

基于填仓法开仓的泥水盾构泥浆流态固化试验研究

瞿建勋

(上海隧道工程有限公司, 上海市 200032)

摘要: 针对目前破碎透水地层泥水盾构填仓法开仓工艺中存在的工期长、成本高等不足,探索利用盾构仓内多相流泥浆掺入固化剂制备流态固化材料技术可行性。以仓内泥浆为基材,通过掺入不同配比的固化剂和高分子材料,配置不同比重的流态土,并开展流态土基本性能测试、自然流动填充模拟试验、带压流态固化模拟试验及高分子泥浆流态固化配比试验,综合评估其流动性和固结效果。试验表明:泥浆基流态固化土流动性良好,早期强度可满足填仓需求,且在自然与加压环境下均能有效填充风化岩石间隙;掺入高分子材料的泥浆可显著降低固化剂用量;利用仓内泥浆制备流态固化材料用于填仓法开仓的技术路线可行,且兼具就地取材、施工便捷和成本优势,但需进一步探究不同地质条件及地层的有机质含量对固化效果的影响。

关键词: 泥水盾构;填仓法;流态固化;泥浆;固化剂

中图分类号: U455.43

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0265-04

Experimental Study on Fluidized Solidification of Slurry from Slurry Shield Tunneling Based on Chamber-filling Method for Chamber Opening

QU Jianxun

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In view of the current shortcomings of the slurry shield chamber-filling method for opening the chamber in fractured and permeable strata, such as long construction period and high cost, the technical feasibility of preparing the fluidized curing materials by adding the curing agents into multiphase slurry from shield chambers is explored. Taking the chamber slurry as the base material, the fluidized soils with the different proportions are prepared by adding the different ratios of curing agents and polymer materials. And the fundamental performance test of fluidized soil, the natural flow-filling simulation test, the simulation test of fluidized state curing under pressure and the polymer slurry fluidized curing ratio test are carried out to comprehensively evaluate its fluidity and consolidation effects. The experimental results show that the slurry-based fluidized curing soil has the good fluidity and the early-stage strength can meet the chamber-filling requirements, which can effectively fill the weathered rock crevices under both natural and pressurized conditions. The slurry mixed with the polymer materials can significantly reduce the curing agent consumption. The technical approach of utilizing in-chamber slurry to prepare the fluidized curing materials is feasible for chamber-opening operations, which has the advantages of local material utilization, construction convenience and cost effectiveness. However, it is necessary to further study the impacts of varying geological conditions and stratum organic matter contents on curing effects.

Keywords: slurry shield; chamber-filling method; fluidized curing; slurry; curing agent

0 引言

上软下硬复合地层泥水盾构掘进施工,常面临刀具磨损、仓内滞排等棘手难题,带压开仓是解决这类问题的一种手段。而在破碎透水地层且盾构上方已形成塌落拱的情况下,往往需要洞内填仓结合地

面加固双保压才能顺利开仓。目前填仓材料主要包括水泥砂浆、低强度抗剪性砂浆以及平衡盾泥^[1-3]等,但使用这些材料存在工期长、成本高等缺点。流态固化土因其具有较好的流动性和自密性、适用于异形空间填充、抗渗性好、早期强度较高等优点^[4],也符合盾构填仓法开仓的需求。

目前在流态固化土研究领域,杜建彪等^[5]利用膨胀土弃方研制流态固化材料,探究膨胀土流态固化材料改性配比设计流程;朱军等^[6]利用盾构泥渣研制流态固化材料运用于地下防空洞回填、清障回

收稿日期: 2025-01-24

基金项目: 上海隧道工程有限公司基金(2024-SK-09)

作者简介: 瞿建勋(1986—),男,学士,高级工程师,从事地下工程施工技术研究工作。

填等工程;陈曦等^[7]利用淤泥质弃土弃方研制流态固化材料,探究不同配比下淤泥质流态材料的强度及流动性,以满足路基回填工程要求;万敏等^[8]开展流态固化材料粘结力对管道回填浮力的影响,推导理论计算公式,以满足市政管道回填工程要求;杨文轩^[9]利用地墙泥浆配置纳米氧化锌改性环氧树脂固化剂研制流态固化材料,以填充装配式地墙的侧壁间隙。可见在过往研究中,利用泥水盾构仓内多相流泥浆就地取材,经流态固化后进行填仓尚无先例。

结合实际工况,深入分析泥浆材料特性,合理选择固化剂,对其流态土基本性能展开测试,并进行填充度和固结试验,对于明确泥水盾构泥浆流态固化土填仓法的技术路线具有重要意义。不同回填材料的优缺点对比如表1所列。

表1 不同回填材料的优缺点对比		
填仓材料	优点	缺点
砂浆系	成本低、固化时间短	抗渗弱、清仓困难
衡盾泥	塑性好,抗渗保压能力强	成本高、固化时间较长
流态固化	流动性、自密性好,就地取材,施工便捷	未经实践,需试验

1 试验材料与方法

1.1 多相流泥浆

盾构仓内多相流泥浆由水、膨润土、处理剂和渣土等混合而成,其作为流态固化的原材料具有特性多变的特点,即仓内泥浆特性与盾构断面土层特性、新浆成分及推进参数密切相关^[10]。

测试仓内泥浆的性能:泥浆比重、漏斗黏度、含砂率及滤失量,并记录试验数据如表2所列,其中滤失量为反映泥水滤失造壁性能的指标,采用在规定压差下,2倍7.5 min的测定值;含砂量为不能通过200目筛网颗粒占泥浆体积的百分数,用含砂量测定仪测定。

表2 不同比重下仓内泥浆性能参数表					
类型	比重	漏斗黏度/s	滤矢量/ml	含砂率/%	含水率(水/总量)/%
仓内泥浆	1.13	34	11	0.50	77.00
掺入高分子材料泥浆	1.26	49	8	1.00	51.90

1.2 固化材料

流态固结机理为固化剂与水反应产生具有胶凝作用的水化产物,使泥浆中的颗粒胶凝成稳定网状结构络合物,胶凝产物与OH⁻、Ca²⁺的浓度正相关;胶凝形成的网状结构之间的孔隙由膨胀剂填充,膨胀

剂由Ca²⁺、Al³⁺、S²⁻、OH⁻组成,生成的钙矾石等膨胀性水化产物填充空隙,即流态固化土以胶凝固结、膨胀填充、碱性激发相辅相成的方式使强度大幅提高,同时具有自密实性、体积稳定性、水稳性、抗渗性好等优点。固化材料选择普通硅酸盐水泥、S95矿粉及生石灰,其组成如表3所列。

表3 固化剂组成					
成分	水泥	矿粉	硫酸钠	膨胀剂	磺酸盐减水剂
含量/%	40	50	4	3	3

1.3 试验方案

(1)试验流程

- a. 选取泥水仓内比重1.13的泥浆配置不同比重流态土并进行相关性能测试;
- b. 进行自然状态下的流动填充模拟试验,测试所配置流态土填充风化岩石流动性和固结效果;
- c. 进行带压流态固化模拟试验,模拟地下带压环境流态土固结效果;
- d. 使用掺入高分子材料比重为1.26的泥浆配置流态土,模拟测试填仓置换后泥浆流态固化的相关性性能。

(2)试验方法

- a. 流态土基本性能测试方法:在取样泥浆中掺入固化剂拌制流态固化土,详细配比如表4所列,获得容重为1.3、1.4、1.5 g/cm³的流态土,并开展相关性性能测试,包括测试坍落扩展度、凝结时间和抗压强度;根据流态土流动性和泵送的要求,调整其流动性。

表4 不同配比流态土组成					
比重	搅拌时间/min	泥浆/kg	泥浆比重	固化剂/kg	固化剂掺量/%
1.31	14.6	15	1.13	5.55	37
1.40	16.6	13	1.13	7.93	61
1.50	17.4	15	1.13	12.75	85

- b. 自然流动填充模拟试验:准备三个相同容量的开口透明容器,将干燥的风化岩放置在容器中,分别倒入不同容重的流态土,观察流态土的流动情况及记录填充满岩石缝隙所需要的时间。
- c. 带压流态固化模拟试验:准备三个相同容量的密封桶,装入含泥水的风化岩石,通过压力将不同容重流态土分别注入到三个桶中,并将密封桶移至压力舱;观察填充情况并记录注满空隙所需要的时间,待流态土达到凝结时间后,观察桶内风化岩石的固结情况。

d. 高分子泥浆流态固化配比试验: 掺入高分子泥浆作为基浆, 测试不同参量流态土的基本性能。用砂浆凝结时间测定仪测试流态土 2~5 d 的贯入值, 并记录试验数据; 测试流态土 7 d 和 28 d 抗压强度, 将流态土装入边长为 70.7 mm 的立方体三联模具中, 养护至相应龄期进行抗压试验, 并记录相应数据。

2 试验结果

2.1 流态土基本性能测试

采用仓内比重 1.13 泥浆配置三种配合比的流态土, 其塌落度扩展度、贯入强度、抗压强度以及凝结时间如图 1 至图 5 和表 5。

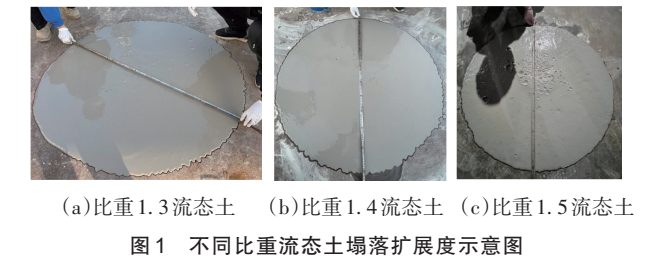


图 1 不同比重流态土塌落扩展度示意图

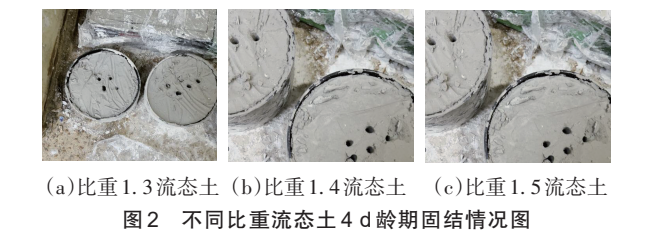


图 2 不同比重流态土 4 d 龄期固结情况图

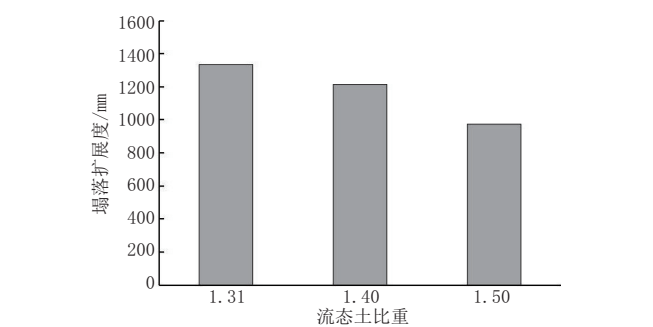


图 3 不同比重流态土塌落扩展度柱状图

三种配比流态土的流动性良好, 满足泵送要求。1.3 容重流态土凝结时间为 3~5 d; 1.4 容重和 1.5 容重的流态土凝结 7 d 后的抗压强度分别为 0.85 MPa 和 1.63 MPa, 可满足填仓法需求。

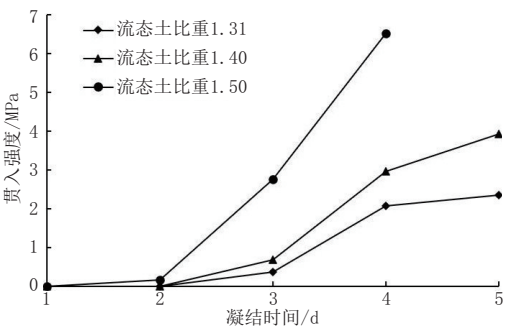


图 4 不同比重流态土贯入强度折线图

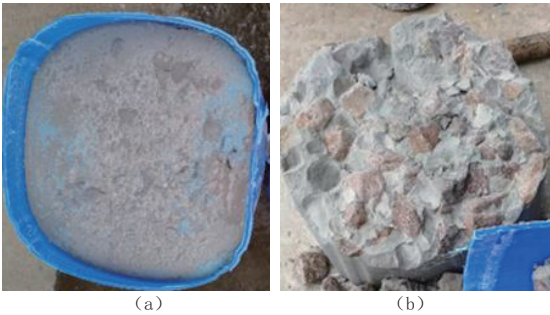


图 5 流态土风化岩石中的固结结果示意图

2.2 自然流动填充模拟试验

每组选用相同重量、不同粒径的风化碎石混合, 具体风化碎石配比如表 6 所列。

将配制好的三种容重的流态土依次倒入至透明容器的相同刻度。观察三种流态土在风化岩石中的填充情况, 容重 1.3 的流态土填充效果最佳, 原因为较低比重的流态土流动性能大于较高比重的流态土, 能够较好填充风化岩石的间隙。

2.3 带压流态固化模拟试验

每组选用相同重量的、粒径在 1~2 cm 和 2~4 cm 的风化岩石混合, 质量为 21 kg, 分别装入三个密封桶中。随后均匀倒入三种容重的流态土, 每组倒入的流态土用量约为 11.5 kg。向密封桶中施加 0.3 MPa 的压力, 每组持续加压 10 min, 使流态土在风化岩石中填充密实, 模拟流态土加压环境向周围土层扩散的过程。最后泄掉桶内压力, 打开桶盖, 转至压力仓内保持 0.35 MPa 的压力, 至流态土达到固结, 保压时间为 4~5 d, 模拟流态土在压力环境下的固结过程, 试验结果如图 5 所示。

在持续 4 d 模拟加压后, 1.3、1.4 和 1.5 流态土的

表 5 流态土塌落度扩展度、贯入强度、抗压强度表

流态土比重	塌落扩展度/mm	贯入强度/MPa					7 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度/MPa
		1 d	2 d	3 d	4 d	5 d		
1.31	14.6	0	0	0.37	2.07	2.35	0.39	1.01
1.31	1 335	0	0	0.68	2.97	3.93	0.85	1.86
1.40	1 215	0	0.17	2.75	6.53	—	1.63	3.91

注: 1.5 容重流态土凝结时间 3 d 后的贯入强度可达 2.75 MPa, 4 d 龄期试样已完全固结。

表6 风化碎石配比表

粒径/cm	6~8	3~6	1~3	<1
重量/kg	1.54	1.16	0.70	0.80

表面均有不同程度的泌水;在加压条件下,不同容重的流态土填充密实情况较为一致,从内部固结状况观察可知:风化岩石间隙越大,流态土扩散固结效果越强,其强度主要与流态土性能呈正比关系。

2.4 高分子泥浆流态固化配比试验

使用掺入高分子材料的泥浆作为基浆,测试不同固化剂掺量下流态土的基本性能,如表7、图6和图7所示。

表7 不同掺量下固化剂性能测试结果

液态土 容重/kg·m ⁻³	固化剂 掺量/%	扩展度/mm			凝结 时间/d	抗压强度/ MPa	
		初始	4 h	24 h		7 d	28 d
1 300	6.70	820	760	370	3	0.11	0.13
1 330	11.00	580	610	320	2	0.35	0.54
1 400	21.00	410	370	280	2	0.63	1.61

注:本配比试验基浆为掺入高分子材料泥浆,比重为1.26。

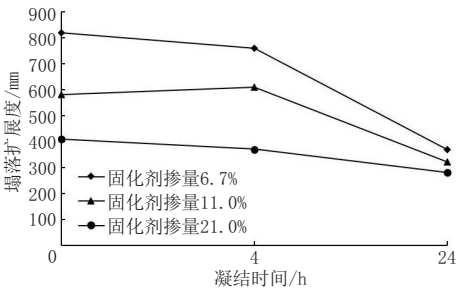


图6 不同固化剂掺量下流态土塌落扩展度折线图

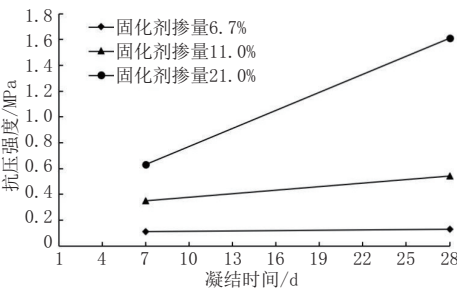


图7 不同固化剂掺量下流态土抗压强度折线图

经试验,所有掺量的凝结时间均在3 d以内,凝结较快,流动性相对较差,固化剂掺量21%的流态土凝结7 d后的抗压强度为0.63 MPa,较适合用于填仓

法施工。

3 结 语

经试验,选用泥水仓泥浆(基浆比重1.13)配置流态固化土得到的流动性较好,早期强度可满足填仓法需求,且在自然与加压环境均能良好填充碎石区域,固结效果较好,固化剂掺量与流态土流动性、早期强度成正比关系。

模拟填仓工况前置换泥浆,再加入高分子材料(基浆比重1.26),可以大幅减小固化剂掺量,流态土性能依然可以达到填仓工况需求。

因此,采用泥水盾构泥浆做基浆,配置流态固化材料运用于填仓法开仓的总体技术路线可行。

需注意的是,盾构法施工的工况复杂,多重地质组合断面的占比、土工试验的物理力学性质和颗粒级配曲线,均会影响仓内泥浆特性,尤其是土层有机质含量会阻碍固化剂形成连续的网络状骨架结构。因此,该技术在具体实用中仍需进一步探究。

参考文献:

[1] 袁晏仁,徐长胜,王科伟,等.上软下硬地层盾构法分区填仓常压换刀施工[J].建筑机械化,2018,39(2):38-41.

[2] 安向阳.快凝低强度浆液填仓法盾构带压开仓换刀施工技术研究[J].现代城市轨道交通,2024(11):55-59.

[3] 张细宝,冯超博.富水砂卵石地层下盾泥带压开仓换刀技术及应用[J].广东土木与建筑,2024,31(4):104-107.

[4] 刘帅,徐玉飞,詹进生,等.国内流态固化土的研究与应用进展[J].新型建筑材料,2022,49(8):167-171.

[5] 杜建彪,罗强,蒋良淮,等.膨胀土流态固化改性试验与配合比研究[J].浙江大学学报(工学版),2024,58(10):2137-2148.

[6] 朱军,黄英豪,王硕.基于地铁工程低碳模型的资源化应用示范研究[J].河南科学,2024,42(10):1477-1487.

[7] 陈曦,竺寅威,沙玉琪,等.淤泥质土改良流态固化土强度及流动度试验研究[J].低碳世界,2024,14(1):109-111.

[8] 万敏,汪涛,陶后兴,等.流态土沟槽埋管回填材料对管道浮力的试验研究[J].中国市政工程,2022(4):64-67.

[9] 杨文轩.装配式地连墙侧壁填充流态固化土试验研究[J].广东建材,2024,40(5):113-115.

[10] 蔡博文,金大龙,李兴高,等.盾构气压开舱条件下的泥膜闭气失效理论研究[J].岩土力学,2023,44(5):1395-1404;1415.