

文章编号: 1001-8360(2023)07-0001-09

聚氨酯复合注浆材料浆液扩散特性及应用研究

陶伟明^{1,2}, 卢春房³, 叶长文⁴, 程鹏达⁵

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;
3. 中国铁道学会, 北京 100844; 4. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,
四川 成都 610059; 5. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 山岭隧道所处地层大多节理裂隙发育, 水系丰富, 由此引发的突涌水灾害普遍具有突发性高、危害性大和破坏性强等特点, 直接威胁隧道施工安全。基于化学改性和无机-高分子杂化技术, 以聚氨酯材料与普通硅酸盐水泥为基础, 结合复合功能助剂, 制备得到聚氨酯复合注浆材料。通过对该复合注浆材料的 SEM 观测, 分析浆材固结体的防渗性能。通过水槽注浆模拟试验, 研究注浆材料的浆液扩散和抗冲刷特性。利用 Galerkin 有限元法建立连续模型方程, 数值模拟浆液的流动过程, 分析注浆过程中的流场特征。通过现场工程应用, 验证该复合注浆材料对山岭隧道突涌水的注浆封堵效果。研究表明, 有机/无机杂化的空间互穿网络凝胶结构, 提高了结石体的力学性能和防渗性能。浆液在动水环境下的富水砂砾地层留存率高, 扩散程度好, 注浆封堵效果明显。数值模拟结果与现场试验基本相符, 对复合注浆材料浆液流场特征进行分析, 有助于实现地下突涌水注浆治理全过程的优化控制。山岭隧道突涌水的现场应用表明, 使用复合注浆材料对富水地层注浆后无渗水现象, 后期经过长时间观测, 封堵效果和耐久性优异。

关键词: 隧道工程; 富水地层; 抗冲刷性; 数值模拟; 扩散特性

中图分类号: U25 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-8360.2023.07.001

Study on Grout Diffusion Characteristics and Application of Polyurethane Composite Grouting Materials

TAO Weiming^{1,2}, LU Chunfang³, YE Changwen⁴, CHENG Pengda⁵

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 3. China Railway Society, Beijing 100844, China; 4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
5. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Most of the mountain tunnel strata have developed joints and cracks, and rich underground water system. The resultant water inrush disasters are generally characterized by high suddenness, extensive harm and strong destructiveness, which directly threaten the safety of tunnel construction. Based on chemical modification and inorganic-polymer hybrid technology, polyurethane composite grouting material was prepared based on polyurethane material and ordinary Portland cement using composite functional additives. Through SEM observation, the mechanical properties and impermeability of the consolidated body of the grouting material were analyzed. With the simulation experiment of flume grouting, the grout diffusion and washout resistance of grouting materials were studied. The Galerkin finite element method was used to establish a continuous model equation to numerically simulate the flow process of the composite grouting materials and analyze the characteristics of the flow field during the grouting process. The grouting plugging effect of the composite grouting materials on water inrush in mountain tunnels in water-rich strata was verified by field engineering application. The results show that polyurethane and cement particles can form organic/inorganic hybrid spatial interpenetrating network gel structure to further improve the mechanical properties and anti-seepage properties of stone bodies. The

收稿日期: 2023-03-19; 修回日期: 2023-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(41877264)

第一作者: 陶伟明(1968—), 男, 四川眉山人, 正高级工程师, 博士研究生。E-mail: taowm@ey.crec.cn

通信作者: 卢春房(1956—), 男, 河北蠡县人, 正高级工程师, 中国工程院院士。E-mail: chflu1956@126.com

grout features high retention rate, good diffusion degree and obvious plugging effect in water-rich sand gravel strata under dynamic water environment. The numerical simulation results are basically consistent with the field experiments. The analysis of the grouting flow field characteristics of the new composite grouting material is helpful to realize the optimal control of the whole process of underground water inrush grouting treatment. The field application of water inrush in mountain tunnel shows no water seepage in the water-rich stratum after grouting with the composite grouting materials. Long time observation shows excellent sealing effect and durability of the material.

Key words: tunnel engineering; water-rich stratum; washout resistance; numerical simulation; diffusion characteristics

山岭隧道所处地层大多数节理裂隙发育,并且水系丰富,在该富水地层修建隧道,引发的突涌水灾害具有突发性高、危害性大和破坏性强等特点^[1-3]。山岭隧道富水地层突涌水灾害直接关系隧道施工安全,是亟待解决的工程技术难题之一。注浆封堵技术是山岭隧道富水地层治理突涌水灾害的常用技术,技术的关键是注浆材料,直接影响治理效果^[4-6]。

目前,已有专家学者对治理隧道突涌水灾害的注浆材料进行了研究。王小龙等^[7]开展了水泥-水玻璃双液注浆力学特性的试验研究,表明双液注浆使得地层岩体后期强度增加,抗冲刷性好。张民庆等^[8]提出使用普通水泥单浆和普通水泥-水玻璃双浆注浆堵水的方法,在齐岳山隧道注浆封堵中得到推广应用。Zhang 等^[9]研究基于水泥、黏土、木质素及偏铝酸盐等形成的水泥基复合注浆材料凝结固化机理和注浆特性,验证了该复合注浆材料在隧道工程注浆封堵中的良好效果。沙飞等^[10]以硅酸盐水泥熟料与工业废渣为原材,通过粒径优化、活性激发等方法,制备高效超细水泥基注浆材料。Song 等^[11]采用物理探测数据,研究了隧道开挖以及注浆封堵前后,隧道中富水地层岩体变形的力学规律。赵国梁等^[12]研发了生物多糖/植物油基涌水隧道高聚物注浆材料,在地下水的帮助下,可达到保证隧道支护结构在富水条件下安全稳定的目的。周新星等^[13]研究了聚氨酯聚合物的特点,提出以聚氨酯为基础的注浆材料,在治理隧道突发水害方面具有先天优势。Saleh 等^[14]指出聚氨酯材料具有凝胶时间快、固化强度高的特点,可以广泛应用于隧道水害治理。然而,普通聚氨酯材料存在施工工艺复杂、强度耐久性不足的缺点,无法满足山岭隧道富水地层注浆封堵和耐久性的要求,并且对聚氨酯复合注浆材料的性能及工程应用还缺乏系统研究。

针对上述问题,本文以聚氨酯材料为基础,结合水泥材料和复合功能助剂,研制聚氨酯复合注浆材料,分析复合注浆材料的交联凝胶原理,开展富水地层的浆液扩散和抗动水冲刷模拟试验。利用数值模型,模拟浆液流场物性参数变化特性。通过山岭隧道富水地层的现场注浆应用,结合注浆材料性能、注浆封堵特征与

现场应用效果,综合分析了复合注浆材料在山岭隧道富水地层的适用性。本文旨在为山岭隧道富水地层突涌水治理,提供高效注浆材料,并为治理突涌水灾害的注浆封堵设计与施工,提供理论基础和科学依据。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料及配合比

试验所用的水泥为复合硅酸盐 P·O 42.5 水泥。水泥的化学组成见表 1。所用聚氨酯为多亚甲基多苯基异氰酸酯,外观为棕色液体,性能指标见表 2。水泥润湿剂为课题组自主研发,主要由聚酯多元醇、催化剂、有机硅消泡剂、流平剂和净味环保型溶剂组成,外观为无色液体,性能指标见表 3。

表 1 水泥熟料的化学组成

化学组成	SiO ₂ / %	Al ₂ O ₃ / %	Fe ₂ O ₃ / %	CaO/ %	MgO/ %	SO ₃ / %	LOI	表观密度/ (kg·m ⁻³)	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)
数值	18.57	5.01	3.53	64.87	1.55	3.02	0.98	3 150	385

表 2 聚氨酯性能指标

性能指标	黏度(25℃)/ (mPa·s)	密度(25℃)/ (g·cm ⁻³)	酸度/ %	异氰酸根(-NCO)含量/ %
数值	221	1.235	0.02	31.5

表 3 水泥润湿剂性能指标

性能指标	黏度(25℃)/ (mPa·s)	密度(25℃)/ (g·cm ⁻³)	表面张力(20℃)/ (mN·m ⁻¹)	折射率(20℃)
数值	5.6	1.132	46.8	1.423 8

试验以水泥、聚氨酯和水泥润湿剂为基础材料。水泥和水泥润湿剂按照质量比 10 : 3 配置,在高速搅拌机 400 r/min 的转速下,充分搅拌 3 min,制备得到水泥浆液。水泥浆液制备完成后,将聚氨酯按照水泥浆液总质量 4%、6%、8%、10%、12%、15% 的比例,加入水泥浆液。在高速搅拌机 400 r/min 的转速下,充分搅拌 3~5 min,制备得到聚氨酯复合浆液。聚氨酯复合浆液的外观为褐色液体,无挥发性气味,性能指标见表 4。将上述浆液倒入 40 mm×40 mm×160 mm 的水泥胶砂标准试模中,按照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》^[15] 要求,对试样进行养护。养

护至规定龄期后脱模,进行力学性能和微观性能测试。

表 4 聚氨酯复合浆液性能指标

性能指标	密度 (25 °C)/ (g · cm ⁻³)	黏度 (25 °C)/ (mPa · s)	初凝时 间/min	终凝时 间/min	体积增 长率/ %
数值	1.75~1.95	85~205	15~65	150~240	50~200

1.2 固结体测试与表征

聚氨酯复合注浆材料初凝、终凝时间,以及抗压强度和抗折强度,按照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》^[15] 的标准要求,进行测试。采用数显黏度计测试浆液的黏度,转速设置为 60 r/min,测试满量程为 5 000 mPa · s。

采用环境扫描电镜仪,考察浆液固结体微观结构特征,研究浆液固结体形貌、孔隙结构及其变化规律。

使用变水头渗透仪,测定不同聚氨酯含量的浆材固结体渗透系数。渗透系数计算式为

$$K_T = 2.3 \times \frac{aL}{A(t_1 - t_2)} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

式中: K_T 为渗透系数,cm/s; a 为测压管断面积,cm²; L 为试样高度,cm; A 为试样截面面积,cm²; t_1 、 t_2 为测定前后时间,s; h_1 、 h_2 为测定前后刻度管中水溶液高度,cm。

1.3 浆液扩散特性现场试验

选用成都市蒲江县某砂砾石地层,采用长×宽×高为 5 m×0.5 m×0.5 m 的试验水槽,开展聚氨酯复合注浆材料浆液扩散和抗冲刷模拟试验。在试验场地进行挖方回填,试验坑尺寸为 16 m×8 m×8 m(长×宽×深),在坑内距离地表 2、4、6、8 m 共 4 个深度段,按照粒径从小到大分别回填 2~5、5~10、10~20、20~50 mm 共 4 种级配的砂卵石。试验坑底部均为原地黏土层,底部设有排水孔,用以模拟动水状态,水流速度拟定为 0.5、1.0、1.5 m/s。经上述分析,得到最优配比的聚氨酯复合注浆材料,试验用水为蒲江地区普通自来水。采用空压机进行纯压式注浆试验,注浆压力设定为 0.4 MPa,按照拟定的水流速度模拟动水环境下,聚氨酯复合注浆材料在不同粒径砂砾石地层中的浆液扩散和抗冲刷性能,研究聚氨酯复合注浆材料在富水地层中的注浆封堵效果。

1.4 浆液扩散数值模拟研究

动水环境注浆过程中,浆液黏度会随浆液扩散不断发生变化,从浆液流动锋面逐级向注浆孔口减小。利用有限元方法数值模拟注浆过程,可得到黏度、压力随时间变化的规律。基于以下假设,建立浆液的流动控制方程:

- (1) 浆料和水是不可压缩、均匀、各向同性的流体^[16]。
- (2) 流体与岩石表面无滑移^[17]。

(3) 渗透到裂隙周围岩体的浆液忽略不计^[18]。

(4) 忽略浆液与岩石间的相互作用。

浆液和水的密度 ρ 、黏度 μ 分别为

$$\rho = \begin{cases} \rho_1 & t^* = 0 \\ (1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2 & t^* > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_1 & t^* = 0 \\ (1 - \varphi)\mu_1 + \varphi\mu_2 & t^* > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 分别为水、浆液的密度; μ_1 、 μ_2 分别为水、浆液的黏度; φ 为浆液的体积分数; t^* 为化学反应时刻。

引入 Bingham 模型,浆液-水流场控制方程^[19] 为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} \quad (5)$$

式中: \mathbf{u} 为流场速度矢量; ρ 为流体密度; t 为流动时间; p 为压力; $\boldsymbol{\tau}$ 为剪应力矢量,是黏性应力和雷诺应力总和, $\boldsymbol{\tau} = \tau_0 + \mu(t)\boldsymbol{\gamma}$,其中, τ_0 为初始屈服强度, μ 为黏度, $\boldsymbol{\gamma} = \nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T$; \mathbf{g} 为重力加速度矢量; \mathbf{f} 为表面张力的影响矢量; ∇ 为哈密顿算子。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = D \nabla^2 \varphi + R \quad (6)$$

式中: φ 为浆液的体积分数; D 为扩散系数; R 为汇或源项。

浆液黏度随时间变化函数表达为

$$\mu_2 = a + b(t - t^*)^c \quad (7)$$

式中: a 、 b 、 c 均为常数,可通过试验数据拟合得到。

浆液黏度随化学反应时间增加而增加,因此在流动过程中黏度时空分布不均匀。引入化学反应时刻 t^* ,可得到空间上化学反应时刻 t^* 的分布,从而得到空间上各个位置流动介质的物性参数。

化学反应时刻 t^* 输运方程^[19] 为

$$\frac{\partial t^*}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla t^* = 0 \quad (8)$$

采用 Galerkin 有限元方法^[20-22] 建立连续模型方程,利用其在分布空间上的离散模式,求解流场控制方程。将式(4)乘以权函数 \mathbf{w} ,并在域 Ω 上积分可得^[23]

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot \left(\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) dV + \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot (\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) dV = \\ & - \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot (\nabla p) dV + \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot [\nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u})] dV + \\ & \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot (\rho \mathbf{g}) dV - \int_{\Omega} \mathbf{w} \cdot \mathbf{f} dV \end{aligned} \quad (9)$$

式中: dV 为体积微元。

速度场求解,采用非连续分段式线性形函数^[23]。压力场求解,采用连续式的分段二次形函数。速度场形函数及解由该分布空间上的形函数线性组合表示。

压力 p 由连续分段二次形函数表示,即

$$p = \sum_{i=1}^N \psi_i p_i \quad (10)$$

式中: ψ_i 为节点 i 位置的形函数,且仅在 i 位置取值,其他节点位置为 0; p_i 是节点 i 位置的压力值。

连续方程基于有限元方法离散为^[19]

$$\sum_{i=1}^N (\mathbf{C}_i^T \mathbf{u} - \mathbf{r}_i) = 0 \quad (11)$$

式中: \mathbf{C}^T 为散度算子; \mathbf{r} 为应用 Dirichlet 边界条件下的曲面积分项; i 为节点编号; N 为节点总数。

离散后方程,采用压力投影法进行数值计算^[24-25]。

2 试验结果与分析

2.1 浆液初终凝时间

浆液初终凝时间随聚氨酯的加量而变化,其关系见表 5。

表 5 浆液固结时间变化情况

聚氨酯/%	初凝时间/min	终凝时间/min	1 d 强度/MPa
4	65	240	6.32
6	50	226	6.94
8	42	218	8.71
10	38	205	8.65
12	30	185	8.74
15	15	152	10.56

由表 5 可知,浆液初终凝时间可根据聚氨酯的加量灵活调整,可实现浆液初凝时间控制在 15~65 min,浆液终凝时间控制在 152~240 min。随着聚氨酯含量的增加,浆液凝固时间显著降低,其中 1 d 强度随聚氨酯含量增加呈现增加的趋势。现场施工中,该聚氨酯复合注浆材料,可根据现场的各种条件(灌浆孔距、灌浆压力、钻孔深度等)灵活调整聚氨酯的用量,用来调整浆材的初终凝时间。

2.2 力学性能分析

不同配比的聚氨酯复合注浆材料固结体的抗压、抗折强度及渗透系数见表 6。

表 6 固结体力学性能

编号	聚氨酯/%	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	28 d 抗折强度 (水养护)/MPa	28 d 抗压强度 (水养护)/MPa
1	4	1.192×10^{-6}	4.78	28.6
2	6	9.261×10^{-7}	5.04	28.5
3	8	6.681×10^{-7}	5.53	30.6
4	10	5.782×10^{-7}	5.87	33.2
5	12	3.450×10^{-7}	6.04	34.8
6	15	3.068×10^{-7}	6.52	34.7

由表 6 可知,随着聚氨酯用量增加,浆材固结体的抗渗性能和力学强度总体均呈现增长趋势,其渗透系数最小为 $3.068 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。这是因为聚氨酯聚合物,添加到水泥浆液后,聚氨酯微粒可填充于浆材体系之

中,改善材料的微观结构,增强材料体系骨架连接性能,并可减少体系中有效孔隙,从而降低渗透系数,有效提高固结体力学强度。

综合材料成本、浆材可注性和力学性能,选择聚氨酯占总质量 10% 的材料配比,进行后续室内研究和现场应用。

2.3 微观结构分析

浆液固结体微观结构见图 1。由图 1 可知,聚氨酯和水泥颗粒,形成了有机/无机杂化的空间互穿网络凝胶结构,增强了注浆材料固结体的力学性能和防渗性能。岩土颗粒呈团状、块状结构,颗粒间的孔隙被浆体填充,说明浆液具有团聚效应,且有很强胶结性和填充性。

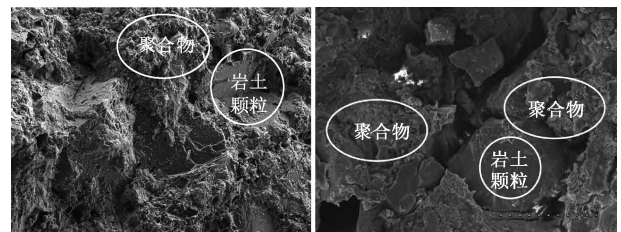


图 1 浆液固结体微观结构特征

2.4 浆液扩散和抗冲刷特征

不同流速下浆液抗冲刷特征见图 2。由图 2 可知,聚氨酯复合注浆材料在动水条件下具有良好的抗冲刷性能。当动水流速达到 1.5 m/s 时,在砂砾地层中浆液留存率超过 90%,并且注浆前砂砾地层中水深为 20.5 cm,注浆后浆液稳定时水深为 32.3 cm,截水时间也只有约 6 min。同时,浆液在动水环境下砂砾地层中的扩散程度较好,浆液呈现无阻碍扩散,并且在砂砾地层中充分充填,见图 3。通过现场取样进行力学性能测试,浆液在砂砾地层中固结体最大抗压强度达 34.8 MPa,渗透率在 $5.42 \times 10^{-7} \sim 9.86 \times 10^{-7} \text{ m/s}$,表明聚氨酯复合注浆材料在动水环境下砂砾地层介质中能较好充填,且具备良好的扩散性和抗冲稀释性。以上试验结果表明,该浆材适用于大裂隙、大溶蚀地层动水条件下的注浆堵水施工。

2.5 浆液抗动水冲释机理

聚氨酯复合注浆材料黏度变化规律见图 4。由图 4 可知,10% 聚氨酯含量的复合注浆材料,在动水环境下黏度变化历程分为初始上升、突变上升和稳定增加 3 个阶段。浆液进入动水环境,黏度首先进入初始上升阶段。从进入动水到 15 min 内,浆液黏度从 145 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 上升到 405 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,平均每分钟黏度增加 17.3 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,黏度值增加缓慢。随后浆液黏度进入突变上升期,15~20 min 内,浆液黏度从 405 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 上升

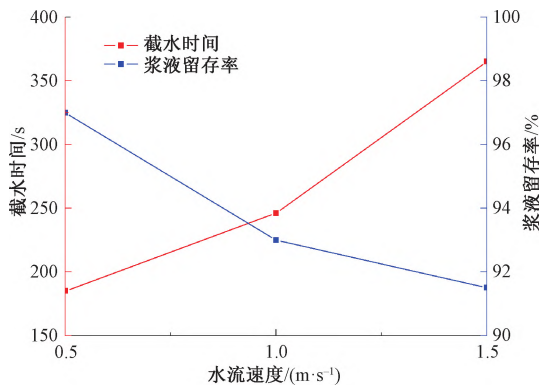


图 2 不同流速下浆液抗冲刷特征



图 3 注浆材料地层填充情况

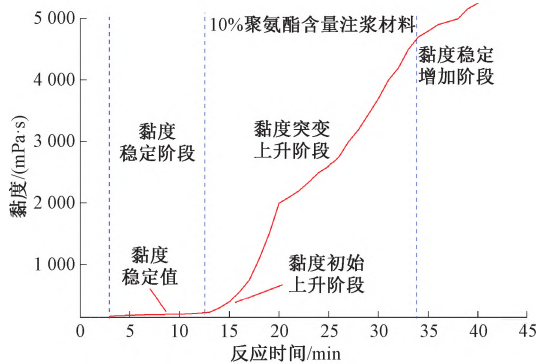


图 4 聚氨酯复合注浆材料黏度变化规律

到 2 010 mPa · s, 平均每分钟黏度增加 321 mPa · s, 黏度急剧上升。20~35 min 内, 浆液黏度从 2 010 mPa · s 上升到 4 800 mPa · s, 平均每分钟黏度增加 186 mPa · s, 黏度增长显著。最后, 浆液从 35 min 开始, 黏度进入稳定增加阶段, 35 ~ 40 min 内, 浆液黏度从 4 800 mPa · s 上升到 5 230 mPa · s, 平均每分钟黏度增加 86 mPa · s, 黏度增长趋势下降, 至 38 min 时, 浆液达到初凝。聚氨酯复合注浆材料在静水中优异的抗水分散能力见图 5。

从聚氨酯复合注浆材料的黏度变化历程, 及聚氨酯的疏水性物化特性可知, 浆液进入动水环境, 前期抗动水冲释能力主要由聚氨酯的疏水特性所赋予。凝胶化过程中, 体系中的自由水, 一部分逐渐转变成结合

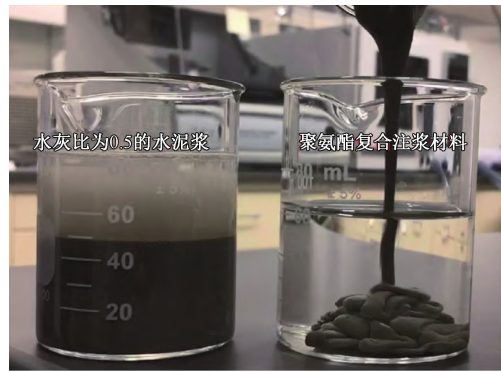


图 5 聚氨酯复合注浆材料抗静水分散性能

水, 在黏度突变上升阶段黏度快速增大, 让浆液在动水环境扩散阶段, 具备了优异的抗动水冲释能力。

固结体的抗压强度, 前期靠聚合物的物理和化学交联作用赋予, 水泥颗粒提高了凝胶体系的力学性能。后期, 聚氨酯和水泥颗粒形成了有机/无机杂化的空间互穿网络凝胶结构, 见图 6。凝胶体形成后, 水泥颗粒逐渐与凝胶体中的一部分自由水发生水化作用, 进一步提高了固结体的力学性能。

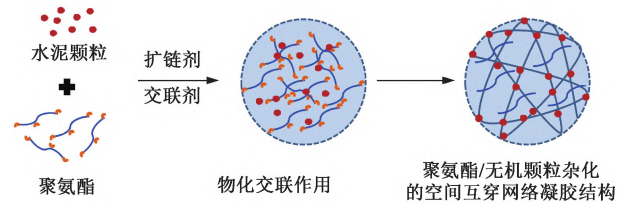


图 6 凝胶固结及抗动水冲释机理

3 浆液扩散数值模拟分析

3.1 几何模型和边界条件

利用 Galerkin 有限元法推导的流场控制方程, 进行注浆过程的数值模拟, 建立几何模型以模拟聚氨酯复合浆液在水平圆管内的流动过程, 见图 7。数值计算采用一维模型, 模型管道直径为 0.1 m, 长为 3 m, 管内设置两种处于饱充水状态的级配砂砾 (10~30、30~50 mm), 浆液以恒定流量注入, 设置计算工况、材料参数均与室内圆管注浆试验条件一致。注浆设定以 0.1 m/s 流速进行恒定流量注入, 分别模拟其注浆压力随时间和空间变化规律。

流场方程计算中, 水平圆管壁面为无滑移边界; 输运方程计算中, 水平圆管壁面为无通量边界条件。流场入口设置为压力或流量入口, 圆管另一端为边界压力出口, 压力为 0。流场初始速度设定为 0, 为静水状态。化学反应时刻输运场初始 t^* 设定为 0。

3.2 模型验证

为验证数值模型的可靠性, 将室内试验圆管注浆

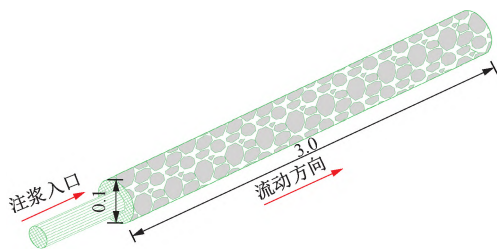


图 7 几何模型(单位:m)

试验所得数据,与上述模型同等参数条件下计算数据对比分析,见图 8。由图 8 可知,饱水环境下,两种级配注浆的计算结果和试验结果均表明,不同级配注浆介质的注浆压力变化曲线不同。级配 10~30 mm 的注浆压力提高速度比级配 30~50 mm 的注浆介质要快,说明级配渗透系数越大,注浆压力升高越慢;两种介质的注浆压力曲线计算结果,与实际试验结果进行对比结果表明,10~30、30~50 mm 级配,计算与实际最高误差分别为 11.65%、12.69%。由此可见,以上数值方法可用来描述聚氨酯复合浆液的注浆过程。误差存在的原因主要为数值模型模拟的是圆管边界无阻力理想状态,而室内试验圆管壁存在一定的流动阻力。

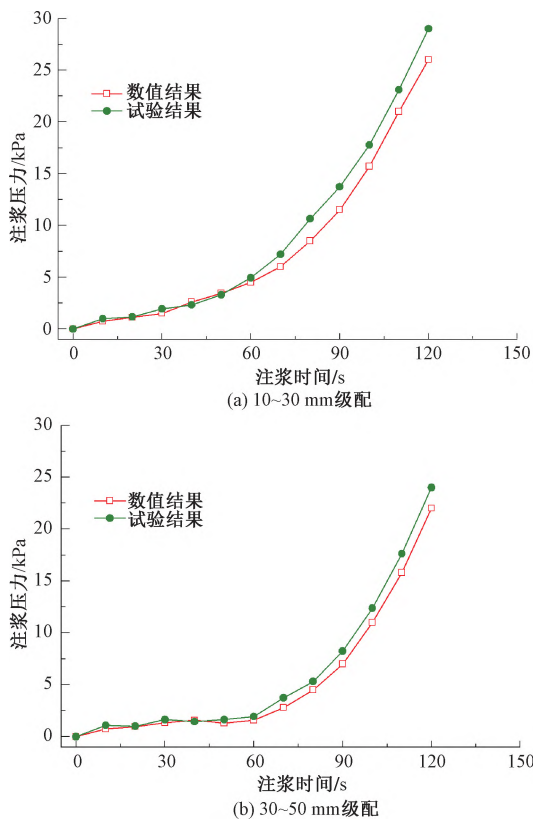


图 8 注浆试验与数值结果比较

3.3 数值模拟结果

本文利用以上数值模型,对聚氨酯复合浆液注浆过程的黏度时变性进行数值分析。通过对水槽冲刷试验进行测量,得到浆液黏度随时间变化见图 9。由

图 9 可知,速凝浆液黏度随时间非线性增加,注浆开始 15 min 以内浆液黏度较低,黏度最大值增加到约为初始黏度的 2 倍,低于 $0.87 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,保持了较好的流动性。15 min 以后浆液黏度迅速增加直至凝固,25 min 时浆液黏度增加至初始黏度的 30 倍以上。

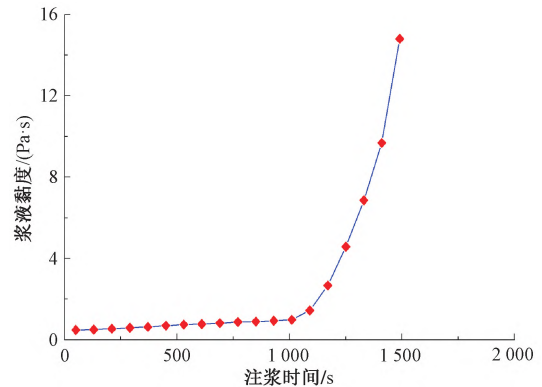


图 9 浆液黏度随时间变化曲线

将上述水槽试验形成的聚氨酯复合浆液黏度 μ , 随时间变化的曲线拟合函数为

$$\mu = 0.05 + 0.046(t - t^*)^2 \quad (12)$$

饱和静水和聚氨酯复合浆液的密度 ρ_1 、 ρ_2 分别为 996 、 $1500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。地下水的黏度设定为 $1.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。浆液材料初始剪切强度 τ_0 为 $0.39 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。裂隙中浆液不溶解于水,可以忽略浆液在水中的扩散。

将上述函数和试验参数代入流场控制方程,数值模拟浆液在圆管内的流动过程。浆液注入口设置为定压条件,压力分别设置为 0.5 、 1.0 、 2.0 、 3.0 kPa ,注入时间为 30 min 。计算得到不同注入压力条件下,浆液流场中特征参数随距离和时间的变化规律。

由于 25 min 时,浆液黏度增加至初始黏度的 30 倍以上,黏度随时间呈现明显的非线性变化,选取 25 min 时的注浆流场进行分析。不同入口压力下料浆压力和速度随距离的变化见图 10。

不同入口压力条件下,随距离增加,流场压力呈现出快速下降-缓慢下降-快速下降的 3 段变化,见图 10 (a)。不同压力条件下,注浆流场平均速度在空间上分布见图 10 (b),流场平均速度均随着注入距离增加呈指数降低,且入口平均速度随入口压力线性增加呈非线性变化。通常情况下,当流动介质物性参数在空间内一致时,流体压力随空间距离增加线性降低,平均速度几乎保持定值。浆液流场中的压力分布和平均速度分布与前者有明显区别,流体物性参数在空间上的分布,直接影响流场压力和平均速度的分布。此外,聚氨酯复合浆液流动过程中伴随不同程度的凝固效应,也会引起流体的物性参数随流动不停变化。

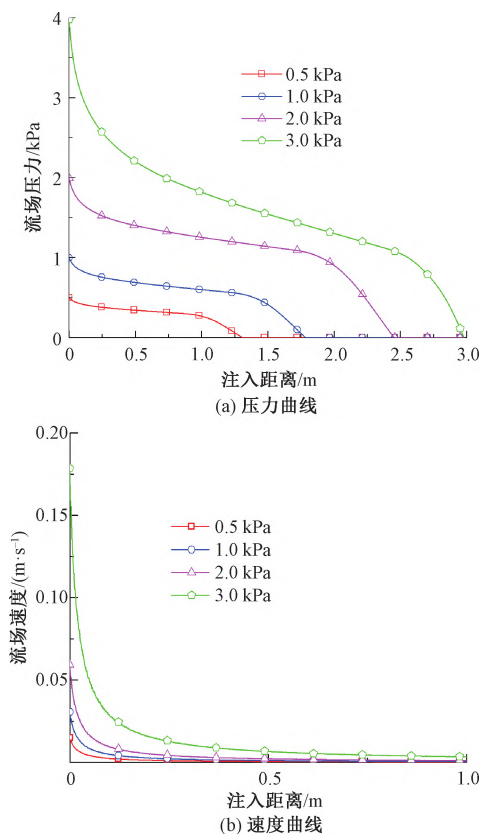


图10 不同入口压力下料浆压力和速度随距离变化

实际工程中,聚氨酯复合浆液注浆若不考虑浆液黏度时空分布不均匀,将引起很大误差。例如,注浆压力可能超过实际注入压力的10倍,而流动距离可能低于实际流动距离的0.5倍。考虑速凝浆液化学反应导致的浆液物性参数空间分布不均匀性,建立浆液-水流场数学模型是非常必要的。

4 现场工程应用

4.1 工程地质概况

大瑞铁路全长约330 km,东起大理,西至瑞丽,线路穿行于云贵高原西部边缘横断山脉南段,地势错综复杂^[26-27]。其中,大瑞铁路全线第3长大隧道的保山隧道段,全长16.097 km,位于云南省保山市隆阳区境内,属于I级高风险隧道,为全线重点控制性工程。全隧工程地质条件复杂,构造断裂发育,隧道穿过5条断层破碎带,隧道围岩破碎。隧道穿越横断山脉南段近山顶部位,斜坡呈上缓下陡的浑圆状,沟谷纵坡较大,且径流较长,不利于地下水向下排泄,该隧道存在突水、突泥灾害高风险。

4.2 隧道渗水特征

受断层及构造影响,隧址区内岩体破碎,裂隙发育,为地下水存储提供了空间条件,隧道开挖揭露该隧道富水地层将直接出现突水突泥灾害。其中,隧道洞

身深孔钻探揭露,富水地层中存在承压水,初始流量为3.6 L/s,随着钻孔不断加深,流量最高达到15 L/s。现场换孔位拔管后继续涌水,流量为10 L/s,说明该隧道动水储量大,地下水丰富^[28-29]。

4.3 现场注浆治理

现场注浆孔的孔径为63 mm,注浆段长度为7 m,注浆孔钻孔角度为0°。注浆管采用长、短管花管注浆,出浆孔直径为5~6 mm,沿管轴向间距为50 cm。结合聚氨酯复合注浆材料的性能参数,综合考虑注浆压力为1.0~2.0 MPa。隧道断面注浆施工完成后,钻孔取心率高,并且钻孔内只有少量水流,说明岩体裂隙中水流通道已实现封堵。同时,岩心里还夹杂着一定量的浆液固结体,说明通过聚氨酯复合注浆材料的注浆施工达到了封堵效果。围岩注浆封堵前后对比表明,富水地层注浆后开挖无渗水现象,说明整体封堵效果好,后期经过长时间监测,证实复合注浆材料良好的注浆效果与材料耐久性。

5 结论

本文基于聚氨酯复合注浆材料,分析了该材料的力学性能、微观结构特征、扩散性能和封堵机制,开展了注浆材料扩散特性和抗冲刷模拟的试验及现场应用研究,得到以下结论:

- (1) 基于化学改性和无机-高分子杂化技术,制备得到聚氨酯复合注浆材料,可注性和封堵性能优异。
- (2) 聚氨酯复合注浆材料中的聚氨酯和水泥颗粒,形成了有机/无机杂化的空间互穿网络凝胶结构,提高了浆液固结体的力学性能。
- (3) 聚氨酯复合注浆材料在动水环境下的砂砾地层介质中,能较好充填,具备良好的扩散性和抗水冲释性。
- (4) 采用有限元法建立了连续模型方程,数值模拟了聚氨酯复合注浆材料的流动过程,数值模拟结果与试验数据基本相符。
- (5) 现场突涌水注浆治理应用表明,聚氨酯复合注浆材料在山岭隧道富水地层中具有较强的扩散封堵与抗动水冲释性能,有效提高了富水地层整体性与稳定性。

参考文献:

- [1] 洪开荣.超长深埋高地应力TBM隧道修建关键技术[J].铁道学报,2022,44(3):1-23.
HONG Kairong. Key Technology for Construction of Ultra-long and Deep-buried TBM Tunnels with High Geostress [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 1-23.

- [2] 马伟斌. 铁路山岭隧道钻爆法关键技术发展及展望 [J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 64-85.
MA Weibin. Development and Prospect of Key Technology of Drilling and Blasting for Railway Mountain Tunnels [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 64-85.
- [3] 申玉生, 廖雄, 陈爱国, 等. 高压富水区山岭隧道施工注浆堵水技术研究 [J]. 公路交通科技, 2019, 36(6): 65-72.
SHEN Yusheng, LIAO Xiong, CHEN Aiguo, et al. Study on Technology of Grouting Water Plugging for Mountain Tunnel Construction in High Pressure and Water Rich Region [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(6): 65-72.
- [4] 帅建兵. 暗挖地铁车站穿越软弱地层注浆设计优化研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1508-1516.
SHUAI Jianbing. Research on Grouting Design Optimization of Underground Metro Station Crossing through Weak Strata [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(6): 1508-1516.
- [5] 赵国堂. 中国高速铁路通用建造技术研究及应用 [J]. 铁道学报, 2019, 41(1): 87-100.
ZHAO Guotang. Research and Application of General Construction Technologies for High-speed Railway in China [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(1): 87-100.
- [6] OZDEMIR M, OTERKUS S, OTERKUS E, et al. Evaluation of Dynamic Behaviour of Porous Media Including Micro-cracks by Ordinary State-based Peridynamics [J]. Engineering With Computers, 2023, 39(1): 61-79.
- [7] 王小龙, 王起才, 张戎令, 等. 水泥-水玻璃双液注浆力学特性的试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(10): 1926-1932.
WANG Xiaolong, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Experimental Study on Mechanical Characteristics of Cement-silicate Double Solution Grouting [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(10): 1926-1932.
- [8] 张民庆, 黄鸿健. 齐岳山隧道高压裂隙水注浆堵水技术 [J]. 铁道工程学报, 2010, 103(1): 68-72.
ZHANG Minqing, HUANG Hongjian. Technology for Blocking Water by Grouting for High-pressure Cranny Water of Qiyueshan Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 103(1): 68-72.
- [9] ZHANG C, YANG J S, FU J Y, et al. A New Clay-cement Composite Grouting Material for Tunnelling in Underwater Karst Area [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7): 1863-1873.
- [10] 沙飞, 李术才, 刘人太, 等. 富水砂层高效注浆材料试验与应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1420-1433.
SHA Fei, LI Shucai, LIU Rentai, et al. Performance and Engineering Application of Effective Microfine Cement-based Grout (EMCG) for Water-rich Sand Strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1420-1433.
- [11] SONG D Q, CHEN J D, CAI J H. Deformation Monitoring of Rock Slope with Weak Bedding Structural Plane Subject to Tunnel Excavation [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(11): 251.
- [12] 赵国梁, 申铁军. 基于隧道水渗条件下的高聚物注浆材料的研究 [J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(7): 125-127.
ZHAO Guoliang, SHEN Tiejun. Study on Polymer Grouting Material Based on Tunnel Water Infiltration [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2022, 45(7): 125-127.
- [13] 周新星, 郑玉婴, 陈乘鑫, 等. 隧道突发水害聚氨酯复合注浆材料的制备及性能评价 [J]. 化学工程与装备, 2022, 8: 4-10.
ZHOU Xinxing, ZHENG Yuying, CHEN Chengxin, et al. Preparation and Performance Evaluation of Polyurethane Composite Grouting Material for Tunnel Burst Water Damage [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2022, 8: 4-10.
- [14] SALEH S, YUNUS N Z M, AHMAD K, et al. Improving the Strength of Weak Soil Using Polyurethane Grouts: a Review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 738-752.
- [15] 国家市场监督管理总局. 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation. Test Method of Cements Mortar Strength (ISO Method): GB/T 17671—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [16] WEI Y, WANG F M, GAO X, et al. Microstructure and Fatigue Performance of Polyurethane Grout Materials under Compression [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9): 04017101.
- [17] ZHANG Q S, ZHANG L Z, LIU R T, et al. Grouting Mechanism of Quick Setting Slurry in Rock Fissure with Consideration of Viscosity Variation with Space [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70: 262-273.
- [18] FRANK M W. Fluid Mechanics [M]. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
- [19] JOHN D A. Computational Fluid Dynamics [M]. New York: McGraw-Hill Education, 1995.
- [20] 程鹏达, 朱心广, 冯春, 等. 再悬浮底泥中非吸附性污染物释放的数值模拟 [J]. 力学学报, 2020, 52(3): 689-697.
CHENG Pengda, ZHU Xinguang, FENG Chun, et al. Numerical Simulation on the Release of Non-adsorption Pollutants during the Sediment Resuspended [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(3): 689-697.

- [21] 章本照.流体力学中的有限元方法 [M].北京:机械工业出版社,1986.
ZHANG Benzha. Finite Element Method in Fluid Mechanics [M]. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [22] 张丙强.半无限平面双孔平行隧道渗流场解析研究 [J].铁道学报,2017,39(1):125-131.
ZHANG Bingqiang. Analytical Solution for Seepage Field of Twin-parallel Tunnels in Semi-infinite Plane [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(1):125-131.
- [23] THOMAS J R, HUGHES L P, FRANCA, et al. A New Finite Element Formulation for Computational Fluid Dynamics; VIII. the Galerkin/Least-squares Method for Advective-diffusive Equations [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1989, 73(2):173-189.
- [24] ELMAN H C, SILVESTER D J, WATHEN A J. Finite Elements and Fast Iterative Solvers; with Applications in Incompressible Fluid Dynamics [M]. Oxford: Oxford University Press, 2005.
- [25] CHORIN A J. Numerical Solution of the Navier-stokes Equations [J]. Computational Fluid Mechanics, 1989, 22(4):17-34.
- [26] 龚秋明,王瑜,卢建炜,等.基于对TBM隧道施工影响的断层带初步分级 [J].铁道学报,2021,43(9):153-159.
GONG Qiuming, WANG Yu, LU Jianwei, et al. Preliminary Classification of Fault Zone Based on Fault Zone Influence on TBM Tunnel Construction [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(9):153-159.
- [27] 管学茂,张海波,杨政鹏,等.高性能无机-有机复合注浆材料研究 [J].煤炭学报,2020,45(3):902-910.
GUAN Xuemao, ZHANG Haibo, YANG Zhengpeng, et al. Research of High Performance Inorganic-Organic Composite Grouting Materials [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3):902-910.
- [28] 李林毅,阳军生,王树英,等.体外排水方式在隧道工程中的研究及应用 [J].铁道学报,2020,42(10):118-126.
LI Linyi, YANG Junsheng, WANG Shuying, et al. Research and Application of External Drainage Method in Tunnel Project [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(10):118-126.
- [29] 邓宏科,郑光,邓韧.大瑞铁路越岭段地震地质灾害危险性评价研究 [J].路基工程,2021(6):194-198.
DENG Hongke, ZHENG Guang, DENG Ren. Risk Assessment of Seismic Geological Hazards in Crossing-mountain Area of the Dali—Ruili Railway [J]. Subgrade Engineering, 2021(6):194-198.

(责任编辑 王德刘霞)