

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.1001

单裂隙注浆参数数值模拟优化分析

杨志佳¹, 祝方才¹, 赖国森², 尚亚新², 李端茹^{1,3}

(1. 湖南工业大学 土木与环境工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 中铁北京工程局集团第二工程有限公司, 湖南 长沙 410116;
3. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 软弱破碎岩体隧道常采用水泥浆液注浆加固以保证隧道安全施工, 并用浆液扩散范围评价注浆效果。采用 Barton 粗糙度标准曲线, 临摹建立裂隙 DXF 文件, 并导入 COMSOL 软件, 基于多孔介质渗流方程建立单裂隙注浆模型。以注浆扩散距离为指标, 设计裂隙粗糙度、注浆压力、黏度和裂隙开度的四因素三水平正交试验方案, 分析 4 个因素对浆液扩散的影响。结果表明, 注浆压力和裂隙开度的增加能提升浆液扩散范围, 黏度升高则与之相反, 裂隙粗糙度增加会加大浆液扩散的角隅效应, 导致扩散距离减小。通过极差分析法和方差分析法, 得知 4 个因素对浆液扩散影响效果由高到低依次为浆液黏度、注浆压力、裂隙开度和粗糙度, 并给出了浆液扩散距离最大时的四因素组合水平。

关键词: 注浆加固; 单裂隙; 扩散距离; 数值模拟; 正交试验设计

中图分类号: TD265.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)01-0001-08

引文格式: 杨志佳, 祝方才, 赖国森, 等. 单裂隙注浆参数数值模拟优化分析[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(1): 1-8.

Numerical Simulation and Optimization Analysis of Single Joint Grouting Parameters

YANG Zhijia¹, ZHU Fangcai¹, LAI Guosen², SHANG Yaxin², LI Duanru^{1,3}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. 2nd Engineering Co., Ltd., China Railway Beijing Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410116, China;
3. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Cement slurry grouting method is widely used in stabilization of tunnel construction with soft and weak rocks, with an evaluation of the grouting effect by the slurry diffusion range. A joint DXF file can be created by copying and importing it into COMSOL software, with the Barton roughness standard curve adopted. A four factor three-level orthogonal experimental scheme is to be designed based on the grouting diffusion distance, including joint roughness, grouting pressure, slurry viscosity, and joint openness, followed by an analysis of the influence of these four factors on the grouting diffusion. The results indicate that an increase in grouting pressure and joint openness can enhance the slurry diffusion range, while an increase in viscosity presents the opposite effect. An increase in joint roughness increases the corner effect of the slurry diffusion, leading to a decrease in diffusion distance. By using range analysis and variance analysis, it is found that the four factors that follow the order from the greatest to the least slurry diffusion effect are slurry viscosity, grouting pressure, joint openness, and roughness, with an additional proposal of the combination level of the four factors at the maximum slurry diffusion distance.

Keywords: grouting reinforcement; single joint; diffusion distance; numerical simulation; orthogonal test design

收稿日期: 2024-12-09

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目(2022JJ50087)

作者简介: 杨志佳, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为地下工程加固, E-mail: yangzhijia19981119@163.com

通信作者: 祝方才, 男, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为边坡和地下工程, E-mail: zhufangcai@163.com

0 引言

注浆是破碎岩体山岭隧道施工中控制围岩稳定性和改善裂隙渗透特性的重要手段,其中浆液扩散范围是评估注浆效果的关键指标。为了深入探讨影响浆液扩散的关键因素,研究者们开展了大量的实验与数值模拟研究。Gan L. 等^[1]实验研究了不同节理粗糙度系数(joint roughness coefficient, JRC)对灰岩粗糙裂隙渗流特性的影响。Cui W. 等^[2]采用分形函数模拟不规则裂隙面,通过三维单裂隙动水注浆实验分析了浆液的流动特性。Liang J. S. 等^[3]探讨了对注浆扩散半径、压力和流量等的影响因素。Ding W. Q. 等^[4]对水泥浆在单个粗糙裂隙中的扩散过程进行了数值模拟,揭示了速度场和压力场的时空分布特征;Mu W. Q. 等^[5]综合考虑流固耦合作用,分析了裂隙粗糙度、浆液黏性和剪切变形对浆液流动特性的影响;T. Babadagli 等^[6]模拟了多种单裂隙模型下的单相流和多相流特征。Ju Y. 等^[7]用透明粗糙裂隙模型分析了裂隙粗糙度对水流特性的影响。刘少炜^[8]、孙振洋^[9]等分别对不同浆液配比和注浆参数进行了分析。许兴亮^[10]、杨坪^[11]等模拟了单裂隙渗水条件下的水泥浆液扩散特征。

已有大多数相关研究仅采用简化的裂隙几何模型(如光滑裂隙),而对裂隙粗糙度的量化不足,难以全面揭示其对注浆扩散的影响,故对于水泥浆液在岩体裂隙中的扩散过程及影响参数有待深入分析。为此,本研究拟通过 JRC 量化裂隙粗糙度,建立十级粗糙度的单裂隙注浆模型,以更加系统化、细化的方式探讨粗糙度对注浆扩散的影响。此外,许多现有研究仅关注单一变量(如裂隙开度或注浆压力等)对扩散的作用,忽略了多因素的相互影响。针对这一问题,本研究采用多孔介质相传递理论和正交试验设计方法,分析裂隙开度、粗糙度、注浆压力和注浆黏度对浆液扩散距离的影响。

1 流体控制方程

质量守恒方程确保浆液与空气的体积分数变化符合物理规律,Darcy 定律控制浆液在裂隙中的渗透扩散,多孔介质传输方程则结合二者,全面描述浆液的流动特性。质量守恒方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho_i s_i) + \nabla(\rho_i u_i) = 0. \quad (1)$$

式中: ε_p 为孔隙率; ρ_i 为相流体密度; s_i 为第*i*个流体的体积分数; u_i 为体积通量。

体积通量如式(2)所示。

$$u_i = -(\kappa_{ri}/\mu_i)\kappa(\nabla P_i - \rho_i g). \quad (2)$$

式中: κ 为渗透率, m^2 ; κ_{ri} 为相对渗透率; P_i 为压力。

由式(1)(2)给出如下多孔介质相传输方程:

$$\nabla \cdot \left[-\kappa \rho_i \frac{\kappa_{ri}}{\mu_i} (\nabla P_i - \rho_i g) \right] + \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho_i s_i) = 0. \quad (3)$$

本研究仅考虑裂隙空气-浆液两相流模型,初始状态为裂隙内充满空气,注浆过程为空气体积分数从1逐渐降至0,浆液的体积分数从0升至1。模型采用以下假设:1)视浆液为各向同性的不可压缩流体;2)裂隙的等效水力开度恒定;3)裂隙边界为无滑移边界,即不会随着浆液流动发生滑移;4)忽略重力和惯性力的作用;5)初始裂隙为充满空气状态;6)注浆入口边界条件由注浆压力控制,出口为裂隙右端,为无压出流边界。

2 正交试验设计

2.1 单裂隙模型

本研究采用 Barton 提出的标准化节理粗糙度曲线,如图1所示。

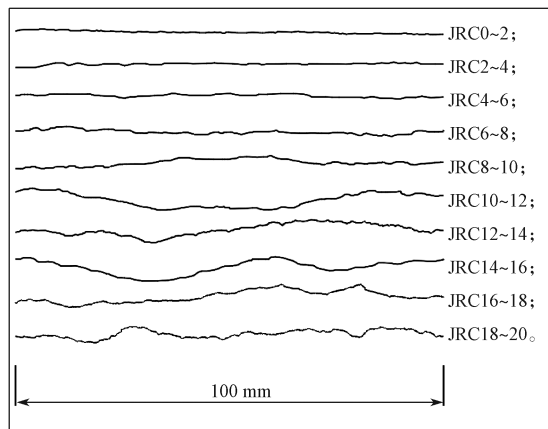


图1 标准轮廓曲线

Fig. 1 Standard contour curves

利用 CAD 对标准 JRC18~20 曲线进行素描,精度误差确保与 JRC 标准曲线小于最大振幅的 2% 以内,通过裂隙单面平移得到不同开度的单裂隙 DXF 文件,将其导入 COMSOL 软件,建立数值模型,如图2所示。

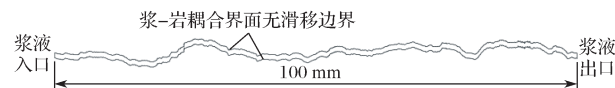


图2 JRC18~20 几何模型

Fig. 2 Geometric model of JRC18~20

网格划分前进行了网格敏感性分析,即选取3种不同的网格密度(最小单元为0.01, 0.03, 0.05 mm)进行计算,分析浆液扩散范围与压力分布的变化情

况。当网格最小单元小于 0.03 mm 时,计算结果的变化率低于 2%,表明网格划分已达到无关性要求。因此,计算网格采用自由三角形网格划分,最小单元为 0.03 mm,最大单元增长率为 1,曲率因子为 0.3,狭窄区域分辨率为 1,网格数量为 187 512 个,网格划分的整体和局部如图 3 所示。

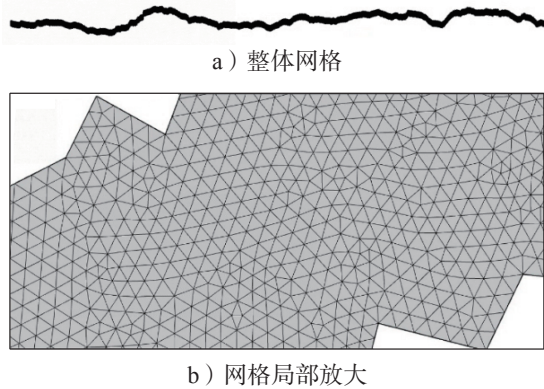


图 3 单裂隙数值模型的网格划分

Fig. 3 Grid division of single fracture numerical model

2.2 模型参数及计算设置

本研究选取注浆压力 (A)、浆液黏度 (B)、裂隙开度 (C)、裂隙粗糙度 (D) 为因素,浆液在 $T=15$ s 时的扩散距离为指标。基于隧道注浆常用压力范围 (0.3 ~ 1.0 MPa),考虑高压可能导致裂隙扩张或浆液突涌,故本研究将压力控制在 0.3 ~ 0.5 MPa,浆液黏度范围设定为 0.05 ~ 0.6 Pa·s,涵盖低至中高黏度。裂隙开度选取 0.5 ~ 2.0 mm,以避免过大影响封堵或过小限制扩散。粗糙度采用十级模型中的边界值和中间值,以全面分析其影响。并设计四因素三水平正交试验方案,正交试验因素与水平设计^[12]如表 1 所示。

表 1 正交试验设计

Table 1 Orthogonal experimental design

A 注浆压力 / MPa	B 浆液黏度 / (Pa·s)	C 裂隙开度 / mm	D 粗糙度 (JRC 值)
0.3	0.05	0.5	2~4
0.4	0.25	1.0	10~12
0.5	0.60	2.0	18~20

COMSOL 数值模拟分两阶段进行:1) 基于 Darcy 定律的稳态渗流计算;2) 多孔介质传递计算,数值模拟计算参数见表 2。

表 2 数值模拟计算参数

Table 2 Numerical simulation calculation parameters

参 数	取 值
水泥浆液密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 350
水泥浆液孔隙率	0.05
水泥浆液渗透率 / m^2	$3.28\text{e}-12$

3 结果与分析

3.1 注浆时间的影响

为研究水泥浆液扩散与注浆时间的关系,当 JRC 为 18~20、注浆压力为 0.5 MPa、裂隙开度为 1.0 mm 时,取注浆时间为 5, 15, 25 s,得到浆液体积分数、扩散距离与注浆时间的关系曲线,如图 4、5 所示。

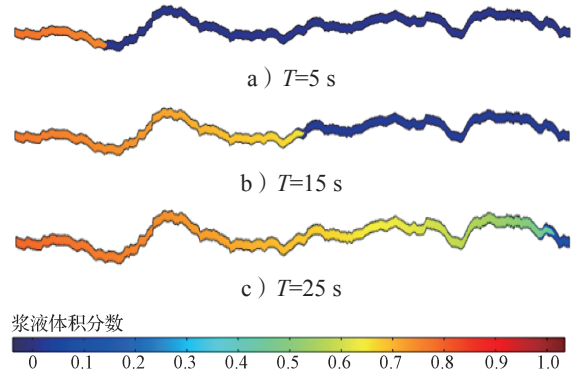


图 4 浆液体积分数与注浆时间关系云图

Fig. 4 Relationship nephogram between slurry volume ratio and grouting time

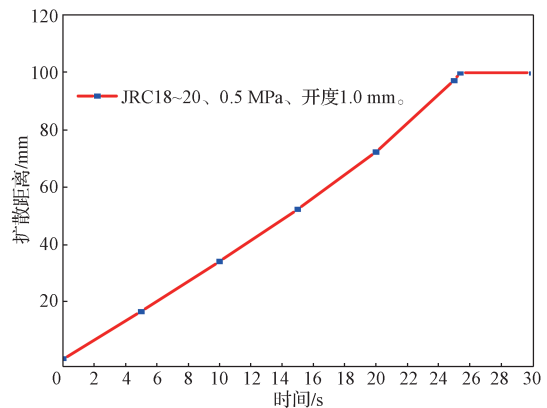


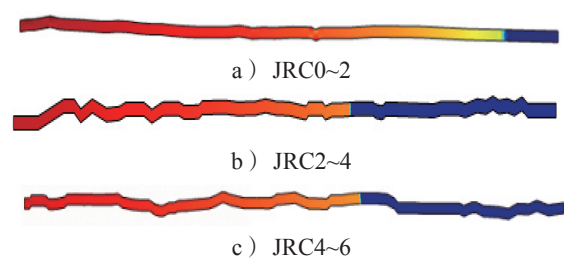
图 5 水泥扩散距离与时间变化关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between cement diffusion distance and time

由图 4 和图 5 可以得知,浆液扩散范围和扩散距离均随着注浆时间的增加呈增长趋势,浆液逐步充填裂隙空间。

3.2 裂隙粗糙度的影响

设定注浆压力为 0.5 MPa、裂隙开度为 1.0 mm、注浆时间为 15 s,得出不同粗糙度浆液的体积分数,如图 6 所示。



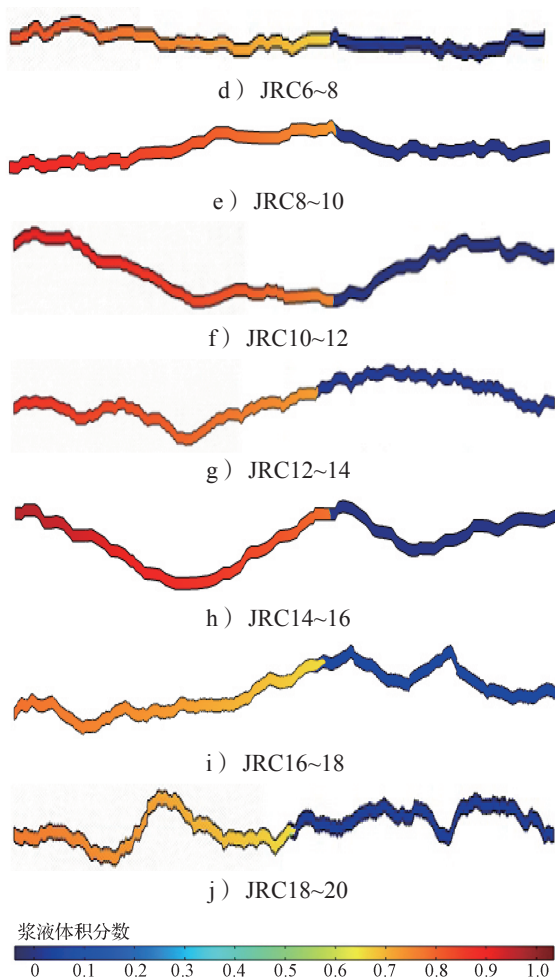


图6 不同粗糙度的水泥浆液体积分数

Fig. 6 Cement volume ratio of slurry with different roughness

由图6可知,随着节理粗糙度增加,浆液扩散能力受阻,其扩散距离和体积分数降低。这是因为粗糙度增加时,角隅增多,增大了浆液的扩散阻力,使角隅难以充满浆液。

图7所示为JRC18~20的角隅对浆液扩散影响结果云图。

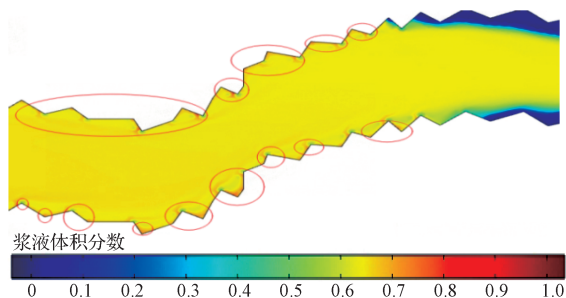
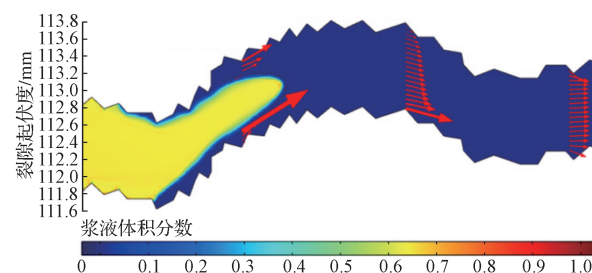


图7 JRC18~20的角隅对浆液扩散影响云图

Fig. 7 Influence nephogram of cement diffusion at the corner with JRC18~20

观察图7中的浆液分布情况可知,浆液体积分数在裂隙边缘较小,浆液渗流速度呈现出类似特征,如

图8所示。

图8 JRC18~20 $T=15$ s时的速度场云图Fig. 8 Velocity field nephogram with JRC18~20 at $T=15$ s

由图7和8可知,裂隙角隅处浆液扩散速度明显减小,圆圈指示区域表明这些位置的浆液体积分数增加,显示浆液在这些地方的滞留量增多。随着裂隙粗糙度增大,裂隙角隅数量增加,裂隙两侧内部滞留的浆液增多,浆液阻流作用加大,导致扩散距离减小。

3.2.1 不同粗糙度下的流场分析

为了研究裂隙粗糙度对浆液流场的影响,以裂隙开度为1.0 mm,注浆压力为0.4 MPa工况为例,分析不同粗糙度裂隙中水泥浆液的流场分布,取3个不同粗糙度模型进行流场分析,所得结果如图9所示,图中箭头为速度矢量。

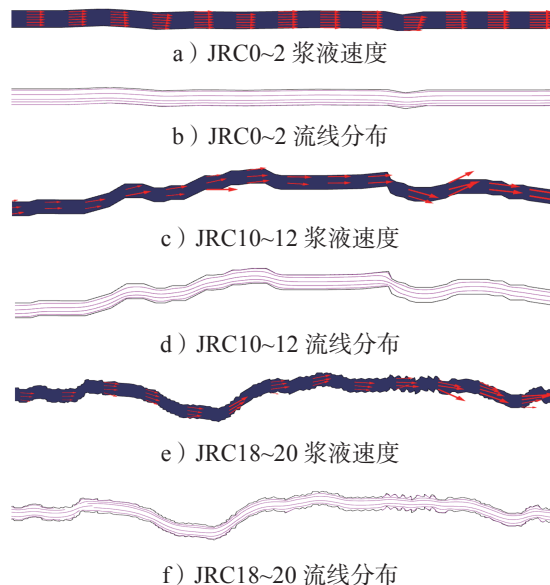


图9 不同粗糙度裂隙中的浆液速度和流线分布图

Fig. 9 Velocity and streamline distribution diagram of slurry in fractures with different roughnesses

由图9所示不同粗糙度裂隙流场分布可知,随着粗糙度增大,速度分布逐渐变得不规则,特别是在裂隙通道的凹槽和凸起处,速度变化显著。通过对比一系列粗糙度裂隙流场可看出,裂隙粗糙度会影响浆液流速分布,从而影响浆液在裂隙中扩散。随着裂隙粗糙度增加,粗糙裂隙壁面几何形貌起伏突变,使得

浆液扩散路径变得曲折迂回, 导致浆液在粗糙裂隙通道里以不同速度和方向扩散, 且当 JRC 值越大时, 裂隙粗糙度越大, 浆液所需要通过的通道路径越长, 扩散距离越小。

3.2.2 粗糙度对裂隙注浆充填状态的影响

对于水泥浆液在粗糙裂隙中的流动效率, 可通过分析浆液在裂隙通道内充填率达到百分百所需时间来判断。以注浆压力为 0.5 MPa、裂隙开度为 1.0 mm 的工况为例, 分析粗糙度对裂隙注浆充填状态的影响, 结果如图 10 所示。

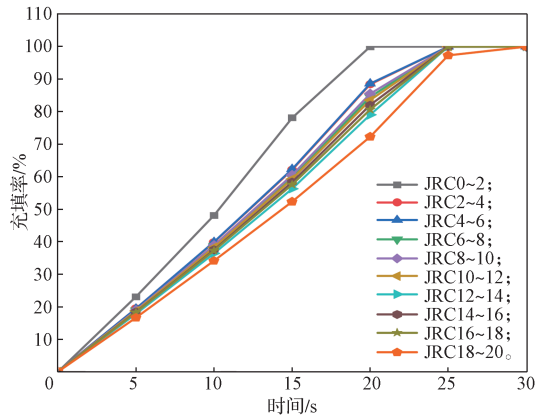


图 10 不同粗糙度下浆液充填率的时变分析结果

Fig.10 Time-varying analysis results of slurry filling rate under different roughness

由图 10 可知, 当注浆时间小于 5 s 时, 各粗糙度下的浆液充填率相差不大, 充填率能达到 20% 左右。随着注浆时间推移, 浆液充填率也随着裂隙粗糙度的不同逐渐拉开差距。在相同时间下, 随着裂隙粗糙度增大, 浆液充填率减小, 说明随着裂隙粗糙度增大, 浆液的流动性减弱。

3.3 注浆压力的影响

设定参数 JRC 为 18~20, 裂隙张开度为 1.0 mm, 浆液黏度为 0.05 Pa·s, 分析注浆压力、浆液体积分数和浆液平均流速, 结果如图 11、12 所示。

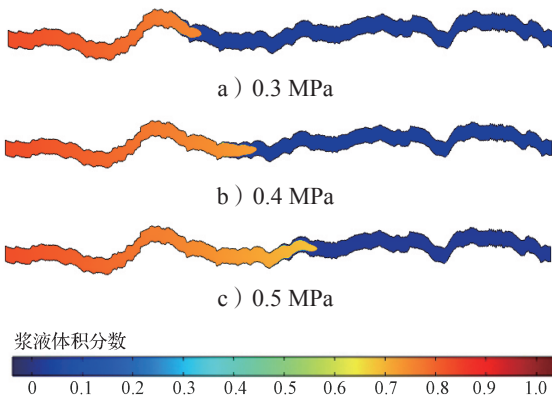


图 11 不同注浆压力下的浆液体积分数图

Fig. 11 Cement volume ratio under different grouting pressures

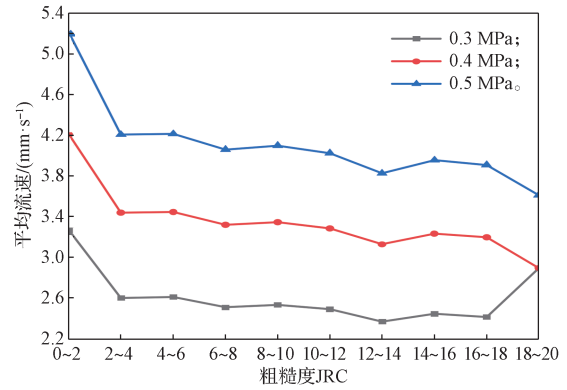


图 12 不同注浆压力下的浆液平均流速

Fig. 12 Average diffusion velocity under different pressures

由图 11、12 可知, 随着注浆压力增大, 浆液扩散距离增加, 浆液平均流速随着注浆压力的增大而增大, 随着粗糙度增大而减小。

3.4 裂隙开度的影响

设定注浆压力为 0.5 MPa, 浆液黏度为 0.05 Pa·s, 注浆时间为 15 s, 研究裂隙开度为 0.5, 1.0, 2.0 mm 条件下浆液体积分数和扩散距离, 所得结果如图 13~15 所示。

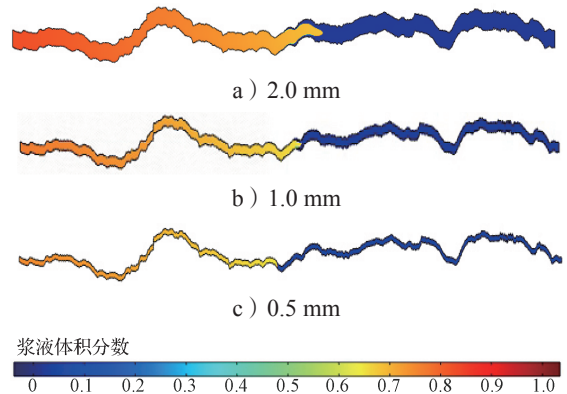


图 13 不同裂隙开度下 JRC18~20 的浆液体积分数

Fig. 13 Cement volume ratio with different joint widths with JRC18~20

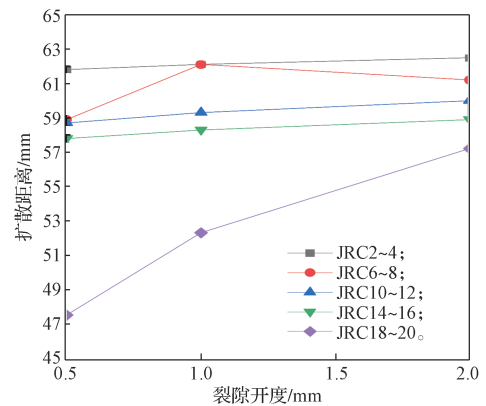


图 14 扩散距离与裂隙开度关系曲线

Fig. 14 Relation curves of cement diffusion distance and joint openness

由图 13、14 可知,随着裂隙开度增加,浆液体积分数和扩散距离均增大。

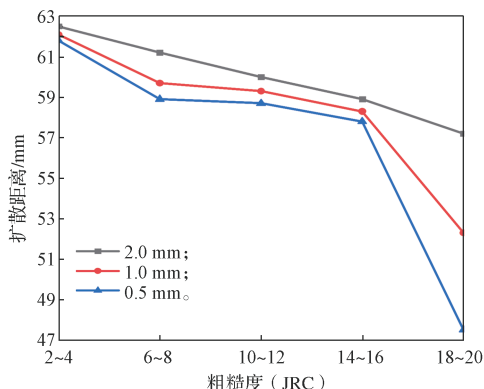
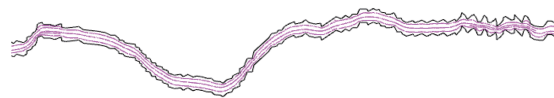
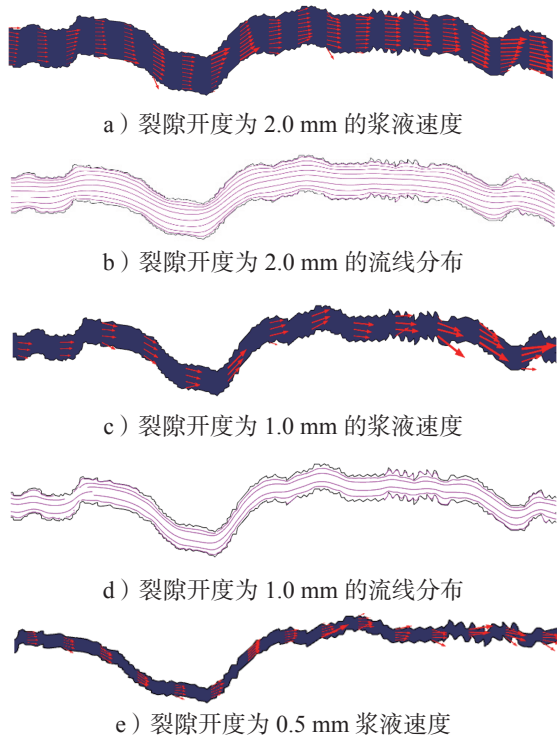


图 15 不同裂隙开度下粗糙度与扩散距离关系曲线

Fig. 15 Relationship curves between roughness and diffusion distance at different openness

由图 15 可以得知,一定范围内,随着裂隙粗糙度增加,浆液扩散距离减小的变化趋势越来越平缓。当裂隙开度达一定值时,浆液扩散距离随着粗糙度的变化趋势相较于裂隙开度较小时的变化趋势较为平缓,说明当裂隙开度足够大时,裂隙的粗糙度对裂隙内的渗流影响逐渐减小,直至粗糙度对裂隙内浆液的流动无法产生实质性的影响。因此,当裂隙开度达到一定大小时,节理粗糙度对裂隙内浆液的流动性影响可以忽略不计。

为了研究裂隙开度对浆液流场的影响,以 JRC18~20 模型为例,分析不同裂隙开度下裂隙的水泥浆液的流场分布,流场分析结果如图 16 所示。



f) 裂隙开度为 0.5 mm 流线分布

图 16 不同裂隙开度下裂隙的浆液速度和流线分布

Fig. 16 Slurry velocity and streamline distribution of grout in fractures under different openness

由图 16 可知,随着裂隙开度减小,浆液的速度分布逐渐变得不规则。这是由于流线分布随着裂隙壁面几何形貌的变化而发生了改变,裂隙开度减小导致受裂隙壁面影响增大。在过流断面缩小区域,浆液流速增大,流线密度增加;而在过流断面扩大区域,浆液流速减小,流线密度降低。这是因为,在连续性流动中,浆液流速与过流断面的面积成反比。在粗糙裂隙中,过流断面随着裂隙壁面的起伏变化而变化,导致通道内的过流断面不断变化,从而导致浆液流速出现激增或骤降现象。

3.5 浆液黏度的影响

设定 JRC18~20、裂隙开度为 1.0 mm,注浆压力为 0.5 MPa,分析 1.3, 0.6, 0.25, 0.05 Pa·s 黏度下的浆液扩散特征,所得结果如图 17、18 所示。

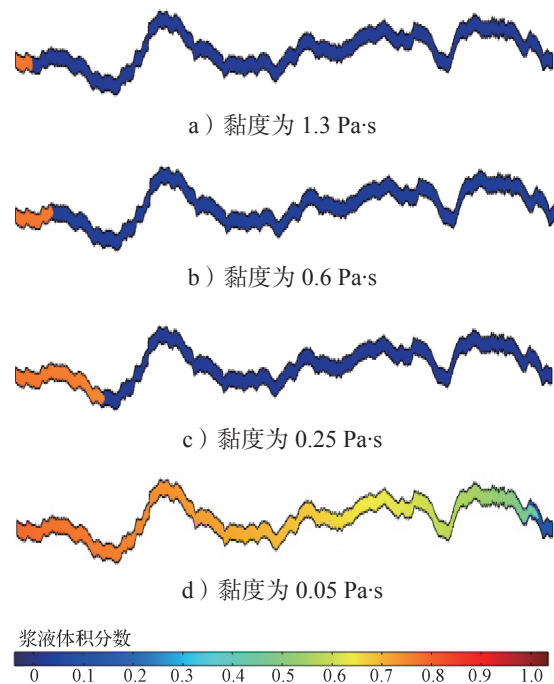


图 17 不同黏度下的浆液体积分数

Fig. 17 Cement volume ratio with different viscosities

由图 17、18 可以得知,随着浆液黏度增大,其扩散距离减小。具体而言,黏度为 0.6 Pa·s 时的浆液扩散距离为黏度为 1.3 Pa·s 时的 2.17 倍,黏度为 0.25 Pa·s 时的浆液扩散距离为黏度为 1.3 Pa·s 时的 5.18 倍,而黏度为 0.05 Pa·s 时的浆液扩散距离达到黏度为 1.3

Pa·s 时的 30.31 倍。由此可见, 低黏度浆液在粗糙裂隙中更易扩散。

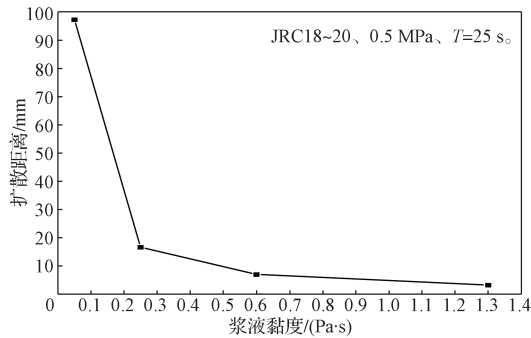


图 18 扩散距离与浆液黏度的关系曲线

Fig. 18 Relation curves of cement diffusion distance and viscosities

3.6 正交试验优化分析

基于单因素分析结果, 以及表 1 的正交试验设计方案, 分析各因素对浆液扩散距离的影响, 所得结果如表 3 所示。

表 3 正交试验结果

Table 3 Orthogonal test results

试验号	A	B	C	D	扩散距离 /mm
1	1	1	1	1	38.0
2	1	2	2	2	7.0
3	1	3	3	3	2.8
4	2	1	2	3	42.4
5	2	2	3	1	9.5
6	2	3	1	2	3.8
7	3	1	3	2	60.0
8	3	2	1	3	9.1
9	3	3	2	1	4.8
	47.8	140.4	50.9	52.3	
	55.7	25.6	54.2	70.8	
	73.9	11.4	72.3	54.3	
	15.933	46.8	16.967	17.433	
	18.567	8.533	18.067	23.6	
	24.633	3.8	24.1	18.1	
R	8.7	43	7.133	6.167	
因素每水平实					
验重复数	3	3	3	3	
因素最佳水平	3	1	3	2	

3.6.1 极差分析法

极差分析法是一种用于实验数据分析的统计方法, 主要用于评估多个因素对实验结果的影响。它通过计算各因素在不同水平下的结果差异 (即极差), 识别影响结果的主要因素以及各因素的最佳组合。

由表 3 所示正交试验结果可知, B 因素的极差值 R 最大, 说明其对浆液扩散的主效应最显著, 故浆液

黏度为最重要因素, 其次是 A 因素即注浆压力, 再就是 C 因素即裂隙开度, 最后是 D 因素即裂隙粗糙度, 各因素按影响大小排序为 $B > A > C > D$ 。

3.6.2 方差分析法

方差分析法, 是将因素水平的不同所导致的实验结果之间的不同和方差的波动所导致的实验结果之间的不同区别开来, 从而确定不同因素对实验结果的影响是否显著。因此, 本研究中采用方差分析法来弥补极差分析法的不足。所得到的方差分析结果如表 4 所示。

表 4 方差分析结果

Table 4 Analysis of variance results

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
A	119.429	2	0.132	3.110	
B	3 335.742	2	3.694	3.110	显著
C	88.496	2	0.098	3.110	
D	68.722	2	0.076	3.110	
误差	3 612.39	8			

由表 4 所示方差分析结果可以得知, 由于 B 因素的 F 比值为 3.694, 明显大于 F 临界值 3.110, 而 A 、 C 、 D 3 个因素的 F 比值均小于其对应的 F 临界值, 故只有 B 因素为显著性因素, 这说明浆液黏度因素对浆液扩散距离的影响显著。结合极差分析法和方差分析法结果可得出一致结论: 浆液黏度对扩散距离的影响程度最大。

4 结论

1) 注浆时间、注浆压力和裂隙开度与浆液扩散距离呈正相关, 增加注浆压力和裂隙开度有利于提高浆液的扩散范围。

2) 节理粗糙度和浆液黏度与浆液扩散距离呈负相关, 尤其是浆液黏度在 4 个因素中起主导作用, 会显著影响浆液的扩散效果。

3) 通过正交试验设计分析, 浆液扩散影响由高到低依次为浆液黏度、注浆压力、裂隙开度和粗糙度, 并给出了浆液扩散距离最大时的 4 因素组合水平, 为 $A_3B_1C_3D_2$ 。

参考文献:

- [1] GAN L, LIU Y, XU T, et al. Experimental Investigation of the Seepage Characteristics of a Single Fracture in Limestone with Different Roughness and Seepage Fluids[J]. Journal of Hydrology, 2023, 622:

- 129699.
- [2] CUI W, WANG L X, LUO Y J. Modeling of Three-Dimensional Single Rough Rock Fissures: A Study on Flow Rate and Fractal Parameters Using the Weierstrass-Mandelbrot Function[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 144: 104655.
- [3] LIANG J S, MA S K, DU X M. Diffusion Model of Parallel Plate Crack Grouting Based on Foaming Expansion Characteristics of Polymer Slurry[J]. Mathematics, 2021, 9(22): 2907.
- [4] DING W Q, DUAN C, ZHANG Q Z. Experimental and Numerical Study on a Grouting Diffusion Model of a Single Rough Fracture in Rock Mass[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7041.
- [5] MU W Q, LI L C, YANG T H, et al. Numerical Investigation on a Grouting Mechanism with Slurry-Rock Coupling and Shear Displacement in a Single Rough Fracture[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(8): 6159–6177.
- [6] BABADAGLI T, REN X J, DEVELI K. Effects of Fractal Surface Roughness and Lithology on Single and Multiphase Flow in a Single Fracture: An Experimental Investigation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 68: 40–58.
- [7] JU Y, ZHANG Q G, YANG Y M, et al. An Experimental Investigation on the Mechanism of Fluid Flow Through Single Rough Fracture of Rock[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(8): 2070–2080.
- [8] 刘少伟, 刘先珊, 张普纲, 等. 采空区岩体粗糙单裂隙中浆液扩散机理研究 [J]. 重庆大学学报, 2024, 47(4): 64–85.
- LIU Shaowei, LIU Xianshan, ZHANG Pugang, et al. Grout Diffusion Mechanism for Rough Single Fracture in the Goaf Rock Mass[J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(4): 64–85.
- [9] 孙振洋. 砂岩裂隙注浆浆液扩散机理及影响因素研究 [J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(7): 28–33.
- SUN Zhenyang. Study on Sandstone Fissure Filling Grouting Slurry Diffusion Mechanism and Impacting Factors[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(7): 28–33.
- [10] 许兴亮, 刘为民, 宋志坚, 等. 单裂隙模型水泥浆液渗透扩散规律研究 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(12): 103–106.
- XU Xingliang, LIU Weimin, SONG Zhijian, et al. Study on Permeation and Diffusion Law of Cement Slurry in Single Fracture Model[J]. Coal Engineering, 2018, 50(12): 103–106.
- [11] 杨 坪, 孙雪青. 动水环境下粗糙单裂隙注浆数值模拟 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(4): 950–954.
- YANG Ping, SUN Xueqing. Rough Single Fracture Grouting Numerical Simulation in Hydrodynamic Environment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 950–954.
- [12] 邓振伟, 于 萍, 陈 玲. SPSS 软件在正交试验设计、结果分析中的应用 [J]. 电脑学习, 2009(5): 15–17.
- DENG Zhenwei, YU Ping, CHEN Ling. Application of SPSS Software in Orthogonal Design and Result Analysis[J]. Computer Study, 2009(5): 15–17.

(责任编辑: 廖友媛)