

基于泥水平衡的盾构渣土资源化利用工艺优化研究

王军艳

(中路交科检测技术有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 泥水平衡盾构由于其独特的平衡水土压力的能力而已成为过江隧道或海底隧道施工方式的首选,但在盾构掘进过程中会产生大量需要处理的渣土。为推动盾构渣土资源化利用,根据盾构渣土的组成和分类,确定了将其用于注浆材料、路基填筑材料、免烧砖等利用方式的控制指标,并对泥沙分离工艺进行优化,提出了注浆材料制备流程、优化的渣土固化改良工艺流程和免烧砖生产工艺流程。

关键词: 泥水平衡; 盾构渣土; 工艺优化; 资源化利用

中图分类号: U455

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0342-05

Study on Process Optimization of Resource Utilization of Shield Muck Based on Slurry Balance

WANG Junyan

(Zhonglu Jiaoke Testing Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The slurry balance shield has become the first construction method of cross-river tunnel or subsea tunnel because of its unique ability to balance soil pressure, but a large amount of muck during shield tunneling will be generated for treatment. In order to promote the resource utilization of shield muck, based on the composition and classification of muck, the control indicators for its application in grouting materials, roadbed filling materials, non-fired bricks, etc. are determined. And the muck separation process is optimized. The preparation process of grouting materials, the optimized process flow of muck solidification improvement and the production process flow of non-fired bricks are proposed.

Keywords: slurry balance; shield muck; process optimization; resource utilization

0 引言

隧道施工中盾构法由于具有众多优点,已逐渐成为城市环境下交通隧道的主流施工方法。在过江隧道或海底隧道等需要穿越水域的工程中,泥水平衡盾构由于其独特的平衡水土压力的能力,往往成为首选。但是,在泥水平衡盾构掘进过程中会形成大量废弃泥浆,需通过排浆泵和输送管道将废浆输送至地面进行处理^[1]。目前,对于盾构废弃泥浆和渣土的处理还存在诸多问题,例如运输过程的无污染要求,大面积场地需求,控制泡沫剂对环境造成的污染,以及固结后难以分离等,导致很多工程采取堆积永久化的方式,对堆积的渣土无后续处理,从而对国土、环境资源造成直接伤害或浪费,突出反映了建设与发展的矛盾冲突。

因此,有必要开展基于泥水平衡的盾构渣土资源化利用工艺优化研究,探索隧道渣土资源化利用的场景,结合盾构渣土组成和分类,明确隧道渣土资源化利用的方法。不仅要防止废弃渣土和泥浆直接排入外界造成的环境污染,同时还要提高渣土和泥浆的重复利用率,积极响应国家“绿水青山”建设的号召,进一步提高中国隧道与地下工程的绿色建造水平。

1 盾构渣土资源化利用发展及现状调研

盾构渣土的有效利用,不仅能够减少对环境的影响程度,同时能够降低固体废弃物的处置成本,提升整体项目的经济效益。通过总结多个项目不同地层的盾构渣土特性,调研多种渣土资源化的技术手段,并通过适应性分析,最终得到的能够使盾构渣土进行最优化利用的技术手段主要包括以下方式。

(1) 用作盾构壁后(同步)注浆材料。经分拣和筛分后,其中粒径小于5 mm的盾构渣土可用作同步注浆原料。

收稿日期: 2024-11-29

作者简介: 王军艳(1990—),女,硕士,工程师,从事交通工程及环境管理工作。

(2)用作路基填筑材料。盾构渣土经预处理后,准确控制材料粒径,以压实度和无侧限抗压强度或者填料最小强度(CBR 值)为设计指标。采用高效固化剂稳定渣土,以满足不同等级道路路基对填料强度的要求。

(3)用作免烧砖材料。免烧砖由于强度高、耐久性好、具有标准尺寸且完整外表等特性,已成为城市建筑泥浆、河道淤泥及泥水平衡盾构废弃泥浆资源化利用的重要方式之一。

综上所述,盾构渣土的资源化利用已取得了一定的成果。然而,在盾构渣土的资源化利用上并未形成系统的工艺技术标准。因此需要通过对盾构渣土的资源化利用工艺进行优化,形成盾构渣土资源化利用的工艺技术体系,以此来促进盾构渣土资源化利用工作的开展^[2]。

2 盾构渣土资源化利用控制指标研究

对盾构渣土的组成和分类进行分析,并对盾构渣土利用方式进行调研后,确定盾构渣土资源化利用方式分别为壁后注浆材料、路基填筑材料、免烧砖;同时,根据相关标准,提出了相应的制作控制技术指标,以及在壁后注浆材料中用粉细砂代替砂骨料;中粗砂、砾砂等用于路基填料;脱水形成的泥块用于制作免烧砖和路基填料等建议。

2.1 盾构渣土组成与分类

泥水盾构施工过程中产生的主要废弃物有 2 种,其一为筛分后产生的粗颗粒物质,即废弃渣土;另一为不可循环的废弃泥浆。其中,废弃渣土主要由砂石土组成;废弃泥浆主要由膨润土、黏性颗粒、少量的砂和水等组成。

按照盾构隧道渣土与泥浆的来源进行分类时,可将盾构渣土分为:土压盾构渣土与泥浆、泥水盾构渣土与泥浆、地下连续墙渣土与泥浆、基坑渣土与泥

浆这 4 类。但是,由于初始地层条件和施工方法的不同,即便是同一起来源的渣土与泥浆也可能会在工程性质和后续处理利用上表现出较大的差别^[3]。因此,本文根据施工工艺、地层条件、物理力学性质,同时考虑外加剂添加的影响,将盾构渣土细化分成 6 类:砂、砾;砂砾土;硬黏土;黏土;泥渣;泥浆,分类标准如表 1 所示。

表 1 盾构渣土分类

类别	分类标准
砂、砾	主要由粗颗粒的卵石、砾石、砂构成
砂砾土	击实后锥度仪贯入指数 $q_c > 800 \text{ kPa}$, 主要由砂和砂土构成
硬黏土	击实后锥度仪贯入指数 $800 \text{ kPa} \geq q_c > 400 \text{ kPa}$, 主要由砂土、粉土和部分黏土构成
黏土	击实后锥度仪贯入指数 $400 \text{ kPa} \geq q_c > 200 \text{ kPa}$, 为含水率 40%~80% 的黏性土
泥渣	击实后锥度仪贯入指数 $q_c \leq 200 \text{ kPa}$ 的泥状土,以黏土、粉土颗粒为主 含水率 $> 80\%$; 含水率太高、无法击实的泥状土属于此类
泥浆	呈液体流动状,难以沉淀分离,流动度大于 300 mm,含水率大于 3 倍液限

由表 1 可知,盾构隧道渣土的性质与原地层土的性质有着非常密切的联系,大部分渣土的性质基本由原地层决定;泥浆性质与施工添加材料以及渗入的地下水有很大的联系。

2.2 盾构渣土资源化利用方式

针对多类盾构渣土处置方式,将盾构渣土用作填料、充填注浆材料,从而实现盾构渣土的直接利用。在盾构渣土间接利用方法中,多以通过干燥、筛分、脱水、粉碎、固化等处置方式来实现盾构渣土利用的多个场景,如路基填筑、免烧砖、陶粒等。通过归纳总结目前盾构渣土资源化处理和综合化利用的模式及其特点,最后提出了具有参考性和可行性的盾构渣土资源化处理和综合化利用处置方式优化方案^[4]。

盾构渣土分类再利用方式如表 2 所示。

表 2 盾构渣土分类再利用方式

渣土类别	性状描述	再利用方式			
		再生骨料	路基填料	回填材料	土壤复垦
1	粒径级配分布窄,存在块体、针片状颗粒和细颗粒,耐磨蚀	适用 A、B、D	适用 A、B、D	可能适用	可能适用
2	颗粒棱角明显,粒径级配分布宽,岩性组成不均匀	不适用	适用 A、B、D	适用 A	适用 A
3	性质与天然砂砾石相似,颗粒磨圆度高,渗透性良好	不适用	可能适用 A、B、D	适用 A、E	适用 A、E
4	粒径级配分布窄,多为沙粒、粉粒、黏粒	不适用	可能适用 A、B、C、E	适用 A、E	适用 A、E
5	粒径、岩性、矿物成分、稠度不均匀	不适用	可能适用 A、B、C、D、E	适用 A、E	适用 A、E
6	含水率更高,渗透性具有时变性	可能适用 A、B、D	可能适用 A、B、C、E	适用 A、E	适用 A、E
7	与类别 4 相似,通常黏度、稠度较高,具有渗透性	不适用	不适用	可能适用 A、E	可能适用 A、E

注:表中 A 代表干燥、B 代表筛分、C 代表脱水、D 代表粉碎、E 代表固化。

通过对某项目渣土组成的分析可知,盾构隧道主要穿越粉质黏土、粉砂、粉细砂、中粗砂层;结合盾构渣土的性质和对盾构渣土的利用方式调研,盾构渣土主要可以用于路基填料、壁后注浆以及免烧砖等材料。因此,为了实现资源化利用产品产量化模式,达到更好的经济效益,以壁后注浆材料、路基填筑材料以及免烧砖为资源化利用研究对象,分析不同资源化利用方式的材料控制指标,从而为探究不同资源化利用方式的优化奠定基础^[5]。

盾构渣土资源化利用方式如图1所示。

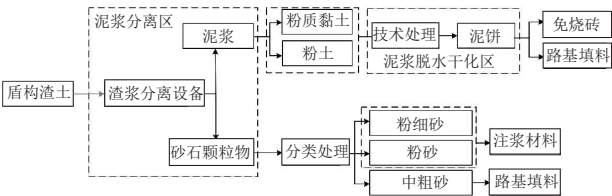


图1 盾构渣土资源化利用方式

2.2.1 壁后(同步)注浆

盾构隧道壁后注浆作为盾构隧道施工中一项关键技术,可控制由地层损失引起的地表沉降,确保管片空间上的位置固定,保证管片受力均匀。根据注浆过程中注浆材料的状态,壁后注浆施工过程大致可以分为:注浆施工前的材料准备阶段、注浆施工时的浆液注入阶段、注浆施工后的浆材凝固阶段这3个阶段。

在材料准备阶段,盾构壁后注浆常用的浆液类型有单浆液和双浆液,这两者都需要掺入砂浆。壁后注浆中的砂浆主要由水泥、粉煤灰、砂骨料、水和膨润土原材料组成。在盾构渣土中,砂土、黏土是常见组分,所以可以选择盾构砂土来替代砂浆中的砂骨料。

2.2.2 路基填料

根据《公路路基施工技术规范》(JTG F10—2006),路基分为填方路基、零填路基和挖方路基,主要包括上路床、下路床、上路堤和下路堤部位。不同填料应用部位使用的填料各不相同,其中路床填料主要使用砂砾、碎石或碎石土、砾石土或无机结合改良细粒土;路堤填筑在满足小于5 mm的细料含量不小于30%的前提下,主要使用硬质岩石、中硬岩石或软质岩石。在盾构渣土中筛选出的中粗砂、砾砂等可以直接用于路基填料;此外,盾构渣土形成的泥饼中主要为粉土、粉质黏土,通过水泥固化改良,可以替代路基填料^[6]。

2.2.3 免烧砖

免烧砖是一种不经过高温煅烧即可制成的强度

高、耐性好的墙体材料,主要原料有粉煤灰、煤渣、煤矸石、尾矿渣、化工渣或天然砂、海涂泥等(以上原料得一种或数种)等。在盾构渣土中主要为粉质黏土层、粉细砂层以及中粗砂,所以可用盾构渣土替代天然砂或海涂泥来制备免烧砖。

2.3 盾构渣土资源化利用控制指标

2.3.1 壁后(同步)注浆材料控制指标

壁后注浆材料主要由水泥、矿物掺合料(粉煤灰)、砂骨料、膨润土、消石灰、外加剂、水等组成。材料均要求符合现行国家标准和行业标准,以确保注浆质量和工程安全。应根据施工条件的不同采用不同配比的同步注浆材料。满足《盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程》(T/CECS 563—2018)中给出的性能指标范围,同时盾构渣土同步注浆材料的稠度、流动度、凝结时间、泌水率等性能指标应符合“水泥基和消石灰单液同步注浆材料的性能要求”,如表3所示。

表3 水泥基和消石灰单液同步注浆材料的性能要求

指标项目	技术要求	
	水泥基	消石灰基
外观	均匀一致、无沉淀、无结块	均匀一致、无沉淀、无结块
流动度/mm	≥160且≤280	—
2 h流动度损失/mm	≤40	—
稠度/mm	≥100且≤130	≥100且≤130
2 h稠度经时损失/mm	≤20	≤20
泌水率	≤3.5	≤3
分层度/cm	≤0.6	≤0.6
凝结时间/h	≥10且≤24	≥12且≤72
结石率/%	≥96	≥96
固结收缩率/%	<4	<4
抗水分散性能试验pH值	≤9	≤10
表观密度/(kg·m ⁻³)	≥1 800	≥1 800

同步注浆材料3 d抗压强度应不小于周围土体强度,同时其28 d抗压强度应满足设计要求;水泥基同步注浆材料硬化浆体的性能应符合“硬化水泥基单液同步注浆材料的性能要求”,如表4所示。

2.3.2 路基填料控制指标

盾构渣土经处理后用于路基填筑工程是盾构渣

表4 硬化水泥基单液同步注浆材料的性能要求

指标项目	技术要求	
	3 d	28 d
抗压强度/MPa	≥0.5	≥2.5
水陆强度比/%	≥65	≥65
结石率/%	≥95	≥95

土资源化利用的重要途径之一。经改善处理的盾构渣土用于路基工程的主要要求应满足我国现行《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)和《公路路基施工技术规范》(JTG F10—2006)的相关规定。

路基填料最小承载比、最大粒径及土质路基压实度应符合《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中的明确要求。首先,路基填料应满足路基强度和回弹模量的要求;其次,路基应以路床顶面回弹模量为设计指标,以路床顶面竖向压应变为验算指标,应控制路基工后沉降量;最后,当路基湿度状态、路基填料 CBR 值、路床回弹模量和竖向压应变不能满足要求时,结合多个条件比选后对路床采取如下处理措施:采用粗粒土或低剂量无机料稳定土换填,并合理确定换填深度;对细粒土采用砂、碎砾石掺拌处置,或采用无机料稳定处置等。其相关技术要求应符合“固化渣土混合料作为路基填料的性能要求”,如表 5 所示。

表 5 固化渣土混合料作为路基填料的性能要求

指标项目	路床顶面以下深度/m	最大粒径/mm	填料最小强度(CBR)/%		
			快速路、主干路	次干路	支路
填方路基	上路床(0~0.3)	100	8	6	5
	下路床(0.3~0.8)	100	5	4	3
	上路堤(0.8~1.5)	150	4	3	3
	下路堤(>1.5)	150	3	2	2
零填及挖方路基	上路床(0~0.3)	100	8	6	5
	下路床(0.3~0.8)	100	5	4	3

由表 5 可知,当盾构渣土填料的细骨料 CBR 值为 2%~3% 时,只可用于填方路基的下路堤;CBR 值为 3%~4% 时,可用于其他等级公路的路基填筑;高等级公路、一级公路要求 CBR 值在 4% 以上^[7]。

2.3.3 免烧砖控制指标

免烧砖是以粉煤灰、煤渣、尾矿渣、化工渣或天然砂中的一种或多种原料制作而成的新型墙体材料。由于该材料强度高、耐久性好、具有标准尺寸且完整外表等特性,因此可以成为一种替代黏土砖且发展前景良好的换代更新产品。目前免烧砖已成为城市建筑泥浆、河道淤泥和泥水平衡盾构废弃泥浆资源化利用的重要方式之一。根据《工程渣土免烧制品》(JGT 575—2020),利用渣土制作免烧砖的主要材料包括水泥、水、渣土、土壤固化剂。其中不同材料的要求均应符合现行国家标准和行业标准,以确保免烧砖的质量和工程安全。根据《非烧结垃圾尾矿砖》(JCT 422—2007)和《工程渣土免烧制品》,

免烧砖抗压强度分为 MU5、MU10、MU15 和 MU20 这 4 个等级^[8]。

免烧砖的表面质量、尺寸偏差、力学和物理性能的相关控制指标见表 6。

表 6 免烧砖性能控制指标

项目	要求	
	免烧砌墙砖	免烧路面砖
抗压强度/MPa	平均值	≥5.0
	最小值	≥3.0
	平均值	≥10.0
	最小值	≥6.0
	平均值	≥15.0
	最小值	≥10.0
	平均值	≥20.0
	最小值	≥14.0
软化系数	≥0.8	≥0.8
干燥收缩值/(mm·m ⁻¹)	0.5	—
抗冻性	抗压强度损失率 ≤30%,外观无明显变化	抗压强度损失率 ≤30%,外观无明显变化
体积密度/(kg·m ⁻³)	≥1 800	≥1 800
吸水率/%	≤15	≤15
泛霜	符合 GB/T 2542—2012 中轻微泛霜要求	符合 GB/T 2542—2012 中轻微泛霜要求
耐磨性/mm	—	≤39
防滑性 BPN	—	≥60

3 盾构渣土资源化利用工艺优化研究

基于对盾构渣土组成和分类、利用方式及控制标准的研究,结合现用的资源化利用方式,提出盾构渣土处理工艺,并对泥沙分离工艺进行优化,提出注浆材料制备流程;同时,优化渣土固化改良工艺流程,完善渣土施工工艺;此外,针对免烧砖,结合免烧砖机理,设计其生产工艺流程,从而形成盾构渣土资源化利用的工艺优化流程^[9]。

3.1 泥水分离工艺优化研究

根据渣土资源化利用方式,对泥沙分离工艺进行优化。首先设计了振动筛分模块,该模块主要用于分离渣土中 2 mm 以上的粗骨料和 2 mm 以下的细骨料及细颗粒。其次是洗砂模块,它由叶轮洗砂机、水力旋流器和脱水筛组成,主要功能是将 0.075~2 mm 的细骨料和 0.075 mm 以下的粉、黏粒分离。该模块采用预筛分、一级至三级旋流分离,可实现盾构渣土中砂砾、中粗砂、粉细砂、泥饼的良好分离。

洗砂模块的主要工作原理如下:

(1)预筛分器单元:把石块、泥团及 2 mm 以上的

颗粒(砾砂)分离出来,泥浆进入旋流分离单元。

(2)一级除砂处理单元:通过渣浆泵和大旋流的配合,把0.25 mm以上的颗粒(中粗砂)分离出来,分离后的泥浆进入下一级旋流单元。

(3)二级除砂处理单元:通过渣浆泵和大旋流的配合,把泥浆中0.075 mm以上的颗粒(粉细砂)分离出来,分离后的泥浆进入下一级旋流单元。

(4)三级除泥处理单元:通过渣浆泵和大旋流的配合,把泥浆中0.02 mm以上的颗粒分离出来,分离后的泥浆进入调浆系统。

(5)脱水振动筛单元:通过高效能的振动方式把旋流渣料脱水,保证渣料较低的含水率。

为了提供稳定的底流浓度,可以考虑采用旋流器的鱼尾装置,从而使泥浆中的固体颗粒进入溢流中的机会大大降低,保证泥浆的分离精度。

3.2 渣土固化改良工艺优化研究

利用盾构渣土填筑路基工程的施工工艺和技术要求应符合现行《公路路基设计规范》、《公路路基施工技术规范》的相关规定。除此之外,在满足基本要求的前提下,还需注意该工程前期准备工作和施工流程。

3.2.1 施工前的准备工作

路基工程施工单位应按照《公路路基施工技术规范》第3章的要求,满足一般规定,以及施工前测量放样、路基填筑材料试验、填筑前地表处理和填前碾压、试验段验证总结的规定。

盾构开挖施工单位应做好盾构渣土的预处理:盾构渣土中细料部分(含泥浆细粒土)不宜用于路基填筑,需与盾构渣土分离,并严格做到分开堆放,以利于对盾构渣土有效成分的利用;盾构渣土中粗料部分(细砂以上颗粒部分)可用于路基填筑,需注意防雨防冻,尽可能控制含水量,使其不超过20%,避免给后续降水疏干造成过大压力。经过预处理的盾构渣土可作为路基填方基本料源。

3.2.2 盾构渣土填筑路基工程处理方法及工艺流程

处理工艺流程为:盾构渣土出渣并分类堆放—盾构渣土运输(处理场或路基填筑现场)—盾构渣土晾晒或掺加粒料等疏干材料(处理场地或填筑现场)—盾构渣土掺加改善材料(处理场地或无机料拌合厂)—拌合(处理场地或无机料拌合厂,单纯掺混粒料时现场拌合)—分层铺筑整形—压实—检查验收。

改善盾构渣土填筑路基前需增加疏干(晾晒、掺加疏干材料或组合方式)和掺加混拌改善材料这2个环节。建议采取场外作业方式,实施中配备简易

拌合设备或无机料拌合机,其他工序与常规做法无区别。

3.3 免烧砖生产工艺优化研究

3.3.1 原材料处理流程

原材料处理工艺主要分为烘干、轮碾、筛分3个流程。首先将工程渣土初步风干后放入旋转烘干机,将渣土含水率降至1%以下;然后用轮碾机碾磨烘干渣土,过筛后得到粒径2 mm以下的渣料;备用。

3.3.2 免烧砖生产工艺流程

第1阶段为渣土的处理,包括渣土的初步除杂、烘干、筛分和破碎。

第2阶段为渣土的分析评估。在筛分流程中,粒径为5 mm以下的渣料须经过颗粒级配、粒径分布、含泥量等因素的分析,评估渣料是否合格,合格渣料可直接用于渣土免烧砖的制备,不合格渣料须作进一步处理;粒径为5 mm以上的粗骨料经过破碎、筛分处理后得到0.15~4.75 mm的细骨料,可用于调整不合格渣料的粒径分布和含泥量。

不合格渣料的进一步处理方式:先利用干筛法进一步降低渣料含泥量,调整其粒径分布;若此时渣料仍不合格,则须继续进行处理,即掺入一定比例的0.15~4.75 mm粒径的细骨料来调整渣料粒径分布,降低其含泥量。不经过继续处理就能达到合格要求的渣料可在烘干过程中采用不完全烘干的方式,只需将渣土烘干至保证渣土搅拌时分散性良好的最大含水率,以便进一步降低渣土烘干能耗,减少后续加入的用水量。

第3阶段是基于抗压强度理论计算公式的材料配合比确定,以及渣土免烧砖的制备。

据文献和市场调研可知,生产免烧砖的工艺流程有很多,并没有固定的生产工艺模式,随着生产条件、生产环境、生产原料及胶凝材料品种、生产设备等各方面因素的不同,会有不同的生产工艺模式。主要有完全工艺模式、不完全工艺模式、简单工艺模式、无轮碾工艺模式以及直接工艺模式等。图2所示为适用于免烧砖的直接工艺模式。

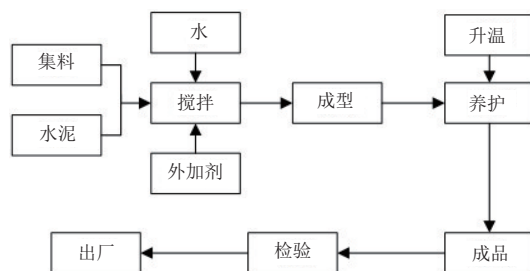


图2 适用于免烧砖的直接工艺模式图

(下转第356)