

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.3001

三维裂隙模型注浆扩散数值模拟研究

祝方才¹, 刘杰¹, 杨志佳¹, 刘志琪¹, 惠海¹, 李端茹^{1,2}

(1. 湖南工业大学 土木与环境工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 裂隙注浆加固是岩土工程治理的主要手段, 因此, 利用 COMSOL 软件, 分别建立了三维粗糙单裂隙面注浆模型和三维随机裂隙网络注浆模型, 并引入黏度时变函数, 实现了考虑浆液时变的三维单裂隙到多裂隙的注浆过程模拟。结果表明, 注浆压力和注浆时间与浆液扩散范围呈正相关, 浆液黏度与之呈负相关; 且裂隙倾角会改变浆液的扩散形态, 随着倾角增加, 扩散形态由类圆形变为椭圆形直至水滴形; 未考虑浆液黏度时变性所得浆液扩散范围始终大于考虑浆液黏度时变性所得扩散范围, 且随着注浆时间增加, 浆液黏度时变特性对扩散距离的影响越显著。

关键词: 三维模型; 裂隙注浆; 数值模拟; 浆液时变性

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)03-0001-09

引文格式: 祝方才, 刘杰, 杨志佳, 等. 三维裂隙模型注浆扩散数值模拟研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(3): 1-9.

Study on Numerical Simulation of Grouting Diffusion in Three-Dimensional Crack Model

ZHU Fangcai¹, LIU Jie¹, YANG Zhijia¹, LIU Zhiqi¹, HUI Hai¹, LI Duanru^{1,2}

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In view of the fact that reinforcement through fissure grouting serves as a primary approach in geotechnical engineering, a three-dimensional rough single fracture grouting model and a three-dimensional random fracture network grouting model have thus been established by using COMSOL software, with a viscosity time-varying function introduced to simulate the grouting process from a three-dimensional single fracture to multiple fractures, and with the time variability of the grout taken into consideration. The results indicate that while the grouting pressure and grouting time are positively correlated with the diffusion range of the slurry, the viscosity of the slurry is negatively correlated. Moreover, the inclination angle of the fissure will change the diffusion pattern of the slurry; with the inclination angle increasing, the diffusion shape changes from circular to elliptical and eventually to droplet shape. The diffusion range obtained without taking into consideration the time-varying properties of the slurry viscosity is always greater than that obtained with the time variability of the slurry taken into consideration. Additionally, as the grouting time increases, the impact of the time-varying characteristics of the slurry viscosity on the diffusion distance becomes more significant.

Keywords: 3D model; crack grouting; numerical simulation; slurry time varying

收稿日期: 2025-01-14

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: 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

注浆是加固岩土体的重要措施,破碎岩体山岭隧道施工时需要对手子面附近的岩体进行加固,加固效果很大程度上取决于浆液的扩散范围。Liang J. S. 等^[1]建立了聚合物单裂隙注浆径向扩散模型,分析了浆料扩散半径、压力和流量的影响因素。Ding W. Q. 等^[2]通过数值模拟研究了单个粗糙裂隙中的浆液扩散过程,得出了速度场和压力场的时空分布特征。Deng S. H. 等^[3]验证了基于三维裂隙网络模型的坝基灌浆 CFD (computational fluid dynamics) 模拟方法。唐芙蓉等^[4]研究了滞后注浆时机与围岩裂隙时效演化进程之间的联系。高帅等^[5]研究了裂隙岩石渗透注浆过程的特性。许兴亮等^[6]分析了不同水灰比、裂隙开度和注浆压力因素下,浆液单裂隙扩散的一般规律。郑志民^[7]研究了基于浆液黏度时变性与注浆压力的竖向裂隙扩散规律。王强等^[8]研究了不同注浆控制因素对浆液在二维裂隙网络中扩散范围的影响。赵军等^[9]研究了动水条件下,水泥浆液在非均匀水力开度的岩体裂隙中的扩散规律。王晓玲等^[10]利用 3DEC (Three-Dimensional Distinct Element Code) 软件模拟了多级水灰比浆液在三维随机裂隙网络中的扩散过程。钟杰等^[11]的研究中,将宾汉姆流体的两相流本构模型扩展到裂隙网络,得出了不同注浆时间下的注浆圈形成范围。Zhang W. J. 等^[12]揭示了水泥-水玻璃 (C-S) 浆液的流变性能以及注浆压力、注浆速率、裂缝宽度等参数对裂隙注浆的影响。王庆磊等^[13]通过模拟试验,研究了浆液柱形渗透的渗滤效应和黏度空间衰减规律。刘健等^[14]研究了水泥浆液黏度的时变规律,推导了盾构壁后注浆水泥浆液的扩散规律。李术才等^[15]测试了 C-S 浆液的时变曲线,并研究了其扩散规律。

本研究拟采用 COMSOL 软件,通过 Matlab 编程建立三维粗糙单裂隙面数值模型和利用离散化插件建立三维随机裂隙网络数值模型,定义浆液黏度时变的解析函数,以模拟浆液扩散行为,从三维单裂隙到裂隙网络,探讨注浆压力、浆液黏度、裂隙倾角和时变性对浆液扩散的影响。

1 理论分析

1.1 控制方程

注浆过程中,水泥浆液的运动满足 Darcy 定律,其速度场由压力梯度、流体黏度和多孔介质的结构决定,即

$$u = -(k_f / \mu) \nabla P, \quad (1)$$

式中: u 为达西速度,单位为 m/s; k_f 为裂隙渗透率,单位为 D; μ 为流体动态黏度,单位为 Pa·s; P 为孔隙压力,单位为 Pa。

假定水泥浆液为不可压缩流体,所以注浆过程中满足质量守恒定律,即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho) + \nabla \cdot (\rho u) = Q_m, \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度,单位为 kg/m³; ε_f 为裂隙孔隙率; Q_m 为质量源项,单位为 kg/(m³·s)。

模型采用以下假设: 1) 浆液只在裂隙或裂隙网络中流动,不考虑浆液在岩体中的渗透现象; 2) 浆液为各向同性的不可压缩流体; 3) 裂隙光滑且隙宽不变; 4) 裂隙为无滑移边界,即边界不随浆液流动发生滑移; 5) 浆液运动过程中流型不变,但引入自定义黏度时变函数,黏度随之发生变化。

1.2 时变函数

考虑水泥浆液的时变性进行注浆模拟,通过自定义浆液黏度的时变解析函数,使 COMSOL 软件在计算过程中能够考虑到浆液黏度随时间的变化,从而更好地模拟出符合实际工况的水泥浆液在裂隙扩散过程中随时间变化的特征。浆液黏度的时变解析函数可表示为

$$\mu(t) = \mu_0 e^{kt}. \quad (3)$$

式中: μ_0 为初始值; k 为黏度时变系数,为常数; t 为注浆时间,单位为 s。

结合刘健等^[14]拟合的两种水灰比黏度时变系数,得出如下式子:

$$\mu_{0.8} = 0.634 e^{(0.014 11t)}, \quad (4)$$

$$\mu_{1.0} = 0.42 e^{(0.021 56t)}. \quad (5)$$

1.3 模拟工况

基于粗糙单裂隙面注浆模型和随机裂隙网络注浆模型,以扩散面积和注浆量为指标,分析注浆压力和浆液黏度对浆液扩散的影响,并引入考虑水泥浆液时变性对浆液扩散的影响,采用裂隙流和稀物质传递两个物理场耦合模拟,该模拟为瞬态研究。模拟注浆工况如表 1 所示。

表 1 数值模拟工况

Table 1 Numerical simulation of working conditions

工况	黏度 / (Pa·s)	注浆压力 / MPa	工况	黏度 / (Pa·s)	注浆压力 / MPa
1	0.366	0.3	6	0.420	0.5
2	0.366	0.4	7	0.634	0.3
3	0.366	0.5	8	0.634	0.4
4	0.420	0.3	9	0.634	0.5
5	0.420	0.4			

2 粗糙单裂隙模型

2.1 单裂隙数值模型

采用分形维数表征实际粗糙表面。通过 Matlab 软件编程, 生成分维数为 2.2 的粗糙裂隙面数据函数^[16], 并导入 COMSOL Multiphysics 软件, 通过参数化曲面操作构建 2 m × 2 m 的粗糙裂隙面实体, 采用垂直裂隙面钻孔注浆, 注浆孔口直径为 0.002 m, 裂隙开度为 1 mm。粗糙裂隙面实体模型如图 1 所示, 整体模型网格划分情况如图 2 所示。

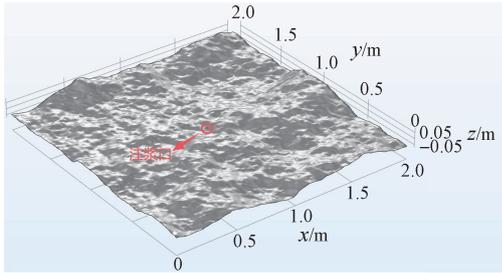


图 1 粗糙裂隙面几何模型

Fig. 1 Rough fracture surface geometric model

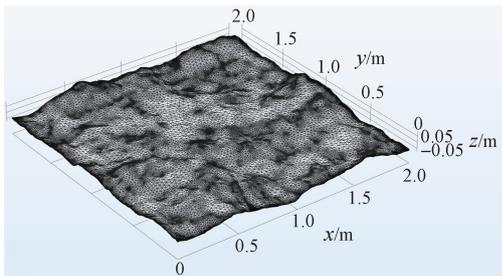


图 2 整体模型网格

Fig. 2 Whole model mesh

注浆入口边界条件由注浆压力控制, 出口选裂隙四周边缘端为无压出流边界, 此边界压力为 0 Pa。如图 2 所示, 计算网格采用自由三角形网格划分, 最小单元为 0.01 mm, 最大单元增长率为 1.05, 曲率因子为 0.5, 狭窄区域的分辨率为 0.6, 网格的总数量为 52 276 个。

2.2 单裂隙模型结果分析

2.2.1 注浆时间对单裂隙模型的影响

为研究水泥浆液扩散与注浆时间的关系, 设参数注浆压力为 0.3 MPa, 浆液黏度为 0.42 Pa·s, 注浆时间为 1, 5, 9, 15, 19 min, 所得浆液浓度、扩散面积与注浆时间的关系如图 3 和 4 所示。

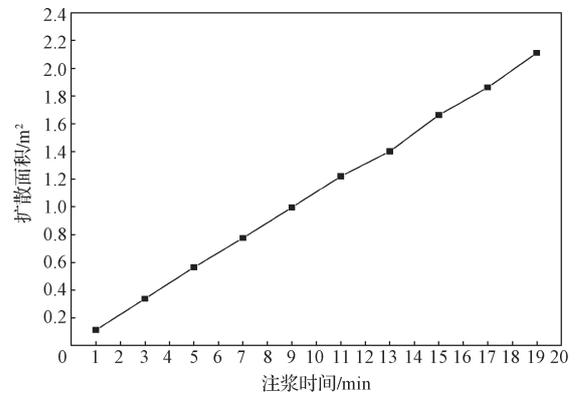


图 3 扩散面积与注浆时间的关系曲线

Fig. 3 Relation curve between diffusion area and grouting time

由图 3 可知, 浆液扩散面积与注浆时间的变化关系为成正比的线性关系。

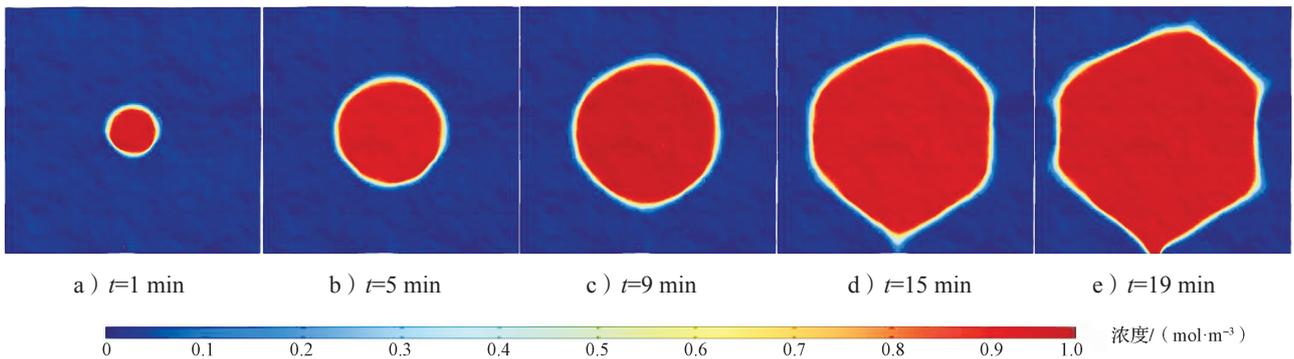


图 4 浆液形态的变化过程

Fig. 4 Change process of slurry morphology

观察图 4 所示不同注浆时间下的浆液形态可以得知, 浆液在不规则裂隙面上的扩散过程中, 注浆初期, 浆液在注浆压力的作用下, 其扩散形态近似于圆饼状, 而随着压力影响范围减弱, 以及裂隙面的起伏变化, 浆液的扩散形态逐渐变得不规则。

2.2.2 浆液黏度对单裂隙模型的影响

设注浆压力为 0.3 MPa, 改变浆液黏度, 分析 0.634, 0.420, 0.366 Pa·s 共 3 种不同浆液黏度对浆液扩散的影响, 得到不同浆液黏度下的扩散面积变化曲线, 见图 5。由图可知, 随着浆液黏度减小, 浆液的

扩散面积增大。可见，浆液黏度越小，随着时间的推移，浆液扩散的范围越大，这会导致扩散阻力越小，更易于浆液扩散。

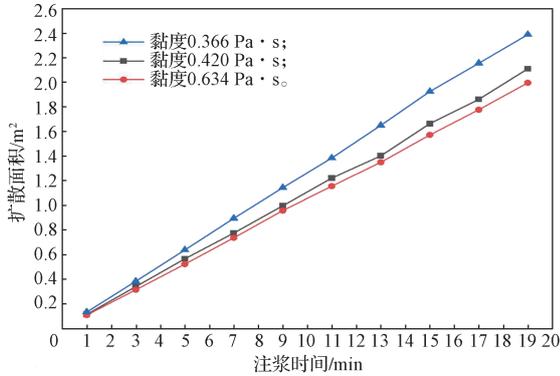


图5 不同浆液黏度下的扩散面积变化曲线
Fig. 5 Variation curves of diffusion area under different slurry viscosities

2.2.3 注浆压力对单裂隙模型的影响

设浆液黏度为 0.420 Pa·s，分析 0.3, 0.4, 0.5 MPa 共 3 种不同注浆压力对浆液扩散的影响，得到的不同注浆压力下的扩散面积变化曲线见图 6。

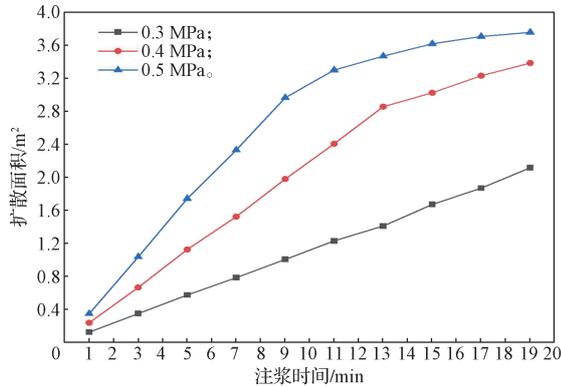


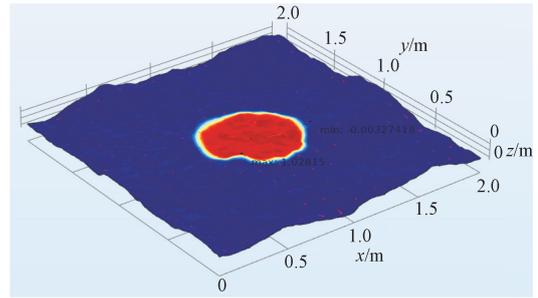
图6 不同注浆压力下的扩散面积变化曲线
Fig. 6 Variation curves of diffusion area under different grouting pressures

由图 6 可知，初期随着注浆压力增大，浆液扩散面积越大，浆液流速也越大。且随着注浆时间的推移，由于进浆量增大和压力影响范围减弱，浆液扩散速率降低，说明在实际注浆过程中可采用逐级增压注浆法，从而提升注浆效果。

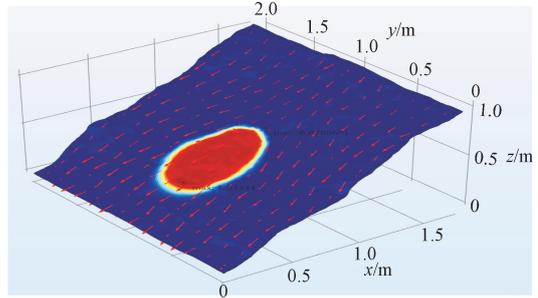
2.2.4 裂隙倾角对单裂隙模型的影响

上述模拟均依托垂直于水平裂隙面的钻孔注浆，但真实地下工程环境中，裂隙交错分布，基本不存在纯水平裂隙。设置与水平线成 0~90° 的裂隙倾角，研究不同倾角对浆液扩散的影响。图 7 显示了在 0°，30°，60°，90° 倾角下，注浆时间为 3 min 时，浆液的浓度场和速度场。图 8 为扩散距离与裂隙倾角之间的

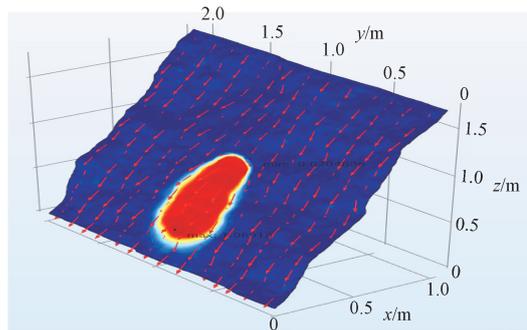
关系曲线。



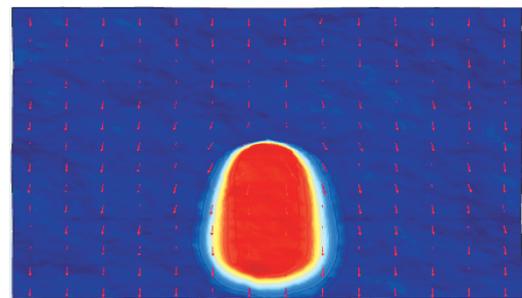
a) 裂隙倾角为 0°



b) 裂隙倾角为 30°



c) 裂隙倾角为 60°



d) 裂隙倾角为 90°

图7 不同裂隙倾角下浆液的浓度场和速度场分布图
Fig. 7 Distribution diagram of slurry concentration field and velocity field under different fracture dip angles

由图 7 可知，浆液在不同倾角裂隙中的扩散形态存在差异。随着倾角增加，浆液扩散形态分别呈现为类圆形、椭圆形和水滴形。随着倾角逐渐增大，重力效应对浆液沿顺坡方向的拉动作用增强，导致浆液沿顺坡方向的扩散距离增大。

由图 8 所示关系曲线可以得知，随着裂隙倾角增

大, 浆液逆重力方向扩散距离减小, 但沿重力方向扩散距离增大。离注浆口的浆液最低点扩散距离随倾角的增加而增大, 但增速减缓, 这表明浆液在裂隙内发生沉积, 使得重力影响减弱。相反, 离注浆口的浆液最高点的扩散距离随倾角的增加而减小, 并且减速减缓, 说明在重力影响下, 浆液沿爬坡方向的扩散变得更加困难。

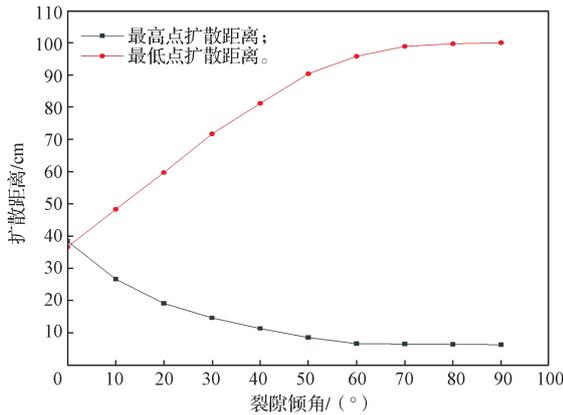


图8 浆液扩散距离与裂隙倾角间的关系曲线

Fig. 8 Relation curves between the liquid diffusion distance and fracture dip angle

2.2.5 时变性对单裂隙模型的影响

浆液黏度受水灰比直接影响, 本研究中配制的3个黏度下的浆液水灰比分别为0.8:1(黏度为0.634 Pa·s)、1:1(黏度为0.420 Pa·s)、1.2:1(黏度为0.366 Pa·s)。本部分对比水灰比为1.0和0.8的浆液, 考虑浆液的时变性, 得到浆液扩散面积与浆液水灰比及浆液时变性的关系曲线, 如图9所示。

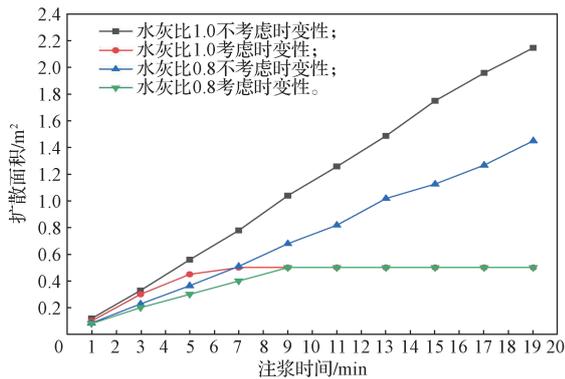


图9 不同水灰比与时变性的浆液扩散面积变化曲线

Fig. 9 Variation curves of slurry diffusion area with different water cement ratio and time variation

由图9可以得知, 考虑浆液的黏度时变性后, 当注浆时间达9 min时, 浆液停止扩散, 这可能是由于浆液已经发生固化, 造成浆液在裂隙内被堵塞。对比考虑后得知, 浆液时变性的扩散面积之间相差最长达1.646 m², 这说明浆液时变性对浆液扩散的影响效果

较为显著。

3 随机裂隙网络

3.1 裂隙网络数值模型

根据实际裂隙的空间分布, 选择具圆盘模型代表三维裂隙网络模型^[17]。圆盘模型的半径代表裂隙的大小, 结合圆心位置和产状信息即可表达裂隙的几何模型。建立尺寸为10 m × 10 m × 5 m的矩形模型, 通过COMSOL Multiphysics软件里三维离散网络裂隙插件设置裂隙, 裂隙数量设置为35条, 裂隙大小采用均匀随机分布, 设置最大轴长为5 m, 最小轴长为1 m; 裂隙方向采用Fisher分布, 设置裂隙走向为60°, 裂隙倾角为45°, 裂隙厚度服从随机均匀分布, 得到的裂隙网络圆盘模型如图10所示, 其中不同颜色代表不同的裂隙厚度。

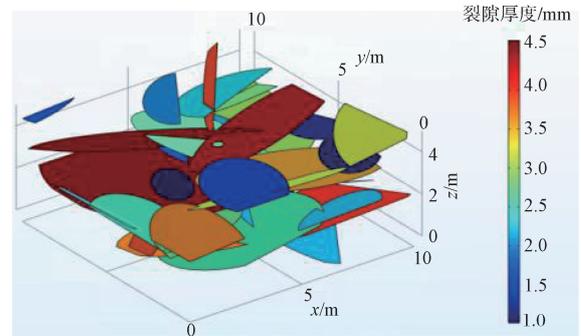


图10 裂隙网络圆盘模型

Fig. 10 Fracture network disk model

在几何模型中对矩形模型进行分割裂隙对象处理, 设置裂隙进出口, 并在模型中心设置直径为40 cm、长4 m的注浆管, 通过求差处理等形成联合体, 得到的几何模型如图11所示。

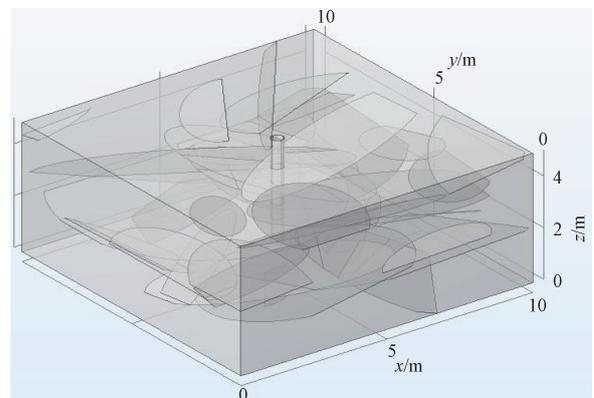


图11 裂隙网络的几何模型

Fig. 11 Fracture network geometric model

设置裂隙面与注浆管相交处为浆液进口, 模型四周设置为无流动边界。裂隙面与模型边界面相交处设

置为浆液出口，设置注浆口为压力入口。计算网格采用自由三角形网格划分，网格数量为46 989个，网格划分结果如图12所示。

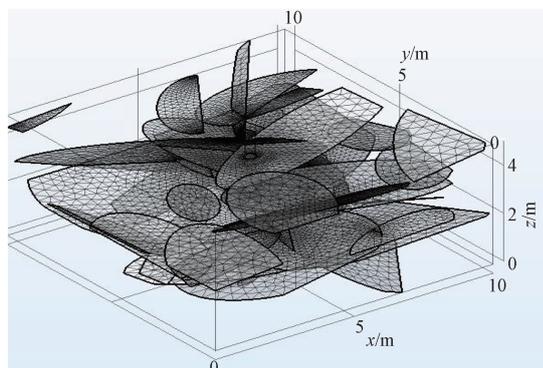


图12 裂隙网络的网格划分图

Fig. 12 Fracture network meshing diagram

3.2 裂隙网络结果分析

3.2.1 压力场分析

在进行不同工况下的注浆模拟时，通过对注浆时的压力场变化进行分析，可探究不同因素对浆液扩散的影响。设定浆液黏度为0.634 Pa·s，注浆压力为0.4 MPa，得此工况下注浆30 min内的浆液压力场变化过程如图13所示。

由图13可知，注浆开始后，压力迅速从注浆孔口呈圆环状向裂隙内扩散，如图a和b所示；注浆200 s后，压力场主要影响范围达2 m，如图c所示；从图d和e可看出，随着注浆时间增加，压力场进一步沿着裂隙通道扩散，但影响范围增速减缓；持续注浆到1 800 s后直至注浆结束，压力场分布趋于稳定状态，如图f。

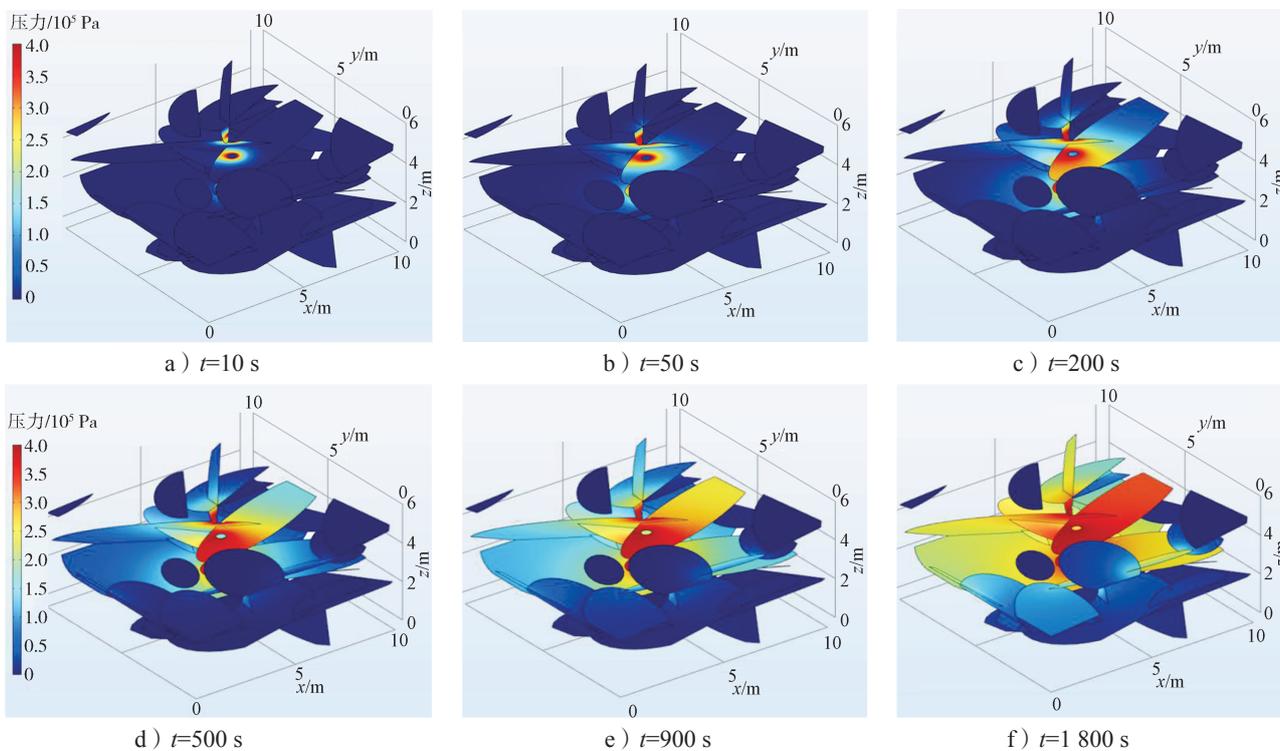


图13 注浆过程中的压力场变化云图

Fig. 13 Pressure field change during grouting nephogram

图14所示为3种不同浆液黏度在持续注浆20 min后的压力分布图。

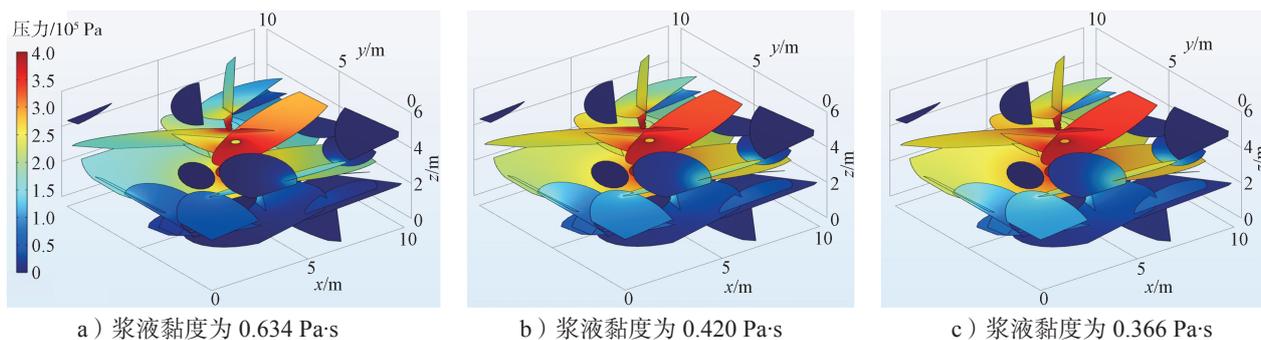


图14 3种浆液黏度在注浆20 min时的压力场分布云图

Fig. 14 Pressure field distribution nephogram of three slurry viscosities during 20 min grouting

由图 14 所示压力场分布云图可以得知, 3 种不同浆液黏度工况的压力场变化情况相似, 但在压力场分布趋于稳定后, 降低浆液黏度将扩大压力场的影响范围。

3.2.2 注浆时间对随机裂隙网络的影响

设注浆压力为 0.4 MPa, 浆液黏度为 0.634 Pa·s, 注浆时间为 10, 50, 150, 300 s, 得到的注浆量与注浆时间关系曲线见图 15。

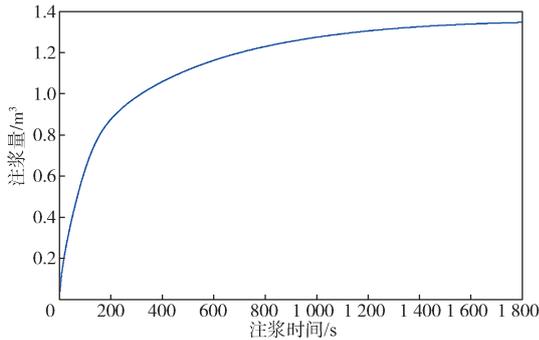


图 15 注浆量与注浆时间的关系曲线

Fig. 15 Relationship curve between grouting amount and grouting time

由图 15 中的关系曲线可知, 随着注浆时间增加, 浆液在裂隙网络中的扩散范围逐渐增大。在注浆时间为 300 s 前, 注浆量快速增加, 注浆量由 0 m³ 快速增加至 0.837 7 m³, 浆液充填率约达 61.7%, 这说明浆液在注浆前期容易在裂隙网络内扩散。但是随着注浆时间的进一步增加, 水泥的进浆量增加, 水泥浆液扩散速率大幅减缓, 注浆量增长趋势进而减缓, 且随着注浆时间的延长, 注浆量最终趋于稳定, 说明浆液已基本充填完毕。

3.2.3 浆液黏度对随机裂隙网络的影响

浆液黏度受水灰比直接影响, 配制水灰比分别为 0.8:1 (0.634 Pa·s)、1:1 (0.420 Pa·s)、1.2:1 (0.366 Pa·s) 的 3 种浆液。设定注浆压力为 0.4 MPa, 分析 3 种不同浆液黏度对浆液扩散的影响, 得到的注浆量与浆液黏度关系曲线如图 16 所示。

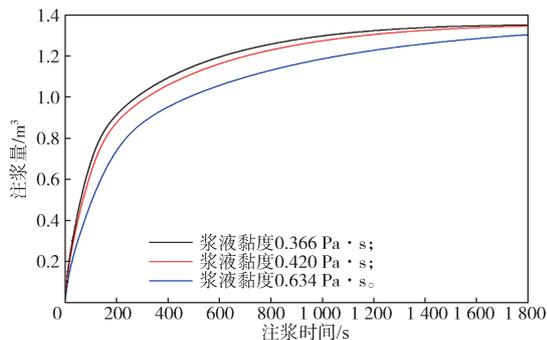


图 16 相同压力下不同黏度浆液的注浆量变化曲线

Fig. 16 Variation curves of grouting volume of grout with different viscosity under the same pressure

由图 16 中的注浆量变化曲线可以得知, 随着浆液黏度减小, 最终的注浆量增大。当注浆结束时, 黏度为 0.366 Pa·s 浆液的最终注浆量为 1.353 5 m³, 黏度为 0.420 Pa·s 浆液的最终注浆量为 1.348 3 m³, 黏度为 0.634 Pa·s 浆液的最终注浆量为 1.306 0 m³。当水灰比从 0.8 提高到 1.0 时, 浆液的注浆量显著增加, 说明调高水灰比、减小浆液黏度可以提高注浆扩散效果。但当水灰比从 1.0 调高到 1.2 时, 浆液的注浆量增加不明显, 这说明调高水灰比对提高注浆扩散效果的影响有限。

3.2.4 注浆压力对随机裂隙网络的影响

注浆压力不仅会影响浆液的流动速度和浆液的扩散范围, 还会直接影响浆液的注入量。设定浆液的黏度为 0.634 Pa·s, 分析 0.3, 0.4, 0.5 MPa 共 3 种不同注浆压力对浆液扩散的影响, 得到注浆量随时间的变化关系曲线如图 17 所示。

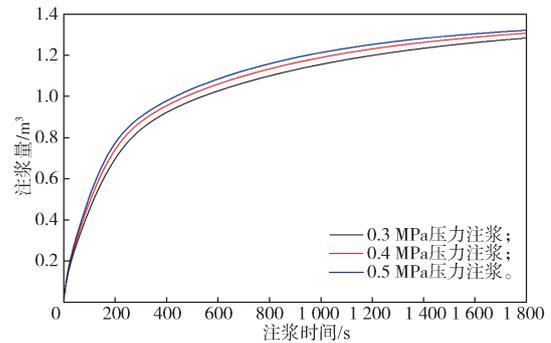


图 17 相同浆液黏度、不同注浆压力下的注浆量变化曲线

Fig. 17 Variation curves of grouting volume under the same slurry viscosity and different grouting pressures

由图 17 所示不同注浆压力下的注浆量变化曲线可以得知, 当注浆压力从 0.3 MPa 增大至 0.5 MPa 时, 最终浆液的注浆量从 1.282 9 m³ 增加至 1.320 5 m³。这一结果表明, 较高压力下浆液能够更好地克服裂隙通道中的黏滞阻力, 使得更多的浆液被注入裂隙中, 更均匀地填充到裂隙网络中, 减少未填充区域的出现, 从而提高了注浆效果。由此可见, 相同的注浆时间内, 较高的注浆压力能够显著加快浆液的扩散速率。

3.2.5 时变性对随机裂隙网络的影响

通过对比考虑水灰比为 0.8 的浆液的时变性, 得到注浆量的变化曲线, 如图 18 所示。由图可知, 考虑了浆液黏度时变性后, 并且当注浆时间达 300 s 后, 裂隙网络中的注浆量不再增加, 且未达到预期的注浆量, 这表明浆液在裂隙内已经逐渐固化, 水泥浆液无法进一步扩散。

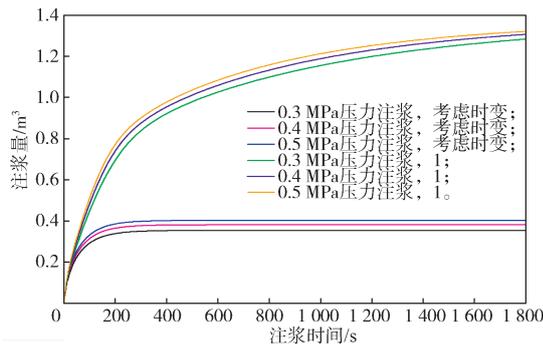


图 18 对比考虑浆液时变性的不同注浆压力下的注浆量变化曲线

Fig. 18 Variation curves comparison of grouting volume under different grouting pressures considering the time-varying of grout

4 结论

1) 通过 Matlab 生成数据函数, 导入 COMSOL 软件, 可建立三维粗糙单裂隙注浆模型; 利用三维离散裂隙网络插件, 生成裂隙圆盘模型, 可建立三维随机多裂隙注浆模型。

2) 浆液扩散范围与注浆时间和压力呈正相关, 与浆液黏度呈负相关。当考虑水泥浆液的时变性后, 由于浆液黏度大幅上升, 会导致注浆量和浆液扩散面积减小。

3) 随着裂隙倾角增加, 浆液在裂隙中的扩散形态由类圆形变为椭圆形直至水滴形。这是由于重力效应导致顺坡方向的扩散距离增加, 而爬坡方向的扩散距离减小。

4) 在注浆过程中, 注浆量随着注浆时间的增加会有明显的减速过程, 故可采用逐级增压策略提高注浆量。根据模拟结果, 水灰比不宜过高或过低, 选用水灰比为 1 时, 注浆效果相对理想。

5) 后续研究中将依托相关工程背景, 在裂隙工况、浆液固化因素以及模型建立等方面进行更深入的研究, 更全面、真实地揭示裂隙注浆作用机理, 指导实际工程施工。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] DENG S H, WANG X L, YU J, et al. Simulation of Grouting Process in Rock Masses Under a Dam Foundation Characterized by a 3D Fracture Network[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(6): 1801-1822.

[4] 唐芙蓉, 陆银龙, 宋浩然. 深井软岩巷道围岩裂隙时效演化规律及注浆强化时机研究[J/OL]. 煤炭学报: 1-12. (2025-06-25). <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0247>.
TANG Furong, LU Yinlong, SONG Haoran. Time-Dependent Evolution of Fractures in Surrounding Rock of Deep Underground Soft Rock Roadways and the Optimal Timing for Grouting Reinforcement[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-12. (2025-06-25). <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0247>.

[5] 高帅, 任富强, 常远. 预制单裂隙砂岩注浆过程中的浆液流动特性研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(8): 2505-2515, 2546.
GAO Shuai, REN Fuqiang, CHANG Yuan. Investigation of Slurry Flow Characteristics During the Prefabricated Single Fracture Sandstone Grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(8): 2505-2515, 2546.

[6] 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.

[7] 郑志民. 基于浆液黏度时变性的竖向裂隙注浆扩散规律研究[J]. 铁道建筑技术, 2024(8): 105-108.
ZHENG Zhimin. Research on the Diffusion Law of Vertical Crack Grouting Based on the Time-Varying Viscosity of Slurry[J]. Railway Construction Technology, 2024(8): 105-108.

[8] 王强, 冯志强, 王理想, 等. 裂隙岩体注浆扩散范围及注浆量数值模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(10): 2588-2595.
WANG Qiang, FENG Zhiqiang, WANG Lixiang, et al. Numerical Analysis of Grouting Radius and Grout Quantity in Fractured Rock Mass[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(10): 2588-2595.

[9] 赵军, 陈志鹏, 高敏. 岩体单一裂隙动水注浆数值模拟研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2022, 42(6): 37-42.
ZHAO Jun, CHEN Zhipeng, GAO Min. Numerical Simulation of Dynamic Water Grouting in Single Fracture of Rock Mass[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 42(6): 37-42.

- [10] 王晓玲, 李瑞金, 敖雪菲, 等. 水电工程大坝基岩三维随机裂隙岩体灌浆数值模拟[J]. 工程力学, 2018, 35(1): 148-159.
WANG Xiaoling, LI Ruijin, AO Xuefei, et al. Three-Dimensional Numerical Simulation of Grouting in Stochastic Fracture Network of Dam Bedrock in Hydropower Engineering[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(1): 148-159.
- [11] 钟杰, 李博, 宋振宇, 等. 基于离散裂隙网络的围岩注浆加固规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(4): 1286-1297.
ZHONG Jie, LI Bo, SONG Zhenyu, et al. Numerical Study on Grouting Reinforcement Effect on Fractured Rock Masses of Tunnels Based on Discrete Fracture Networks[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(4): 1286-1297.
- [12] ZHANG W J, LI S C, WEI J C, et al. Grouting Rock Fractures with Cement and Sodium Silicate Grout[J]. Carbonates and Evaporites, 2018, 33(2): 211-222.
- [13] 王庆磊, 朱永全, 李文江, 等. 考虑黏度空间衰减的宾汉姆流体柱形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(8): 1647-1658.
WANG Qinglei, ZHU Yongquan, LI Wenjiang, et al. Study on the Mechanism of Column Permeation Grouting of Bingham Fluid Considering the Spatial Attenuation of Viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(8): 1647-1658.
- [14] 刘健, 张载松, 韩焯, 等. 考虑黏度时变性的水泥浆液盾构壁后注浆扩散规律及管片压力模型的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 361-368.
LIU Jian, ZHANG Zaisong, HAN Ye, et al. Backfilled Grouting Diffusion Law and Model of Pressure on Segments of Shield Tunnel Considering Viscosity Variation of Cement Grout[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 361-368.
- [15] 李术才, 刘人太, 张庆松, 等. 基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2415-2421.
LI Shucai, LIU Rentai, ZHANG Qingsong, et al. Research on C-S Slurry Diffusion Mechanism with Time-Dependent Behavior of Viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2415-2421.
- [16] 邵雪峰. 基于分形理论的栓接结合部动态特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
TAI Xuefeng. Studies on Dynamic Modeling of Bolted Joints Based on Fractal Theory[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [17] 王明玉, 刘庆哲, 曲辞晓, 等. 基于圆盘裂隙物理模型的岩体单一裂隙渗流规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3523-3530.
WANG Mingyu, LIU Qingzhe, QU Cixiao, et al. Experimental Investigation on the Seepage Flow Through a Single Fracture in Rocks Based on the Disc Fracture Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3523-3530.

(责任编辑: 廖友媛)