

淮南师范学院实验报告

学院： 电子工程学院 专业： 物理学 班级： 请输入

学号： 请输入 姓名： 请输入 日期： 请输入

一、实验名称：金属线胀系数的测量

二、实验目的：

1. 了解固体线热膨胀的基本规律及线胀系数的物理意义。
2. 掌握用千分表测量金属杆微小长度变化的方法，熟悉温度控制器和 Pt100 温度传感器的使用。
3. 采用逐差法和最小二乘法处理温度—伸长量数据，测定紫铜棒在一定温度范围内的平均线胀系数。

三、实验原理：

（一）固体的线热膨胀

在一定温度范围内，固体受热时各方向的线度均会发生变化。若温度变化不大，可认为金属杆的伸长量与原长及温度变化量成正比，即：

$$\Delta L = \alpha L \Delta t$$

式中，L 为金属杆初始长度， ΔL 为温度升高 Δt 时的伸长量， α 为材料的线胀系数，单位为 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。由上式可得：

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \Delta t}$$

本实验中，千分表读数的变化量用于表征金属杆的伸长量。在测量温度范围内若 α 近似为常量，则千分表读数 S 与温度 t 之间应满足线性关系。

$$S = S_0 + \alpha L(t - t_0) = a + kt$$

其中直线斜率 $k = \alpha L$ ，因此可由拟合斜率求得线胀系数：

$$\alpha = \frac{k}{L}$$

（二）逐差法

为充分利用等间隔测量数据，并减小初始读数偏移对结果的影响，将第 i 个数据与第 i+4 个数据配对，定义：

$$\Delta S_i = S_{i+4} - S_i, \quad \Delta T = t_{i+4} - t_i = 40^{\circ}\text{C}$$

各组线胀系数及其平均值分别为：

$$\alpha_i = \frac{\Delta S_i}{L \Delta T}, \quad \bar{\alpha} = \frac{\Delta \bar{S}}{L \Delta T}$$

（三）最小二乘法及不确定度

用最小二乘法将 S 与 t 拟合为直线 $S = a + kt$ 。斜率 k 的标准不确定度可按下式估计：

$$u(k) = \sqrt{\left[\frac{\sum (S_i - kt_i - a)^2}{(n-2)\sum (t_i - \bar{t})^2} \right]}$$

线胀系数的标准不确定度和相对标准不确定度分别为：

$$u(\alpha) = \frac{u(k)}{L}, \quad u_r(\alpha) = \frac{u(\alpha)}{\alpha} \times 100\%$$

四、主要仪器设备：DH4608T 热学综合实验仪—温度控制器、透光真空管式炉、千分表（分度值 0.001 mm）、Pt100 温度传感器、紫铜棒（标称长度 150 mm）、连接导线等。

五、实验步骤：

- (1) 将温度传感器由左端插入管式炉，在样品两端分别装入石英棒，使金属棒位于炉管中心位置；调节预紧微调螺钉，使千分表长指针预压到约 20 格，保证测头与样品充分接触。
- (2) 连接 Pt100 温度传感器、加热电流输出端和温控器，检查接线无误后接通电源。
- (3) 将温控器设定值调至 110.0 $^{\circ}\text{C}$ ，加热电流调至约 0.300 A，使样品缓慢连续升温。
- (4) 待温度依次达到 30、40、50、60、70、80、90 和 100 $^{\circ}\text{C}$ 时，分别记录千分表读数 S。读数过程中避免振动仪器和实验台。
- (5) 以温度 t 为横轴、千分表读数 S 为纵轴绘制关系图；采用逐差法和最小二乘法计算紫铜棒的平均线胀系数，并与参考值比较。

六、原始数据记录：

（一）实验条件

项目	符号或型号	数值	单位/说明
待测样品	—	紫铜棒	—
初始长度	L	150	mm
千分表分度值	—	0.001	mm（1 μm）
加热电流	I	0.300	A
温控设定值	SV	110.0	℃
记录温度范围	t	30~100	℃
相邻温度间隔	—	10	℃

（二）原始测量数据

测量序号	1	2	3	4	5	6	7	8
实测温度 t _i / ℃	30	40	50	60	70	80	90	100
千分表读数 S _i / μm	45.0	69.5	92.5	116.2	139.5	161.2	184.0	205.0

说明：千分表读数单位统一换算为μm；本次数据为紫铜棒升温过程的连续读数。

七、数据处理：

（一）逐差法计算

紫铜棒初始长度换算为：L=150 mm=150000 μm。取相隔 4 个测量点的数据进行逐差，温差均为 40 ℃。

配对	t _i /℃	t _{i+4} /℃	S _i /μm	S _{i+4} /μm	ΔS _i /μm	α _i /(10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)
1—5	30	70	45.0	139.5	94.5	15.75
2—6	40	80	69.5	161.2	91.7	15.28
3—7	50	90	92.5	184.0	91.5	15.25
4—8	60	100	116.2	205.0	88.8	14.80

逐差伸长量的平均值为：

$$\Delta \bar{S} = \frac{94.5 + 91.7 + 91.5 + 88.8}{4} = 91.625 \mu\text{m}$$

代入线胀系数公式：

$$\bar{\alpha} = \frac{91.625}{150000 \times 40} = 1.527 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$
$$\bar{\alpha} = 15.27 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

（二）最小二乘法拟合

为便于核查拟合计算，列出 t、S、t²和 tS 的计算表。

序号	t/℃	S/μm	t²/℃²	tS/(℃·μm)
1	30	45.0	900	1350.0
2	40	69.5	1600	2780.0
3	50	92.5	2500	4625.0
4	60	116.2	3600	6972.0
5	70	139.5	4900	9765.0
6	80	161.2	6400	12896.0
7	90	184.0	8100	16560.0
8	100	205.0	10000	20500.0
Σ	520	1012.9	38000	75448.0

最小二乘拟合得到：

$$S = -22.1060 + 2.28798t$$
$$R^2 = 0.9996$$

由 k=αL 可得：

$$\alpha = \frac{2.28798}{150000} = 1.525 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$
$$\alpha = 15.25 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

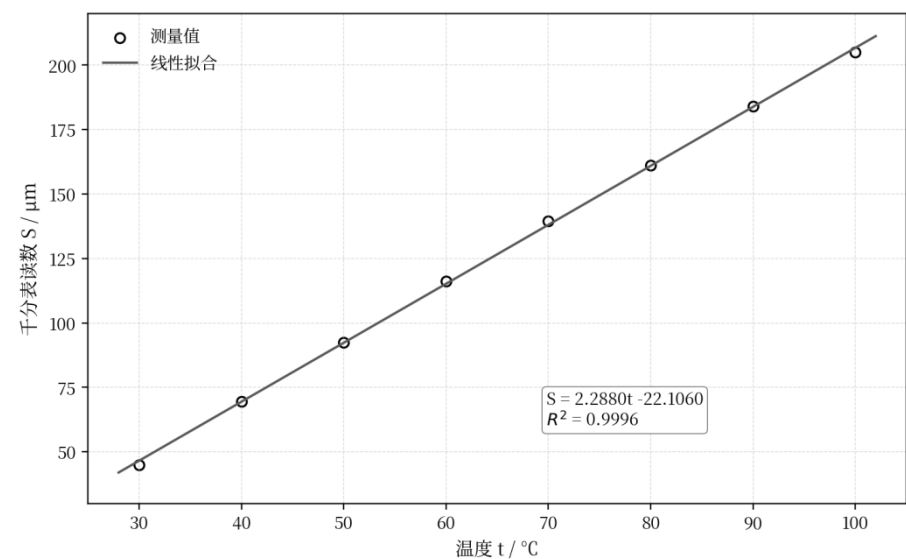


图1 温度 t 与千分表读数 S 的关系及线性拟合

（三）拟合不确定度

由拟合残差计算得斜率标准不确定度、线胀系数标准不确定度及相对标准不确定度如下：

项目	计算结果
斜率 k	$2.28798\text{ }\mu\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
斜率标准不确定度 $u(k)$	$0.01839\text{ }\mu\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
线胀系数 α	$15.25\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
线胀系数标准不确定度 $u(\alpha)$	$0.12\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
相对标准不确定度 $u_r(\alpha)$	0.80%

因此，最小二乘法测量结果可表示为：

$$\alpha = (15.25 \pm 0.12) \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

（四）与参考值比较

紫铜线胀系数参考范围约为 $(17.0\sim 17.5)\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。取参考范围中值 $17.25\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 计算相对误差：

$$E = \frac{17.25 - 15.25}{17.25} \times 100\% = 11.6\%$$

八、实验结果与讨论：

（一）实验规律

实验中温度由 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，千分表读数由 $45.0\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $205.0\text{ }\mu\text{m}$ ，总增加量为 $160.0\text{ }\mu\text{m}$ 。数据点随温度升高近似均匀增加，说明紫铜棒在本实验温度范围内发生明显线膨胀，且伸长量与温度变化量近似成正比，符合 $\Delta L = \alpha L \Delta t$ 的线性热膨胀模型。

（二）两种数据处理方法的比较

逐差法得到 $\bar{\alpha} = 15.27 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，最小二乘法得到 $\alpha = 15.25 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，两者相差仅 $0.02 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，结果一致性较好。最小二乘拟合的 $R^2 = 0.9996$ ，表明 t-S 关系具有很好的线性。逐差法能够削弱初始读数偏移的影响，而最小二乘法综合利用全部数据点，故最终采用最小二乘结果作为实验测量值。

（三）误差分析

测得值低于紫铜线胀系数参考范围，按参考中值计算相对误差约为 11.6%。拟合相对标准不确定度仅为 0.80%，说明数据点本身的随机离散较小，主要偏差更可能来自系统误差。

(1) 温度滞后：温控器显示的是传感器附近温度，金属棒整体可能尚未达到热平衡，导致显示温度高于金属棒平均实际温度，从而使线胀系数计算值偏小。

(2) 千分表接触与预紧误差：测头与石英棒的接触状态、预紧力变化以及支架微小形变都会影响位移传递。

(3) 机械摩擦和卡滞：金属棒伸长过程中，样品、石英棒和炉管之间的摩擦可能使部分热伸长未能完整传递至千分表。

(4) 读数误差：千分表分度值为 $1\text{ }\mu\text{m}$ ，指针摆动、视差和实验台振动会引入读数不确定度。

(5) 有效长度误差：计算采用标称长度 150 mm ，但实际受热并被测量的有效长度与标称值可能存在差异。

(6) 升温速率影响：加热电流约 0.300 A ，若升温较快且未在各温度点充分稳定，长度变化会滞后于温度读数。

（四）实验结论

本实验利用千分表法测量了紫铜棒在 $30\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的热伸长量，实验数据验证了金属棒伸长量与温度变化量近似成正比的规律。逐差法测得平均线胀系数为 $15.27 \times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ；最小二乘法测

得 $\alpha=(15.25\pm0.12)\times10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，相对标准不确定度为 0.80%。测量结果低于紫铜参考值，主要原因可能是温度滞后、机械摩擦、有效长度偏差及千分表接触状态等系统因素。