

DOI: 10.11779/CJGE2021S2059

不同注浆材料对隧道漏水漏砂封堵效果试验研究

刘永超^{1, 2}, 袁振宇¹, 程雪松^{*1}, 李刚², 张天星², 栗晴瀚¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津建城基业集团有限公司, 天津 300301)

摘要: 在盾构隧道中经常出现漏水漏砂事故, 注浆是常见的抢险方法, 由于地下环境经常是动水条件, 所以对注浆材料有很高的要求, 需要综合考虑注浆材料的凝结时间、动水留存率、堵水率等指标。通过室内试验, 对高分子材料、马丽散、双液浆、双组份水反应类聚氨酯、膏状浆液与水玻璃混合物、高分子材料与双液浆混合物等六种注浆材料进行堵漏试验并做对比研究, 分析不同注浆材料的堵漏效果及堵漏机理, 并提出堵水比量化评价参数。

关键词: 室内试验; 注浆材料; 堵漏效果; 堵漏机理; 堵水比

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0249-04

作者简介: 刘永超(1970—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程设计与施工技术研究与管理。E-mail: chao96521@vip.sina.com。

Experimental study on plugging effect of different grouting materials for water and sand leakage of tunnels

LIU Yong-chao^{1, 2}, YUAN Zhen-yu¹, CHENG Xue-song¹, LI Gang², ZHANG Tian-xing², LI Qing-han¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Jiancheng Foundation Group Co., Ltd., Tianjin 300301, China)

Abstract: Water and sand leakage accidents often occur in shield tunnels, and grouting is the common emergency treatment method. Because the underground environment is often dynamic water conditions, the grouting materials have high requirements, which need to comprehensively consider the properties of grouting materials, such as setting time, dynamic water retention rate and water plugging rate. Through the laboratory tests on six kinds of grouting materials: polymer materials, marithan, double-grouting, reaction of two-component water polyurethane, paste slurry mixture with sodium silicate, and polymer materials and double-liquid mixture, the plugging effect and mechanism of grouting materials are analyzed, and the quantitative evaluation parameter, water plugging ratio, is put forward.

Key words: laboratory test; grouting material; plugging effect; plugging mechanism; water plugging ratio

0 引言

对隧道漏水漏砂等问题的防治, 工程上多采用注浆的方法进行抢险, 常见的浆液分为有机注浆材料和无机注浆材料^[1], 浆液在注入后将面临复杂的地质水文条件, 在动水的环境下极易被水冲走, 大大降低堵漏效果。堵漏注浆工程中对浆液原料的物理性质及化学性质要求极高, 凝结时间、动水留存率和堵水比等指标常用来评价注浆材料堵漏性能优劣。目前, 国内外进行了不同配比的双液浆、聚氨酯等浆液的物理、化学性质及堵水试验的研究, 通过长时间对扩散机制及注浆机理的研究, 浆液除了需要有抗水冲刷能力外, 还需要能够在短时间内具备一定强度, 从而达到堵水效果。

本文主要介绍自主研发的隧道渗漏注浆模拟装置, 并对高分子材料、马丽散、双液浆、双组份水反

应类聚氨酯、膏状浆液与水玻璃混合物、高分子材料与双液浆混合物等6种材料的堵水效果进行研究, 并提出堵水比量化评价系数, 在同一装置及环境条件下进行不同材料的堵水效果与堵漏机理的对比及分析, 并探究水压对注浆堵水效果的影响。

1 试验设计

1.1 试验装置设计

针对目前实际工程中隧道渗漏状况, 笔者设计了小型注浆试验装置来模拟不同注浆材料在实际注浆工程中的注浆效果, 通过对试验现象及数据, 来比较6种材料的注浆性能, 分析其堵漏机理; 试验装置整

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630641)

收稿日期: 2021-08-13

*通信作者 (E-mail: cheng_xuesong@163.com)

体设计如图 1, 试验装置分为 4 个系统, 分别为注水系统、注浆系统、收集系统及模型箱, 4 个系统相互连接形成整个系统的液体流动路径; 注浆系统又分为单液浆注浆系统和双液浆注浆系统, 具体试验装置整体设计图以及 3D 模型箱、实物模型箱如图 1。

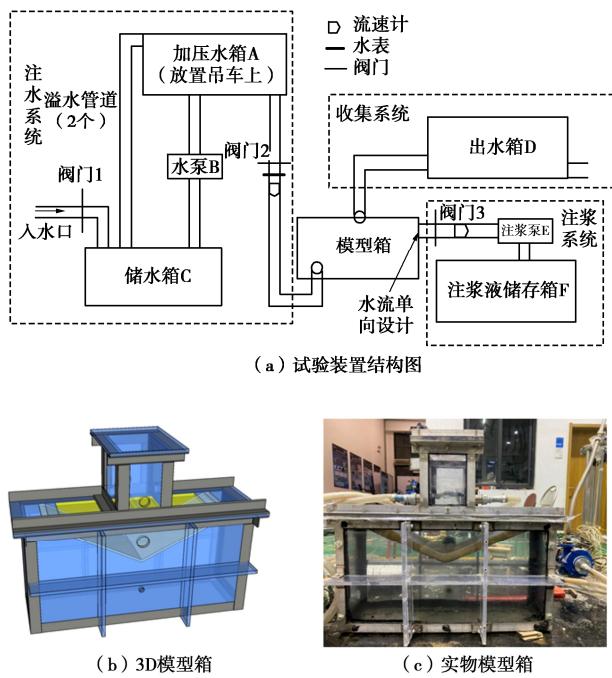


图 1 试验装置整体结构及模型箱

Fig. 1 Schematic diagram of overall structure and model box

下面分别对 4 个系统进行介绍, 具体如图 1 (a):

(1) 注水系统: 共有 3 个主要试验装置, 分别为吊起后的加压储水箱 A, 水泵 B 以及地面上的储水箱 C。通过将水箱 A 吊起至不同高度来模拟不同水压高度, 以此来改变注入模型箱的水压力; 水箱 A 共接入四根管道, 一根管道与水管相连, 试验前将水注入箱内, 两根管道与外界形成水循环, 一根管道向模型箱注水。储水箱 C 是整个系统的水源, 水泵将水注入水箱 A 中, 从而带动整个试验装置的液体流动。

(2) 模型箱: 模型箱用来模拟隧道渗水、渗漏状态, 其下部为注水与注浆空间, 水通过三角折板进入三角空间, 浆液通过注浆泵进入三角空间, 水和浆液通过裂缝向上流, 然后流入水箱。模型箱大部分为透明板, 可以清楚直观地观察箱内浆液反应情况, 并通过试验现象及数据来分析不同浆液堵漏的机理。

(3) 注浆系统: 注浆系统分为单液浆注浆系统和双液浆注浆系统, 注浆系统将储存箱 F 中的浆液注入到模型箱中, 使浆液在模型箱中反应。

(4) 收集系统: 收集系统水箱 D 连接着模型箱, 将模型箱中的水与渗漏出的浆液收集其中。

1.2 试验操作流程

连接仪器, 准备注浆液。将加压水箱 A 提升至目标高度, 打开阀门 1 将水储存于储水箱 C, 关闭其余阀门; 打开水泵, 将水提升至加压水箱 A; 待加压水箱溢水管开始出水, 打开阀门 2, 并开始记录流量计读数; 模型箱中充满水后, 开始进入渗漏状态, 保持记录, 等待出水口水流稳定; 打开阀门 3, 开启注浆泵 E, 将浆液储存箱 F 中的浆液注进模型箱, 保持记录流量计读数; 出水口流量稳定或浆液注完后试验结束, 停止计数; 关闭阀门 3 和注浆泵, 关闭水泵 B 和阀门 2, 关闭阀门 1; 清理试验装置, 分析数据, 准备下一次试验。

1.3 堵水比定义

本文根据试验装置特点定义堵水比 n 来反应不同浆液的堵水效果, 本试验测试不同注浆材料试验时注水速率的变化, 以此作为评价不同注浆材料堵水效果的指标。试验过程中在进水管处安装电子流量计, 准确测量整个试验过程注水流速的变化, 并测试注浆稳定后的堵水比, 令 $n = (\text{渗漏流速平均值} - \text{注浆稳定后渗漏流速平均值}) / \text{渗漏流速平均值}$ 。

2 试验过程及试验数据整理

2.1 试验材料

下面分别介绍 6 种试验注浆材料。

高分子材料: 白色粉末, 遇水 3~5 s 即可反应, 体积膨胀约 80~100 倍; 马丽散: 由甲液与乙液组成, 几十秒后膨胀 15~20 倍, 无水反应后可抵抗压力 25~38 MPa, 而吸水反应后抗压能力介于 15~25 MPa, 其浆液黏度低, 可以很好地渗入细小裂缝中, 成型后具有较好的黏合能力; 双液浆: 由水泥浆和水玻璃组成的双组份材料, 根据研究表明^[2-3], 为达到最优的注浆效果, 水灰比取 1.0; 双组份水反应类聚氨酯: 通过对注浆材料的不断研究^[4-5], 逐步开发聚氨酯等有机材料, 本次试验采用双组份水反应类聚氨酯, 混合后遇水反应迅速, 体积膨胀近 10 倍; 膏状浆液+水玻璃: 自主研发新型注浆材料, 原料为水泥、粉煤灰、膨润土、泥浆 4 种材料按照一定比例混合而成, 并与水玻璃混合进行本装置试验; 高分子吸水材料+双液浆: 自主创新地将两种材料混合注入试验装置, 先注高分子材料, 后注双液浆。

2.2 试验分组及过程

本次试验共选取两组变量, 6 种不同注浆材料和两个高压水箱高度, 一共 9 组试验 (其中高分子材料、马丽散、双液浆 3 种材料进行 3 m 和 5 m 两种水头的对比试验), 具体试验分组见表 1。

试验分为 3 个阶段: 注水阶段—渗漏阶段—注浆

阶段, 结束注浆后, 模型箱中的缝隙有不同程度的封堵, 与堵水比 n 均可反应注浆后的封堵效果。

表 1 试验分组表

Table 1 Test scheme

试验编号	注浆材料	水头/m
1	高分子吸水材料	3
2	高分子吸水材料	5
3	马丽散	3
4	马丽散	5
5	双液浆	3
6	双液浆	5
7	双组份水反应类聚氨酯	3
8	膏状浆液+水玻璃	3
9	高分子吸水材料+双液浆	3

2.3 数据整理及分析

观察试验 1 至试验 4 组数据可以看出, 开始注水时, 此时浆液尚未注入, 只研究水头对试验效果的影响。可以看出水箱高度越大, 注水速度越大, 渗漏速度越大, 其差值也越大。在开始渗漏时, 流速有大幅度减小, 可以用渗漏发生后的注水速度模拟隧道的渗漏速度。

注浆结束稳定后, 通过分析 6 种材料的注浆后堵水比 n (见表 2) 可以看出, 聚氨酯堵水效果较好, 在动水情况下反应速度快、膨胀率大、且成型后具有一定强度, 成功将注水端的水流压成倒流; 高分子吸水材料与双液浆混合注入方式也有较好的堵漏效果, 堵漏程度远优于传统双液浆。9 组试验具体数据见图 2。

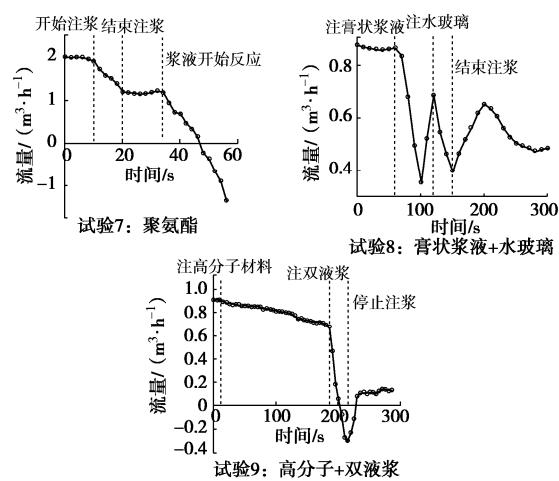
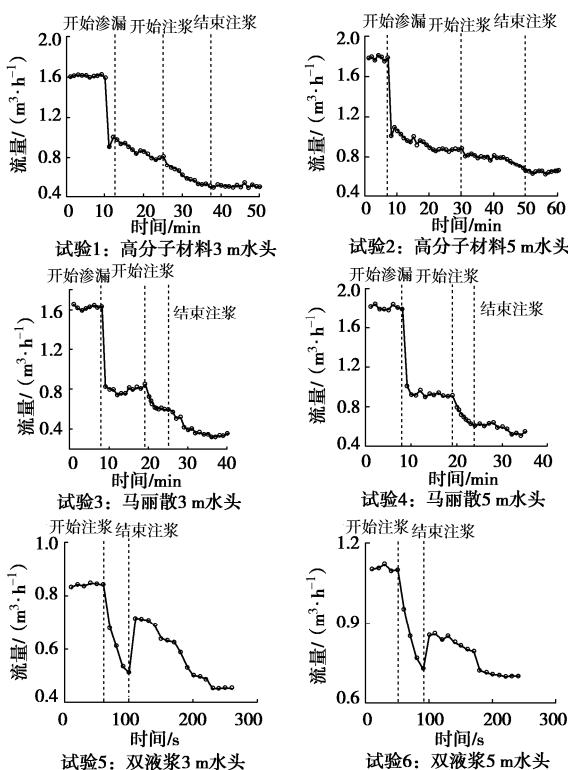


图 2 试验数据

Fig. 2 Experimental data

表 2 各注浆材料堵水比

Table 2 Water plugging ratio of grouting materials

注浆材料	堵水比/%	
	水头 3 m	水头 5 m
高分子吸水材料	38.4	31.7
马丽散	57.5	43.0
双液浆	40.6	36.1
聚氨酯	100.0	—
膏状浆液	44.2	—
高分子+双液浆	85.0	—

3 试验现象及堵漏机理分析

3.1 试验现象

高分子吸水材料: 材料遇水反应速度极快, 形成类似于碎果冻形状的白色透明物质, 但是成型后强度很小, 水流仍能穿过浆液从裂缝中流走。

马丽散: 由于成型后的马丽散密度小于水的密度, 所以漂浮在水上面, 对于上部的裂缝有比较好的堵漏效果, 在本次试验中, 有不错的堵水效果。

双液浆: 浆液注入后模型箱内的水变浑浊, 双液浆在动水情况下成型较慢, 很大一部分随着水流在裂缝中流走, 成型后的双液浆固体首先在水下部沉积, 然后向上部堆积。

聚氨酯: 由于材料密度小于水, 浆液从上向下进行反应, 迅速膨胀, 导致了注水口水倒流的情况。

膏状浆液: 膏状浆液与水玻璃注入试验装置中, 浆液迅速下沉至三角区下部, 三角区外部分的水依然保持较清澈透明, 这是膏状浆液与双液浆试验现象的不同之处; 对比膏状浆液与双液浆, 膏状浆流动水留存率较传统双液浆好很多, 不容易被水冲散。

高分子吸水材料+双液浆: 首先将高分子材料注入装置, 进水速度有所减缓, 然后向装置内注入双液浆, 三角区内立刻由白颜色变为黑色浑浊空间。

3.2 不同材料堵漏机理分析

根据 6 种试验材料物理化学性质不同, 结合具体试验现象及数据, 得出 6 种材料的堵漏机理如下:

高分子材料、双液浆、膏状浆液+水玻璃、高分子+双液浆: 以上 4 种材料吸水后密度大于水, 随着浆液的注入, 成型后的浆液在模型箱模拟渗漏空腔三角区部位从下慢慢堆积直至达到最上面裂缝处位置, 将裂缝堵住。

马丽散、聚氨酯: 这两种材料均为油性材料, 密度均小于水的密度, 注入模型箱后浮在水表面, 在三角区内反应并且从上向下进行膨胀从而达到封堵效果; 本装置裂缝在上部(模拟隧道外注浆), 故此两种材料初步反应时就可以将裂缝部分堵住, 所以在本试验中有较好的封堵效果, 材料反应机理及封堵示意图如图 3。

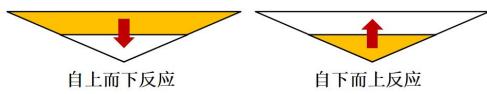


图 3 不同材料堵漏机理

Fig. 3 Plugging mechanism of different materials

高分子与双液浆混合注入这种方式有较好的堵漏效果, 由于先注入高分子延缓了水流并且将三角区用非液态物质塞满, 为后续双液浆的注入提供了良好的反应载体, 不会有大量的双液浆被动水冲走, 提供给了双液浆反应硬化空间, 水的渗流速度从开始的 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 减小到了约 $0.14 \text{ m}^3/\text{h}$, 堵水比达到了约 85%, 故此种混合浆液的注入有很好的堵漏效果。聚氨酯注入后迅速反应膨胀, 膨胀压力将水流压成倒流状态, 从试验 7 数据可以看出水流速度达到负值, 堵漏效果基本为 100%。以上两种材料在本试验中取得了较好的试验封堵效果, 可以为工程抢险注浆材料选择提供参考。

综上所述, 可以推演出不同的裂缝位置可以采用不用的注浆材料来进行堵漏, 当裂缝位置处于下部时可以考虑用密度小于水的浆液进行初步封堵, 如马丽散、聚氨酯等材料; 若裂缝位置在上方时, 可以用双液浆、膏状浆液与水玻璃的混合物、高分子与双液浆的混合物等密度大于水的材料进行初步封堵。

4 结 论

本文介绍了自主研发的隧道渗漏注浆模拟装置, 并对高分子吸水材料、马丽散、双液浆、双组份水反应类聚氨酯、膏状浆液与水玻璃的混合物、高分子与双液浆的混合物等 6 种材料进行堵水效果的试验研究, 在试验现象与机理的分析以及数据分析对比中形成以下结论:

(1) 在本试验研究的 6 种注浆材料中, 聚氨酯的堵漏效果较好, 在动水情况下成型快, 膨胀压力大,

堵漏效果明显; 高分子和双液浆的混合浆液堵漏效果显著, 在本试验装置中的堵水效果远优于传统双液浆。

(2) 6 种材料的堵漏机理不同, 马丽散和聚氨酯两种材料反应后密度小于水, 浮在水面上反应, 随着浆液注入, 从上往下进行封堵; 而高分子材料、双液浆、膏状浆液与水玻璃混合物、高分子与双液浆混合物四种材料密度大于水, 注入后沉入装置底部并开始反应, 与前两种材料相反, 是从下向上开始进行反应封堵。

(3) 水压越大, 注水流速越快, 模型箱渗漏越严重, 相同材料的堵水比越小, 堵漏效果越差; 可以推出, 在实际堵漏工程当中, 可以通过降低水位来减缓渗漏。

(4) 自主研究膏状浆液材料, 并与水玻璃相结合组成混合浆液, 在本试验中动水留存率远高于双液浆, 且堵水效果优于传统双液浆, 可以推演出在工程注浆中将大大减少注浆量, 减少注浆成本且相对于传统双液浆有较好的封堵效果。

参 考 文 献:

- [1] 李利平, 李术才, 崔金声. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3642 - 3648. (LI Li-ping, LI Shu-cai, CUI Jin-sheng. Experimental research on chemical grout for treating water inrush in rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3642 - 3648. (in Chinese))
- [2] 甄泽强. 水玻璃类浆材注浆性能及工程应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019. (ZHEN Ze-qiang. Study on Grouting Performance and Engineering Application of Water Glass Material[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019. (in Chinese))
- [3] 张民庆, 韩忠存, 施宏峰. 超细水泥-水玻璃双液浆的研究及应用[J]. 铁道工程学报, 1998, 15(4): 136 - 145. (ZHANG Min-qing, HAN Zhong-cun, SHI Hong-feng. Research and application of superfine cement and sodium silicate mixed grout[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1998, 15(4): 136 - 145. (in Chinese))
- [4] 冯志强, 康红普. 新型聚氨酯堵水注浆材料的研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 375 - 380. (FENG Zhi-qiang, KANG Hong-pu. Development and application of new waterproof grouting materials of polyurethane[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 375 - 380. (in Chinese))
- [5] 胡安兵, 徐会文, 杨敏. 新型注浆材料试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 210 - 213. (HU An-bing, XU Hui-wen, YANG Min. Experiments on new type of grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 210 - 213. (in Chinese))