

# 高蒙脱石含量地铁盾构废弃泥浆固化和力学特性试验研究

池凌杰<sup>1</sup>, 林法力<sup>2</sup>, 朱赞成<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>腾达建设集团股份有限公司, 上海

<sup>2</sup>台州学院建筑工程学院, 浙江 台州

收稿日期: 2023年12月1日; 录用日期: 2024年1月8日; 发布日期: 2024年1月18日

## 摘要

本文基于杭州地铁盾构废弃泥浆固废处理, 选用固废再利用矿渣、粉煤灰作为固化剂, 生石灰作为碱性激发剂, 对废弃泥浆进行固化处理, 并对固化产物进行了一系列物理力学特性试验研究。试验结果表明, 随着固化剂掺量的参加, 固化土的强度明显增长; 而当固化剂掺量不变时, 矿渣掺量较大时, 28 d的无侧限抗压强度较高, 水稳系数均大于0.75。试验结果验证了该泥浆固化后可以用作城市道路基底路基材料。

## 关键词

地铁盾构废弃泥浆, 固化剂, 水稳系数, 无侧限抗压强度

# Experimental Study on Solidification and Mechanical Properties of High Montmorillonite Content Subway Shield Waste Slurry

Lingjie Chi<sup>1</sup>, Fali Lin<sup>2</sup>, Zancheng Zhu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Tengda Construction Group Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>School of Civil Engineering and Architecture, Taizhou University, Taizhou Zhejiang

Received: Dec. 1<sup>st</sup>, 2023; accepted: Jan. 8<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 18<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 池凌杰, 林法力, 朱赞成. 高蒙脱石含量地铁盾构废弃泥浆固化和力学特性试验研究[J]. 土木工程, 2024, 13(1): 13-18. DOI: 10.12677/hjce.2024.131003

## Abstract

This article is based on the treatment of waste mud and solid waste from shield tunneling in Hangzhou Metro. Solid waste reuse slag and fly ash are selected as solidifying agents, and quicklime is used as an alkaline activator to solidify the waste mud. A series of physical and mechanical properties tests are conducted on the solidified products. The experimental results show that with the addition of a solidifying agent, the strength of the solidified soil increases significantly; When the amount of solidifying agent remains constant and the amount of slag is large, the unconfined compressive strength at 28 days is higher, and the water stability coefficient is greater than 0.75. The experimental results have verified that the solidified slurry can be used as a foundation material for urban roads.

## Keywords

Subway Shield Waste Slurry, Solidifying Agent, Water Stability Coefficient, Unconfined Compressive Strength

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着经济的快速发展，目前越来越多的城市正在发展以地铁为代表的轨道交通，新建地铁盾构区域的环境越来越复杂，遇到复合地层条件下穿既有铁路、轨道交通线、市政管等复杂构筑物的情况越来越多。各大中城地铁建设进入高峰期，由于土压平衡盾构法施工具有对周围环境影响较小的优点逐渐成为我国城市地铁建设的主要工法。但在盾构施工过程中会产生大量废弃泥浆，如何对科学处理这些废弃泥浆成为难题。据不完全统计，目前建筑垃圾已占城镇总量的 30%~40%，处理成为难题。全国每年建筑垃圾处置还存在收集程度低、理工艺粗放等问题。浙江省每年产生建筑垃圾约 7500 万吨，其中杭州主城区每年产生建筑垃圾 350 万吨[1]。目前的建筑垃圾综合资源利用率偏低，盾构泥浆和钻孔等废弃由于含水高活性物质含量低等原因情况尤甚[2] [3] [4]。

陈源等[5]利用掺加了泥浆质量 2% 的水泥，其中 0.5% 的水玻璃和 0.1% 硫酸铝等外加剂后，固化的泥浆得到较高强度。郝彤[6]对郑州 4 号线地铁盾构掘出的渣土，提出地铁区间盾构施工中掘出的渣土难以安置、污染环境回收利用等问题，探讨通过利用盾构区间掘进渣土替代部分中砂制备新型同步注浆材料，实现利用盾构区间掘进渣土固废资源化利用，以郑州盾构工程掘出渣为研究对象制备新型同步注浆材料，在无水下抗分散剂强化的情况下，材料除抗压性能偏低外，其余性能指标均能达到同步注浆材料性能要求。李雪[7]以南京地铁 10 号线盾构隧道泥浆研制同步注浆材料，通过改变胶砂比、粉灰比，得到同步注浆浆液性能较高。姜军[8]对广州地铁盾构渣土研制了烧结砖。近年来，常使用矿渣、水泥、粉煤灰等粉体，在激发剂作用下配置成土体固化剂，现在已经广泛应用于各种泥浆的固化处理[9] [10] [11]。

出于废弃泥浆现场快速处理处置研究的现实需要，本文以实际施工过程中产生的钻孔桩、盾构废弃泥浆为研究对象，研发适宜于城市道路路基材料的固化剂配方和配合比，由于原料泥浆量大，传统运输及对方成本高昂，固化剂、外掺的量较低可以大量节省城市建设成本，同时解决了底泥堆放产生的经济成本以及可能产生的环境污染治理成本，具有一定的社会意义和工程技术价值。

## 2. 试验材料和制备

### 2.1. 杭州地铁泥浆和粘结剂化学组分

试验所用的原始泥浆取自于杭州市西起梅灵南路，东至水澄路，沿之江路、老复兴街的盾构隧道以及明挖段隧道抗拔桩现场，盾构隧道切削地层主要为中风化泥质粉砂岩、中风化凝灰质砾砂岩、强风化泥质粉砂岩等泥岩地层。泥浆经过压滤呈板结状，颜色为暗红色，将其放入 105℃ 烘箱内，烘干 8 h，得到干燥的地铁盾构废弃泥浆，再经过研磨过 0.25 mm 筛，分别测试泥浆的物理化学性质，如表 1、表 2 所示。

**Table 1.** Chemical composition of waste mud and binder from Hangzhou metro (%)

**表 1.** 杭州地铁废弃泥浆和粘结剂化学组分(%)

试样 \ 组分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO
泥浆	55.12	16.27	4.62	0.16	0.45	3.06
粉煤灰	44.50	40.43	2.74	0.53	0.20	0.58
矿渣	25.85	10.37	0.33	0.59	0.14	6.29

由表 1 可知，杭州地铁盾构泥浆 SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量高达 76.41%，非常接近火山灰(SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)含量，可以考虑用于烧制水泥掺合料，理论上可以替代粘土质原料。黄晓庆等[4]对添加了石灰、黄土、粉煤灰等不同原料的污泥改性物进行了测试，得到当熟石灰添加量达到 10% 以上、PH 值达到 12 以上时，处理的污泥混合物抗压强度随着熟石灰的增加而增加。

**Table 2.** Main mineral composition of mud (%)

**表 2.** 泥浆主要矿物成分 (%)

试样 \ 组分	方解石	石英	斜长石	赤铁矿	微斜长石	蒙脱石	伊利石	绿泥石
泥浆	14	36	9	2	4	19	11	3

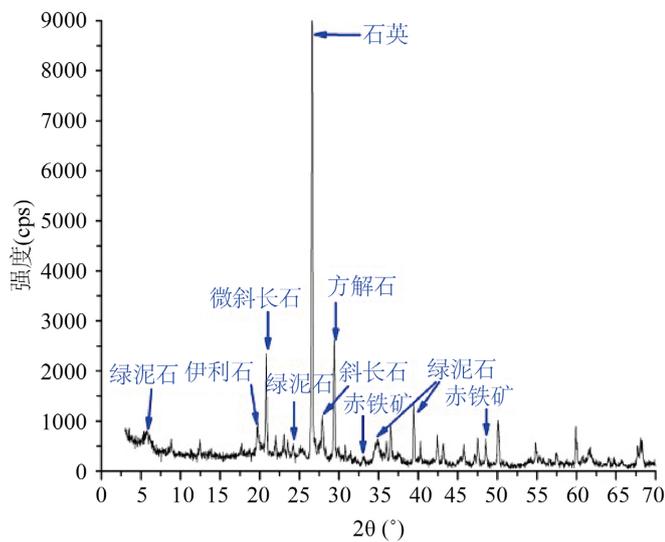
利用 X 射线荧光光谱仪(XRD)分析杭州盾构废弃泥浆的矿物成分含量，分别见图 1 和表 2。由表 1 和图 2 可知，杭州地铁盾构废弃泥浆主要矿物成分含有方解石、石英、斜长石、蒙脱石、伊利石等。含有高达 19% 的蒙脱石和 11% 的伊利石矿物，属于膨润土，具有较大的膨胀性能。试验选用的粉煤灰为 I 级灰，颜色呈尘灰色，颗粒大小不均。粉煤灰和矿渣(GGBS)采用 XRF 方法测试其化学成分见表 1。

### 2.2. 固化土的制备

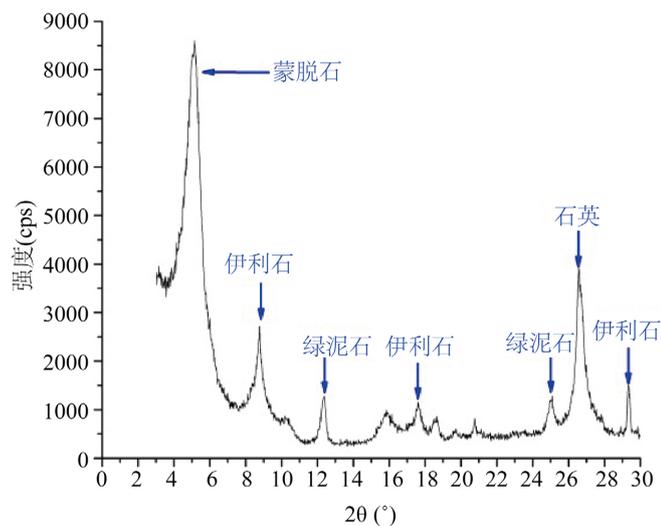
将烘干过筛的地铁盾构废弃泥浆粉末与固化剂三种成分：粉煤灰、矿渣、生石灰，按照表 3 的配比见表 3，以烘干的泥浆质量为 1.0，将称量好的泥浆、固化剂搅拌均匀后，将水倒入塑料桶内，再次将其搅拌均匀，把固化土泥浆装入直径 D = 48 mm、H = 50 mm 的塑料试模内，最后放入温度为 20 ± 2℃、RH = 95% 的恒温恒湿养护箱内，养护到相应龄期再测试其无侧限抗压强度。

## 3. 试验结果分析

根据前人相近的试验研究结果，确定固化剂各组分——粉煤灰、矿渣、生石灰适应的掺量范围，按



(a) 全岩粉末片



(b) 乙二醇饱和片

Figure 1. XRD of original mud in Hangzhou metro

图 1. 杭州地铁原始泥浆 XRD

Table 3. Preparation parameters of experimental raw materials

表 3. 试验原料制备参数

试样编号	组分比率			含水率
	Cao	GGBS	Fly Ash	
1#	0.090	0.063	0.147	0.50
2#	0.120	0.126	0.054	0.50
3#	0.120	0.090	0.090	0.50
4#	0.090	0.063	0.147	1.00
5#	0.090	0.063	0.147	2.00
6#	0.120	0.210	0.090	0.50

照正交试验单因素控制变量设计, 在养护龄期 3 d、7 d、14 d 和 28 d 下, 参照 JTG E51-2009《公路工程无机结合料温度材料试验规程》[12]测试 7 d 水稳系数、无侧限抗压强度作为检测指标, 以对各种固化剂组分进行优选, 确定固化剂最优配比。根据实际工程背景, 现场地铁盾构废弃泥浆经过压滤后的初始含水率约 34%左右, 将杭州地铁盾构泥浆水土比设计为 0.5、1.0、2.0 三种情况, 将每组试验 3 个平行试样的算术平均值作为本组试验的无侧限抗压强度。

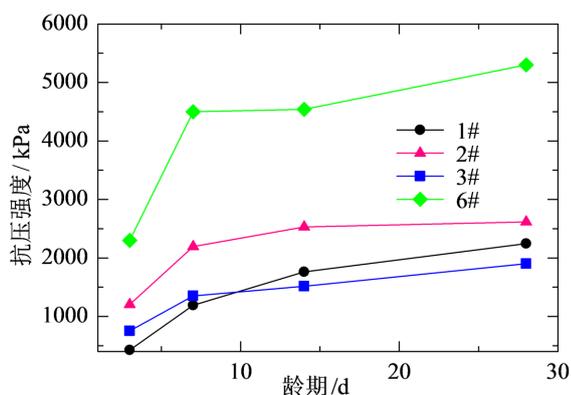
由表 4 可知, 1#、4#、5#试样固化剂相同配比相同, 水土比不同情况下, 养护 28 d 后, 1#样水土比为 0.5, 28 d 无侧限抗压强度为 2245 kPa, 4#样水土比为 1.0, 28 d 无侧限抗压强度为 524 kPa, 5#样水土比为 2.0, 28 d 无侧限抗压强度为 208 kPa, 随着水土比增大, 无侧限抗压强度急剧下降。因 4#、5#试样 3 d、7 d 强度较低, 试样比较软, 脱模时试样变形和破损较大, 未测试其 3 d 和 7 d 的无侧限抗压强度。1#、2#、3#试样 7 d 的水稳系数分别为 0.83、0.82、0.91, 均大于 0.75, 当生石灰掺量一定时, 随着矿渣 (GGBS) 的增加, 水稳系数和 28 d 无侧限抗压强度也随之增大。矿渣中含有较多的活性成分, 如硅酸、铝酸等(见表 1)与水 and 生石灰发生反应, 产生水化产物, 从而提高固化土的强度和稳定性。同时, 矿渣微粉可以填充固化土中的孔隙, 减少泥浆中的孔隙度, 从而提高了固化土的密实性和稳定性。

**Table 4.** 7-day water stability coefficient and 28 day unconfined compressive strength of each group of samples

**表 4.** 各组试样 7 d 水稳系数及 28 d 无侧限抗压强度

试验编号	7 d/kPa	7 d 水稳/kPa	水稳系数	28 d/kPa
1#	1191	990	0.83	2245
2#	2194	1797	0.82	2530
3#	1351	1230	0.91	1902
4#	—	—	—	524
5#	—	—	—	208
6#	4500	4105	0.91	5300

图 2 为 1#、2#、3#、6#试样随龄期无侧限抗压强度变化曲线图, 由图可知, 1#试样 3 d 无侧限抗压强度约为 28 d 无侧限抗压强度的 20%, 7 d 增长到 28 d 的 53%, 14 d 增长到 78%; 2#试样 3 d 无侧限抗压强度约为 28 d 无侧限抗压强度的 46%, 7 d 增长到 28 d 的 84%, 14 d 增长到 97%; 3#试样 3 d 无侧限



**Figure 2.** Curve of strength variation with age for different mix proportions

**图 2.** 不同配合比随龄期强度变化曲线

抗压强度约为 28 d 无侧限抗压强度的 40%，7 d 增长到 28 d 的 71%，14 d 增长到 80%；6# 试样 3 d 无侧限抗压强度约为 28 d 无侧限抗压强度的 43%，7 d 增长到 28 d 的 85%，14 d 增长到 86%。试验结果表明：固化剂掺量固定时，生石灰掺量为 0.09 比掺量为 0.12 的试样初期无侧限抗压强度增长较慢，而当生石灰掺量都为 0.12 时，2#、3#、6# 无侧限抗压强度增长速度差别不大，将矿渣含量由 0.090、0.126、0.210 逐步增大时，28 d 的无侧限抗压强度从 1902 kPa、2530 kPa、5300 kPa 逐渐增大，特别是 6# 试样较 3# 试样生石灰和粉煤灰含量不变，只增加了矿渣约 1 倍，而 28 d 无侧限抗压强度增加了约 3 倍。

#### 4. 结论

为了探究高蒙脱石含量的地铁废弃泥浆的固化处理后用于城市道路路基材料，选用了杭州地铁盾构废弃泥浆作为研究对象，进行了一系列试验研究，试验结果表明，采用生石灰作为碱激发材料，固化高蒙脱石含量的废弃泥浆具有一定的效果，得到的主要结论如下：

- 1) 当固化剂掺量不变时，28 d 无侧限抗压强度，随矿渣掺量的增加而增加，说明矿渣对地铁泥浆固化后的强度是主要影响因素。
- 2) 水稳性方面，当固化剂总掺量达到泥浆干重的 30% 时，水稳系数均超过了 0.75。
- 3) 强度增长速度方面，生石灰含量为 0.090 的 3 d、7 d 无侧限抗压强度增长速率比生石灰含量为 0.120 的 3 d、7 d 的无侧限抗压强度增长速率低约 50%；生石灰含量为 0.120 的 14 d 的无侧限抗压强度约为 28 d 的无侧限抗压强度的 85%。

#### 参考文献

- [1] 冯志远, 罗霄, 黄启林. 余泥渣土资源化综合利用研究探讨[J]. 广东建材, 2018, 34(2): 69-71.
- [2] 李洵. 杭州建筑垃圾资源化处置技术探讨[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(16): 64-65.
- [3] 李雁, 程曦, 慧锋, 等. 建筑泥浆资源化利用技术研究[J]. 施工技术, 2021, 50(3): 105-109.
- [4] 黄晓庆, 黄少斌, 杨顺汉. 污泥的特性与建筑材料资源化利用[J]. 粉煤灰, 2006(1): 45-48.
- [5] 陈源, 王加灿, 韩建刚. 海南红粘土废泥浆固化处理技术研究[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2014, 32(1): 74-79.
- [6] 郝彤, 李鑫箫, 冷发光, 等. 郑州市地铁粉质黏土层中盾构渣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.
- [7] 李雪, 黄琦, 王培鑫, 等. 粉细砂地层泥水盾构渣土回收利用及性能优化[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 299-307.
- [8] 姜军, 尹宝党. 盾构渣土制作新型墙材研究探析[J]. 砖瓦, 2019(3): 45-48.
- [9] 徐选臣, 杨建明, 杨建明, 单春明. 钢渣粉对 MKPC 浆体的改性作用试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019(3): 38(3): 811-816.
- [10] 沈建生, 徐亦冬, 方建柯. 新型废渣软土固化剂的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(10): 3332-3337.
- [11] 孙家瑛, 沈建生. 新型固化剂 GSC 固化软土的力学性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013(1): 20-25.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51-2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.