

盾构渣土制备同步注浆材料试验研究

Experimental Study of Synchronized Grouting Material Prepared from Shield Tunneling Spoil

闫 革^{1,2}, 范 涛², 张 平², 李玉博³, 张 云², 冷凯凯²

(1. 喀什大学 新疆工程材料与结构安全重点实验室, 喀什 844000; 2. 武汉市汉阳市政建设集团有限公司, 武汉 430050; 3. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

摘要: 为合理利用地铁盾构施工产生的渣土以有效降低其运输成本及堆放对环境造成的危害, 以武汉市轨道交通 19 号线为背景, 利用不同比例渣土替代砂和膨润土制备注浆材料, 重点研究了渣土掺量对注浆材料的流动度、力学性能及微观结构的影响。结果表明: 增加泥岩渣土掺量显著降低注浆材料流动度, 但泌水现象得到改善。水胶比为 0.9 时, 75% 掺量盾构渣土的注浆材料 28 d 抗压强度可达 2.94 MPa, 盾构渣土注浆材料硬化体内部结构更为致密, 无明显结构缺陷。结合工程应用, 对盾构渣土注浆工艺进行探讨, 为盾构渣土就地利用提供技术参考。

关键词: 隧道工程; 盾构渣土; 同步注浆; 资源化利用

中图分类号: TU94 + 2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 05-0055-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.011

YAN Ge^{1,2}, FAN Tao², ZHANG Ping², LI Yubo³, ZHANG Yun², LENG Kaikai²

(1. Xinjiang Key Laboratory of Engineering Materials and Structural Safety, Kashi University, Kashi 844000, China; 2. Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 3. School of Civil Engineering Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to make reasonable use of the muck produced by the subway shield construction to effectively reduce its transportation cost and the harm to the environment caused by stacking, This study focuses on Wuhan Rail Transit Line 19 and investigates the impact of different proportions of shield soil dregs substitution for sand and bentonite in grouting materials. Fluidity, mechanical properties, and microstructures were analyzed comparably. The results indicated that the fluidity of grouting materials were significantly reduced by the increase content of shield soil dregs, while the bleeding tendencies were improved. A compressive strength of 2.94 MPa at 28 d was achieved for the grouting material that 75% shield soil dregs and 0.9 water-binder ratio. This was attributed to denser internal structures. Furthermore, this study discusses the application of shield soil dregs grouting technology, this could provide valuable technical insights for in-situ utilization of shield soil dregs.

Key words: tunnel engineering; shield soil dregs; synchronous grouting; resource utilization

0 引言

作者简介: 闫 革 (1989—), 男, 博士, 工程师。研究方向: 建筑结构、固废资源化。

收稿日期: 2024-11-27

随着城市化进程的快速推进, 我国城市轨道交通建设迎来了黄金发展期。截止 2022 年 6 月, 我国内地共有 51 个城市开通运营轨道交通, 运营里程

材料科学

9 000 余公里^[1]。盾构法作为地铁主要施工方法，施工过程包括稳定开挖面、掘进与排土、管片拼装与壁后注浆等环节^[2]。而在盾构机掘进过程中产生的大量盾构渣土，不仅占用施工等空间，同时加剧城市环境灾害。因此，开展盾构渣土资源化利用具有显著的经济和社会效益^[3-5]。

目前，国内外对于地铁盾构渣土的资源化利用已有广泛研究。朱伟等^[6]根据渣土含水率、流动状态、颗粒组成与锥度仪贯入指数等指标，将工程渣土与泥浆划分为六等级，并提出相应的再利用方式。同时现行 DBJ 43/T 515—2020《湖南省盾构渣土处理技术标准》^[7]对工程渣土与泥浆分级处理，砂石集料与干化土用途，再生产品的性能提出了建议指导；王智宇等^[8]采用泥质渣土在 800 ℃ 的温度下制备出强度等级 MU20 的烧结砖；张磊等^[9]使用污泥制备出密度等级 700~900 kg/m³ 的渣土陶粒；荣辉等^[10]研究了烧结温度、预热时间等焙烧参数对污泥陶粒吸水率、堆积密度等性能的影响；Riley 等^[11]提出三相图方法，对黏土制备陶粒可行性进行了评估；Chen 等^[12]在 Riley 研究的基础上，对淤泥状渣土制备陶粒可行性进行了评价，并总结工程渣土制备陶粒的系统经验。同时姚清松等^[13-16]采用黏性土、淤泥土，辅以水泥、石灰等胶凝材料，掺加相应的外加剂，制备形成抗压强度 10~15 MPa 的免烧砖。

近年来，盾构渣土也在固化回填和注浆材料等方面进行了相应的资源化利用。Tsuchida^[17]和 Watabe

等^[18]制备出基于盾构渣土的轻质固化土，并完成在机场扩建和护岸工程中的回填应用；郝彤等^[19]以盾构渣土掺量和水胶比为影响因素，研究其对注浆材料工作性能和力学性能的影响规律；Zhou 等^[20]采用南京长江隧道工程开挖泥浆，制备得到了性能优异的回填灌浆；杨钊等^[21]采用泥水盾构泥浆，探讨水胶比、砂胶比、泥浆比重等因素对壁后注浆材料的影响；钟小春等^[22]采用盾构产生的粉细砂渣土，根据土砂比变化，调整浆液密度、稠度、凝结时间、强度等参数，保证壁后注浆材料性能稳定。

基于武汉市轨道交通 19 号线第五标段工程，对渣土进行沉淀、筛分、压滤等工序，制备分离出 5~31.5 mm 岩石骨料，0~5 mm 岩石骨料和盾构渣土，通过对盾构渣土的分析，将盾构渣土取代壁后同步注浆材料中的膨润土和细砂，探讨不同试验配比下，材料的工作性能及力学性能，得出推荐配合比，进而制备出性能满足规程的同步注浆材料，以消纳盾构渣土。在保证施工质量、施工进度、安全方面的前提下，产生了良好的经济效益和社会效益。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

试验采用 P·O 42.5 水泥，I 级粉煤灰，钠基膨润土，0~2.36 mm 细砂，盾构渣土。试验原材料的化学成分组成见表 1，其颗粒级配和 XRD 分别如图 1~2 所示。

表 1 注浆原材料的化学成分
Table 1 Chemical composition of grouting raw materials

种类	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
水泥	0.86	6.19	20.46	0.14	3.44	0.94	62.87	0.33	4.17
粉煤灰	0.45	28.96	42.43	0.77	1.79	2.19	10.06	2.34	9.70
膨润土	0.96	16.34	56.97	0.59	—	3.81	3.02	1.75	15.31
细砂	1.68	11.39	56.91	0.67	—	4.28	12.04	1.72	10.30
盾构渣土	0.60	9.66	18.37	0.32	0.51	1.74	58.24	0.89	9.13

1.2 试验配合比

盾构渣土分别按照 50%、75%、100% 掺量替代膨润土和细砂，用以制备同步壁后注浆材料，使用水胶比为变量做单因素试验，设计为 0.9、1.0、1.1、1.2，水泥粉煤灰比例固定为 1:2，膨润土不计入胶凝材料。具体配合比见表 2。

1.3 试验方法

采用水泥胶砂搅拌机，将水泥、粉煤灰、膨润土、细砂依次加入搅拌锅中，充分搅拌 30 s 后加入水，低速搅拌 90 s，再高速搅拌 60 s。同步壁后注浆材料的泌水率和流动度试验分别参照 T/CES 563—2018《盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程》和

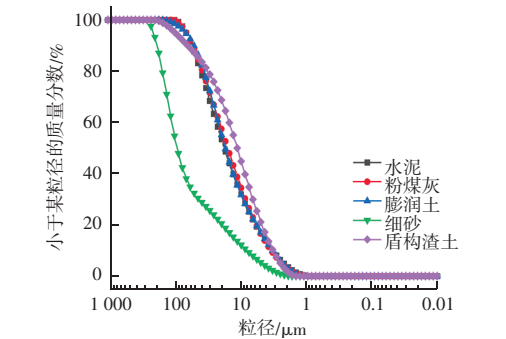


图1 注浆材料颗粒级配曲线分布图

Fig. 1 Distribution diagram of particle size distribution curve of grouting material

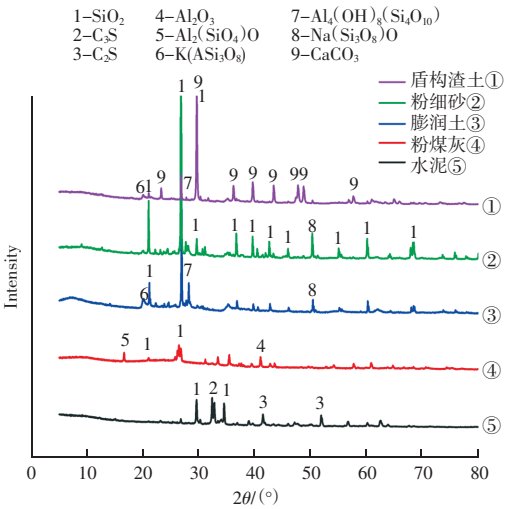


图2 原材料 XRD 图

Fig. 2 XRD pattern of raw material

表2 盾构渣土制备同步壁后注浆材料试验配合比

Table 2 Experimental mix ratio of synchronous grouting materials / (kg/m³)

序号	胶凝材料				盾构渣土	水胶比
	水泥	粉煤灰	膨润土	细砂		
基准组	190	380	60	780		0.9
B1-1	190	380	30	390	420 (50%)	0.9
B1-2	190	380	30	390	420 (50%)	1.0
B1-3	190	380	30	390	420 (50%)	1.1
B1-4	190	380	30	390	420 (50%)	1.2
B2-1	190	380	15	195	630 (75%)	0.9
B2-2	190	380	15	195	630 (75%)	1.0
B2-3	190	380	15	195	630 (75%)	1.1
B2-4	190	380	15	195	630 (75%)	1.2
B3-1	190	380			840 (100%)	0.9
B3-2	190	380			840 (100%)	1.0
B3-3	190	380			840 (100%)	1.1
B3-4	190	380			840 (100%)	1.2

GB/T 50448—2015 《水泥基灌浆材料应用技术规范》；JGJ/T 233—2011 同步壁后注浆材料的抗压强度测试参考《水泥土配合比设计规程》，加载速率控

制在 100 N/s。

取注浆材料碎块置入样品管，向管内注满无水乙醇终止其水化。在微观测试前取出相应样品放置在 60 ℃ 烘箱中干燥。对试验原材料和注浆材料样品分别进行 SEM 微观测试。

2 试验结果分析

2.1 盾构渣土掺量对注浆材料工作性能影响

由表3可知，随着盾构渣土掺量的增加，注浆材料的流动性逐渐降低，可通过提高水胶比来改善注浆材料的流动性。对水胶比为 1.0 的注浆材料，盾构渣土掺量从 50% 增加至 100%，流动度从 210 mm 降低至 165 mm；对于盾构渣土掺量 75% 的注浆材料，水胶比从 0.9 增加至 1.2，流动度从 185 mm 增加至 235 mm，均满足流动度值≥160 mm 指标要求。

表3 盾构渣土掺量和水灰比对注浆材料工作性能的影响

Table 3 Influence of shield soil dregs content and water cement ratio on the working performance of grouting materials

序号	盾构渣土掺量/%	水胶比	流动度/mm	泌水率/%
基准组		0.9	220	3.0
B1-1	50	0.9	205	2.3
B1-2	50	1.0	210	2.9
B1-3	50	1.1	220	3.5
B1-4	50	1.2	245	4.0
B2-1	75	0.9	185	2.0
B2-2	75	1.0	185	2.2
B2-3	75	1.1	215	2.5
B2-4	75	1.2	235	3.1
B3-1	100	0.9	160	1.1
B3-2	100	1.0	165	1.2
B3-3	100	1.1	200	1.2
B3-4	100	1.2	215	1.5

注浆材料的填充性指标可利用泌水率来评价，一般规程对于注浆材料的泌水率要求低于 3.5%。由表3可知，泌水率随盾构渣土掺量的增加而降低，随着水胶比的增加而增加。当水胶比为 1.0 时，盾构渣土掺量从 50% 增加至 100%，泌水率从 2.9% 降低至 1.2%；当盾构渣土掺量 75% 的注浆材料，水胶比从 0.9 增加至 1.2，泌水率从 2.0% 增加至 3.1%。

当水胶比一定时，注浆材料流动度和泌水率随着盾构渣土掺量的增加而减小。由于盾构渣土颗粒细小，且在絮凝剂的作用下表现出较高黏性，其内部的充填水不易排出，整体自由水减小，流动性降

材料科学

低。同时盾构渣土较好的保水和不易固结排水特性，对于注浆材料的泌水率有较大的改善作用。

2.2 盾构渣土掺量对注浆材料力学性能影响

由表 4 可知，随着盾构渣土掺量的增加，材料的抗压强度先增加后降低，而材料的抗压强度和水胶比出现负相关的现象。当水胶比为 1.0 时，着盾构渣土掺量从 50% 增加到 75%，28 d 抗压强度从 2.40 MPa 降低到 2.54 MPa，而盾构渣土掺量从 75% 增加到 100%，28 d 抗压强度从 2.54 MPa 降低到 2.34 MPa。当盾构渣土掺量 75% 的注浆材料，水胶比从 0.9 增加至 1.2，28 d 抗压强度从 2.94 MPa 降低至 2.05 MPa。

表 4 盾构渣土掺量和水灰比对注浆材料力学性能的影响
Table 4 Influence of shield soil dregs content and water cement ratio on the mechanical properties of grouting materials

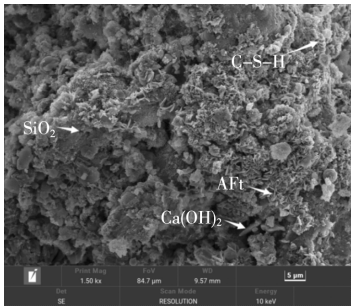
序号	盾构渣土掺量/%	水胶比	3 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
基准组	—	0.9	1.04	2.72
B1-1	50	0.9	1.05	2.75
B1-2	50	1.0	0.61	2.40
B1-3	50	1.1	0.58	2.26
B1-4	50	1.2	0.46	1.75
B2-1	75	0.9	1.10	2.94
B2-2	75	1.0	0.69	2.54
B2-3	75	1.1	0.64	2.39
B2-4	75	1.2	0.54	2.05
B3-1	100	0.9	0.95	2.64
B3-2	100	1.0	0.58	2.34
B3-3	100	1.1	0.51	2.16
B3-4	100	1.2	0.39	1.56

可见，适量的盾构渣土可增强注浆材料的抗压强度，当盾构渣土掺量为 75% 时抗压强度最高，随着水胶比的增加，抗压强度增长率降低。究其原因，水胶比的增加，体系内自由水含量增加，未参与水化反应的自由水一部分从表面泌出，另一部分则留在试块内部最终形成毛细孔使得抗压强度降低，而适量盾构渣土细小颗粒降低泌水填充空隙，使得试块内部更加密实，抗压强度呈现部分上升趋势。

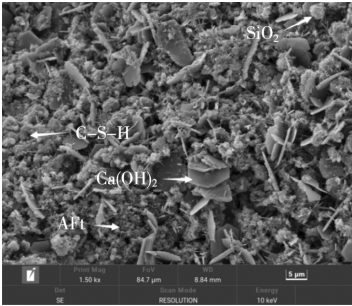
2.3 盾构渣土制备注浆材料微观形貌分析

由图 3 (a) 基准注浆材料 SEM 图中可以看到棱柱状的 AFt、絮状的 C-S-H 凝胶和少量的Ca (OH)₂等产物；图 3 (b) 为 B3-1 组试样，在盾构渣土基注浆材料 SEM 图中可以看到棱柱状的 AFt，絮状的 C-S-H 凝胶，椭圆形的粉煤灰和大量板状的 Ca (OH)₂。对比可知，在注浆材料中采用盾构渣土

取代细砂和膨润土后，注浆材料内部相对较为致密，无孔隙、裂缝等明显缺陷，这也是盾构渣土基注浆材料的抗压强度和普通注浆材料接近的原因。



(a) 基准注浆材料



(b) 盾构渣土基注浆材料

图 3 注浆材料扫描电镜图
Fig. 3 SEM of grouting materials

3 结论

以武汉市轨道交通 19 号线为背景，利用不同比例渣土替代砂和膨润土制备同步注浆材料，系统性研究了渣土掺量对注浆材料的工作性能、力学性能及微观结构的影响，得出结论如下：

- (1) 盾构渣土掺量以及水胶比对注浆材料的工作性能影响明显，随着渣土掺量的增加，注浆材料流动度呈降低趋势，但泌水现象得到改善。盾构渣土注浆材料的水胶比试验推荐水胶比为 1.0~1.1。
- (2) 试验区间盾构渣土的掺入可以优化骨料级配，在盾构渣土掺量为 75% 时，注浆材料的抗压强度强化效果最为明显，在相同水胶比 0.9 的情况下，28 d 抗压强度可达 2.94 MPa，比基准注浆材料高 7%。
- (3) SEM 测试表明，粒径小于细砂的盾构渣土作为骨料，注浆材料内部相对较为致密，无孔隙、裂缝等明显缺陷，验证了盾构渣土作为骨料在注浆材料中资源化利用是可行的。

参 考 文 献

- [1] 徐俊. 粉土地层盾构渣土同步注浆再利用研究 [D]. 湖南大学, 2020.
- [2] 何小华. 地铁盾构下穿建筑物群地层沉降控制技术 [J]. 交通世界, 2021 (33): 79-80.
- [3] 谢亦朋, 张聪, 阳军生, 等. 盾构隧道渣土资源化再利用技术研究及展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (2): 188-207.
- [4] 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.
- [5] 郭卫社, 王百泉, 李沿宗, 等. 盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2020, 40 (8): 1101-1112.
- [6] 朱伟, 钱勇进, 王璐, 等. 盾构隧道渣土与泥浆的分类与处理利用技术及主要问题 [J]. 隧道建设 (中英文): 2021, 41 (增刊2): 1-13.
- [7] 湖南省盾构渣土处理技术标准 [S]. DBJ 43/T 515—2020. 长沙. 湖南省住房和城乡建设厅. 2020.
- [8] 王智宇, 翁晶晶, 屠浩驰, 等. 河道淤泥生产烧结砖的基础研究 [J]. 新型建筑材料, 2010, 37 (6): 24.
- [9] 张磊, 张鸿飞, 荣辉, 等. 700~900 密度等级渣土陶粒的研制及其性能 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21 (5): 803-810.
- [10] 荣辉, 张鸿飞, 张磊, 等. 污泥陶粒焙烧制度优化及其对陶粒性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2019, 46 (4): 68-72, 87.
- [11] RILEY CM. Relation of chemical properties to the bloating of clays [J]. Journal of the American ceramic society, 1951, 34 (4): 121-128.
- [12] CHEN H J, YANG M D, TANG C W, et al. Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28: 387-394.
- [13] 姚清松, 蔡坤坤, 刘超, 等. 粉质黏土地层基坑渣土免烧砖配比及力学性能研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2020, 40 (增刊1): 145-151.
- [14] 郭小雨, 陈枝东, 裴立宅, 等. 改性矿渣水泥-渣土免烧砖的制备与性能表征 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (5): 75-79.
- [15] 江朝华, 潘跃鹏, 冷杰, 等. 砂性弃土制备免烧砖试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34 (11): 3116-3121.
- [16] 朱明, 王福喜, 曾文超, 等. 城市建筑泥浆制备免烧砖的强度形成机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (9): 45-48, 58.
- [17] TSUCHIDA T, FUJISAKI H, MAKIBUCHI M, et al. Use of light-weight treated soils made of waste soil in airport extension project [J]. Proceedings of JSCE, 2010 (644): 13-23.
- [18] WATABE Y, ITOU Y, KANG MS, et al. One-Dimensional Compression of Air-Foam Treated Lightweight Geo-Material in Microscopic Point of View [J]. Soils and Foundations, 2004, 44 (6): 53-67.
- [19] 郝彤, 李鑫箫, 冷发光, 王帅. 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.
- [20] ZHOU S H, LI X, JI C, et al. Back-fill grout experimental test for discharged soils reuse of the large-diameter size slurry shield tunnel [J]. Ksce Journal of Civil Engineering. 2017. 21 (3). 725-733.
- [21] 杨钊, 贺祖浩, 刘毅, 等. 福州地铁过江通道泥水盾构弃浆在壁后注浆材料中的再利用 [J]. 现代隧道技术, 2019, 56 (3): 192-199, 205.
- [22] 钟小春, 左佳, 刘泉维, 等. 地层中粉细砂在盾构壁后注浆中的再利用研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (增刊2): 293-296.