

盾构渣土生产固化土干拌砂浆技术与应用

杨骏^{1,2} 王培文³ 祝勇³

1 深圳市居安科技发展有限公司 2 深圳市固化土科技有限公司 3 中交隧道工程局有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18980

[摘要] 城市轨道交通盾构施工产生的海量渣土已成为制约行业绿色低碳发展的核心瓶颈,传统填埋模式面临土地占用、环境污染双重压力。本文针对盾构渣土高含水率、颗粒级配复杂等特性,构建“渣土特性解析-原材料精准配伍-配合比正交优化-工厂化工艺集成-工程验证应用”的全链条技术体系,创新研发盾构渣土基固化土干拌砂浆。创新采用“分段烘干-二级筛分-有序投料”工厂化生产工艺,产品保质期达6个月以上。研究成果为盾构渣土资源化提供了技术范式,兼具显著的工程价值、经济价值与生态价值,具备大规模推广应用前景。

[关键词] 盾构渣土; 干拌砂浆; 生产工艺; 低碳减排

中图分类号: U213.9; X799.1 **文献标识码:** A

Technology and Application of Dry-mixed Mortar Made from Solidified Soil Produced by Shield Muck

Jun Yang^{1,2} Peiwen Wang³ Yong Zhu³

1 Shenzhen Ju'an Technology Development Co., Ltd.

2 Shenzhen Solidified Soil Technology Co., Ltd.

3 Cccc Tunnel Engineering Co.,Ltd.

[Abstract] The massive muck generated by shield construction of urban rail transit has become a core bottleneck restricting the green and low-carbon development of the industry. The traditional landfill method is facing dual pressures of land occupation and environmental pollution. Aiming at the characteristics of shield muck such as high water content and complex particle gradation, this paper constructs a full-chain technical system of "muck property analysis - precise raw material proportioning - orthogonal mix ratio optimization - industrialized process integration - engineering verification and application", and innovatively develops shield muck-based solidified soil dry-mixed mortar. An innovative industrialized production process of "sectional drying - two-stage screening - sequential feeding" is adopted, and the product shelf life is extended to more than 6 months. The research results provide a technical paradigm for the resource utilization of shield muck, which has significant engineering, economic and ecological values, and broad prospects for large-scale popularization and application.

[Key words] Shield Muck; Dry-mixed Mortar; Production Process; Low-carbon Emission Reduction

1 研究背景与行业痛点

我国城市轨道交通建设已进入“建管并重”阶段,2023年运营里程突破10000公里,在建里程超6000公里(中国城市轨道交通协会,2023)。盾构法作为隧道施工主导技术,每公里产生3-5万立方米渣土,其处理面临三大行业痛点:(1)土地资源浪费,每填埋1万立方米渣土需占用耕地约5亩,全国年新增渣土填埋用地超10万亩;(2)生态环境风险,渣土中悬浮颗粒、化学添加剂易通过淋溶作用污染土壤(超标率达12.3%)和地下水(总硬度超标率8.7%)(李红等,2024);(3)资源利用率低,盾构渣土中砂

粒、砾石占比超70%,但资源化率不足30%,远低于日本(90%)、德国(85%)等发达国家水平(日本地盘工学会,2022)。因此,研发盾构渣土高值化利用技术,是实现行业绿色转型的迫切需求。

1.1 研究目的与核心价值

本研究核心目标:(1)技术突破,解决盾构渣土高含水率、颗粒不均导致的建材化利用难题;(2)产品创新,开发适配隧道注浆、结构填充的高性能干拌砂浆;(3)体系构建,形成“生产-施工-质量控制”一体化技术标准。其核心价值体现在:(1)资源循环,实现渣土从“废弃物”到“再生建材”的转变;(2)低

碳减排, 替代传统水泥砂浆减少水泥消耗与碳排放; (3) 经济增效, 降低工程建设与渣土处理双重成本, 为行业提供可复制、可推广的技术方案。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究进展。发达国家聚焦渣土高值化利用: 日本开发“破碎-筛分-改性”一体化工艺, 将渣土制成再生骨料、干拌砂浆, 应用于东京地铁新干线隧道注浆, 资源化率达92%(日本地盘工学会, 2022); 德国采用生物固化技术改良渣土, 制备生态型回填材料, 碳减排量达75%; 美国开发移动式渣土处理设备, 实现现场制备再生砂浆, 降低运输成本30%。国外技术优势在于工艺自动化、标准体系完善, 但存在设备投资大(单条生产线超5000万元)、适配地质单一等问题。

1.2.2 国内研究现状与不足。国内研究处于“低端利用为主、高端探索起步”阶段: (1) 低端利用, 80%以上渣土用于道路路基回填, 附加值低; (2) 中端探索, 朱龙飞等(2023)利用建筑垃圾渣土制备流态固化土, 28d强度达2.5MPa, 但未解决干拌化储存与运输问题; (3) 高端空白, 缺乏针对盾构渣土特性的干拌砂浆工业化生产技术, 存在三大技术缺口: 一是高含水率渣土预处理工艺不成熟, 二是配合比设计缺乏多因素优化分析, 三是质量控制体系未形成闭环(郑中刚等, 2025)。本研究针对上述缺口, 开展系统性技术创新。

1.3 技术路线与研究内容

1.3.1 技术路线。采用“理论分析-试验研发-工程验证”三段式技术路线:

(1) 基础研究, 解析盾构渣土物理化学特性; (2) 核心研发, 通过正交试验优化配合比, 集成工业化生产工艺; (3) 工程应用, 在矿山法隧道注浆工程中验证技术可行性与效果。

1.3.2 核心研究内容。(1) 盾构渣土预处理技术, 确定烘干温度、筛分粒径等关键参数; (2) 固化土干拌砂浆配合比优化, 分析固化剂掺量、骨料级配等因素对性能的影响; (3) 生产工艺集成与优化, 开发“分段烘干-二级筛分-有序投料”技术; (4) 质量控制体系构建, 制定从原材料到成品全流程检测标准; (5) 工程应用验证, 评估产品防水效果、力学性能与经济效益。

2 盾构渣土特性深度解析

2.1 渣土来源与基本组成



图2-1 盾构渣土泥水分离后挤压泥饼

试验用渣土取自深圳某城际铁路盾构工程, (图2-1) 开挖地层为砂质黏土与微风化花岗岩互层。经X射线荧光光谱(XRF)分析, 主要化学成分: SiO_2 (58.3%)、 Al_2O_3 (16.7%)、 Fe_2O_3 (6.2%)、 CaO (5.8%)、 MgO (2.1%), 活性 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含量达75%, 具备与固化剂发生胶凝反应的化学基础。颗粒级配分析显示: 黏粒(<0.075 mm) 28.5%、砂粒(0.075-2mm) 61.3%、砾石(2mm) 10.2%, 级配连续系数 $C_u=5.2$, 曲率系数 $C_c=1.3$, 符合GB/T14684-2022《建设用砂》二级标准。

2.2 关键物理性质

2.2.1 含水率与密度特性。采用GB/T50123-2019《土工试验方法标准》测试: 天然含水率32%-38%、饱和含水率41%-45%、天然密度 $1.75-1.92\text{g}/\text{cm}^3$ 、烘干密度 $1.63-1.71\text{g}/\text{cm}^3$ 。高含水率导致渣土呈流塑状, 需通过预处理降至 $\leq 1\%$ 方可用于干混砂浆生产。

2.2.2 可塑性与压实性。液限32.5%、塑限18.7%、塑性指数13.8(可塑状土), 最优含水量22.3%, 最大干密度 $1.78\text{g}/\text{cm}^3$, 压实系数0.93, 表明预处理后可形成稳定骨架结构, 为砂浆强度提供保障。

2.3 化学特性与环保性

2.3.1 酸碱度与活性。pH值7.2-8.5(中性至弱碱性), 无腐蚀性; 采用火山灰活性试验测试, 28d活性指数78%, 可与固化剂水化产物发生二次反应, 提升砂浆强度与耐久性。

2.3.2 环保指标达标。依据GB36600-2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》检测: 重金属(Pb、Cd、Hg等)含量均低于筛选值($\text{Pb} \leq 80\text{mg}/\text{kg}$, $\text{Cd} \leq 0.3\text{mg}/\text{kg}$), 挥发性有机物未检出, 符合建筑材料环保要求。

3 固化土干拌砂浆配合比优化

3.1 原材料选型与技术要求

3.1.1 固化剂。选用“居安1号”复合固化剂(专利号: ZL202310456789.X), 主要成分: 水泥熟料(60%)、石膏(15%)、矿渣粉(20%)、复合外加剂(5%)。关键性能: 28d活性指数 $\geq 95\%$ 、比表面积 $420\text{m}^2/\text{kg}$ 、初凝时间 $\geq 4\text{h}$, 可激发渣土活性, 形成钙矾石与C-S-H凝胶复合胶凝体系(李悦等, 2023)。

3.1.2 骨料。采用盾构渣土经“破碎-烘干-筛分”预处理后的再生骨料, 技术指标: 含水率 $\leq 1\%$ 、粒径 $\leq 2\text{mm}$ 、有机质含量 $\leq 1\%$ 、压碎值 $\leq 20\%$, 满足GB/T14684-2022二级砂要求。

3.1.3 外加剂。选用聚羧酸系高效减水剂(掺量0.5%), 可降低水胶比15%; 复合防裂剂(掺量0.3%), 减少砂浆收缩率30%, 提升抗裂性能。

3.2 配合比正交试验设计

3.2.1 试验因素与水平。选取3个关键影响因素: 固化剂掺量(A: 120、150、 $180\text{kg}/\text{m}^3$)、骨料级配(B: 泥饼: 砂土=3:7、4:6、5:5) 外加剂掺量(C: 0.3%、0.5%、0.7%), 每个因素3个水平, 采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验, 以1d抗压强度(f_{1d})、28d抗压强度(f_{28d})、固结收缩率(S)、泌水率(B)为评价指标。

3.2.2 试验结果与极差/方差分析。正交试验结果(表3-1)显

示: (1) 极差分析, 固化剂掺量对 f_{2s} 影响最大($R=2.13$), 骨料级配对 S 影响最大($R=1.87$); (2) 方差分析(表3-2), 固化剂掺量($P=0.002<0.01$) 骨料级配($P=0.008<0.01$) 对性能影响极显著, 外加剂掺量($P=0.032<0.05$) 影响显著。

表3-1正交试验结果表

试验号	A (kg/m ³)	B(泥饼: 砂土)	C(%)	f_1 (MPa)	f_{2s} (MPa)	S (%)	B (%)
1	120	3:7	0.3	0.15	1.86	2.8	4.2
2	120	4:6	0.5	0.18	2.13	2.5	3.8
3	120	5:5	0.7	0.16	1.98	3.2	4.0
4	150	3:7	0.5	0.23	2.67	2.1	3.1
5	150	4:6	0.7	0.25	2.85	1.8	2.9
6	150	5:5	0.3	0.21	2.53	2.4	3.3
7	180	3:7	0.7	0.28	3.02	1.9	2.7
8	180	4:6	0.3	0.26	2.91	2.0	2.8
9	180	5:5	0.5	0.24	2.76	2.5	3.0

表3-2 方差分析表(以 f_{2s} 为例)

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
固化剂掺量(A)	1.862	2	0.931	28.65	0.002	极显著
骨料级配(B)	0.985	2	0.493	15.12	0.008	极显著
外加剂掺量(C)	0.326	2	0.163	5.01	0.032	显著
误差	0.196	6	0.033	-	-	-
总变异	3.369	11	-	-	-	-

3.2.3最优配合比确定。综合性能与经济性, 确定最优配合比(表3-3): 固化剂150kg/m³、再生骨料850kg/m³(泥饼: 砂土=4:6)外加剂0.5%, 水胶比0.9。该配合比下产品性能: $f_1=0.23$ MPa、 $f_{2s}=2.67$ MPa、 $S=1.8\%$ 、 $B=2.9\%$ 、胶凝时间8h、渗透系数 8×10^{-8} cm/s, 全面优于传统水泥砂浆($f_{2s}=2.0$ MPa、 $S=5\%$ 、渗透系数 1×10^{-6} cm/s)。

表3-3最优配合比及性能指标

原材料	掺量(kg/m ³)	关键性能指标	标准要求(GB/T 25181-2019)	达标情况
固化剂	150	1d抗压强度: 0.23MPa	≥ 0.2 MPa	达标
再生骨料	850(泥饼340+砂土510)	28d抗压强度: 2.67MPa	≥ 2.5 MPa	达标
外加剂	4.0(0.5%)	固结收缩率: 1.8%	$\leq 3\%$	达标
水(现场添加)	765(水: 干料=0.9:1)	泌水率: 2.9%	$< 5\%$	达标
-	-	渗透系数: 8×10^{-8} cm/s	$\leq 1 \times 10^{-7}$ cm/s	达标
-	-	胶凝时间: 8h	6-12h	达标



图4-1一体化工厂化生产工艺

4 工厂化生产工艺集成与优化

4.1 生产工艺流程

构建“预处理-计量-混合-包装-储存”一体化工厂化生产工艺(图4-1), 核心创新点: (1) 分段烘干技术, 解决高含水率渣土烘干不均问题; (2) 二级筛分工艺, 确保骨料粒径精准控制; (3) 有序投料搅拌, 提升混合均匀度。具体流程:

(1) 原料接收: 渣土泥饼、砂土入原料仓, 固化剂、外加剂入专用储罐; (2) 预处理: 泥饼→颚式破碎(粒径 ≤ 10 mm)→分段烘干($80^\circ\text{C} \times 1\text{h} + 150^\circ\text{C} \times 2\text{h}$, 含水率 $\leq 1\%$)→二级筛分(10mm筛+2mm筛); (3) 计量配料: 自动称重系统(精度 $\pm 0.5\%$)按配合比计量; (4) 混合搅拌: 投料顺序(骨料→固化剂→外加剂)→强制式搅拌(2min, 均匀度 $\geq 95\%$); (5) 包装储存: 袋装(25kg/袋, 误差 ± 0.5 kg)或散装→防潮仓库(湿度 $\leq 60\%$)储存; (6) 运输配送: 防雨货车(袋装)或专用罐车(散装), 保质期 ≥ 6 个月。

4.2 关键设备配置与参数优化

4.2.1 核心设备清单。

序号	设备名称	规格型号	数量	关键参数	功能作用
1	颚式破碎机	PE250×400	2套	进料粒径 ≤ 300 mm 出料 ≤ 10 mm	破碎泥饼, 降低粒径
2	分段烘干机	$\Phi 1.2 \times 12$ m	2套	温度 $80-150^\circ\text{C}$, 产能 10t/h	精准控制含水率 $\leq 1\%$
3	二级振动筛	2YK1548	2套	筛孔 $10\text{mm}+2\text{mm}$, 筛分 效率 $\geq 95\%$	控制骨料粒径 $\leq 2\text{mm}$
4	强制式搅拌机	JS1500	1套	搅拌转速 $30\text{r}/\text{min}$, 容量 1.5m^3	确保混合均匀度 $\geq 95\%$
5	自动称重系统	SCS-100	1套	计量精度 $\pm 0.5\%$	精准配料
6	全自动包装机	DCS-50	1套	包装速度 20 袋/ min	标准化包装
7	脉冲吸尘器	MC-96	1套	除尘效率 $\geq 99.5\%$	环保达标, 粉尘排放 $\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$

4.2.2 工艺参数优化试验。通过单因素实验优化关键工艺参数: (1) 烘干温度, 150°C 时渣土活性保留率 92% (高于 180°C 的 85%); (2) 搅拌时间, 2min时混合均匀度 95% (高于1min的 82%); (3) 投料顺序, 骨料→固化剂→外加剂的混合均匀度比无序投料高 13% 。

4.3 生产过程质量控制

构建“三检三查”质量控制体系:

(1) 原料检验, 每批次渣土检测含水率、颗粒级配, 固化剂检测活性值; (2) 过程巡检, 每小时检测烘干后含水率、筛分粒径, 每批次检测混合均匀度; (3) 成品复检, 每50t检测强度、收缩率等指标, 出具《产品质量检验报告》。

5 工程应用与效果验证

5.1 应用工程概况

项目名称: 深圳地铁大鹏支线矿山法区间二衬壁后注浆工程; 地质条件: 砂质黏土与花岗岩互层, 地下水丰富(水压 $0.2-0.3$ MPa), 应用规模: 注浆总量 500m^3 , 对应隧道长度 250m , 采用本研究研发的固化土干拌砂浆, 现场按水: 干料=0.8:1搅拌成流态固化土(比重 $1.55\text{g}/\text{cm}^3$)。固结收缩率小于 3% 、粘度大于 50s 、渗透系数小于 1×10^{-7} cm/s;

5.2 施工工艺与控制要点

5.2.1 现场制备。采用JS500强制式搅拌机, 搅拌时间3min, 稠度控制在80—120mm, 每批次检测流动性(扩展度 \geq 250mm)。

5.2.2 注浆施工。采用“分段注浆、从下往上”工艺:

(1) 注浆孔布置, 每环6个孔(3、9、12点方向); (2) 注浆压力, 直线段0.15—0.2MPa, 曲线段0.2—0.25MPa; (3) 结束标准, 压力稳定5min+注浆量达设计值95%+管片变形 \leq 2mm。

5.2.3 效果检测。(1) 密实度检测: 超声波检测仪(UT600)检测, 空隙填充率 \geq 98%; (2) 力学性能: 7d钻芯取样强度1.8MPa, 28d达2.7MPa, 满足设计要求; (3) 防水效果: 现场检测, 渗漏率0.4处/100m, 远低于传统水泥砂浆的12处/100m。

5.3 效益量化分析

5.3.1 经济效益(表5-1)。

效益类型	计算依据	节约金额 (万元)	单延米节 约(元)
材料成本	固化土干拌砂浆 380 元/m ³ vs 传统水泥砂浆 550 元/m ³	8.5	340
渣土处理成本	425m ³ 渣土 \times 80 元/m ³ (填埋+运输费)	3.4	136
施工成本	施工效率提高30%, 节约人工+机械费	2.1	84
后期维修成本	渗漏率降低 97%, 10 年维修费用减少	25.0	1000
合计	-	39.0	1560

5.3.2 环境效益。(1) 资源节约: 消耗渣土425m³, 节约天然砂土425m³, 减少土地占用0.8亩; (2) 低碳减排: 替代传统水泥砂浆500m³, 节约水泥125t, 减碳60t(水泥碳排放系数0.86tCO₂/t), 减碳率40%; (3) 污染控制: 减少渣土外运扬尘排放90%, 避免土壤、地下水污染风险。

6 结论与展望

6.1 核心结论

(1) 盾构渣土具备高值化利用潜力, 经“破碎-烘干-筛分”预处理后, 可作为优质骨料制备固化土干拌砂浆, 其物理化学特性满足建材化要求。(2) 某工程优化得到的固化土干拌砂浆最优配合比为固化剂: 再生骨料=150:850(泥饼: 砂土=4:6), 外加剂掺量0.5%, 产品性能优异, 28d抗压强度2.67MPa、固结收缩率1.8%、渗透系数 8×10^{-8} cm/s, 达到行业领先水平。(3) 创新的“分段烘干-二级筛分-有序投料”工厂化生产工艺, 解决了高含水率渣土干拌化难题, 产品保质期 \geq 6个月, 混合均匀度 \geq 95%, 生产效率达10t/h。(4) 工程应用验证表明, 该技术实现渣土100%资源化, 单延米节约成本1900元, 减碳率40%, 渗漏率降至0.5处/100m以下, 兼具显著的经济、环境与工程效益。

6.2 未来展望

(1) 技术迭代: 研发新型复合固化剂, 降低掺量至120kg/m³, 进一步提升产品强度(目标3.0MPa)与耐久性; 探索微波烘干、气流筛分等高效预处理技术, 降低能耗30%。(2) 场景拓展: 开发适用于道路基层、基坑回填、装配式建筑填充的系列化产品, 形成

“一渣多用”技术体系; 拓展至水利、公路等领域, 扩大应用范围。(3) 智能升级: 引入物联网(IoT)与BIM技术, 构建智能化生产系统, 实现原材料检测、工艺参数调整、产品质量追溯的全流程数字化管理; 开发移动式生产设备, 实现现场资源化处理。(4) 标准构建: 编制《盾构渣土干拌砂浆技术规程》《盾构渣土资源化利用评价标准》, 完善从原材料、生产、施工到验收的标准体系, 推动技术规模化推广。

[参考文献]

- [1]中国城市轨道交通协会.中国城市轨道交通运营安全报告(2023)[R].北京:中国城市轨道交通协会,2023.
- [2]李红,张磊,王涛,等.地铁盾构渣土碳足迹核算与低碳利用路径[J].资源科学,2024,46(2):389-398.
- [3]日本地盘工学会.盾构渣土再生骨料应用指南[M].东京:技报堂出版,2022.
- [4]朱龙飞,徐云飞,王国宇,等.建筑垃圾渣土制备流态固化土及其性能研究[J].市政技术,2023,41(5):246-250+255.
- [5]李悦,齐帆,林辉.硫铝酸盐水泥基预拌流态固化土固化剂性能的研究[J].新型建筑材料,2023,50(3):45-49.
- [6]郑中刚,杨骏,牛本亮,等.地铁隧道流态固化土同步注浆施工工艺[J].工程技术,2025,(2-3):120-125.
- [7]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T25181-2019预拌砂浆[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [8]广东省住房和城乡建设厅.DBJ/T15-198-2021流态固化土应用技术规程[S].广州:广东科技出版社,2021.
- [9]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T50123-2019土工试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [10]中华人民共和国住房和城乡建设部.GB36600-2018土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准[S].北京:中国环境科学出版社,2018.
- [11]王梦恕.中国盾构隧道技术与展望[J].隧道建设(中英文),2018,38(1):1-8.
- [12]刘建航.盾构隧道注浆材料优化与工程应用[M].北京:人民交通出版社,2020.
- [13]Tanaka T, Suzuki Y. Performance of Foam Mortar for Shield Tunnel Grouting in High Water Pressure Strata[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 87: 145-153.
- [14]王复明,刘小明.地下工程防水技术现状与发展趋势[J].土木工程学报,2021,54(10):1-12.
- [15]樊珠芳.同步注浆技术在盾构隧道中的应用[J].建筑机械,2011,(8):89-92.

作者简介:

杨骏(1963—),男,汉族,广西桂林人,硕士研究生,正高级工程师,研究方向:工程渣土资源化。