

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.03.018

# 盾构渣土置拌同步浆液 及其在叠落隧道应用研究

周艳家<sup>1</sup>, 杨国华<sup>1</sup>, 王 炜<sup>2</sup>, 李闻韬<sup>3,4</sup>

(1. 中铁电气化局集团有限公司, 北京 100071; 2. 北京工业大学, 北京 100124;  
3. 江苏省智慧城轨工程研究中心, 江苏苏州 215031; 4. 南洋理工大学, 新加坡 639798)

**摘要:** 针对盾构渣土资源化利用, 依托苏州轨道交通 8 号线, 基于实验室研究改进固化材料配比, 将区间线路盾构渣土置拌成符合工程要求的同步注浆浆液。同时, 新建 8 号线双线盾构隧道与既有 3 号线双线隧道在唐庄站交汇, 形成两层四线叠落的特殊工况。本项目使用的渣土浆液稠度约为 113 mm, 7 d 强度 $\geq 1$  MPa, 28 d 强度 $\geq 2.5$  MPa, 满足工程要求。掘进过程中既有隧道结构的监测数据表明, 盾构渣土浆液可以有效地控制新建盾构对既有建(构)筑物的影响。利用盾构渣土制备同步注浆浆液可实现渣土资源化利用, 在推进绿色建造的同时降低隧道(双线)施工成本约 75 万元/km。

**关键词:** 城市轨道交通; 盾构渣土; 注浆材料; 绿色建造; 叠落隧道

**中图分类号:** U231; U455.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6073(2024)03-0135-06

## Use of Shield Muck to Produce Grouting Materials and Its Applications in Stacked Tunnels

ZHOU Yanjia<sup>1</sup>, YANG Guohua<sup>1</sup>, WANG wei<sup>2</sup>, LI Wentao<sup>3,4</sup>

(1. China Railway Electrification Bureau Group Co. Ltd., Beijing 100071; 2. Beijing University of Technology, Beijing 100124; 3. Intelligent Urban Rail Engineering Research Center of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu, 215031; 4. Nanyang Technological University, Singapore 639798)

**Abstract:** Focusing on the reuse of tunnel muck, this study aims to prepare tunnel muck from the Suzhou Metro Line 8 into a synchronous grouting material that satisfies the engineering requirements of different geological conditions by adjusting the solidification material compositions through laboratory experiments. In this project, a new double-line shield tunnel of Metro Line 8 intersects the existing double-line tunnel of Line 3 at Tangzhuang Station, forming a unique layout with two layers of four tracks. The muck-produced grout used in this project has a consistency value of 113 mm, and the 7- and 28-day strengths exceed 1 and 2.5 MPa, respectively, satisfying the engineering specifications. The deformation monitoring data show that the muck-produced grout effectively controls the impact of the upper tunnel construction on existing structures. Utilizing shield tunneling muck to prepare synchronous grouting slurry can achieve resource utilization of muck while promoting green construction and reducing construction costs by approximately 750 thousand Yuan per kilometer (double line).

**Keywords:** urban rail transit; shield muck; grouting material; green construction; stacked tunnels

收稿日期: 2024-01-25 修回日期: 2024-03-07

第一作者: 周艳家, 男, 学士, 工程师, 从事隧道方面的研究工作, 106232146@qq.com

通信作者: 李闻韬, 男, 博士, 讲师, 主要从事固废处理和软土加固方面的研究工作, wtl2022@suda.edu.cn

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB560023)

引用格式: 周艳家, 杨国华, 王炜, 等. 盾构渣土置拌同步浆液及其在叠落隧道应用研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(3): 135-140.

ZHOU Yanjia, YANG Guohua, WANG wei, et al. Use of shield muck to produce grouting materials and its applications in stacked tunnels[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(3): 135-140.

在交通强国战略的引领下,我国城市轨道交通建设获得了巨大发展。盾构掘进因其安全、高效等优点,已成为城市轨道交通区间隧道最常用的开挖方式。随着地下空间的利用率逐步上升,新建隧道不可避免地与既有隧道在空间上叠交穿越。为保证既有线路的安全与正常运营,对新建隧道扰动控制技术手段提出了新的要求和挑战<sup>[1-2]</sup>。

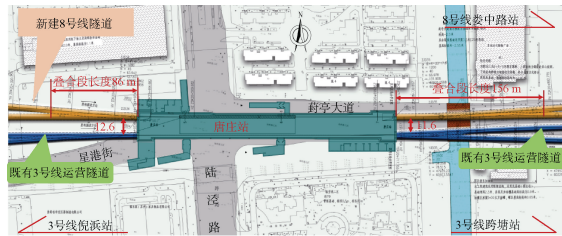
同时,我国在建的盾构隧道工程预计将产生 2.96 亿 m<sup>3</sup> 的盾构渣土,处理费用超 700 亿元<sup>[3-4]</sup>,盾构渣土的资源化回收利用也逐步成为工程和科学研究的热点。郭沁颖等利用改良泥水盾构渣土制备路基填筑材料,通过调配固化剂类别改进渣土路基材料的水稳性与耐久性<sup>[5]</sup>。许宁等利用泥岩地层盾构渣土制备免烧砖<sup>[6]</sup>。郝彤等研究了水泥拌合盾构渣土制备同步注浆浆液,通过调节渣土掺量和水胶比改善渣土浆液的性能<sup>[7]</sup>。其中,利用水泥等胶凝材料拌合盾构渣土制成盾构掘进过程中的同步注浆材料的方法,可较大程度减少渣土排放量和排放费用,取得较好的经济和环保效益,盾构渣土置拌浆液已在一些工程中成功应用<sup>[7]</sup>。然而,叠落隧道复杂的施工环境和严苛的沉降变形控制对渣土浆液的应用提出了更高的要求<sup>[8-9]</sup>。

本文以苏州轨道交通 8 号线工程和顺路站—唐庄站区间(以下简称“和唐区间”)隧道盾构掘进渣土的回收利用为研究对象,基于复合地层盾构渣土的特性,采用多种固化材料配合比将盾构渣土转化为同步注浆材料,用于盾构尾部衬砌注浆。本研究旨在为土压平衡盾构渣土资源化利用以及城市轨道交通盾构的绿色施工建造提供依据,并为减轻盾构渣土污染等问题提供参考。

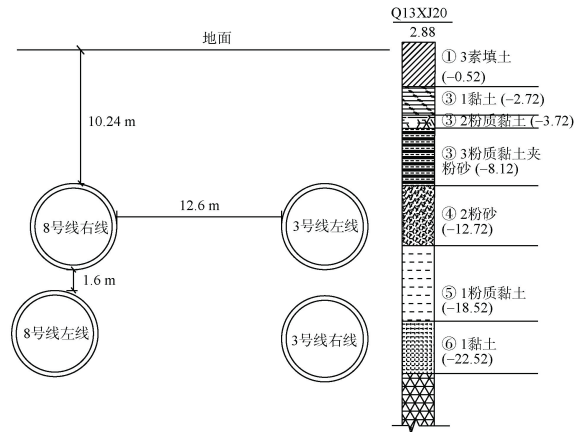
## 1 工程概况

苏州轨道交通 8 号线工程和唐区间左、右线均采用盾构法施工,新建 8 号线与既有 3 号线在唐庄站上下叠岛换乘。其中,8 号线左线由唐庄站往和顺路站掘进,左线贯通后,8 号线右线从和顺路站往唐庄站掘进,叠落隧道平面、横截面及盾构穿越土层情况如图 1 所示。

由图 1 可知,和唐区间左、右线上下叠落段长度为 86 m,叠落段上下线净距最小处仅有 1.6 m。穿越的土层主要为:③1 黏土、③3 粉质黏土夹粉砂、④2 粉砂、⑤1 粉质黏土以及⑥1 黏土。上述土层的主要物理力学指标如表 1 所示。



(a) 交汇布置



(b) 断面图

图 1 新建 8 号线与既有 3 号线叠落隧道位置关系

Figure 1 Cross-section of strata for stacked tunnels

表 1 土层基本物理力学参数

Table 1 Physical parameters of soil layers for shield tunnels

土层	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	含水率/%	液限/%	塑限/%
①3 素填土	19.2	30.7	37.5	20.5
③1 黏土	20.0	25.7	41.2	20.6
③2 粉质黏土	19.2	29.5	31.4	19.6
③3 粉质黏土夹粉砂	19.6	29.5	28.2	20.3
④2 粉砂	20.0	24.3	—	—
⑤1 粉质黏土	19.2	18.2	32.2	19.4
⑥1 黏土	20.2	15.1	36.6	19.0

## 2 渣土置拌同步浆液

### 2.1 盾构渣土室内试验

本研究试验渣土取自苏州轨道交通 8 号线和唐区间隧道建设项目,盾构掘进段主要处于粉质黏土和粉砂层,均可作为同步注浆浆液的原材料。渣土置拌浆液还需添加水泥和土体改良剂 ZDT 等材料。试验所用水泥为天山牌 P.O 42.5 硅酸盐水泥,其性能符合《通用硅酸盐水泥》(GB175—2007)要求。土体改良剂 ZDT 主要由水性丙烯酸改性环氧树脂、水性硅烷低聚物、纳米硅溶胶等成分组成,主要用于调控渣土浆液的稠度、流动性与早期强度。为研究不同地

层盾构渣土制备同步注浆材料的工程适用性,对和唐区间不同地层盾构渣土进行了试验。经实验室和现场多次试验,粉质黏土、黏土、粉土、粉砂、泥岩等地层渣土均能用于制备盾构渣土再生浆液,且都能通过调控配比实现较好的工程性能。选取该区间段3种典型地层的盾构渣土进行室内试验,其基本试验性能如表2所示。其中,6~8 h贯入强度用于评估样品的凝结时间。

表2 不同地层盾构渣土同步注浆材料室内性能分析

Table 2 In-lab properties of grouting slurry formed using muck from different soil layers

地层类型	配合比				6~8 h 贯入强度/MPa	抗压强度/MPa		流动度/mm
	泥浆	水泥	ZDT-I	ZDT-II		7 d	28 d	
淤泥质土层	1 400	100	0	0	0.11	0.06	0.50	170
	1 400	100	10	0	0.20	0.21	0.52	170
	1 400	100	5	5	0.22	0.27	0.59	170
	1 400	50	10	10	0.27	0.38	0.72	175
	1 400	100	5	15	0.59	0.62	1.02	175
	1 400	100	10	20	0.75	0.79	1.15	175
粉质砂土层	920	80	0	0	0.21	—	0.49	170
	966.5	30	2.5	1	0.37	—	0.63	175
	913.7	80	2.5	3.8	0.76	—	1.62	175
	837	150	3	10	0.94	—	1.95	170
	824	150	6	20	1.37	—	2.47	170
	774	200	6	20	1.85	—	3.02	170
黏质土层	1 000	100	0	0	0.14	0.327	0.425	150
	1 000	75	1.6	0	0.26	0.527	0.698	150
	1 000	100	1.6	8	0.59	0.709	1.095	150
	1 000	100	1.6	15	0.74	0.988	1.416	150
	1 000	150	1.6	15	0.83	1.216	1.736	150

由表2可知,对于不同地层渣土,需根据其特性配置不同成分的固化剂以实现其性能提升,达到设计要求。其中,对于淤泥质土样品添加约5%粉煤灰,对于粉质砂土样品添加约2%膨润土,黏质土样品添加15%砂,限于版面未在表2标注。对于所有类别盾构渣土样品,其强度均随着水泥掺量的提升而增长。同时,土体改良剂ZDT也对渣土浆液的强度有较大影响。以淤泥质土层渣土浆液为例,当水泥掺量为100 kg时,添加改良剂ZDT相比不添加改良剂样品的28 d强度实现了超过100%的强度增长,即0.5 MPa对比1.15 MPa。对于3种土层渣土制备的同步注浆浆液,

可通过较少的砂和膨润土用量来调节其强度和流动度等性能,减少对不可再生资源的需求和消耗。

本文还制备了由砂、水泥、粉煤灰等材料制成的标准浆液,标准浆液与盾构渣土浆液性能对比如表3所示。盾构渣土同步注浆材料强度低于传统单液浆,主要是由于本项目渣土浆液的水泥掺量相对较少。但渣土浆液也满足28 d实验室强度不小于1 MPa的设计要求,且渣土浆液消耗的水泥量大幅减少,成本更低。水中溶蚀养护后,盾构渣土同步注浆材料强度损失分别为6%、5.6%和5.2%,而传统单液浆约为13%,高于渣土浆液的2倍。同时,对样品在模拟地层潮湿环境养护条件下进行了强度测试。由表3可知,潮湿土养护下的渣土浆液试块强度满足设计要求。

表3 盾构渣土同步注浆材料室内性能分析

Table 3 In-lab properties of standard slurry and muck-produced slurry

浆液类别	28d 标准养护强度/MPa	28d 水溶蚀养护强度/MPa	强度损失率/%	28d 潮湿土养护强度/MPa
传统单液浆	2.6	2.3	13	2.7
淤泥土盾构浆液	1.2	1.1	6	1.4
粉砂土盾构浆液	1.6	1.5	5.6	1.9
黏土盾构浆液	1.5	1.4	5.2	1.7

## 2.2 渣土制浆流程及设备

室内试验结果证明,利用盾构掘进的渣土,分离出的盾构渣土浆液(3 mm以下颗粒,特定含水率)在添加水泥和土体固化剂ZDT等材料后可制备满足设计要求的同步注浆浆液。实际工程中,需对渣土的组成进行分析,确定地层中含黏土、粉砂等比例,为后续浆液配比提供依据。根据盾构施工地层情况及渣土性能,及时对固化材料配比进行相应调整,使处理后盾构渣土能达到注浆浆液的性能要求。

苏州轨道交通8号线项目利用盾构渣土制备同步注浆浆液的施工设备与施工流程如图2所示。盾构渣土制浆主要施工流程可分为渣土上料、颗粒筛分、泥浆收集、混合搅拌和泵送注浆5部分。渣土制浆设备采用模块化设计,便于后续工程搭建渣土浆液制浆成套流水线,基本设备如表4所示。整套设备可分为泥浆制作模块和成品浆液制作模块。泥浆制作模块采用挖机上料,通过盾构渣土加水搅拌均匀筛分得到所需泥浆,本项目已实现一键启动操作生产;成品浆液制作模块则采用筛分所得泥浆,将其混合水泥、土体硬

化剂等材料，得到所需的成品浆液，实现智能化自动配料生产与泵送。渣土制浆主要设备占地面积不超过 75 m<sup>2</sup>，亦可根据工程实际情况进行调整。



图 2 盾构渣土制备同步注浆浆液施工流程

Figure 2 Process flow for the preparation of synchronous grouting slurry using shield muck

表 4 盾构渣土制浆主要设备配置

Table 4 Equipment for the preparation of synchronous grouting slurry using shield muck

序号	名称	体积、型号	备注
1	小型挖机	30 型, 0.15 m <sup>3</sup>	采用挖机上料
2	斗提式上料机	0.6 m <sup>3</sup> , 功率 7.5 kW	碳钢, 两层防腐
3	卧式搅拌机	5 m <sup>3</sup> , 功率 22 kW	碳钢, 防腐, 大开口, 选配格栅
4	振动脱水筛	5~20 t/h, 功率 2×7.5 kW	含密闭下料槽, 检修孔等
5	储浆池	20 m <sup>3</sup>	碳钢, 内外防腐两层, 含曝气管道和头等
6	空压机	7.5 kW	含储气罐、防止泥浆沉淀分层
7	高铬渣浆泵	7.5 kW	从储浆池抽至调浆罐
8	调浆罐	10 m <sup>3</sup>	加入水泥、添加剂调配浆液
9	水泥罐	50 t	含螺旋上料机调配浆液
10	电气系统	—	配电柜、电缆等

注：设备总功率不超过 65 kW，配电要求 380 V，产能不低于 5 m<sup>3</sup>/h。

为确保工程改造浆车能满足同步注浆要求，苏州轨道交通 8 号线工程施工阶段增加浆车容积到 7.5 m<sup>3</sup>，并严格控制注浆量及注浆压力，保证盾构缝填充密实。同时，在注浆完成后，及时对壁后空洞进行探测，如发现地层深层沉降，则需及时进行二次补浆，减少地表沉降。根据工程地质性质和施工设计要求，本文依托工程盾构渣土浆液的注浆压力为 0.3~0.5 MPa，并根据盾构推进速度控制注浆量，为有效控制地表沉降，本项目实际注浆量为理论空隙的 2.1~2.4 倍。

### 3 渣土浆液工程应用及效益分析

#### 3.1 渣土浆液叠落段应用

苏州轨道交通 8 号线和唐区间左、右线穿越地层分布情况如图 3 所示。该区间段盾构穿越的主要地层是⑤1 粉质黏土层，黏质渣土产出量大。因此，本区间段使用的渣土浆液以黏质渣土浆液为主。

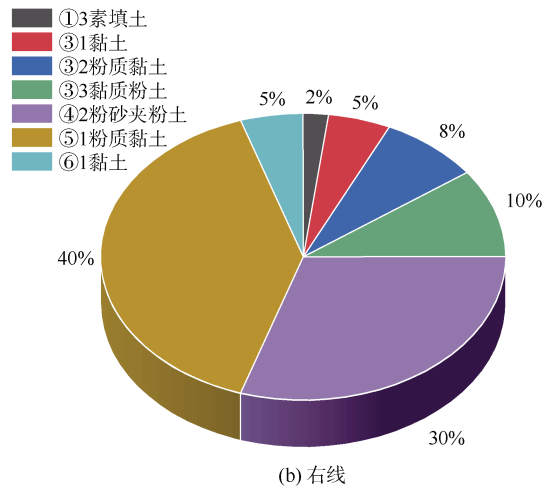
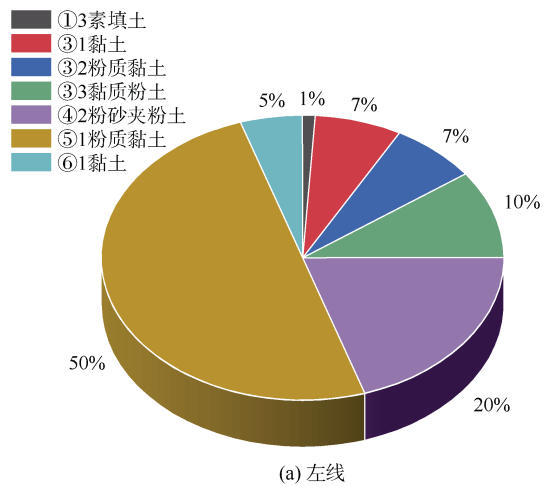


图 3 盾构掘进地层分布

Figure 3 Stratigraphic distribution of soil layers during shield tunneling

基于室内试验结果(表 2),针对本区间段黏质渣土浆基本物理性能,工程中实际使用的渣土浆液配比如下:渣土浆  $1162 \text{ kg/m}^3$ ,水泥  $175 \text{ kg/m}^3$ (掺量 15%),水  $175 \text{ kg/m}^3$ ,砂  $175 \text{ kg/m}^3$ ,添加剂 ZDT-I  $3.5 \text{ kg/m}^3$ ,添加剂 ZDT-II  $17.5 \text{ kg/m}^3$ 。其中,渣土浆液的含水率约为 40%,高于其液限(32%),因此通过添加中砂来调节其稠度至设计范围。基于上述配比,将黏质渣土浆液制成  $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$  立方体样品,测试其不同龄期强度,黏质渣土浆液试样如图 4 所示。



图 4 黏质渣土浆液试样

Figure 4 Grouting samples made from shield tunnel muck

本项目对黏质渣土制备的同步注浆浆液工程性能主要设计值为稠度  $100 \sim 125 \text{ mm}$ ,7 d 抗压强度  $\geq 0.15 \text{ MPa}$ ,28 d 抗压强度  $\geq 1.0 \text{ MPa}$ ,其他参数设计值为泌水率  $0 \sim 1\%$ ,固结率  $\geq 95\%$ 。基于图 2 所示渣土制浆工艺流程,黏质渣土浆液的稠度值为  $113 \text{ mm}$ ,其泌水率和固结率均满足要求。养护后黏质渣土浆液样品强度如图 5 所示。由图 5 可知,黏质渣土浆液样品 3 d 强度约为  $0.35 \text{ MPa}$ ,7 d 和 28 d 强度分别不低于  $1 \text{ MPa}$  和  $2.5 \text{ MPa}$ ,满足设计要求。

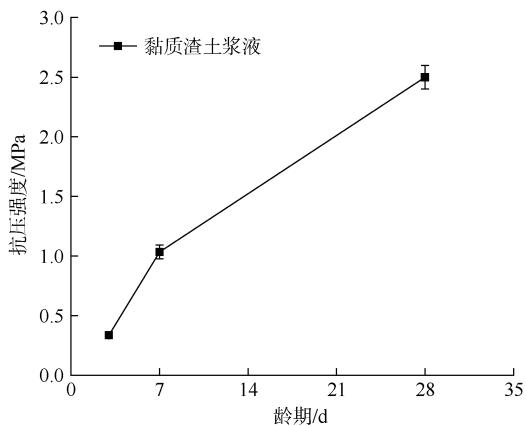


图 5 黏质渣土浆液样品强度

Figure 5 Compressive strength of grouting samples made from shield tunnel muck

为减少 8 号线盾构掘进对既有隧道的影响,本线路施工工序调整为左线(下行)隧道先行施工,右线(上

行)隧道后施工。此外,为确保施工过程中既有地铁隧道结构和运营安全,根据即时监测情况及时调整掘进速度、推力、扭矩等参数。同步注浆采用渣土浆液,注浆压力为  $0.5 \sim 1.0 \text{ MPa}$ ,每环注浆量不少于  $6 \text{ m}^3$ 。渣土浆液泵送至注浆前,对其稠度进行抽样检测,如稠度测试值在设计范围之外,则对该批次渣土浆液进行废弃处理。此外,对于区间叠合段,采用克泥效施工,通过盾构掘进同步注入,及时填充开挖形成的间隙,减少盾构掘进扰动引起土体自然下沉以及后续沉降的风险。同时,叠落段右线(上行)隧道盾构机掘进过程中在左线(下行)隧道内部设置支撑台车,对管片施加支撑力,减少相邻管片间错台变形的同时降低上行隧道开挖对下行隧道引起的扰动,确保隧道安全。

本项目采用远程自动化监测系统对既有运营线的结构变形和轨道变形进行 24 h 即时监测。自叠落段开始施工至盾构穿越后 1 个月内,既有 3 号线上行线道床沉降累计变化量在  $-1.1 \sim 3.9 \text{ mm}$  之间,小于沉降量控制值( $10 \text{ mm}$ )和隆起量控制值( $5 \text{ mm}$ );结构水平位移累计变化量在  $-3.8 \sim 0.3 \text{ mm}$  之间,小于水平位移控制值( $5 \text{ mm}$ ),且变化速率均小于控制值  $\pm 2 \text{ mm/d}$ 。既有 3 号线下行线道床沉降累计变化量在  $-0.9 \sim 2.8 \text{ mm}$  之间,小于沉降量控制值( $10 \text{ mm}$ )和隆起量控制值( $5 \text{ mm}$ );结构水平位移累计变化量在  $-3.3 \sim 2.5 \text{ mm}$  之间,小于水平位移控制值( $5 \text{ mm}$ ),且变化速率均小于控制值  $\pm 2 \text{ mm/d}$ 。

### 3.2 渣土浆液效益分析

利用盾构渣土制备同步浆液是城市盾构隧道减少废弃物排放,节约砂石资源消耗,减少水泥用量的一个重要举措,符合我国“碳达峰、碳中和”战略。苏州轨道交通 8 号线和唐区间工程实践证明,采用盾构渣土制浆工艺,能够直接减少渣土外运量 10% 以上,相比标准浆液减少加砂量 80% 以上,减少加水量约 30%;同时,渣土浆液不需额外添加粉煤灰及膨润土,进而可减少建筑材料用量及运输过程中的碳排放<sup>[10]</sup>。工程实践表明,采用盾构渣土制备的同步浆液流动性强,充填性好,不易漏失到间隙以外区域;渣土浆液的强度可根据要求通过改变配合比进行调控,满足设计及施工要求。

基于苏州轨道交通 8 号线盾构渣土制浆工程核算,按照市场自拌砂浆成本分析,考虑材料费用、砂浆站建设费用、设备摊销等,采用盾构渣土制备同步注浆材料的费用约  $330 \text{ 元/m}^3$ ,相比市面上的成品标准浆液费用节省约  $10 \text{ 元/m}^3$ 。同时,每立方米渣土浆液

可消耗 0.8 m<sup>3</sup> 渣土,按照渣土外运价格 100 元/m<sup>3</sup> (运输、消纳等费用)计算,可节省渣土外运费用 80 元,共计节省 90 元/m<sup>3</sup>,具体成本核算如表 5 所示。8 号线盾构外径 6.83 m,衬砌外径 6.6 m,注浆量取地层与衬砌间空隙计算值的 210%~240%。掘进每千米隧道(双线)可直接节约工程成本约 75 万元,对于 30 千米的城市盾构隧道,利用盾构渣土制备同步注浆浆液可减少工程造价约 2 200 万元。同时,渣土制浆设备可重复使用,在工艺得到推广后能够进一步缩减施工成本。

表 5 同步注浆材料成本对比

Table 5 Cost comparison of synchronous grouting materials

浆液类别	基本费用/ (元/m <sup>3</sup> )	渣土外运价格/ (元/m <sup>3</sup> )	浆液消耗 渣土/m <sup>3</sup>	节约成本/ (元/m <sup>3</sup> )
标准浆液	340	100	—	90
渣土浆液	330	—	0.8	

利用盾构渣土制备同步注浆浆液积极响应国家号召,可实现“四节一环保”的绿色施工目标。以江苏省为例,目前江苏省共有 6 座城市建有地铁,分别是南京、苏州、无锡、常州、徐州和南通。苏州轨道交通规划至 21 号线,待建里程约为 680.7 km;南京轨道交通线网预计 2035 年总里程达 1 260 km;无锡市 2035 年城市轨道交通线网规划的批复方案总长 297 km;常州市轨道交通 2035 年远景规模为 292 km。按照江苏省每年新增地铁里程 150 km 计算,则每年可节约成本 11 250 万元,经济效益显著,同时较大幅度减少渣土排放量,降低环境影响。

## 4 结论

本文利用盾构渣土置拌成工程性能良好的注浆浆液,将其用于叠落隧道的同步注浆,主要结论如下。

1) 浆液配比试验表明,不同地层盾构渣土可通过调配固化剂改进其性能,获得符合工程需求的同步注浆浆液。水泥和土体改良剂 ZDT 可以明显缩短初凝时间,增强凝结强度。

2) 本项目使用的黏质渣土浆液稠度在 100~125 mm 之间,7 d 强度≥1 MPa,28 d 强度≥2.5 MPa,满足设计要求且能有效控制叠落段隧道沉降。

3) 采用盾构渣土制浆工艺,能够直接减少渣土外运量 10%以上,可实现渣土资源化利用,在推进“四节一环保”的绿色施工目标的同时降低施工成本。

## 参考文献

[1] 陈璞,吴勇,杨康,等. MJS 联合微扰动注浆在地铁隧

道收敛变形整治中的应用研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 86-92.

CHEN Pu, WU Yong, YANG Kang, et al. Application of MJS combined with micro-disturbance grouting in renovation of convergence deformation of subway tunnel[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 86-92.

[2] 王祐菁,刘飞. 平行叠落地铁区间施工地表沉降特征研究[J]. 市政技术, 2024, 42(1): 147-153.

WANG Youjing, LIU Fei. Characteristic study on surface settlement of construction of parallel stacking subway intervals[J]. Journal of municipal technology, 2024, 42(1): 147-153.

[3] 陈蕊,杨凯,肖为,等. 工程渣土的资源化处理处置分析[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 22-26.

CHEN Rui, YANG Kai, XIAO Wei, et al. Analysis on recycling treatment and disposal of engineering slag[J]. Environmental engineering, 2020, 38(3): 22-26.

[4] 章邦超,刘洪亮,雷锋国,等. 上软下硬地层大直径土压平衡盾构下穿民房建筑群沉降控制[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 172-181.

ZHANG Bangchao, LIU Hongliang, LEI Fengguo, et al. On settlement control in large-diameter EPB shield tunnelling under civil housing complex in upper-soft and lower-hard strata[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(2): 172-181.

[5] 郭沁颖,李白云,丁建文,等. 工业废渣改良泥水盾构渣土的路用性能试验研究[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20221222.0927.002.html>.

GUO Qinying, LI Baiyun, DING Jianwen, et al. Experimental study on the road performance of slurry shield tunnel residue improved by industrial waste residues[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering.

[6] 许宁,陈铭,蔺威威,等. 泥岩地层盾构渣土免烧砖制备技术研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(6): 80-82.

XU Ning, CHEN Ming, LIN Weiwei, et al. Study on preparation technology of unburned brick for shield tunneling in mudstone formation[J]. New building materials, 2023, 50(6): 80-82.

[7] 郝彤,李鑫箫,冷发光,等. 郑州市地铁粉质黏土层中盾构渣土制备同步注浆材料特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(3): 53-62.

HAO Tong, LI Xinxiao, LENG Faguang, et al. Synchronous grouting materials for shield slag in silty clay of Zhengzhou metro[J]. Journal of Chang'an University (natural science edition), 2020, 40(3): 53-62.

[8] 张箭,金俊杰,丰土根,等. 土压平衡盾构渣土浆液配比优化研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 748-757.

ZHANG Jian, JIN Junjie, FENG Tugen, et al. Optimization of mixture ratio of muck grout by earth pressure balance shield machine[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(4): 748-757.

[9] 张强,米保伟,王术明. 盾构近距离上跨既有线路风险评估研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(3): 22-28.

ZHANG Qiang, MI Baowei, WANG Shuming. Risk assessment of shield tunnel crossing in close proximity to existing lines[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 22-28.

[10] 李晓锋,王荔,梁承志,等. 基于实际地铁线路的全生命周期碳排放研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 82-87.

LI Xiaofeng, WANG Li, LUAN Chengzhi, et al. Whole life-cycle carbon emissions based on actual metro lines[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 82-87.

(编辑:傅依萱)