

盾构隧道同步注浆材料性能试验与注浆效果评价研究

郑航雄

中铁隧道股份有限公司, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/ERA.2026020045

摘要 : 针对盾构隧道同步注浆材料性能与注浆效果评价问题, 通过室内试验、模型试验和现场验证, 系统研究了水泥-粉煤灰-膨润土复合浆液的物理力学性能、流动扩散机理及注浆效果。基于宾汉姆流体理论构建的浆液流动模型, 结合室内注浆模拟试验, 确定了最优注浆参数(压力0.3-0.4MPa、间隙35-45mm、速度3-4L/min)。构建了涵盖材料性能、施工过程、填充质量、结构响应四层次的综合评价体系, 现场试验段综合评价得分93.8分, 地层沉降量降低45%以上, 管片上浮量降低60%以上, 验证了优化浆液及注浆参数的优越性, 为盾构隧道同步注浆提供了技术支撑。

关键词 : 盾构隧道; 同步注浆; 浆液性能; 配合比优化

Research on Performance Testing of Synchronous Grouting Materials and Evaluation of Grouting Effects in Shield Tunnels

Zheng Hangxiong

China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : Focusing on the evaluation of the performance of synchronous grouting materials and grouting effects in shield tunnels, this study systematically investigates the physical and mechanical properties, flow and diffusion mechanisms, and grouting effects of a cement-fly ash-bentonite composite slurry through laboratory tests, model tests, and field validation. Based on the Bingham fluid theory, a slurry flow model was constructed, and combined with laboratory grouting simulation tests, the optimal grouting parameters were determined (pressure: 0.3-0.4 MPa, gap: 35-45 mm, flow rate: 3-4 L/min). A comprehensive evaluation system covering four levels—material performance, construction process, filling quality, and structural response—was established. The field test section achieved a comprehensive evaluation score of 93.8 points, with a reduction in ground settlement of over 45% and a reduction in segment uplift of over 60%, validating the superiority of the optimized slurry and grouting parameters. This provides technical support for synchronous grouting in shield tunnels.

Keywords : shield tunnel; synchronous grouting; slurry performance; mix proportion optimization

引言

盾构隧道施工中, 同步注浆是填充管片与地层间空隙、控制地表沉降、保障隧道稳定的关键技术。传统浆液常面临泌水率高、凝结时间长、早期强度低等问题, 影响注浆效果。本文通过室内试验优化浆液配合比, 揭示浆液流动扩散机理, 建立综合评价体系, 并通过现场试验验证, 以提升同步注浆施工质量和效率。

一、同步注浆材料物理力学性能试验研究

(一) 新拌浆液的工作性能试验

为了减小地铁盾构隧道在强震作用下的损失程度, 一些专家学者提出在地铁盾构施工时进行同步注浆, 这种浆液要求具备良好的减震和隔震效果^[1]。新拌浆液工作性能是盾构同步注浆顺利输送、填充盾尾间隙的前提, 核心评价指标包含流动性、凝结时间、泌水性和不分层性^[2]。以水泥-粉煤灰-膨润土复合浆液为体系, 选取水胶比、粉煤灰、膨润土及外加剂掺量为试验变量,

按相关盾构注浆规程开展试验。流动性测试表明, 水胶比是影响流动性的核心因素, 其增大会提升浆液扩展度, 但易引发泌水离析; 粉煤灰掺量30%~50%可改善流动性, 超50%则延缓早期强度; 膨润土掺量5%~8%能提升保水黏聚性、抑制泌水, 掺量过高会降低流动性; 高效减水剂0.5%~1.0%、缓凝剂0.2%~0.5%可分别优化浆液流动性与凝结时长^[3]。经维卡仪测试, 缓凝剂、水胶比与凝结时间呈正相关, 粉煤灰掺量过高会延长初凝时间^[4]。量筒法泌水试验显示, 膨润土掺量 $\geq 6\%$ 、粉煤灰掺量 $\geq 40\%$ 时, 浆液泌水率可控制在2%以内。综合试验结果, 初步确定浆液组分掺量范

围,为后续力学性能试验及配合比优化奠定基础。

(二) 硬化浆液的力学性能试验

选取12组工作性能合格的配合比试样,经标准养护3d、7d、28d后测试力学性能。结果显示,强度均随养护龄期增长,28d趋于稳定;水胶比增大、膨润土掺量超8%会显著降低强度,粉煤灰合理掺量(30%~40%)可促后期强度,高效减水剂可提升强度,缓凝剂影响较小;粘结强度随龄期增大,受浆液强度和界面密实度影响,合理掺加粉煤灰、膨润土可提升粘结性能。综合确定28d抗压 $\geq 2.0\text{MPa}$ 、抗折 $\geq 0.5\text{MPa}$ 、粘结强度 $\geq 0.3\text{MPa}$ 为合格标准,筛选出6组配合比进入后续抗渗耐久试验。

(三) 浆液的抗渗与耐久性能试验

盾构隧道多穿越富水地层,硬化浆液的抗渗、耐久性能直接决定隧道长期运营安全,核心评价指标包含抗渗等级、抗冻性及硫酸盐、氯离子侵蚀抗性^[9]。选取6组力学性能合格的配合比试样开展标准试验,抗渗试验显示浆液抗渗等级与抗压强度正相关,水胶比越小、膨润土掺量越高,抗渗性能越优,膨润土掺量 $\geq 7\%$ 且水胶比 ≤ 0.9 时,28d抗渗等级可达P6及以上;抗冻试验经25次快速冻融循环,粉煤灰掺量30%~40%可提升抗冻性,质量与强度损失率均控制在10%以内,膨润土掺量过高则会降低抗冻性;抗侵蚀试验在硫酸盐、氯离子溶液分别浸泡28d、90d后,粉煤灰可显著提升浆液抗侵蚀性能,掺量 $\geq 40\%$ 时90d强度损失率 $\leq 15\%$ 。综合试验结果,筛选出3组最优配合比进入优化分析阶段。

(四) 基于性能试验的配合比优化分析

基于新拌浆液、硬化浆液及抗渗耐久性能试验,采用正交试验与综合评价法构建多目标优化模型,以流动性、凝结时间、28d抗压强度、抗渗等级为核心指标,经层次分析法确定权重(0.25、0.20、0.35、0.20),完成3组候选配合比综合评分^[9]。优化得出最优配合比,水胶比0.85,水泥、粉煤灰、膨润土、高效减水剂、缓凝剂掺量依次为30%、40%、7%、0.8%、0.3%。该配合比浆液扩展度220~240mm,初凝6~8h、终凝12~14h,泌水率 $\leq 1.5\%$;28d抗压强度2.8MPa,抗折、粘结强度分别为0.65MPa、0.42MPa,抗渗等级P8,25次冻融、90d硫酸盐侵蚀强度损失率各为8.2%、12.5%,完全满足盾构隧道同步注浆施工要求。同时掺用工业废料与廉价矿物掺合料,降低水泥用量,实现了经济性与环保性统一。

二、同步注浆浆液填充扩散机理与模型试验

(一) 浆液在盾尾间隙的流动模型分析

盾构隧道盾尾间隙为30~50mm的不规则非均匀环形空间,同步注浆浆液受多重因素作用,流动状态复杂^[7]。研究基于宾汉姆流体理论,忽略浆液重力,将盾尾间隙简化为平行平板缝隙流并构建二维流动模型,明确了浆液扩散半径与各影响参数的关联规律。结果显示,扩散半径与注浆压力、注浆时间、盾尾间隙宽度正相关,与浆液屈服应力、塑性黏度负相关,且注浆压力需高于屈服应力对应的临界值才能实现浆液有效流动填充。模型可预测

不同工况下浆液扩散范围,为现场注浆参数设计提供理论参考。

(二) 室内注浆模拟台架试验

为验证流动模型合理性、揭示浆液填充扩散规律,搭建盾构盾尾间隙注浆模拟台架(含模拟盾尾、管片、地层及注浆、监测系统,间隙30~50mm可调,注浆参数与地层相似性可控)。选取优化浆液配合比,设置3组工况(变注浆压力0.2~0.4MPa、间隙30~50mm、速度2~6L/min),每组重复3次取均值^[8]。试验表明,浆液扩散呈近似椭圆形,与理论模型规律基本一致。压力增大促进扩散但超0.4MPa易致地层隆起等问题;间隙加宽减小扩散阻力但过宽降低密实度;速度2~4L/min时扩散均匀,超6L/min易离析。同时存在压力衰减现象,降至临界压力时浆液停止扩散。结合试验修正模型(引入压力衰减及间隙不均匀系数),确定最优注浆参数,压力0.3~0.4MPa、间隙35~45mm、速度3~4L/min,为工程施工提供支撑。

三、工程现场试验与注浆效果评价

(一) 工程概况

本次现场试验依托某地铁2号线盾构区间隧道工程,区间隧道全长1200m,盾构机直径6.28m,管片外径6.0m,内径5.4m,管片厚度0.3m,环宽1.5m。工程地质条件复杂,隧道主要穿越粉质黏土、粉土和细砂地层,地层含水率18%~25%,天然孔隙比0.85~1.05,承载力基本值120~180kPa^[9]。水文地质条件为潜水,地下水位埋深2.5~4.0m,地下水对混凝土具有弱腐蚀性。该区间隧道施工过程中,前期采用传统同步注浆浆液(水泥-粉煤灰浆液),存在浆液泌水率高、凝结时间长、早期强度低、地层沉降控制效果不佳等问题,部分段落出现管片上浮、地层沉降超标(最大沉降量达35mm)和局部空洞等隐患。基于此,选取该区间K0+300~K0+500段(长200m)作为试验段,采用本次室内试验优化的同步注浆浆液配合比和注浆参数开展现场试验。

(二) 现场注浆试验方案

为验证流动模型合理性、揭示浆液填充扩散规律,搭建间隙30~50mm可调、注浆参数与地层相似性可控的盾构盾尾间隙注浆模拟台架;选取优化浆液配合比,设置注浆压力、间隙、注浆速度3组可变工况,每组重复3次取均值。试验表明浆液扩散呈近似椭圆形,与理论模型规律基本一致,各参数均存在最优作用区间,且浆液存在压力衰减现象,临界压力下停止扩散。结合试验引入压力衰减及间隙不均匀系数修正模型,确定最优注浆参数为压力0.3~0.4MPa、间隙35~45mm、速度3~4L/min,为工程施工提供支撑。

(三) 注浆效果评价体系构建与实施

针对现有注浆效果评价单一指标的局限性,构建材料性能-施工过程-填充质量-结构响应四层次综合评价体系(含12项指标)^[10]。采用层次分析法定权重、模糊综合评价法开展评价,该体系目标层为注浆效果综合评价,准则层包含材料性能(权重0.25)、施工过程(权重0.20)、填充质量(权重0.30)、结构响应(权重0.25),各准则层均含3项指标,指标层权重分

别为材料性能0.4/0.35/0.25、施工过程0.4/0.3/0.3、填充质量0.45/0.35/0.2、结构响应0.4/0.3/0.3,评价等级分为优秀(90-100分)、良好(80-89分)、合格(70-79分)、不合格(<70分)。指标量化依据现场监测、室内试验及检测数据评分,例如新拌浆液流动性180-240mm、地层沉降 ≤ 20 mm、浆液填充密实度 $\geq 95\%$ 均为优秀等级,其余等级按对应区间判定,实施过程中收集试验段指标数据,按模糊综合评价法计算得分,并邀请5名行业专家审核指标量化及权重分配,保障评价科学性。

(四) 综合效果评价

根据现场试验监测数据和检测结果,对试验段注浆效果进行综合评价。材料性能评价方面,现场制备的新拌浆液流动性平均为225mm,凝结时间平均为7.2h,泌水率平均为1.2%,硬化浆液28d抗压强度平均为2.7MPa,抗折强度平均为0.62MPa,抗渗等级平均为P8,各项指标均达到优秀标准,评价得分95分;施工过程评价方面,现场注浆压力稳定在0.3-0.4MPa,压力波动幅度 $\leq 5\%$,单环注浆量达标率98%(仅2环注浆量略低于设计值,为 4.3m^3),注浆速度均匀,波动幅度 $\leq 10\%$,施工过程各项指标均达到优秀标准,评价得分92分;填充质量评价方面,地质雷达探测结果显示试验段浆液填充密实度平均为96.5%,无空洞率100%,钻孔取芯结果显示硬化浆液与管片粘结紧密,粘结强度平均为0.4MPa,填充质量达到优秀标准,评价得分94分;结构响应评价方面,试验段地层最大沉降量为18mm,平均沉降量为12mm,均控制在规范允许范围(≤ 30 mm)内,管片最大

径向位移为8mm,环向收敛量为5mm,均满足设计要求,管片应力监测结果显示管片最大应力为12MPa,远低于管片设计强度(30MPa),结构响应稳定,评价得分93分。综合各层次评价得分,试验段注浆效果综合评价得分为93.8分,评价等级为优秀,与试验段前后非试验段(采用传统浆液)相比,地层沉降量降低45%以上,管片上浮量降低60%以上,浆液填充密实度提升10%以上,充分验证了优化后的浆液配合比和注浆参数的适用性和优越性,同时通过现场试验,进一步优化了注浆施工工艺,提出了针对性的质量控制措施,为后续整个区间隧道及同类工程同步注浆施工提供了宝贵的实践经验。

四、结束语

本文针对地铁盾构隧道同步注浆材料性能及注浆效果评价问题,开展了系统的室内试验、理论分析、模型试验及工程现场验证。通过正交试验与多目标优化分析,确定了最优同步注浆浆液配合比。构建了涵盖材料性能、施工过程、填充质量、结构响应四个层次的综合评价体系,并通过现场试验验证了其科学性与实用性。研究提出的同步注浆材料配比优化方法及注浆效果评价体系,能够有效指导盾构隧道施工,具有良好的工程应用价值。未来可进一步结合智能化监测技术,实现对注浆过程的实时动态控制,以适应更加复杂多变的地质条件。

参考文献

- [1] 李晓强,王飞龙,董明明.地铁盾构隧道水泥基同步注浆减震层材料性能研究[J].粉煤灰综合利用,2025,39(05):129-135.DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.023.
- [2] 刘刚杰.地铁盾构隧道掘进同步注浆施工技术研究[J].工程技术研究,2025,10(19):64-66.DOI:10.19537/j.cnki.2096-2789.2025.19.020.
- [3] 邓文武,黄大维.引气剂在盾构隧道注浆材料中的应用研究[J/OL].华东交通大学学报,1-13[2026-02-04].https://doi.org/10.16749/j.cnki.jecjtu.20250908.007.
- [4] 姜丰.重庆快轨越江盾构隧道同步注浆材料性能研究[D].重庆交通大学,2025.DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2025.000889.
- [5] 姚占虎,杨琴,李辉,等.盾构隧道同步双液注浆技术研究与应用[J].现代隧道技术,2025,62(02):265-273.DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2025.02.026.
- [6] 呼炜,段堃龙,司洪亮,等.重庆过江盾构隧道同步注浆材料性能重难点分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2025,43(02):105-107.DOI:10.20232/j.cnki.jms-dxxb.2025.02.008.
- [7] 苟安迪,孙天敏,郝建雷.盾构隧道同步注浆材料配比试验及现场应用研究[J].山西建筑,2025,51(04):139-143.DOI:10.13719/j.cnki.1009-6825.2025.04.030.
- [8] 资谊,薛光桥,张昊楠,等.饱和砂土地层盾构隧道同步注浆浆液填充-渗透扩散过程研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(12):2350-2361.
- [9] 申路.复合地层沉降控制盾构隧道同步注泥注浆材料研究[D].西南交通大学,2024.
- [10] 周航.超大直径盾构隧道同步注浆浆液扩散特性研究[D].西南交通大学,2024.