

# 盾构隧道壁后注浆研究现状及发展趋势

叶 飞, 毛家骅, 纪 明, 孙昌海, 陈 治

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 壁后注浆是盾构隧道施工过程中必不可少的环节。针对盾构隧道壁后注浆的特点, 分析壁后注浆研究拟解决的主要问题, 同时对壁后注浆研究论文的分布特征、研究机构、科研群体及基金资助等情况进行分析, 综述盾构隧道壁后注浆研究现状, 探讨其未来研究的发展方向。结果表明: 1) 传统岩土工程研究对盾构隧道壁后注浆研究具有较大的参考价值; 2) 在论文质量与数量方面, 该领域研究成果依然不多, 且高等院校的优势明显; 3) 国家基金的资助对盾构壁后注浆研究的促进作用巨大; 4) 壁后注浆研究现状中, 对浆液材料研究较多, 注浆参数控制和浆液扩散机制依然停留在理论阶段, 而对注浆效果评估的研究依旧不多。

**关键词:** 盾构隧道; 壁后注浆; 论文分布特征; 研究现状; 发展趋势

**DOI:** 10.3973/j.issn.1672-741X.2015.08.001

中图分类号: U 45

文献标志码: A

文章编号: 1672-741X(2015)08-0739-14

## Research Status and Development Trend of Back-filled Grouting of Shield Tunnels

YE Fei, MAO Jiahua, JI Ming, SUN Changhai, CHEN Zhi

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Back-filled grouting is an essential step in shield tunnelling. In the paper, the main problems that are to be solved in the field of back-filled grouting are analyzed on basis of the characteristics of back-filled grouting; the distribution characteristics, research institutions, research groups and fund sponsorships of research papers in back-filled grouting are analyzed; the research status of back-filled grouting of shield tunnels are summarized, and the development trend of back-filled grouting of shield tunnels is discussed. The results showed that: 1) Researches on conventional geotechnical engineering have great reference value for researches on the back-filled grouting of shield tunnels; 2) In the aspect of paper quality and paper quantity, papers and research achievements on back-filled grouting are still little, and universities have significant advantages in this aspect; 3) The national fund has obvious effect in promoting the researches on back-filled grouting; 4) As to the status of researches on back-filled grouting, there are many researches specialized on grouting materials, the researches on grouting parameter control and grout diffusion mechanisms are still in the theoretical stage, and there are little researches specialized on grouting effect evaluation.

**Keywords:** shield tunnel; back-filled grouting; characteristics of paper distribution; research status; development trend

### 0 引言

盾构工法因具有施工安全、快速、劳动强度低和对环境影响小等优点<sup>[1]</sup>, 被广泛应用于城市地铁和 underwater 隧道的施工; 但盾构法施工时不可避免地会对周围地层造成扰动, 引起地表沉降。控制盾尾地表沉降的关键在于对盾尾间隙的有效充填, 而盾尾间隙的充填需要由壁后注浆来实现。但是, 在注浆过程中经常发生

浆液堵管、泄露; 浆液进入盾尾间隙后, 浆液与土体及管片相互作用; 浆液固结硬化过程和后期填充效果的评估等一系列问题目前都未得到较好的解决。总而言之, 关于盾构隧道壁后注浆存在的诸多问题需要学者们进行持续和深入的探索。

### 1 盾构隧道壁后注浆概述

从岩土注浆技术的发展历程来看, 盾构隧道壁后

收稿日期: 2015-04-20; 修回日期: 2015-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478044, 51178052)

第一作者简介: 叶飞(1977—), 男, 陕西石泉人, 2007年毕业于同济大学结构工程专业, 博士, 长安大学教授, 硕士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的研究与教学工作。

注浆技术总是作为岩土注浆的一个分支, 或者说是因其在盾构法隧道施工中的应用而存在的。法国土木工程师 Charles Berigny 于 1802 年在修理迪耶普(法国)冲砂闸时, 利用木制冲击筒装置, 采用人工锤击的方法向地层注入石灰和黏土, 开启了注浆技术在岩土工程领域应用的大门<sup>[2]</sup>。直到 1864 年, P. W. Barlow 利用水泥浆液在伦敦和巴黎地铁隧洞衬砌背后充填注浆, 并获得了第 1 个用于盾构的注浆专利<sup>[3]</sup>。从此, 随着盾构施工技术的改进与发展, 盾构隧道壁后注浆技术在岩土注浆领域占据了一席之地。

### 1.1 壁后注浆的作用

盾构隧道施工过程中进行壁后注浆的作用有以下 5 点<sup>[4]</sup>。

#### 1.1.1 缓解地层变形

盾构施工过程中, 盾尾脱离管片衬砌后, 衬砌外围形成的盾尾间隙导致周围土体出现临时无支护状态, 此时若不及时对盾尾间隙进行充填处理, 极易导致周围土体向盾尾间隙移动, 进而引起地层变形; 而盾构隧道壁后注浆作为一种弥补地层损失的手段, 在缓解地层变形方面起到了重要的作用。

#### 1.1.2 确保管片衬砌受力均匀

盾构隧道应是一种管片衬砌和地层一体化结构稳定的构造物, 管片上作用的外力也是在这个假定条件下考虑的。这意味着管片背面空隙的均匀注入充填是确保外力(土压)作用均匀的先决条件。壁后注浆使得管片衬砌和地层紧密结合在一起, 地层对管片衬砌产生的压力均匀化, 管片结构受力状态更为良好, 结构更为安全。

#### 1.1.3 提高盾构隧道的抗渗性

盾构壁后注浆层作为盾构隧道抗渗漏的第 1 层防护圈, 能够有效地缓解因盾构管片衬砌出现裂缝或防水垫层损坏而导致的渗漏水。

#### 1.1.4 固定管片衬砌的位置

当盾尾脱离管片衬砌后, 从盾构隧道管片衬砌的角度来看, 此时的管片处于悬空状态, 如果浆液无法及时填充盾尾间隙, 由于管片自身重力作用, 管片纵向螺栓将承受较大的剪切应力, 这对衬砌整体受力性能将产生不利影响。

#### 1.1.5 承受盾构后备设施产生的荷载

盾构作为一种隧道掘进的专用工程机械, 其在金属外壳的保护下将进行土体开挖、土渣排运、整机推进和管片安装等一系列作业。为了完成上述施工任务, 在盾构后部将配备大量的辅助设施, 而由此产生的荷载将直接作用在管片衬砌上, 如果盾尾间隙未得到填充, 管片纵向螺栓及管片本身同样将承受较大的剪切应力。

## 1.2 壁后注浆工艺

### 1.2.1 注入位置

壁后注浆按照注入位置可分为盾尾注浆(通过安装在盾构盾壳上的注浆管注浆, 见图 1(a)) 和管片注浆(通过管片上的注浆孔, 见图 1(b)) 2 种注浆方式的优缺点比较如表 1 所示。

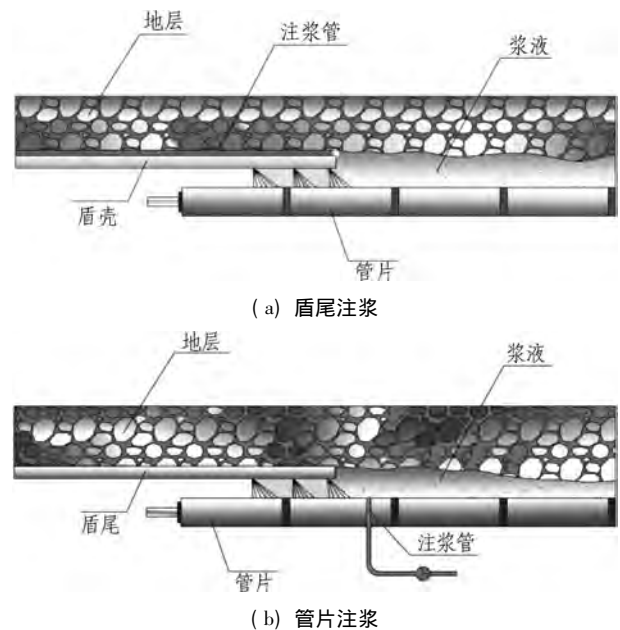


图 1 浆液注入位置示意图

Fig. 1 Sketch of grouting location

表 1 盾尾注浆及管片注浆的优缺点比较<sup>[5]</sup>

Table 1 Comparison and contrast between grouting at shield tail and grouting through segments<sup>[5]</sup>

注浆方式	优点	缺点
盾尾注浆	能够及时、均匀注浆; 降低了渗漏水的可能性; 自动化程度高, 施工控制相对容易; 浆液在盾尾间隙的分布相对均匀	在盾尾布置注浆管会增加盾构直径或钢板厚度; 堵管时清洗困难; 一般只适用于单液注浆, 若选双液浆, 需配置专门清洗装置
管片注浆	操作灵活, 容易清理; 既可选单液浆, 也可选双液浆; 可对局部地段进行二次补浆(如出洞及联络通道位置) 适合特殊情况的处理(隧道偏移, 地表建筑物变形控制等); 不增加盾构直径和钢板厚度	易造成注浆不均匀; 注浆孔是潜在的渗漏点; 管片表面易受浆液污染; 易产生时差, 很难做到真正的同步注浆

### 1.2.2 注入时期

盾构隧道壁后注浆从注入时期上可分为一次注浆和二次注浆。一次注浆按照注入时期的不同又可分为同步注浆、即时注浆和后方注浆; 二次注浆是为补充一次注浆未填充到的部位和浆液体积缩减部分, 或提高

注浆层抗渗性等施工效果而进行的。

同步注浆是通过同步注浆系统及盾尾或管片上的注浆孔,在盾构向前推进、盾尾间隙形成的同时进行,浆液在盾尾间隙形成的瞬间及时填充,从而使周围土体及时获得支撑,可有效地防止土体坍塌,控制地表沉降<sup>[6]</sup>。从壁后注浆的目的考虑,这是比较理想的注浆方式,因为它是在盾尾间隙产生和注浆充填处理没有时滞的状态下实施的<sup>[5]</sup>。

即时注浆是指每当一环推进完毕后就立即实施注浆的方式。

后方注浆是指当盾构推进数环后才从注浆孔进行壁后注浆。

### 1.3 壁后注浆研究拟解决的主要问题

由于围岩与管片是盾构隧道壁后注浆浆液在注浆及后期固结过程中所接触的2种主要介质,所以对盾构隧道壁后注浆的研究归根到底都是围绕着解决下面2个主要问题而展开的:1)地表变形问题;2)管片衬砌结构受力问题。

#### 1.3.1 地表变形问题

在盾构隧道施工过程中,目前公认的引起地表变形的主要原因有以下5个方面<sup>[7]</sup>:

- 1) 刀盘与周围土体间的摩擦(扭转)作用;
- 2) 盾构开挖面支护作用(挤土效应);
- 3) 盾壳与周围土体之间的摩擦作用;
- 4) 开挖面卸载作用;
- 5) 地层损失(主要为盾尾间隙的生成)。

由此可以看出,盾构隧道壁后注浆作为补偿地层损失的手段,对缓解地表变形起到了重要的作用。

对于这一问题的研究,国内外学者主要借鉴了早期岩土领域的研究成果,同时针对盾构隧道的施工特点,展开了大量的分析和研究。目前对于盾构隧道引起的地表变形研究的主要方法有:1)经验公式法(Peck公式及其修正公式)。这一公式最早由R. B. Peck<sup>[8]</sup>于1969年提出,其通过大量的工程监测资料进行反分析,采用地层损失率估算地表变形,并通过工程实测资料对地层损失率的取值进行了统计,认为地表横向沉降槽符合正态分布。此后众多学者针对各自所面临的不同工程地质情况,对其中的参数进行了修正。Schmidt<sup>[9]</sup>、Attewell<sup>[10]</sup>、Rankin<sup>[11]</sup>等学者分别通过自己的研究支持了Peck公式并在其基础上完善和补充了其他相关的公式。2)弹性应变法。C. Sagaseta<sup>[12]</sup>采用镜像法得到了弹性半空间解析解。唐晓武等<sup>[7]</sup>根据盾构隧道施工实际情况,采用Sagaseta提出的等效圆柱来模拟土体损失。叶飞等<sup>[13]</sup>则将此方法引入盾构隧道壁后注浆机制研究中,分析了注浆压力对地表变形的影响。3)随机介质法。朱忠隆等<sup>[14]</sup>将土体视

为随机介质,通过随机预测法对盾构施工所引起的土体损失进行预测。4)复变函数法。王立忠等<sup>[15]</sup>在考虑隧道变形椭圆化的基础上,利用复变函数对土层损失所引起的地表变形进行了映射求解。5)Mindlin法。魏纲等<sup>[16-17]</sup>利用空间弹性力学Mindlin解推导了正面附加推力和盾壳与土体之间摩擦力引起的纵向地面变形计算公式。6)数值算法。于宁等<sup>[18]</sup>分别采用不同数值方法对盾构施工的动态过程进行了模拟,并对其引起的地表变形进行了分析。

各国学者对盾构隧道施工引起的地表变形在时间序列上的划分有着不同的认识。在我国,研究者一般认为盾构推进引起的地表变形过程由以下5个阶段组成:1)盾构到达前;2)盾构到达时;3)盾构通过时;4)盾尾脱出管片衬砌后;5)盾尾通过后土体的长期次固结沉降(以及壁后注浆浆液固结收缩)。而盾构隧道壁后注浆对地表变形的影响主要表现在最后2个阶段。

从时间序列这一角度出发,对盾构隧道施工引起地表变形的研究主要分为2种手段。目前,各国学者主要基于现场监控数据,利用经典时间序列分析方法,如AR模型、ARIMA模型和回归方程等统计时域分析方法研究盾构隧道施工地表变形时间序列,实现以较少的参数和简洁的模型拟合来表达变形时间效应规律。在非线性时间序列即混沌时间序列方面的研究,已有部分学者将其引入岩土工程的变形监测领域中,以F. Darve<sup>[19]</sup>、K. T. Chau<sup>[20]</sup>、G. Lombardi<sup>[21]</sup>、E. L. Krinitzsky<sup>[22]</sup>等为首的学者通过应用混沌理论和分形理论,在混沌相重构空间中揭示出变形动力系统复杂运动特征,从而发现复杂变形系统如盾构施工地表变形中内在的、有序的、确定性规律。

#### 1.3.2 管片衬砌结构受力问题

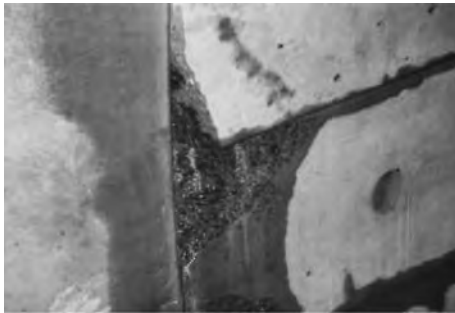
管片是盾构隧道最基本的结构单元,与正常使用阶段相比,管片在施工阶段承受的荷载及相应的力学行为均有较大差异<sup>[23]</sup>。从工程经验可知,管片开裂、错台等损伤多发生在施工阶段(见图2),因此,对管片在施工阶段力学行为的研究尤为重要。盾构壁后注浆作为盾构隧道施工期间一道重要的工序,对管片衬砌结构受荷性能的影响是无法忽略的。

从1922年Hewett和Johnson最早提出圆形衬砌考虑弹性抗力开始,各国学者提出了一系列圆形盾构管片衬砌考虑地层作用的受力计算模型。这些理论为研究考虑壁后注浆的管片衬砌受荷性能提供了极有价值的理论基础和借鉴作用。在现场监测方面,为了准确测量盾构管片上的衬砌压力,T. Hashimoto等<sup>[24]</sup>发明了一种垫片式衬砌压力计,能长期监测隧道掘进机后的衬砌压力或浆体压力。通过现场实测,发现衬砌

压力的变化取决于注浆压力消逝的时间,软黏土中由于壁后注浆的作用,衬砌压力增大,之后随时间的消逝急剧减小,从长期来看又会再次增大,稳定在地基初始应力左右。硬黏土中衬砌压力的形成主要取决于注浆压力,在低注浆压力作用下衬砌压力比在高注浆压力作用下增长的大,而且通常靠近隧道掘进机几环的衬砌压力分布均匀,之后变得越来越不均匀。



(a)



(b)

图 2 施工阶段的管片破损现象<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Segment ruptures in construction stage

然而,在盾构隧道壁后注浆施工实践过程中,施工人员发现由壁后注浆引起的管片上浮成为了管片衬砌损坏的一个重要原因。其中,叶飞<sup>[5]</sup>对这一领域进行了深入地研究,其基于前人的理论研究,提出了盾构管片“局部抗浮计算模式”(即研究 1 块(数块)或 1 环(数环)管片在上浮力的作用下,管片、螺栓,乃至上覆土对其上浮的影响)和“纵向整体抗浮计算模型”(即将已拼装成型管片纵向考虑为一个整体,将其简化为一纵向长梁,考虑该梁在上浮力的作用下,简化梁与地层总体的受力和变形性能)。同时将横向刚度有效率及横向刚度影响系数引入到纵向等效抗弯刚度的分析计算中,从理论上解决了先前研究中将管片纵横向受力性能分开考虑的问题。其后,为了探明盾构隧道纵向变形性能及抗弯刚度有效率的取值,基于模型试验分别对 3 种纵向试验模型进行了加载试验,得到了各级荷载下通缝、错缝和匀质圆筒模型纵向变形规律及其抗弯刚度有效率<sup>[25]</sup>。

## 2 盾构隧道壁后注浆论文检索分析

作为传统岩土注浆技术在盾构法隧道施工中的应

用,国外学者单独对盾构隧道壁后注浆工艺和理论的研究较少,他们还是将更多的目光放在了传统岩土注浆领域上。然而近几年,随着我国盾构施工的普及,盾构隧道壁后注浆工艺和理论研究在国内迅速发展。一个领域内论文的分布蕴含着丰富的发展历程信息,并在一定程度上可预示其发展趋势<sup>[26]</sup>。因而,分析中国盾构隧道壁后注浆论文产出特点,追踪研究机构和研究团队,对回顾其盾构隧道壁后注浆研究历程、分析研究现状、预测发展趋势均有裨益。笔者长期关注盾构隧道壁后注浆论文发表情况,所在科研团队也正致力于开展有关盾构隧道壁后注浆浆液扩散机制及影响方面的研究工作。本文在利用维普中文科技期刊全文数据库对 1993 年以来国内盾构隧道壁后注浆论文进行系统检索的基础上,归纳了论文在发表时间和发表机构等方面的分布特征。同时对国外相关领域的研究情况进行了介绍,总结了国内盾构隧道壁后注浆的研究现状,并预测和展望了其未来研究的趋势及相关科学技术问题。

维普中文科技期刊全文数据库系统检索结果显示,该数据库收录了 1993 年至今盾构隧道壁后注浆文献 176 篇(见表 2)。

表 2 维普中文科技期刊全文数据库盾构隧道壁后注浆文献检索统计

Table 2 Papers in back-filled grouting of shield tunnels: result of literature search from VIP Chinese sci-tech periodical full text database

年份	数量/篇		类别/篇				
	全部期刊	核心期刊	数值分析	现场实测	室内试验	理论分析	论述
1993—2000	11	6	1	3	4	1	2
2001	5	3		4			1
2002	5	1		5			
2003	8	4			3	2	3
2004	11	2		4	2		5
2005	7	5	2	1	3	1	
2006	9	6	1	2	2	1	3
2007	8	4	2		5	1	
2008	13	8	1	1	4	4	3
2009	11	6	1	1	2	3	4
2010	9	5	1	6		1	1
2011	29	17	3	7	6	5	8
2012	21	9	2	1	7	8	3
2013	17	9	3	2	5	6	1
2014	13	5	1	2	3	2	5

注: 2014 年数据截至 2014 年 7 月 1 日; 论文分类以主要研究手段作为分类标准。

### 2.1 论文总体分布特征

1) 从表 2 可以看出,历年的盾构隧道壁后注浆论文在数量上总体呈上升趋势。特别是从 2008 年开始,随着我国众多城市地铁项目的规划和开工,论文数量和质量都有显著提升;但是 20 年内盾构隧道壁后注浆论文的总数占盾构论文(每年平均 200 多篇)总量依然很少,这一现象不但说明盾构法施工的复杂性和涉及面的广泛性,还反映出盾构隧道壁后注浆研究有待深入。

2) 在论文类别方面,盾构隧道壁后注浆的前期研究以现场实测和室内试验 2 个手段为主,自 2008 年以来理论分析开始显著增加,数值分析也略有增加;但是数值分析占每年论文总数的比例反而呈下降趋势,其原因可能是传统的有限元数值模拟并不能很好地反映盾构隧道壁后注浆的真实情况,所以众多学者转而采取其他手段进行研究。

### 2.2 论文分布揭示的盾构隧道壁后注浆发展特征

学术论文的数量、质量以及学术交流活动的活跃度在很大程度上反映一个学科或领域的研究进展。从图 3 可以看出,盾构隧道壁后注浆研究经历了 3 个阶段。

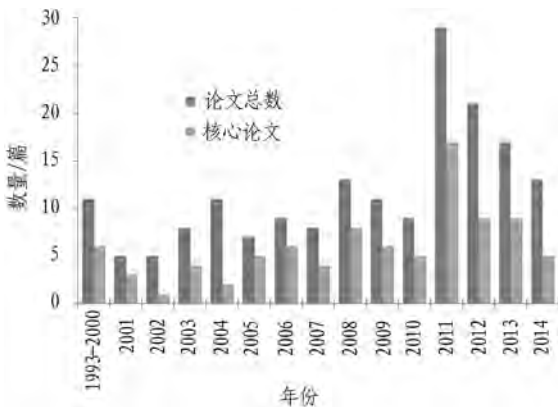


图 3 盾构隧道壁后注浆论文的时序分布

Fig. 3 Temporal distribution of papers on back-filled grouting of shield tunnels

1950 年初,在辽宁阜新煤矿使用手掘式盾构修建疏水巷道工程拉开了我国盾构法施工的序幕,但是由于受到各种因素的制约,盾构技术的研究未能取得明显进展。

20 世纪末,随着上海、广州、北京等城市先后开始采用盾构法修建过江隧道、排水隧道和城市地下铁路,以同济大学为首的一批学者才开始关注盾构隧道壁后注浆技术。在盾构隧道壁后注浆研究的起步阶段,研究工作以引入介绍国外研究成果<sup>[27-33]</sup>并结合特定的工程为主。其中具有代表性的有唐益群等于 1993 年和 1995 年先后在《地下空间与工程学报》(曾用刊名《地下空间》)上发表了 3 篇分别关于惰性浆液性质的实验研究、隧道轴线上浮机制研究和地面沉降与注浆

量关系的论文<sup>[34-36]</sup>。

在 21 世纪头几年,盾构隧道壁后注浆的研究工作进入了瓶颈阶段,在此期间发表的论文多数是对施工工艺和经验的总结归纳及适应各自地质的浆液材料特性试验研究。论文的研究手段也较为单一,主要采用现场实测和室内试验。

进入 2008 年,随着我国城市地铁项目在众多城市上马,盾构隧道壁后注浆的研究论文在数量和质量上都得到了明显的提升,特别是到了 2011 年,论文数量出现急剧增长,研究手段也呈现多样化的趋势。在这个阶段理论推导开始大量涌现,众多学者不满足于对现场实测和室内试验得到的数据规律的分析,希望通过理论推导和数值分析手段得到壁后注浆对土体和管片的影响及作用机制。与此同时,部分学者开始对盾构隧道壁后注浆浆液的分布和注浆效果的评价进行研究,其中同济大学黄宏伟教授及其课题组在这方面做了大量的研究工作<sup>[37-40]</sup>。

### 2.3 论文的研究机构与学术团队

对盾构隧道壁后注浆论文的研究机构和学术团队进行归纳,发现多家研究机构合作的情况较为普遍,34%的论文由多个科研机构的研究人员联合署名,且近年来机构间的合作趋势愈加明显,这种现象说明了盾构隧道壁后注浆的研究正逐渐从理论走向实践应用。为分析方便,由多家研究机构和人员联合署名发表的论文,研究机构和人员只统计前 2 位,各计 1 篇。由图 4 可以看出,高等院校和生产单位是盾构隧道壁后注浆研究的主力军。其中在高等院校中,同济大学和长安大学以 27 篇和 13 篇论文分列第一和第二位。而在生产单位中,中国铁路工程总公司系统以 31 篇论文占据绝对优势。从论文质量上来看,高等院校发表的论文被核心期刊收录的数量远远超过生产单位,但是高等院校发表的论文同样存在一个较大的问题,即研究内容过于理想化,得出的结论往往无法直接应用于生产实践中;因此,高等院校与生产单位的合作具有很大潜力。

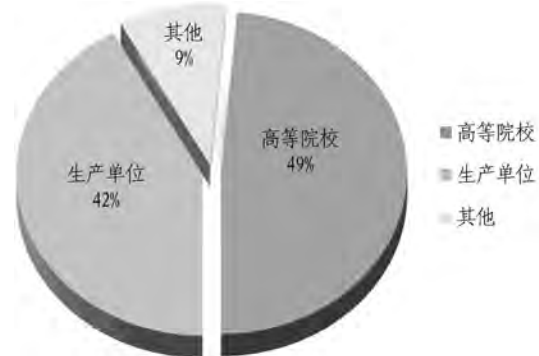


图 4 论文研究机构和学术团队分析

Fig. 4 Analysis diagram of research institutions and academic teams of papers

统计结果还表明,近年来同济大学、河海大学以及长安大学等一批高等院校科研团队走在了盾构隧道壁后注浆研究队伍的前列。预计在未来的研究中这些团队将会承担更多课题,发挥更大的作用,因而及时追踪这些学术团队的科研成果能更好地把握盾构隧道壁后注浆在国内的研究进展。然而在生产单位中很难找到有对盾构隧道壁后注浆进行持续深入研究的稳定科研团队,这也是导致生产单位关于盾构隧道壁后注浆研究水平较低的原因之一。

#### 2.4 论文的基金资助情况

对 2008—2014 年核心期刊论文的基金资助情况统计表明(见表 3),近 7 年发表在核心期刊上的盾构隧道壁后注浆论文有 56% 受到过国家相关基金的资助,这充分体现了国家基金资助对科研产出的重要意义。国家主要通过国家重点基础研究发展规划(973)项目、国家高技术研究发展计划(863)项目、国家科技“十一五计划”支撑项目、国家重大科技专项、国家自然科学基金、博士后科学基金和中央高校基本科研业务专项基金项目等诸多类型进行资助。

表 3 2008—2014 年核心期刊论文基金资助情况

Table 3 Statistical results of fund of core journal papers from 2008 to 2014

年份	核心期刊 论文/篇	基金资助	
		论文/篇	比例/%
2008	8	4	50
2009	6	4	67
2010	5	2	40
2011	17	8	47
2012	9	9	100
2013	9	5	56
2014	5	1	20
合计	59	33	56

### 3 国外盾构隧道壁后注浆研究情况

由上文可知,国外对盾构隧道壁后注浆技术的应用远早于我国,所以关注国外学者对盾构隧道壁后注浆及相关领域的研究,具有较大的参考意义。Koyama 等<sup>[41]</sup>在 1998 年采用室内试验对盾构隧道壁后注浆进行了模拟,并且分析了浆液对隧道衬砌及周围土体的影响,试验结果表明,注浆压力和地层土体密度对管片衬砌的压力及地层位移的影响较大。Hashimoto 等<sup>[42]</sup>通过尺寸为 750 mm × 450 mm 的隔膜衬砌压力计,对作用在管片上的壁后注浆压力及浆液固结压力进行了现场测量。Kasper 和 Meschke 则分别在考虑注浆压力的情况下,对盾构隧道开挖过程进行了三维有限元模拟。Mo 等<sup>[43]</sup>指出,注浆压力分布较为复杂,不均匀的

压力分布可能会导致管片错台甚至破裂,在其研究中,注浆压力被认为是沿着横断面的竖向轴线呈线性增长,并最终等于土压力值。

其中不得不提的是,以 Bezuijen 为首的一批学者,通过室内试验、理论分析和现场监测等多种研究手段,对盾构隧道壁后注浆理论进行了大量的研究<sup>[44]</sup>。其中采用土工离心机对盾构隧道壁后注浆过程进行了相似模型试验,研究分析了不同注浆压力对地表及桩基础的影响。通过计算分析建立了考虑浆液时效性的理论模型,同时对 Sophia 铁路隧道进行了现场实测验证,结果表明在靠近盾尾处(小于 5 m)的浆液压力由注浆压力来决定;而在远离盾尾时,浆液压力主要由管片所受到浮力及弯矩的反作用力来决定的。研究还表明,浆液压力还受到管片安放位置及盾构掘进的影响,掘进过程中的浆液压力较计算值略小。此外,Bezuijen 还通过选取注浆层单元体,对其进行了室内试验(见图 5),研究分析了浆液固结对地层及管片衬砌的影响。

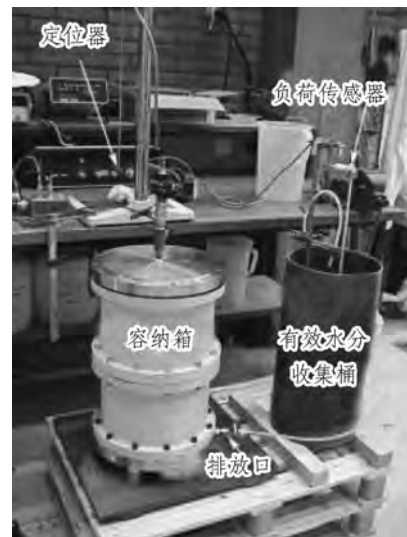


图 5 试验装置

Fig. 5 Experiment setup

### 4 国内盾构隧道壁后注浆研究现状

盾构隧道壁后注浆作为岩土注浆的一个分支,既具有自身的特点,又继承了岩土注浆研究中的重要成果和关键技术,所以众多学者在盾构隧道壁后注浆的研究过程中往往会参考岩土注浆研究的相关论文,并有选择性得借鉴其研究成果。

#### 4.1 浆液材料

从统计文献中可以看出,注浆材料是盾构隧道壁后注浆研究中关注较多的一个方面。盾构隧道壁后注浆浆液与普通岩土加固注浆浆液的不同之处在于普通岩土要求浆液具有渗透性,即注浆时浆液能够侵入岩土介质中,起到加固岩土的作用,而壁后注浆充填材料

最基本的特性是填充性及其紧密相关的流动性和流失性,同时要求浆液硬化后具有很好的固结强度。目前盾构隧道施工中壁后注浆浆液大致可分为单液型和双液型2大类,单液型浆液又可分为惰性浆液和硬性浆液,双液浆又可根据初凝时间不同分为缓凝型、可塑型和瞬凝型<sup>[45]</sup>。虽然目前盾构隧道壁后注浆中采用较多的还是单液浆,但双液浆的应用在日本、意大利、新西兰、保加利亚和新加坡等国家已经相当普遍<sup>[46]</sup>,国内也有不少工程开始采用双液浆进行壁后注浆,例如上海延安东路越江隧道、南水北调工程南干线和盾构下穿北京地铁4号线大兴线段等一系列工程。相信双液浆的研究和使用在未来将越来越广泛和深入。

早期由水泥和水玻璃类活性材料制成的双液浆,因为清洗不彻底,易产生堵管,达不到充分填充盾尾间隙的目的<sup>[47]</sup>。于是在20世纪90年代,以软弱地层为主的上海地铁从法国引进了土压平衡盾构,开始使用单液惰性浆液。祝龙根等<sup>[48]</sup>针对惰性浆液提出了动静性能优良、泵送性好及价格低廉的优选配制方法并进行了配合比试验。周东等<sup>[47]</sup>就地取材,采用盾构隧道施工的弃土改良了原先的惰性浆液。为了寻找一种适应上海西藏南路越江隧道工程的惰性浆液,肖立等<sup>[49]</sup>通过室内和现场注浆配比试验给出了浆液的具体配比,并用现场监测数据及数值模拟结果对这种惰性浆液的工程特性进行了验证。而肖朝昀等<sup>[50]</sup>则分析了添加泵送剂、增稠剂和氢氧化钠等材料对惰性浆液性能的影响,并得到了优化的浆液配比;但是单液惰性浆液作为一种在软弱地层中被广泛应用的注浆材料,其动静强度较低、抗渗性能差等缺点始终无法被克服,不利于隧道衬砌早期稳定和隧道防渗效果。

凭借具有一定的早期强度、凝固时间可控及易于泵送等优点,以水泥作为主料,砂土作为骨料的硬性浆液开始在盾构隧道壁后注浆中占有一席之地。由于其对施工管理要求和浆液材料成本相对双液浆较低,这一特点正好符合我国当时的施工和经济水平,硬性浆液在工程中被广泛应用。为了增强其保水性,郑大锋等<sup>[51]</sup>对比了羧甲基纤维素、聚乙烯醇和聚丙烯酸钠3种高聚物对掺高效减水剂GCL1-3A的盾构隧道注浆材料的泌水性、流动度、凝结时间以及水泥净浆流变性的影响。王红喜等<sup>[52]</sup>采用相同的有机-无机复合技术原理配制出了适用于武汉长江隧道壁后注浆的硬性浆液材料。为了获得稳定性和流动性均较好的水硬性浆液,田焜等<sup>[53]</sup>采用配合比试验对粉煤灰掺量、减水剂种类和掺量、水胶比、胶砂比等与流动度、结石体3, 14, 28 d抗压强度、凝结时间之间的关系进行了研究。彭波等<sup>[54]</sup>希望通过掺加苯丙乳液、纯丙乳液和乳化沥青来提高超高掺量粉煤灰同步注浆硬性浆液的和易

性、抗裂性和耐水性,并且对这3种聚合物的改性效果进行了比较分析。

至于双液浆,早在20世纪90年代就被应用于上海市延安东路隧道南线工程中。夏诗梁<sup>[55]</sup>还对其在施工中的应用、浆液性能、注浆方法以及注浆系统的改进做了详细的介绍。双液浆具有凝结时间更短、短期和长期强度均比较大、固结后体积变化较小、泵送时材料分离度小等特点。双液浆的引入也在一定程度上克服了盾构隧道壁后注浆的2个主要矛盾:1)保持浆液流动性和降低浆液流失性;2)要求浆液具备一定早期强度和避免浆液堵塞运输管道。但是由于双液浆的应用将大幅提高工程成本,并且对施工管理水平要求较高,所以限制了其在盾构隧道壁后注浆中的应用。不过在统计文献中仍然能够找到几篇针对双液浆进行研究的论文。苏华等<sup>[56]</sup>就曾在室内进行了注浆模拟实验,探讨了各材料组分对注浆材料流动性、稳定性、凝胶特性和强度等性能的影响。郭志超等<sup>[57]</sup>通过对水泥复合偏高岭土-水玻璃注浆材料的 $\text{Na}^+$ 固化性能和抗水溶蚀性能进行试验验证,并采用IR和SEM微观测试分析手段提出了以 $(\text{Na}, \text{Ca})-\text{Si}-\text{Al}-\text{H}$ 类沸石凝胶物质为主、 $\text{C}-\text{S}-\text{H}$ 为辅的浆液组成结构,改善了浆液材料凝胶时间不稳定、产物稳定性和抗地下水侵蚀性能差等主要问题。

#### 4.2 注浆参数控制

对注浆机制的研究主要为了明确壁后注浆对地表及建筑物和管片衬砌的影响,其研究决定了施工过程中应该选取的注浆压力、注浆率、注浆时间、注浆速率、注浆点的布置及浆液材料特性等诸多注浆参数。

注浆压力和注浆量作为施工过程中最重要的2个参数,也是注浆机制研究的重点。学者们分别从上覆土压力、地层劈裂、螺栓接头抗剪破坏及前方泥水压力(泥水盾构)等因素,对注浆压力临界值进行探讨。徐方京等<sup>[58]</sup>采用上覆土压力对注浆压力的上下临界值进行了估计,但忽略了管片螺栓剪切破坏、盾尾窜浆、土体劈裂等诸多因素对注浆压力的限制作用。随后,叶飞<sup>[59-61]</sup>在对管片抗浮研究中,在考虑了螺栓接头抗浮效应和上覆土抗浮效应的情况下,给出了注浆压力上限值,认为上覆土压力不仅作用于注浆浆液,而且对管片上浮的阻碍作用较大。宋天田<sup>[62]</sup>则分别从地层劈裂、前方泥水压力(泥水盾构)、上覆土压力对注浆压力控制进行了讨论,并且认为计算注浆量公式(1)中的注浆率 $\alpha$ 包括由注浆压力产生的压密系数、地质情况决定的土质系数、施工消耗系数和掘进方式产生的超挖系数等。

$$Q = \left[ \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) \right] m \alpha. \quad (1)$$



卢海林等<sup>[63]</sup>将注浆过程看成产生盾尾间隙的逆过程,根据浆液量的分布,通过引入镜像法<sup>[64]</sup>计算分析了注浆过程对地表沉降的影响。

另外,有不少学者从盾构推进速度、隧道直径、注浆孔数量及布设位置等注浆施工参数来研究其对注浆机制的影响。杨方勤等<sup>[65]</sup>就曾对上海长江隧道抗浮模型试验进行了介绍,并且在考虑浆液固化的情况下,通过理论推导认为随着盾构推进速度的增大,管片上浮力也将增大。

#### 4.3 浆液扩散机制

注浆扩散机制的研究实质上是注浆参数控制研究的一个延伸。其研究目的就是为在充分理解注浆浆液流动和浆液压力分布等机制的情况下,更好地指导注浆参数和盾构型号的选取,并且为盾构隧道的设计提供参考。

李志明等<sup>[66]</sup>、袁小会等<sup>[67]</sup>和范昭平等<sup>[68]</sup>对同步注浆浆液力学机制进行了理论分析,推导出了相应的注浆压力分布模型,但其研究未考虑浆液的时变性。叶飞等<sup>[69]</sup>在归纳总结了前人研究成果的基础上,将浆液在管片壁后的扩散方式理想化归纳为充填注浆、渗透注浆、压密注浆及劈裂注浆 4 个阶段,并提出了盾尾间隙土体等效孔隙率的概念。随后的研究中,以叶飞为学术带头人的研究团队分别对浆液扩散过程中的 4 个阶段(见图 6)展开了理论研究<sup>[70-74,13]</sup>。在理论推导过程中,叶飞将浆液时变性和施工扰动导致围岩结构变化等诸多因素考虑进注浆计算模型中,形成了较为系统的浆液扩散模型。魏新江等<sup>[75]</sup>则基于单圆盾构壁后注浆的研究,对双圆盾构注浆浆液扩散方式及压力分布进行了研究,根据双圆盾构两点注浆的工艺特点,提出了浆液两阶段扩散机制。

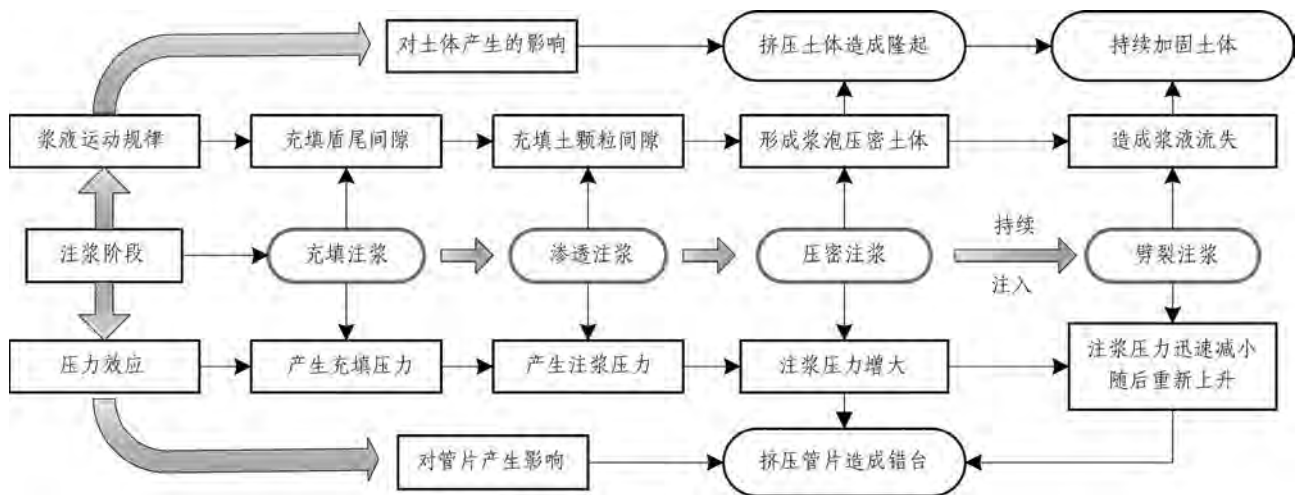


图 6 盾构管片壁后注浆扩散过程示意<sup>[45]</sup>

Fig. 6 Diffusion process of back-filled grouting of shield tunnel

#### 4.4 浆液固结机制

早在 1993 年,唐益群等<sup>[34]</sup>就为了对盾构管片在惰性浆液中的上浮现象做出解释,进行了浆液固结试验。通过对试验结果的分析,认为管片衬砌上浮的主要原因是浆液的分层固结,且随着固结速率增大,上浮速率也将增大。朱合华等<sup>[76]</sup>利用 Goodman 单元和应力释放系数法描述盾尾注浆压力消散作用对土体应力状态变化的影响。之后的几年中,少有学者再涉足这一方面的研究。直到 2007 年,韩月旺等<sup>[77-78]</sup>和袁小会等<sup>[79-80]</sup>才开始在 Kasper 等<sup>[81-82]</sup>、G. Swoboda 等<sup>[83]</sup>和 K. Komiya 等<sup>[84]</sup>国外学者的研究基础上,利用壁后注浆单元体模型试验装置(见图 7)研究了在不同的注浆压力、注浆材料和围岩土质条件下浆体变形及浆液压力消散的规律,推导出固结变形数值模型,并且用数值计算模型对试验结果进行了验证。杨春山等<sup>[85]</sup>通过有限元软件分别模拟了考虑浆液固结过程和

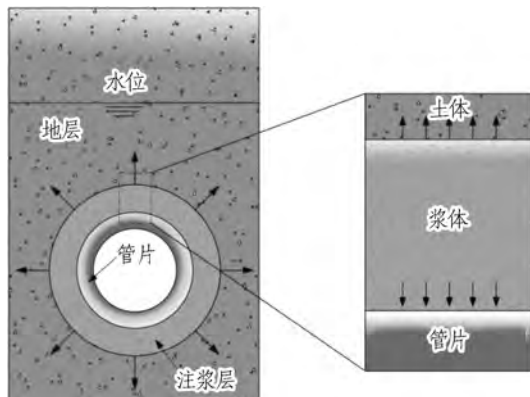
未考虑浆液固结过程 2 种盾构施工,并与现场监测数据进行对比,认为在控制地表沉降时,有必要考虑浆液后期的固结过程。万战胜等<sup>[86]</sup>沿用了张云等<sup>[87]</sup>提出的将盾尾间隙及沿隧道径向向外延伸一定范围内的土体看作等分层的思路,对其赋予不同的物理参数来模拟浆液固结过程对地表沉降的影响。

#### 4.5 注浆效果评估

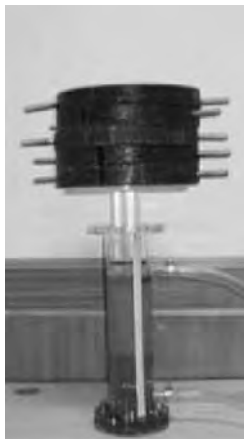
盾构施工注浆效果的好坏,直接关系到盾构隧道本身的施工安全及周围建筑物的稳定和安全,所以对管片壁后浆液分布情况和注浆效果的好坏评价也一直是工程界及学术界关注的重点。在盾构隧道壁后注浆浆液的分布和注浆效果的评价方面,同济大学黄宏伟、杜军和张丰收等学者较早进行了这方面的研究工作<sup>[88-92]</sup>,对利用探地雷达方法探测检验盾构隧道壁后注浆分布进行了一系列卓有成效的研究。上海交通大学的学者也对盾构隧道壁后注浆浆液分布、注浆效果



检验及评价进行了诸多尝试,取得了一些研究成果<sup>[93-94]</sup>。张平松等<sup>[95]</sup>结合盾构隧道结构进行不同模型设计,通过高密度电法正演模拟及数据反演,说明了进行注浆质量检测的可能性,并就高密度电法实际探测存在的问题及应用进行了探讨分析,为隧道壁后注浆质量检测提供了一种可能的新途径。



(a) 模型概化示意图



(b) 试验装置<sup>[87]</sup>

图7 壁后注浆单元体及浆体固结模型装置

Fig. 7 Back-filled grouting element and experiment set-up for grout solidification

## 5 需要重点研究的问题与发展趋势

到目前为止,我国已有38个城市被批准建设城市地铁项目(截至2014年6月),且有大量的城市越江隧道、城市排水管线及区域输水、输油线路等项目的修建都将采用盾构法施工。鉴于我国幅员辽阔,地质状况复杂多样,项目各具特点,所以盾构隧道壁后注浆研究将在极富挑战性的背景下展开,总体上有如下发展趋势:

1) 数值模拟作为岩土领域重要的研究手段,具有成本低、可重复、操作较简便等优点,但是从上文统计分析可以看出,数值模拟在盾构隧道壁后注浆研究中所占的比例并不高。导致这一现象的原因可能是影响盾构隧道壁后注浆的因素众多,且土体作为非均质、各向异性体,其本构模型复杂等,使得研究者在对其进行数值模拟时,参数选取因人而异,结果可信度低。开发出适合

盾构隧道壁后注浆特点的数值模拟软件,显得尤为必要。

2) 目前双液浆的使用主要依靠现场经验,对于双液浆特性的研究依然不多。此外由于双液浆具有快速凝结、固结后强度高、不易渗入周边土体等特点,当前基于单液浆的注浆机制和浆液固结机制的研究结论必然是不符合双液浆注浆的。

3) 在注浆机制方面的研究依然有相当长的路要走。许多学者仅仅考虑了注浆过程中的浆液充填和压密阶段,但是对浆液的渗透和劈裂机制研究深入不够,作为一个连续的过程,且根据土体条件的不同,扩散过程区别较大,因此如何模拟在不同土质条件下连续注浆过程,选取合适的注浆压力、注浆量等盾构隧道注浆施工参数,将是今后研究工作应该重点关注的问题。

4) 壁后注浆在充填盾尾间隙和加固土体的同时,对管片也产生了一定压力,该压力达到一定程度时,可能引起管片局部或整体上浮、错台、开裂、压碎或其他形式的破坏;因此,对壁后注浆引起的管片衬砌结构变形模式及机制的研究是极其必要的。同时基于管片整体及纵横向变形的注浆临界压力的选取对注浆施工也具有较大的意义。

5) 随着盾构工法的应用越来越广泛,为了满足不同的工程需求,各种异型盾构将随之出现。这一变化必将引起盾构隧道壁后注浆工艺的改变,使得原有的壁后注浆理论不再适用。可以预见,学者们必将提出与之适应的研究理论,同时,在高寒、高水压等特殊环境对壁后注浆工艺也将提出了新的要求。

## 6 结论与讨论

壁后注浆是盾构隧道施工的重要环节,随着盾构工法在城市隧道施工中广泛应用,对于壁后注浆的研究将逐渐增多。本文通过对盾构隧道壁后注浆国内外研究进行归纳分析,得出如下结论。

1) 地表变形问题及管片结构受力问题作为盾构隧道壁后注浆研究拟解决的主要问题,决定了该领域研究的特点,即在继承和应用传统岩土工程研究成果的基础上,结合盾构隧道自身特点来试图解决上述2个主要问题。

2) 虽然盾构隧道壁后注浆的论文数量在近几年迅猛增长,但是其论文数量依然在盾构隧道论文中占极小部分,且采用数值模拟作为研究手段的论文数量较其他研究手段少很多。在研究机构论文发表数量及质量方面,高等院校优势明显,同时国家自然科学基金对科研产出具有较大的促进作用。

3) 单液浆在盾构隧道施工中仍然被广泛采用;但是随着我国经济的发展和施工管理水平的提升,双液浆将凭借其凝结时间更短,短期和长期强度均比较高,

固结后体积变化较小,泵送时材料分离度小等优点在盾构隧道壁后注浆施工中占有一席之地。

4) 虽然在浆液扩散机制方面已经取得了一些研究成果;但是对渗透阶段和劈裂阶段的研究依然深入不够,而且由于土质状况及注浆过程的复杂性,目前的研究成果还无法对注浆施工做出有效指导,对注浆参数的选取仍然依靠施工经验,显然这方面的研究还任重道远。

5) 在浆液效果评估方面的研究依然不多,目前被应用于实践研究仅限于采用探地雷达方法对壁后注浆分布进行检测。

#### 参考文献(References):

- [1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (ZHOU Wenbo. Shield tunnelling technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese))
- [2] Della M R. Alkali-activated cements opportunities and challenges [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(2): 249-254.
- [3] 郑玉辉. 裂隙岩体注浆浆液与注浆控制方法的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2005. (ZHENG Yuhui. Research on grouts and controllable method of grouting in rock mass of the fissures [D]. Jilin: Jilin University, 2005. (in Chinese))
- [4] Shirlaw J N, Richards D P, Ramond P, et al. Recent experience in automatic tail void grouting with soft ground tunnel boring machines [C]//Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress. Singapore: Elsevier, 2004: 22-27.
- [5] 叶飞. 软土盾构隧道施工期上浮机制分析及控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (YE Fei. Analysis and control for upward movement of shield tunnel during construction [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [6] 邹翀. 盾构隧道同步注浆技术[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(1): 26-30. (ZOU Chong. Simultaneous grouting technique of shield-driven tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology 2003, 40(1): 26-30. (in Chinese))
- [7] 唐晓武, 朱季, 刘维, 等. 盾构施工过程中的土体变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 417-422. (TANG Xiaowu, ZHU Ji, LIU Wei, et al. Research on soil deformation during shield construction process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 417-422. (in Chinese))
- [8] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: State of the Art Volume, 1969: 225-281.
- [9] Schmidt B. Settlements and ground movement associated with tunnelling in soil [D]. Urbana: University of Illinois, 1969.
- [10] Attewell P B. Engineering contract, site investigation and surface movements in tunneling works [C]//Soft-ground Tunneling Failures and Displacement. Rotterdam: A A Balkema, 1981: 5-12.
- [11] Rankin W J. Ground movement resulting from urban tunneling: Predictions and effects. Engineering geology of underground movements [C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on the Engineering Group of the Geological Society. Nottingham: Nottingham University, 1988: 79-92.
- [12] Sagaset A C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [13] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 618-624. (YE Fei, GOU Changfei, CHEN Zhi, et al. Ground surface deformation caused by synchronous grouting of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 618-624. (in Chinese))
- [14] 朱忠隆, 张庆贺, 易宏传. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 56-59. (ZHU Zhonglong, ZHANG Qinghe, YI Hongchuan. Stochastic theory for predicting longitudinal settlement in soft-soil tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 56-59. (in Chinese))
- [15] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起的地基变形[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 319-327. (WANG Lizhong, LV Xuejin. A complex variable solution for different kinds of oval deformation around circular tunnel in an elastic half plane [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 319-327. (in Chinese))
- [16] 魏纲, 徐日庆. 软土隧道盾构法施工引起的纵向地面变形预测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1077-1081. (WEI Gang, XU Riqing. Prediction of longitudinal ground deformation due to tunnel construction with shield in soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1077-1081. (in Chinese))
- [17] 魏纲, 张世民, 齐静静, 等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学和工程学报, 2006, 25(增刊1): 3317-3323. (WEI Gang, ZHANG Shimin, QI Jingjing, et al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3317-3323. (in Chinese))
- [18] 于宁, 朱合华. 盾构隧道施工地表变形分析与三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1330-1334. (YU Ning, ZHU Hehua. Analysis of earth deformation caused by shield tunnel construction and 3D-FEM simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1330-1334. (in Chinese))
- [19] Darve F, Laouafa F. Instabilities in granular materials and application to landslides [J]. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials 2000, 5(8): 627-652.
- [20] Chau K T. Landslides modeled as bifurcations of creeping slopes with nonlinear friction law [J]. International Journal of Solids and Structures, 1995, 32(23): 3451-346.

- [21] Lombardi G. On the limits of structural analysis of dams [J]. *International Journal on Hydro Power & Dams*, 1996, 3(5): 50-56.
- [22] Krinitzky E L. Earthquake probability in engineering [J]. *Engineering Geology*, 1993, 36(1-2): 1-52.
- [23] 宋克志,袁大军,王梦恕. 盾构法隧道施工阶段管片的力学分析 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(3): 619-623. (SONG Kezhi, YUAN Dajun, WANG Mengshu. Segmental mechanical analysis of shield tunnel during construction stage [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 619-623. (in Chinese))
- [24] Hashimoto T, Brinkman J, Konda T, et al. Simultaneous backfill grouting pressure development in construction phase and in the long-term [C]//*Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress*. Singapore: Elsevier, 2004: 52-59.
- [25] 叶飞,杨鹏博,毛家骅,等. 基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 37(1): 83-90. (YE Fei, YANG Pengbo, MAO Jiahua, et al. Longitudinal rigidity of shield tunnels based on model tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 37(1): 83-90. (in Chinese))
- [26] 秦勇. 从CNKI论文看中国煤层气产业发展 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(12): 26-29. (QIN Yong. Having a view on Chinese coalbed methane industry development from CNKI publications [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(12): 26-29. (in Chinese))
- [27] Moor E K. Model studies of the behavior of deep tunnels in clay [C]//*Proc. of the 12<sup>th</sup> ICSMFE. Rio de Janeiro* [s. n.], 1989: 909-912.
- [28] Mair R J. Application of centrifuge modelling to the design of tunnels and excavations in soft clay [C]//*Proc. of a Symposium on the Application of Centrifuge Modeling to Geotechnical Design. Manchester* [s. n.], 1984: 357-380.
- [29] Eisenstein Z. The contribution of numerical analysis to the design of shallow tunnels [J]. *Geomechanical Modelling in Engineering Practice*, 1986(2): 135-165.
- [30] Eisenstein Z, Ezzeldine Q. 隧道施工技术对地层控制的影响 [J]. *隧道译丛*, 1993(8): 29-34. (Eisenstein Z, Ezzeldine Q. Influence of tunnel construction technology on ground control [J]. *Suidao Yicong*, 1993(8): 29-34. (in Chinese))
- [31] Anagnostou G, Kovan K. Face stability of slurry-shield-driven tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, 9(2): 165-174.
- [32] Kuzihara K, Mori A, Tamura M. Experimental study on the suitable pressure in a slurry type shield [C]//*土木学会论文集*. [s. l.]: [s. n.], 1989(9): 156-168.
- [33] 中岛信,矢秋秀一,藤木育雄. シールドトンネルの新技术(8),Ⅲ. 设计・施工编 [J]. *トンネルと地下*, 1991, 22(1): 69-78.
- [34] 唐益群,叶为民,张庆贺. 上海地铁盾构法施工隧道中几个问题的研究(一) [J]. *地下空间*, 1993, 13(2): 94-99. (TANG Yiqun, YE Weimin, ZHANG Qinghe. Some problems in tunneling by shield driven method for Shanghai Metro( I) [J]. *Underground Space*, 1993, 13(2): 94-99. (in Chinese))
- [35] 唐益群,叶为民,张庆贺. 上海地铁盾构法施工隧道中几个问题的研究(二) [J]. *地下空间*, 1993, 13(3): 171-177. (TANG Yiqun, YE Weimin, ZHANG Qinghe. Some problems in tunneling by shield driven method for Shanghai Metro( II) [J]. *Underground Space*, 1993, 13(3): 171-177. (in Chinese))
- [36] 唐益群,叶为民,张庆贺. 上海地铁盾构施工引起地面沉降的分析研究(三) [J]. *地下工程*, 1995, 15(4): 250-258. (TANG Yiqun, YE Weimin, ZHANG Qinghe. Some problems in tunneling by shield driven method for Shanghai Metro( III) [J]. *Underground Space*, 1995, 15(4): 250-258. (in Chinese))
- [37] 黄宏伟,刘遵剑,谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆效果的雷达探测研究 [J]. *岩土力学*, 2003, 14(增刊2): 353-356. (HUANG Hongwei, LIU Yujian, XIE Xiongyao. Application of GPR to grouting distribution behind segment in shield tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 14(S2): 353-356. (in Chinese))
- [38] XIE X Y, LIU Y J, HUANG H W. Research of GPR nondamaged test of grouting behind lining of shield tunnel [C]//*Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. Delft: IEEE*, 2004: 419-422.
- [39] 黄宏伟,杜军,谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验 [J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(2): 243-248. (HUANG Hongwei, DU Jun, XIE Xiongyao. Simulation of GPR detecting of grouting materials behind shield tunnel segments [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(2): 243-248. (in Chinese))
- [40] Zhang F S, Xie X Y, Huang H W. Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(2): 99-107.
- [41] Koyama Y, Sato Y, Oknao N, et al. Back-fill grouting model test for shield tunnel [J]. *Quarterly Report of RTRI*. 1998, 39(1): 35-39.
- [42] Hashimoto T, Brinkman J, Konda T, et al. Simultaneous backfill grouting pressure development in construction phase and in the long-term [C]//*Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress*. Singapore: Elsevier, 2004: 22-27.
- [43] Mo H H, Chen J S. Study on inner force and dislocation of segments caused by shield machine attitude [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008(23): 281-291.
- [44] Bezuijen A, Lottum H V. *Tunnelling: A decade of progress* [M]. London: Taylor & Francis Group Public Limited Company, 2006: 71-115.

- [45] 苟长飞. 盾构隧道壁后注浆浆液扩散机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (GOU Changfei. Study on the grouts diffusion mechanism of shield tunnel back-filled grouts [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese))
- [46] Pelizza S, Peila D, Borio L et al. Analysis of the performance of two component back-filling grout in tunnel boring machines operating under face pressure [C]// ITA-AITES World Tunnel Congress 2010. Vancouver [s. n.], 2010: 14-20.
- [47] 周东, 李明文. 盾构隧道施工中同步注浆新材料的试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2002(1): 10-13. (ZHOU Dong, LI Mingwen. Experimental study on new materials of synchronic grouting in shield tunneling [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2002(1): 10-13. (in Chinese))
- [48] 祝龙根, 白延辉, 杜坚. 上海地铁土压平衡盾构同步注浆浆液配比的优选[J]. 地下工程与隧道, 1993(4): 42-49. (ZHU Longgen, BAI Yanhui, DU Jian. The comparison of grouting material proportion of earth pressure balance shield tunneling in Shanghai [J]. Underground Engineering and Tunnels, 1993(4): 42-49. (in Chinese))
- [49] 肖立, 张庆贺, 赵天石, 等. 泥水盾构同步注浆材料试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 59-64. (XIAO Li, ZHANG Qinghe, ZHAO Tianshi, et al. Study on mortar material of tail void grouting in slurry shield tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 59-64. (in Chinese))
- [50] 肖朝昀, 张庆贺. 盾尾注浆材料配比试验研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2013, 10(13): 107-109. (XIAO Chaoyun, ZHANG Qinghe. Study on the experiment of grouting material proportion [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2013, 10(13): 107-109. (in Chinese))
- [51] 郑大锋, 邱学青, 楼宏铭, 等. 水溶性高聚物在盾构隧道注浆材料中的应用研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33(8): 87-90. (ZHENG Dafeng, QIU Xueqing, LOU Hongming, et al. Study of water-soluble polymers used in the grouting material for shield tunnel [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 33(8): 87-90. (in Chinese))
- [52] 王红喜, 田焜, 丁庆军, 等. 盾构隧道同步注浆水下不散砂浆的研制[J]. 混凝土与水泥制品, 2006(6): 29-31. (WANG Hongxi, TIAN Kun, DING Qingjun, et al. The development of underwater disperse mortar for tail void grouting [J]. China Concrete and Cement Products, 2006(6): 29-31. (in Chinese))
- [53] 田焜, 丁庆军, 陈跃庆, 等. 盾构隧道大掺量粉煤灰同步注浆材料优化设计[J]. 隧道建设, 2007, 27(4): 26-29. (TIAN Kun, DING Qingjun, CHEN Yueqing, et al. Optimal design of high volume fly ash simultaneous grouting material for shield tunnel [J]. Tunnel Construction, 2007, 27(4): 26-29. (in Chinese))
- [54] 彭波, 田焜, 丁庆军. 聚合物改性盾构法同步注浆用水泥砂浆的研究[J]. 混凝土, 2008(7): 97-99, 102. (PENG Bo, TIAN Kun, DING Qingjun. Polymer modified cement mortar used in synchronous grouting of shield tunnelling [J]. Concrete, 2008(7): 97-99, 102. (in Chinese))
- [55] 夏诗梁. 双液注浆在大型泥水平衡盾构施工中的应用[J]. 世界隧道, 1998(3): 18-22. (XIA Shiliang. Application of two-shot solution grouting to large slurry balance shield tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Works, 1998(3): 18-22. (in Chinese))
- [56] 苏华, 李珍, 汪在芹. 南水北调中线穿黄隧道盾构注浆浆材试验[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 28-32. (SU Hua, LI Zhen, WANG Zaiqin. Grouting experiment of shield tunnel crossing Yellow River in middle route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 28-32. (in Chinese))
- [57] 郭志超, 丁庆军, 田焜. 盾构隧道新型水玻璃注浆材料的研究[J]. 施工技术, 2008, 37(10): 25-28. (GUO Zhichao, DING Qingjun, TIAN Kun. Research on sodium silicate grouting materials in shield tunnel [J]. Construction Technology, 2008, 37(10): 25-28. (in Chinese))
- [58] 徐方京, 侯学渊. 盾尾间隙引起地层移动的机制及注浆方法分析[J]. 地下工程与隧道, 1993(3): 12-20. (XU Fangjing, HOU Xueyuan. Analysis on mechanism of ground movement caused by shield tail gap and grouting method [J]. Underground Engineering and Tunnels, 1993(3): 12-20. (in Chinese))
- [59] 叶飞, 朱合华, 丁文其. 考虑管片环间接头效应的盾构隧道抗浮计算与控制分析[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 76-80. (YE Fei, ZHU Hehua, DING Wenqi. Calculation for anti-buoyancy and control analysis of shield tunnel considering effect of joint of segment rings [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 76-80. (in Chinese))
- [60] 叶飞, 朱合华, 丁文其, 等. 施工期盾构隧道上浮机制与控制对策分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 738-743. (YE Fei, ZHU Hehua, DING Wenqi, et al. Analysis and control of upward moving of shield tunnel under construction [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(6): 738-743. (in Chinese))
- [61] 叶飞, 朱合华, 丁文其. 基于螺栓接头受力性能的盾尾注浆压力控制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 312-316. (YE Fei, ZHU Hehua, DING Wenqi. Pressure control analysis based on mechanical properties of bolts during grouting at shield tail [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(3): 312-316. (in Chinese))
- [62] 宋天田, 周顺华, 徐润泽. 盾构隧道盾尾同步注浆机制与注浆参数的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 4(1): 130-133. (SONG Tiantian, ZHOU Shunhua, XU Runze. Mechanism and determination of parameters of

- synchronous grouting in shield tunneling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 4 (1): 130 - 133. (in Chinese)
- [63] 卢海林, 赵志民, 方芑, 等. 盾构法隧道施工引起土体位移与应力的镜像分析方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 45 - 50. (LU Hailin, ZHAO Zhimin, FANG Peng, et al. Analytical method of image theory used to calculate shield tunneling induced soil displacements and stresses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 45 - 50. (in Chinese))
- [64] Sagareta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301 - 320.
- [65] 杨方勤, 段创峰, 吴华荣, 等. 上海长江隧道抗浮模型试验与理论研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 454 - 459. (YANG Fangqin, DUAN Chuangfeng, WU Huaqi, et al. Model experiment and theoretical study on stability against uplift of Shanghai Yangtze River Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 454 - 459. (in Chinese))
- [66] 李志明, 廖少明, 戴志仁. 盾构同步注浆填充机制及压力分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1752 - 1757. (LI Zhiming, LIAO Shaoming, DAI Zhiren. Theoretical study on synchronous grouting filling patterns and pressure distribution of EPB shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1752 - 1757. (in Chinese))
- [67] 袁小会, 韩月旺, 钟小春. 盾构隧道壁后注浆压力分布模型[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 18 - 23. (YUAN Xiaohui, HAN Yuewang, ZHONG Xiaochun. Pressure distribution model of simultaneous backfill grouting of shield tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 18 - 23. (in Chinese))
- [68] 范昭平, 韩月旺, 方忠强. 盾构壁后注浆压力分布计算模型[J]. 公路交通科技, 2011, 28(3): 95 - 100. (FAN Zhaoping, HAN Yuewang, FANG Zhongqiang. Calculating model of backfill grouting pressure distribution for shield tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(3): 95 - 100. (in Chinese))
- [69] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1307 - 1312. (YE Fei, ZHU Hehua, HE Chuan. Back-filled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1307 - 1312. (in Chinese))
- [70] 叶飞, 苟长飞, 刘燕鹏, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液时变半球面扩散模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(12): 1789 - 1794. (YE Fei, GOU Changfei, LIU Yanpeng, et al. Half-spherical surface diffusion model of shield tunnel back-filled grouts [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(12): 1789 - 1794. (in Chinese))
- [71] 叶飞, 刘燕鹏, 苟长飞, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液毛细管渗透扩散模型[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 428 - 433. (YE Fei, LIU Yanpeng, GOU Changfei, et al. Capillary penetration diffusion model for backfill grouting of shield tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 428 - 433. (in Chinese))
- [72] 苟长飞, 叶飞, 张金龙, 等. 盾构隧道同步注浆充填压力环向分布模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 590 - 597. (GOU Changfei, YE fei, ZHANG Jinlong, et al. Ring distribution model of filling pressure for shield tunnels under synchronous grouting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 590 - 597. (in Chinese))
- [73] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道粘度时变性浆液壁后注浆渗透扩散模型[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 127 - 134. (YE Fei, GOU Changfei, CHEN Zhi, et al. Back-filled grouts diffusion model of shield tunnel considering its viscosity degeneration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 127 - 134. (in Chinese))
- [74] 叶飞, 陈治, 苟长飞, 等. 基于球孔扩张的盾构隧道壁后注浆压密模型[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 35 - 42. (YE Fei, CHEN Zhi, GOU Changfei, et al. Back-filled grouting compaction model of shield tunnel based on spherical cavity expansion [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 35 - 42. (in Chinese))
- [75] 魏新江, 洪杰, 魏纲. 双圆盾构隧道同步注浆扩散及环向压力研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(10): 106 - 110. (WEI Xinjiang, HONG Jie, WEI Gang. Research on DOT shield tunnel back-filled synchronous grouting diffusion and segments circumferential pressure distribution [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(10): 106 - 110. (in Chinese))
- [76] 朱合华, 丁文其, Tadashi Hashimoto, 等. 盾构隧道施工过程模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增刊): 860 - 864. (ZHU Hehua, DING Wenqi, Tadashi Hashimoto, et al. Analysis of shield tunnel construction model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(S): 860 - 864. (in Chinese))
- [77] 韩月旺, 钟小春, 虞兴福. 盾构壁后注浆体变形及压力消散特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1142 - 1147, 1175. (HAN Yuewang, ZHONG Xiaochun, YU Xingfu. Experimental research on the backfill grout deformation and grout pressure dissipation of shield tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1142 - 1147, 1175. (in Chinese))
- [78] 韩月旺, 梁精华, 袁小会. 盾构隧道壁后注浆体变形模型及土体位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊2): 3646 - 3652. (HAN Yuewang, LIANG Jinghua, YUAN Xiaohui. Deformation model of backfill grouting and ground movement analysis of shield tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2007, 26(S2): 3646-3652. (in Chinese)
- [79] 袁小会, 韩月旺, 钟小春. 盾构隧道壁后注浆压力分布模型[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 18-23. (YUAN Xiaohui, HAN Yuewang, ZHONG Xiaochun. Pressure distribution model of simultaneous backfill grouting of shield tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 18-23. (in Chinese))
- [80] 袁小会, 韩月旺, 钟小春. 盾尾注浆硬性浆液固结变形数值计算模型构建[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 925-932. (YUAN Xiaohui, HAN Yuewang, ZHONG Xiaochun. Numerical model building for consolidation deformation of cemented mortar for shield tail grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 925-932. (in Chinese))
- [81] Kasper, Thomas, Meschke, et al. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(2): 160-171.
- [82] Kasper, Thomas, Meschke, et al. A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling[J]. Computer and Geotechnics, 2006, 33(4-5): 234-247.
- [83] Swoboda G, Abu-Krishna A. Three-dimensional numerical modelling for TBM tunnelling in consolidated clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(3): 327-333.
- [84] Komiya K, Soga K, Akagi H, et al. Soil consolidation associated with grouting during shield tunnelling in soft clayey ground [J]. Geotechnique, 2001, 51(10): 835-846.
- [85] 杨春山, 吴增伟, 张雅宁. 盾构施工盾尾注浆硬化过程数值分析研究[J]. 广东工业大学学报, 2011, 28(4): 90-94. (YANG Chunshan, WU Zengwei, ZHANG Yaning. Numerical analysis of grouting hardening process of shield tunneling[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2011, 28(4): 90-94. (in Chinese))
- [86] 万战胜, 朱岱云, 夏永旭. 盾构隧道壁后注浆对地表沉降影响数值模拟研究[J]. 河北工业大学学报, 2011, 40(1): 110-113. (WAN Zhansheng, ZHU Daiyun, XIA Yongxu. Numerical simulation study of settlement on shield tunnel after grouting of wall formation[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2011, 40(1): 110-113. (in Chinese))
- [87] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2002, 21(3): 388-392. (ZHANG Yun, YIN Zongze, XU Yongfu. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 388-392. (in Chinese))
- [88] 黄宏伟, 刘逸剑, 谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆效果的雷达探测研究[J]. 岩土力学, 2003, 14(增刊2): 353-356. (HUANG Hongwei, LIU Yujian, XIE Xiongyao. Application of GPR to grouting distribution behind segment in shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 14(S2): 353-356. (in Chinese))
- [89] 杜军, 黄宏伟, 谢雄耀. 隧道壁后注浆体的探地雷达探测模拟试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 817-820. (DU Jun, HUANG Hongwei, XIE Xiongyao. Research on the simulation examination about GPR detection of grouting material behind shield tunnel segment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 817-820. (in Chinese))
- [90] 杜军, 黄宏伟, 谢雄耀, 等. 介电常数对探地雷达检测隧道壁注浆效果研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 420-424, 429. (DU Jun, HUANG Hongwei, XIE Xiongyao, et al. Research of the effect of dielectric permittivity on the GPR detection for the grouting material behind shield tunnel segment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 420-424, 429. (in Chinese))
- [91] 张丰收, 黄宏伟, 谢雄耀, 等. 盾构隧道壁后注浆材料的介电常数测定[J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(增刊2): 3757-3762. (ZHANG Fengshou, HUANG Hongwei, XIE Xiongyao, et al. Dielectric coefficient testing of grouting material behind segments in shield tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3757-3762. (in Chinese))
- [92] 黄宏伟, 杜军, 谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 243-248. (HUANG Hongwei, DU Jun, XIE Xiongyao. Simulation of GPR detecting of grouting materials behind shield tunnel segments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 243-248. (in Chinese))
- [93] 晁东辉, 张得焯, 罗春泳. 检测盾构施工中注浆效果的模型试验[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 62-65, 104. (CHAO Donghui, ZHANG Dexuan, LUO Chunyong. Model test on the grouting effect in shield construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(1): 62-65, 104. (in Chinese))
- [94] 於昌荣, 周松, 黄醒春. 砂砾地层中盾构隧道衬砌后背回填注浆效果的试验研究[J]. 铁道建筑, 2009(4): 61-64. (YU Changrong, ZHOU Song, HUANG Xingchun. Experimental study on backfill grout effect of shield tunnel in sand and gravel stratum [J]. Railway Engineering, 2009(4): 61-64. (in Chinese))
- [95] 张平松, 吴健生, 刘盛东. 隧道壁后注浆质量高密度电法测试的可能性[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 331-334, 360. (ZHANG Pingsong, WU Jiansheng, LIU Shengdong. Prospecting possibility with high density resistivity for quality of concrete behind segment in tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2): 331-334, 360. (in Chinese))