

DOI: 10.11779/CJGE20221530

温度对自膨胀高聚物浆液在裂隙中扩散行为影响 试验研究

贾赫扬^{1,2}, 李晓龙^{*1,2}, 曹东东³, 王珊珊³, 桂云祥^{1,2}, 钟燕辉^{1,2}, 张蓓^{1,2}

(1. 郑州大学水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001;
3. 河南水利勘测设计研究院有限公司, 河南 郑州 450016)

摘要: 为了研究温度对膨胀型聚氨酯高聚物注浆材料在裂隙中扩散特性的影响, 设计了平板裂隙注浆模型试验装置, 以工程中应用的聚氨酯高聚物浆液为对象, 开展了高聚物注浆系列试验, 测试了不同浆液预热温度、环境温度、注浆量条件下高聚物浆液在平板裂隙中的扩散特性, 得到了不同工况下浆液扩散速率、扩散范围以及浆液和裂隙壁内温度分布随时间变化情况。分析结果表明: 浆液预热温度对高聚物扩散过程具有重要影响, 相同注浆量条件下, 预热温度越高, 浆液扩散速率越快, 初凝时间越早, 浆液扩散半径随着预热温度的升高逐渐增大, 低温下浆液扩散半径显著低于高温下的试验结果; 浆液扩散过程与其化学反应进程不完全同步, 其化学反应终止时间晚于浆液初凝时间; 浆液温度随时间呈现先升高然后逐渐下降、变化速率由快至慢的演化特征, 同一时刻注浆孔中心处温度最高, 沿径向逐渐递减; 浆液升温速率和温度峰值随预热温度和环境温度的升高而增大; 浆液扩散过程中高聚物与裂隙壁间存在明显热传导效应。试验结果对于高聚物裂隙注浆机理研究和注浆技术研发具有参考作用。

关键词: 高聚物; 裂隙注浆; 扩散机理; 温度; 试验

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)04-0794-09

作者简介: 贾赫扬(1993—), 男, 博士, 主要从事高聚物裂隙注浆理论与试验等方面的研究工作。E-mail: Jiahychina@outlook.com。

Experimental study on influences of temperature on diffusion behaviors of self-expanding polymer slurry in fractures

JIA Heyang^{1,2}, LI Xiaolong^{*1,2}, CAO Dongdong³, WANG Shanshan³, GUI Yunxiang^{1,2}, ZHONG Yanhui^{1,2}, ZHANG Bei^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Water & Power Engineering Consulting CO., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: In order to study the influences of temperature on the fracture diffusion characteristics of expansive polyurethane polymer grouting materials, a plate fracture grouting model test device is designed. With a polyurethane polymer slurry applied in engineering as the research object, a series of polymer grouting tests are carried out. The diffusion characteristics of polymer slurry in plate fractures under different slurry preheating temperatures, ambient temperatures and grouting amounts are tested. The changes of slurry diffusion rate, slurry diffusion range, and temperature distribution of slurry and fracture wall under different working conditions are obtained. The analysis results show that the preheating temperature of slurry has an important influence on the diffusion process of polymer. Under the same grouting amount, the higher the preheating temperature, the faster the slurry diffusion rate and the earlier the initial gel time. The slurry diffusion range gradually increases with the increase of the preheating temperature. The slurry diffusion radius at low temperatures is significantly lower than the test results at high temperatures. The slurry diffusion process is not synchronized with the chemical reaction process, and the chemical reaction termination time is later than the initial gel time. The slurry temperature firstly rises and then gradually decreases with time, and the change rate is from fast to slow. At the same time, the temperature at the center of the grouting hole is the highest and gradually decreases along the radial reaction. The rising rate

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178401); 河南高校科技创新团队支持计划项目(23IRTSTHN014); 河南省2021年水利科技攻关项目(72); 中原英才计划项目(234200510014)

收稿日期: 2022-12-12

***通信作者** (E-mail: lx11977@zzu.edu.cn)

and peak value of slurry temperature increase with the increase of the preheating temperature and ambient temperature. There is an obvious heat conduction between the slurry and the fracture wall during the process of slurry diffusion. The test results can be used as a reference for the researches on the polymer fracture grouting mechanism and grouting technology.

Key words: polymer; fracture grouting; diffusion characteristic; temperature; test

0 引言

注浆是裂隙岩体加固防渗的主要手段,在基础设施领域得到了广泛应用^[1-2]。深入了解浆液在岩体裂隙中的运移规律对于工程实践具有重要指导意义。

试验是研究注浆扩散机理的重要途径,国内外学者在该领域开展了大量研究工作。Funchag 等采用亚克力板制作了单裂隙平板注浆试验装置,研究了宾汉姆浆液黏度、屈服应力和扩散特性^[3]。Sui 等利用单裂隙模型试验台,通过正交试验研究了动水条件下裂隙宽度、初始水流速度、浆液胶凝时间、注浆量等对注浆堵漏效率的影响^[4]。李术才等^[5]、刘人太等^[6]研制了大尺寸平板裂隙注浆模型试验系统,开展了裂隙岩体动水注浆模型试验研究,对浆液扩散性能和封堵效果进行了定量评价。Wang 等^[7]设计了一种微裂隙注浆试验系统,采用多种超细水泥浆液,进行不同裂隙开度条件下注浆试验,揭示了注浆压力和注浆量对注浆加固效果的影响。Liang 等^[8]设计了倾斜裂隙模型试验装置,研究了不同裂隙倾角条件下,注浆对水砂混合物排放控制效果的影响。总体来看,上述研究主要针对水泥、水玻璃等常密度浆液,所得结论不适用于解释具有自膨胀特性的高聚物注浆材料的扩散行为。

近年来,具有自膨胀特性的聚氨酯类高聚物注浆材料及其高压注射技术在国际上发展十分迅速,成为岩土工程领域较为活跃的发展方向之一^[9]。高聚物浆液具有反应速度快、膨胀率高、防水抗渗、安全环保等特点,成为综合性能较优的注浆材料,在地下工程水害防治等领域得到广泛应用^[10]。为揭示高聚物材料裂隙注浆扩散机理,Hao 等^[11]和 Li 等^[12]设计了单裂隙平板注浆模型试验装置,测试了不同注浆量条件下高聚物浆液在裂隙中的扩散特性和压力分布。Liang 等^[13]研究了高聚物浆液在竖向裂隙中的膨胀扩散特性。

一些学者已注意到高聚物浆液反应过程中的高放热现象,石明生等研究了双组分聚氨酯高聚物材料在固化过程中的温度变化规律^[14]。郝梅美^[15]研究发现,在相同环境温度下,高聚物膨胀速率随浆液预热温度的升高而增大,原因在于提高预热温度能够加快浆液化学反应速度,加速体系升温 and 物理发泡剂气化,从而使浆液膨胀速率加快。

可以推断,当浆液流动过程中与周围介质之间由于温差发生热传导时将改变浆液温度场分布,进而影

响其反应速率和扩散过程。尤其对于裂隙注浆,由于裂隙面延展范围大、开度小,浆液与裂隙壁接触面积大,因温差产生的热传导对浆液温度场及其扩散过程的影响无疑会更加显著。但目前关于温度和热传导效应对高聚物裂隙注浆扩散行为的影响仅限于定性了解,缺乏系统深入的试验研究。

基于这一背景,本文设计了平板裂隙注浆模型试验装置,以一种工程中常用的聚氨酯高聚物浆液为对象,开展了系列注浆试验,测试不同条件下高聚物浆液在平板裂隙中的扩散特性,分析浆液预热温度、环境温度、注浆量等因素对浆液扩散行为的影响,研究高聚物扩散过程浆液温度场变化及分布特征,旨在深化对高聚物裂隙注浆扩散机理的认识,为高聚物注浆工艺设计和施工方案制定提供参考依据。

1 裂隙注浆试验介绍

1.1 试验装置

试验装置由可视化裂隙注浆平台,温度采集系统,高聚物注浆系统 3 部分组成,试验装置组成如图 1 所示。

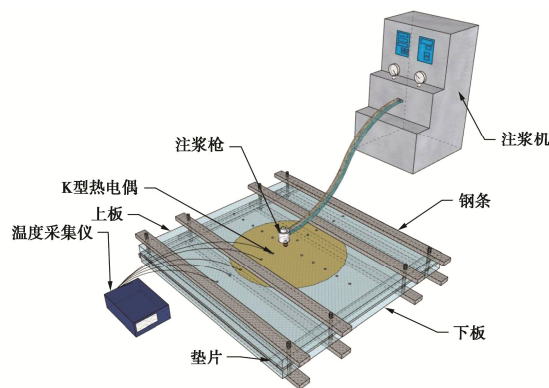


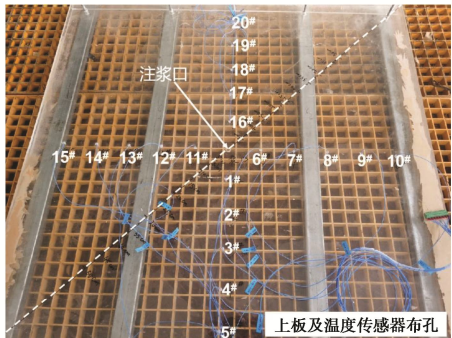
图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic plot of test device

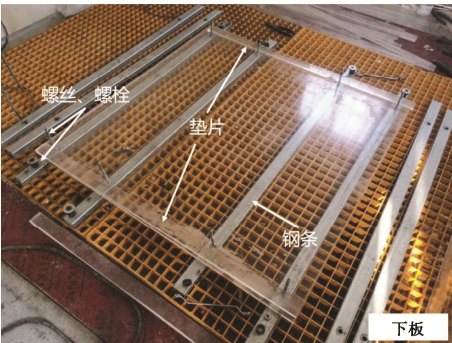
裂隙注浆平台由上下两块 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 15\text{ mm}$ 尺寸透明亚克力板,加固装置及垫片构成,如图 2 所示。在上板表面中心处钻直径 10 mm 圆孔作为注浆孔。为避免亚克力板在浆液膨胀压力下产生过大变形,在上、下板外侧分别放置 4 根 $1.5\text{ m} \times 50\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 钢条,利用螺栓将钢条与亚克力板固定,提升亚克力板抵抗变形能力。通过在上、下板间放置长条状垫片形成裂隙空间。为安设温度传感器,以注浆孔为中心,在上板面沿两垂直中轴线方向钻直径 2 mm 圆孔,相

邻两孔间隔 10 cm，其中，#1~#15 孔钻透板底，#16~#20 孔钻深 7.5 mm（上板厚度一半）。

温度采集系统如图 3 所示，包含温度采集仪和 K 型热电偶。温度采集仪为慧谱 TCP-X 多路温度采集仪，能够精确快速、稳定可靠地记录高聚物膨胀扩散过程中的温度变化。把 K 型热电偶探头插入预先布好的钻孔中，在孔周围涂抹热熔胶将其黏结固定。如图 4 所示，#1~#10 号探头悬浮于裂隙中，用于测量高聚物浆液温度，#11~#15 号探头紧贴亚克力板内侧，用于测量浆液扩散过程中高聚物与亚克力板的接触温度，#16~#20 号探头位于亚克力板内部，用于测量亚克力板壁面内温度。



(a) 裂隙上壁面板



(b) 裂隙下壁面板

图 2 可视化裂隙注浆平台

Fig. 2 Visual fracture grouting platform

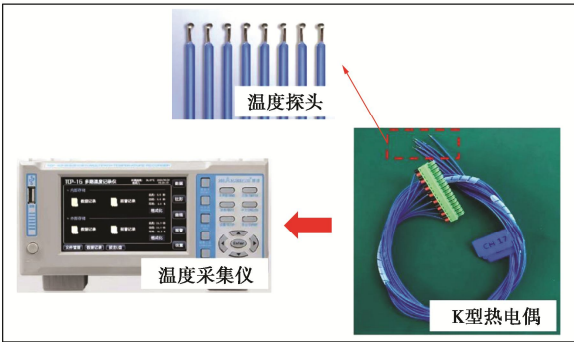


图 3 温度采集系统

Fig. 3 Temperature acquisition system

高聚物注浆系统采用重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室开发的集成式多功能注浆系

统。该系统主要由供料子系统和注射子系统组成，供料子系统将高聚物 A，B 两种原料按一定比例吸入其内部，利用加热器将两种原料加热至设定的预热温度后通过输料管送入注射子系统中，经注射枪高速混合后高压输出，完成注浆过程。

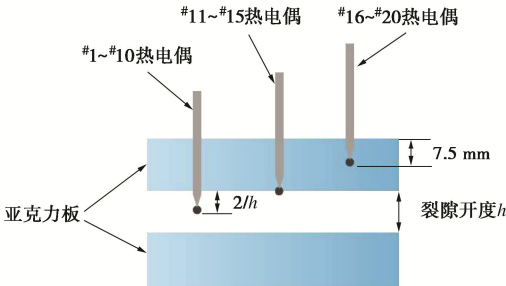


图 4 热电偶布置示意图

Fig. 4 Schematic plot of thermocouple layout

1.2 试验材料

试验采用的聚氨酯高聚物浆液由 A，B 两种组分构成，A 组分为多亚甲基多苯基多异氰酸酯，B 组分主要由多元醇、催化剂、发泡剂等构成。A，B 两种组分的质量混合比为 1.1：1，材料配比组成见表 1。高聚物浆液黏度在初凝前基本保持稳定（小于 0.8 Pa·s），接近初凝时黏度急剧升高；浆液固化体抗压强度和抗拉强度随材料密度的增大而增大，当材料密度为 0.9 g/cm³ 时，抗压和抗拉强度分别达到 36 MPa 和 13 MPa；浆液固化体具有较好的抗渗性能，渗透系数为 1×10⁻⁸~1×10⁻⁹ cm/s。

表 1 高聚物浆液材料配比

Table 1 Proportioning of polymer slurry materials

组分	原料	质量分数/%
A 组分	多亚甲基多苯基多异氰酸酯	100
	硬泡聚醚多元醇体系	35
	聚酯多元醇（PS-3152）	15
	阻燃剂（磷酸三乙酯）	10
B 组分	催化剂体系	2
	表面活性剂（L6950）	0.5
	物理发泡剂	5
	化学发泡剂	0.5
	其它	32

该浆液的固化过程主要包括两个化学反应——凝胶反应和发泡反应。异氰酸酯和多元醇反应生成聚氨酯的过程被称为凝胶反应，其反应方程式为

$$n\text{NCO}-\text{R}-\text{NCO}+n\text{HO}-\text{R}'-\text{OH}\rightarrow$$

$$-[\text{O}-\text{R}'-\text{O}-\text{CONH}-\text{R}-\text{NHCO}]_n-$$

在采用水作为化学发泡剂的情况下，异氰酸酯和水反应生成脲和二氧化碳的反应被称为发泡反应，其反应方程式为

$$2\text{R}-\text{NCO}+\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{R}-\text{NH}-\text{CO}-\text{NH}-\text{R}+\text{CO}_2\uparrow$$

在高聚物浆液被注入裂隙后，迅速发生化学反应，释放大量热能，一方面促使浆液体系温度不断上

升, 加速反应进行, 另一方面, 使浆液中溶解的液态物理发泡剂逐渐气化形成大量微小闭孔气泡悬浮于浆液中, 连同发泡反应生成的二氧化碳气体, 促使浆液体积膨胀, 驱动浆体流动。

1.3 试验过程

首先组装裂隙注浆试验平台, 然后连接 K 型热电偶与温度采集仪, 待环境温度达到设定值之后开始注浆试验。利用高聚物注浆系统将预热至设定温度的浆液通过注射枪高压 (注浆压力 7 MPa) 注入裂隙中, 此后注浆压力撤去, 高聚物浆液依靠其自身的化学反应膨胀, 驱动浆液流动扩散, 观察高聚物扩散过程, 同步记录温度变化。重复上述步骤, 依次开展试验, 试验各影响因素取值列于表 2 中。

表 2 试验各影响因素取值

Table 2 Values of influencing factors of tests			
编号	注浆量/g	浆液预热温度/℃	环境温度/℃
#1	500	30	20
#2	625	40	30
#3	750	50	—

2 试验结果分析

2.1 高聚物浆液扩散形态及温度变化和分布特征

图 5 所示为裂隙开度 7 mm, 注浆量 500 g, 预热温度 40℃, 环境温度 30℃ 条件下高聚物浆液在裂隙中的扩散过程, 高聚物浆液被注入裂隙后开始发生化学反应, 浆液以圆饼状向周围迅速膨胀扩散, 由最初的透明液态逐渐转变为淡黄色固态。图 6, 7 分别为对应工况 $r=10, 20\text{ cm}$ 测点处浆液温度随时间变化曲线和不同时刻浆液温度沿径向分布情况, 可以看到, 高聚物浆液温度在反应过程中先快速升高, 达到峰值后逐渐降低, 温度下降速度低于上升速度; 充填区域内的浆液温度分布随时间不断变化, 任一时刻, 在注浆孔中心处温度最高, 沿径向逐渐降低。

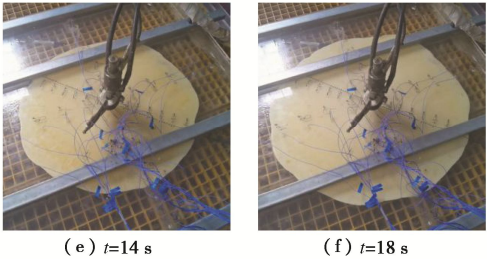
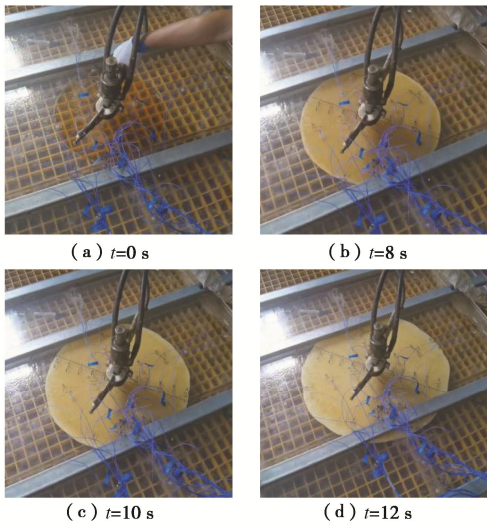


图 5 高聚物浆液在裂隙中扩散过程
Fig. 5 Fracture diffusion process of polymer slurry

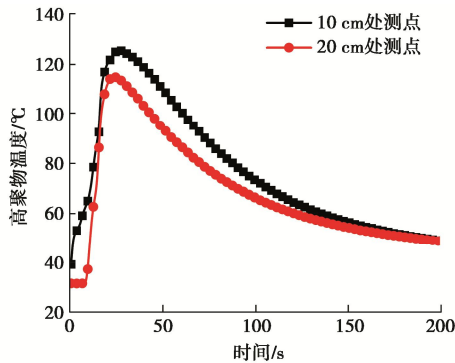


图 6 注浆量 500 g, 预热温度 40℃, 环境温度 30℃ 不同测点处高聚物温度随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curves of polymer temperature with time at different measuring points under grouting amount 500 g, preheating temperature 40℃ and ambient temperature 30℃

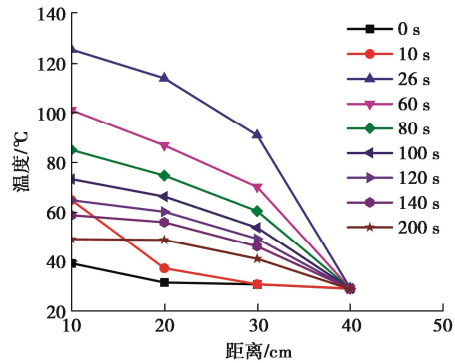


图 7 注浆量 500 g, 预热温度 40℃, 环境温度 30℃ 不同时刻高聚物浆液温度沿径向变化曲线

Fig. 7 Radial variation curves of polymer temperature with time at different time under grouting amount 500 g, preheating temperature 40℃ and ambient temperature 30℃

2.2 预热温度对浆液膨胀扩散过程的影响

裂隙开度 7 mm, 环境温度 30℃, 预热温度分别为 30℃, 40℃ 和 50℃ 条件下, 注浆量为 500, 625 g 时浆液扩散半径随时间的变化如图 8 所示, 对应工况的浆液最终扩散半径如图 9 所示。从图 8 可以看出, 不同注浆量条件下, 浆液扩散过程均表现出相似特征, 预热温度越高, 浆液扩散速率越快, 初凝时间越早,

预热温度 30℃时的扩散速率和初凝时间显著低于 40℃和 50℃时的测试结果。当注浆量为 500 g, 浆液预热温度 30℃, 40℃, 50℃时, 其扩散平均速率分别为 1.09, 2.03, 2.31 cm/s, 初凝时间分别为 22, 18, 16 s。注浆量 625 g, 预热温度 30℃, 40℃, 50℃时的平均扩散速率分别为 1.04, 2.25, 2.73 cm/s, 分别在 24, 18, 15 s 时达到初凝, 与 500 g 时对应预热温度条件下的初凝时间较为接近。

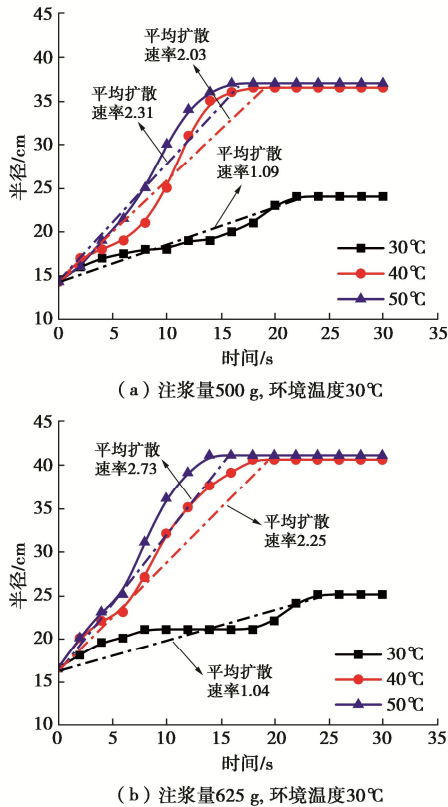


图 8 不同预热温度条件下高聚物扩散半径随时间变化曲线
Fig. 8 Variation curves of polymer diffusion radius with time under different preheating temperature conditions

从图 9 中可以发现, 预热温度为 40℃和 50℃时浆液扩散范围较为接近, 而预热温度 30℃时的浆液最终扩散半径远小于前两者。注浆量 500 g 时, 预热温度 30℃, 40℃, 50℃条件下浆液的最终扩散半径分别为 24, 36.5, 37 cm; 注浆量 625 g 时, 3 种预热温度条件下浆液最终扩散半径分别为 25, 40.5, 41 cm。分析其原因在于, 当预热温度为 30℃时, 化学反应速率较慢, 浆液反应不充分, 体系温度较低, 物理发泡剂未充分气化, 导致体积膨胀倍率较低。从试验结果来看, 预热温度 40℃以上时浆液反应已较为充分, 物理发泡剂充分气化, 因此随着温度的继续升高浆液扩散半径不再显著增加。

裂隙开度为 7 mm, 环境温度为 30℃, 预热温度为 50℃, 注浆量分别为 500, 625 g 时高聚物扩散半径及温度随时间变化曲线如图 10 所示。可以看到, 当注

浆量为 500 g 时, 浆液在 14 s 时达到初凝, 此后扩散范围不再增大, 但温度仍继续上升, 19 s 时达到峰值 (132℃), 之后逐渐下降。注浆量 625 g 时的试验结果表现出类似特征, 表明高聚物浆液化学反应进程与其扩散过程并不同步, 浆液化学反应终止时间晚于其初凝时间。

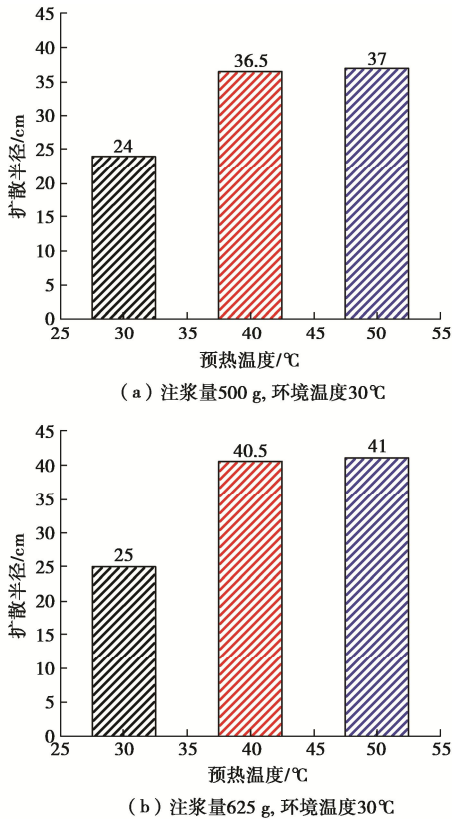


图 9 不同注浆量时高聚物扩散半径-预热温度变化柱状图
Fig. 9 Histograms of polymer diffusion radius-preheating temperature change under different grouting amounts

2.3 预热温度对浆液温度的影响

图 11 为注浆量 750 g, 裂隙开度 7 mm, 环境温度 30℃, 预热温度 30℃, 40℃, 50℃条件下, 距离注浆孔 10, 20 cm 测点处高聚物浆液温度随时间变化曲线; 图 12 为预热温度 40℃, 50℃条件下, $t=20, 40$ s 时浆液温度沿径向分布情况。可以看出, 不同工况下高聚物温度变化均呈现先升高后下降的趋势。预热温度越高, 浆液温度变化速率越快, 达到峰值的时刻越早。在 10 cm 测点处, 当预热温度为 30℃, 40℃, 50℃时, 浆液温度分别在 68, 34, 20 s 达到峰值, 峰值温度分别为 105℃, 129℃, 151℃。在温度下降阶段, 预热温度 30℃工况下浆液温度下降速度慢于其他两种工况, 分析其原因可能是由于该工况下浆液扩散范围较小, 与裂隙壁接触面积小, 因此受热传导效应影响小, 使浆液温度下降速率相对较慢。在其它条件相同的情况下, 同一时刻预热温度越高, 对应测点处浆液温度越高。

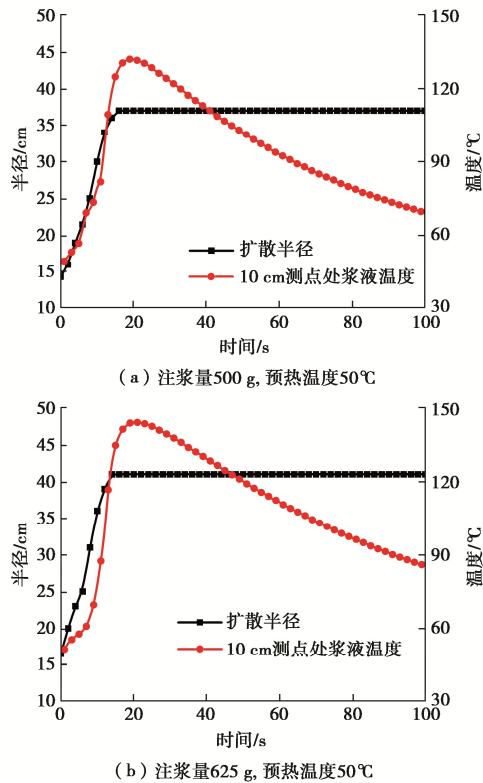


图10 不同注浆量时高聚物扩散半径、温度随时间变化曲线

Fig. 10 Variation curves of polymer diffusion radius and temperature with time under different grouting amounts

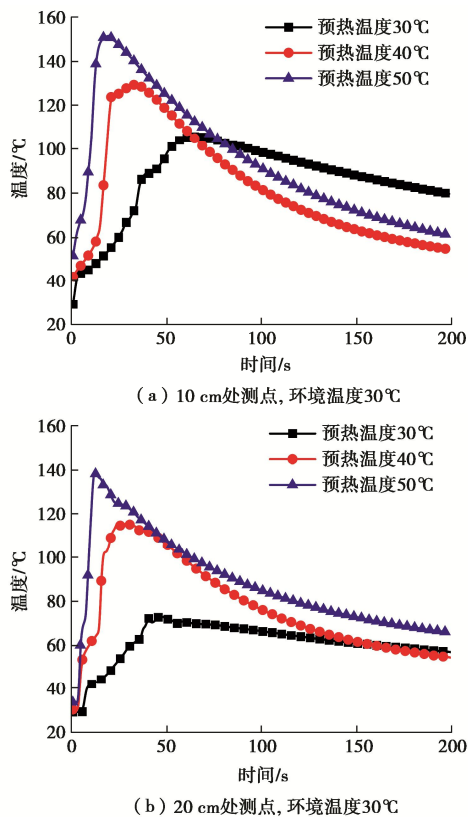


图11 注浆量750 g不同预热温度、不同位置处浆液温度随时间变化曲线

Fig. 11 Variation curves of slurry temperature with time at different preheating temperatures and different positions under grouting amount 750 g

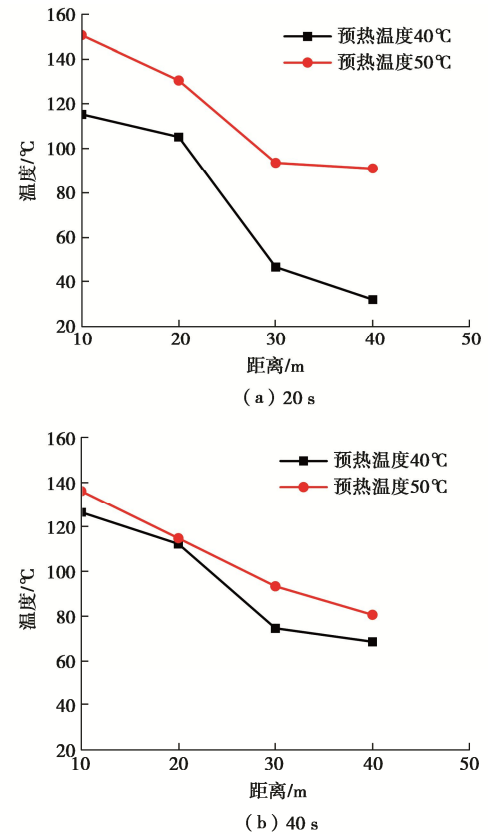
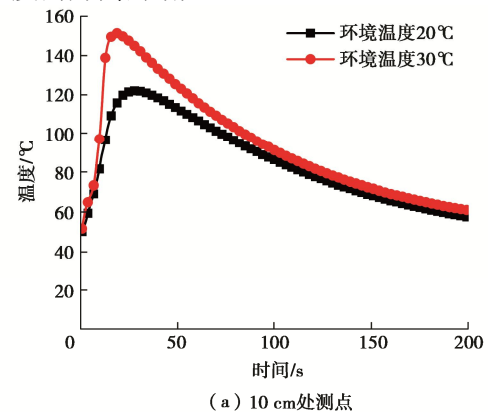


图12 注浆量750 g不同预热温度、不同时刻浆液温度沿径向分布曲线

Fig. 12 Distribution curves of slurry temperature along radial direction at different preheating temperatures and different time under grouting amount 750 g

2.4 环境温度对浆液温度的影响

裂隙开度7 mm, 注浆量750 g, 预热温度50℃, 环境温度20℃和30℃条件下, $r=10, 20$ cm测点处浆液温度随时间变化曲线和 $t=30, 60$ s时高聚物温度径向分布情况分别如图13, 14所示。可以看出, 环境温度越高, 浆液温度上升速率越快, 达到峰值的时刻越早, 环境温度30℃时的浆液温度和上升速率始终高于环境温度20℃时的试验结果; 10 cm测点处, 前者浆液温度在20 s时达到峰值151℃, 而后者在22 s时才达到峰值133℃; 同一时刻注浆孔中心处浆液温度最高, 沿径向逐渐降低, 在不同位置处, 浆液温度随着环境温度的升高而增大。



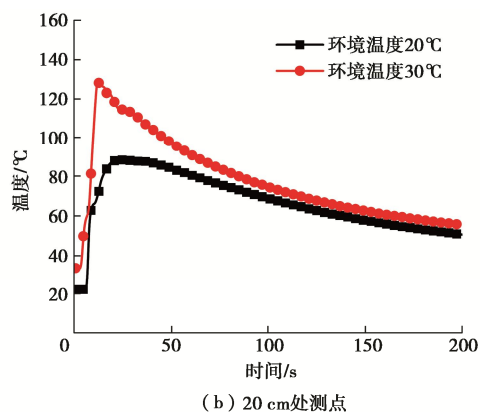


图 13 注浆量 750 g, 预热温度 50°C 不同环境温度不同位置处浆液温度随时间变化曲线

Fig. 13 Variation curves of slurry temperature with time at different ambient temperatures and different positions under grouting amount 750 g and preheating temperature 50°C

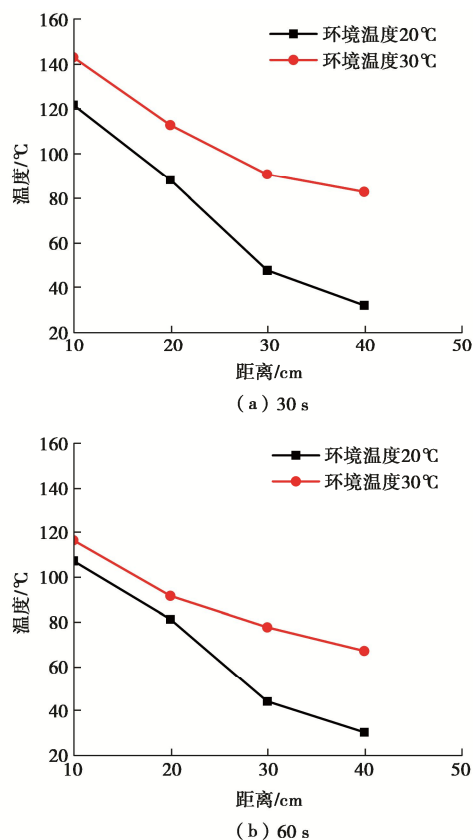


图 14 注浆量 750 g, 预热温度 50°C 不同环境温度不同时刻浆液温度沿径向分布曲线

Fig. 14 Distribution curves of temperature along radial direction at different ambient temperatures and different time under grouting amount 750 g and preheating temperature 50°C

2.5 高聚物浆液与裂隙壁热传导效应

预热温度 50°C, 环境温度 30°C, 裂隙开度 7 mm, 注浆量 750 g 时, $r=10$, 20 cm 测点处高聚物温度、接触面温度及裂隙壁内温度随时间变化曲线及 $t=30$, 50 s 时以上 3 类温度的径向分布情况分别如图 15, 16 所

示。从图 15 可以看出, 高聚物温度与接触面温度随时间变化趋势基本保持同步, 先升高然后逐渐降低, 几乎同时达到峰值, 受热传导作用影响, 过峰值后两者温度逐渐下降, 但相同位置处接触面温度始终低于高聚物温度。在 10 cm 测点处, 高聚物和接触面峰值温度分别为 151°C, 93°C, 在 20 cm 测点处, 两者的峰值温度分别为 129°C, 80°C。裂隙壁内温度在初始时刻与环境温度相同, 然后随时间缓慢升高, 在测试时间范围内始终低于接触面温度。200 s 时 10 cm 测点处温度达到 33.8°C, 20 cm 测点处温度达到 32.07°C。其原因在于, 在测试时间范围内浆液温度始终高于裂隙壁面温度, 受热传导效应影响, 裂隙壁内温度逐渐上升。

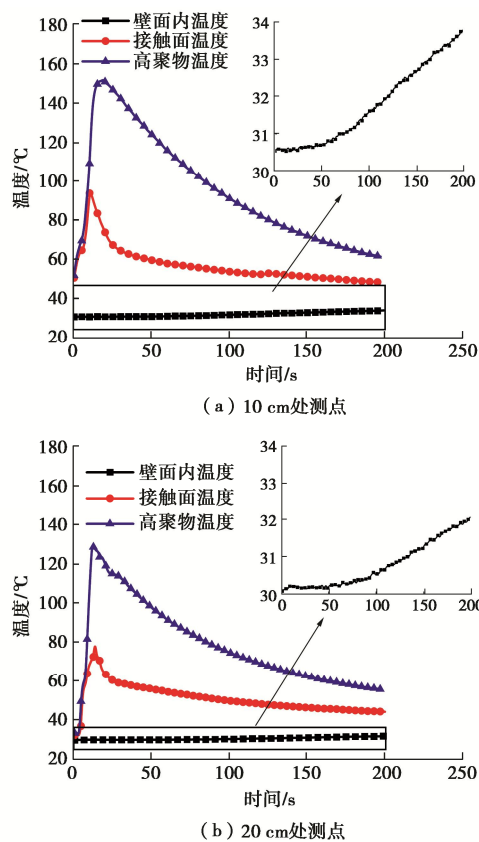


图 15 注浆量 750 g, 预热温度 50°C, 环境温度 30°C 时高聚物温度、接触面温度及裂隙壁内温度随时间变化曲线

Fig. 15 Variation curves of polymer temperature, contact surface temperature and wall temperature with time under grouting amount 750 g, preheating temperature 50°C and ambient temperature 30°C

从图 16 可以看出, 裂隙壁内温度始终低于高聚物温度和接触面温度。由于热传导效应, 50 s 时裂隙壁内不同测点处温度均高于 30 s 时对应位置测试结果。

2.6 温度和热传导效应对高聚物浆液在裂隙中扩散过程影响机制分析

高聚物浆液被高速混合注入裂隙后, 迅速发生化

学反应, 释放大热量, 促使浆液温度不断上升, 使浆液中溶解的液态物理发泡剂达到沸点温度后逐渐气化, 连同发泡反应生成的气体, 驱动浆液体积快速膨胀并持续扩散。由于温度是影响浆液化学反应速率的重要因素, 因此温度变化尤其是浆液预热温度的改变对浆液扩散过程产生较显著影响。

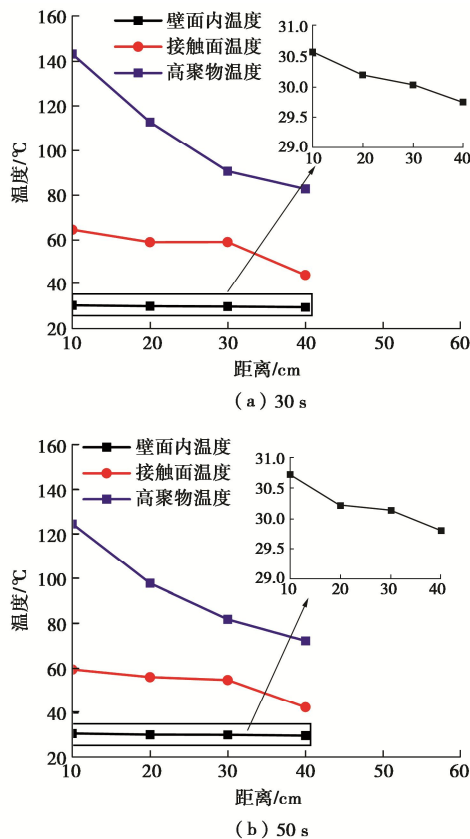


图16 注浆量750 g, 预热温度50℃, 环境温度30℃时不同时刻高聚物温度、接触面温度及壁面内温度沿径向分布曲线

Fig. 16 Distribution curves of polymer temperature, contact surface temperature and wall temperature along radial direction under grouting amount 750 g, preheating temperature 50℃ and ambient temperature 30℃

浆液反应过程中温度不断升高与裂隙壁间形成较大温差, 因温差产生的热传导使一部分热能通过接触面由浆液传递到裂隙壁内, 导致浆液温度减小, 改变了温度场分布, 降低浆液反应速度和扩散速率。环境温度的变化改变浆液与裂隙壁间的温差, 影响两者间热传导效应和温度场变化速率, 间接对浆液反应速度和扩散过程产生影响。

3 结 论

(1) 浆液预热温度对高聚物扩散过程具有重要影响。相同注浆量条件下, 预热温度越高, 浆液扩散速率越快, 初凝时间越早, 浆液扩散半径越大, 当预热

温度升高至一定值时, 浆液扩散范围基本不再变化。

(2) 浆液扩散过程与其化学反应进程不完全同步, 化学反应终止时间晚于初凝时间。不同注浆量条件下浆液扩散半径、温度随时间变化趋势基本一致, 其峰值随着注浆量的增大而增大。

(3) 高聚物浆液温度时空演变过程具有明显规律性。不同测点处浆液温度随时间均呈现先升高后下降, 变化速率由快到慢的演化特征; 在体系温度达到平衡前, 注浆孔中心处温度最高, 沿径向逐渐递减。

(4) 随着预热温度和环境温度的升高, 浆液整体温度增大, 升温速度加快, 峰值温度增高, 达到峰值点的时刻变早。与预热温度相比, 环境温度对浆液温度变化速率影响相对较小。

(5) 受高聚物与裂隙壁温差影响, 浆液在裂隙内扩散过程中存在明显热传导效应, 使得浆液温度达到峰值后逐渐下降, 当两者温度达到平衡前, 浆液温度高于接触面温度, 接触面温度高于裂隙壁内温度。

围绕温度对高聚物浆液在裂隙中扩散行为影响采用可视化平板裂隙模型开展了初步研究, 尚未考虑裂隙壁面粗糙度、起伏度等因素的耦合影响, 未来将进一步完善试验装置, 使试验工况最大限度逼近真实工程场景, 为现场注浆施工提供更有效的指导。

参考文献:

- [1] 边学成, 程 翀, 王复明, 等. 高速铁路路基沉降高聚物注浆修复后动力性能及长期耐久性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 562-568. (BIAN Xuecheng, CHENG Chong, WANG Fuming, et al. Experimental study on dynamic performance and long-term durability of high-speed railway subgrade rehabilitated by polymer injection technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 562-568. (in Chinese))
- [2] 张连震, 张庆松, 刘人太, 等. 基于浆液-岩体耦合效应的微裂隙岩体注浆理论研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2003-2011. (ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, et al. Grouting mechanism in fractured rock considering slurry-rock stress coupling effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2003-2011. (in Chinese))
- [3] FUNEHAG J, THRON J. Radial penetration of cementitious grout-Laboratory verification of grout spread in a fracture model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 72(feb.): 228-232.
- [4] SUI W, LIU J, HU W, et al. Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with

- flowing water[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2015, **50**: 239-249.
- [5] 李术才, 张 霄, 张庆松, 等. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2377-2396. (LI Shucan, ZHANG Xiao, ZHANG Qingsong, et al. Research on mechanism of grout diffusion of dynamic grouting and plugging method in water inrush of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2377-2396. (in Chinese))
- [6] 刘人太, 张连震, 张庆松, 等. 速凝浆液裂隙动水注浆扩散数值模拟与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(增刊 1): 3297-3306. (LIU Rentai, ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of crack grouting process of quick setting slurry with running water and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S1): 3297-3306. (in Chinese))
- [7] WANG K, WANG L, REN B, et al. Understanding the Effect of cementitious grouting pressure on micro-fracture permeability for rock reinforcement underground: a lab study[J]. Energies, 2020, **13**: 4225.
- [8] LIANG Y, SUI W, QI J. Experimental investigation on chemical grouting of inclined fracture to control sand and water flow[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **83**: 82-90.
- [9] 石明生, 夏威夷, 王复明, 等. 高聚物锚固体与粉土间黏结性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(4): 724-730. (SHI Mingsheng, XIA Weiyi, WANG Fuming, et al. Experimental study on bond performance between polymer anchorage body and silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 724-730. (in Chinese))
- [10] 李晓龙, 王复明, 钟燕辉, 等. 自膨胀高聚物注浆材料在二维裂隙中流动扩散仿真方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(6): 1188-1197. (LI Xiaolong, WANG Fuming, ZHONG Yanhui, et al. Simulation on flowing and diffusing of expansible grouting material of polymer in two-dimensional fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(6): 1188-1197. (in Chinese))
- [11] HAO M, WANG F, LI X, et al. Numerical and experimental studies of diffusion law of grouting with expansible polymer[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, **30**(2): 04017290.
- [12] LI X, HAO M, ZHONG Y, et al. Experimental study on the diffusion characteristics of polyurethane grout in a fracture[J]. Construction and Building Materials, 2020, **273**: 121711.
- [13] LIANG J, DU X, FANG H, et al. Numerical and experimental study of diffusion law of foamed polymer grout in fracture considering viscosity variation of slurry[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, **128**: 104674.
- [14] 石明生, 夏威夷. 聚氨酯高聚物注浆固化温度试验研究[J]. 化工新型材料, 2014, **42**(7): 133-135. (SHI Mingsheng, XIA Weiyi. Experimental research on curing temperature of polyurethane polymer[J]. New Chemical Materials, 2014, **42**(7): 133-135. (in Chinese))
- [15] 郝梅美. 自膨胀高聚物浆液在充水裂隙中的扩散机理研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019. (HAO Mei-mei. Study on the Diffusion Law of Expansible Polymer Grout in the Water-Filled Rock Mass Fracture[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019. (in Chinese))