

DOI: 10.11779/CJGE202212009

盾构隧道壁后注浆浆液与地层适配性优选方法

叶飞¹, 夏天晗¹, 应凯臣^{1,2}, 李永健¹, 梁晓明¹, 韩兴博^{*1}

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 盾构隧道壁后注浆是盾构施工中的关键技术, 在保证围岩稳定、控制地层变形、有效抑制管片上浮等方面有着良好的效果, 注浆浆液与地层相适配是影响其效果的核心因素。通过对中国 144 个地铁隧道项目壁后注浆材料进行调研, 并引入博弈论权重的 TOPSIS 评价方法和研发一维注入装置进行室内注入试验, 得到了实际工程中圆砾地层的适配浆液配合比具体值。研究表明: 目前盾构隧道壁后注浆仍以单液浆为主, 含水地层中选用的多为双液浆或改性单液浆; 经注入试验验证, 采用 TOPSIS 评价方法提出与目标地层相适配的浆液配合比范围值是可靠的; 通过自主研发的装置进行实际注入, 得到了与目标地层相适配的浆液配合比具体值, 算例中圆砾地层浆液配合比具体值建议为水胶比为 0.9, 胶砂比为 0.7, 膨水比为 0.2, 0.3, 灰粉比为 0.4。基于提出的优选方法, 可以为不同地层浆液配合比具体值的选取提供参考。

关键词: 盾构隧道; 壁后注浆; 浆液配合比; 优选方法; 注入试验; 地层适配性

中图分类号: TU91; U231 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)12-2225-09

作者简介: 叶飞(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事隧道及地下工程方面的研究与教学工作。E-mail: xianyefei@126.com。

Optimization method for backfill grouting of shield tunnel based on stratum suitability characteristics

YE Fei¹, XIA Tian-han¹, YING Kai-chen^{1,2}, LI Yong-jian¹, LIANG Xiao-ming¹, HAN Xing-bo¹

(1. School of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The backfill grouting is the key technology in shield construction, which has good effect in controlling stratum deformation and segment up-floating. The suitability between the backfill grouting and the stratum is the core factor affecting its effect. Based on the investigation on backfill grouting materials of 144 shield tunnel projects in China, the specific value of grout ratio in round gravel stratum is obtained by the TOPSIS evaluation method and the injection tests. The research results show that the main type of grout is the single-component grout. Two-component grout or modified single-component grout are mostly used in the strata with groundwater. Confirmed by the injection tests, the range value of the grout ratio proposed by TOPSIS evaluation method is reliable. Through the injection tests, the specific value of the grout ratio is obtained. The optimum grout ratios in the round gravel stratum are 0.9 (water-binder ratio), 0.7 (binder-sand ratio), 0.2 or 0.3 (bentonite-water ratio), 0.4 (cement-fly ash ratio). The proposed optimization method may provide reference for selecting the specific grout ratios for different strata.

Key words: shield tunnel; backfill grouting; grout ratio; optimization method; grouting experiment; stratum suitability

0 引言

盾构法因其自动程度高、地层扰动小以及优越的经济指标等特点在地下基础设施建设中得到了广泛运用^[1]。截至 2022 年 1 月, 中国大陆(不含港澳台)共有 51 个城市开通运营轨道交通, 总线路 270 条, 总里程 8759 km^[2]。

盾构隧道施工过程中, 为保证围岩稳定、控制地层变形、增强地层抗渗能力、有效抑制管片上浮, 采

用壁后注浆对盾尾间隙进行填充是现阶段工程中常用手段^[3]。

现阶段盾构隧道壁后注浆的研究主要从 3 个方面开展: ①研究浆液自身性质, 包括已有浆液材料配合比优化^[4-7]、新型材料开发等^[8-11]; ②研究浆液注入地层

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878060); 国家自然科学基金项目(52108360); 中国博士后科学基金项目(2020M683398)

收稿日期: 2021-10-29

*通信作者(E-mail: xingbo.han@chd.edu.cn)

表1 盾构隧道同步注浆材料施工参数调研(部分)

Table 1 Investigation on construction parameters of back-filled grouting materials (part)

城市	地层情况	浆液配合比情况(组分比值)
北京	黏土、砂性土、砂砾石	生石灰:粉煤灰:细砂:膨润土:水=1:1.25:1.5:1.75:2
上海	淤泥质黏土地层	石灰:粉煤灰:膨润土:砂:水:外加剂=1:4:0.5:8:3.4:0.03
广州	砂土	水泥:粉煤灰:黏土:生石灰:硫酸钠:水=1:2.56:0.30:4.90:2.32
南京	粉质黏土、中砂、粗砂和砂卵石	水泥:粉煤灰:膨润土:砂:水:外加剂=1:4:1:25:8.4:0.076
沈阳	圆砾、砾砂	水泥:粉煤灰:膨润土:砂:水=1:2.94:0.35:4.71:2.47
	黏土层	熟石灰:粉煤灰:膨润土:砂:水=1~2.17:2~3.175:0.42~0.5:6.49:3.83~3.92
大连	中风化碎裂岩和微风化辉绿岩	水泥:粉煤灰:膨润土:砂:水=1~1.75:3.0125~4.7625:0.625~0.75:8.875~11.675:5.75~5.875
哈尔滨	中砂层	水泥:粉煤灰:水=1:8:5
太原	粉质黏土、粉土、粉细砂、粗砂、砂砾	水泥:粉煤灰:膨润土:砂:水=1:1.93:0.38:7.54:2.31
苏州	粉质黏土层	消石灰:粉煤灰:膨润土:砂:水:减水剂=1:6.67:1.17:13.33:8.33:0.017
杭州	粉土粉砂质地层	水泥:膨润土:粉煤灰:细砂:水=1:2:10.8:24.8:17.6
宁波	软土	水泥:粉煤灰:膨润土:砂:水=1:5.84:0.55:7.91:8.76
郑州	砂层	水泥:粉煤灰:膨润土:砂:水=1:8:1.6:17.8:7.6
南昌	中风化泥质粉砂岩	水泥浆:水玻璃=1:1

状态,包括浆液扩散机理^[12-16]、注浆效果评估等^[17-20];③研究浆液、管片以及地层之间的相互作用,包括注浆参数控制对管片结构及地表沉降的影响等^[21-24]。

现阶段关于盾构隧道壁后注浆的研究主要存在两方面的局限性:①研究的浆液与地层适配性及工程指导性仍需加强;②在研究中较少考虑到因盾尾脱空过程导致周边土体的结构改变。

本研究通过对实际工程中的壁后注浆材料开展调研,根据地层渗透系数进行分类得出常见地层下浆液配合比范围;同时进行浆液基本性能测试,根据回归分析得出浆液性能指标与配合比之间的回归关系;基于调研数据及回归关系,采用 TOPSIS 评价方法提出优化算法并计算得出与目标地层相适配的浆液配合比范围值;最后,通过自主研发的盾构隧道一维注浆模型试验系统开展注入试验,分析各组浆液在目标地层下的扩散规律及注浆效果,对优化算法进行了验证并得出了与目标地层相适配的浆液配合比具体值,以期不同工程上浆液选取适宜的配合比提供方法参考。

1 盾构隧道壁后注浆材料调研

1.1 注浆材料及配合比调研

现有国家规范及行业标准提出的盾构隧道注浆材料配合比多为范围参数,但根据工程实际地质条件和施工环境,壁后注浆材料的技术指标应有所区分,合

理选择注浆材料、明确其配合比,并指向性地注入是施工时应着重考量的关键因素。

针对中国大陆(不含港澳台)144个地铁隧道项目壁后注浆材料展开调研,调研涵盖中国24个省份及直辖市,其中地层信息和注浆参数匹配完整的数目共114项,部分调研结果见表1。

1.2 常见地层分类及浆液选用情况

在盾构施工中,地层渗透系数作为盾构选型、施工参数、浆液扩散效果的影响指标,依据渗透系数对调研地层进行分类,主要分为4类:①渗透系数 $<6.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,主要包括黏土、粉质黏土、粉土地层;②渗透系数为 $6.0 \times 10^{-4} \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,主要包括粉、细砂地层;③渗透系数为 $6.0 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,主要包括中、粗砂地层;④渗透系数为 $6.0 \times 10^{-2} \sim 1.8 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$,主要包括砾石地层。同时将地层渗透系数与岩土体渗透等级进行匹配^[25],详见表2。

表2 常见地层及其渗透系数

地层	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	渗透性等级
黏土、粉质黏土、粉土地层	$<6.0 \times 10^{-4}$	弱透水及以上
粉、细砂地层	$6.0 \times 10^{-4} \sim 6.0 \times 10^{-3}$	中等透水
中、粗砂地层	$6.0 \times 10^{-3} \sim 6.0 \times 10^{-2}$	
砾石地层	$6.0 \times 10^{-2} \sim 1.8 \times 10^{-1}$	强透水

调研显示, 目前盾构隧道施工采用的浆液主要为单液浆和双液浆, 相比于双液浆, 单液浆的适用范围受地层条件影响较小, 且二者主要区别在于凝结时间长短。因单液浆成本相比双液浆较低, 且施工简便, 堵塞注浆管的风险小, 在同一地层类型下单液浆和双液浆使用比例约为 3 : 1。从含水地层浆液使用情况来看, 地层中水量较大则对浆液抗水分散性、凝结时间提出更高要求, 选用双液浆或改性单液浆更为适宜 (图 1)。

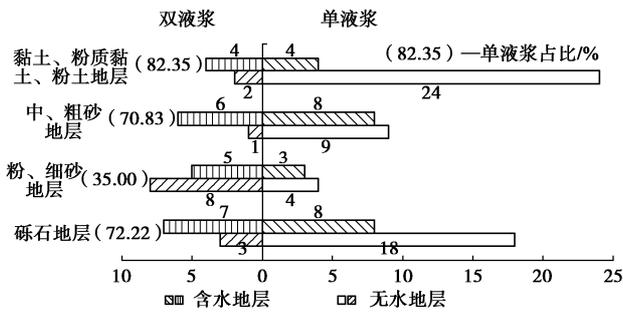


图 1 浆液调研统计 (依地层分类)

Fig. 1 Statistics of grout investigation (classification by stratum)

1.3 单液浆配合比选用分析

调研发现, 在考虑与地层相适配时, 对浆液性能的要求有所不同。浆液性能差异是由浆液材料及其配合比所决定, 因此依照地层分类, 对调研结果中的硬性单液浆进行配合比分析, 具体结果见表 3。

表 3 常见地层浆液配合比参考范围

Table 3 Reference ranges of grout mixing ratio of common strata

地层	水胶比	胶砂比	膨水比	灰粉比
黏土, 粉质黏土, 粉土地层	0.31~1.28	0.29~0.92	0.11~0.70	0.11~0.62
粉、细砂地层	0.60~1.68	0.41~0.88	0.11~0.40	0.17~0.40
中、粗砂地层	0.56~0.96	0.39~0.82	0.13~0.36	0.49~0.81
砾石地层	0.45~1.51	0.22~1.30	0.07~0.30	0.18~0.83

整体而言, 目前常见地层普遍采用的浆液水胶比 (水/(水泥+粉煤灰)) 范围为 0.31~1.51, 胶砂比 ((水泥+粉煤灰)/砂骨料) 范围为 0.22~1.30, 膨水比 (膨润土/水) 范围为 0.07~0.70, 灰粉比 (水泥/粉煤灰) 范围为 0.11~0.83。在含水地层中选用的单液浆多为改性浆液, 其掺有改善浆液部分性能的外加剂。

因地下工程的复杂多样性, 上述各类地层采用的浆液配合比范围值存在一定误差, 但均经过工程应用并证明了各配比下浆液的可靠性, 上述浆液配比范围值可作为经验供行业人员参考。

2 浆液配合比范围值优化算法

2.1 浆液性能测试及回归

壁后注浆浆液需要满足充填性、流动性、早期强

度、抗分散性、固结体体积收缩率等性能要求, 同时配合比方案应便于调整, 浆液选用无公害材料、成本经济等。为确定浆液基本性能与浆液配合比之间的关系, 进行浆液性能基本测试。

本试验涉及水胶比、胶砂比、膨水比及灰粉比多种因素, 通过正交试验得出各配合比下浆液性能, 从调查中得到的浆液配合比经摘除部分单一样本所反映的极端配合比值后, 其上限和下限分别被视为最高和最低的因子水平, 并采用均分法确定中间因子水平。试验各因子及水平情况见表 4。

表 4 各因子及水平列表

Table 4 List of factors and levels

水平	因子			
	水胶比 A	胶砂比 B	膨水比 C	灰粉比 D
I	0.6	0.45	0.1	0.2
II	0.8	0.65	0.2	0.4
III	1.0	0.85	0.3	0.6
IV	1.2	1.05	0.4	0.8
V	1.4	1.25	0.5	1.0

本试验选用普通硅酸盐 P.O 42.5 级水泥、钠基膨润土, 振筛机选取粒径小于 0.5 mm 的砂粒及常规粉煤灰, 实验室温度控制在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度大于 50%。根据《建筑砂浆基本性能测试方法标准》JGJ/T 70—2009^[26]、《盾构法隧道同步注浆材料》DB42/T 1218—2016^[27]中的规定对浆液密度、泌水率、结石率、稠度、凝结时间及抗压强度进行测定, 测试过程见图 2。

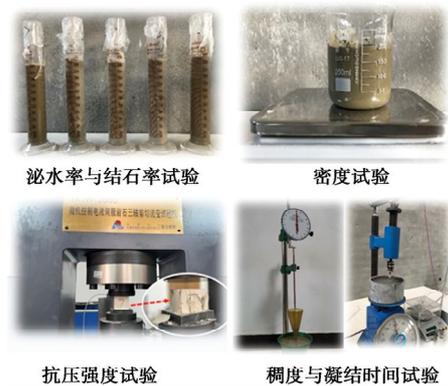


图 2 浆液基本性能测试

Fig. 2 Basic performance tests on grout

根据浆液性能测试结果, 进一步研究各配合比与浆液基本性能指标之间的关系, 利用回归分析法建立数学关系, 以直观反映浆液性能结果与配合比之间的关系。使用 Data Processing System (DPS) 数据处理系统, 采用二阶多项式模型进行回归分析, 二阶多项式为

$$y = a_0 + a_1A + a_2B + a_3C + a_4D + a_5A^2 + a_6B^2 + a_7C^2 +$$

$$a_8 D^2 + a_9 AB + a_{10} AC + a_{11} AD + a_{12} BC + a_{13} BD + a_{14} CD, \quad (1)$$

式中, a_i 为回归系数, $i=0\sim 14$, A, B, C, D 分别为浆液水胶比、胶砂比、膨水比、灰粉比。

根据试验结果得回归关系见表 5, 各性能指标的相关系数表明该回归模型的拟合优度较好。将基本测试组配合比代入回归模型中, 并引入 GHE 方法对回归方程的拟合优劣进行判断。其中 $GHE=[2(M-C)^2/(M+C)]^{0.5}$, 式中, M 为预测值, C 为实际测试值, 当 $GHE<5$ 时, 认为模型拟合效果良好。代入计算后数据如表 6 所示, 可以认为此回归模型较为可靠。

2.2 浆液性能优劣解距离分析

通过前期调研得出了常见地层下浆液配合比的推荐选用范围, 为盾构隧道壁后注浆浆液选择提供参考, 但浆液的选择对于实际地层有一定各异性, 且浆液配合比推荐值具有较大范围, 对于实际工程的指导并未具化。

另一方面, 壁后注浆由于施工特殊性, 浆液性能需根据地层条件具体调整, 如凝结时间主要取决于水文地质条件、施工工序; 早期强度主要取决于地层自稳性等。相反, 施工地层勘测确定后, 对壁后注浆浆液性能的要求也随之确定, 往往从泌水率、抗压强度、凝结时间、稠度等方面进行约束试配, 但在试配过程中往往会出现性能之间的冲突, 例如随着水胶比的提高, 浆液稠度对应增加, 但往往伴之泌水率增加、凝结时间延长、抗压强度减小。

对于此类问题, 需要合理把控得出较优的配合比

范围, 通过不同地层对浆液性能的需求进行框定配合比是较好适配地层的方法。采用 TOPSIS 法 (优劣解距离法) 对调研配合比进行优化, 可以较好地小范围。

因各类地层适配浆液优劣解距离分析的计算方法一致, 以实际工程中的圆砾地层为例进行优化运算。在施工的实际情况下, 同步注浆浆液基本性能应与其地层具体情况适配, 根据已有研究^[28], 给出了工程实际中圆砾地层浆液的性能指标: 泌水率 $<5\%$, 稠度为 $100\sim 140$ mm, 凝结时间为 $6\sim 12$ h。同时根据《盾构法隧道同步注浆材料》DB42/T 1218—2016^[27]中对于浆液性能基本要求, 得出的浆液密度宜为 $1.7\sim 2.0$ g/cm³, 28 d 抗压强度 >2.5 MPa, 根据《盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程》T/CECS 563—2018^[29]中对于浆液基本性能要求, 对浆液稠度进行了修正, 具体为稠度需要控制在 $100\sim 130$ mm。

以圆砾地层为例进行 TOPSIS 优劣解距离法运算, 根据显著性分析, 胶砂比和灰粉比对浆液性能的影响较小, 故选取的浆液配合比: 水胶比为 $0.5\sim 1.5$; 胶砂比为 0.7 ; 膨水比为 $0.1\sim 0.3$; 灰粉比为 0.4 , 共计 33 组配合比, 并通过回归方程得出各组浆液基本性能。

在优劣解距离法决策中, 指标权重的确定有着重要的地位。现阶段权重的确定一般有主观赋权法、客观赋权法以及综合赋权法。因由单一的主观或客观赋权易导致决策的不准确, 影响后期方案选择。为提高权重的准确性采用博弈论组合权重, 以圆砾地层浆液性能要求作为期望指标, 计算得出的层次分析法权重、

表 5 浆液性能指标回归关系

Table 5 Regression relations for performance indexes of grout

性能指标	回归关系	相关系数
密度	$y = 2.256 - 0.366A - 0.566C - 1.534C^2 - 0.394AB + 1.003AC + 0.704BC + 0.117CD$	0.967
泌水率	$y = -0.266 + 0.372A + 0.255B - 0.098B^2 + 0.744C^2 - 0.685AC - 0.054AD - 0.205BC + 0.125CD$	0.973
结石率	$y = 126.276 - 36.223A - 26.868B + 10.578B^2 - 71.124C^2 + 66.802AC + 5.204AD + 20.046BC - 12.301CD$	0.971
稠度	$y = -272.427 + 440.515A + 257.049B + 167.540D - 164.273A^2 - 79.068B^2 - 40.499D^2 - 45.480AB - 33.041AD - 90.728BD$	0.947
凝结时间	$y = -12.532 + 32.132A - 7.802B^2 - 18.962C^2 + 37.925D^2 + 30.151AB - 50.429AD - 11.908BD$	0.930
3 d 抗压强度	$y = -1.789 - 1.217A + 7.211B + 4.692D + 3.096A^2 - 12.333C^2 - 2.298D^2 - 7.791AB - 1.524AD + 5.293BC + 3.467CD$	0.945
28 d 抗压强度	$y = 5.146 - 16.275A + 5.102B + 20.002D + 10.918A^2 + 2.048B^2 + 8.942C^2 - 4.097AB - 13.083AD + 1.041BD - 10.28CD$	0.981

表 6 回归模型对比表

Table 6 Comparison of regression models

组数	浆液密度 /(g·cm ⁻³)	泌水率 /%	结石率 /%	稠度 /mm	凝结时间 /h	抗压强度/MPa	
						3 d	28 d
25	1.5150	4.7000	95.288	—	28.0700	0.3000	0.7000
回归模型	1.5240	3.8000	95.978	131	32.3520	0.1680	0.6920
GEH	0.0073	0.4366	0.0706	—	0.7790	0.2729	0.0096

熵权法权重以及博弈法综合权重如表 7 所示。其中经济指标按浆液成分单位质量市场价计算。

表 7 评价指标权重

Table 7 Weights of evaluation indexes

评价指标	APH	TEM	综合权重
经济指标	0.0798	0.0044	0.0293
密度	0.0424	0.0067	0.0185
泌水率	0.0798	0.5924	0.4232
稠度	0.2660	0.0384	0.1135
凝结时间	0.2660	0.3123	0.2970
28 d 抗压强度	0.2660	0.0458	0.1185

在层次分析法中, 应根据实际地层对浆液性能的要求进行合理赋权, 如自稳性较差地层对浆液凝结时间和早期强度提出了更高的要求, 应合理增加相应评价指标的权重。

通过构造归一化矩阵, 得出最优及最劣方案, 计算各评价对象与最优方案、最劣方案的接近程度, 得出各评价对象与最优方案的贴近程度。通过分析及计算得出了在圆砾地层条件下浆液不同配合比的综合性能评价, 表 8 为综合性能分值 $C_i > 0.9$ 的浆液配合比。

表 8 浆液性能评价排序

Table 8 Sorting of grout performance evaluation

排序	水胶比	胶砂比	膨水比	灰粉比	分值 C_i
1	0.8	0.7	0.2	0.4	0.98
2	0.7	0.7	0.2	0.4	0.97
3	0.8	0.7	0.3	0.4	0.97
4	0.7	0.7	0.3	0.4	0.97
5	0.7	0.7	0.1	0.4	0.96
6	0.9	0.7	0.3	0.4	0.94
7	0.9	0.7	0.2	0.4	0.90

3 浆液与地层适配性注入试验

通过自主研发的室内模型试验观察盾构隧道壁后注浆浆液在模拟地层中注入情况, 并重点考虑盾尾脱空工序。通过实际注入试验验证优化算法得出的浆液配合比范围的可靠性并提出适配浆液配合比的具体建议值, 同时考虑模型尺寸与地层粒径级配之间的比例, 以圆砾地层为例, 分析浆液与地层之间的适配性问题。

3.1 一维可视化注浆扩散模拟试验系统

浆液的地层注入试验以一维长柱圆砾地层作为注浆对象, 并增设模拟盾尾装置, 用于模拟施工阶段盾尾脱空过程, 试验系统由渗透注浆装置、恒压注浆系统以及数据采集系统等三大部分组成, 如图 3 所示。

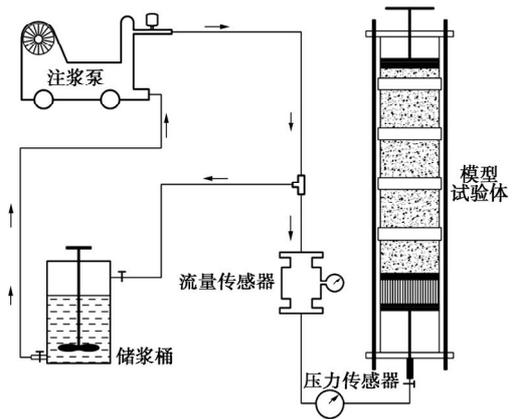


图 3 盾构隧道壁后注浆模型试验装置

Fig. 3 Model test device for backfill grouting of shield tunnel

(1) 渗透注浆装置

渗透注浆装置由高强度圆管、紧固装置、模拟盾尾装置组成。受注体为长柱体, 直径 110 mm, 长度 1000 mm, 试验注浆管采用透明亚克力材质, 为方便取样和清洗, 将有机玻璃管沿纵向一分为二。在切口位置做必要的密封防水处理, 密封条尺寸为 10 mm×5 mm, 为自黏防水性胶条, 在圆管周身采用管箍每隔 15 cm 设置一道加固圈。该装置通过 4 根 1.2 m 螺纹丝杆和上下两块封顶钢板进行受力加固; 同时在下钢板中心处设置密封隔层, 由直径为 10 cm 的圆钢板和 10 mm×15 mm 遇水膨胀止水条组成。装置顶部还设有压紧螺杆, 通过压紧螺杆和滤板对注浆体进行压密, 保证受注体介质在盾尾脱空前处于稳定的密实状态。

模拟盾尾装置主要模拟盾构隧道施工过程中盾尾脱空的过程, 以达到较好模拟实际工程行为的效果。
①一方面可以通过调节模拟盾尾装置与注浆端的距离确定初始盾尾间隙的尺寸, 当所有装置安装完成后, 借助与盾尾装置相连的拉杆移动, 实现盾尾与土体的脱空;
②另一方面注浆管与长圆柱之间存在较大尺寸偏差, 利用盾尾装置内部空腔使浆液在注入前达到稳流状态, 以达到浆液全截面均匀进入地层, 渗透注浆装置见图 4。

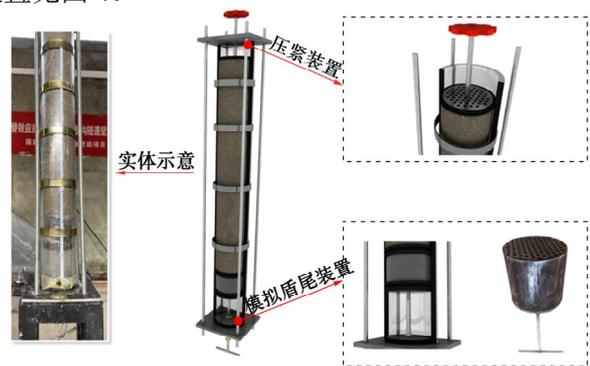


图 4 渗透注浆装置

Fig. 4 Permeation grouting device

(2) 恒压注浆系统

注浆系统为试验装置提供注入动力,由注浆泵、缓冲器、储浆桶和压力调节管等组成。按照各方案配合比在配料桶内将浆液提前搅拌均匀,当渗透注浆装置搭建完成后将其倒入储浆桶内,再由灰浆泵压入模型试验体内。

(3) 数据采集系统

数据采集系统为注浆管路上设置的流量传感器及压力传感器,动态监测注浆过程中的注浆速率和注浆压力。流量传感器为智能直显型电磁流量计,测量量程为0~20 L/min;压力传感器量程为0~1 MPa,测量精度为1 kPa。

3.2 试验方案及流程

本试验地层参数选取参考昆明市地铁4号线沿线所处圆砾地层,该地层渗透系数为 6.02×10^{-4} m/s,其中圆砾含砾石($2 \text{ mm} < d < 50 \text{ mm}$,占74.8%),砂($0.075 \text{ mm} < d < 2 \text{ mm}$,占22.07%)。结合试验条件,对部分土粒占比进行调整,最终采用如图5所示的地层级配,并测得模拟地层渗透系数为 5.73×10^{-4} m/s,与实际地层情况相近。

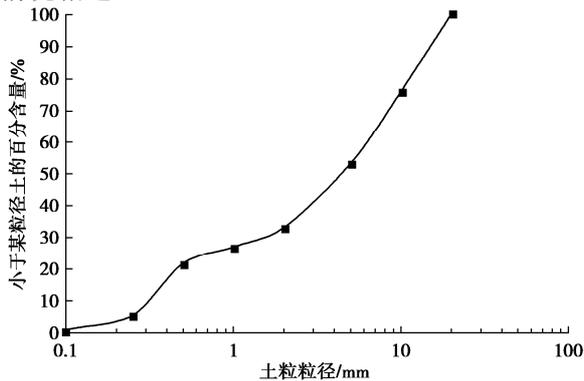


图5 试验模拟地层级配

Fig. 5 Stratum gradation of experimental simulation

基于TOPSIS优劣解距离法分析出的浆液综合评价排序,浆液配合比选取评价时综合评价分值 $C_i > 0.9$ 的方案作为评价组,除此之外,选择了两组评分 $C_i < 0.9$ 的浆液配合比作为验证组,具体配合比及评价分值见表9。

表9 验证组浆液配合比及评价分值

Table 9 Grout mixing ratio and performance evaluation of validation group

组数	水胶比	胶砂比	膨水比	灰粉比	分值 C_i
8	0.6	0.7	0.3	0.4	0.85
9	1.0	0.7	0.1	0.4	0.69

(1) 管件组装完毕后,按照指定的模拟地层级配填充,根据试验中盾尾间隙的模拟量,调节土体填充高度,本次盾尾间隙模拟量为10 cm。将模拟盾尾装置放入注浆管体内,利用紧固装置加固渗透注浆装置,

同时在出浆端处安装压紧螺杆以压密填充土体,保证在试验前地层的稳定。

(2) 按照方案中的配合比拌制浆液,同时为更清楚观察浆液的扩散情况,在拌制浆液过程中,添加混合惰性化学固体以改变浆液的颜色,本试验混合1%~3%的氧化铁惰性固体,该显色剂不溶于水,为粉末状,细度 $< 1 \mu\text{m}$,其添加量代替对应砂的部分,在浆液中显红色。

(3) 对注浆管道密封性及阀门的开关状况进行仔细检查,为使在注浆开始时浆液就能尽快注入管内,在正式注浆前预先启动注浆泵,利用压力调节通道实现浆液管外自循环,待浆液稳定循环后关闭泵。

(4) 试验人员将模拟盾尾装置向下拉至最底部,并将注浆管接头与下方接头扣上,当连接工作完成,启动泵开关。实际盾构隧道同步注浆中注浆压力一般为0.2~0.4 MPa,考虑模型试验尺寸,此处采用0.2 MPa的注浆压力。

结合试验模型装置尺寸,试验采用恒压注浆的压力控制方式,即稳定模拟盾尾装置内缓冲区的压力,若观察到浆液扩散范围不再变化,保持注浆3 min后,注浆结束。

为验证管道中压力传感器显示的注浆压力值的精确程度,于模拟盾尾装置内(浆液缓冲区)增设微型应变式压力传感器,进一步监测管道内外压力的一致性。根据图6可以看到压力传感器上的压力与盾尾内浆液压力一致,注入瞬间,管内压力突增,在10 s内填充盾尾间隙,之后注浆端处压力稳定在0.2 MPa附近,表明管道中压力传感器可反映注浆端处压力。

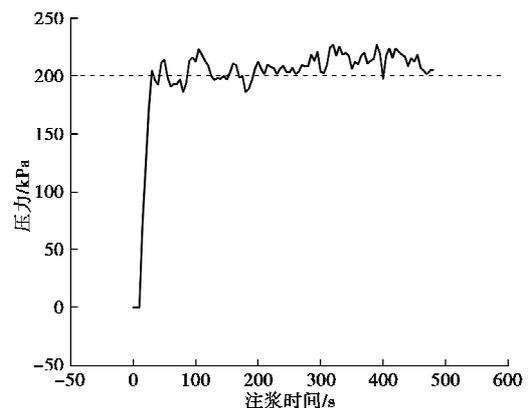


图6 管内压力监测数据

Fig. 6 Monitoring data of pressure in tube

3.3 试验结果及分析

(1) 浆液扩散范围

注浆结束24 h后,将渗透注浆装置拆分,并测量每组浆液的扩散范围,测量示意如图7,各组注浆具体结果见表10。



图 7 注浆扩散范围测量示意

Fig. 7 Measurement of grouting diffusion range

表 10 实际注浆扩散范围

Table 10 Ranges of actual grouting diffusion

组别	扩散范围 /cm	组别	扩散范围 /cm	组别	扩散范围 /cm
1	12.5	4	11.1	7	16.4
2	11.6	5	13.7	8	9.7
3	11.7	6	13.0	9	18.2

结合图表可知, 每组注浆扩散距离差异较大, 且注浆效果沿轴线分布不均匀。直观来看, 注浆端附近, 浆液注入效果好, 见少量空洞; 随着与注浆端距离增加, 地层注浆效果变差, 部分甚至存在明显的裂隙和空洞, 产生该现象的原因与浆液性质相关。

在验证组中, 第 8 组 (水胶比=0.6, 胶砂比=0.7, 膨水比=0.3, 灰粉比=0.4) 的浆液扩散范围均小于评价组各配合比, 第 9 组 (水胶比=1.0, 胶砂比=0.7, 膨水比=0.1, 灰粉比=0.4) 在浆液扩散范围有较好表现。

在评价组中, 从注浆范围来考量, 第 4 组 (水胶比=0.7, 胶砂比=0.7, 膨水比=0.3, 灰粉比=0.4) 的扩散范围最小, 第 7 组 (水胶比=0.9, 胶砂比=0.7, 膨水比=0.2, 灰粉比=0.4) 的扩散范围最大。同时不难发现, 水胶比一定时注浆范围随膨水比的增大而减小, 膨水比一定时注浆范围随水胶比增大而增大。但在不同水胶比情况下, 随着膨水比呈梯度减小浆液扩散范围的增长范围不一致, 这说明: 实际浆液扩散效果的提升与下降与浆液调整前后的具体配合比参数相关。

(2) 注浆体断面扩散效果

盾构隧道壁后注浆浆液的注入效果由浆液与地层之间的交互影响决定, 因此浆液的最终选取需基于浆液基本性能指标, 结合注入体的效果, 进行综合评判。其中浆液扩散范围是最直观的观察对比的数据, 但浆液扩散范围的远近不能直接表明浆液的注入效果, 根据上文分析得到, 若浆液颗粒含量低, 其流动性增加, 在地层中的渗流扩散较远, 但是对于地层加固效果而言甚微, 因此对注浆体做进一步扩散效果对比分析, 在一定程度上混凝土宏观孔隙率对其抗压强度影响较大^[30]。换言之, 宏观孔隙率在一定程度上可以反映加固体强度。基于此, 对注浆体剖面浆液填充效果及断面孔隙率展开分析。具体分析步骤如下: ①利用高清数码相机对注浆体截面拍照取样; ②将拍照取样的注

浆体图像导入 Photoshop 软件内进行灰度处理, 凸显孔隙部分; ③处理后图片导入 Image-Por Plus 软件内, 进行图像二值化处理, 随后进行孔隙识别分析计算, 计算宏观孔隙率。处理过程参见图 8。

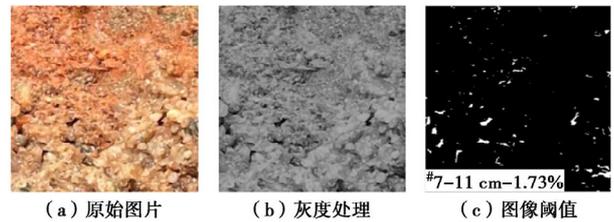


图 8 图片处理过程

Fig. 8 Processing of images

结合各组试验中的浆液扩散范围, 选取 11 cm 位置处宏观孔隙率见表 11。

表 11 11 cm 处各组注浆体宏观孔隙率

Table 11 Macroscopic porosities of grouting at 11 cm in each group

组别	宏观孔隙率/%	组别	宏观孔隙率/%
1	3.00	6	0.64
2	1.41	7	1.73
3	1.24	8	—
4	4.17	9	8.72
5	2.70		

不同浆液在相同注浆体位置处其宏观孔隙率差异显著。在验证组中, 由于第 8 组浆液扩散范围较小, 并未注入至 11 cm 处, 故此组在 11 cm 处无宏观孔隙率。第 9 组虽在扩散范围方面表现较好, 但其 11 cm 处宏观孔隙率显著大于评价组, 意味着其并未对土体进行良好加固。在综合考量扩散范围及宏观孔隙率的情况下, 相较评价组, 验证组浆液表现不佳, 在一定程度上对优化算法的可靠性进行了验证。

在评价组中, 第 4 组浆液扩散范围为 11.1 cm, 而从 11 cm 处可以看出其地层孔隙填充效果不佳, 土颗粒松散, 据此可认为浆液有效加固范围与浆液扩散范围不一致, 浆液有效加固范围小于浆液扩散范围。第 5 组浆液扩散范围为 13.0 cm, 其 11 cm 处宏观孔隙率为 0.64%, 浆液填充效果良好, 宏观孔隙数量少、尺寸小。

从宏观孔隙率方面考量, 第 2, 第 3, 第 6, 第 7 组在 11 cm 处的加固效果较优; 从注浆扩散范围方面考量, 第 1, 第 5, 第 6, 第 7 组的注浆扩散范围较优。综合考量下, 第 6, 第 7 组浆液与试验地层有较好的适应能力, 浆液性能满足地层所需的相关要求, 即与对应实际工程的圆砾地层最为适配的浆液配合比: 水胶比为 0.9, 胶砂比为 0.7, 膨水比为 0.2, 0.3, 灰粉比为 0.4。

4 结 论

基于数据调研及优化算法, 通过浆液注入试验提

供了盾构隧道壁后注浆浆液与地层适配性优选方法。以实际工程中的圆砾地层为演算例,展示了优选方法的具体步骤,得到了圆砾地层下浆液配合比具体推荐值,为实际工程选用适配的浆液配合比具体值提供了方法参考,得出5点结论。

(1) 目前盾构隧道同步注浆以单液浆为主,在同一地层类型下单液浆和双液浆使用比例约为3:1,含水地层中选用的多为双液浆或改性单液浆。

(2) 不同的地层和施工条件对适配注浆浆液的要求有所不同,根据常见地层的渗透系数差异,提出了常见地层壁后注浆浆液配合比的参考范围。

(3) 基于浆液基本性能测试及回归计算,采用TOPSIS法提出了浆液配合比范围值优选算法,经注入试验验证,该算法有较好的可靠性。

(4) 研制了盾构隧道壁后注浆一维注浆模型试验系统,得出了实际工程中圆砾地层浆液配合比推荐值:水胶比为0.9,胶砂比为0.7,膨水比为0.2,0.3,灰粉比为0.4。

(5) 本文提出的优选方法可为不同目标地层壁后注浆浆液配合比具体值的选取提供参考。

在注入试验阶段,发现浆液中存在可注性控制点,但针对不同类型的浆液在不同地层下的有效加固范围仍需进一步研究。同时,将进一步通过工程应用、学术研究完善各类地层下浆液配比的经验范围,以更好地服务于工程建设。

参考文献:

- [1] 何川,封坤,方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97 - 109. (HE Chuan, FENG Kun, FANG Yong. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97 - 109. (in Chinese))
- [2] 交通运输部. 1月城市轨道交通运营数据速报[EB/OL]. 2022-02-07. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1724102977133803657>. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Urban rail transit operation data report in 2022.01[EB/OL]. 2022-02-07. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1724102977133803657>. (in Chinese))
- [3] 叶飞,王斌,韩鑫,等. 盾构隧道壁后注浆试验与浆液扩散机理研究进展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 92 - 104. (YE Fei, WANG Bin, HAN Xin, et al. Review of shield tunnel backfill grouting tests and its diffusion mechanism[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 92 - 104. (in Chinese))
- [4] 梁精华. 盾构隧道壁后注浆材料配比优化及浆体变形特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (LIANG Jing-hua. Study on the Proportion of Backfill-Grouting Materials and Grout Deformation Properties of Shield Tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [5] 张海涛. 盾构同步注浆材料试验及隧道上浮控制技术[D]. 上海: 同济大学, 2007. (ZHANG Hai-tao. Study on the Proportioning of Tail Void Grouting Material and Up Floating Control of Shield Tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [6] 陈艺元. 盾构同步注浆复合水泥基-水玻璃双液浆材料特性研究及强度模拟试验[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. (CHEN Yi-yuan. Investigation into the Characteristics and Strength Simulation Test of the Complex Two-Component in Synchronous Grouting of Shield Tunneling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese))
- [7] 贾毅,李福海,吴德宝,等. 盾构隧道壁后同步注双液浆配合比试验研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(2): 143 - 151, 157. (JIA Yi, LI Fu-hai, WU De-bao, et al. Experimental study on mix proportions of synchronous two-component grouting for shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(2): 143 - 151, 157. (in Chinese))
- [8] HUANG W H. Improving the properties of cement-fly ash grout using fiber and superplasticizer[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(7): 1033 - 1041.
- [9] SARIC-CORIC M, KHAYAT K H, TAGNIT-HAMOU A. Performance characteristics of cement grouts made with various combinations of high-range water reducer and cellulose-based viscosity modifier[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 1999 - 2008.
- [10] ZHANG C, FU J Y, YANG J S, et al. Formulation and performance of grouting materials for underwater shield tunnel construction in karst ground[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 327 - 338.
- [11] MAO J H, YUAN D J, JIN D L, et al. Optimization and application of backfill grouting material for submarine tunnel[J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 120281.
- [12] 叶飞,陈治,贾涛,等. 盾构隧道管片注浆幂律流型浆液渗透扩散模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 890 - 897. (YE Fei, CHEN Zhi, JIA Tao, et al. Penetration diffusion model of exponential fluid for backfill grouting through segments of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 890 - 897. (in Chinese))
- [13] YE F, YANG T, MAO J H, et al. Half-spherical surface diffusion model of shield tunnel back-fill grouting based on

- infiltration effect[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **83**: 274 - 281.
- [14] 梁禹, 阳军生, 王树英, 等. 考虑时变性影响的盾构壁后注浆浆液固结及消散机制研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(12): 3373 - 3380. (LIANG Yu, YANG Jun-sheng, WANG Shu-ying, et al. A study on grout consolidation and dissipation mechanism during shield backfilled grouting with considering time effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(12): 3373 - 3380. (in Chinese))
- [15] SAADA Z, CANOU J, DORMIEUX L, et al. Modelling of cement suspension flow in granular porous media[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2005, **29**(7): 691 - 711.
- [16] 李术才, 冯啸, 刘人太, 等. 考虑渗滤效应的砂土介质注浆扩散规律研究[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(4): 925 - 933. (LI Shu-cai, FENG Xiao, LIU Ren-tai, et al. Diffusion of grouting cement in sandy soil considering filtration effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(4): 925 - 933. (in Chinese))
- [17] 张连震, 张庆松, 刘人太, 等. 考虑浆液黏度时空变化的速凝浆液渗透注浆扩散机制研究[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(2): 443 - 452. (ZHANG Lian-zhen, ZHANG Qing-song, LIU Ren-tai, et al. Penetration grouting mechanism of quick setting slurry considering spatiotemporal variation of viscosity[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(2): 443 - 452. (in Chinese))
- [18] 张玉, 郭豪, 陈铁林, 等. 孔隙介质水泥浆液渗透注浆有效扩散距离试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, **50**(10): 2536 - 2551. (ZHANG Yu, GUO Hao, CHEN Tie-lin, et al. Experimental study on effective diffusion distance of cement slurry in porous media under permeation grouting[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, **50**(10): 2536 - 2551. (in Chinese))
- [19] DING W Q, DUAN C, ZHU Y H, et al. The behavior of synchronous grouting in a quasi-rectangular shield tunnel based on a large visualized model test[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **83**: 409 - 424.
- [20] 黄宏伟, 杜军, 谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J]. *岩土工程学报*, 2007, **29**(2): 243 - 248. (HUANG Hong-wei, DU Jun, XIE Xiong-yao. Simulation of GPR detecting of grouting materials behind shield tunnel segments[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, **29**(2): 243 - 248. (in Chinese))
- [21] 张云, 殷宗泽. 埋管隧道竖向地层压力的研究[J]. *岩土力学*, 2001, **22**(2): 184 - 188. (ZHANG Yun, YIN Zong-ze. Study on the vertical ground pressure of the buried tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, **22**(2): 184 - 188. (in Chinese))
- [22] BEZUIJEN A, TALMON A M, KAALBERG F J, et al. Field measurements of grout pressures during tunnelling of the sophia rail tunnel[J]. *Soils and Foundations*, 2004, **44**(1): 39 - 48.
- [23] HASHIMOTO T, BRINKMAN J, KONDA Y, et al. Simultaneous backfill grouting, pressure development in construction phase and in the long-term[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2004, **19**(4/5): 52-59.
- [24] 申志军, 艾旭峰, 郑余朝, 等. 马蹄形盾构隧道结构内力现场测试[J]. *土木工程学报*, 2017, **50**(增刊 2): 267 - 273. (SHEN Zhi-jun, AI Xu-feng, ZHENG Yu-chao, et al. In-situ test of internal force for structure hippocrepiform shield tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, **50**(S2): 267 - 273. (in Chinese))
- [25] 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487—2008[S]. 2009. (Code for Engineering Geological Investigation of Water Resources and Hydropower: GB 50487—2008[S]. 2009.
- [26] 建筑砂浆基本性能测试方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 2009. (Standard for Test Method of Basic Properties of Construction Mortar: JGJ/T 70—2009[S]. 2009. (in Chinese))
- [27] 盾构法隧道同步注浆材料: DB42/T 1218—2016[S]. 2016. (Local Standard of Hubei Province. Shield Tunnel Synchronous Grouting Material: DB42/T 1218—2016[S]. 2016. (in Chinese))
- [28] 舒瑶, 周顺华, 季昌, 等. 多变复合地层盾构隧道施工期管片上浮实测数据分析与量值预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(增刊 1): 3464 - 3474. (SHU Yao, ZHOU Shun-hua, JI Chang, et al. Analysis of shield tunnel segment uplift data and uplift value forecast during tunnel construction in variable composite formation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(S1): 3464 - 3474. (in Chinese))
- [29] 盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程: T/CECS 563—2018[S]. 2018. (Technical Specification for Simultaneous Grouting Material in Shield Projects: T/CECS 563—2018[S]. 2018. (in Chinese))
- [30] 朱洪波, 闫美珠, 李晨, 等. 图像分析宏观孔隙率对混凝土抗压强度的影响[J]. *建筑材料学报*, 2015, **18**(2): 275 - 280. (ZHU Hong-bo, YAN Mei-zhu, LI Chen, et al. Analysis of the influence of porosity of macroscopic pore on concrete strength by image method[J]. *Journal of Building Materials*, 2015, **18**(2): 275 - 280. (in Chinese))