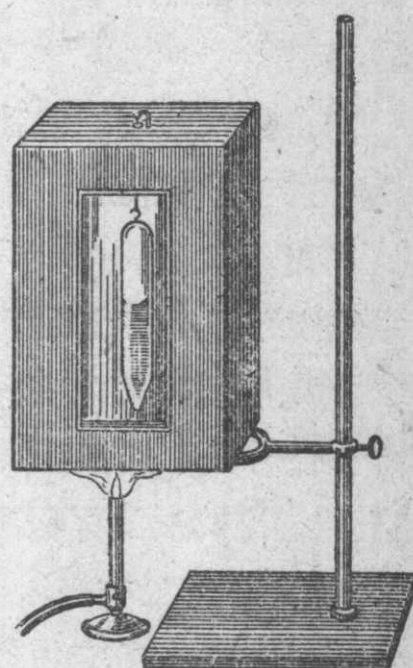


图 7.25 临界状态实验装置

临界状态，这时的温度叫临界温度，这时的压强叫临界压强。从图 7.24(a) 可以看到蒸汽和液体的密度逐渐接近。在图 7.24(b) 中，字母 t_K 表示临界温度。

在实验室里，可以用图 7.25 的装置来观察乙醚的临界状态。在一个坚固的小玻璃管里装上约佔容积 $2/5$ 的乙醚，将管里空

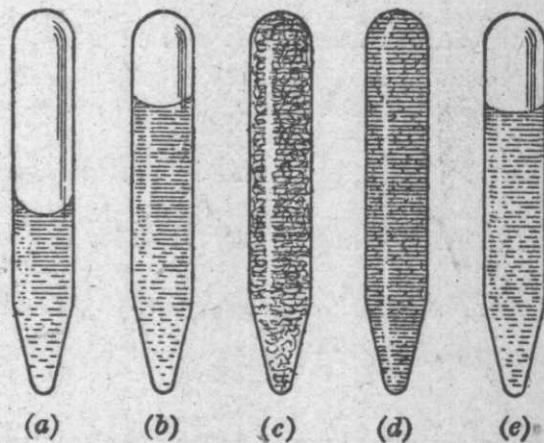


图 7.26 乙醚临界状态

气驅逐干淨后,封上玻璃管,并将它悬挂在一个前面开着窗孔的小铁箱里.对铁箱加热,使液体温度升高.在开始时,管里液汽的分界面很清楚,成凹月形,温度逐渐上升,液体体积渐渐增大使液面上升,凹月面渐渐拉平,同时汽的密度也在不断地增大.当温度升高到某一程度时,分界面消失,表面張力等于零,这一温度就是乙醚的临界温度.如果这时停止加热,让它渐渐地冷却下来,乙醚的状态将沿相反的过程进行.当温度降到临界温度以下时,分界面又重新出现.图 7·26 中(a)到(e)表示了乙醚在加热和冷却时液面的变化.

临界温度的存在意味着什么呢?在温度比临界温度高时,物质处于什么状态呢?

門捷列夫在 1860 年首先指出了临界温度的存在,接着科学家恩德留斯又作出了解释:当温度高于临界温度时,物质只能处于气态.这时物质不可能有两种状态,因为分子的热运动很剧烈,速度很大,使分子不能相互接近而成液态.如果用压力把在临界温度以上的汽态物质的体积减小,它的压强将增大,但是它不会变成饱和汽和液化.只有当温度降到临界温度以下,汽体分子的热运动状态才有可能转变为液体分子的热运动状态,因此汽体和液体两种状态才可能并存.

了解临界温度以后,就能够解释上述六种气体不能液化的原因了.原来这是因为各种物质有不同的临界温度.水、氯、氨和二氧化碳等的临界温度较高,所以在室温下,增加压强就可以使它们液化.但是有一些物质如氫、氮、氧与氦等的临界温度则很低.要使它们变成液体,必须先使它们的温度冷却到临界温度以下,然后用加大压强或减小体积的方法使它们液化.这也就是说它们并不是永久气体,只要使温度下降到它们的临界温度以下,它们也是能被液化的.因此可以得到这样的结论:所有的气体都能够被液化,但只是由于临界温度不同而液化的难易程度也不同.表 7·9 表示

各种物质的临界温度和临界压强。

表 7·9 各种物质的临界温度和临界压强

物 质	临界温度 (°C)	临界压强(大气压)
水 銀	1477	?
水	374	218.5
酒 精	243	62.7
醚	197	35.8
氯	146	76
二氧化碳气	31	73
氧	-118	50
氮	-146	33
氢	-240	12.8
氨	-268	2.26

§ 7·13 气体的液化

从 § 7·12 的内容中，我們知道了要使气体液化首先要获得低温，只有当气体的温度下降到临界温度以下时才能用增大压强的方法使它液化。经过科学家的努力，找到了获得低温的方法。在 1908 年终于液化了最难液化的氦。而在 1926 年竟然还获得固态的氦。

究竟怎样才能取得使气体液化的低温呢？我們知道临界温度较高的气体只要稍微压缩就能够使它液化，同时放出热量。而当压强减小时，它又可能汽化，同时吸收热量。所以当液体剧烈汽化时，可以使周围的物体冷却。我們就是利用这种方法来获得低温的。为了要說清楚冷却的原理，我們先从冷藏庫、冷冻装置等致冷机获得低温的方法讲起。

图 7·27 为一冷冻装置的构造图。它由蒸发器 T ，压缩机 P 和冷凝器 C 三个主要部分组成。压缩机把蒸发器螺旋管中的汽体氨用高压压入冷凝器的螺旋管中。由于在压缩过程中，对氨做功，所以汽体氨的温度要升高。在冷凝器螺旋管外面有流通的冷水，

它們吸收了氨的热量后使被压缩的汽体氨的温度降低，凝結成液体。液体氨由活門 V 流入蒸发器的螺旋管中，冷凝器中压强約为 12 公斤/厘米²，而蒸发器中大約只有 3 公斤/厘米²，所以液体的氨进入蒸发器中后便很快地汽化，并且需要吸收热量以使周圍的物体冷却。如图所示，蒸发螺旋管的下面部分就是冷冻箱，它的温度可以低到 -10°C 左右，因此可以用来制造冰和作为冷藏之用。

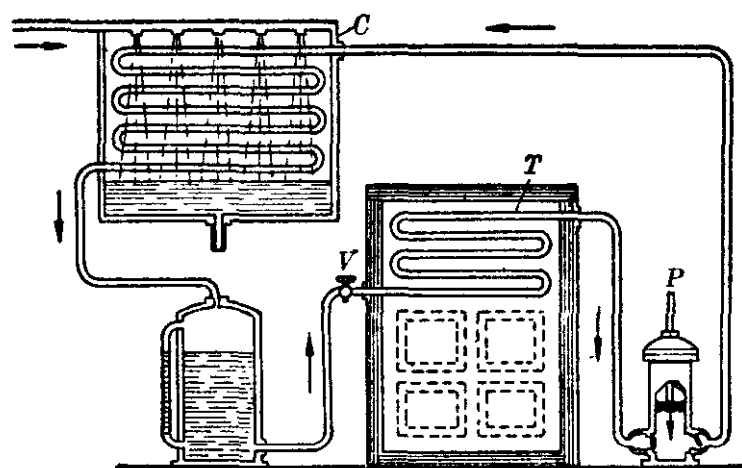


图 7·27 冷冻装置

用类似的方法可以使临界温度較低的气体液化。例如，我們让液体二氧化硫在一个容器中汽化，而在这个容器中又装有一个螺旋管，螺旋管中通过处于高压下的二氧化碳。这样由于二氧化硫汽化时吸热所获得的低温可以用来使二氧化碳液化。再让液化了的二氧化碳在另一个容器中汽化，在那个容器中也有螺旋管，其中通过的是高压的氧。由于管外液体二氧化碳的剧烈汽化，使温度降低到 -130°C 左右，这个温度比氧的临界温度还要低（氧的临界温度为 -118.8°C ），于是，就可以使处于高压下的氧液化。同样，还可以利用液态氧使处在 190 大气压下的氩液化。

除了上述的方法以外，科学家們通过研究还知道，当气体在真空或压强很低的空間里迅速膨脹时，温度会急剧地降低。因为当气体膨脹时，由于分子間的距离要增加，因此分子間的势能也要相应地增加，根据能量守恒定律知道，当气体的內能保持不变的

时候,势能的增加必定是以动能的减少为代价的,所以分子的平均动能要减少,它的温度要相应地降低. 利用这一原理,也可以获得低温,使气体液化.

图7·28所示的是空气液化器的示意图. 它的构造基本上与致冷机相同,不过用膨胀器代替了蒸发器. 先让压缩机 P 把空气压入冷凝器的螺旋管 C 中,因为 C 管外面有冷水流过,就使 C 管内的压缩空气(大约有100大气压)的温度降低. 经过初步降温的压缩空气再流进膨胀管 T 并从管口喷出. 由于空气体积急剧地膨胀,温度可以降低很多. 膨胀后处于低温下的空气由 T 管的外面向上流动时,又可以使还在 T 管中的空气预先冷却. 因为一次膨胀还不能使温度降到空气的临界温度以下,所以膨胀后的空气必须利用压缩机再作连续的循环操作. 结果使在 T 管中流动的空气逐渐变冷,等冷却到某一程度时,由管口喷出的气体温度降到空气的临界温度以下,于是空气就可以凝结成液点而流入瓶中.

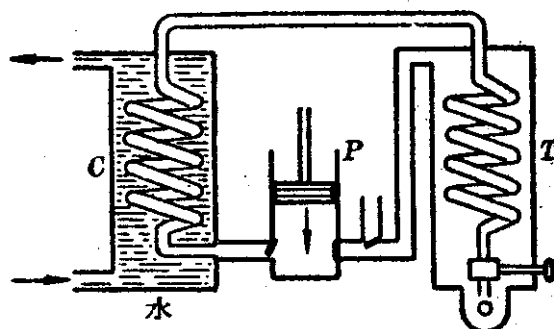


图7·28 空气液化装置的示意图

§ 7·14 液态气体的应用

液态气体在工业技术上和科学研究上有着广泛的应用. 如用液态气体获得低温以及用液态气体获得真空等.

下面我们就来介绍一下液态空气的用途:

(1) 在工业上常常应用液化空气法来分离它的组成部分. 因为空气是由氮、氧、氩、氙等气体组成的,所以液态空气也是这几种液体的混合物. 但是这几种液体的沸点是不同的,在一个大气压下,氧的沸点是 -183°C ,氩是 -185°C ,氮是 -196°C ,氙是 -245°C . 当液态空气汽化时,首先蒸发的是沸点较低的氩、氮,其次是氩、氧. 用这种方法就可以分离出各种气体,而这些气体的用处却很多,如工业上可以用氮来制造氨;在白炽灯中需要充入氩、

氦等惰性气体；当氧和乙炔混合燃烧时，可以得到高温的乙炔焰，用来焊接和



图 7-29 液态氧的应用

裁切金属(图 7-29)；把氧直接输入冶金工业上所用的鼓风机中，可以提高冶金效率；而氧在医疗上、高空飞行中和海底工作中，也有着极其重要的应用。

此外，液态氧还可以应用在爆炸工程方面。用它和木屑、煤烟、萘以及其他容易氧化的物质混合在一起，可以制成威力很大的爆炸物。在开矿或建筑公路时，利用这种炸药是比较方便和安全的。因为这种爆

炸物里的液态氧蒸发得很快，当它蒸发后炸药就不能再发生爆炸，因此在开山洞时，如果由于某种原因炸药没有即时爆炸，我们就可以在相隔一段时间后，接近炮眼去检查一下没有爆炸的原因，这时已没有爆炸的危险了。

(2) 气体液化的方法还可以用来提纯某些气体，通常在工业上，用电解食盐溶液的方法所得到的氯气，纯度只有 95% 左右，这对许多使用氯气的化学工业来说，还是不够理想的。于是我们就可以用加大压强、降低温度的方法，使氯气液化，这时虽然氯气已经液化成液态了，而杂质却仍可能是气态，这样氯和杂质就分开了。用这种方法可以得到纯度达到 99% 以上的液态氯。

同时，由于液态气体的体积比气态时的体积要小得多，这样就能够将液态气体盛在钢筒里，以便运输。

(3) 应用液化气体的方法来获得真空。在现代工业技术上，广泛地应用着各种真空仪器。例如白炽灯、日光灯、霓虹灯、电子管、光电管等等。这些真空仪器都是将玻璃容器或金属容器中的空气全部抽出，然后再充进惰性气体，或其他气体。那么怎样来抽出容器里的空气呢？过去我们曾经用活塞式抽气机、回轉抽气机来抽取空气，但是这些抽气机所能够达到的真空程度离现代科学技术上的要求还很远。因此近来就经常采用液化气体的方法来获得高度的真空。例如：当我们把一个充有空气的容器放在液态氩里面后，因为氩的沸点比空气的沸点低得多，所以容器里的空气就要全部液化。这样就可以获得压强只有百万分之几毫米高水银柱的真空。所以利用液态气体是掌握真空技术主要途径之一。

(4) 应用液态气体汽化获得低温。在 § 7-13 中我們已經讲过, 液体汽化时能使周圍温度降低, 从而使某些难以液化的气体获得低温而液化。如果再让这些已經液化的气体在低压下汽化, 那么周圍的温度就必然降得更低。科学家曾經使液态氮在很低的压强下汽化, 結果使温度降到 0.9°K (-272.1°C)。最近几年, 用改进了的技术設備可以得到 0.71°K , 以至 0.1°K 以下的温度。所以說利用液态气体的汽化可以获得低温。

物质在低温下的性质, 与在一般温度下相比, 发生显著的变化, 由于低温的获得为科学研究工作开辟了新的領域, 从而有可能进行低温下物质特殊性质的研究。例如: 金属的电阻在极低温度下会完全消失, 出現了非常奇异的“超导电性”; 又如温度低于 -271.81°C 的液态氮在流經水平放置的毛細管时, 出現了几乎完全不需要两端压强差的“超流动性”現象。此外, 在极低的温度下, 物质的“机械性能”也会发生显著的改变。例如, 鉛会象鋼那样, 成为具有彈性的物质, 橡皮却变成了很脆的物质。对于物质在低温下的各种性质的研究, 使我們能够进一步認識物质的結構和各种現象的本质。所以低温物理学是科学研究的一个重要的項目。

习 題 7-14

1. 什么叫做临界温度? 当温度为 30°C 时, 只用增加压强的方法能不能使二氧化碳液化? 为什么?
2. 在临界温度时, 物质的汽化热等于什么? 为什么?
3. 在临界温度时, 汽密度和液密度有无区别?
4. 使气体液化的基本原理是什么? 常用哪种方法使气体液化?
5. 在极低的温度下, 物质会出现哪些奇异的特性?
6. 液态气体在科学和技术上有哪些用途?

§ 7-15 空气的湿度

空气里所含有水汽的多少对大气中所发生的現象起着很大的影响, 如云、雨、露、霜的出現都和它有着直接的关系。而空气的干湿程度又和工农业生产有着密切的联系。如果空气太干燥, 植物就要枯萎; 而空气太潮湿呢, 又会延迟植物开花結实和籽粒成熟的时间。在暖房中培植蔬菜、麻菇要非常注意調节室内的潮湿程度, 才

能使它們很好地生长。在采桑养蚕的副业中，也要充分注意到室内的干湿程度，因为桑叶的干湿程度直接影响着蚕的正常发育。此外，在紡織厂中，如果空气太干燥，棉紗容易断头；如果空气太潮湿，棉紗又容易发霉。对于发电厂来說，太潮湿的空气甚至会使发电机里的繞阻发霉。上述事例都說明空气中所含有水汽的多少与人們的生活和劳动生产有着直接的关系。所以我們必須很好地掌握与这方面有关的知識。

在一定的温度下，在一定体积的空气里含有的水汽越少，則空气越干燥；水汽越多，則空气越潮湿。空气的干湿程度叫做湿度。

量度空气湿度的方法有两种：一种是用空气中实际含有水汽的密度来量度，这叫做絕對湿度，通常以1立方米空气内所含有的水汽的克数来表示。气体定律告訴我們，汽的压强是随着汽密度的增加而增加的。所以，空气里的絕對湿度的大小也可以通过水汽压强来表示。实际上，从表7·10中可以看出，水汽密度的数值与以毫米高水銀柱表示的同温度飽和水汽压强的数值很接近。因此为了方便起見，我們也常以水汽压的毫米高水銀柱的数值来計算空气的干湿程度。从而也可以将空气里所含有的水汽的压强大小，叫做空气的絕對湿度。

表 7·10 在不同温度下的汽压和密度表

温 度	压 强 p (单位：毫米高水銀柱)	水 汽 密 度 d (1米 ³ 空气中水蒸汽质量的克数)
0	4.58	4.84
10	9.21	9.4
20	17.54	17.3
30	31.82	30.3

仅仅知道了絕對湿度还是不够的，它还不能全面地表达出空气的干湿程度，因为空气的干湿程度和空气中所含有的水汽量接近飽和的程度有关，而和空气中含有水汽的絕對量却没有直接的关系。例如空气中所含有的水汽的压强同样等于12.79毫米高水

銀柱时,在炎热的夏天中午(約 35°C),人們并不感到潮湿,因为这时离水汽飽和汽压还很远,物体中的水分还能够繼續蒸发. 而在較冷的秋天(約 15°C),人們却会感到很潮湿,因为这时的水汽压已經达到过飽和,水分不但不能蒸发,而且还要凝結成水,所以我們把空气中实际所含有的水汽的密度 ρ_1 与同温度时飽和水汽密度 ρ_2 的百分比 $\rho_1/\rho_2 \times 100\%$ 叫做相对湿度. 当然我們也可以用水汽压强的比来表示:設 p 代表实际水蒸汽的压强, P 代表同温度时飽和蒸气的压强,則相对湿度 B 就是: $B = \frac{p}{P} \times 100\%$.

例如空气中含有水汽的压强是 12.79 毫米高水銀柱,在 35°C 时(飽和汽压为 44.55 毫米高水銀柱)空气的相对湿度是 $\frac{12.79}{44.55} \times 100\% = 29\%$,而在 15°C 时(飽和汽压是 12.79 毫米高水銀柱),相对湿度是 100%.

我們已經知道了絕對湿度和相对湿度的意义,現在我們就来比較全面地叙述一下空气的干湿程度. 在这里还要注意的是这两个物理量之間并没有什么函数关系.

例如,温度愈高,則水蒸发得愈快,于是空气里的水汽也就相应地增多,所以在一天之中,往往是中午的絕對湿度比夜晚来得大;在一年之中,又是夏季的絕對湿度比冬季大. 但是由于空气的飽和汽压也要随着温度的变化而变化,所以又可能是中午的相对湿度比夜晚的小;冬天的相对湿度比夏天的大.

由于在某一温度时的飽和水汽压可以在表 7.11 中查出,因此知道了絕對湿度就可以計算出相对湿度;反过来,知道了相对湿度,也可以計算出絕對湿度来.

例 8. 空气的温度是 10°C , 空气里水汽的压强是 8 毫米高水銀柱,求这时空气的相对湿度.

【解】 空气的絕對湿度 $p = 8$ 毫米高水銀柱,从飽和水汽压表中查出 10°C 时的飽和水汽压 $P = 9.21$ 毫米高水銀柱. 所以,

$$\text{相对湿度} = \frac{8}{9.21} \times 100\% = 87\%.$$

例9. 室内空气的温度是 25°C , 空气的相对湿度是65%, 问空气的绝对湿度等于多少?

【解】 从饱和水汽压表中查出 25°C 时的饱和水汽压 $P=23.76$ 毫米高水银柱. 所以,

$$\begin{aligned} \text{绝对湿度} &= 23.76 \text{ 毫米高水银柱} \times \frac{65}{100} \\ &= 15.44 \text{ 毫米高水银柱.} \end{aligned}$$

表7.11 不同温度时的饱和水汽压(P)
(单位: 毫米高水银柱)

$t^{\circ}\text{C}$	P	$t^{\circ}\text{C}$	P	$t^{\circ}\text{C}$	P	$t^{\circ}\text{C}$	P	$t^{\circ}\text{C}$	P	$t^{\circ}\text{C}$	P
-20	0.77	-9	2.13	2	5.29	13	11.23	24	22.38	35	42.18
-19	0.85	-8	2.32	3	5.69	14	11.99	25	23.76	36	44.56
-18	0.94	-7	2.53	4	6.10	15	12.79	26	25.21	37	47.07
-17	1.03	-6	2.76	5	6.54	16	13.63	27	26.74	38	49.69
-16	1.13	-5	3.01	6	7.01	17	14.53	28	28.35	39	52.44
-15	1.24	-4	3.28	7	7.51	18	15.48	29	30.04	40	55.32
-14	1.36	-3	3.57	8	8.05	19	16.48	30	31.82	50	92.5
-13	1.49	-2	3.88	9	8.61	20	17.54	31	33.70	60	149.4
-12	1.63	-1	4.22	10	9.21	21	18.65	32	35.66	70	233.7
-11	1.78	0	4.58	11	9.84	22	19.83	33	37.73	80	355.1
-10	1.95	1	4.93	12	10.52	23	21.07	34	39.90	100	760.0

我們可以利用仪器来直接测得空气的湿度. 这种仪器叫做湿度計. 一般常用的是干湿泡湿度計, 因为它的精确度比較高.

干湿泡湿度計(图7.30)是由两个相同的温度計 A 和 B 組成的. 我們把它們并排地裝在木板上, 在左边温度計的玻璃管泡上包有紗布, 紗布的下端浸在盛有水的瓶子 C 里. 瓶子里的水由于毛細作用而沿着紗布上升. 但是右边的温度計的玻璃管泡却是干的, 它和通常的温度計相同, 用来表示空气的温度. 由于紗布上的水分在蒸发时需要吸收热量, 所以左边温度計的讀数一般总比右边的

来得低一些。两温度计刻度所示的温度差就叫做干湿泡温度差。我们知道蒸发的快慢和空气的相对湿度有关。相对湿度越小，则越容易蒸发；相对湿度越大，即接近于饱和状态，水就越不容易蒸发。所以要是空气的相对湿度越小，则干湿泡温度差就越大；反之，空气的相对湿度越大，干湿泡温度差就越小。这样，知道了两温度计的读数差及当时的空气温度，利用表 7.12 就可以得到空气的相对湿度。例如，设干泡温度计所指示的温度是 22° ，湿泡温度计所指示的是 16° ，两泡的温度差是 6° ，我们就可以先在表中所示温度一行找到 22° ，又在温差一行找到 6°C 。再把 22°C 横向与 6°C 竖行对齐，结果就找到了数值 54。它的意思就是说相对湿度是 54%。

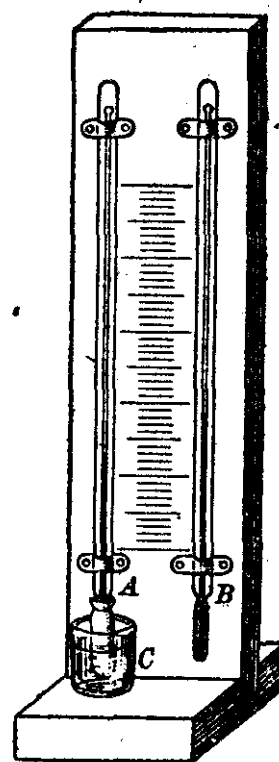


图 7.30 干湿泡湿度计

毛发湿度计 我们人的头发有一种特性，它吸收空气中水汽的多少是随相对湿度的增大而增加的，而毛发的长短又和它所含有的水分多少有关。利用这一变化就可以制造毛发湿度计，它的构造如图 7.31 所示。把脱了脂的经过适当方法处理过的头发的一端固定在木架上，并在头发的另一端悬挂一个小砝码。为了能够看清楚头发长短的变化起见，将头发绕过一个滑轮，同时在滑轮上安上一个很长的指针。由于小砝码本身的重量作用，而使头发紧紧地压在滑轮上。当头发伸长时，滑轮就作顺时针方向的转动，并带动它上面的指针沿着弧形向下偏转，而当头发缩短时，指针则向上转动。设空气完全干燥时，指针所指的地方算作 0。空气中水蒸汽达到饱和状态时，指针所指的地方算作 100，再用干湿泡湿度计和它相核对，刻出其他度数，这样就可以直接测出空气的相对湿度了。毛发湿度计的优点是比干湿泡湿度计的构造简单，用起来

表 7.12 空气的相对湿度
(摄氏温度)

干泡温 度計讀 数(°C)	干泡溫度計和濕泡溫度計的溫度差(°C)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	相 对 湿 度 %										
0	100	81	63	45	28	11					
1	100	83	65	48	32	16					
2	100	84	68	51	35	20					
3	100	84	69	54	39	24	10				
4	100	85	70	56	42	28	14				
5	100	86	72	58	45	32	19	6			
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
7	100	87	74	61	49	37	26	14			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	33	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39
32	100	93	86	80	74	68	62	57	51	46	41
34	100	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43
36	100	94	87	81	75	70	64	59	54	50	45
38	100	94	88	82	76	71	66	61	56	51	47
40	100	94	88	82	77	72	67	62	57	53	48

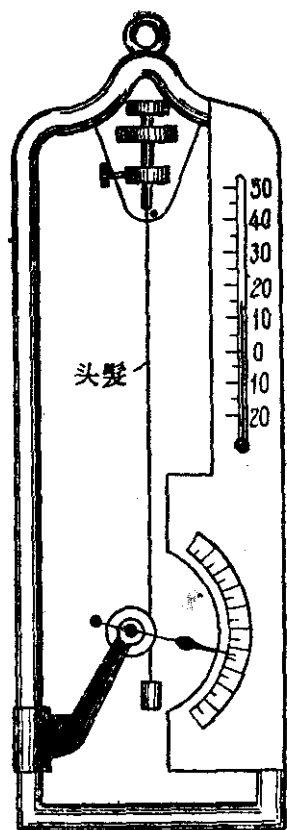


图 7·31 毛发湿度计

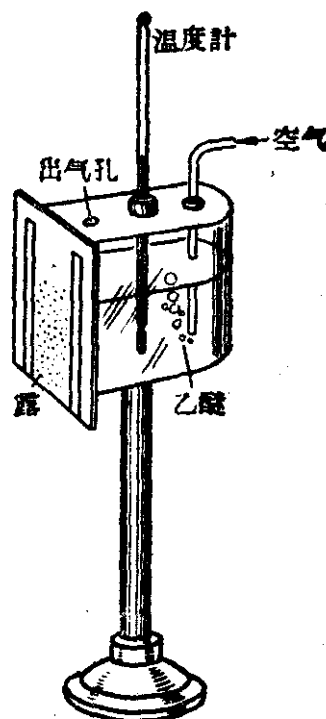


图 7·32 露点湿度计

也比较方便,但缺点是不够准确。

露点湿度计 除了以上两种湿度计以外,我们还应用了一种露点湿度计。为了理解露点湿度计的原理,让我们先来介绍一下什么叫做露点。在饱和汽的性质中,我们已经知道,降低温度能够使具有一定质量和体积的未饱和汽变成饱和汽。所以,保持空气中水汽的含量不变,而降低温度到某数值时,空气里的未饱和汽也能变成饱和汽,而这个温度就叫做露点。

怎样来测量露点呢?这可以用露点湿度计来进行(图 7·32)。在一个表面极为光滑的金属盒里盛有乙醚,盒盖上开有三个小孔,在一个小孔内插入一支温度计;另一个小孔内插入一根弯曲的玻璃管,其一端浸到乙醚中,空气可以由这根管子进入金属盒内;第三个小孔是出气孔。用打气筒向盒内打气时,乙醚就迅速蒸发,同时吸收周围空气里的热量而使周围空气温度降低。当降到一定温度时,金属盒附近空气里的水汽达到饱和,于是盒面上就出现了一

层很薄的細露珠。記下当时的温度 T_1 ，这一温度已較露点略低，以后停止打气以使金属盒的温度逐漸回升。等到金属面上的露珠完全消失时，再記下温度 T_2 ，这一温度已較露点略高。 T_1 和 T_2 的平均温度就是露点。为了更正确地觉察出露珠的出現和消失，可以在盒壁的周圍加上一个用同样的金属制成的边框，让边框和盒壁之間留有小縫，于是边框的温度比盒壁冷得慢，比較边框和盒壁两表面的状态，就能够很准确地測出露珠出現时的温度。

知道露点以后，就能够求得原来空气里水汽的絕對湿度和相对湿度，这又是什么原因呢？这是因为当盒里的温度降低到露点时，周圍空气中的水汽虽然呈飽和状态，但是空气中水汽的含量却并没有改变，也就是說水汽的压强并没有改变，而只是由于盒周圍温度降低使得它从未飽和变为飽和罢了，因此露点时的飽和水汽压跟空气中原有的未飽和水汽压相等，也就是露点时的飽和汽压跟原来温度时空气的絕對湿度相等。

举例來說，今天的气温是 20°C ，空气中含有一定量的未飽和水汽，用露点湿度計測得的露点是 12°C ，由表 7·11 查出 12°C 时的飽和汽压是 10.52 毫米高水銀柱，也就是說原来空气中的水汽压(或它的絕對湿度)是 10.52 毫米高水銀柱。而 20°C 时的飽和汽压是 17.54 毫米高水銀柱。根据相对湿度的定义

$$B = \frac{10.52}{17.54} \times 100\% = 60\% .$$

空气的温度下降到露点时，空气中的水汽就凝結成露。如果露点低于 0°C ，那么，水汽就直接凝結成霜。

露点的測定对于农业具有重大的意义，知道了露点可以預料夜間有无霜冻出現。如果露点在 0°C 以上，那末結霜的可能性是很小的。因为当温度还不到 0°C 时水汽就开始凝結，同时放出热量，阻止气温繼續下降，使温度保持在 0°C 以上，而不致于有霜出現。当空气很干燥时，露点可能低于 0°C ，只有当温度降到 0°C 以

下时,水汽才开始凝結成霜。霜冻对晚秋作物特别有害,所以在得到了霜冻预报后,就要采取預防措施,如在田野里燃起火堆,使所产生的烟气包圍田野,防止过分强烈的冷却而使农作物遭受冻伤。

例 10. 气温是 25°C 时,空气的相对湿度等于 60% 。問气温降低到多少度时才会有露珠出現?

【解】 先計算出 25°C 时的绝对湿度。从表 7.11 中查出 25°C 时的飽和汽压是 23.76 毫米高水銀柱。所以,

$$\begin{aligned} \text{空气的绝对湿度 } p &= 60\% \times 23.76 \text{ 毫米高水銀柱} \\ &= 14.3 \text{ 毫米高水銀柱.} \end{aligned}$$

再从表 7.11 查出 14.3 毫米高水銀柱所对应的温度是介于 16°C 与 17°C 之間,即露点介于 16°C 与 17°C 之間。因此可以知道,气温降低到 17°C 以下时,才能出現露珠。

例 11. 已知 6°C 时的相对湿度是 55% ,問夜間会不会有霜冻現象?

【解】 由表 7.11 查得 6°C 时的飽和水汽压为 7.01 毫米高水銀柱,此时空气绝对湿度为 $p=7.01 \times 55\%$ 毫米高水銀柱

$$= 3.86 \text{ 毫米高水銀柱.}$$

再查表 7.11 知道:与飽和水汽压为 3.86 毫米水銀柱相对应的温度約为 -2°C ,即露点約为 -2°C ,所以有霜冻出現的可能。

习 題 7.15

1. 如果在冬天和夏天,白天和夜間空气的绝对湿度是相同的,問它們的相对湿度是否也相同? 如果不同,那么什么时候比較大? 什么时候比較小?
2. 为什么戴眼鏡的人在冬天由街上进入到屋里时,鏡片总要模糊的呢?
3. 空气的温度 $t=20^{\circ}\text{C}$, 露点 $t_0=9^{\circ}\text{C}$, 求它的绝对湿度和相对湿度。
4. 如果空气的温度 $t=18^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $B=60\%$, 試求露点。
5. 如果白天空气的温度 $t=22^{\circ}\text{C}$; 相对湿度 $B=60\%$, 而夜間土壤的温度降到 10°C , 那么第二天早晨能不能看見露水呢?

6. 白天空气的温度 $t=0^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $B=70\%$, 夜间土壤温度下降到 -5°C , 那么夜里有没有霜冻出现呢?

7. 用于湿泡湿度计测定湿度, 如果干泡温度计所指示的温度各为 10°C 、 18°C 、 24°C 时, 湿泡温度计的相应温度各为 8°C 、 14°C 、 18°C , 试根据表 7.12 求出各个不同情况下的相对湿度.

本章提要

这一章的主要内容是在分子运动论的基础上来研究物质的气态、液态、固态之间相互变化的过程、规律及其应用.

1. 熔解和凝固 熔解和凝固是固态和液态之间的变化过程.

(1) 物质从固态变成液态的现象叫做熔解, 从液态变成固态的现象叫做凝固.

晶体要在一定的温度下才能熔解, 这个温度叫做熔点. 晶体也只有在一定的温度时才能凝固, 这个温度叫做凝固点. 同一物质的凝固点跟它的熔点相同.

非晶体在熔解和凝固过程中温度总是在不断地改变, 所以非晶体没有一定的熔解温度和凝固温度.

晶体的熔点决定于物质的种类、杂质含量和它所受的压强.

(2) 晶体在熔解的时候要吸热, 在凝固的时候要放热.

单位质量的晶体在熔点变成同温度的液体时所吸收的热量, 叫做这种晶体的熔解热.

单位质量的液体在凝固点变成同温度的晶体所放出的热量, 等于它的熔解热.

晶体在熔解时, 由固态分子热运动转变成液态分子热运动的过程需要外界供给一定的热量, 这些热量不是用来增加分子的平均动能, 而是用来改变分子之间的势能. 因此, 在熔解的过程中虽然对它继续进行加热, 但晶体温度并不升高, 例如冰的熔解热 = 80 卡/克.

(3) 大多数物质都是熔解时体积膨胀, 凝固时体积缩小. 只有很少几种物质, 如水、铸铁等是熔解时体积缩小, 凝固时体积膨胀的.

(4) 熔解时体积膨胀的物质, 如果所受的压强增加, 它们的熔点就升高. 熔解时体积缩小的物质, 如果所受的压强增加, 它们的熔点就降低.

2. 汽化和液化 汽化和液化是液态和气态之间的变化过程.

(1) 物质从液态变成气态的现象叫做汽化, 从气态变成液态的现象叫做

液化.

汽化有两种方式——蒸发和沸腾。蒸发是只在液体表面上进行的汽化过程，沸腾是在液体内部和表面同时进行的汽化过程。在任何温度下，所有的液体都能够蒸发，而沸腾只能在一定的压强和温度下才能进行。在一个大气压下液体的沸腾温度叫做沸点。压强减小，液体的沸腾温度降低。压强增大，液体的沸腾温度升高。

(2) 液体在汽化的时候要吸热，气体在液化的时候要放热。

单位质量的液体，变成同一温度的汽时所需要吸收的热量，叫做这种液体的汽化热。液体的汽化热跟温度有关，温度越高，汽化热越小。

气体在液化的时候放出的热量，等于在同一温度下的汽化热。

水在 100°C 时的汽化热 $L=539$ 卡/克。

(3) 临界状态：

(i) 每种物质都有一个特定的温度，在这个温度以上，无论怎样增大压强，气态物质也不会液化。这个温度叫做临界温度。

(ii) 物质处在临界态时，液态和气态之间没有任何区别，连分界面都消失了。这时的汽化热等于零。

(4) 使气体液化的方法是：

(i) 降低气体温度到临界温度或临界温度以下；

(ii) 增大压强到临界压强或临界压强以上。降低温度和增大压强能使气体分子的动能减少，同时缩短分子之间的距离，迫使气体分子无规则的运动发生变化而变成液体。

(5) 物质从固态直接变成气态的现象，叫做升华。固体在升华的时候要吸热。

3. 未饱和汽和饱和汽

(1) 未饱和汽和饱和汽的性质完全不相同：未饱和汽的压强、体积跟温度的相互关系，是近似地遵循理想气体三定律的。

(2) 在密闭的容器里如果有液体存在，那么容器内部空间的汽一定是这种液体的饱和汽。

(3) 饱和汽的性质：

(i) 在一定的温度下，如果改变饱和汽的体积，并且保持它始终处于饱和状态，那么它的压强与体积无关。

(ii) 当温度升高时，由于它的密度变大和汽分子运动的平均速度也增大等两重原因，饱和汽的压强比未饱和汽增加得更强烈一些。

所以對於飽和汽來講，理想氣體三定律完全不能適用。

(iii) 在相同的溫度下，不同種類的液體飽和汽壓不同。

(4) 使未飽和汽變為飽和汽的基本方法：未飽和汽變為飽和汽或飽和汽變為未飽和汽的過程，一般是在密閉容器內進行的。設某一密閉容器內原來含有一定質量的未飽和汽：

(i) 在溫度保持不變的情況下，放入足夠多的這種汽的液體可以使它變為飽和汽。

(ii) 體積保持不變，而降低它的溫度，可以使它變為飽和汽。

(iii) 溫度保持不變，而縮小它的體積，也可以使它變為飽和汽。

(iv) 如果降低溫度而且縮小體積，那就更容易使它變為飽和汽了。

(5) 使飽和汽變為未飽和汽的基本方法：密閉容器里的飽和汽只要增大汽的體積或升高汽的溫度，或者兩種方法同時進行，都可以使飽和汽變為未飽和汽。

4. 絕對濕度、相對濕度和露點

(1) 絕對濕度：大氣中含有的水汽的壓強，叫做絕對濕度。

(2) 相對濕度 = $\frac{\text{當時空氣的絕對濕度}}{\text{同一溫度下飽和水汽的壓強}} \times 100\%$,

即
$$B = \frac{p}{P} \times 100\%.$$

(3) 露點：使空氣中所含有的水汽達到飽和狀態而結露時的溫度叫做露點。

復習題七

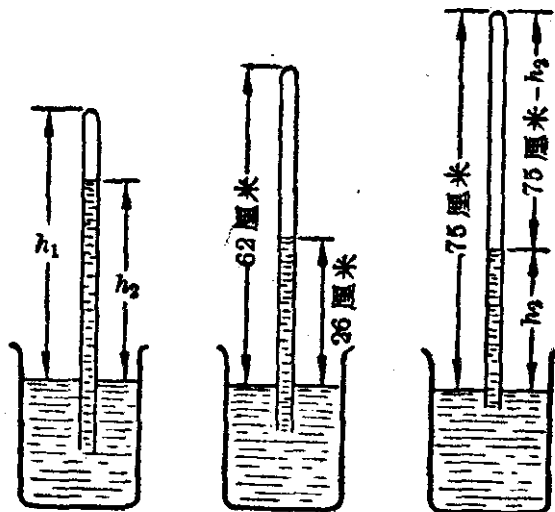
1. 等重量的沸水與冰相混合，冰完全熔解後，其最後平衡溫度為 10°C ，求冰的熔解熱。

2. 把 50 克 0°C 的冰與 50 克 40°C 的水相混合，問最後的混合溫度是幾度？

3. 冰的比熱是 0.5 卡/克·度，它的熔解熱是 80 卡/克。使 1 千克 -30°C 的冰變成 40°C 的水；需要多少千卡的熱量？

4. 將 500 克處於熔點的液態鉛倒入 1 升 22°C 的水內。鉛在水內凝固，同時水的溫度升高，並有一部分水變成 100°C 的蒸汽。如果未汽化的水的最後溫度是 27°C ；那末，變成蒸汽的水的質量是多少？（鉛的熔點是 327°C ，熔解熱是 5 卡/克，比熱是 0.03 卡/克·度，水在 100°C 時的汽化熱是 539 卡/克。）

5. 在一端封閉的均匀玻璃管内，充滿水銀，把它倒立在一个較深的水銀槽中，然后向管内注入一些乙醚（如图所示）。設大气压强是 75 厘米高水銀柱，問在下列各种情况下管内乙醚汽的压强各是多少厘米高水銀柱？（乙醚重量不計）(1) 温度为 $t^{\circ}\text{C}$ ，管内存有液体， $h_1=50$ 厘米， $h_2=30$ 厘米；(2) 温度保持 $t^{\circ}\text{C}$ ，将管向上提高，管内仍有液体 $h_1=62$ 厘米； $h_2=26$ 厘米；(3) 温度增加到 $t^{\circ}\text{C}$ ，管内液体恰好完全汽化， $h_1=62$ 厘米， $h_2=26$ 厘米；(4) 温度保持 $t^{\circ}\text{C}$ ，再将管向上提高， $h_1=75$ 厘米。



(第 5 題)

6. 在一定温度下的飽和汽为什么具有一定的密度？飽和汽压的大小跟哪些因素有关？

7. 什么叫做临界状态？

8. 怎样才能使气体变成液体？

9. 什么叫做露点？用什么方法能够測出露点？

10. 当温度是 8°C 时，相对湿度为 40%。問夜間气温降低到多少度才会有霜出現？我們平常所說的要“降霜”了，从物理意义上来讲，这句话对不对？

第八章 热 机

在第二章中已經学习了能的轉变和能量守恒定律。我們知道：自然界里所具有的能量既不能消灭，也不能創生，它只能从一种形式轉变为另一种形式。我們还知道：能量的轉移可以通过热傳遞的方式，也可以通过做功的方式来进行。热机就是这样的一种装置，它能够連續不断地把燃料燃燒时所放出的能量，通过傳热的方式轉变为物质的內能，再通过做功的方式轉变为其他形式的能（如机械能）。蒸汽机、汽輪机、內燃机都是常見的热机。

热机的发展过程是跟生产关系和生产力的发展分不开的。在十七世紀以前，生产力受着封建制度落后的生产关系的束縛。当时，在生产上只能用人力、畜力、风力和水力来带动一些简单的机器。直到十七世紀末叶，在从封建社会轉变为資本主义社会的革命过程中，欧洲的工业逐漸发达起来，手工业工場也开始发展到使用机器的工厂。这就需要比人力和畜力更强大的动力来带动一切机器，因此当时就有很多的科学家在总结劳动人民长期生产实践經驗的基础上，发明了动力較大的热机。其中贡献較大的有俄国技师巴祖諾夫，他一面参加劳动，一面刻苦地自学物理学和其他科学技术知識，终于設計了一台蒸汽机。此外，在热机的設計和創造上，英国技师瓦特也作出了很大的贡献。

热机作为一切机器的动力来源，在工农业生产和交通运输上都占有非常重要的地位。比如蒸汽机能使火車得到动力；鍋駝机是重要的农村排灌动力机械；內燃机用来开动汽車和拖拉机；而汽輪机是火力发电站中不可缺少的动力装置。

热机的种类虽然很多，但是它们的主要工作原理都是利用高温高压的气体或蒸汽膨胀做功。在这一章中，我们将分三部分来进行讲解：

第一部分是气体膨胀做功的情况。

第二部分是以锅炉蒸汽机为例来分析热机的组成部分、工作原理和效率。

第三部分是分别介绍各种不同类型的热机。

§ 8.1 气体膨胀做功

在日常生活中，我们非常清楚地知道水沸腾时蒸汽的压力是很大的，它能把壶盖推开。我们也可以做这样的实验：如图 8.1 所示，在一个铁筒里装入半筒水，把它放在火上加热，并将筒口塞紧。筒侧带有短管，用橡皮管把它和球囊连接起来。当水沸腾时，所产生的大量蒸汽将经过短管和橡皮管进入球囊，于是球囊体积膨胀并将其上的重物渐渐地提高。这说明蒸汽膨胀时可以举高重物做功。

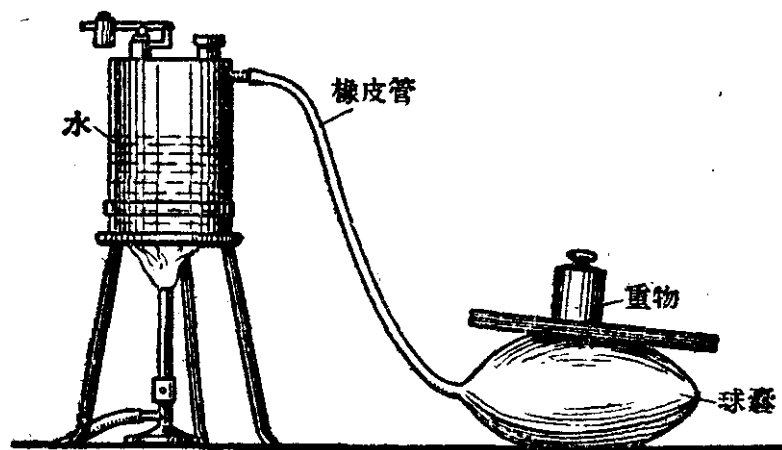


图 8.1 球囊里的蒸汽膨胀举高重物做功

图 8.2 所示的是一个古时候的炮膛，它是一个一头封闭着的铁筒，放炮以前，先放进火药，然后在火药前面放上当作炮弹的铁球或石块。而在炮膛封口的一头还有一个小孔，通过它引进一根引火线。火药点燃后，很快地燃烧并产生大量灼热的气体，当这种

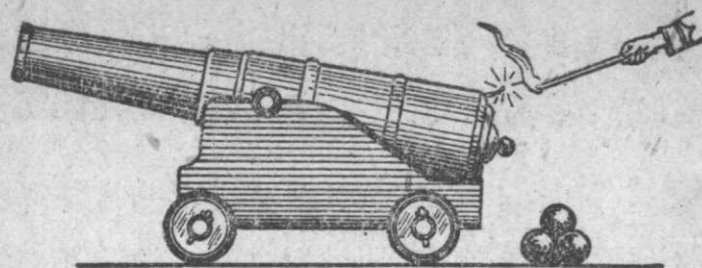


图 8.2 炮膛里火药爆发产生的高温高压气体膨胀做功, 推出炮弹

高压高温的气体膨胀时, 就能把炮弹发射出去。

以上列举的都是气体膨胀做功的具体例子。

在第四章中我们已经学过气体的性质, 现在就在已有知识的基础上来进一步研究: 当气体受热或膨胀做功时, 它的状态的变化和能量转变等情况。

在学习玻意耳-马略特定律时, 我们曾经讨论过等温过程中气

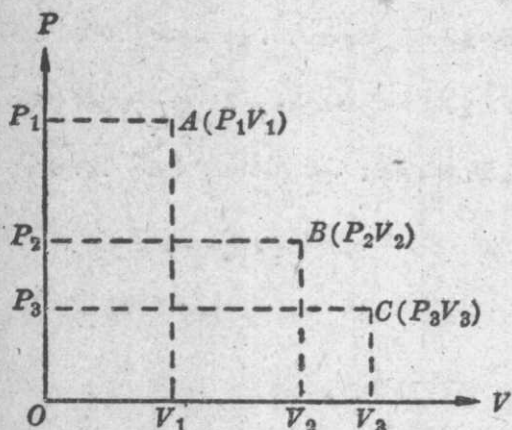


图 8.3 描述气体状态的 P - V 图线

体压强和体积的函数图线。在图 8.3 里, 每一点表示一定质量气体的压强和相应的体积, 如 A 点代表气体的压强为 P_1 、体积为 V_1 时的状态, B 点代表气体压强为 P_2 、体积为 V_2 时的状态等等。如果在气体压强和体积的变化过程

中, 记下每一时刻的 P 和 V , 并

在图上用相应的点表示出来, 连接这些点, 就得到等温过程的 P - V 图线。我们又从气态方程中知道, 表示气体状态的三个量 (压强、体积、温度) 之间的关系是: 一定质量的理想气体的压强和体积的乘积被它的绝对温度来除所得的商, 在状态变化中恒定不变。所以在三个量中如果知道两个量就可以求出第三个量。对于非等温过程的 P - V 图线来讲, 虽然它不直接表示出气体的温度, 但是我们可以根据图线上每一点所表示的压强 P 和体积 V 的数值, 应用气态方程来计算出相应的温度 T , 从而了解在状态变化

过程中温度的变化情况。不同形状的 $P-V$ 图线反映不同情况的温度变化。

$P-V$ 图线除了可以用来表示气体状态的变化情况之外，还可以用来表示气体在变化过程中做了多少功。现在我们就利用 $P-V$ 图线来研究一定质量的气体在几种典型的变化过程中的做功情况。

首先我们来研究气体在压强不变的条件下膨胀做功的情况：

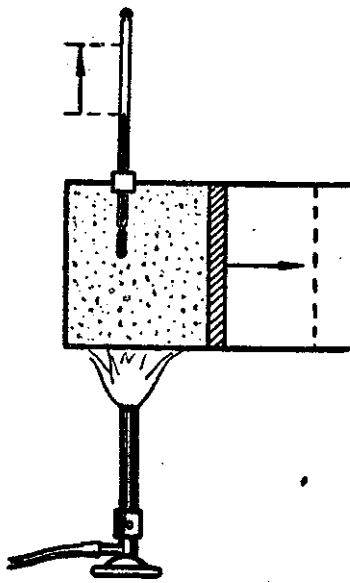


图 8.4 气体等压膨胀对外做功的示意图

图 8.4 所示的是一个内壁光滑的圆筒，筒内有一个可以左右移动的活塞，活塞很轻，由于它与筒壁密切吻合，所以筒内气体不能漏出。对密闭在筒内的气体慢慢地加热后，气体就逐渐膨胀，并推动活塞做功。因为在这个过程中，气体的压强始终等于外面的大气压强，所以我们称它为等压膨胀。

气体作等压膨胀时能量将发生怎样的变化呢？热源加热气体所传送的能量，一部分转变为气体的内能（使气体的温度有了升高，即分子的平均动能有了增加），另一部分通过气体膨胀做功传送给外界。在这个变化中，气体的压强所以能够保持恒定不变，也正是由于气体的温度有了增加，否则在气体膨胀时，由于体积增大，密度减小，气体压强就要降低。

气体在一定的压强下膨胀后做了多少功呢？从图 8.5 中可以看到，气体最初的体积是 $CDEF = V_1$ ，在压强 (P) 不变的情况下加热，使气体膨胀推动活塞向右移动一段距离 s ，结果气体的体积变为 $CDE_1F_1 = V_2$ 。气体推动活塞所做的功

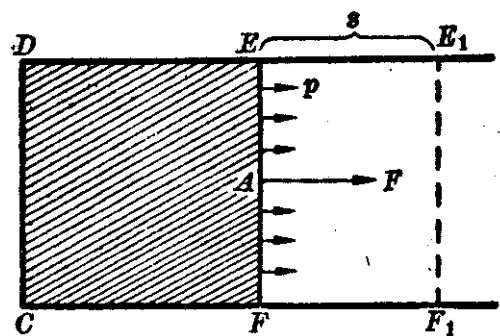


图 8.5 气体等压膨胀做功

【§ 8.1】

W 等于作用在活塞上的力 F 和距离 s 的乘积。如果活塞的面积是 A ，气体压强是 P ，那么 $F=PA$ 。所以当活塞向右移动时所做的功 $W=Fs=PA_s$ ，而 As 又等于气体膨胀时所增大的体积，即 $As=V_2-V_1$ ，所以 $W=P\cdot(V_2-V_1)$ 。这就是说在一定的压强下，气体膨胀时所做的功等于压强和体积变化量的乘积。

如果用 $P-V$ 图线来表示气体的等压膨胀过程，那么由于体积为 V_1 时压强为 P ，体积为 V_2 时压强仍为 P ，并且与每一个体积相对应的压强都是 P ，所以它是一条与横坐标轴平行的直线，如图 8.6 所示。

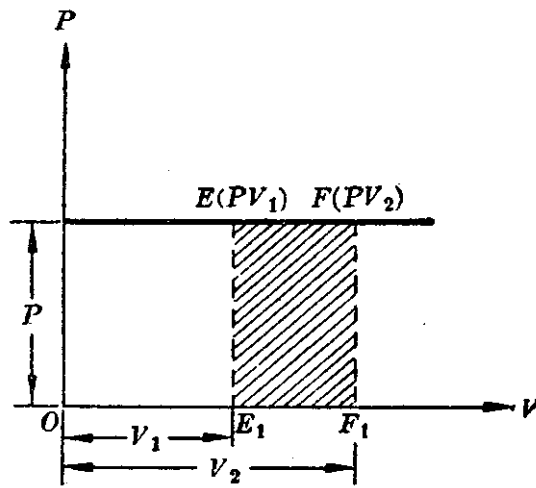


图 8.6 等压线。

表示这种等压变化过程的图线叫做等压线。

从 $P-V$ 图上还可以看出横坐标轴上的线段 E_1F_1 是表示体积的增加 V_2-V_1 ，纵坐标轴上的线段 EE_1 表示压强，它在全部过程中总是保持恒定，并等于大气压强 P ；长方形 EE_1F_1F 的面积等

于 $P\cdot(V_2-V_1)$ ，也就是气体等压膨胀时所做的功 W 。所以我们说：气体在等压膨胀时所做的功，在数值上等于 $P-V$ 图上由横坐标轴、等压线以及对应于最初体积和最后体积的纵线所包围的面积。

掌握了这一个计算方法以后，我们就能够比较方便地应用 $P-V$ 图线来求出气体在作各种变化时所做的功。

第二，研究气体在体积不变的条件下所进行的能量转换。

如图 8.7 所示，将一定质量的气体密

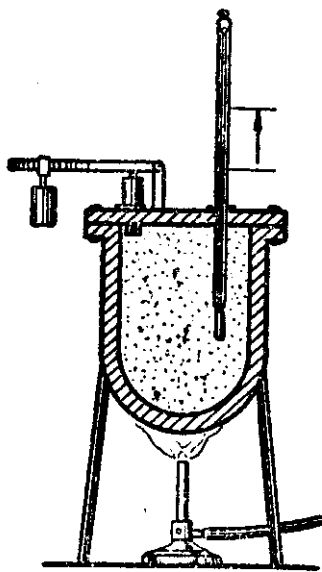


图 8.7 气体等容升压时能的转变示意图

閉在一个很坚固的容器里，并对它慢慢地加热。这时，由于气体的体积不能有所增长，所以它的压强将按查理定律随着温度的升高而增长。在这样的变化过程中，气体并不对外做功，而温度却不断地升高，也就是说，从热源输入的能量全部转变为气体的内能。正是由于气体的温度有了增加，才使气体的压强增大。这样的变化过程就叫做等容变化过程。它的 $P-V$ 图线如图 8·8 所示，是一根平行于纵轴的直线，这根直线表示气体的体积不变而压强上升。

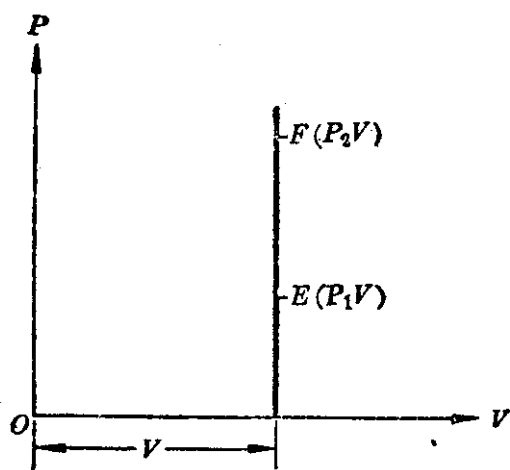


图 8·8 等容线

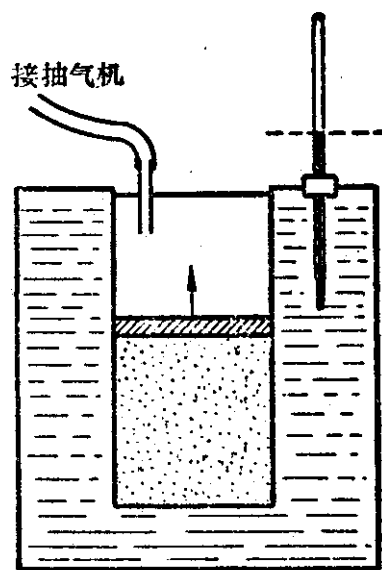


图 8·9 气体等温膨胀对外做功的示意图

第三，研究气体在温度不变的条件下膨胀做功的情况。

我们将图 8·9 所示的圆筒放在一个大水槽中，水槽里盛满了水，由于水的热容量很大，所以它的温度保持不变，并使筒内气体的温度也保持不变。再用抽气机将活塞上面的气体慢慢地抽出，以便逐渐减小活塞上的压强。于是筒里的气体发生等温膨胀，从而使活塞向外移动做功。

这时能量是如何变化的呢？

由于气体的温度保持不变，所以气体分子的平均动能也保持不变，而理想气体的内能只包含分子动能，因此我们说，在等温过程中，理想气体的内能并不发生变化。

既然气体的内能没有发生变化，那么它在向外膨胀做功时所消耗的能量又是从哪里来的呢？原来，活塞下面的气体，一方面推动活塞做功消耗它本身的内能，另一方面又通过吸热的方式从它周围的水中获得能量来补偿失掉的内能，结果就保持原来的温度不变。至于圆筒外面的水，由于它的热容量很大，虽然与筒内气体有少量的热交换，但并不显著地改变温度。这样的热源（即筒外的水）叫做恒温热源。我们经常这样说：气体在作等温膨胀时内能保持不变，它从恒温热源所吸收的热量用来对外做功，这时它起转换和传递能量的作用。

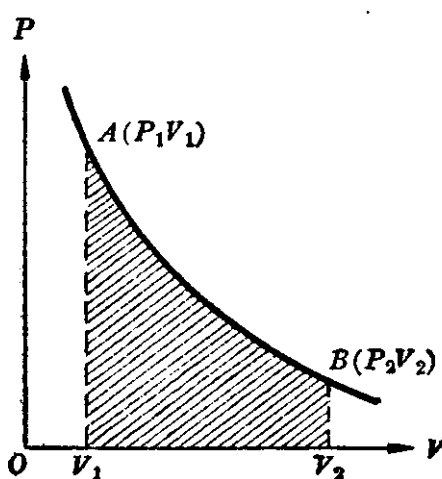


图 8·10 等温线

气体在作等温变化时遵循玻意耳-马略特定律；它的 $P-V$ 图是一条如图 8·10 所示的曲线，叫做等温曲线。理论上证明：气体在等温膨胀时所做的功，在数值上等于横坐标轴、等温曲线以及对应于最初体积和最后体积的纵线所包围的面积。

最后我们来研究气体在绝热膨胀时所做的功。

在 § 4·10 中已经介绍过气体绝热膨胀和绝热压缩的实验。

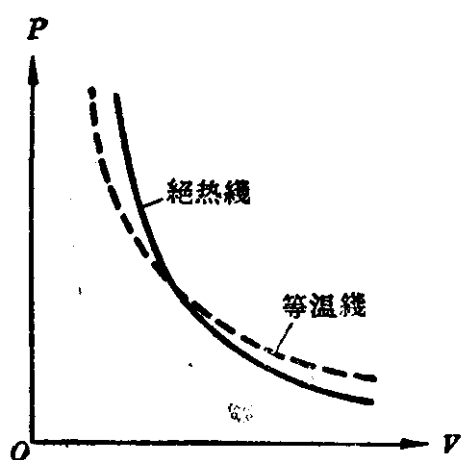


图 8·11 气体作绝热变化时的 $P-V$ 图线

我们已经知道：在作绝热变化时，气体跟周围物体没有热量交换。因此当气体绝热膨胀对外做功时，它的内能必定要减少，同时温度要降低，压强也要减小；反过来，当气体被绝热压缩时，由于其他物体对它做功，它的内能就要增加，同时温度要升高，压强也要增大。

气体作绝热变化时的 $P-V$ 图

綫也是一条曲綫(如图 8·11 所示), 叫做絕热綫。对橫坐标軸来讲, 絕热綫要比等温綫更陡一些, 因为在气体作絕热膨脹时并没有热量輸入, 所以它的压强要比等温膨脹时降低得更剧烈一些。

根据前面所讲的方法, 我們也可以利用絕热綫来求出气体作絕热膨脹时所做的功。

我們已經討論了气体作各种变化时, 能量的变化和功的計算, 接下来我們就要进一步来学习和討論各种热机了。

习 題 8·1

1. 什么是热机? 为什么在学习热机前要先学习有关气体膨脹做功的知識呢?

2. 試作出气体等压变化时的 $P-V$ 图, 并說明等压膨脹时能量轉变的情况。如果撤去热源, 用外力反向推动活塞, 使气体在外力的作用下进行等压收縮, 試問这时它的能量又将发生怎样的变化?

[提示: 外力压縮气体时对它做功, 机械能轉变为內能, 为了要保持气体的压强不变, 就必须降低它的温度。]

3. 試作出气体等温变化时的 $P-V$ 图, 并說明在等温膨脹时能量轉变的情况。如果在图 8·9 中用外力推动活塞向下运动, 使气体进行等温收縮, 試問这时它的能量又将发生怎样的变化呢?

[提示: 气体作等温变化时內能保持不变。]

4. 如果气体在进行等容降压时, 它的能量将发生怎样的变化?

5. 什么叫做絕热过程? 气体在絕热膨脹和絕热压縮时, 它的能量将发生怎样的变化?

6. 一定质量的气体在 12 大气压下膨脹, 体积从 0.35 米^3 增加到 0.5 米^3 , 求气体所做的功。

7. 将 2 升压强为 1 大气压的空气在等压的条件下加热, 使它的体积等于原来的两倍, 再在体积不变的条件下加热到压强等于 2 大气压, 最后在等温条件下膨脹到压强等于 1 大气压。作压强体积图綫表示这个变化过程。

[提示: 在等温变化过程中, 压强和体积应按玻意耳-馬略特定律計算。]

§ 8.2 鍋 炉

前面已經讲过，热机都是利用气体或蒸汽的膨脹来做功的。在技术上我們常称气体或蒸汽为热机的工作物质，或簡称为工质。蒸汽机和汽輪机中的工质是蒸汽。在讲蒸汽机以前，我們先要讲讲产生蒸汽的装置——鍋炉。

鍋炉是高压蒸汽的发生器。在鍋炉中燃料的化学能轉变为蒸汽的内能。

鍋炉是由火室和汽鍋两部分組成的。根据构造和形式的不同，可以分为水管式鍋炉和烟管式鍋炉。

图 8.12 是水管式鍋炉的构造示意图。它的上面部分是汽鍋，下面部分是火室。在火室中，1 是鏈条炉排，燃料由炉排送入，并在炉排上燃燒；在炉排下装有鼓风机，用来供給空气帮助燃燒。2 是一排热水管，斜装在火室中。它通过前后貯水管 3、4 和汽鍋相联。5 是蒸汽过热器，6 是送汽管，7、8 是炉档，它的作用是使火焰和烟气繞着水管、汽鍋和过热器的外表面迂回流动，并把热量傳

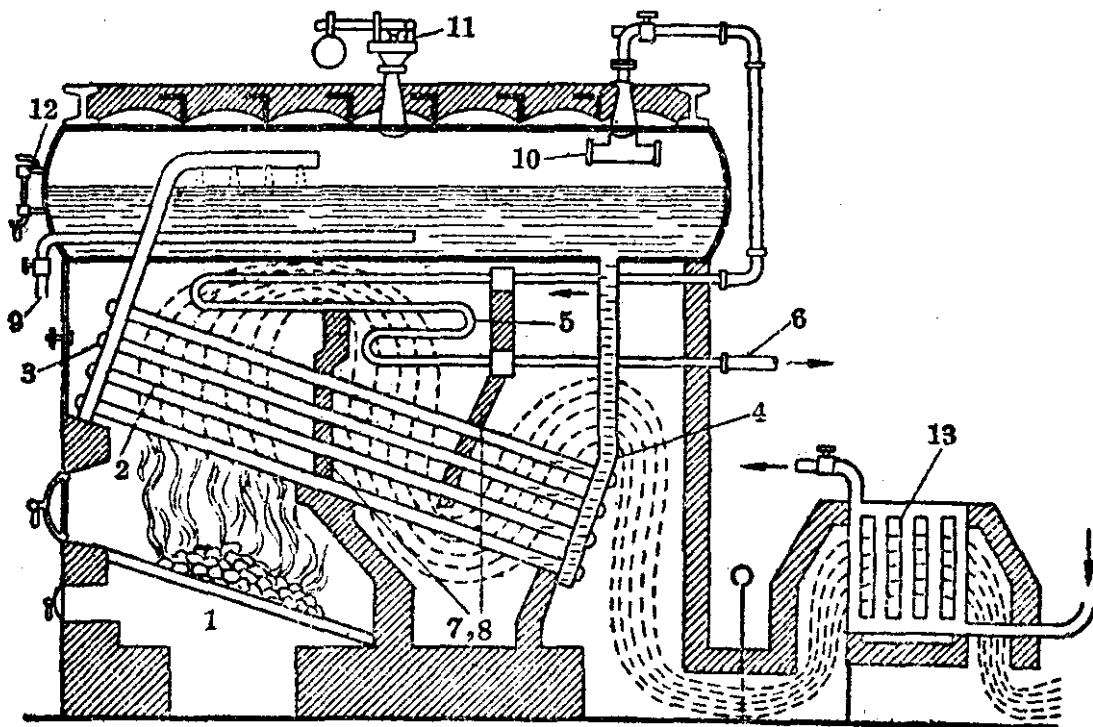


图 8.12 水管式鍋炉示意图

給水和蒸汽。在汽鍋中，9 是進水管，10 是輸汽管，11 是安全閥，12 是水位器。

水在水管或汽鍋中受熱變成水蒸汽後，由前水管送到汽鍋的上部。汽鍋中的飽和水蒸汽又由輸汽管送到過熱器中，再次受熱變成過熱蒸汽，過熱蒸汽經過送汽管送到蒸汽機的汽缸中去推動活塞做功。

鍋爐中為什麼要有蒸汽過熱器的裝置？為什麼要把飽和蒸汽再加熱成為過熱蒸汽呢？這是因為過熱蒸汽比飽和蒸汽貯藏着更多的內能。如果從送汽管送出的是飽和蒸汽，那麼當周圍的溫度較低時，就會有一部分飽和汽液化成水。這些水在汽缸中不能做功，並將妨礙活塞的移動。飽和蒸汽經過加熱變成為過熱蒸汽後，就不會在輸送過程中因冷卻而立即液化，僅僅是溫度稍微有些降低，因此進入汽缸後仍能膨脹做功，並保證熱機的運行安全。

從火室中出來的煙氣溫度也是很高的，通常在 350°C 到 400°C 左右。如果就讓它從煙囪中排出去，那就要損失很大一部分的能量，因此在鍋爐的煙道中又常常裝有一種叫做省煤器的設備。圖中 13 就是省煤器的構造，它是由鑄鐵或鋼管組成的，在管內通水，以便煙氣從管外通過時，使管內冷水的溫度升高。將這樣預熱過的水送到汽鍋中，既可節省燃料又能延長汽鍋的使用壽命，因為用高溫的水送入汽鍋，可以避免汽鍋溫度的劇烈變化。

煙氣經過省煤器後，溫度還是很高，為了更充分地利用煙氣的能量，可以再讓它通過空氣預熱器來預熱送往火室中幫助燃燒的空氣。這樣就可以使燃料更加迅速地燃燒，從而提高燃燒的溫度。管式空氣預熱器的結構和省煤器相似，所不同的是空氣預熱器中的煙氣由管內通過，空氣在管外吸取熱量。

水管式鍋爐的蒸發量很大，大型的每小時可以供應蒸汽幾十噸到幾百噸。這對大型火力發電站和需要大量蒸汽的工廠來講是

比較适合的。但是由于水管式鍋炉的水管、汽鍋和火室的体积很大，象一座楼房，因此它不适宜于使用在火車和小輪船中。

在火車上常用的是一种烟管式鍋炉。如图 8·13 所示，在火車車輪上面，橫臥着一个圓柱形的汽鍋，它是由鍋体（鋼板做的圓柱形筒）和許多管子构成的。鍋炉里的管子叫做烟管或火管。图中 1、2、3 就是烟管，4 是汽包，5 是过热器，6 是烟箱，7 是蒸汽机。鍋体里面和烟管外面都充滿了水。煤在火室的炉篋上燃燒，产生的热烟和火焰通过烟管到烟箱排出，管外的水受热后变成水蒸汽，由汽包导入过热器变成过热蒸汽，再从过热器引入蒸汽机的汽缸推动活塞作功。

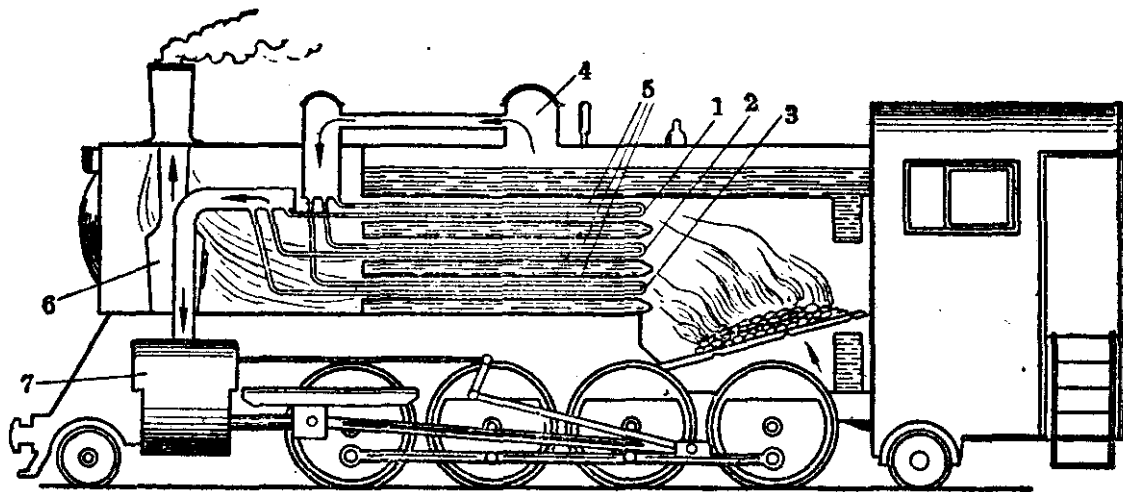


图 8·13 烟管式鍋炉示意图

烟管鍋炉的优点是結構簡單、体积比較小，容易管理，所以被广泛地使用在火車上或小型工厂中。

为了保証安全生产，各种鍋炉都装有安全閥。安全閥平时是关闭着的。当鍋炉里的蒸汽压强超过一定的限度时，蒸汽就会頂开安全閥，而泄出其中的一部分，使鍋炉里的压强恢复到安全限度以内。这样可以避免汽鍋爆炸的危險。

习 題 8·2

1. 烟管式鍋炉和水管式鍋炉的构造有什么不同？比較它們的优缺点。

2. 过热器的构造是怎样的? 为什么鍋炉要有过热器?
3. 省煤器的构造和功能是怎样的?
4. 空气預热器的构造和功能是怎样的?

§ 8.3 蒸 汽 机

从鍋炉里出来的高压过热蒸汽蘊藏有很多的能量，通过蒸汽机可以把它釋放出来对外作功。下面我們就来討論一下蒸汽机是怎样工作的。

图 8.14 所示的是一种臥式蒸汽机，图中 1 是臥式汽缸，2 是活塞，3 是汽室，4 是曲柄，5 是飞輪，6 是离心节速器，7 是排气管，8 是进汽管，9 是偏心輪。

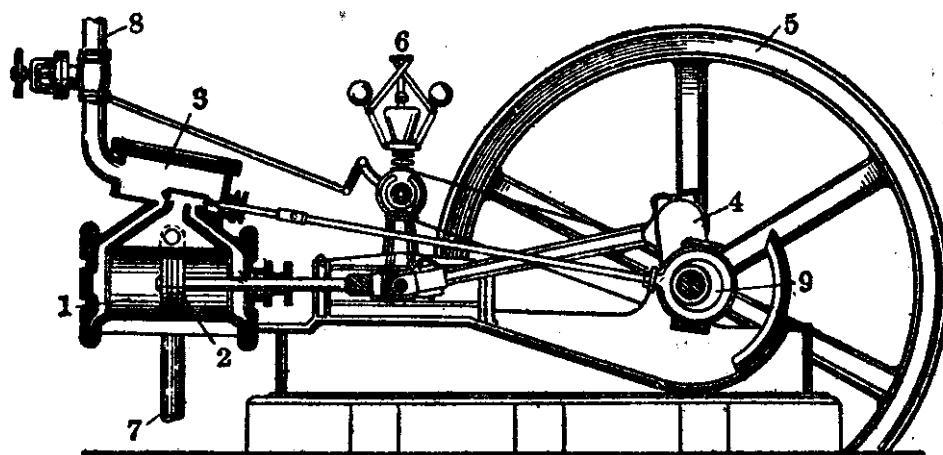


图 8.14 臥式蒸汽机

1. 蒸汽机的构造和工作原理

(1) 汽缸和汽室：汽缸是蒸汽膨脹做功的部分，也是蒸汽机中最主要的組成部分。如图 8.15 所示，1 是汽缸；2 是活塞，它可以在汽缸內往复移动，但又須与汽缸紧密連接而不漏汽。汽缸上有一个汽室 3，汽室里有四个汽管。汽管 4 和 5 与汽缸两端相通；汽管 6 是进汽管，过热蒸汽由它通入；汽管 7 是排气管。汽室內还有一个可以左右移动的滑动閥 8，它在同一时刻內只能遮住两个管口：排气管口和某一个通汽缸的管口。

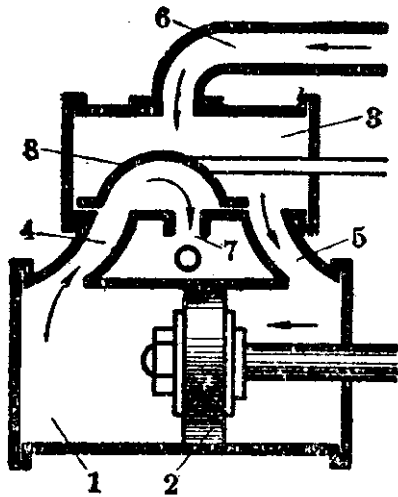


图 8-15

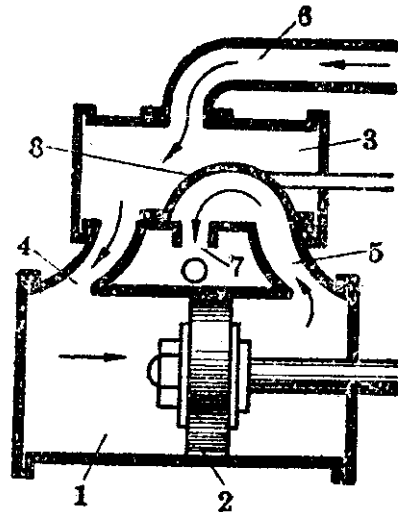


图 8-16

在图 8-15 所示的情况下，过热蒸汽经过汽管 6，进入汽室 3，再从汽室 3 通过开启着的右汽管 5，进入汽缸的右边。也就是说，这时汽缸右端和锅炉连通，从锅炉来的高压过热蒸汽推动活塞向左移动。被滑动阀复盖着的左汽管 4 跟排气管 7 连接，因此活塞左边的蒸汽被活塞推压，从汽管 4 经过排气管 7 排出。

活塞间接带动滑动阀运动，在活塞向左移动的后一段时间里，滑动阀向右移动。结果当活塞到达汽缸左端时，滑动阀把右汽管 5 关闭，左汽管 4 打开。在图 8-16 中，蒸汽从左汽管 4 进入汽缸，推动活塞向右移动。而汽缸右面刚刚经过膨胀的废气经过右汽管 5 排出。当活塞移动到汽缸右端时，滑动阀又回到图 8-15 所示的状态。这样由于蒸汽膨胀做功推动活塞，往复不停地运动着。

(2) 将活塞左右移动变成飞轮转动的装置：这部分的工作原理跟我们推磨子的情况很相似，如图 8-17 所示，人手前后移动，可以通过曲柄的作用，变成磨子的转动。在图 8-18 中，1 是活塞，2 是活塞杆，3 是十字头，4 是连杆，5 是曲柄，6 是飞轮。活塞上的活塞杆跟十字头连在一起，十字头在两块导板里左右运动。导板是彼此平行的，因此活塞杆只能左右移动，不能上下运动。十字头 3 通过连杆和曲柄连接在一起，当活塞运动时，连杆拉动曲柄，并带着机轴转动。当活塞在最左或最右的位置时，活塞杆、连杆和曲柄



图 8·17 人用双手推磨子

位于一条直线上。连杆不能使曲柄转动。这个位置叫做静点。为了使曲柄在静点的时候还能够继续转动，就在机轴上装置一个很重的飞轮，依靠它的惯性，使曲柄通过静点，维持机器连续不断地转动。

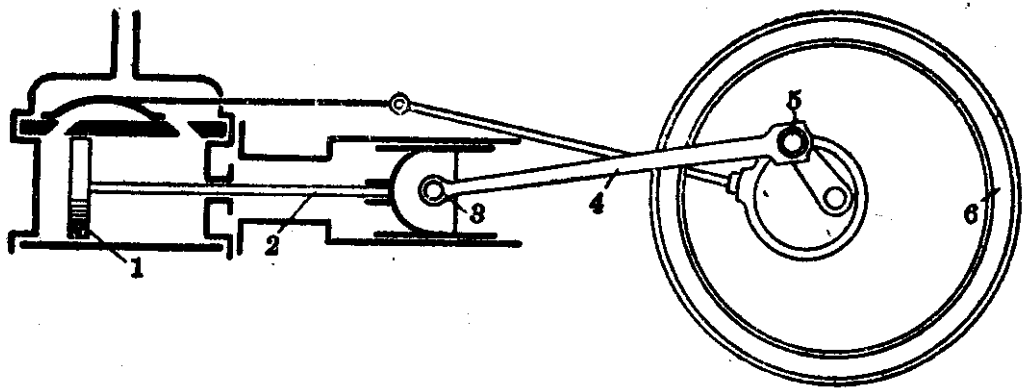


图 8·18 将活塞左右移动变成转动的装置

(3) 滑动阀的运动：图 8·19 滑动阀上的阀杆，由一个活动接头 1 和偏心轴杆 2 相连接。偏心轴杆的末端是一个圆环 3，叫做偏心轴套，轴套套在偏心轴 4 外，随着偏心轴的转动而运动，偏心轴牢固地装在机轴上，而机轴是通过偏心轴中心的一边的。当活塞推动机轴转动时，偏心轴随着而转动，推动偏心轴套，偏心轴套又带动偏心轴杆和阀杆作往复的运动。

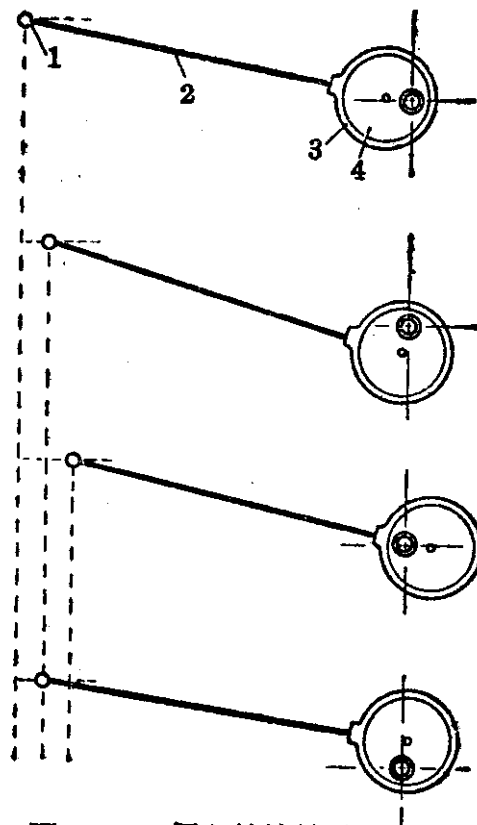


图 8·19 偏心輪的轉动

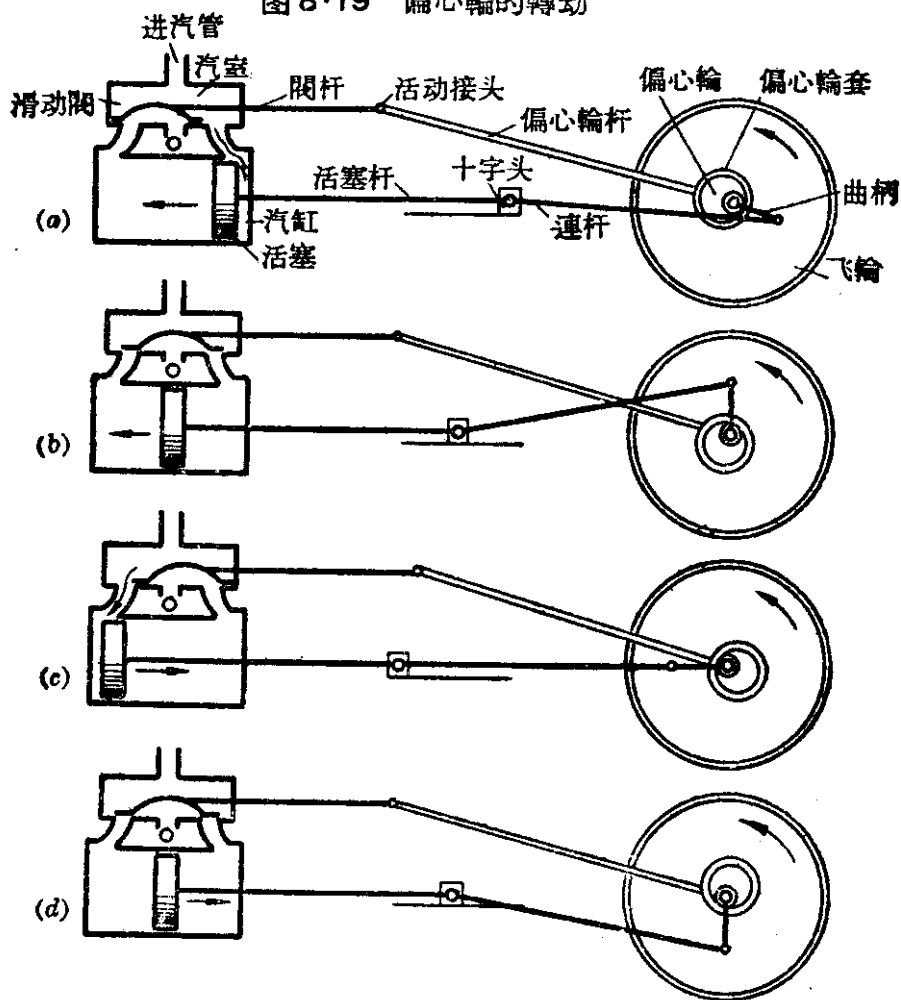


图 8·20 蒸汽机輪軸轉动一周各部分的工作示意图

滑动閥不仅要有規則地管理着蒸汽的进出，而且还要控制进汽的多少，因此滑动閥的形状，偏心輪和曲柄的相对位置都要經過精确的計算和設計，使它起到分配蒸汽和調节蒸汽的作用。

图 8·20 是蒸汽机輪軸轉动一周各部分的工作示意图。

2. 冷凝器 蒸汽在汽缸中膨脹做功以后，內能已經减少，我們把它叫做廢汽，或称为廢工质。要让蒸汽机繼續工作，就必须把廢工质从汽缸中排出，并再吸进新工质来。容納廢工质的装置就叫做冷凝器。

輪船上和工厂中使用的蒸汽机，大都装有特別的冷凝器，而火車上的蒸汽机是用大气作为冷凝器，直接把廢汽排入大气中。蒸汽机的冷凝器常常根据需要而有不同的形式。

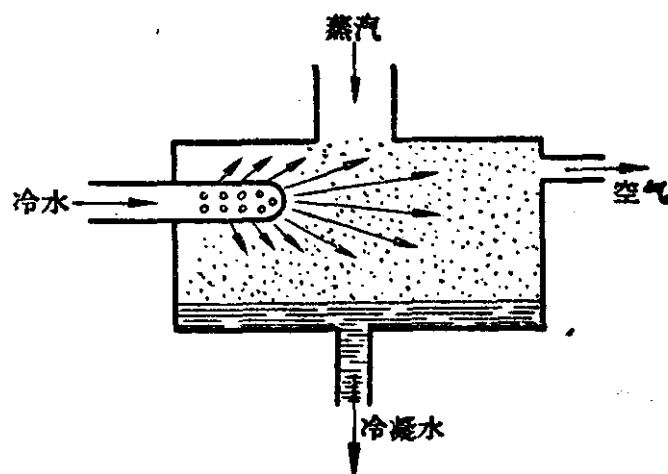


图 8·21 凝汽器构造示意图

图 8·21 是一种噴射式凝汽器的示意图。汽缸內的廢汽沿排汽管进入由鑄鉄制成的圓筒里，冷水从冷水管引入，在冷水管的末端有許多小孔，水就从小孔噴出，成为許多細流。蒸汽和噴入的冷水混合后，被冷却而凝結成水，并沿排水管流出。空气可以从抽气口抽出，以减低筒里的压强。

另一种是水管式冷凝器，如图 8·22 所示，它是由許多穿过鼓形圓筒的管子組成的。冷水在管中流过，而廢气在管外通过。廢汽冷却后大部分凝結成水并从排水管流出，它們經过去油污的处理后可以再行送到鍋炉里作为給水，因为在这样的水中所含有的杂质很少，所以对鍋炉的損害也很小，这就延长了鍋炉的寿命，同时由于廢汽水的温度較高，可以节约大量的燃料。

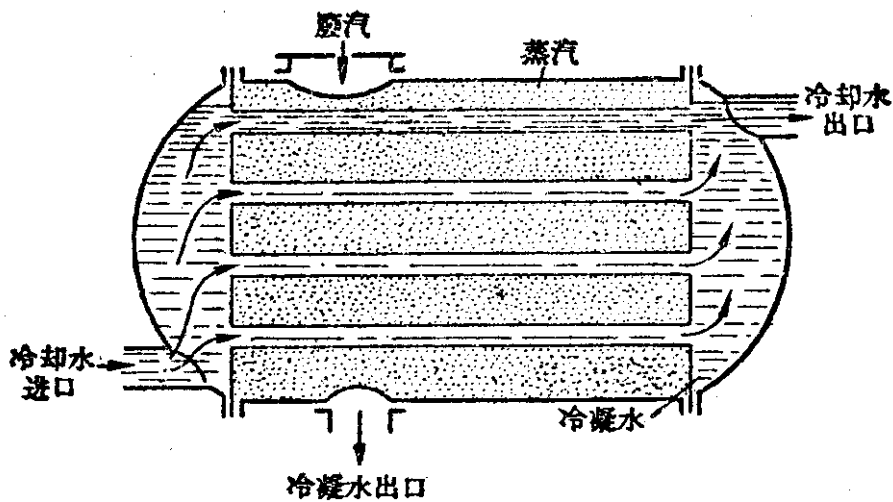


图 8·22 水管式冷凝器构造示意图

3. 提前閉汽和多級膨脹

如果从汽缸排出的廢蒸汽的温度和压强都很高，那么总是要白白地浪费掉許多能量，因此我們應該設法尽可能多地利用蒸汽膨脹做功。于是在生产实践經驗的基础上，人們又提出了提前閉气和多級膨脹这两种方法来充分利用蒸汽的能量。

提前閉汽：在活塞离开行程終点还有相当距离的时候，就設法使滑动閥将进汽管遮住，停止新蒸汽的供給，这叫做提前閉汽，或叫做断汽。断汽后汽缸中的蒸汽就要进行絕热膨脹，推动活塞做功并减少內能，于是蒸汽的压强和温度也都要降低。由于这时廢汽的温度比不实行提前閉汽时廢汽的温度低，并且排出的廢汽量也比不提前閉汽时来得少，这就使蒸汽中內能的利用率大大地提高。

多級膨脹：上面讲了用提前閉汽来使汽缸里的蒸汽絕热膨脹，結果使蒸汽的温度和压强迅速下降，但是由于蒸汽的温度下降时，汽缸壁和活塞的温度也要随着而下降，因此当再通入新蒸汽时，就需要将一部分热量傳給汽缸壁和活塞，而这部分热量在廢汽排出时又被廢汽帶走，这样就引起了换热損失。换热損失随着新蒸汽和廢汽的温度差的增加而增大。同时又由于蒸汽压强下降也会增加新蒸汽与廢汽之間的压强差。当压强差过大时，可能引起汽缸汽室中的漏汽現象，使一部分新蒸汽还没有做功就从排汽口泄出，造成能量的損失。为了避免上述問題的產生，可以采用多級膨脹的方法，不让蒸汽的温度在一个汽缸中降低得过多，而让它在第一級汽缸膨脹后，再进入第二、第三个汽缸进行膨脹，經過几次的膨脹后再排出去。这样，在每个汽缸里温度和压强的下降并不大，而换热損失和漏汽損失也就减少了。

蒸汽依次通过二个或三个汽缸，最后才作为废气从排气管排出的蒸汽机，叫做二級膨脹式蒸汽机，或者是三級膨脹式蒸汽机。图 8·23 所示的就是一个三級膨脹式蒸汽机。蒸汽每膨脹一次，体积就增加一些，同时压强也减小一些。所以第二級汽缸的活塞面积應該比第一級的大，第三級的又應該比第二級的大，这样才能使蒸汽对各級活塞的推力接近相等。

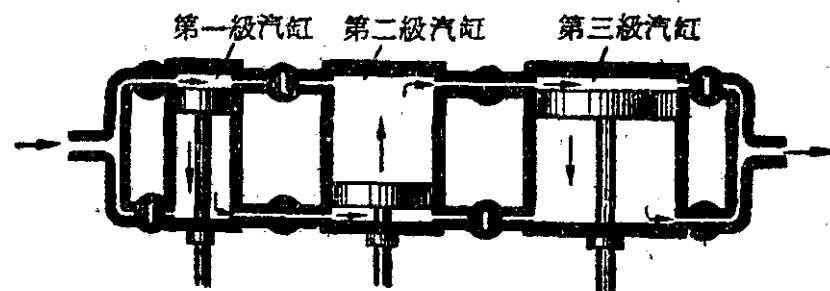


图 8·23 多級膨脹汽缸

多級膨脹蒸汽机的管理比較麻煩，因此在实际中，二級膨脹蒸汽机比較普遍，三級以上的就应用得比較少了。

总的来說，蒸汽机具有下列的优点：制造、保养、操作都比較简单，結構坚固耐用，可以使用多种燃料，开倒車很容易，并且也可以在很大的功率範圍內工作。所以它已經被广泛地应用在水路运输和铁路运输上。

§ 8·4 蒸汽在汽缸內膨脹做功

从 § 8·3 的学习中已經知道蒸汽机工作的主要原理是利用蒸汽在汽缸中膨脹做功。現在用 $P-V$ 图(图 8·24) 来研究汽缸中蒸汽压强变化的情况和蒸汽做功的过程。为了詳細地了解它的变化过程，我們把它分为六个阶段来討論。

(1) 开始时，汽缸左面的进汽管和汽室相通，过热蒸汽立即冲进汽缸。由于这时活塞在汽缸的左边还没有开始运动，所以汽的压强在急剧地增加。这一阶段，可

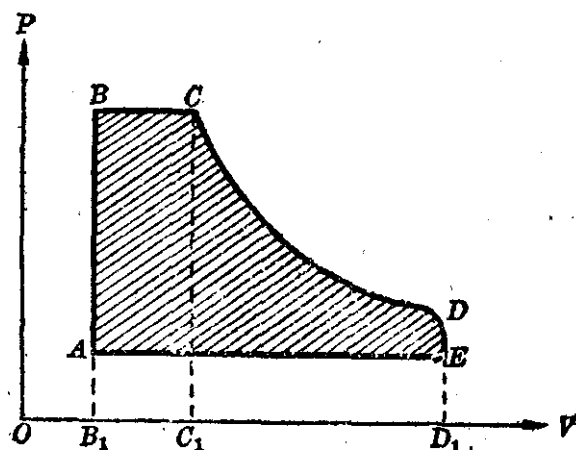


图 8·24 蒸汽机汽缸中蒸汽压强变化图綫

以近似地看作为等容变化过程：汽缸中蒸汽的体积不变，而压强却从冷凝器中废汽的压强升高到锅炉新蒸汽的压强。相应地在 $P-V$ 图中，以直线 AB 来表示。在等容升压时，蒸汽不对外做功。

(2) 左边的进气管还开放着，而活塞在高压蒸汽的作用下向右移动。因为在这一阶段汽缸和锅炉是始终相通的，所以蒸汽的压强总是保持不变，并等于锅炉中的蒸汽压。这个过程可以看作是等压变化过程，用等压线 BC 来表示。在等压变化过程中，蒸汽所做的功，在数值上等于四边形 BCC_1B_1B 的面积。

(3) 这时滑动阀把进气管关闭，汽缸里的蒸汽就开始绝热膨胀，消耗它的内能来推动活塞做功。因此，它的压强逐渐减小，我们用绝热线 CD 来表示它的变化。在这个过程中，蒸汽所做的功在数值上等于 CDD_1C_1C 所包围的面积。

(4) 当活塞到达汽缸的右端时，滑动阀使汽缸的左边和排气管相通，使已经做过功的蒸汽开始排出。这时蒸汽的压强突然下降到跟冷凝器中的压强相同，在这一瞬间，蒸汽体积可以近似地看做不变，我们用直线 DE 来表示。

(5) 由于飞轮的惯性，带动活塞通过静点，并向相反方向运动。因此为了要排除汽缸中的废汽，就要反抗它的压强而做功。废汽的压强总是等于冷凝器的压强，所以是一种等压变化过程，并用等压线 EA 来表示。但这时不是蒸汽对外做功，而是活塞依靠飞轮的惯性对废汽做功。活塞对废汽所做的功，在数值上等于 EAB_1D_1E 所包围的面积。

(6) 当活塞反向运动到开始时，左面的汽缸又恢复到情况(1)，这时蒸汽压强又开始急剧上升。只有采用这样周而复始的变化，才能使蒸汽机继续不断地工作。

那么蒸汽机运转一周究竟做了多少功呢？

从 $P-V$ 图中可以看出，图形 $B_1BCDD_1B_1$ 所包围的面积表示蒸汽在等压变化和绝热膨胀时所做的功的和，也就是蒸汽对活塞

所做的总功。图形 EAB_1D_1E 包圍的面积表示活塞在排除廢汽时对廢汽所做的功。因此要計算蒸汽机运轉一周所做的有用功，应该从 $B_1BCDD_1B_1$ 的面积中，减去 EAB_1D_1E 的面积，也就是应当等于图形 $ABCDEA$ 的面积。

根据图形可以計算出蒸汽机运轉一周所做的功，如果还知道它在单位時間里的运轉周数，就能够計算出蒸汽机的功率和某一段時間內所做的总功。

图綫 $ABCDEA$ 称为蒸汽机的示功图。实际上由于蒸汽机在工作中要受到很多其他因素的影响，所以它的几个过程不是严格地等容、等压或絕热地进行，而仅仅是近似于这种情况。为了簡化問題、便于掌握事物的本质起見，我們常常忽略一些次要的因素。但是在进行蒸汽机的設計，研究蒸汽量的分配和汽缸的有效压强时，就要掌握住汽缸中的具体情况。这时常常用一些精密的仪器，将汽缸中压强变化的实际情况描繪出来，再做詳細的計算和研究。由于这已超出本书的范围，这里不再詳細地說明了。

习 題 8·4

1. 蒸汽机是怎样工作的？
2. 多級膨脹和提前閉气的作用是什么？
3. 冷凝器的构造和用途是怎样的？
4. 蒸汽机的压强体积图是怎样画成的？图上的各綫段表示什么意义？

§ 8·5 热机的組成部分。热机的效率

从鍋炉和蒸汽机的工作过程，可以清楚地看到燃料和工质是热机进行工作所必需的物质条件。为了能够連續不断地完成能量的轉变，热机必須包括三个組成部分——发热器、工作部分和冷凝器。发热器是使燃料的化学能轉变为工质內能的装置。工作部分是工质膨脹做功的装置，在这里工质的一部分內能轉变为其他形

式的能。冷凝器是容納由工作部分排出的廢工质的装置，廢工质中总是帶有部分的內能。热机的种类很多，不同类型的热机其构造和能量轉变的方式也是不同的，但是这三个基本部分却总是具备的。

下面我們就按照热机的三个組成部分来研究热机的效率。

1. 燃燒效率 燃料在发热器中燃燒时，往往由于設備不够完善而不能完全燃燒，同时也不可能把燃燒时所釋放的化学能全部轉变为工质的內能。設燃料經過完全燃燒所能够放出的热量是 Q ，傳遞給工质的热量只有 Q_1 ，那么燃燒效率：

$$\eta_{\text{燃}} = \frac{Q_1}{Q}.$$

因为燃料的燃燒过程是在鍋炉中进行的，所以燃燒效率也称为鍋炉效率。

2. 热效率 工质从发热器吸收到的热量 Q_1 ，在做功时并不能全部轉变为机械功，其中总是有一部分热量 Q_2 要被廢工质带出热机的工作部分。所以轉变成机械功的淨热量是 $Q_1 - Q_2$ ，而热机的热效率：

$$\eta_{\text{热}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

3. 机械效率 由热量 $Q_1 - Q_2$ 轉变而成的机械功不能全部傳到发动机的机軸上作为输出的有用功，其中有一部分要消耗在傳动装置上，例如消耗在活塞、十字头、曲柄以及轉动軸等处的摩擦上。因此傳到机軸上的与有用功相当的热量 Q_3 ，又是 $Q_1 - Q_2$ 中的一部分。所以热机的机械效率：

$$\eta_{\text{机}} = \frac{Q_3}{Q_1 - Q_2}.$$

4. 热机的总效率 热机的总效率又叫做热机的經濟效率，或有效效率，有时也簡称为效率。它是与最后轉变为机軸上有用功相当的热量 Q_3 跟燃料完全燃燒时所能够放出的热量 Q 的比值，

通常用百分比来表示。所以热机的总效率：

$$\eta_{总} = \frac{Q_3}{Q} \times 100\%.$$

很容易看出，

$$\frac{Q_3}{Q} = \frac{Q_1}{Q} \cdot \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot \frac{Q_3}{Q_1 - Q_2},$$

也就是说

$$\eta_{总} = \eta_{燃} \cdot \eta_{热} \cdot \eta_{机}.$$

我們可以用一个具体的例子来说明热机各部分的效率。

在現代的蒸汽机中，1 千克煤完全燃燒后，产生 7000 千卡的热量，它大致分配如下：

(1) 鍋炉損失 1400 千卡

$$\therefore \text{鍋炉的效率} = \frac{7000 - 1400}{7000} = \frac{5600}{7000} = 80\%.$$

(2) 汽管傳送蒸汽时損失 280 千卡。

(3) 蒸汽在汽管和汽缸里液化时損失 950 千卡。

(4) 廢汽帶走的热量 3409 千卡。

蒸汽在汽缸里損失的热量总共是

$$280 + 950 + 3409 = 4639 \text{ 千卡,}$$

轉变为机械功的热量是 $5600 - 4639 = 961$ 千卡，

$$\therefore \text{热效率} = \frac{961}{5600} = 17\%.$$

(5) 机械各部分摩擦損失 170 千卡，

$$\therefore \text{机械效率} = \frac{961 - 170}{961} = \frac{791}{961} = 82\%.$$

(6) 与有用功相当的热量是 791 千卡

$$\text{热机的总效率} = \frac{791}{7000} = 11.30\%$$

或

$$\eta_{总} = \eta_{燃} \cdot \eta_{热} \cdot \eta_{机} = 11.30\%.$$

提高热机效率的方法：从上面的例子中，可以看到蒸汽机的效率是很低的，目前最好的蒸汽机，其效率也不过在15%左右。所以提高热机效率一直是热力工程中的一个重要任务，一般是从提高热机的燃烧效率、热效率和机械效率三方面着手的。

首先是改进锅炉的装置来提高热机的燃烧效率问题。这可以用煤粉来代替煤块，将煤粉喷入火室中，并输入热空气以帮助燃烧，使煤能更完全地燃烧。同时改进水管锅炉的构造，增加水的受热面积，以及利用省煤器、空气预热器等等，所有这些都为提高锅炉的燃烧效率提供了条件。

其次是提高发热器的温度、压强和减小冷凝器的温度、压强，借以提高热机的热效率。

法国工程师卡诺在理论上研究了热机效率，并提出了没有热损失和摩擦损失的、热效率最高的理想热机的模型。理想热机热效率的计算公式是

$$\eta_{\text{热}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

其中 T_1 代表发热器的绝对温度， T_2 代表冷凝器的绝对温度。公式指出了提高热机热效率的主要途径，这就是提高 T_1 减小 T_2 。因此，现在锅炉正朝着高温高压方向发展。在锅炉中都用过热器来提高蒸汽的温度和压强，并且用提前闭汽、多级膨胀、减低冷凝器压强等方法来降低废汽的温度，从而提高了热效率。

最后，也可以用改进机械组合，使用润滑油等方法来减小摩擦，提高机械效率，从而使热机的总效率提高。

除了增大热机的效率外，还可以充分地利用废汽所带走的热量，这虽然不是提高热机的效率，但是从能量的利用来说，还是很有价值的。我们可以将汽缸排出的废汽直接送到染织、纺织、化工等工厂供加热和其他生产过程使用。同时，也可以将冷凝器中排出的热水通过热水管送往生产单位或宿舍供应生产或生活上的使

用。这样就可以大大地减少能量的损失，使燃料中所释放的化学能得到充分的利用。

例 1. 蒸汽机活塞的直径是 49 厘米，冲程是 1 米，蒸汽的平均压强是 2 公斤/厘米²，计算工质每膨胀一次时，对活塞所做的功。

【解】 如果要用示功图来计算蒸汽每膨胀一次所做的功，就必须先知道汽缸中每一时刻的压强，然后才能从作出的 $P-V$ 图中求出功，但是为了使运算简易起见，我们可以用平均压强乘以行程中的距离来粗略地计算蒸汽每膨胀一次所做的功。

$$\text{活塞的面积 } A = \pi r^2 = 3.14 \left(\frac{49}{2} \right)^2 = 1884.785 \text{ 厘米}^2,$$

$$\text{活塞上所受到的力 } F = AP = 1884.785 \times 2 = 3769.6 \text{ 公斤},$$

工质每膨胀一次，对活塞所做的功

$$W = F \cdot S = 3769.6 \times 1 = 3769.6 \text{ 公斤} \cdot \text{米}.$$

例 2. 在 $\Pi \omega_1$ 型机车的蒸汽机中，活塞的面积是 2640 厘米²，活塞的冲程是 71 厘米，当蒸汽进入汽缸时的压强是 14 公斤/厘米²，活塞移动到冲程的 $\frac{1}{5}$ 位置时停止送汽，在其余 $\frac{4}{5}$ 冲程上活塞是靠蒸汽膨胀移动的。假定蒸汽压强的减小是均匀的，当活塞移动到冲程终点时蒸汽的压强减小到 2 公斤/厘米²。求一个冲程中蒸汽所做的功。

【解】 解这一题能使我们更具体地理解这种蒸汽机的结构和它的工作过程。

(1) 先计算断汽前蒸汽对活塞所做的功。

断汽以前蒸汽对活塞的压力为

$$\begin{aligned} F_1 &= P_1 A, \\ &= 14 \times 2640 = 36,960 \text{ 公斤}, \end{aligned}$$

活塞移动的距离为

$$S_1 = \frac{0.71}{5} \approx 0.14 \text{ 米},$$

蒸汽所做的功为

$$W_1 = 36,960 \times 0.14 = 5174 \text{ 公斤} \cdot \text{米}.$$

(2) 计算断汽后蒸汽对活塞所做的功.

由于假设断汽后蒸汽膨胀时压强的降低是均匀的, 所以蒸汽的平均压强为

$$P_2 = \frac{14+2}{2} = 8 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

断汽以后蒸汽对活塞的平均压力为

$$\begin{aligned} F_2 &= P_2 A \\ &= 8 \times 2640 = 21,120 \text{ 公斤}, \end{aligned}$$

活塞移动的距离为

$$S_2 = \frac{4 \times 0.71}{5} = 0.57 \text{ 米},$$

这时蒸汽所做的功为

$$W_2 = 21,120 \times 0.57 = 12,038 \text{ 公斤} \cdot \text{米}.$$

在一个冲程中蒸汽所做的功是

$$\begin{aligned} W &= W_1 + W_2 \\ &= 5174 + 12,038 \approx 1.72 \times 10^4 \text{ 公斤} \cdot \text{米}. \end{aligned}$$

例 3. (1) 蒸汽机锅炉里的水温为 100°C , 水管里的水要在 250°C 沸腾, 这时它的汽化热是 408 卡/克. 如果蒸汽生产量是 550 公斤/小时, 而产生 280°C 的过热蒸汽 (比热 0.5 卡/克·度), 用去煤 (燃烧值 7000 千卡/公斤) 60 公斤. 求锅炉效率.

(2) 假使把这些蒸汽通过汽缸, 使它做机械功, 功率是 100 马力, 求热效率.

(3) 蒸汽机的活塞半径是 10 厘米, 冲程是 50 厘米, 飞轮转速是 150 次/分, 求活塞上的平均压强.

(4) 整个装置的机械损失功率是 10 马力, 求机械效率.

(5) 求这台热机的总效率.

【解】 (1) 求燃烧效率:

1) 550 公斤水从 100°C 上升到 250°C 时所需要的热量是

$$550 \times (250 - 100) \times 1 = 82,500 \text{ 千卡.}$$

2) 550 公斤水在 250°C 化为 550 公斤的饱和汽所需的热量是

250°C 时水的汽化热是 408 千卡/公斤,

$$550 \times 408 = 224,400 \text{ 千卡.}$$

3) 250°C 饱和蒸汽在过热器中变为 280°C 的过热蒸汽所需要的热量是

$$550 \times (280 - 250) 0.5 = 8250 \text{ 千卡.}$$

4) 产生 550 公斤 280°C 的过热蒸汽一共需要的热量是

$$82,500 + 224,400 + 8250 = 315,150 \text{ 千卡.}$$

5) 60 公斤煤所发出的热量是

$$60 \times 7000 = 420,000 \text{ 千卡.}$$

$$6) \quad \eta_{\text{热}} = \frac{315,150}{420,000} = 75\%.$$

(2) 求热效率:

功率 100 馬力在 1 小时所做的功是

$$W = Nt = 100 \times 75 \times 3600 = 27,000,000 \text{ 公斤} \cdot \text{米.}$$

相当于 100 馬力做 1 小时功的热量:

$$Q = \frac{Nt}{J} = \frac{27,000,000}{427} = 63,230 \text{ 千卡,}$$

$$\eta_{\text{热}} = \frac{63,230}{315,150} = 20\%.$$

(3) 求活塞上的平均压强 P :

$$W = FS = PAS = P\pi r^2 S.$$

因为飞輪每分钟轉 150 次,即每秒钟轉 2.5 次,每次来回 2 冲程,每轉一周,活塞向左向右各移动一次,所以每秒钟作 5 冲程.

$$N = 5W = 5P\pi r^2 S,$$

$$P = \frac{N}{5\pi r^2 S} = \frac{100 \times 75}{5 \times 3.14 \times 10^2 \times 0.5} = 9.6 \text{ 公斤/厘米}^2.$$

(4) 求机械效率:

功率为 100 馬力, 損失 10 馬力, 尚有 90 馬力的功轉变为有用功.

$$\eta_{\text{机}} = \frac{90}{100} = 90\%.$$

(5) 这台热机的总热率:

$$\eta_{\text{总}} = \eta_{\text{燃}} \times \eta_{\text{热}} \times \eta_{\text{机}} = 75\% \times 20\% \times 90\% = 13.5\%.$$

习 題 8.5

1. 热机在构造上有哪些基本組成部分? 各部分的作用怎样?
2. 什么叫做热机的热效率? 如何来提高热机的热效率?
3. 什么叫做热机的机械效率? 什么叫做热机的总效率? 怎样計算热机的总效率?

4. 蒸汽鍋炉里盛有 100°C 的水, 水管里的水在 300°C 时沸騰, 它的汽化热是 300 卡/克, 蒸汽的生产量是 600 公斤/小时, 每一小时用煤 (燃燒值 7000 千卡/公斤) 60 公斤.

(1) 求鍋炉的效率.

(2) 假使把这些蒸汽通过汽缸, 使它轉变为机械功, 功率是 100 馬力, 求热效率.

(3) 蒸汽机的活塞半徑是 10 厘米, 冲程是 50 厘米, 飞輪的轉速是 150 次/分, 求活塞上的平均压强.

(4) 整个装置的机械損失功率是 10 馬力, 求机械效率.

(5) 这台热机的有效效率是多少?

5. 蒸汽机圓形活塞的直徑是 49 厘米, 冲程是 1 米, 蒸汽平均压强是 2 公斤/厘米², 飞輪每分钟轉动 120 次, 如果蒸汽机的机械效率是 85%, 求

(1) 在一个冲程內蒸汽所做的功, (2) 有用功率.

§ 8.6 內 燃 机

前面所讲的蒸汽机, 是在汽缸外部将燃料的化学能轉变为蒸

汽的内能,再使蒸汽推动活塞运动。内燃机却不是这样的。它所用的燃料和空气是在汽缸里燃烧的。燃烧时气体急剧地膨胀做功,并推动活塞运动。也就是说它的发热器是在工作部分之内的,正是由于这一点,它被称为内燃机。

内燃机主要可以分为奥托内燃机和狄塞尔内燃机两种。奥托内燃机通常用汽油作为燃料;狄塞尔内燃机用柴油作为燃料,所以又称为柴油机。

1. 奥托内燃机 图8.25是一个单汽缸奥托内燃机的构造图,它的构造可以分为下面三部分来叙述。

(1) 汽缸: 汽缸是燃料燃烧膨胀做功的部分。图8.25中1

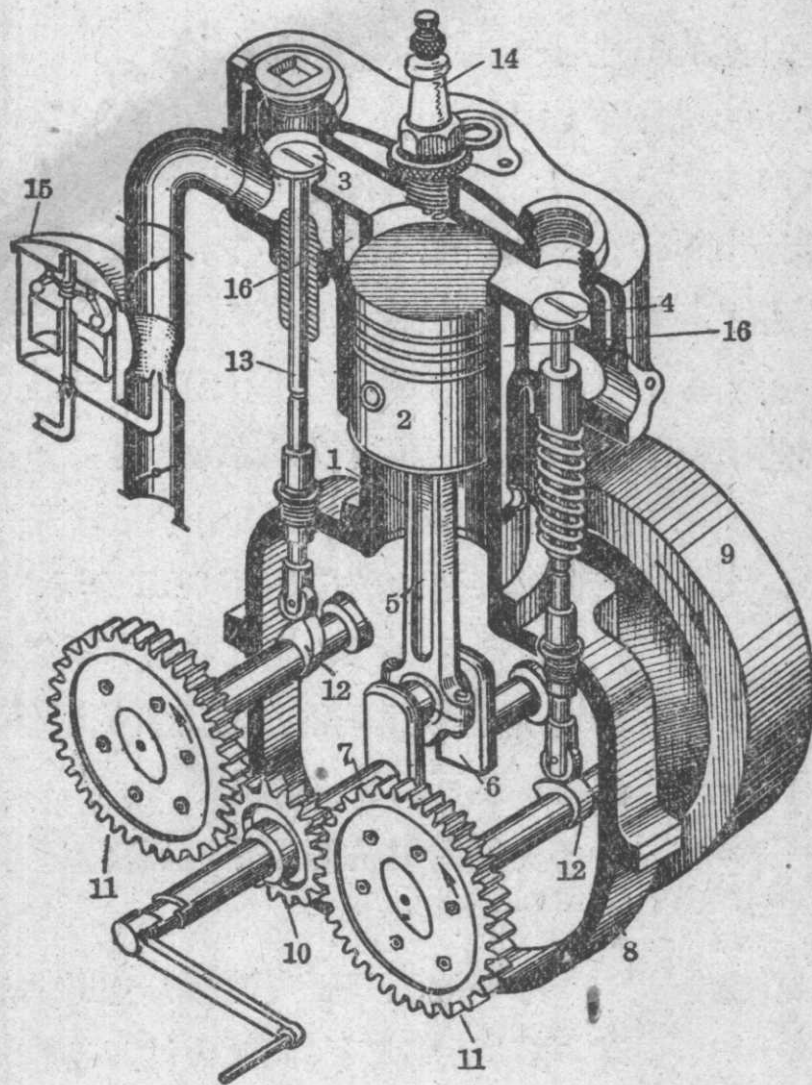


图8.25 内燃机的剖面图

是汽缸，它的內壁非常光滑，頂端由汽缸盖封閉着，汽缸盖下面凹进去的部分就是燃燒室。汽缸孔腔下面是开着的。2 是活塞（見图 8·26），它是一个中空的圓筒，上端封閉，外表面上有环形槽，槽內套有彈性很强的鋼制活塞环，用来减少活塞往返运动时的磨耗損失，同时增加汽缸和活塞之間的緊密性。汽缸中还有两个气閥，3 是进气閥，4 是排气閥。

(2) 将活塞的移动变成机軸轉动的装置：在內燃机的活塞里有活塞梢，它通过連杆 5 和曲柄 6、机軸 7 連在一起，这样就能把活塞的往返运动改变成曲軸的轉动。曲軸装在曲軸箱 8 內。在它的一端还装有一个飞輪 9。利用飞輪的慣性可以克服曲軸轉动的不均匀性。

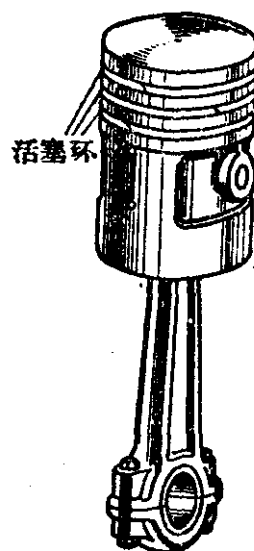


图 8·26 內燃机
活塞的外形图

(3) 汽門的自动开閉：进气閥和排气閥的开閉，是由齿輪 10、11 以及凸輪 12 配合管理的。凸輪的形状象一个桃子，俗称桃子板，它和气閥杆 13 相連接。凸輪軸上装有大齿輪，大齿輪的齿数是小齿輪的两倍，曲軸每轉动两周，才使大齿輪軸轉动一次，因为活塞上下移动两次，气閥才各打开一次。气門自动开閉的装置如图 8·27 所示。

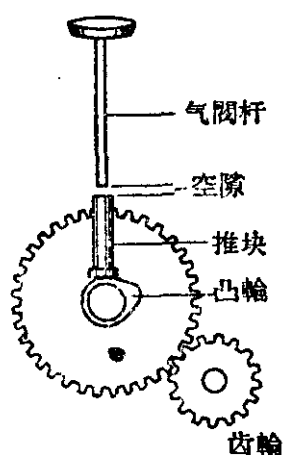


图 8·27 气門自动开
閉的装置

图 8·25 中 14 是火花塞，15 是化油器，16 是水套。这些都是內燃机的附件，将在后面再加說明。

奥托內燃机的工作过程可以分为四个冲程来进行。

第一冲程是吸气冲程。这时曲軸向下轉动，带动活塞向下，同时通过齿輪带动凸輪旋轉，使凸輪的凸起部分頂开进气閥，让可燃燒的气体（汽油蒸汽和

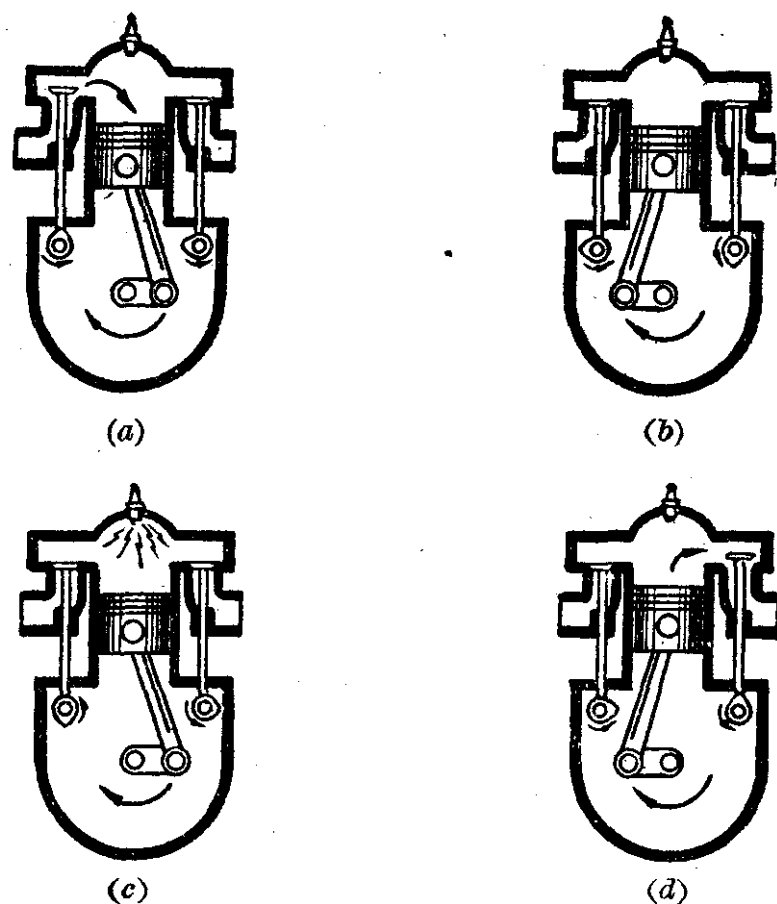


图 8·28 奥托内燃机四个冲程

- (a) 吸气冲程； (b) 压缩冲程；
(c) 做功(爆发)冲程； (d) 排气冲程

空气混合物)进入汽缸,如图 8·28(a) 所示。

第二冲程是压缩冲程。曲轴带动活塞向上,凸轮的凸起部分这时已经转了过去,进气阀已经关闭。由于凸轮还只转过 $\frac{1}{4}$ 周,所以排气阀仍是关闭着的,如图 8·28(b) 所示。活塞向上运动时,压缩第一冲程吸入的可燃气体。气体被压缩后温度可以升到 300°C 左右。

第三冲程是做功冲程。在第二冲程的最后火花塞发出电火花,混合气体迅速燃烧,温度骤然升高到 1600°C 至 1800°C 。高温高压烟气急剧膨胀,推动活塞向下做功,此时曲柄转动半周而凸轮转过 $\frac{1}{4}$ 周,两个气阀仍然紧闭(图 8·28(c))。

第四冲程是排气冲程。由于飞轮的惯性,曲柄转动,使活塞向

上运动,这时凸輪頂开排气閥,将廢气排出(图 8·28(d)).

四个冲程是內燃机的一个循环. 在一个循环中,气体的压强将发生怎样的变化呢? 同时气体又是怎样膨脹做功的呢? 这可以用 $P-V$ 图来说明:

在吸气冲程中,活塞向下运动同时让气体进入汽缸,这时气体的压强几乎保持不变(在图 8·29 中用 AB 綫表示). 在压缩冲程中,活塞向上运动压缩气体,使气体压强逐渐增加,这时活塞对气体做功,消耗了机械能,增加了气体的內能. 这个过程我們用曲线 BC 来表示. 在压缩冲程終了、做功冲程开始时,气体突然燃燒,压强

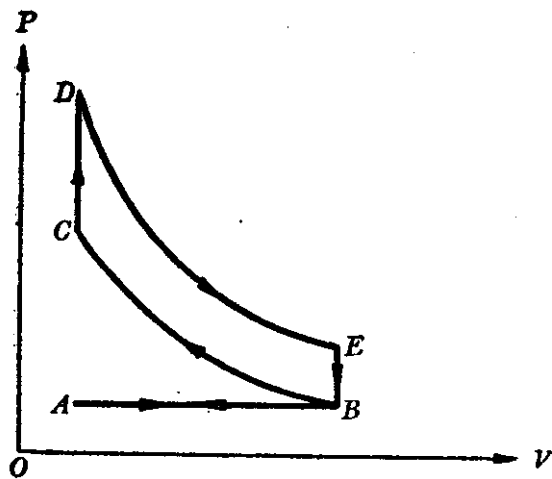


图 8·29. 奥托內燃机压强-体积图

- AB —等压吸气过程;
- BC —絕热压缩过程;
- CD —等容燃燒过程;
- DE —絕热膨脹做功过程;
- EB —等容放热过程;
- BA —等压排气过程

激增,在这瞬間体积还来不及变化,所以我們把它看作是等容变化,并用 CD 綫来表示. 气体压强增加后就要作絕热膨脹推动活塞向下做功,同时消耗本身的內能轉变为机械功,在这一过程中压强逐渐减小,我們用絕热綫 DE 来表示. 在做功冲程終了时,排气閥开放,气体压强突然降低,而体积还来不及变化,我們用等容綫 EB 来表示. 最后是排气冲程,活塞由于慣性作用繼續向上运动,同时排除廢气,这时压强不变,我們用 BA 綫来表示. 这样得到的图綫叫做奥托循环图綫,根据用 $P-V$ 綫計算功的方法,我們可以知道面积 $BCDEB$ 代表在一次循环中气体对活塞所做的淨功.

从前面所讲的过程中可以清楚地看到,在一个循环中只有第三冲程是动力冲程,即高压气体膨脹做功的冲程,其他三个冲程不但沒有做功,还要消耗一部分机械能. 这里可以看出飞輪的作用

是很大的，它依靠慣性轉動帶動連杆通過靜點，并且还帶動活塞完成其他三個沖程。

因為在四個沖程中只有一個動力沖程，所以單汽缸內燃機在工作時要產生不均勻的震動。利用多汽缸組合而成的內燃機就可消除這個缺點。其中每一個汽缸的活塞都能帶動機軸轉動，只要把各汽缸的做功沖程錯開，就可以不用很重的飛輪，或者甚至不用飛輪。汽缸越多，機軸轉動得越均勻。圖 8·30 表示八汽缸發動機的示意圖。

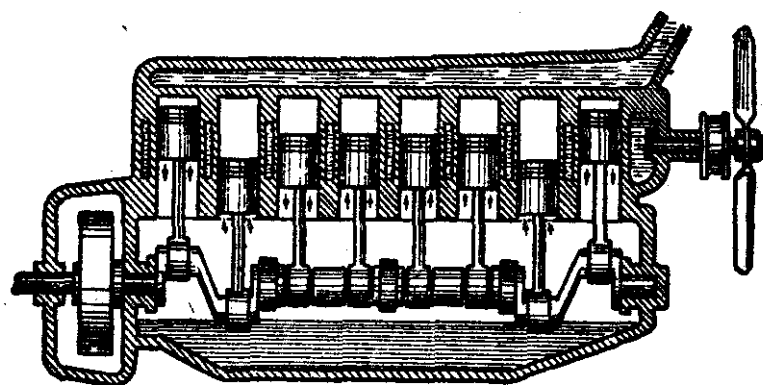


圖 8·30 八汽缸發動機圖

從內燃機做功的條件來看，可燃氣體的化學反應是它的能源，造成工質的高溫；汽缸活塞是它的工作部分；做了功的廢工質排出到大气中以大气作為它的冷凝器。因為可燃燒的混合氣體在汽缸內燃燒時所產生的溫度很高（約在 1500°C 以上），所以內燃機的效率比蒸汽發動機的效率要高得多。奧托內燃機在工作中，約有 25% 的热量作為有用功，10% 的热量損失於摩擦中，25% 的热量由廢汽帶走，40% 的热量傳給汽缸外的冷却水。因此它的效率一般是在 20~30%。

奧托內燃機的功率大小不一，小的可以小到 $\frac{1}{2}$ 馬力，大的可以大到 2500 馬力，它的優點是機身小巧輕便，動作迅速，因此被廣泛地應用在汽車、飛機、坦克、潛水艇等交通工具和軍事設備上。

2. 內燃机的四个主要的輔助設備系統

內燃机除了上面所叙述的基本构造外, 还有燃料、点火、冷却、潤滑四个輔助設備系統.

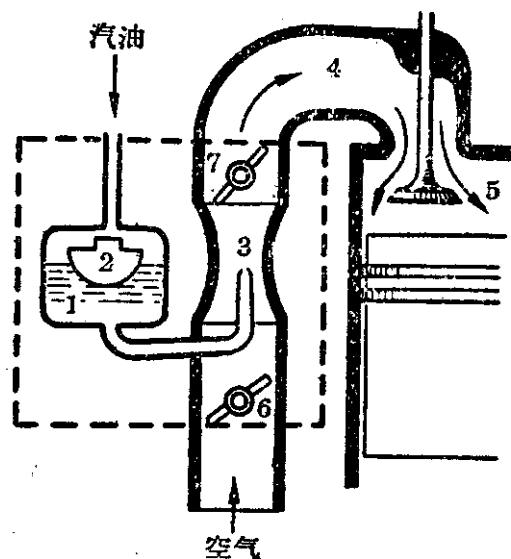


图 8-31 燃料系統图

1—油池; 2—浮子; 3—噴油嘴; 4—进气管; 5—气缸; 6—风門; 7—油門

燃料系統的构造如图 8-31 所示. 化油器是它的主要部分, 它的作用是把汽油和空气按一定的比例配制成雾状的混合气体, 以供給汽缸作为燃料使用.

点火系統的构造如图 8-32 所示. 它是由蓄電池、綫圈、火花塞等部分組成的. 火花塞是由齿輪来管理的. 它能够按时在汽缸中产生电火花, 使压缩的混合气体燃燒爆炸.

冷却系統的构造如图 8-33 所示. 燃料在汽缸中燃燒时, 汽缸的温度可以

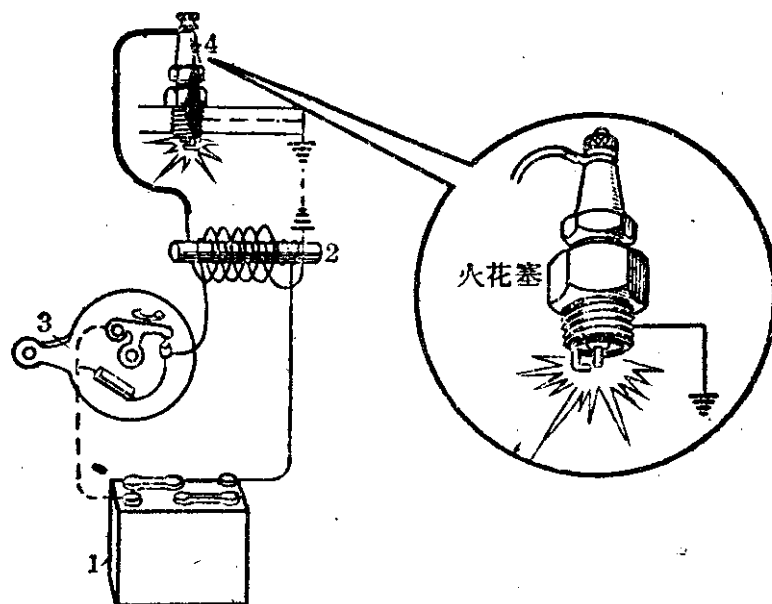


图 8-32 点火系統图

1—蓄電池; 2—綫圈; 3—控制器; 4—火花塞

升到 2000°C 左右, 使汽缸壁和活塞发热, 以致使机件遭受损坏, 因此常常在汽缸外层包有一个水套, 使水可以在其中流动. 由于水的对流作用, 热水上升进入散热器, 降温后, 再用抽水机将冷水打回至水套, 使水循环地冷却汽缸. 小型內燃机和少数飞机用的內燃机也常利用空气减热法, 設法增加汽缸外壳与空气接触的面积, 使热量散逸到空气中去.

25

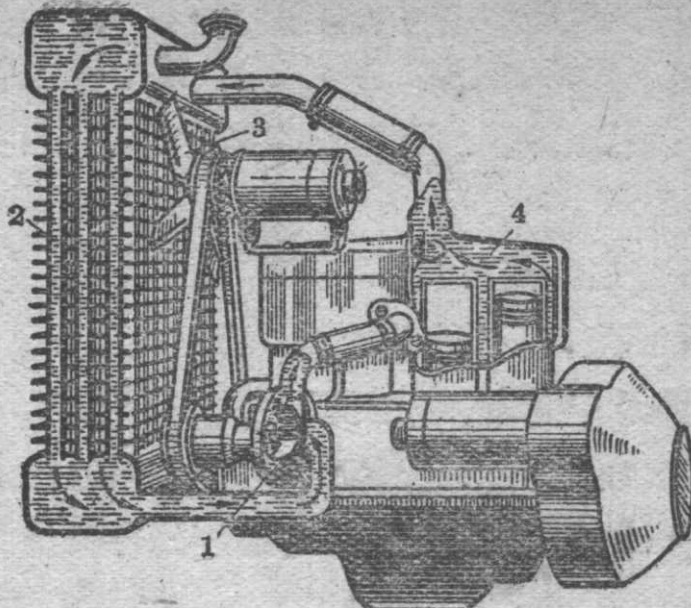


图 8-33 冷却系統图

1—水泵；2—散热器；3—风扇；4—冷却水套

潤滑系統 內燃机的各部分机件，在运动时要相互摩擦，这不但要損耗一部分机械能，而且还要发热使机件遭受損坏。为了防止金属磨損，在內燃机內装有油盘、抽油泵等装置，并由这些装置向机件的各部分輸送潤滑油涂抹在机件表面，以减小摩擦。

3. 狄塞耳內燃机 狄塞耳內燃机是十九世紀末叶由德国工程师狄塞耳所設計的，它的构造原理和奧托內燃机大致相同，所不同的是它将石油或柴油噴进汽缸作为燃料燃燒，而不是用汽油的混合气体作为燃料，同时在压縮冲程中，也不是压縮可燃混合气体，而是单纯压縮空气。图 8-34 是狄塞耳內燃机构造的示意图。汽缸的右端并没有火花塞，但却装有一个噴油嘴。排气閥、进气閥

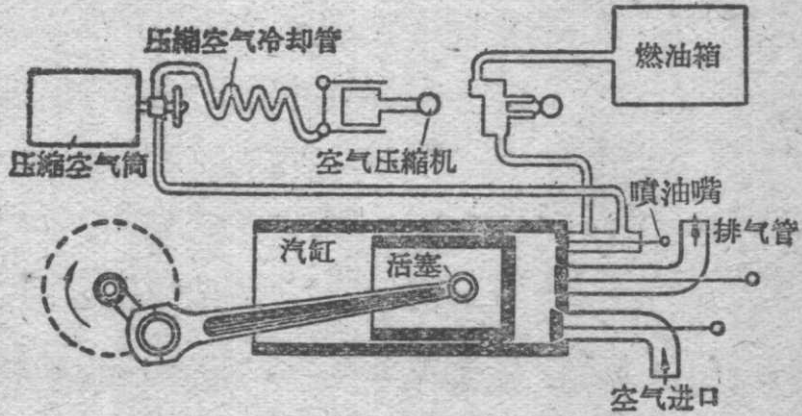


图 8-34

和噴油嘴都由一个專門的調節軸来控制,調節軸由机軸帶動。

狄塞耳內燃机的工作过程也可以分为四个冲程来进行:

第一冲程是吸气冲程。活塞向左运动同时进气閥打开,使空气进入汽缸。

第二冲程是压缩冲程。两个气閥都关闭,活塞向右运动并压缩空气,使它的温度高达 $500\sim 700^{\circ}\text{C}$, 超过柴油的着火点。

第三冲程是做功冲程。在压缩冲程结束时,柴油在高压作用下从噴油嘴高速噴入汽缸,雾状液滴与热空气相遇立刻燃燒,由于柴油噴发时间較长,所以燃燒时间也較长,不象奥托內燃机內汽油是驟然爆发燃燒的那样。柴油的燃燒温度可以高达 2000°C 左右,而活塞就在高温高压的烟气作用下向左运动。

第四冲程是排气冲程。活塞向右运动同时打开排气閥进行排气。

狄塞耳內燃机的工作过程也可以用 $P-V$ 图綫(图 8·35)来表示。

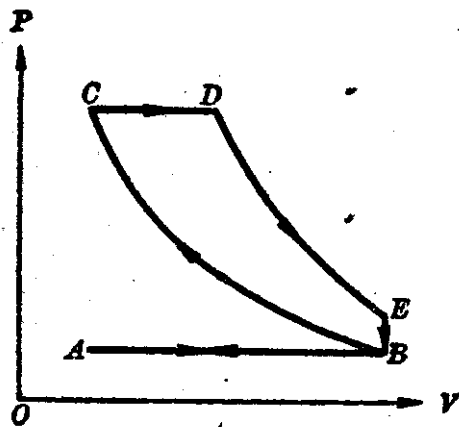


图 8·35 狄塞耳內燃机
 $P-V$ 图

- AB—等压吸气过程;
- BC—絕热压缩过程;
- CD—等压燃燒过程;
- DE—絕热膨胀作功过程;
- EB—等容放热过程;
- BA—等压排气过程

吸气过程是在較小的气压下等压进行的,用直綫 AB 来表示。在压缩冲程中,气压逐渐上升,用絕热曲綫 BC 来表示。在做功冲程开始一段时间內,柴油正在燃燒中,活塞在一定的压强下移动,用 CD 綫来表示。等到燃燒停止后,烟气膨胀推动活塞作功,用 DE 綫来表示。在排气冲程开始时,排气閥开启,汽缸中的压强又突然降到大气压强,而体积还来不及变化,用 EB 綫来表示。在排气冲程中,廢气排入大

气中,体积逐渐减小,用 BA 綫来表示。狄塞耳循环图綫 $BCDEB$ 所包圍的面积在数值上代表一个循环內所做的淨功。

狄塞耳內燃机和奥托內燃机相比有很多优点。首先是它的效率可以高达30%~40%。理論和实验都指出,如果加大气体压缩比,就可以提高內燃机的效率。所謂压缩比,就是气体进入汽缸后的最大体积,跟被压缩后最小体积的比值(如图8-36)。但压缩比不能过于大,因为它受着其他条件的限制。在奥托內燃机里,被压缩的是汽油和空气的混合气体,如果压缩得太过分,温度会升得太高,这就可能使活塞在还没有达到压缩冲程的終点

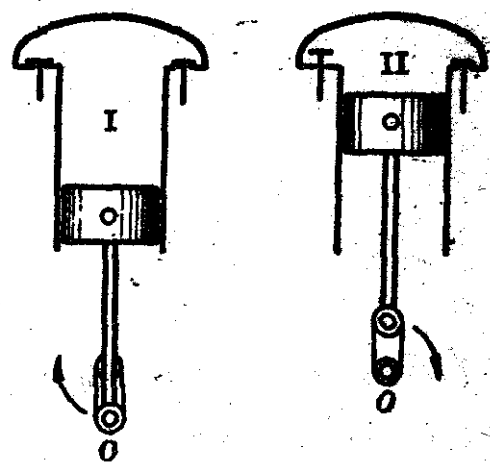


图 8-36

时就自燃起来。这时活塞本应向上运动,却由于自燃气体的膨胀而向下运动,結果机輪反向轉动,产生打倒車的现象,这对机件的损坏是很大的。奥托內燃机的压缩比一般不能超过4~5。而在狄塞耳內燃机里,被压缩的是空气,压缩比不受液体燃料燃点的限制,因此可以提高到12~20。但也不宜过高,否則必須采用很笨重的机件才能承受压缩終了时的压强。

其次,狄塞耳內燃机所使用的燃料是价廉的柴油或原油,因此它比使用汽油的奥托內燃机经济。此外,柴油着火点高,不象汽油那样容易引起火灾,儲藏也比较方便。柴油机的功率很高;常常可以达到几万匹馬力左右。

柴油机的缺点是构造比汽油机笨重,轉速較小,振动比較剧烈,起动的慢。从性能来看,它比較适宜于长途运输和負荷大的工作,所以常常被采用在拖拉机、載重汽車、舰船、坦克、潜水艇等上做动力机,而飞机、小汽車、小摩托車等就常常采用汽油机。目前,狄塞耳內燃机已經被广泛地应用在铁路运输上,这种机車叫做內燃机車。它不仅比蒸汽机車经济,而且不需要鍋炉燒水,因此特別适宜于使用在缺水的地区。

4. 旋轉活塞式內燃機

前面我們介紹了三種熱機，它們的共同特點在於都是利用氣體的膨脹推動活塞在汽缸里作往復的運動，然後通過連杆、曲柄將往復的運動轉變為主軸的旋轉運動。因為在將移動變為轉動時，總是要消耗一部分的能量，所以它們的效率並不高，而且由於必須有曲柄、飛輪等機件，就使得它們的構造複雜，機身龐大笨重，轉速不大，以致於在提高速度方面受到很大的限制。這也是它們共同具有的缺點。那麼是否有可能將往復式活塞動力機改進一下，使氣體膨脹做功，直接推動主軸旋轉呢？近幾年來經過各國科學家的精心研究，發明了各種各樣的旋轉活塞式內燃機，它們的形式雖然繁多，但基本的原理卻都是相同的，即利用活塞在汽缸內的轉動來直接帶動轉軸運動，這就克服了往復式內燃機所具有的缺點。旋轉活塞式內燃機是內燃機發展的方向，目前各種類型的旋轉活塞式內燃機正處在試驗階段，還有待於改進。

下面介紹一種最近發表的雙旋轉四循環活塞式內燃機。圖 8·37 所示的是它的外形。圖 8·38 表示它活塞的簡單結構。一個環形的鼓筒兩端用蓋封閉，筒里有兩對旋轉活塞，將筒分成四個空間。圖 8·38 上兩對活塞是分開來看的。左邊一對活塞 A、B 和機軸連在一起，隨着機軸而旋轉。右邊一對活塞 C、D 固定在一象套筒一樣的空心轉軸上。套筒的直徑比機軸的直徑大，它不隨着機軸一起轉動，卻可以在機軸上自由旋轉。這兩對活塞在汽缸

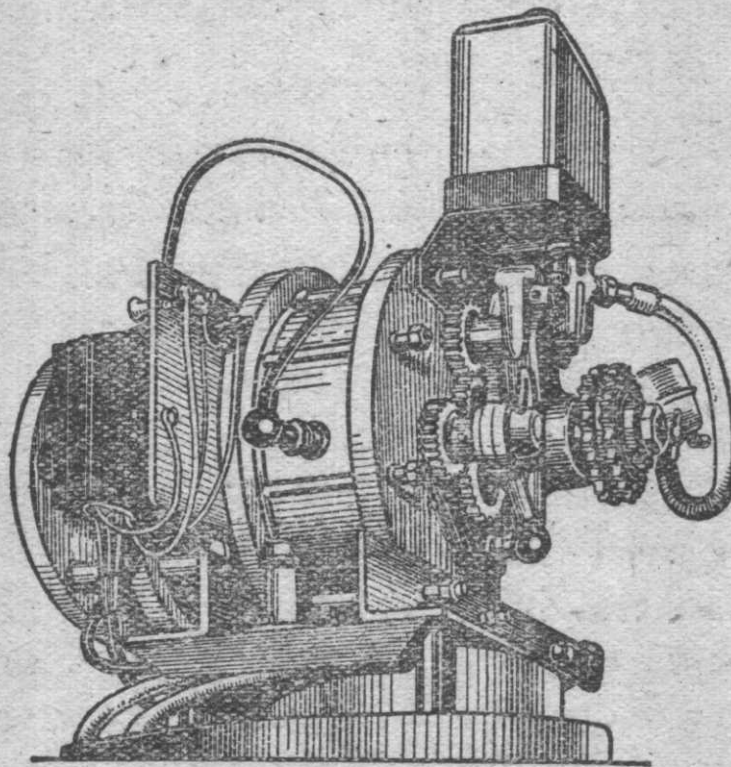


圖 8·37 旋轉活塞式內燃機的外形

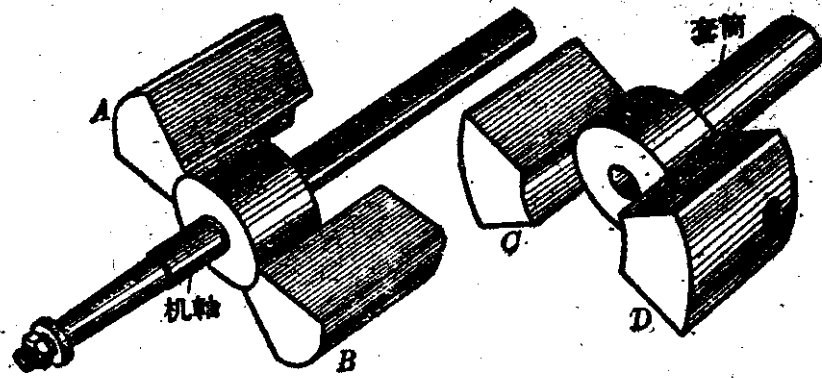


图 8·38 旋轉活塞式內燃机活塞的簡單結構圖

中是套在一起的，利用齒輪和杠桿組成的控制機構來控制它們（至於控制機構的構造，這裡不準備作詳細的介紹），使這兩對活塞能夠繞着共同的軸線向同一方向旋轉。由於它們的轉速分別按照不同的規律變化，因此活塞之間的空間不斷地增大或減小，就象往復式發動機中氣缸工作部分的容積在不斷地改變一樣。每一個空間可以看作是一個氣缸，這樣它就成為四氣缸內燃機了。

下面我們進一步來說明在旋轉半周時各氣缸工作的情況。

圖 8·39(a) 是氣缸的截面圖，打斜綫的表示一對活塞 A、B，黑色的表示另一對活塞 C、D。這時活塞 A 和 D 之間的氣缸正處在火花塞點火瞬間，于是被壓縮的氣體開始燃燒。

圖 8·39(b) 表示氣體燃燒後膨脹，竭力推開 A、D 兩活塞，使它們之間的氣缸容積變大。A、D 兩活塞原先是順時針旋轉的，A 受到氣體的推力後，沿順時針方向加速旋轉；而 D 所受到的推力是阻礙它順時針轉動的，于是它的速度減小。這種差速轉動都是由控制機構在管理着的。

這時 A、C 兩活塞之間的氣缸正和排氣管相連進行排氣，而與 D、A 相對的 C、B 活塞之間的氣缸却和進氣管相連，準備吸氣。至於 B、D 之間的氣缸容積正在變小，其間的氣體正受到壓縮。

圖 8·39(c) 表示在 D、A 之間的氣缸里膨脹做功沖程將要完畢，廢氣開始沿氣缸壁上的縫槽排氣。這時 A、C 之間的氣缸還在排氣，C、B 之間的氣缸還在吸氣，B、D 之間的氣缸在繼續壓縮。

圖 8·39(d) 所示的情況是 A、B 活塞轉到超前 C、D 活塞最遠的位置，D、A 之間的氣缸體積最大。A、C 之間的氣缸排氣將近結束，C、B 之間的氣缸吸氣也將結束，而 B、D 之間已壓縮到最小，並即將點火燃燒推動 D 活塞向前，同時通過控制機構的作用，使活塞 DC 用較大的速度趕上活塞 AB。將

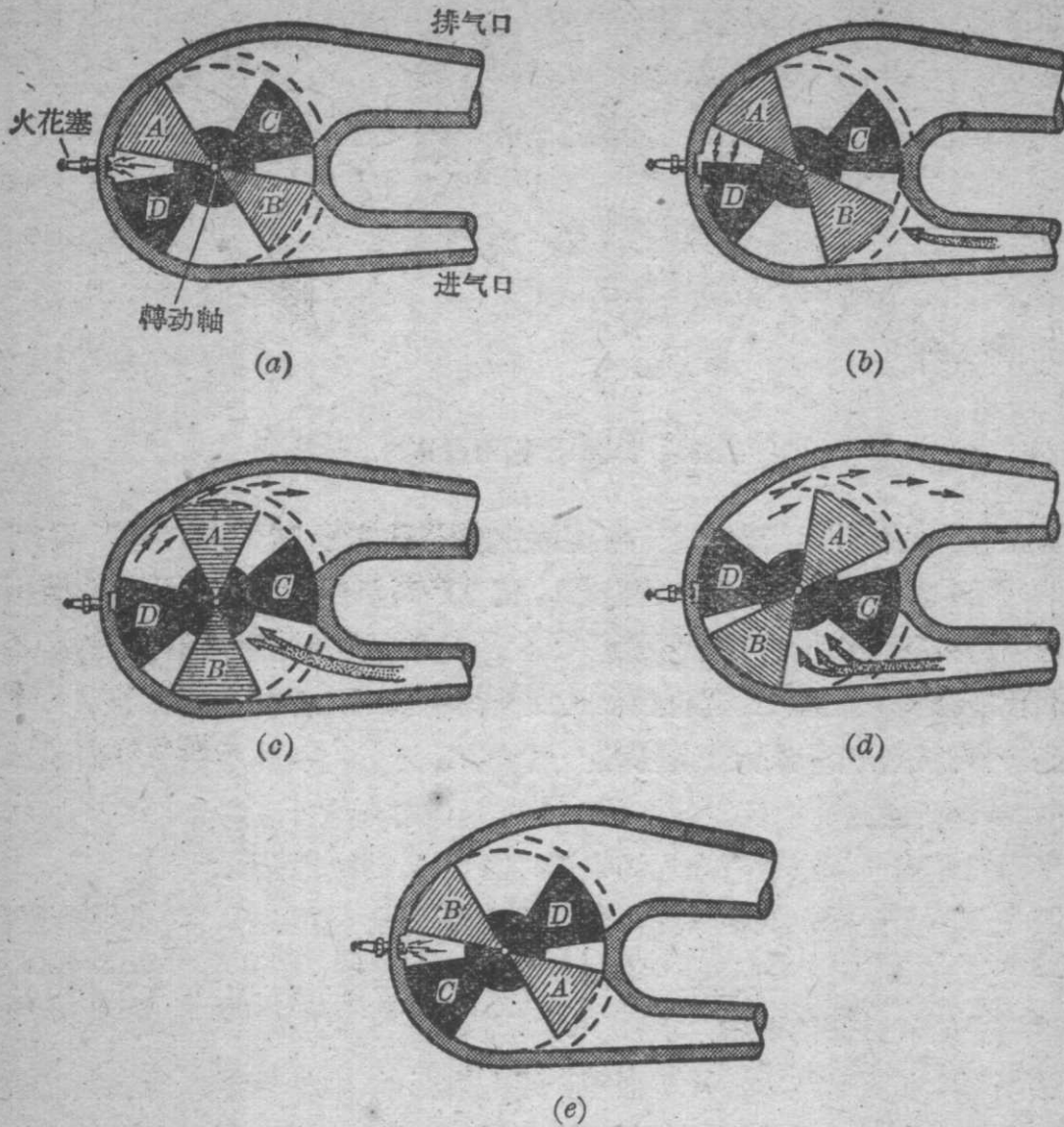


图 8-39 旋轉活塞式內燃机气缸的工作情况示意图

D、A 之間气缸中作过功的廢气排出。同时又压缩了 C、B 之間气缸剛吸入的新鮮气体，使活塞轉到图 39(e) 的位置，这时两对活塞恰好轉了半周。

从图中可以看出，每个气缸在鼓形筒里轉过一周时，它必定经历两次压缩和两次膨胀的行程。从四个气缸来看，它們是同时在进行着排气、吸气、压缩、做功四项工作的，在旋轉一周的全部时间里，都有做功冲程。这和往复式活塞只有 $\frac{1}{4}$ 時間在做功，就有很大的不同。

旋轉活塞式內燃机和往复式活塞式內燃机相比，具有很多的优点。根据所发表的数据，这种內燃机与最好的同容积往复式內燃机相比所产生的馬力要大 3.6 倍；耗油量却只有它的 $\frac{1}{3}$ ；而且体积也很小，平均每一匹馬力只重 $\frac{1}{2}$ 公斤多一些；此外发动机的轉速范围亦很广，从 60 轉/分到 4000 轉/分不等。

这种新式内燃机的效率之所以会这么高，是因为膨胀的气体几乎是充分用来做功的。由于进气槽和排气槽很长，不象一般往复式那样只有狭小的排气阀和通道，因此吸气排气通畅，而且它的活塞始终是不倒转的，排气和膨胀气体的运动方向也始终一致。此外，省掉了阀门机构以后，不仅摩擦减少，也省掉了冲开阀门弹簧所消耗的能量。由于传动轴在每转一周中受到四次燃气的推力，所以它转得十分均匀而平稳。因此旋转活塞式内燃机是内燃机改进发展的方向。

习 题 8·6

1. 奥托内燃机的主要构造有哪些部分？
2. 试述奥托内燃机工作中的四个冲程。
3. 狄塞尔内燃机和奥托内燃机的工作过程有什么不同？两种内燃机各有什么优缺点？它们应用的场合为什么不一样？
4. 内燃机有哪些辅助设备系统？
5. 旋转活塞式内燃机和往复式内燃机相比较有些什么优点？

§ 8·7 蒸 汽 轮 机

前面所讲的都是活塞式动力机，能不能不用活塞而直接用蒸汽来推动轮机呢？很早以来人们就在这方面进行了研究，并发明了蒸汽轮机。

蒸汽轮机运转的基本原理和常见的风车相似。我们知道，风车是由轴轮和轮外沿的叶片所组成的，当风吹动叶片时，风车就旋转起来。风力越大，风车就旋转得越快，因此它是一种利用流动空气的动能来做功的装置。

蒸汽轮机是由一个中央很厚的钢盘和钢盘外沿弧形叶片所组成的，如图 8·40 所示。当蒸汽喷射到叶片上时，轮机就转动起来，而且蒸汽速度越大，轮机转动得越快。

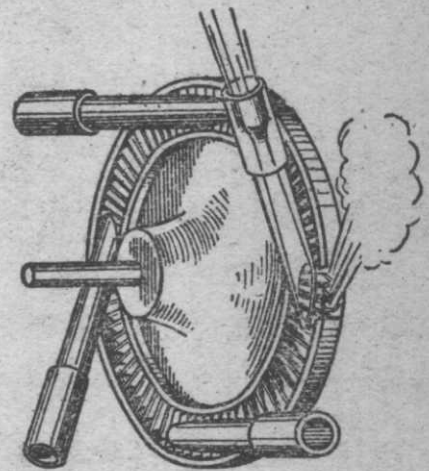


图 8·40 单级冲动式汽轮机示意图

那么怎样才能得到速度很高和动能很大的蒸汽呢？

我們知道,当气体从高压空間流向低压空間时,压强差越大,流动的速度也越大,因此在蒸汽輪机里就利用噴嘴来得到高速的蒸汽,如图 8.41 所示.

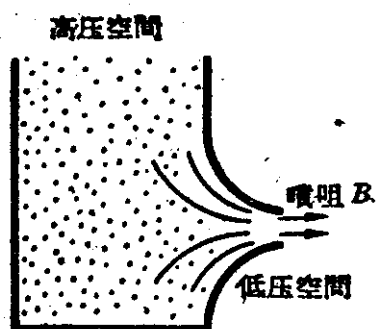


图 8.41 蒸汽的流动

如图 8.41 所示.图 8.42 是一个擴張式噴嘴.从水管式鍋炉的过热管送来的过热蒸汽經過噴嘴流向压强較低的空間.蒸汽从噴嘴噴出时,体积开始急剧地膨脹,同时压强降低,速度增大.这样的蒸汽具有很大的动能,也就是說蒸汽的内能在噴嘴中轉变为蒸汽的动能.

当蒸汽噴射到叶片上时,它的动能又轉变为机軸旋轉的机械能.

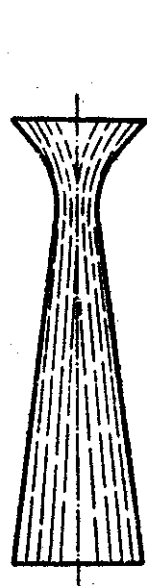


图 8.42 擴張式噴嘴

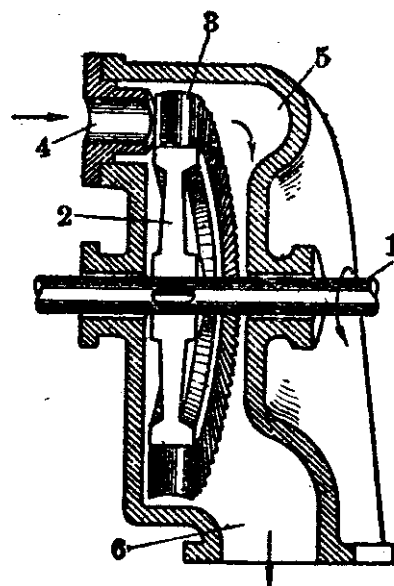


图 8.43 单級冲动式汽輪机剖面图

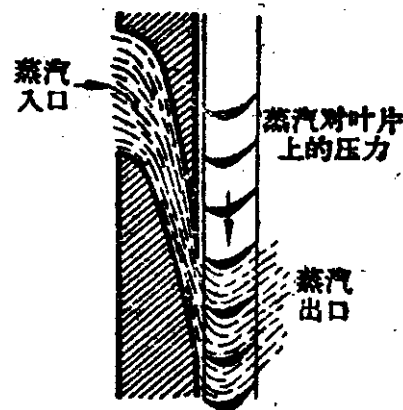


图 8.44 蒸汽沿叶片流动

图 8.43 是一个单級冲动式汽輪机的剖面图. 1 是机軸, 2 是叶輪, 3 是叶片, 4 是噴嘴, 5 是汽室, 6 是排汽管. 从图 8.44 中可以看出蒸汽流动的情况. 輪上叶片的形状是弯曲的. 当蒸汽順着叶片流过时, 它們之間就有相互作用. 叶片对汽流的作用是改变它的流动方向, 汽流对叶片的作用是使叶輪和机軸轉动.

实际上,为了提高蒸汽使用的效率,常常采用压力多级冲动式的汽轮机,它的结构如图 8.45 所示. 图中 1 是汽室, 2 是第一级喷嘴, 3 是第一级叶轮, 4 是隔板, 5 是第二级喷嘴, 6 是第二级叶轮, 7 是第三级喷嘴, 8 是第三级叶轮, 9 是排汽管.

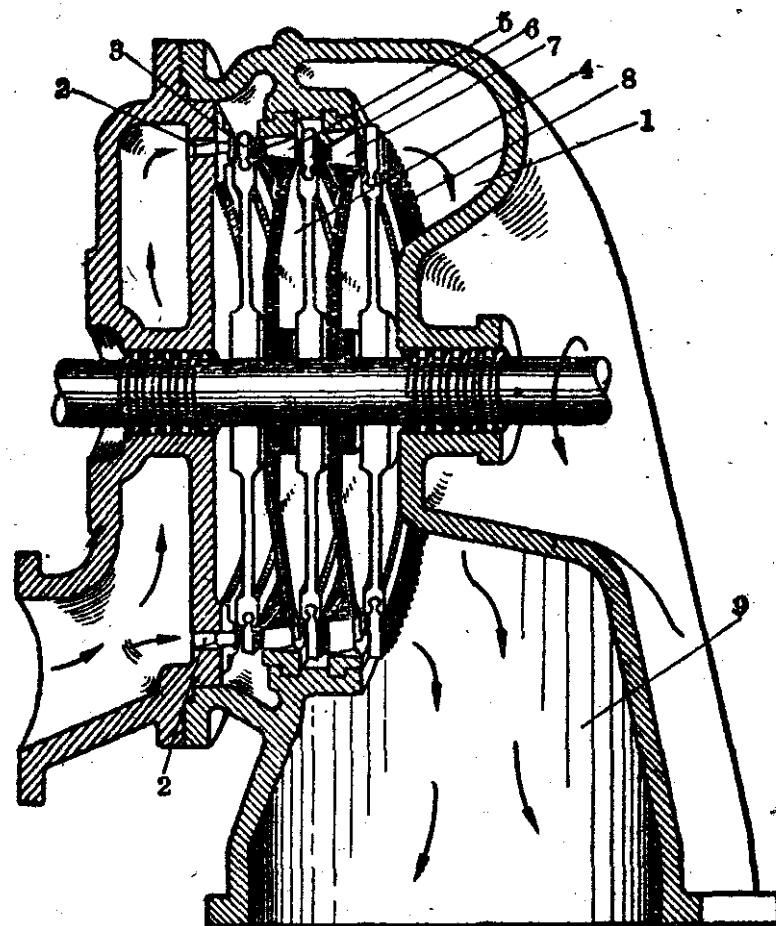


图 8.45 多级冲动式汽轮机

第一、二、三级的叶轮又称为动叶片,它们是并排装在机轴上的,用来带动机轴转动. 第一、二、三级喷嘴又称为导向叶片,它们是固定在汽缸机罩上的. 从图中可以看到各级喷嘴的作用,一方面是改变蒸汽的方向;另一方面是使蒸汽膨胀,降低压强,提高速度,从而推动叶轮转动.

蒸汽轮机跟蒸汽机相比具有许多优点: 蒸汽轮机比同样功率的蒸汽机的重量轻,体积较小,不需要用曲柄和飞轮等机械来将移动改为转动,因此转动均匀,没有振动;转动速度大,每分钟可以达

到 3000 轉；巨型蒸汽輪机的輸出功率可以达到几十万千瓦；效率可以高达 25% 到 30%；机件中的滑动部分少，这样既节省了潤滑油，又使蒸汽不致于被油沾污，因此在凝結后就可以作为多种用途。

但是蒸汽輪机也有一些缺点，比如它只能沿着一个方向轉动，不能开倒車，并且它的速度变化范围不能作較大的改变，所以不能象蒸汽机那样方便地被使用在机車上。同时汽輪的制造又需要較高的工艺水平，制造叶輪的材料要能够耐高温高压，一般是采用鉻、鉬、鈳或鎢的合金鋼，机軸的鍛造要求也很高。此外，蒸汽輪机运行时需要有高压蒸汽来噴射叶輪，因此它就必然要和高压鍋炉連在一起，虽然它本身的体积很小，但整个蒸汽发动机还是很龐大和复杂的。所以蒸汽輪机一般只在巨型发电厂里用来带动发电机，或作为巨型舰艇上的发动机使用。

§ 8.8 燃气輪机

燃气輪机的基本原理和蒸汽輪机相似，所不同的在于它的工质不是蒸汽而是燃料燃燒后的烟气。燃气輪机属于內燃机一类，所以也叫做內燃气輪机。

燃气輪机的构造可以分为四个主要部分：(1)空气压縮机；(2)燃燒室(相当于內燃机的汽缸)、噴油嘴、抽油机(这三部分的构造和狄塞耳內燃机相似)；(3)叶輪、叶片、噴嘴(这三部分的构造和汽輪机相似)；(4)回热装置，也就是空气預热器。

图 8.46 是燃气輪机的构造簡图。

空气压縮机 1 将空气压进空气回热器 2 里，空气在这里受到从汽缸排出的廢气預热，預热后的空气經過空气管 3 进入到燃燒室的夹层里，空气在这里繼續受热，相反地它也使燃燒室冷却(因为空气虽然在預热器里預热，它的温度和燃燒室的温度相比还是相差很远)，然后，空气經過靠近噴油嘴 7 的小孔进入燃燒室 4，而由抽油机 8 送来燃料，通过噴油嘴 7 噴进燃燒室和空气相混合后

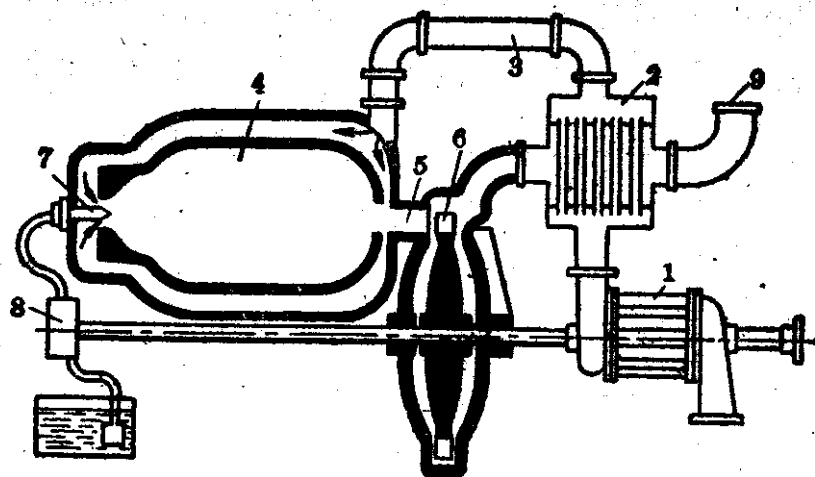


图 8-46 燃气轮机的构造

燃烧。燃烧后的气体进入喷嘴 5，并以极大的速度离开喷嘴冲击叶轮 6，使叶轮旋转；由于膨胀做功后的废气仍具有很高的温度，因此让它通过预热器后，再经过排气管 9 排出。

从上面所讲的工作过程中，可以清楚地看到，燃气轮机是利用气体作为工质，在燃烧室里燃烧，将燃料的化学能转变为气体的内能。在喷嘴里，气体的内能转变为气体的动能。结果它就以极大的速度喷出，冲击叶轮转动。

燃气轮机最主要的优点是它和蒸汽轮机一样不需要连杆、曲柄、飞轮等传动装置，同时它又和内燃机一样不需要额外的锅炉装置。因此它不但体积小，重量轻，构造简单，而且功率大（可以达到 100,000~200,000 千瓦），效率高（可以达到 50~60%），所以已经被广泛地应用在飞机上作为动力装置。

但是燃气轮机也有很多缺点：(1)喷射到叶轮上的气体的温度很高，一般要达到 1300°C 左右，在这样高温下工作的叶轮，就必须用价格昂贵的特殊的耐热合金来制造，这就使得它的加工困难，成本高。(2)耗油量非常大，产生同样的功率，燃气轮机的耗油量要比活塞式汽油机多 2 倍，因此如果使用燃气轮机作为机车的动力时需要消耗大量的燃料。(3)燃气轮机吸进的空气多，喷出的废气体积更大，这将影响城市街道的卫生。因此燃气轮机还不能普

遍地被应用在一些市内交通工具上。经过近几年来研究和试用证明：燃气轮机最适宜于使用在 1000~3000 馬力以上的飞机和船舶上，以及作为 3000 馬力到数万馬力以上的固定在地面的动力装置。

习 題 8·8

1. 蒸汽轮机的构造主要有哪几部分？
2. 蒸汽轮机的工作原理和蒸汽机有什么不同？
3. 蒸汽轮机喷嘴的作用是什么？
4. 燃气轮机的构造主要有哪些部分？
5. 燃气轮机跟活塞内燃机比较有哪些优点？
6. 为什么蒸汽机和内燃机需要飞輪而蒸汽轮机和燃气轮机不需要飞輪？

§ 8·9 空气噴气发动机

前面我們已經学过两大类型的发动机。第一类是用气体膨胀推动活塞做功的蒸汽机和内燃机，第二类是利用具有很大动能的气体冲击叶輪轉动的蒸汽轮机和燃气轮机。虽然这两类发动机都已經被广泛地使用在各种交通工具上，但是它們还远远不能满足近代飞行速度和高度的要求。

自从 1882 年世界上誕生了第一架飞机以来，科学家們就着手研究怎样使飞机飞得更快和更高。如果使用活塞式内燃机来带动螺旋桨轉动以推动飞机飞行，那么要飞行得快，就要使螺旋桨轉动得快。但是螺旋桨轉得越快，它所受到的阻力也就越大，因此它的效率就大大地减低，所以它的速度不能超过 211 米/秒。而且螺旋桨式飞机又只能在空气中飞行，这就限制了它的飞行高度。直到噴气式飞机发明以后才使飞机的速度有了巨大的跃进，而且远远地超过了 211 米/秒。目前飞机的速度不但已經超过音速的两三倍，而且还能冲出空气层作宇宙飞行。

噴气式发动机和內燃式发动机的作用原理是完全不同的。它的燃料在燃燒室內燃燒后，产生高温和高压的气体，这种气体从尾部以极高的速度噴出，同时产生很大的反作用力推动机身向前运动(可以參見第一册力学中的牛頓第三定律和动量守恒定律)。噴气式发动机的作用是直接产生反冲推力，把燃料的內能轉变为燃气的动能和飞机前进的机械能，而不需要通过能量轉变的中間結構——活塞、螺旋桨等等。这就减少了能量的損失，大大提高了飞机的飞行速度。

噴气式发动机又可以分为两大类：一类是空气噴气发动机；另一类是火箭噴气发动机，簡称为火箭。

空气噴气发动机本身只携带有燃料，它需要利用外界的空气来帮助燃燒。因此它的飞行高度还是有一定的限度，并且不适宜于在空气稀薄的高空飞行。火箭噴气发动机本身帶有燃料和氧化剂，不需要依靠外界空气来帮助燃燒，因此飞行的高度不受限制，不仅可以在高空飞行，而且还可以飞出大气层，成为星际航行的工具。

下面我們就先来讲空气噴气发动机。由于发动机的种类有很多，这里只介紹冲压式和气輪式两种。

1. 冲压式噴气发动机 图 8·47 是这种发动机的結構示意图，它好象一个圓筒，前面有进气口，中間有燃燒室，燃燒室里也有噴雾器和火花塞，尾部有噴气口。

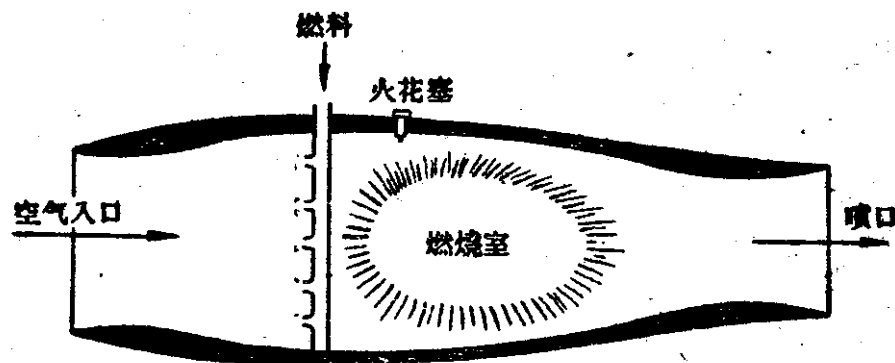


图 8·47 冲压式噴气发动机

当机身向前飞行时,空气从进气口进入燃烧室,由于通道的截面积比进口大,所以空气速度降低,同时被压缩而使压强增大. 飞机飞行的速度越大,气体被压缩得越厉害,它的压强也就越大. 在燃烧室里,喷雾器喷出雾状的燃料,它和压缩空气混合后,被火花塞点火而燃烧成高压和高温的烟气. 烟气以很大的速度从喷气口冲出,产生极大的反冲推力使机身向前飞速地运动. 这个过程不断地进行下去,机身也就继续向前运动了.

冲压式发动机适宜于高速飞行,并且能长时间地以比音速大好几倍的速度飞行. 超音速飞行时的效率可以达到50%左右,这是它的优点. 但缺点是在起飞时速度不大,而需要其他的辅助发动机来帮助它发动.

2. 气轮式喷气发动机 气轮式喷气发动机主要包括进气口、压气机、燃烧室、辅助发动机、燃气轮机和尾喷管等,如图8·48所示. 其中辅助发动机、压气机和燃气轮机装在同一根机轴上. 在飞机中,空气压缩机常常采用轴向式的,它是由很多级定向叶轮和动叶轮组成的. 当机身在空气中高速前进时,空气从进气口进入,于是速度减小,同时被初步压缩. 当空气进入压气机后,就进一步被压缩. 压气机每一级动叶轮都象螺旋桨一样,能够用很大的速度把进来的空气一级一级地向后推去,这时压强逐渐增加,最后甚至可以达到3至4个大气压.

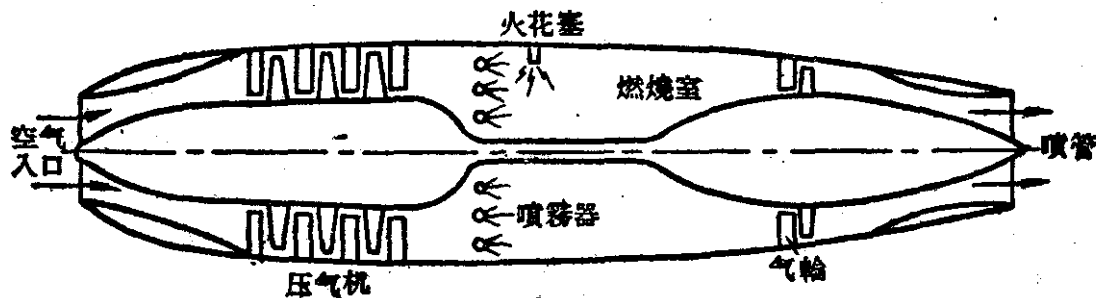


图8·48 气轮式喷气发动机构造示意图

被压缩的空气进入燃烧室后,和从喷雾器喷出的燃料混合,并由火花塞点火燃烧,这时温度可以高达 1500°C ,而所产生的大量

气体向后喷出,同时冲击燃气轮机的叶輪轉动,使轉速达到 15,000 轉/分左右. 最后它又以极大的速度从尾部噴管噴出,其速度可以达到 500~600 米/秒,这就使机身得到巨大的反冲推力而向前飞行.

在剛起飞时,压气机由輔助发动机带动,等到叶輪旋轉到一定的速度以后,輔助发动机就停止工作,改由燃气輪机带动压气机運轉.

目前一般接近于音速的飞机,大多采用这种发动机作为动力装置. 在大型噴气式客机上常常装有两台强有力的气輪式噴气发动机,結果飞行速度可以达到 300 米/秒,飞行高度可以达到 10 公里以上.

在航空工程中得到普遍应用的除了上述两种噴气发动机外,还有气輪螺旋桨式噴气发动机(图 8·49). 它是在飞机前面气輪的軸上再装上螺旋桨(由于螺旋桨不能和机軸同速轉动,所以螺旋桨和軸之間装有减速装置). 由燃燒室产生的气体冲击叶輪时,把大部分能量傳給了輪机,但是这些能量往往超过压縮机所需要的能量,因此多余的能量就用来带动螺旋桨轉动,产生牵引力. 同时由尾部噴出气体,也产生了反冲推力. 所以具有这种发动机的飞机起飞容易,功率很大,燃料消耗低,續航力强,飞得远,載得多,并且还可以作低速飞行.

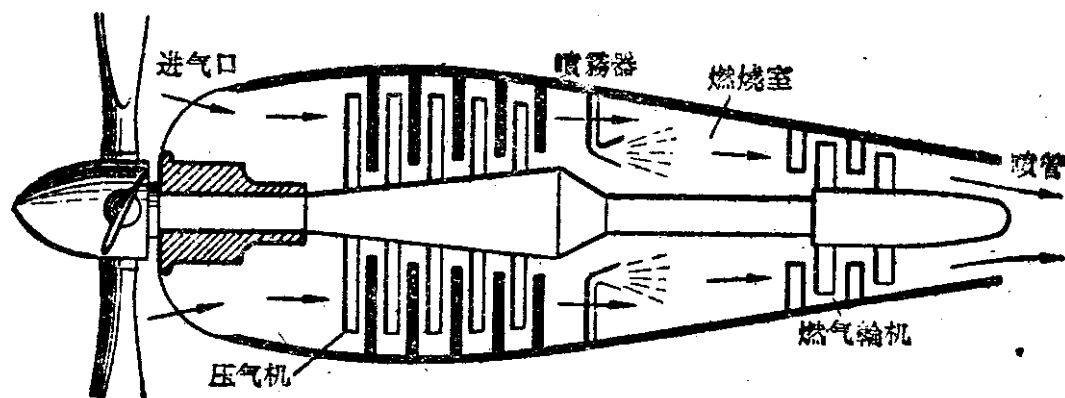


图 8·49 气輪螺旋桨式噴气发动机构造示意图

§ 8.10 火箭噴气发动机

前面已經讲过,火箭噴气发动机本身带有燃料和氧化剂,所以不需要外界空气来帮助燃燒. 它使用的燃料有固体燃料和液体燃料两种.

固体燃料火箭的主要部分是燃燒室和尾部噴口. 图 8.50 是它的构造示意图. 經常使用的固体燃料是硝化纖維、硝化甘油和其他少許附加物的混合物. 一般将燃料做成实心或空心的圓柱体,貯存在燃燒室內,用电流点燃后,让它逐漸燃燒. 燃燒所得到的烟气压强很均匀. 烟气从尾部噴口噴出时,产生反冲推力推动火箭向前飞行.

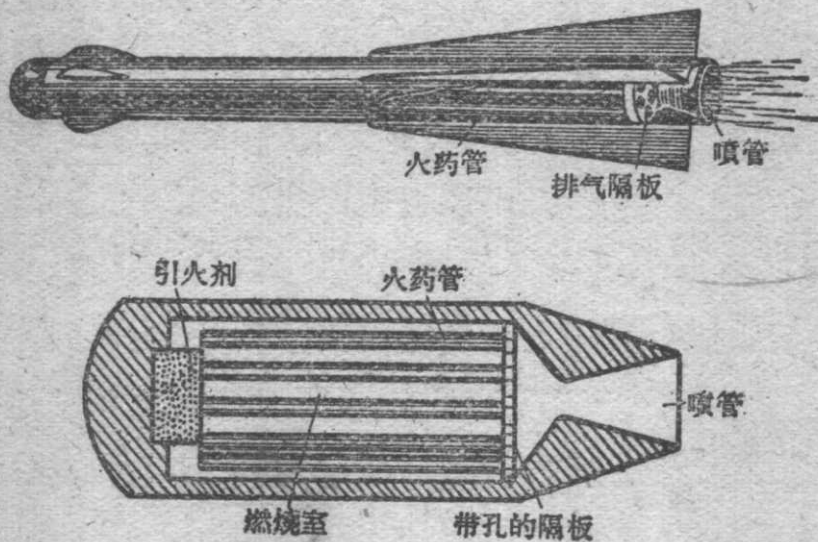


图 8.50 固体燃料火箭构造示意图

固体燃料火箭发动机的缺点是它的工作時間很短,一般不过几分之一秒或十几秒钟,但是常常用它来作为其他类型飞机起飞时的輔助发动机.

液体燃料火箭的构造如图 8.51 所示. 它由燃料箱、輸送系統和燃燒室三个主要部分組成. 燃料箱是用来貯存燃料的,液体燃料与氧化剂分別装在两个箱子里. 如果用汽油或乙醇作为燃料,一般可以用液态氧作为氧化剂;如果用甲醇作为燃料,一般用过氧

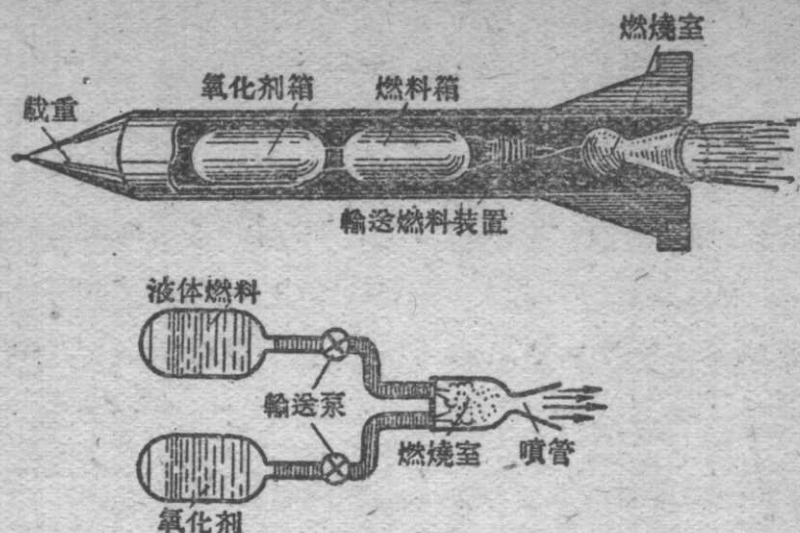


图 8-51 液体燃料火箭构造示意图

化氢作为氧化剂。输送系统是按时按量地把燃料从燃料箱输送到燃烧室中去燃烧的装置，因此它的构造比较复杂。工作时，由输送系统把燃料和氧化剂喷入燃烧室，最初用电火花点燃，其温度可以高达 3700°C ，压强可以高达 $20\sim 40$ 个大气压。第一次点燃之后，以后继续进入燃烧室的燃料就可以自行燃烧。燃烧产生的气体以很高的速度从尾部喷口喷出，同时对火箭产生强大的反冲推力，使它前进。

火箭喷气发动机的特点是功率巨大，可以使火箭的飞行速度增大，同时上升高度也可以不受限制，而多级火箭又能作为宇宙航行的工具。

习 题 8-10

1. 气轮式喷气发动机的主要构造有哪几部分？
2. 火箭喷气发动机和空气喷气发动机有什么区别？

本 章 提 要

1. 热机的装置 热机是这样的一种装置，它能持续不断地把燃料燃烧时释放的能量，通过传热的方式转变为工作物质（简称为工质）的内能，再通过做功的方式转变为机械能。

2. 热机的組成 热机必须具备三个組成部分：

- (1) 发热器——是使燃料所釋放出的能量轉变为工质內能的装置。
- (2) 工作部分——是使工质消耗內能来做机械功的装置。
- (3) 冷凝器——是容納工作部分排出的廢工质的装置。

3. 热机的工作特点 工质从发热器得到的热量，只有一部分轉变为机械功，其余部分都傳給了冷凝器。工质从发热器得到的热量是 Q_1 ，其中一部分 Q_2 被做过功的廢工质带入冷凝器，轉变为机械功的只是 $Q_1 - Q_2$ 。

4. 热机的效率

(1) 燃燒效率：在发热器中，工质所得到的热量与燃料燃燒所放出的热量之比。即

$$\eta_{\text{燃}} = \frac{Q_1}{Q}$$

(2) 热效率：在热机的工作部分中轉变为功的热量与工质从发热器得到的热量之比。即

$$\eta_{\text{热}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

(3) 机械效率：机軸上得到的和有用功相当的热量与轉变为和机械功相当的热量之比。即

$$\eta_{\text{机}} = \frac{Q_3}{Q_1 - Q_2}$$

(4) 总效率：轉变为有用功的热量跟燃料燃燒时放出的热量之比。与輸出功相当的热量为 Q_3 ，燃料燃燒放出的热量为 Q ，則

$$\eta_{\text{有效}} = \frac{Q'_{\text{輸出}}}{Q_{\text{輸入}}} = \frac{Q_1}{Q} \cdot \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot \frac{Q_3}{Q_1 - Q_2} = \eta_{\text{燃}} \cdot \eta_{\text{热}} \cdot \eta_{\text{机}}$$

5. 提高热机效率的途徑 提高发热器的温度，降低冷凝器的温度，同时尽量减少发热器內热量的損失与工作部分因摩擦所引起的能量消耗。

6. 蒸汽机的发热器是鍋炉；工作部分是汽缸；冷凝器是凝汽器。

7. 蒸汽机是靠高温和高压的蒸汽推动汽缸里的活塞来做功的。汽缸的进汽和排汽由滑动閥自动控制。

8. 內燃机是让燃料直接在气缸里燃燒，并靠燃燒产生的气体来推动活塞做功。

內燃机的工作过程是由吸气、压缩、做功和排气四个冲程組成的。但是，在奥托內燃机(汽油机)里吸入气缸的是燃料空气混合物，燃燒是由火花器产生电火花来点燃的；在狄塞耳內燃机(柴油机)里，吸入气缸的是空气，噴入气

各种热机比较

种类	工质	发热器	工作部分主要机构	冷凝器	效率	优点	缺点	主要应用	提高效率方向
活塞式	蒸汽机	炉	汽缸, 活塞, 滑阀, 连杆, 曲柄, 飞轮	凝汽器或大气	6~15%	制造、保养、操作较简单, 坚固耐用, 燃料不积垢, 功率大, 可直接开倒車	笨重, 效率低, 启动慢	輪船, 機車	断汽多級膨脹
	內燃机	汽缸	汽缸, 活塞	大气	20~40%	重量輕, 体积小, 效率高, 启动快, 用水少	燃料价格貴, 功率不大	小型工厂, 輪船, 潜水艇, 坦克, 拖拉机, 汽車, 飞机, 機車	多汽缸式改为旋轉活塞式
輪机式	蒸汽輪机	鍋炉	叶輪, 叶片, 机軸, 噴嘴, 外罩	凝汽器	25~30%	比蒸汽机重量輕, 体积小, 效率高, 轉速大, 轉动均匀, 冷凝水可以作为其他用途	构造复杂, 工艺要求高	火力发电厂, 快速軍舰, 远洋輪船	多級輪机
	燃气輪机	燃燒室	压气机, 燃料压泵, 輪机, 燃燒室	大气	50~60%	具备蒸汽輪机与內燃机的优点, 功率大	需耐高溫的合金与冷却装置, 构造复杂	发电厂, 火車, 高速海輪, 飞机	多級輪机
噴气式	空气噴气发动机	燃燒室	压气机, 輪机, 燃燒室	大气	50~60%	重量輕, 体积小, 效率高, 功率大	同上, 燃料消耗量大	飞机	
	火箭噴气发动机	燃燒室	氧化剂, 燃料貯存装置, 燃燒室	大气		不需要外界空气帮助燃燒, 功率巨大, 上升高度不受限制	需耐高溫的合金与冷却装置, 构造复杂, 消耗燃料量很大	星际航行工具	

缸的燃料在接触温度很高的热空气后燃烧。

9. 蒸汽轮机和燃气轮机是靠喷嘴喷出的蒸汽流或气流冲击叶片来带动叶轮和机轴转动。

10. 空气喷气发动机是利用气体从尾部高速喷出时所产生的反冲的推力来推动机身前进的。

11. 火箭喷气发动机本身带有燃料和氧化剂，不需要外界空气助燃，由喷气发动机从尾部高速喷出气体的反冲推力能使机身飞速地前进。同时它还能够作为宇宙航行的工具。

复习题八

1. 什么叫做热机？它在生产上有什么重大的作用？
2. 热机的工质有什么作用？哪些物质可以作为热机的工质？
3. 怎样计算定量气体在作等压膨胀时所做的功？
4. 怎样才可以提高蒸汽机的效率？
5. 喷气式飞机和火箭是用什么原理飞行的？
6. 一台内燃机在燃烧 1 公斤汽油（燃烧值 10,000 千卡/公斤）时，所产生的热量可以大致分配如下：

(1) 相当于摩擦所损失的热量	1000 千卡
(2) 废气带走的热量	3500 千卡
(3) 汽缸散热的损失	3000 千卡
(4) 相当于有用功的热量	2500 千卡

求这台内燃机的燃烧效率，热效率，机械效率和总效率。

7. 有一台 8250 型八缸四冲程柴油机，汽缸直径是 250 毫米，活塞冲程是 300 毫米，飞轮转速是 600 转/分，发动机的功率是 400 马力，求第三冲程中气体的平均压强。

[提示：在解答有关热机的习题时，我们要注意几个问题，(1) 单缸的往复蒸汽机的活塞在汽缸中往复一次，即通过两个冲程时，飞轮转一周，这时蒸汽做了两次功；而单缸的四冲程内燃机每完成一次循环（即完成四个冲程），飞轮转动两周，在这个过程中气体只做了一次功（只在第三冲程时气体做功）。也就是说，单缸的往复蒸汽机的飞轮每转动一周，蒸汽做两次功；而单缸的四冲程内燃机的飞轮每转动两周，气体做一次功。(2) 发动机的功率是指几个汽缸的功率之和，我们应先求出每一个汽缸的平均功率。例如本题是八个汽缸的功率的和是 400 马力，所以，每个汽缸的平均功率 $N = 50$ 马

力。(3) 活塞面积的公式是 $A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$ 。(4) 要从飞轮的转速中求出每分钟內每个汽缸中气体做功的次数。例如本題飞轮的转速 $n = 600$ 轉/分 $= 10$ 轉/秒, 所以在每秒钟內每个汽缸中气体做功的次数为 $\frac{n}{2} = 5$ 次。(5) 功率的公式是 $N = pAS \cdot \frac{n}{2}$ (S 是活塞的冲程), 要按步求出这五个方面的值后, 才能解出本題.]

8. 八汽缸四冲程內燃机活塞的面积是 450 厘米², 冲程是 0.4 米, 第三冲程中气体的平均压强是 5 公斤/厘米², 飞机的转速是 600 周/分, 求內燃机的功率。假使燃料的燃燒值是 $10,000$ 千卡/公斤, 內燃机在 1 小时內燃燒燃料 96 公斤, 求它的效率。

总复习题

1. 在质量是 128 克的量热器中注入 8.4°C 的水 240 克, 然后投入质量为 192 克和温度为 100°C 的金属物体. 混合后的末温度是 21.5°C , 已知量热器的比热为 0.09 卡/克·度, 求金属物体的比热.

2. 根据下列实验数据计算煤油的比热:

量热器: 质量	150 克
比热	0.09 卡/克·度
初温度	15°C
铁 块: 质量	480 克
初温度	98°C
比热	0.11 卡/克·度
煤 油: 质量	300 克
初温度	15°C
混合物的末温度	35°C

3. 汽车以平均速度 80 公里/小时行驶了 256.2 公里的路程, 共消耗汽油 48.6 公斤. 已知发动机的效率为 25%, 汽油的燃烧值是 11,000 千卡/公斤, 求汽车行驶时的平均功率.

4. 质量是 800 克的铜壶中装有 10°C 的水 2.5 公斤, 把这些水烧开需要消耗 50 克煤油. 已知铜的比热为 0.09 卡/克·度, 煤油的燃烧值是 11,000 千卡/公斤, 求煤油炉的效率.

5. 房间的容积是 3 米 \times 5 米 \times 4.5 米, 每分钟通过墙壁和窗户散失的热量是 8 千卡. 现在用一只效率是 25% 的炉子, 先把室内空气温度从 0°C 加热到 20°C , 然后一直维持在这个温度, 问每昼夜需要消耗多少木柴? 空气的比热是 0.24 卡/克·度, 标准状态时空气的密度是 1.3 公斤/米³, 木柴的燃烧值为 3000 千卡/公斤.

6. 水从 15 米的高处落下, 如果它的势能全部转变为本身的内能, 问水的温度将升高几度?

7. 1.2 公斤的铁锤工作时, 在 1.5 分钟内温度升高 20°C , 如果机械能只

有40%轉变为鐵錘的內能,求鐵錘所做的功和功率的大小。

8. 体积相同的一块鉛和一块鋁,从同一高度落下。假定它們的势能全部轉变为各自的內能,那么,那一个的温度升得高?(已知鉛的比热为0.03卡/克·度,鋁的比热为0.21卡/克·度。)

9. 用钻头在鐵块上钻孔时,注入 20°C 的水10公斤。經過6分钟后,水的温度上升到 100°C ,并有200克的水变成了蒸汽。如果有80%的机械能轉变为水的內能,求钻头的功率。水在 100°C 时的汽化热是539卡/克。

10. 为了測定鉛的綫脹系数,可以量出鉛棒在两个不同温度时的长度。測量的結果是: 10°C 时,棒长60.34厘米; 100°C 时,棒长60.50厘米。根据上述数据,求出鉛的綫脹系数。

11. 鐵棒在 20°C 时长6.25米,截面积是24厘米²。如果傳給它5148千卡的热量,問棒要伸长多少?

[提示:注意鐵在 20°C 时的密度跟 0°C 时的密度不同。]

12. 鋪設鐵軌时的温度是 12°C 。考慮到温度的变化是从 -35°C 到 $+42^{\circ}\text{C}$,問每两根鐵軌接合处应留出多少間隙?已知鋪設时每根鐵軌的长度为12.5米。

13. 在高5米,直徑也是5米的圓柱形鐵筒中装入煤油。当温度为 5°C 时,油面离筒边緣15厘米。問温度升高到几度时,煤油开始溢出鐵筒?計算时要考慮鐵筒本身的膨脹。

14. 要使 0°C 的质量是17.6公斤的銅球体积增加10.2厘米³,它的温度将要升高若干度?需要傳遞給它的热量是多少?已知 0°C 时銅的密度是8.8克/厘米³。

15. 10°C 时10升酒精的质量是7.9公斤。試問: 30°C 时10升酒精的质量是多少?

16. 长江大桥的鋼梁,一端固定,另一端却能自由伸縮,这是为什么?如果在 -10°C 时把两端都固定起来,当温度升高到 40°C 时,鋼梁所承担的胁强是多少?已知鋼的綫脹系数为 1.2×10^{-5} /度,彈性模量为 2.0×10^4 公斤/毫米²。又为什么胁强的大小跟桥长无关?

17. 钟摆的杆由鐵制成,綫脹系数为 1.2×10^{-5} /度,在 30°C 时此钟每天走慢13秒,問在什么温度下它走得最准确?

18. 一个鐵球的直徑在 0°C 时为5.01厘米,另一个銅环的內徑在 0°C 时为5厘米,已知鐵的綫脹系数为 1.2×10^{-5} /度,銅的綫脹系数为 1.9×10^{-5} /度,問在几度时鐵球恰好能够穿过銅环。

19. 一个玻璃球在空气中重 90 克, 在 12°C 的某一种液体中重 49.6 克, 在 97°C 时, 它在同一种液体中的重量为 51.9 克. 已知玻璃的线胀系数为 $8 \times 10^{-6}/\text{度}$, 求液体在 $12^{\circ}\text{C} \rightarrow 97^{\circ}\text{C}$ 之间的平均体胀系数.

[提示: 解法参见第三章的复习题 11.]

20. 气泡由池底升到池面时, 体积变为原来的三倍, 如果池中的水温到处相同, 大气压强为 750 毫米高水银柱, 求池中水的深度.

[提示: 先将压强化成同一单位.]

21. 将两端开口的玻璃管垂直地插入水银中, 待管长的一半浸入水银时, 用拇指密封管的上口, 并将玻璃管从水银中徐徐取出, 此时残留在管中的水银柱长 24 厘米, 已知管长为 90 厘米, 求当时的大气压强.

22. 一端封闭的玻璃管垂直地插在水银中. 管中的水银面比管外的水银面高出 4 厘米, 管中空气柱长 19 厘米. 如果要使管内外水银面齐平, 那么, 应该怎样移动玻璃管? 要移动多少? 已知当时的大气压强为 760 毫米高水银柱.

23. 钢筒中有一个空心小钢球, 它的半径是 2 厘米, 重 5 克. 如果要使这一小球能在压缩空气上浮起, 问钢筒内压缩空气的压强应为多少大气压?

[提示: 计算时可以把压缩空气看作是理想气体. 先根据阿基米德定律求出压缩空气的密度, 再求出所需的压强.]

24. 对理想气体来说, 是否存在这样一个温度, 如果从这一个温度起将气体在压强不变的条件下升高 1°C , 则它的体积增加为原来的二倍; 如果从这一温度起将气体等压地升高 2°C , 则它的体积增加为原来的三倍……?

[提示: 用绝对温度进行计算.]

25. 容积是 10 升的钢筒中盛有 90 大气压、 -13°C 的氧气. 求筒中氧气的质量, 已知氧气在标准状态下的密度 $D_0 = 1.429$ 克/升.

26. 一端封闭的玻璃管, 开口朝下, 垂直地插在盛有水银的容器中. 管中的水银面比容器中的水银面高出 4 厘米, 管中的空气柱长 80 厘米. 如果要使管中的水银面降到跟容器中的水银面一样高, 应将管中空气加热到几度? (这时的大气压强是 750 毫米高水银柱, 空气的初温度是 20°C .)

27. 在容积是 2.5 升的橡皮球中充有 17°C , 压强为 753 毫米高水银柱的空气. 如果把这一橡皮球放在 10.33 米深的水中, 水温是 7°C , 那么, 球中空气的体积为若干?

28. 有两个相同的封闭容器, 用水平的玻璃管把它们连接起来. 在玻璃管的正中央有一段水银柱. 当一个容器中气体的温度是 0°C , 另一个容器中

气体的温度是 20°C 时水銀柱保持靜止。如果使两容器中气体的温度同时保持在 10°C ，管中的水銀柱是否会移动？向那一方向移动？試根据所学过的气体定律加以詳細說明。

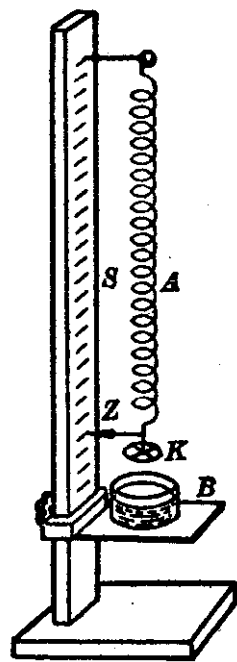
29. 空气的温度是 15°C ，压强是 750 毫米高水銀柱，問在容积是 12 米 \times 5 米 \times 4 米的房間中，共有多少空气分子？

[提示：先化为标准状态下的体积.]

30. 玻璃比重計和液面接触部分的圓管的外徑为 6 毫米。当此比重計浮于水面时，求水对它的拉力，并求比重計因受此拉力而多下沉的深度。設水的表面張力系数为 75 达因/厘米。

[提示：水对它的拉力 $= 2\pi r\sigma$ ， r 为管的半徑， σ 是水的表面張力系数。設比重計由于拉力作用而多下沉的深度为 h ，則多排开水的体积为 $\pi r^2 h$ ，比重計多受的浮力为 $\pi r^2 h Dg$ (D 是水的密度)，所以得到 $2\pi r\sigma = \pi r^2 h Dg$ ，而 $h = \frac{2\sigma}{r Dg}$.]

31. 附图所示的是一种测定液体表面張力系数的仪器。A 是彈簧，Z 是指針，K 是用金属絲做的圓环，B 是盛着待测液体的容器，S 是刻度尺。实验时，先把 B 向 K 靠攏，使 K 浸入液面，記下这时 Z 所指的刻度 S_1 。然后慢慢地降低 B，这时会看到在 K 的下面形成一层圓筒状的水膜，它的长度随着 B 的下降而增加，同时 A 逐漸伸长。記下液膜断开瞬間 Z 所指的刻度 S_2 ，由 S_1 和 S_2 求出彈簧的伸长为 20 毫米。已知使彈簧伸长 1 厘米需要的力是 0.6 克，圓环的直徑是 25 毫米。試求水的表面張力系数。



(第 31 題)

32. 两垂直平行的玻璃片之間的距离为 2 毫米，如果把它們的下端豎直插入水中，問这时水在玻璃片之間上升的高度为若干。已知水的表面張力系数为 72 达因/厘米。

[提示：表面張力的向上拉力跟片之間升高的液柱的重量相等的时候，片之間的液体就停止上升，达到平衡。由此得到上升高度 $h = \frac{2\sigma}{r Dg}$ ，式中 σ 是表面張力系数， r 是两片之間的距离， D 是液体的密度， g 是重力加速度。注意单位的一致性，一般用厘米·克·秒制.]

33. 有两根玻璃管，細管的內直徑是 1 毫米，管壁厚 0.5 毫米，粗管的內直徑是 3 毫米。把細管放在粗管里并使两管的軸綫重合，然后一起豎直地插

入水中，求(1)水在細管里上升的高度；(2)水在两管之間上升的高度。已知水的表面張力系数是 73.5 达因/厘米。

[提示：計算水在两管之間上升的高度时，要考虑細管的外壁和粗管的內壁两方面的拉引作用。]

34. 毛笔的毛在水里是散开的，为什么取出水面后就聚集在一起了？

35. 把两块玻璃板豎起，一边靠在一起，另一边用一根棒隔开，把它們浸在水里。这时就会看到水在玻璃板之間升起，板之間的距离越小，水层上升得越高。試說明这种現象。

36. 煤斗装满时的重量是 5 吨，用由 100 根鉄絲擰成的鉄索来提它，如果鉄索的极限强度是 3500 公斤/厘米²，安全系数为 6，問每根鉄絲的直徑應該是多少？

37. 金属綫长 10 米，横截面积为 0.75 毫米²，在 10 公斤的拉力作用下它伸长 1 厘米。求金属綫的彈性模量。

38. 把横截面积相同、长度相等的鋼絲和銅絲豎直地連在一起，在它們下端悬挂 15 公斤的重量。已知鋼的彈性模量为 2×10^4 公斤/毫米²，銅的彈性模量为 10^4 公斤/毫米²，問鋼絲和銅絲所負擔的重量各是多少？

[提示：鋼絲和銅絲的伸长程度相同。]

39. 长 16 米、直徑为 2 厘米的鋼筋，在 3600 公斤的拉力作用下伸长多少？已知鋼的彈性模量为 2.0×10^4 公斤/毫米²。

40. 起重机在匀速举高某重物时，原长 4 米的鋼索伸长了 2 厘米。已知鋼索的半徑为 1 厘米，鋼的彈性模量为 2×10^4 公斤/毫米²，求重物的质量？

41. 冰的熔点是 0°C ，水的凝固点也是 0°C ，如果在 0°C 的水中放进一块 0°C 的冰，将会发生什么現象？ 100°C 的水蒸汽与 100°C 的水相混合时又会怎样？

42. 已知鉛的熔点是 327°C ，它在固体时的比热是 0.0316 卡/克·度，在液体时的比热是 0.04 卡/克·度，溶解热为 5 卡/克，今把 356°C 的液体鉛 100 克，投入 0°C 的水槽中，水的温度升高 0.1°C ，求水槽中水的质量。（水槽壁吸热不計）

43. 在下列情况下把冰与水相混合，分別求混合后的結果。

(1) 將 2 公斤 0°C 的冰投入 3 公斤 60°C 的热水中；

(2) 將 2 公斤 0°C 的冰投入 3 公斤 45°C 的水中。

44. 設有 1 公斤的水已过度冷却至 -20°C ，今以小块投入其內，問將有几克水凝固成冰？

45. 将 -16°C 的冰 100 克投入 0°C 的水中, 结果使 10 克水凝固, 且温度也都为 0°C , 试求冰的比热.

46. 问需要多少煤才可以使汽锅内 28.3 公斤的水在 1 大气压与沸腾温度下完全汽化? 设汽锅的效率为 50%, 又知每克煤的燃烧热为 8000 卡.

47. 将 20°C 的铜 100 克骤然投入 100°C 的水蒸汽中, 问铜上有多少蒸汽凝结成水?

48. 回答下列问题:

(1) 在降低未饱和汽温度的时候, 如果让它的体积改变, 而保持它的压强不变, 能不能使它变成饱和汽? 为什么?

(2) 增大外部压强时, (i) 液体的沸点为什么要升高? (ii) 而熔解时体积缩小的物质, 为什么熔点反而会降低?

(3) 液化气体有哪些应用?

49. 夏天用的人造冰, 是用液态氨在汽化的时候吸收热的方法来使水结冰的. 现在要把 8 公斤 20°C 的水变成 0°C 的冰, 问需要用多少液态氨? (液态氨的汽化热是 500 卡/克.)

50. 蒸汽暖室装置的散热器, 在 3 小时内用蒸汽 6 公斤. 进入散热器的蒸汽温度是 100°C , 流出散热器的水温是 70°C . 问屋内平均每小时从散热器获得多少热量.

51. 夏日温度为 30°C 时, 相对湿度为 60%, 冬日温度为 5°C 时, 相对湿度为 100%, 问在哪一种情况下绝对湿度较大? 而要使湿布干燥, 在哪一种情况下比较容易? 为什么?

52. 傍晚气温为 28°C 时, 相对湿度为 70%, 问当气温降到多少度时才会出现露水? 如果气温降到 20°C , 问这时相对湿度是多少?

53. 四汽缸四冲程内燃机的飞轮每分钟转 300 次, 假使第三冲程中的平均压强是 5 公斤/厘米², 活塞冲程是 0.3 米, 而活塞面积是 120 厘米², 试求内燃机的功率.

54. 热机的作用怎样? 它有哪些几个基本组成部分?

55. 提高热机效率的途径与措施是什么?

56. 奥托内燃机跟狄塞耳内燃机有什么区别? 狄塞耳内燃机的汽缸里没有火花器, 那么它的燃料怎么会燃烧的呢? 为什么狄塞耳内燃机比奥托内燃机的效率高?

57. 蒸汽机的功率是 320 马力, 活塞直径是 50 厘米, 活塞冲程是 75 厘米, 蒸汽的平均压强是 4 公斤/厘米². 求这一蒸汽机飞轮的转速.

习題答案

第一章

习题1.2 4. ≈ 625 年; 5. 2.7×10^{10} 个; 6. 8.4×10^{22} 个;

7. $\frac{N}{\mu}$, $\frac{N}{\mu} \cdot D$.

习题1.3 3. 1260 倍.

复习題一

4. 約 2.2×10^{22} 个; 5. 約 3.3×10^{22} 个; 6. 約 10^8 , 即 1 亿个分子;
7. 約 4×10^{15} 个/秒; 8. 約 5.7×10^8 公里, 15 倍; 9. 依次約各为
 1.5×10^{-22} 克, 6.6×10^{-23} 克, 2.81×10^{-22} 克.

第二章

习题2.4 1. $\frac{mt}{1000}$ 千卡; 2. 400 千卡; 3. $m(t_1 - t_2)$ 千卡.

习题2.5 5. 410.08 千卡; 6. 0.2 公斤; 7. 40°C ;
10. 410 千卡; 11. 5.4°C ; 12. 0.64 千卡/公斤·度.

习题2.6 3. 37.5°C ; 4. 16.8°C ; 5. 0.51 卡/克·度;
6. 3 公斤; 7. 650°C ; 8. ≈ 0.22 卡/克·度; 9. 1.6 千卡/度;
10. 93 千卡, 約 18.6 公斤.

习题2.7 5. 0.25 公斤; 6. 11 公斤; 7. 40%; 8. 18.7 分钟.

习题2.8 2. 2,989,000 公斤·米; 3. ≈ 92.5 公斤;
4. ≈ 2850 馬力; 5. ≈ 112 公里; 6. ≈ 707 公斤; 7. $\approx 25\%$.

复习題二

4. 內能的势能部分增加; 8. $t = \frac{m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2}$; 9. 銀的比热
 $c = 0.0556$ 卡/克·度; 10. $t = 30.55^\circ\text{C}$; 11. 冷水 300 升, 热水 250 升;

13. 436 公斤·米/千卡; 14. 25 次; 15. 29%; 16. 20°C;
 17. 水跟灼热的鉄板之間有一层不容易傳热的蒸汽隔开, 所以不容易蒸发;
 当水滴在温热板上时, 它就紧紧地貼在板面上.

第三章

- 习题3.3 2. 159.8 毫米; 3. 銅尺长 2.47, 鉄尺长 3.47; 4. 283°C;
 5. 0.011 毫米; 9. 每天走快 20.55 秒.

习题3.5 1. 59 厘米²; 2. 17 厘米³; 3. 858 千卡; 8. 螺栓和螺帽之間有一层鉄锈, 形成很大的摩擦力. 螺栓加热时要膨胀, 将这层鉄锈压紧, 因此, 冷却后, 螺栓和螺帽之間重新产生縫隙.

- 习题3.7 1. 150 厘米³; 2. 18.02 厘米; 3. 1.57 厘米³;
 7. 第一种情况, 温度不变的容器中的液面不变; 第二种情况, 液面降低.

- 习题3.9 2. 7.62 厘米³; 3. 13.36 克/厘米³; 4. 0.227 厘米³.

复习題三

7. 伸长 35.7 厘米; 8. 1035 克/厘米²; 11. 0.0000489/度;
 12. 水的体脹系数 $\beta = 0.000282/\text{度}$.

第四章

- 习题4.1 1. 1033.6 克/厘米²; 1.013×10^6 达因/厘米².

- 习题4.3 1. 2000 升; 2. 0.00143 克/厘米³; 3. 48 厘米;
 4. 約 6.7 厘米; 5. 57 厘米; 6. $n \approx 25$ 次.

- 习题4.4 2. $-\frac{273}{2} = -136.5^\circ\text{C}$, $-\frac{2}{3} \times 273 = -182^\circ\text{C}$,
 $-\frac{n-1}{n} \times 273^\circ\text{C}$; 3. -91°C .

习题4.5 3. 不正确, 必須以 0°C 的压强为标准进行計算; 因为 γ 的数值比較大, $P_2 = P_1[1 + \gamma(t_2 - t_1)]$ 不再适用.

- 习题4.9 4. 204 公斤; 5. 0.00083 克/厘米³; 6. 1890 升.

复习題四

4. 管内水銀面高出槽中水銀面 54.1 厘米; 5. 80 厘米;

6. 75.9 厘米高水銀柱; 7. 819°C; 8. 1.1 大气压; 0.91 大气压;
9. 6.4 公斤; 10. 2.76 小时。

第五章

- 习题5.5 3. 400 达因; 5. 39.2 达因/厘米; 6. ≈ 23 毫克;
7. ≈ 31.4 达因/厘米; 8. $\frac{\text{酒精滴数}}{\text{水滴数}} = 3.4$; 9. $\frac{\text{第一管滴数}}{\text{第二管滴数}} = \frac{1}{1.5}$ 。

- 习题5.6 1. $b \approx 0.0018$; 3. 80°C 时的 σ 为 8°C 时 σ 的 $\frac{1}{1.2}$ 。

- 习题5.7 7. 浸潤液体沿容器壁流散; 不浸潤液体則呈球形。

- 习题5.8 6. 約 20.6 达因/厘米; 7. 0.47 毫米; 10. 粉笔中的毛细管比海綿中的更細; 11. 0.82 克/厘米³; 12. 470 达因/厘米。

复习題五

1. 約 3.7 厘米; 約 7.11 厘米; 2. 73.6 达因/厘米²; 5. 約 25,120 尔格; 6. 616 尔格。

第六章

- 习题6.2 4. 4.68×10^{22} 个。

- 习题6.6 6. 1.1×10^4 公斤/毫米²; 7. 0.7 毫米; 8. 0.02 毫米;
9. 原长 10 厘米; 彈性模量 1.25×10^7 达因/厘米²; 10. 約 4 毫米。

- 习题6.7 2. 0.25 公斤·米; 3. ≈ 8 厘米。

- 习题6.8 2. 資用肋强不能超过 12 公斤/毫米²; 4. ≈ 8800 公斤/厘米²; 5. ≈ 4 公里; 6. 33.3 米; 7. 5024 公斤; 8. ≈ 4 ; ≈ 1.7 。

- 习题6.9 1. 300 公斤/毫米²。

复习題六

2. 1.2 厘米²; 3. 43 根; 4. 拉伸、压縮和弯曲; 5. 0.25 公斤;
6. 10 根; 7. 24 公斤/毫米²; 8. 6.8 公斤/毫米²; 9. 13.3 公斤/毫米², 1.33×10^4 公斤/毫米²; 10. 20 公斤; 11. $L_0 = \frac{L_1 P_2 - L_2 P_1}{P_2 - P_1}$ 。

第七章

- 习题7.2 6. 232,650 千卡; 8. 鉛的熔解热是 6.3 卡/克;

10. 水的末温度是 47°C ; 11. 需要准备 23.6 克的火油。

习题 7.11 6. 乙醚的汽化热是 84 卡/克; 7. 混合后的温度是 49.5°C ;

8. 需要给它 12,380 卡的热量; 9. 需要蒸发的液态氨为 1600 克;

10. 吸收热量 7265 卡。

习题 7.15 3. 相对湿度为 49.1%; 4. 10.1°C 。

复习题七

1. 冰的熔解热为 80 卡/克; 2. 最后的温度是 0°C ; 3. 共需热量是

135 千卡; 4. 变成水蒸汽的水的质量为 3.27 克; 5. $p_1 = H - h_2 = 45$

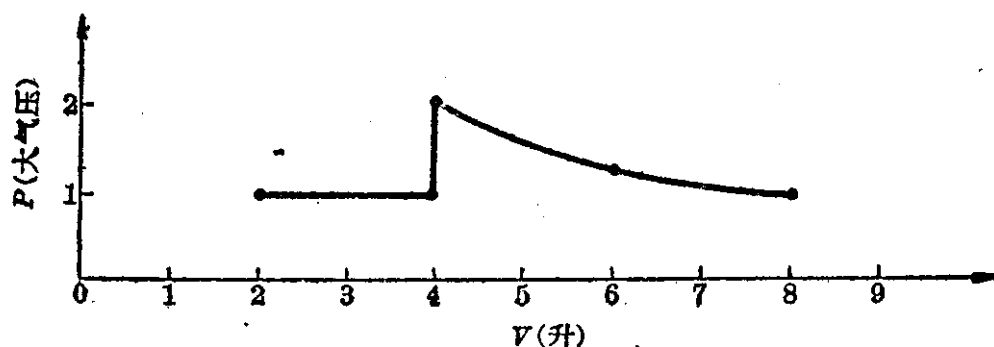
厘米高水银柱; $p_2 = p_1 = 45$ 厘米高水银柱; $p_3 = H - h_2 = 49$ 厘米高水银柱;

$p_4 = \frac{P_3 V_3}{V_4} = 75 - h = 42$ 厘米高水银柱。

第八章

习题 8.1 7.

答:



习题 8.5 4. 70%; 20%; 9.6 公斤/厘米²; 90%; $\approx 13\%$;

5. ≈ 3600 公斤·米; ≈ 174 馬力。

复习题八

7. $p = 5$ 公斤/厘米²; 8. 每一汽缸的功率是 60 馬力, 发动机功率是 480 馬力, 效率 $\approx 31.6\%$ 。

总复习题

1. 0.22 卡/克·度; 2. 0.51 卡/克·度; 3. 48.6 千瓦; 4. 42%;

[习题答案]

5. 約15.9公斤; 6. 0.035°C ; 7. 約27.6千焦耳, 0.307 千瓦;
 8. 鉛溫度的升高是鋁的7倍; 9. 約13.3千瓦; 10. $\approx 0.000029/\text{度}$;
 11. ≈ 2.89 厘米; 12. ≈ 4.5 毫米; 13. $\approx 37.2^{\circ}\text{C}$; 14. 100°C ,
 158.4千卡; 15. 7.73公斤; 16. 肋強為12公斤/毫米², 只跟相對伸
 長有關; 17. 約在 5°C ; 18. $t=402^{\circ}\text{C}$; 19. $7.356 \times 10^{-4}/\text{度}$;
 20. 20.4米; 21. 754.3毫米高水銀柱; 22. 應將玻璃管向下移動5
 厘米; 23. 115.5大氣壓; 24. -272°C ; 25. 1307克;
 26. 325°K ; 27. ≈ 1.2 升; 29. $\approx 6.04 \times 10^{27}$ 個; 30. 拉力282達
 因, 多下沉深度5毫米; 31. 約75達因/厘米; 32. 升高0.72厘米;
 33. 水在細管里升高3厘米, 在兩管之間升高3厘米; 36. 0.32厘米;
 37. 1.33×10^4 公斤/毫米²; 38. 銅絲5公斤, 鋼絲10公斤;
 39. 9.16毫米; 40. 約31.4噸; 42. 16.5公斤; 43. 最終得到
 4°C 的水5公斤; 4688克水, 312克冰, 溫度為 0°C ; 44. 222克;
 45. 0.5卡/克·度; 46. 3.792公斤; 47. 1.4克; 49. 1.6公斤;
 53. 4馬力; 57. 120次/分。