

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.04.006

采空区岩体粗糙单裂隙中浆液扩散机理研究

刘少炜¹, 刘先珊^{2a,2b}, 张普纲¹, 侯泽林^{2a,2b}, 潘玉华^{2a,2b}, 熊振瑀^{2a,2b}

(1. 山西省交通新技术发展有限公司, 太原 030000; 2. 重庆大学 a. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; b. 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:以某采空区岩体粗糙裂隙为研究对象, 基于有限元软件 COMSOL Multiphysics 构建了三维粗糙单裂隙注浆模型, 分析岩体裂隙中的浆液流动规律, 研究了不同的裂隙面粗糙度、开度、注浆压力、裂隙倾角及浆液黏度影响的浆液扩散机理。结果表明, 裂隙面粗糙度影响浆液的扩散面轮廓, 粗糙度越大, 浆液扩散阻力越大, 浆液扩散各向异性越强; 注浆速率与开度为二次多项式关系, 裂隙开度越大, 注浆速率的损失越小; 注浆压力对浆液扩散轮廓的影响较弱, 但改变了浆液的扩散半径, 且注浆压力与扩散半径为正相关、与注浆速率呈二次多项式关系, 注浆压力越大, 注浆速率的损耗越低; 浆液黏度并不影响其扩散的各向异性, 仅改变浆液扩散的范围。研究成果表明了采空区粗糙裂隙中的浆液扩散机理, 为采空区注浆范围的预测及加固决策提供了理论支持。

关键词: 注浆; 采空区; 注浆模型; 扩散机理; 粗糙度; 浆液黏度

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)04-064-22

Grout diffusion mechanism for rough single fracture in the goaf rock mass

LIU Shaowei¹, LIU Xianshan^{2a,2b}, ZHANG Pugang¹, HOU Zelin^{2a,2b}, PAN Yuhua^{2a,2b},
XIONG Zhenyu^{2a,2b}

(1. Communications New Technology Development Company of Shanxi Province, Taiyuan 030000, P. R. China; 2a. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; 2b. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: This study presents a 3D rough fracture grouting model on an engineering scale, specifically investigating the diffusion mechanism of slurry under different fracture surface roughness, openness, grouting pressure, fracture inclination, and slurry viscosity in fractured rock bodies. Using the software COMSOL

收稿日期: 2023-07-12

基金项目: 山西省交通新技术发展有限公司资助项目(SXJTJS-02040-2022-第9号); 国家自然科学基金资助项目(52279094); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0069)。

Supported by Communications New Technology Development Company of Shanxi Province(SXJTJS-02040-2022-No. 9), Natural Science Foundation of China (52279094) and Natural Science Foundation of Chongqing (CSTB2023NSCQ-MSX0069).

作者简介: 刘少炜(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程方向研究, (E-mail)372797493@qq.com。

通信作者: 刘先珊(1978—), 女, 博士, 教授, (E-mail)liuxianshan@163.com。

Multiphysics, the study examines the slurry flow law within the fractures. It is observed that the profile of the slurry diffusion surface is influenced by the roughness of the fracture surface. A rough fracture surface hinders slurry diffusion and is a key cause of anisotropy in slurry diffusion. Furthermore, a quadratic polynomial relationship is identified between the grouting rate and the degree of opening. Large fracture opening results in smaller losses in grouting rate. Injection pressure is found to weakly affect the slurry diffusion profile, mainly changing the diffusion radius of the slurry. There is a positive correlation between injection pressure and diffusion radius, with a quadratic polynomial relationship with injection rate. Higher injection pressure leads to lower loss in injection rate. The effect of slurry viscosity on the slurry diffusion pattern depends on the range of viscosities, primarily changing the range of slurry diffusion. This study sheds light on the slurry diffusion pattern in rough fissures and provides a theoretical basis for grouting prediction and management in extraction area.

Keywords: grouting; mining area; grouting model; diffusion mechanism; roughness; slurry viscosity

中国煤炭开采以井工开采为主,工程实践表明^[1],40%~80%的深井巷道开挖后变形破坏严重,不断维修才能保证巷道生产需求。用于通风、运输的巷道和未完全充填的矿区(统称采空区)均破坏了岩体结构的完整性。为了提高采空区的稳定性,精细化的注浆控制可以提高岩体强度并实现封堵抗渗^[2]。实际注浆过程中,复杂的裂隙空间展布、注浆孔间距、注浆压力、注浆时间、浆液配比等都会影响注浆效果,当前的注浆浆液渗流过程、浆液扩散半径无法实现实时监控,注浆钻孔布置存在盲目性和不确定性,无法判断最终的注浆效果,注浆设计和施工过程的精准性不够。为了提高采空区注浆的有效性,注浆过程中的浆液扩散精细化描述是当前亟待解决的问题。

国内外学者对岩体裂隙内的浆液流动开展了研究。Amadei等^[3]基于宾汉姆流体假设推导了裂隙中注浆扩散方程;刘泉声等^[4]将岩体考虑为多孔介质,分析了深部巷道注浆加固浆液扩散机理;Zhang等^[5]考虑浆液黏性随着空间改变条件下的流动特性;Zhang等^[6]推导了水泥和硅酸钠浆液在岩体裂隙中的流动半径扩散模型。可见,精确计算浆液在岩体裂隙内扩散距离的理论还远不成熟,大部分计算都会对裂隙简化,难以反映浆液的真实扩散情况。还有一些学者开展了各类注浆扩散模型的研究,李术才等^[7]通过试验数据拟合获取了水泥-玻璃浆液黏度时变性函数曲线,数值模拟了定注浆速率条件下浆液扩散形态及压力场时空变化规律;高圣元^[8]基于巴顿公式中标准节理轮廓线构建微裂隙几何模型,采用 $N-S$ 方程建立了宾汉姆流体微裂隙注浆扩散有限元模型,获取了裂隙开度、粗糙度以及浆液黏度对扩散规律的影响;杨志全等^[9-10]研究了幂律型流体半球形和柱形扩散机制,与试验方法结合研究了流变参数时变性特征对注浆效果的影响;李术才等^[11]通过分数布朗函数创建节理面几何模型,基于 $N-S$ 方程分析了节理粗糙度、连通性对浆液扩展的影响,修正立方定律并建立界面层本构方程、浆液流动方程建立了浆岩耦合效应的注浆扩散公式;Hong等^[12]基于试验研究了采空区上部裂隙发展过程中的浆液扩展机理;Saeidi等^[13]基于离散元软件UDEC模拟了浆液在简单交叉裂隙岩体中的流动扩散过程;Xie等^[14]基于 $N-S$ 方程研究了单一岩体裂隙在剪切过程中的水动力线特性,为浆液流动数值分析提供了技术手段;杨坪等^[15]将二维裂隙曲线拉伸到三维裂隙面,基于COMSOL软件的两相流水平集法模块研究了裂隙面粗糙度对动水注浆扩散距离的影响;Mu等^[16]建立水力耦合效应的浆液流动模型,分析粗糙度及剪切变形对浆体流动特性的影响。

上述成果为复杂粗糙裂隙的浆液扩散机理研究提供了理论基础及技术支持。在此基础上,以山西汾石老旧采空区(矿区含煤地层厚486 m,采空区主要为煤房柱式采空区、煤长壁式采空区及岩巷,位于东北及西南角)特定结构的工程尺度粗糙裂隙为研究对象,基于SRA方法生成粗糙裂隙面,导入到有限元软件COMSOL Multiphysics, $N-S$ 方程考虑水平集追踪浆液的扩散界面,分析不同配比浆液在不同注浆方式及不

同类型裂隙中的流动特性,验证注浆模型的可行性。开展不同裂隙面粗糙度、开度、注浆压力、裂隙倾角及黏度条件下的粗糙裂隙浆液流动研究,获得浆液扩散半径、扩散速率及注浆压力的变化规律,建立各因素之间的关联性,为采空区岩体精细化注浆控制提出建议。

1 粗糙裂隙注浆模型构建

1.1 生成粗糙裂隙面

研究表明,裂隙面具有分形特点^[17-19],Kulatilake等^[20]假设裂隙为自反射剖面,提出了一种变异函数法来评价分形维数,其表达式为

$$2\gamma(x,h) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2, \quad (1)$$

式中, $\gamma(x,h)$ 是半方差函数; $Z(x_i+h)$ 和 $Z(x_i)$ 是裂隙面的高度值; M 是粗糙裂隙面轮廓以 h 为滞后距离时的高度对的总数。

当 $h \rightarrow 0$ 时, $\gamma(x,h)$ 可以被简化为幂律函数:

$$2\gamma(x,h) = K_v h^{2H}, \quad (2)$$

式中: K_v 是比例常数; H 为赫斯特指数,与分形维数 D_v 之间有以下关系: $D_v = 2 - H$,赫斯特指数的范围在0~1,数值越大,裂隙面越光滑。可见,赫斯特指数可以反映出裂隙面的分形特点。

考虑裂隙面的分形特性,使用分形几何法即应用逐次累加法或随机布朗函数法来生成分形裂隙面构建数值模拟所需的粗糙裂隙面。基于修正逐次随机累加算法(SRA)^[17]生成二维裂隙面。

1) 设定裂隙面尺寸,4个角点的起伏度初始值由高斯分布函数 $N(0, \sigma_0^2)$ 产生。

2) 通过线性插值获取裂隙面4个边中点以及裂隙中心点处起伏度的初始值,对每个点的起伏度值加上由高斯分布函数 $N(0, \sigma_1^2)$ 产生的随机值。

$$\sigma_1^2 = \frac{\sigma_0^2}{2^{2H}} \left(1 - \frac{2^{2H}}{4}\right), \quad (3)$$

式中: H 为赫斯特(Hurst)指数,取值范围为0~1, H 的数值越大,代表裂隙面越光滑。

3) 对步骤2)形成的每个新小正方形裂隙面的各边中点以及中心点进行线性插值得到新的各点起伏度初始值,再对每个点的起伏度值加上由高斯分布函数 $N(0, \sigma_2^2)$ 产生的随机值。

$$\sigma_2^2 = \frac{\sigma_1^2}{2^{2H}} = \frac{\sigma_0^2}{(2^{2H})^2} \left(1 - \frac{2^{2H}}{4}\right). \quad (4)$$

4) 重复步骤3),第 n 次后得到包含 $(2^n + 1)^2$ 各节点的粗糙裂隙面数据。

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_{n-1}^2}{2^{2H}} = \frac{\sigma_0^2}{(2^{2H})^n} \left(1 - \frac{2^{2H}}{4}\right). \quad (5)$$

5) 继续对所有点的起伏度值添加服从 $N(0, \sigma_j^2)$ 分布的随机值。

$$\sigma_j^2 = \frac{\sigma_{j-1}^2}{2^{2H}} = \frac{\sigma_0^2}{(2^{2H})^j} \left(1 - \frac{2^{2H}}{4}\right), \quad (6)$$

式中: $j=n+1, n+2, n+3, \dots$,直到 $\sigma_j^2 \ll \sigma_0^2$ 。

调整差值次数和容差可得到给定起伏度范围内的参数化粗糙裂隙面。借助MATLAB生成符合分形特征的随机数据点,随后形成不同 H 值的粗糙裂隙面,如图1所示。

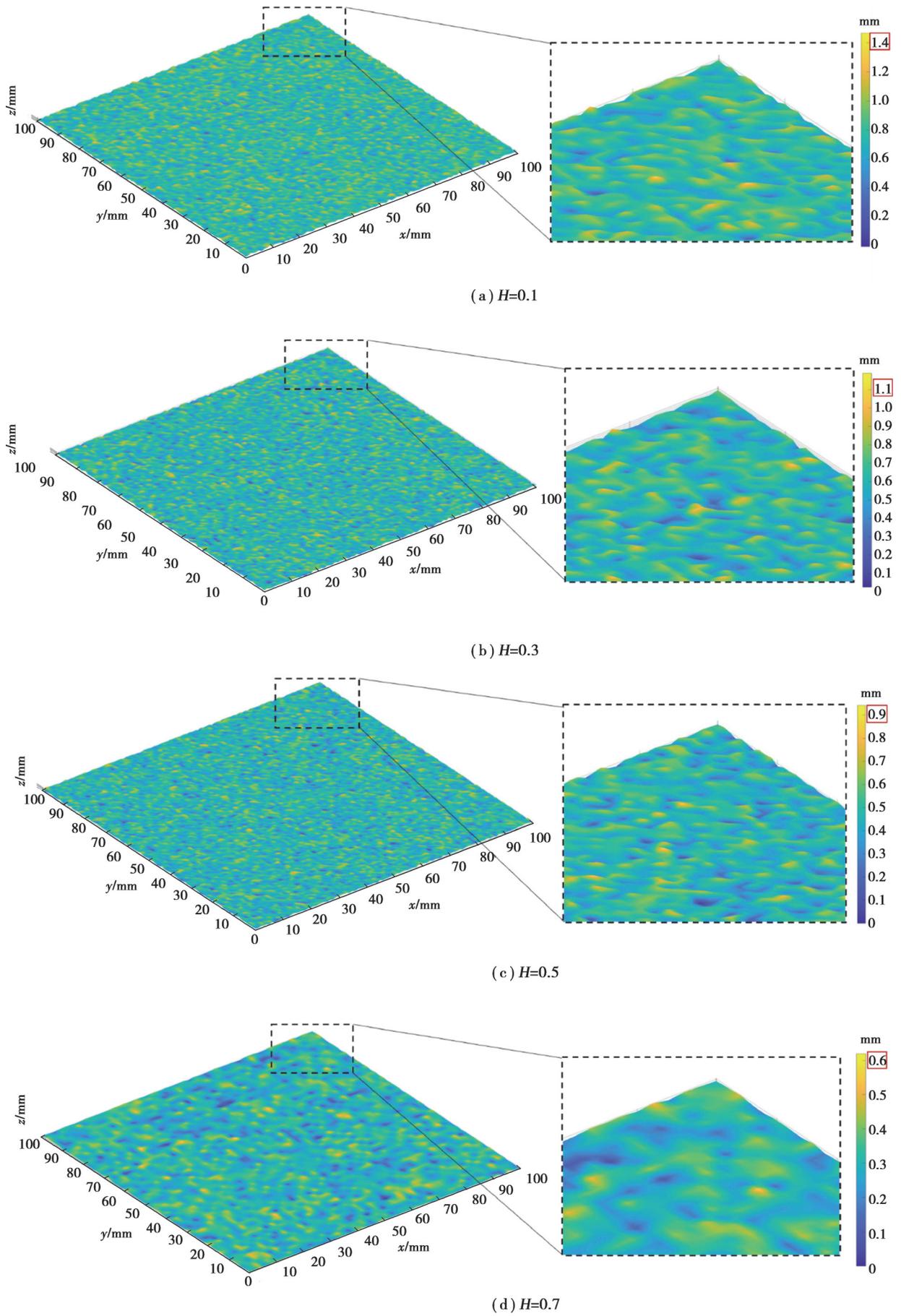


图 1 MATLAB 中不同 H 值粗糙裂隙面

Fig. 1 Rough fracture surface with different H values

1.2 构建粗糙裂隙注浆模型

首先,根据SRA算法在MATLAB中生成具有分形特性的不同粗糙度的裂隙面数据,随后,将这些裂隙面数据导入有限元软件COMSOL,借助软件中的参数化曲面的方法,构建不同粗糙度的裂隙面,如图2所示。建立粗糙单裂隙模型,通过“抬升”裂隙面的方式构建出常开度的粗糙单裂隙^[24],如图3所示。

设计粗糙裂隙模型尺寸为25 m×25 m,如图4所示,模型中心设置半径5 cm的圆形注浆孔^[22]。注浆模型边界条件:中间注浆孔设置为定压力的入口边界($P=P_{\text{zhujiang}}$),裂隙上下面为不可压缩的无滑移($\mathbf{u}=0$)、无流动的壁条件:

$n \cdot \left[\epsilon_s \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] = 0$,即裂隙壁面法向方向没有流动,其他均为出口边界($P=0$)。

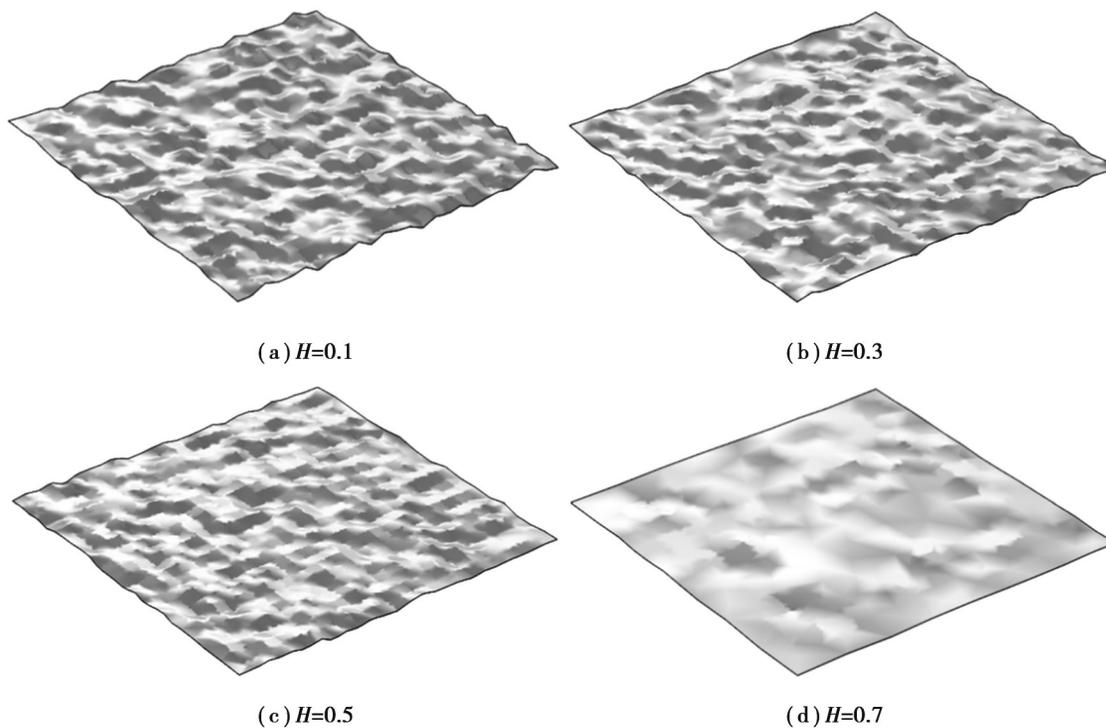


图2 COMSOL中不同 H 值的粗糙单裂隙模型

Fig. 2 Rough single fracture model with different H values

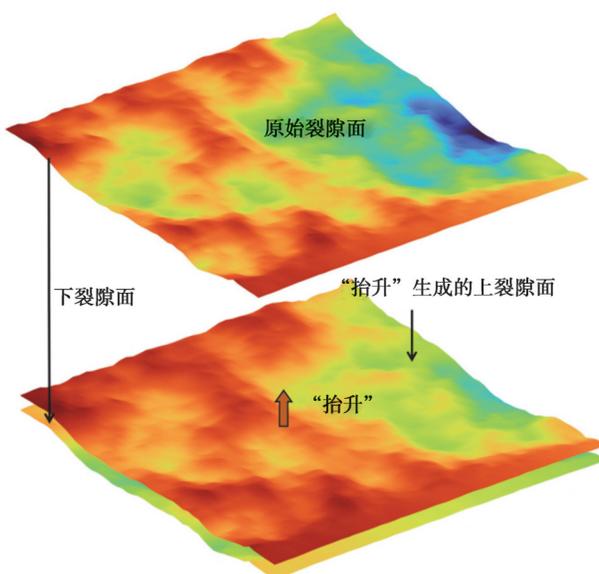


图3 构建粗糙单裂隙的示意图

Fig. 3 Construction of a rough single fracture

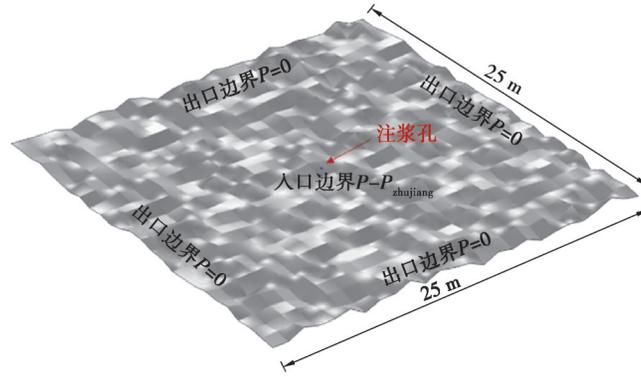


图4 粗糙单裂隙注浆模型及边界条件

Fig. 4 Rough single crack grouting model

1.3 控制方程

基于 COMSOL Multiphysics 软件中的层流模块,选择 $N-S$ 方程计算浆液流动,用水平集法追踪浆液的扩散界面。

1) 运动方程

假设浆液扩散各向同性,运动方程如下

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho\mathbf{g}, \quad (7)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; \mathbf{u} 为速度场; p 为压力; \mathbf{I} 为单位张量; \mathbf{K} 为黏性应力张量; \mathbf{F} 为流体所受到的体积力, N 。

2) 连续性方程

根据质量守恒定律,浆液流动的连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (8)$$

3) 两相流相边界的控制方程

浆液在粗糙单裂隙中的扩散属于液-液混合物的两相流问题,可以使用表面追踪法来描述两相的相边界的形状。文中借助水平集法来描述浆液在含水的粗糙单裂隙中的扩散过程,水平集法是将两相界面看作高一维空间中的某一函数(水平集函数),在这种方法中,不同的相之间是相互排斥的,并且存在一个清晰的相边界,在这个相边界上水平及函数 ϕ 会发生突变。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left(\epsilon_b \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right), \quad (9)$$

式中: ϕ 为水平集函数,该函数仅追踪相边界的位置,没有任何物理意义,数值介于 0~1 之间; γ 为重新初始化速度参数; ϵ_b 为界面厚度控制参数。

将界面上 $N-S$ 方程求解的速度传递到水平集函数上,求解水平集函数发展方程推进水平集函数,得到新时刻的零水平集,界面的法向和曲率由水平集函数的偏导数得出,从而得到两相界面的形状。两相界面上的液体密度和动力黏度均与水平集函数相关联,表达式为

$$\rho = \rho_g + \phi(\rho_w - \rho_g), \quad (10)$$

$$\mu = \mu_g + \phi(\mu_w - \mu_g), \quad (11)$$

式中: ϕ 为水相的水平集函数; ρ_g 和 ρ_w 分别为浆液和水的密度; μ_g 和 μ_w 分别为浆液和水的黏度。计算采用体积分数方法来表征浆液和水两相界面的变化规律。

2 粗糙单裂隙中浆液扩散规律

浆液因配制原料及水灰比的不同,流体性质不同,分为牛顿、宾汉姆和幂律型流体,基于表 1 中不同浆液的流变方程和流动模式,选取宾汉姆流变模式来表现浆液的特性。阮文军等^[23]通过大量试验得出宾汉姆流

体的水灰比为 0.8~1.0,水灰比小于 0.8 时,浆液向幂律流体转换;水灰比大于 1.0 时,浆液逐渐转换为牛顿流体。浆液的流变方程及对应流动模式如表 1 所示,考虑多因素(粗糙度、开度、倾角、注浆压力、浆液黏性)影响的单裂隙注浆浆液扩散规律^[24]。基于汾石、晋阳采空区治理项目的勘探资料,裂隙开度在 1~3 mm,开度设计介于 1~3 mm,分别为 1、1.5、2、2.5、3 mm。实际工程中裂隙粗糙度变化范围大,选取 4 种有代表性的裂隙粗糙度($H = 0.1、0.3、0.5、0.7$)进行研究,其结果与 $H=1.0$ 的光滑裂隙对比。考虑工程常用的注浆压力范围,注浆压力值取 0.1~0.5 MPa。裂隙倾角的设置是由项目勘探报告中钻孔岩芯的成像图分析得出,芯样中裂隙的倾角在 $10^\circ\sim 60^\circ$ 之间,设置 6 个不同倾角($10^\circ、20^\circ、30^\circ、40^\circ、50^\circ、60^\circ$)。考虑浆液黏度对注浆效果的影响,选取代表性的水灰比($w/c = 0.5、0.75、1.0、1.25、1.5$)。不同水灰比水泥浆液的流变方程,如表 2 所示。模拟工况,如表 3 所示。

为了监测注浆过程中粗糙裂隙里浆液扩散分布情况,在注浆孔附近 $x=12\text{ m}$ 的位置处,截取 1 个截面,如图 5(a)所示,截面的放大图如图 5(b)所示。在截面上截取 11 条截线,截线位置如图 5(c)所示,可获得浆液扩散路径中不同位置处沿着裂隙开度方向的流速分布,便于分析浆液扩散规律。

表 1 浆液的流变方程和流动模式

Table 1 Rheological equation and flow mode of grout

浆液性质	流变方程	流变模式
$w/c < 0.8$	$\tau = k\gamma^n$	幂律型
$0.8 < w/c < 1.0$	$\tau = \tau_0 + \mu_0\gamma$	宾汉姆
$w/c > 1.0$	$\tau = \mu_f\gamma$	牛顿

表 2 不同水灰比水泥浆液的流变方程

Table 2 Rheological equation of cement grout with different water cement ratios

水灰比 w/c	屈服应力 τ_0	塑性黏度 η_p	流变方程及相关系数
0.50	12.412 0	0.104 2	$\tau = 12.4121 + 0.1042D_s, R^2 = 0.979 2$
0.75	3.213 0	0.020 3	$\tau = 3.2130 + 0.0203D_s, R^2 = 0.956 5$
1.00	0.859 3	0.016 9	$\tau = 0.8593 + 0.0169D_s, R^2 = 0.993 9$
1.25	0.113 6	0.015 9	$\tau = 0.1136 + 0.0159D_s, R^2 = 0.999 4$
1.50	0.055 9	0.015 6	$\tau = 0.0559 + 0.0156D_s, R^2 = 0.999 8$

表 3 模拟试验工况

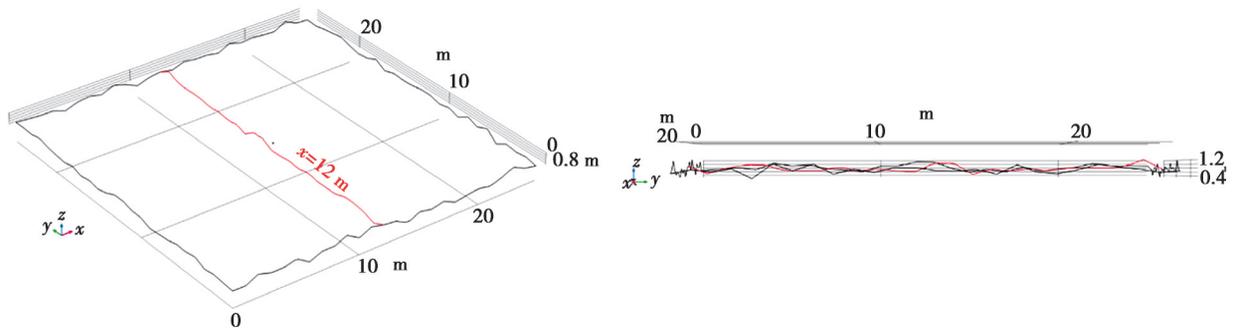
Table 3 Simulated experimental conditions

影响因素	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
粗糙度 H	0.10	0.30	0.50	0.70	1.00	—
裂隙开度 D_f/mm	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	—
倾角 $/^\circ$	10	20	30	40	50	60
注浆压力 P/MPa	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	—
浆液水灰比 w/c	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	—

2.1 粗糙度对浆液扩散的影响

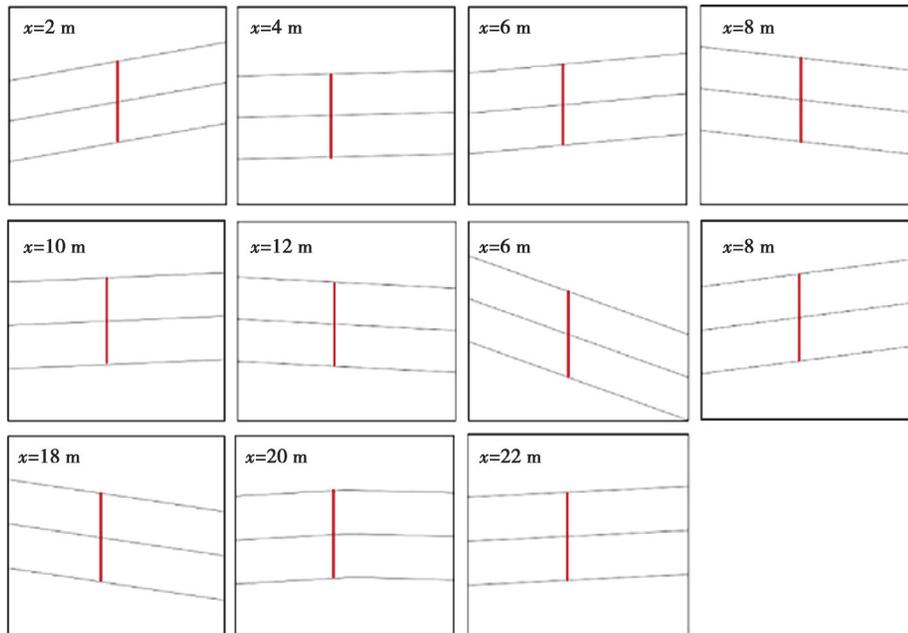
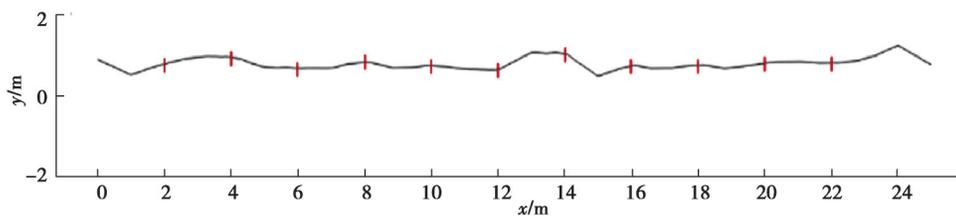
为观察浆液面扩散形态,在裂隙面上以注浆孔为圆心,截取半径为 8 m 的圆形区域,对不同 H 值的粗糙裂隙的注浆过程进行分析。选取代表性工况的浆液扩展过程如图 6 所示,红色区域代表浆液,图例数值表示浆液体积分数。结果表明,在固定的注浆压力下,不同粗糙度的裂隙中浆液面半径均随时间逐渐扩大,但裂隙越光滑,相同时间内浆液扩散半径与裂隙面粗糙度之间呈负相关, $t=50\text{ s}$ 时刻, $H=1.0$ 时,浆液扩散半径明显大于其他 3 种粗糙度裂隙中的浆液半径。由此可见,裂隙面粗糙度越大,浆液的扩散半径越小,裂隙表面

的粗糙微凸体对浆液的扩散有阻碍作用。对比不同 H 值的粗糙裂隙中的浆液面轮廓形状, $H = 1$ 时的浆液面轮廓始终保持为标准圆形,粗糙裂隙的浆液扩散轮廓会随着裂隙表面的凹凸不平而变化,浆液扩散半径各向异性,不同方向的浆液扩散半径互不相同。图 5 给出了 $t = 50$ s 时,3 种不同 H 值的粗糙裂隙中浆液扩展情况, $H = 0.7$ 时的浆液轮廓的各向异性更显著,表明裂隙表面大尺度起伏对浆液扩散半径的影响更显著。图 7 所示的浆液压力分布表明,相同时刻,裂隙粗糙度越大,压力等值线越不规则;离注浆孔越近,压力等值线会越规则。压力数值的大小表明,裂隙粗糙度越大,注浆孔附近的浆液压力越大,等值线分布越密集。因此,粗糙度越大,浆液扩散的阻力越大,浆液压力沿浆液扩散方向降低的速率越大,耗散的能量越多。



(a) 截取粗单中 $x = 12$ m 截面

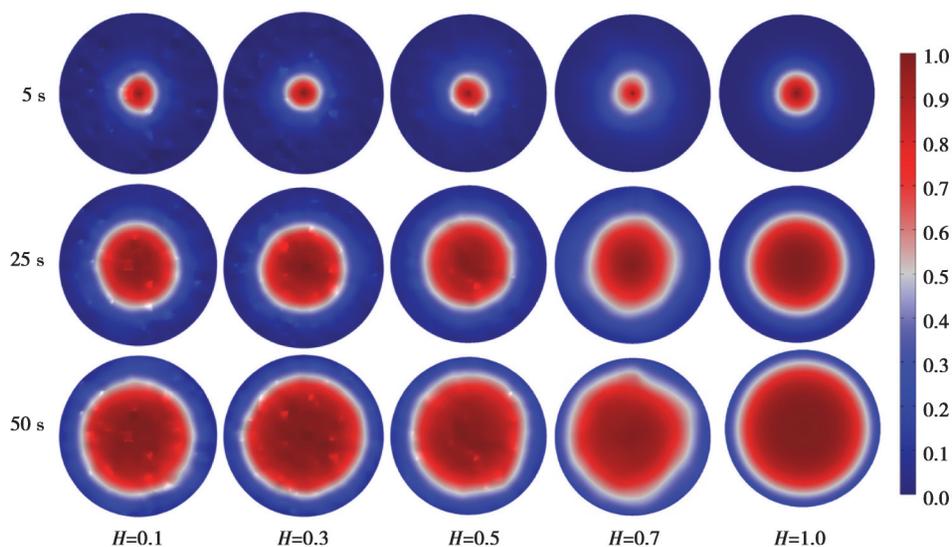
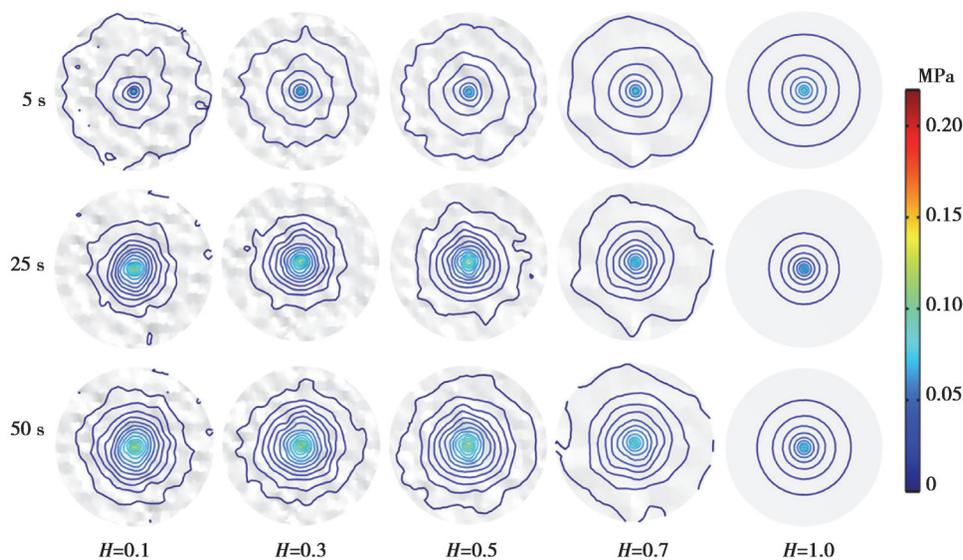
(b) $x = 12$ m 截面的放大图



(c) 截面上截取的 11 条截线

图 5 不同 H 值的粗糙裂隙中浆液扩展情况

Fig.5 Grout expansion in rough cracks with different H values

图6 不同 H 值的单裂隙在不同时刻的浆液分布图Fig. 6 Serous distribution of single fracture with different H values at different times图7 不同时刻不同 H 值的裂隙的浆液压力等值线图Fig. 7 Contour maps of slurry pressure for fractures with different H values at different times

监测注浆过程中注浆口处的浆液流量,得到不同粗糙裂隙相同注浆压力和开度下的浆液量变化曲线,如图8所示的实线;在各个时间点将浆液流量对时间积分,计算得到平均浆液扩散半径随时间的变化规律,如图8中的点划线。结果表明,固定注浆压力时,浆液注入的速率随时间快速达到峰值,再迅速降低,最后趋于平稳。整个注浆过程中,光滑裂隙中的注浆速率始终最大, H 值越低,即裂隙越粗糙,注浆速率越小。注浆结束时,光滑裂隙的注浆速率为347.77 L/min, $H=0.3$ 的粗糙裂隙的注浆速率最低,为261.36 L/min,两者相差86.41 L/min。注浆结束时, $H=0.3$ 的裂隙中注浆速率降低了30.19%, $H=0.5$ 的注浆速率下降了30.22%, $H=0.7$ 的下降了23.87%,光滑裂隙下降了17.82%。因此,裂隙越粗糙,注浆过程中损耗的能量越大,即实际注浆过程中要达到理想的注浆效果,所需的注浆压力高于试验值和模拟值。同时,由浆液扩散半径的变化可知,光滑裂隙浆液扩散半径最大,注浆结束时达到6.94 m, $H=0.1$ 的粗糙裂隙的浆液扩散半径最小,为5.83 m,相差1.11 m,可见裂隙面越光滑,浆液扩散半径越大。

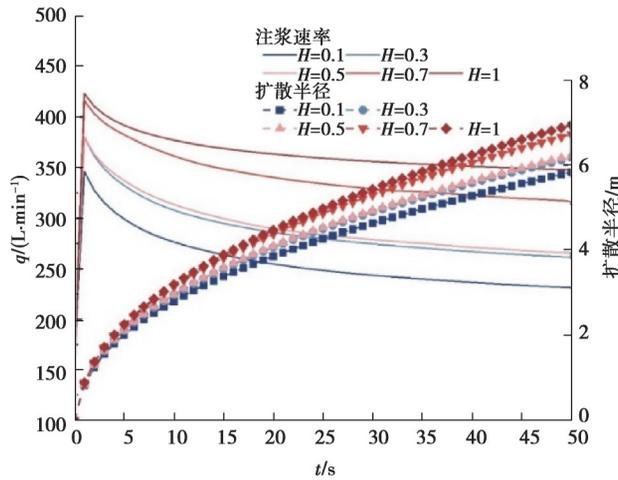


图 8 不同粗糙度下注浆速率与浆液扩散半径的变化曲线

Fig. 8 Curves of grouting rate and grout diffusion radius under different roughness values

为便于观察裂隙粗糙度对注浆过程的影响,分别在注浆前期($t=2\text{ s}$)、中期($t=25\text{ s}$)和后期($t=50\text{ s}$)的不同阶段,拟合不同 H 值的粗糙裂隙所对应的注浆孔口处的浆液流量 q ,如图 9 所示。结果表明,不同注浆阶段的注浆速率与粗糙度 H 值正相关。不同的注浆阶段,拟合函数的一次项系数有差异。随着注浆的进行,拟合曲线的一次项系数逐渐增大,表明粗糙度对注浆速率的影响随时间增大。因 H 值介于 0~1 之间,即使裂隙表面粗糙度发生变化,对注浆速率的影响都比较小。因此,工程中考虑裂隙的粗糙度时,可取相对较大的 H 值的划分区间,即对于粗糙度相近的一类裂隙可采用相同的 H 值进行描述。

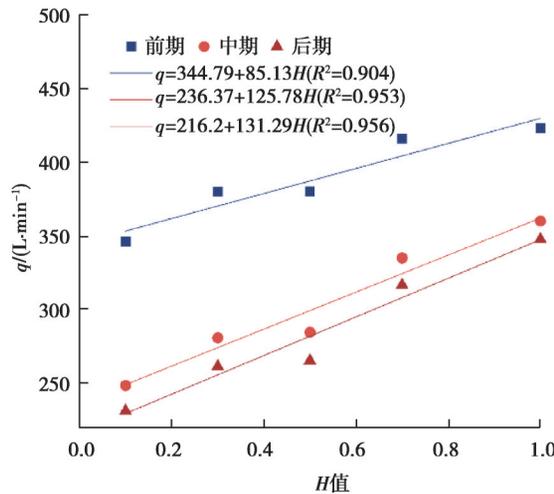


图 9 不同注浆阶段时注浆速率与 H 值关系

Fig. 9 Relationship between grouting rate and H value at different grouting stages

获得不同粗糙度裂隙各截线处的浆液流速,如图 10 所示。结果表明,裂隙粗糙度对浆液的扩散有显著影响,图 10(e)是 $H=1.0$ 时的流速分布,其流速在裂隙中线处最大,裂隙壁面为 0,符合光滑平行板中流速的分布状态。随着裂隙粗糙度的不断增大,相同截线处的流速分布状态开始逐渐发生变化,图 10(a)为 $H=0.1$ 时,开度方向的流速分布,图中各截面的流速峰值并非单一集中在裂隙开度的中间,甚至有双峰值的情况出现。由图可知, $x=12\text{ m}$ 的截线处流速总是最大,主要是该截线距离注浆孔最近,离注浆孔的距离是影响浆液扩散速度峰值的关键因素。总之,粗糙度 $H=0.5$ 时,浆液流速的峰值最小,速度最大的 $x=12\text{ m}$ 截线的峰值速度都只有 0.257 m/s ; $H=1.0$ 的情况下,浆液流速最大,对应 $x=12\text{ m}$ 截线的峰值速度达到 0.954 m/s 。

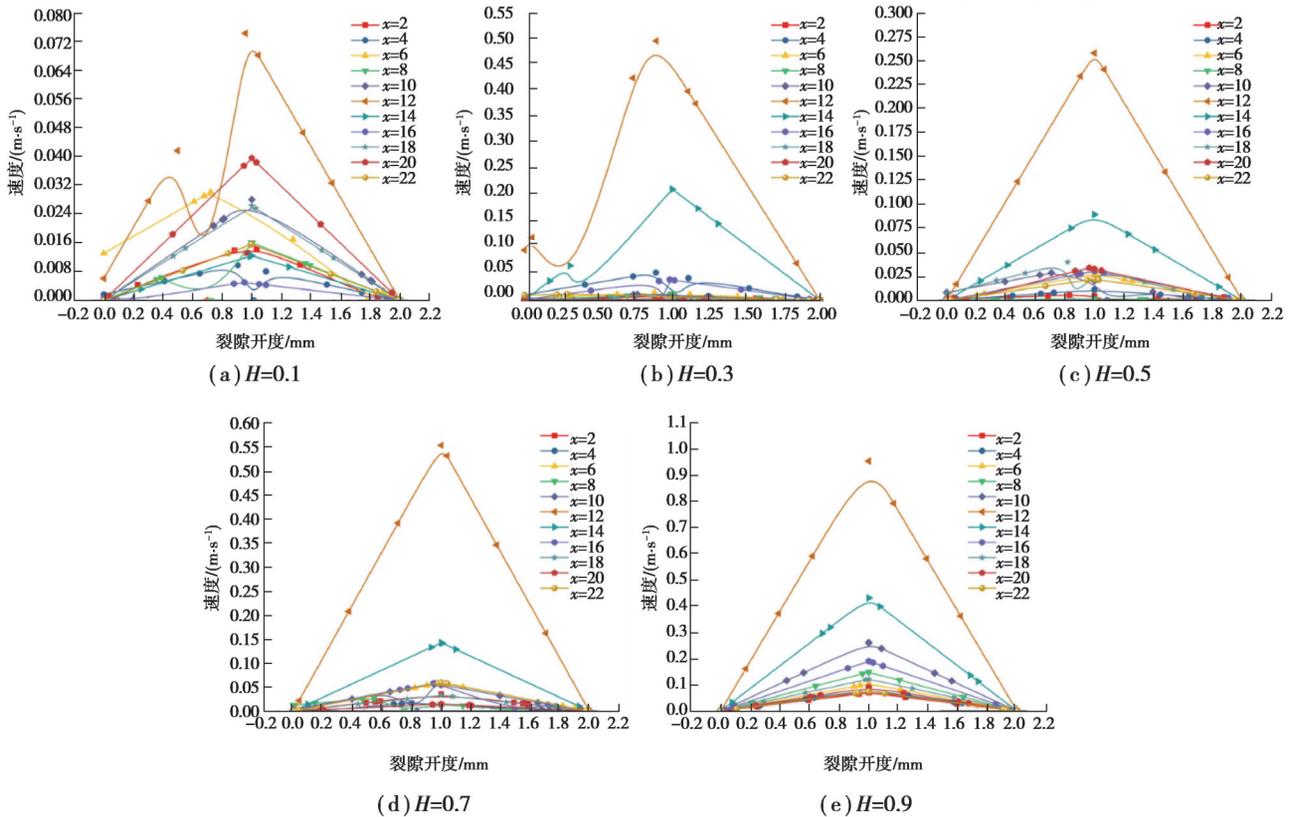


图 10 不同粗糙度情况下各截线处流速分布

Fig. 10 Velocity distribution at each transversal under different roughness values

2.2 开度对浆液扩散的影响

保持裂隙粗糙度为 $H = 0.5$, 注浆压力 P 为 0.2 MPa , 水灰比 w/c 为 1 , 裂隙倾角 θ 为 0° , 仅改变裂隙开度, 研究裂隙开度 D_f 对浆液扩散的影响。为便于观察浆液面扩散形态, 截取以注浆孔为圆心, 半径为 8 m 的范围内的浆液扩散分布云图和压力等值线图进行分析, 如图 11~图 12 所示。由图 11 可知, 注浆压力和粗糙度不变, 相同时刻不同开度裂隙时, 浆液面的扩散轮廓都相同, 如时间 $t = 15 \text{ s}$ 时, 开度为 2.5 mm 的裂隙的浆液轮廓与开度为 1.5 mm 的浆液面轮廓以及 1 mm 的浆液面的轮廓都相同。但裂隙开度越大, 浆液面的扩散半径越大, 在注浆结束时, 不同开度裂隙中浆液扩散半径相差较大, 可见裂隙开度对浆液面轮廓形状的影响较小, 但是对浆液扩散半径有较大影响。

图 12 描述了不同时刻, 不同开度裂隙的浆液压力分布。结果表明, 注浆初始阶段 ($t = 5 \text{ s}$), 裂隙开度越大, 浆液压力的分布范围越广, 但随着注浆过程的进行, 小开度的裂隙压力等值线分布更加密集, 当时间 $t = 25 \text{ s}$ 和 $t = 50 \text{ s}$ 时, 开度 $D_f = 1.0 \text{ mm}$ 时, 压力等值线分布比 $D_f = 3.0 \text{ mm}$ 时更密集, 裂隙开度越小, 浆液扩散越困难, 注浆压力越大。图 11 显示, 压力等值线呈现不规则的圆, 裂隙开度越小, 等值线形状越不规则。因此, 等值线形状与裂隙开度和裂隙表面粗糙度均相关, 裂隙开度越大、裂隙表面越光滑, 压力等值线的形状越趋向于规则的圆形; 反之, 压力等值线形状越不规则。

图 13 给出了注浆过程中不同开度裂隙的注浆速率随时间变化曲线。将浆液流量对时间进行积分得到灌浆量, 计算浆液平均扩散半径随时间的变化曲线, 如图 13 的点划线所示。结果表明, 不同开度裂隙注浆口处的注浆速率随时间的变化规律相同, 均在注浆刚开始就快速达到速率峰值, 再逐渐降低, 最后趋于平缓。但不同开度的裂隙中, 注浆口的注浆速率峰值相差较大, 整个注浆过程中, 注浆速率随裂隙开度的增大而增大, $D_f = 3.0 \text{ mm}$ 时, 注浆速率峰值最大, 为 759.53 L/min , 是 $D_f = 2.5 \text{ mm}$ 时注浆速率的 1.45 倍, 是 $D_f = 2.0 \text{ mm}$ 时注浆速率的 2.39 倍, 是 $D_f = 1.5 \text{ mm}$ 时的 4.8 倍, 是 $D_f = 1.0 \text{ mm}$ 时的 14.73 倍。注浆结束时, 开度 $D_f = 1.0 \text{ mm}$ 的注浆速率降低了 47.85% , 开度 $D_f = 1.5 \text{ mm}$ 的注浆速率降低了 38.98% , 开度 $D_f = 2.0 \text{ mm}$ 的降低了

30.22%, $D_f = 2.5 \text{ mm}$ 的降低了 22.64%, $D_f = 3.0 \text{ mm}$ 的降低了 16.47%, 因此, 裂隙开度越大, 注浆过程中注浆速率的损失越小。

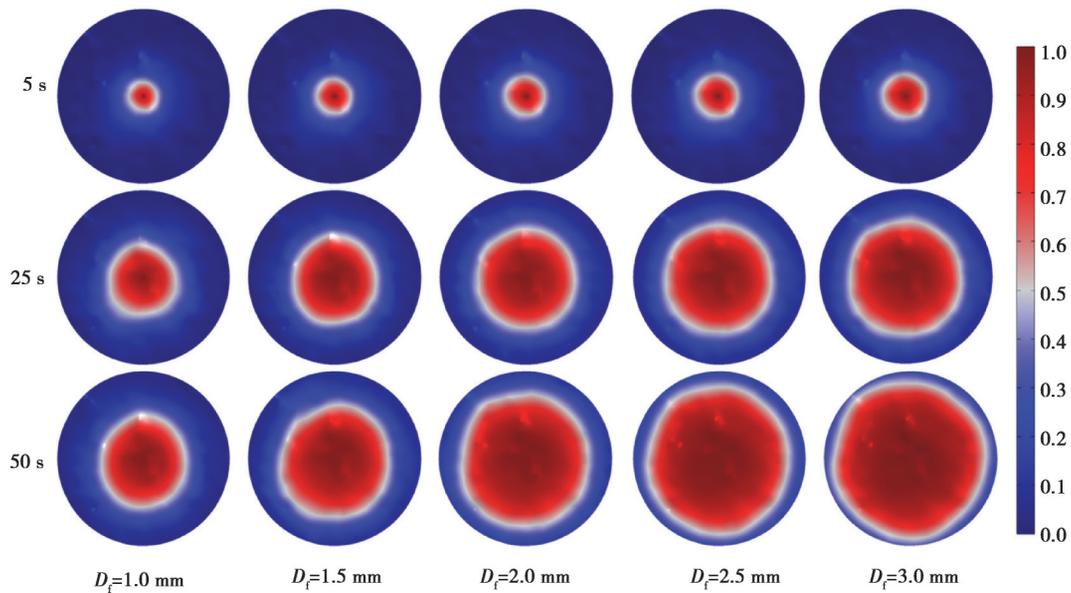


图 11 不同裂隙开度时浆液扩散分布云图

Fig. 11 Cloud image of slurry diffusion distribution at different fracture apertures

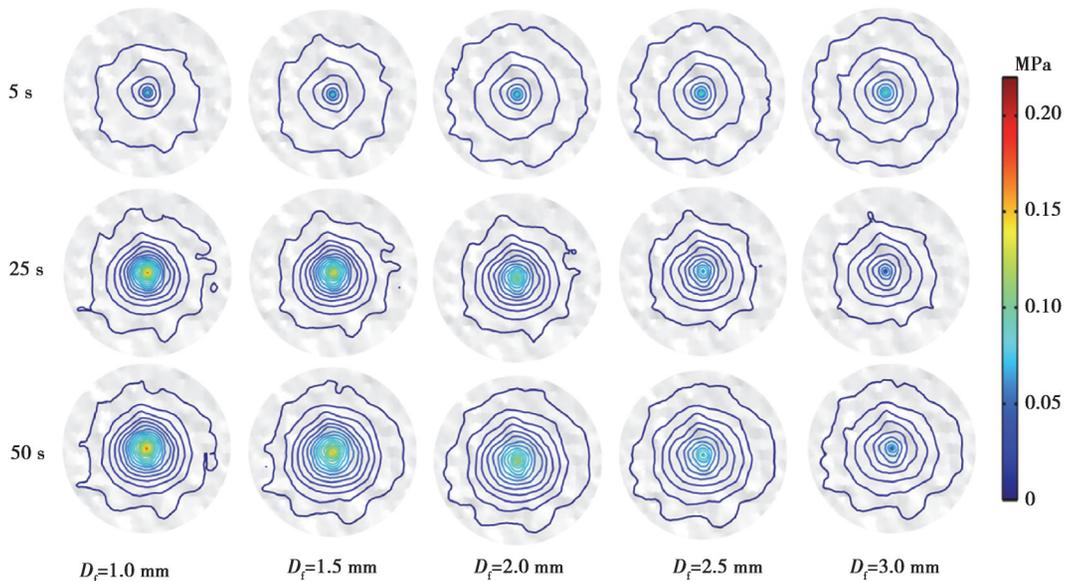


图 12 不同裂隙开度浆液压力等值线图

Fig. 12 Contour map of slurry pressure at different fracture apertures

图 13 还显示, 浆液扩散半径逐渐增大, 增大的速率逐渐降低, 但在同一时刻, 裂隙开度越大, 浆液扩散半径越大。注浆结束时, $D_f = 3.0 \text{ mm}$ 时的裂隙中浆液扩散半径最大, 为 7.66 m , $D_f = 1.0 \text{ mm}$ 时的裂隙中浆液扩散半径最小, 仅达到 3.68 m ; 注浆压力相同时, 大开度裂隙中的浆液扩散半径更大, 所需的浆液量也更大。因此, 按传统的一次性全孔注浆法进行注浆时, 注浆压力超过阈值或总的注浆量达到一定值时再终止注浆, 会导致大开度裂隙中浆液扩散半径过大造成浆液浪费、较小开度裂隙灌浆不充分而影响工程质量。

图 14 给出了不同开度裂隙在注浆前期 ($t=2 \text{ s}$)、中期 ($t=25 \text{ s}$) 和结束 ($t=50 \text{ s}$) 时的注浆速率曲线。结果表明, 注浆速率与裂隙开度满足二次多项式关系, 裂隙开度对注浆速率的影响较大, 注浆速率随裂隙开度的增

加显著增大。由此可见,裂隙开度对浆液扩散有较大影响,注浆关键参数选取时应重点考虑注浆区段的裂隙开度。

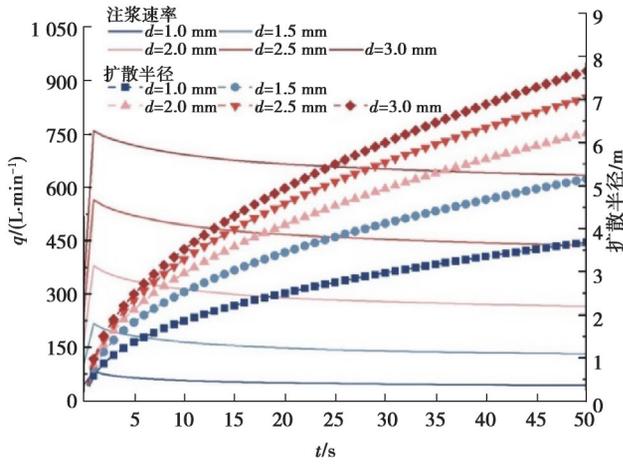


图 13 不同开度裂隙的注浆速率和浆液扩散半径曲线
Fig. 13 Curves of grouting rate and grout diffusion radius in cracks with different apertures

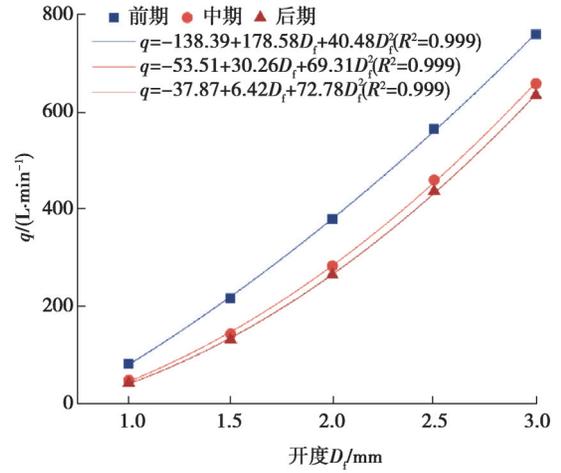


图 14 不同注浆阶段注浆速率与裂隙开度关系
Fig. 14 Relationship between grouting rate and crack aperture at different grouting stages

图 15 的不同裂隙开度不同截线位置处的浆液扩散速度分布规律显示,裂隙开度对浆液扩散速度分布的影响较小,流速的最大值基本都在裂隙开度的中线处。但开度变化对浆液扩散速度的大小影响大,如开度 $D_f = 1.0 \text{ mm}$ 时,浆液流速的最大值只有 0.005 5 m/s ;随着裂隙开度的增大,开度为 $D_f = 1.5 \text{ mm}$ 时,流速峰值为 0.145 7 m/s ;而裂隙开度增大至 $D_f = 3.0 \text{ mm}$ 时,浆液流速的最大值达到 0.489 9 m/s 。由此可见,裂隙开度的改变,对浆液扩散有显著的影响,工程中需特别注意裂隙的开度量级。

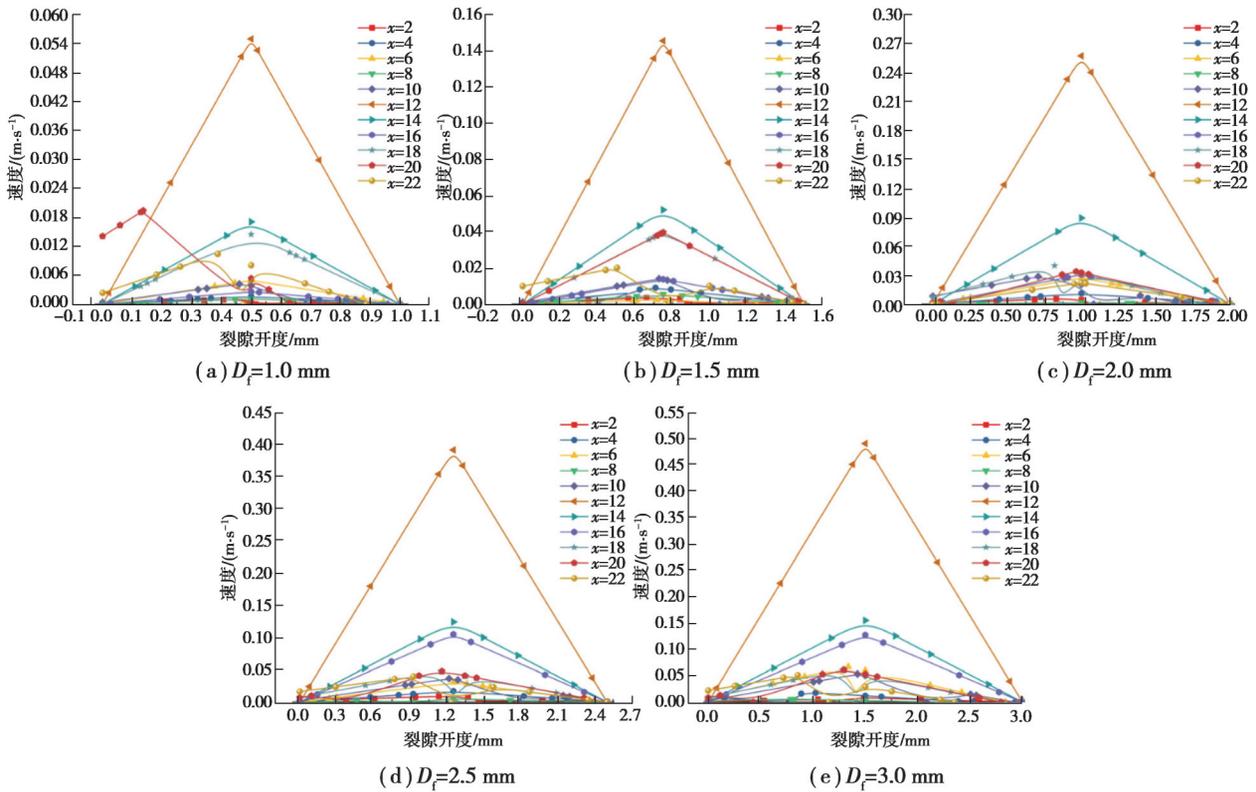


图 15 不同裂隙开度时各截线位置处流速分布
Fig. 15 Velocity distribution at each transversal position with different fracture apertures

2.3 不同注浆压力下粗糙裂隙注浆模拟

设置裂隙粗糙度 $H = 0.5$, 裂隙开度 2 mm , 水灰比 w/c 为 1 , 裂隙倾角 θ 为 0° , 仅改变注浆压力的大小, 研究注浆压力 P 对浆液扩散的影响, 图 16 为不同注浆压力下的浆液扩散过程。结果表明, 注浆压力直接影响裂隙中的浆液扩散半径, 注浆压力越大, 相同时间内, 浆液的扩散半径越大, 即扩散范围越广, 如注浆压力为 0.5 MPa 时, 浆液扩散半径最大 8.7 m ; 注浆压力为 0.1 MPa 时, 浆液扩散半径最小, 仅为 4.8 m 。对比相同时刻、不同注浆压力时的浆液扩散图, 浆液扩散轮廓都基本相同, 可知注浆压力对浆液扩散轮廓无影响, 其形状由裂隙面粗糙度决定。

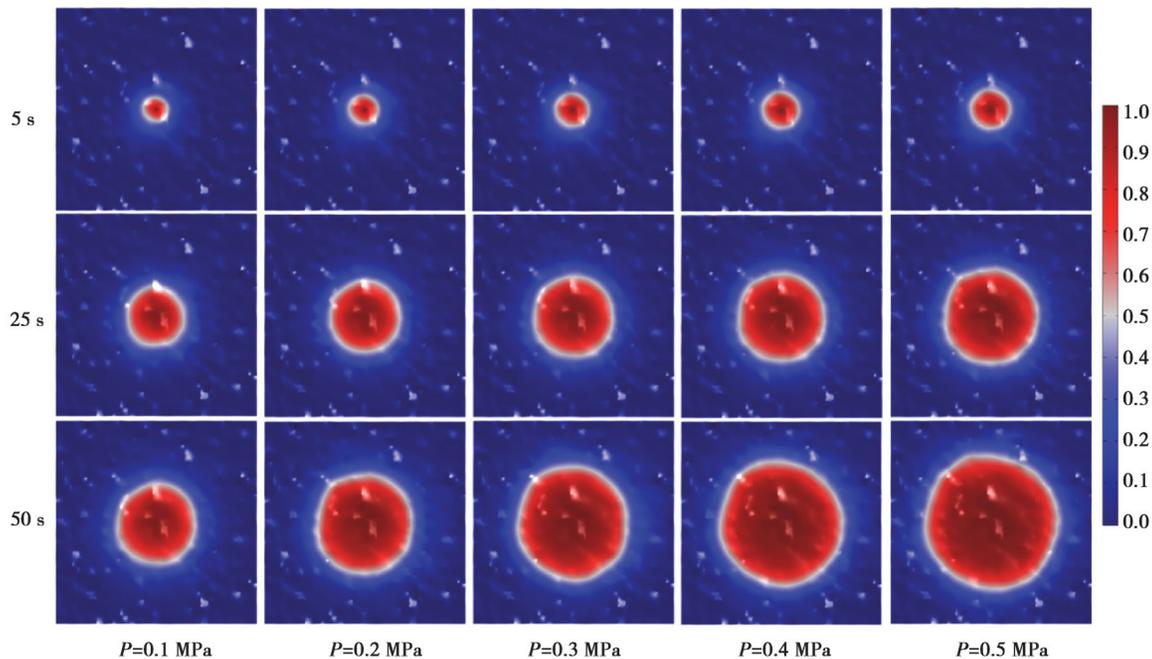


图 16 不同时刻在不同注浆压力下裂隙中浆液扩散分布云图

Fig. 16 Cloud image of slurry diffusion distribution in fracture under different grouting pressures at different times

图 17 展示了不同注浆压力下, 注浆过程中浆液压力分布。由图可知, 注浆进行过程中, 浆液压力等值线以近似圆形的轮廓向四周扩展, 注浆压力越大, 浆液压力分布范围越大。对比图 17 中不同注浆压力、不同时刻的压力等值线形状, 其形状均相同, 浆液压力的分布范围由注浆压力控制, 而其轮廓受裂隙面粗糙度的影响。

如图 18 所示, 实线为不同注浆压力下注浆速率变化曲线, 点划线为平均浆液扩散半径变化曲线, 由图可知, 注浆压力一定时, 浆液注入的速率先迅速增大, 达到峰值后快速减小, 而后趋于平缓。整个过程中, 注浆压力越大, 注浆速率也越大, 使得浆液扩散半径也越大。注浆结束时, 注浆压力 $p = 0.5 \text{ MPa}$ 时, 裂隙中注浆速率最大, 为 530.91 L/min ; 注浆压力 $p = 0.1 \text{ MPa}$ 时, 注浆速率最小, 为 156.23 L/min , 差值达 374.68 L/min 。注浆结束时, 注浆压力 $p = 0.1 \text{ MPa}$ 的工况中注浆速率降低了 33.66% , $p = 0.2 \text{ MPa}$ 时, 注浆速率下降了 30.22% , $p = 0.3 \text{ MPa}$ 时, 下降了 28.06% ; $p = 0.4 \text{ MPa}$ 时, 下降了 26.40% ; $p = 0.5 \text{ MPa}$ 时, 注浆速率下降了 24.92% 。由此可见, 注浆过程中注浆压力越大, 注浆速率的损耗越低。图 18 的注浆速率各曲线间距显示, 不同注浆压力的注浆速率差异较大, 注浆压力的增大, 注浆速率的增加量降低, 如图 19 所示的注浆起始阶段、注浆中期及后期注浆孔口处单位时间内浆液速率 q 与注浆压力值曲线, 表明注浆不同阶段, 注浆速率 q 与注浆压力 p 之间呈现良好的二次多项式关系。压力较小时, 增大注浆压力能够显著增大注浆速率, 但随着注浆压力的持续增大, 注浆速率的增量逐渐减小, 注浆效率降低, 注浆压力增大到一定值后, 不仅不能明显增大浆液灌入量, 反而易导致地层结构破坏, 出现注浆孔冒浆等问题。因此, 注浆压力需要在适宜的范围内, 才能提高注浆速率, 节约注浆治理时间。

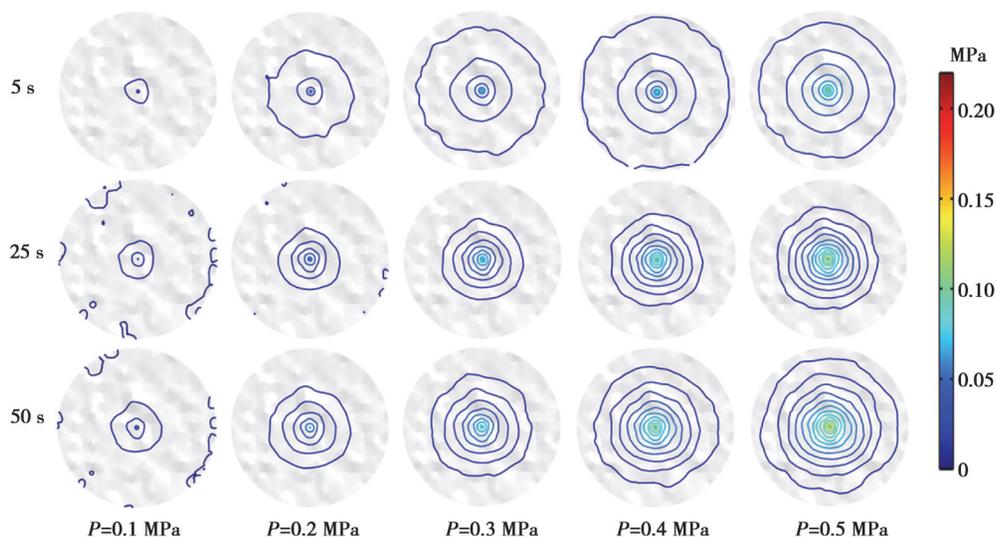


图 17 不同注浆压力下裂隙中浆液压力等值线图

Fig. 17 Contour map of slurry pressure in fracture under different grouting pressures

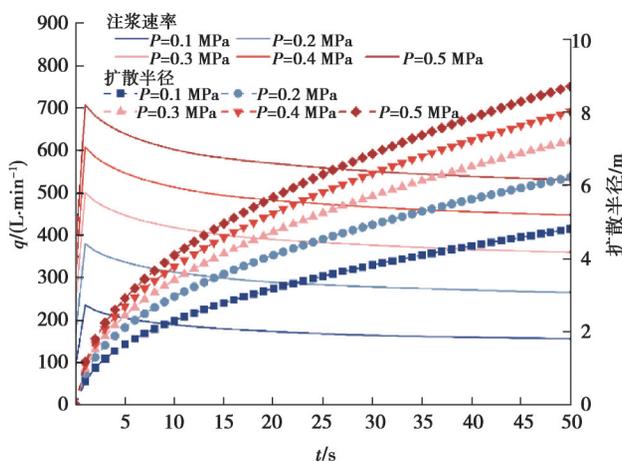


图 18 不同注浆压力下注浆速率及浆液扩散半径变化曲线

Fig. 18 Curves of grouting rate and grout diffusion radius under different grouting pressures

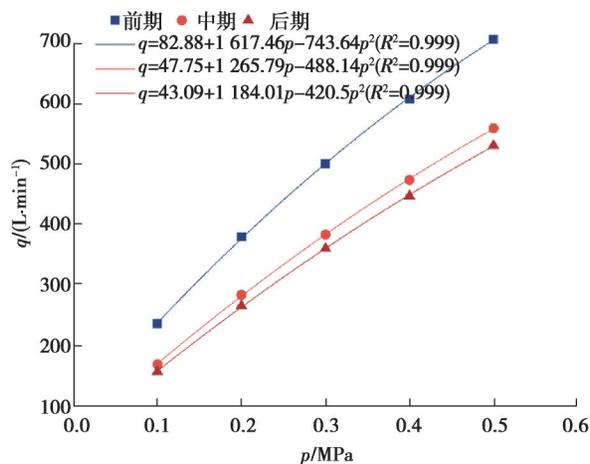


图 19 不同阶段浆液流量与注浆压力关系

Fig. 19 Relationship between grout flow and grouting pressure at different stages

图 20 显示不同注浆压力下各截线处沿裂隙开度方向浆液流速的分布曲线。结果表明,不同注浆压力时,裂隙开度方向的浆液速度曲线的形状相同。注浆压力的改变并不会引起开度方向流速分布的改变,即注浆压力只改变浆液扩散速度的大小,不影响开度方向流速的分布情况。注浆压力越大,浆液扩散速度随之增大,如注浆压力为 0.1 MPa 时,截面中流速最大位置处的速度峰值为 0.151 7 m/s;注浆压力增大到 0.5 MPa 时,相同位置处的流速峰值为 0.496 7 m/s。

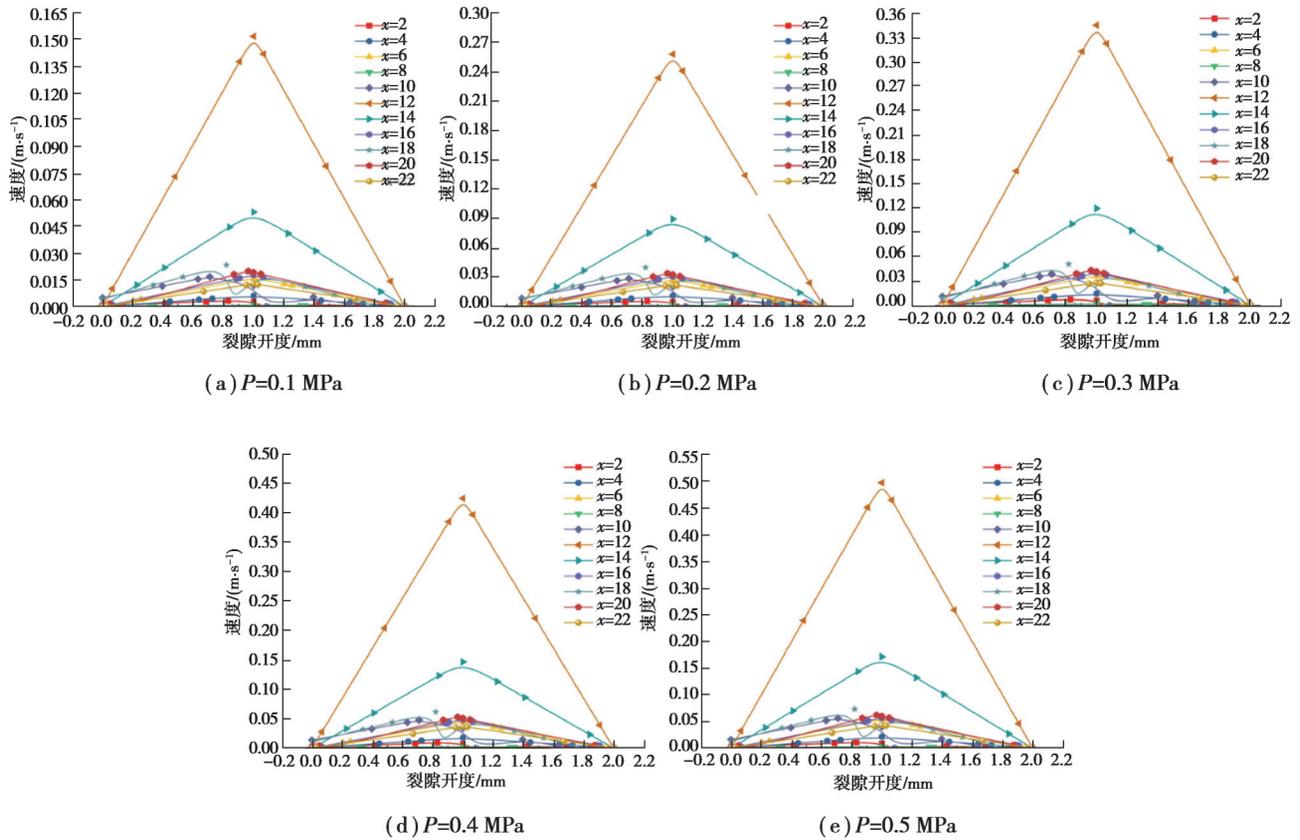


图 20 不同注浆压力下各截线上流速分布

Fig. 20 Velocity distribution on each cut line under different grouting pressures

2.4 倾角对浆液扩散的影响

为研究裂隙倾角对浆液扩散的影响规律,裂隙粗糙度 $H = 0.5$,裂隙开度 2 mm,注浆压力 0.2 MPa,水灰比 w/c 为 1,仅改变裂隙倾角,即设置裂隙面与水平面夹角分别为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 6 个工况进行注浆模拟。图 20 和图 21 分别显示了不同倾角的浆液扩散云图以及浆液压力分布等值线图在注浆过程中的发展变化规律。图 21 显示,不同倾角裂隙中浆液扩散轮廓面形状和大小都无明显变化,均近似圆形均匀地向四周扩散,没有因裂隙倾角的变化而出现明显的浆液面轮廓变化。结合图 22 的压力等值线可知,与水平裂隙相比,随着裂隙倾角的增大,压力等值线在注浆孔上方(左侧)的分布较密集,注浆孔下方(右侧)较稀疏,且倾角越大,右侧浆液压力越大。表明注浆孔上方注浆压力降低较快,下方浆液压力降低较慢,下方的浆液扩散速度也会稍快,主要是受重力和沿裂隙向下的注浆压力分力的影响。此外,由于考虑了浆液及水的重力,裂隙倾角增大时,裂隙中静水压力从上到下增大,影响了外围的压力等值线轮廓,注浆孔附近区域由于浆液压力较大,等值线轮廓依旧保持圆形或椭圆形。

综上所述,在浆液扩散云图中并没有发现注浆孔下方浆液扩散距离会更远的现象,主要原因是模拟采用了压力边界,在孔口处压力分布受倾角影响较小;其次,浆液参数采用的是较低水灰比、黏度较大的宾汉浆液参数,而粗糙裂隙的开度仅为 2 mm,黏稠的浆液会受到粗糙裂隙面的阻碍作用力,很大程度上抵消了重力的影响;注浆孔下方的静水压力逐渐增大,图 22 中不同倾角裂隙中浆液的扩散云图并无明显区别。

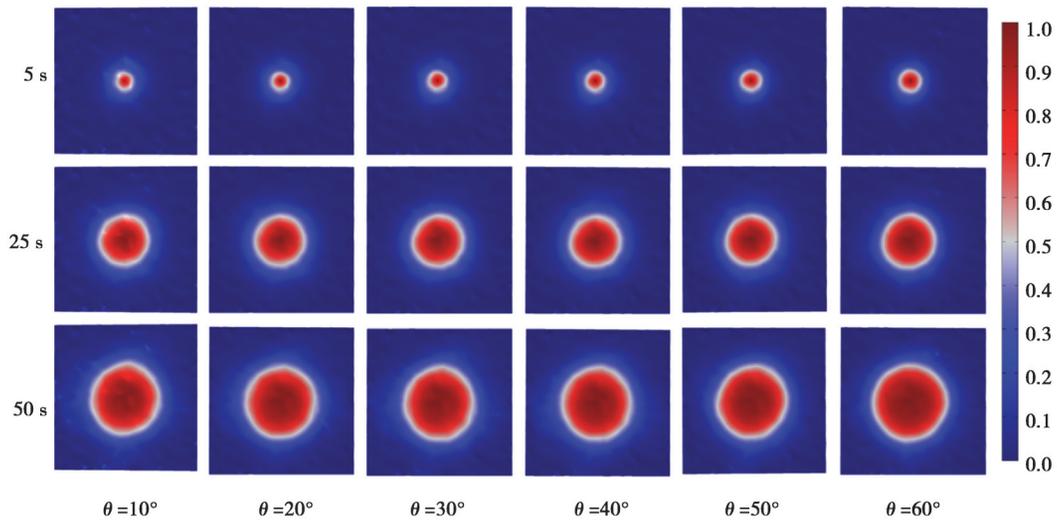


图 21 不同倾角裂隙中浆液扩散分布图

Fig. 21 Slurry distribution in fractures with different dips

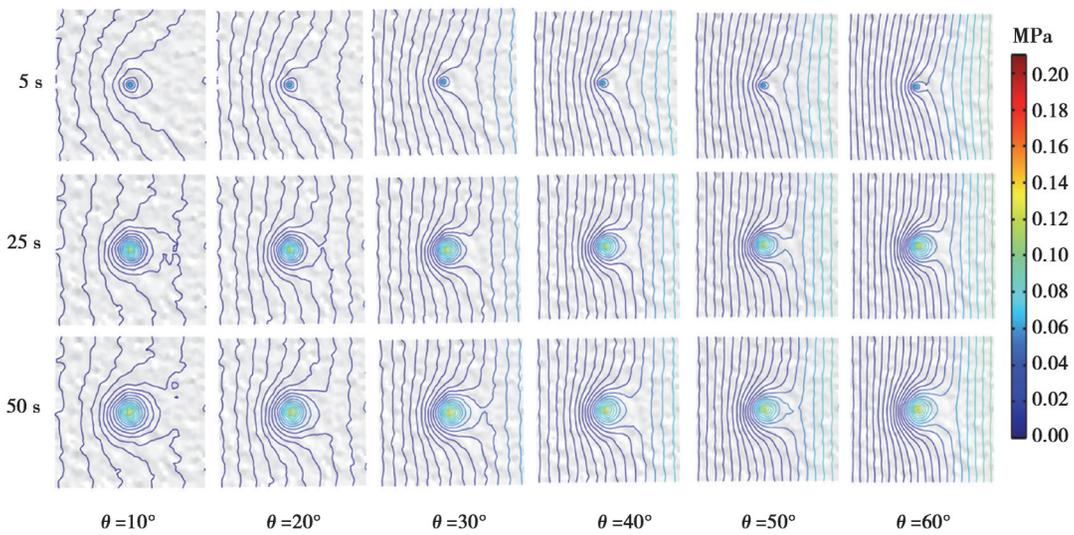


图 22 不同倾角裂隙中压力等值线图

Fig. 22 Pressure contour maps in fractures with different dips

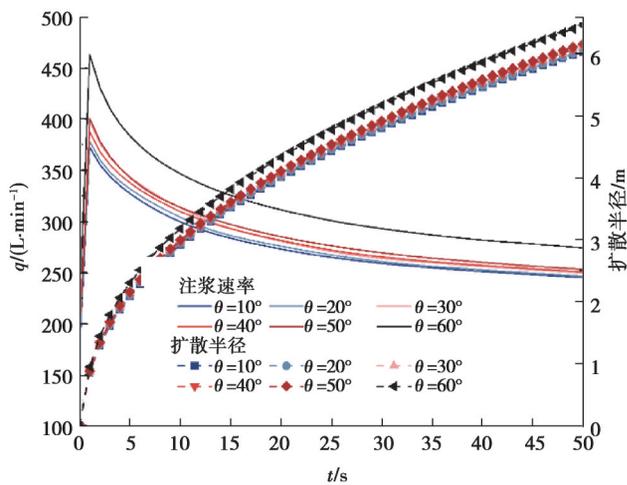


图 23 不同倾角裂隙注浆速率及浆液扩散半径变化曲线

Fig. 23 Curves of grouting rate and grout diffusion radius in fracture with different dips

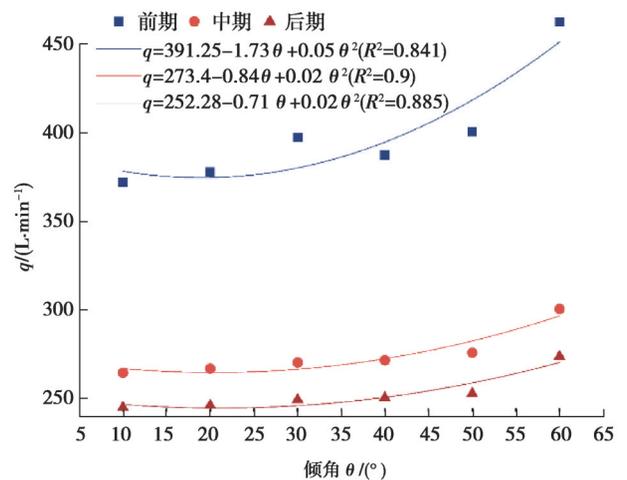


图 24 不同阶段注浆速率与裂隙倾角关系

Fig. 24 Relationship between grouting rate and fracture dips at different stages

如图 23 所示,不同裂隙倾角下注浆速率及浆液扩散半径随注浆时间的变化曲线。由图可知,整个注浆过程中,裂隙倾角越大,注浆速率就越大,浆液扩散半径也越大。相较于倾角为 10°的裂隙,倾角为 20°、30°、40°、50°、60°的裂隙最终灌浆量分别增加了 0.9%、3.11%、2.9%、4.36% 和 14.57%,浆液扩散半径相差不足 0.5 m,裂隙倾角对注浆速率的影响较小。

如图 24 所示,注浆前期($t=2\text{ s}$)、中期($t=25\text{ s}$)、后期($t=50\text{ s}$)不同倾角裂隙对应的注浆速率变化曲线,结果表明,拟合函数的一次项系数和二次项系数都非常小,裂隙倾角对注浆速率的影响较小,在注浆中后期的影响更小。因此,实际注浆过程中,当裂隙开度很小且浆液黏度较大时,可适当忽略裂隙倾角对浆液扩散的影响。

图 25 显示了不同裂隙倾角时各截面上沿裂隙开度方向变化的浆液扩散速度的分布曲线。由图可知,裂隙倾角不仅会影响浆液扩散速度的大小,还会影响开度方向上速度的分布。截线 $x=12\text{ m}$ 位置处的流速分布无明显规律,考虑到该位置距离注浆孔非常近,会弱化倾角对其影响。通过其他截线处的流速变化曲线来分析裂隙倾角对浆液扩散的影响,发现随着裂隙倾角的增大,各截线处的浆液流速整体上增大,如 $\theta=20^\circ$ 时,除去注浆孔旁的 $x=12\text{ m}$ 的截线位置,其他各截线处的浆液流速的峰值均小于 0.042 m/s,而当倾角为 $\theta=50^\circ$ 时,对应的浆液流速峰值则是小于 0.1019 m/s。

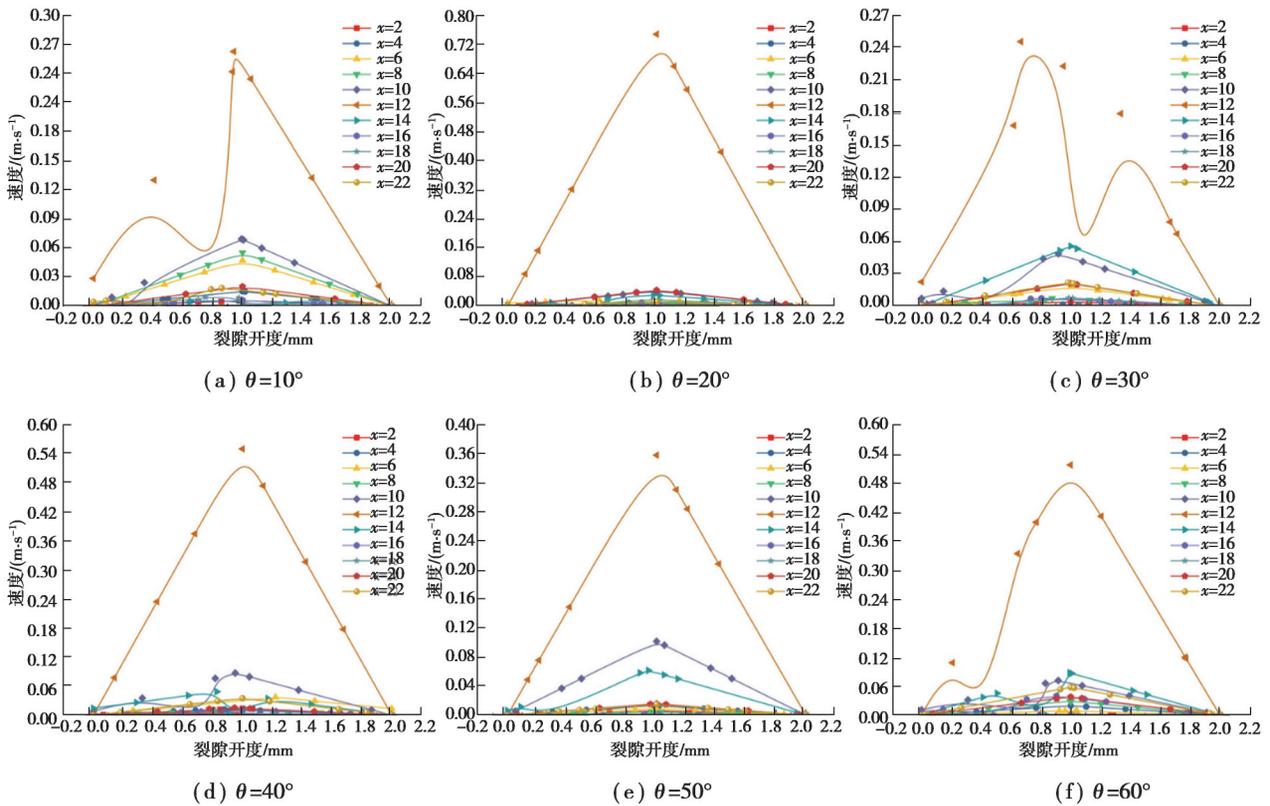


图 25 不同裂隙倾角时各截线上流速分布

Fig. 25 Velocity distribution on each section line at different fracture angles

2.5 浆液黏度对浆液扩散规律的影响

研究可知,小开度粗糙裂隙中浆液的黏度会影响浆液的扩散特性,开展粗糙裂隙中不同黏度浆液的扩散规律。设置裂隙粗糙度 $H=0.5$,裂隙开度 2 mm,注浆压力 0.2 MPa,裂隙倾角 0°,仅改变水灰比 w/c ,分别设置浆液水灰比为 0.5、0.75、1.0、1.25 和 1.5。图 26 和图 27 分别显示了不同水灰比下的浆液扩散云图以及浆液压力分布等值线图。由图 26 中浆液不同水灰比下裂隙中浆液扩散分布情况可知,相同时间内,水灰比越小,浆液的扩散半径越小,反之扩散半径越大。不同水灰比时,浆液扩散轮廓均相同,浆液黏度并不会影响其扩散的各向异性,只改变浆液扩散的范围。结合图 27 中对应的压力等值线可知,水灰比越小,压力等值线越密集,但分布范围要比大水灰比的范围小,由此可知,浆液黏度越大,所需的注浆压力就越大,浆液的扩散范围

越有限。图28显示了不同浆液黏度下注浆速率和浆液扩散半径随时间的变化曲线。由图可知,不同黏度浆液的注浆速率随时间均呈现先迅速增大到峰值,随后减小,最后趋于稳定。5种不同水灰比的浆液,当水灰比越小,浆液注浆速率的峰值越小,例如,水灰比 $w/c = 0.5$ 时,注浆速率峰值为 134.45 L/min ;水灰比 $w/c = 1.5$ 时,注浆速率峰值则为 388.83 L/min ,差值达到 254.38 L/min ,接近水灰比 $w/c = 0.5$ 时注浆速率峰值的2倍,表明浆液黏度对注浆速率有较大的影响。由图25的点划线可知,浆液扩散半径与注浆速率之间正相关,水灰比最小的工况 ($w/c = 0.5$),其浆液扩散半径也最小;水灰比最大的工况,其对应的浆液扩散半径也最大。由此可知,浆液黏度对注浆过程中浆液扩散规律的影响较大。

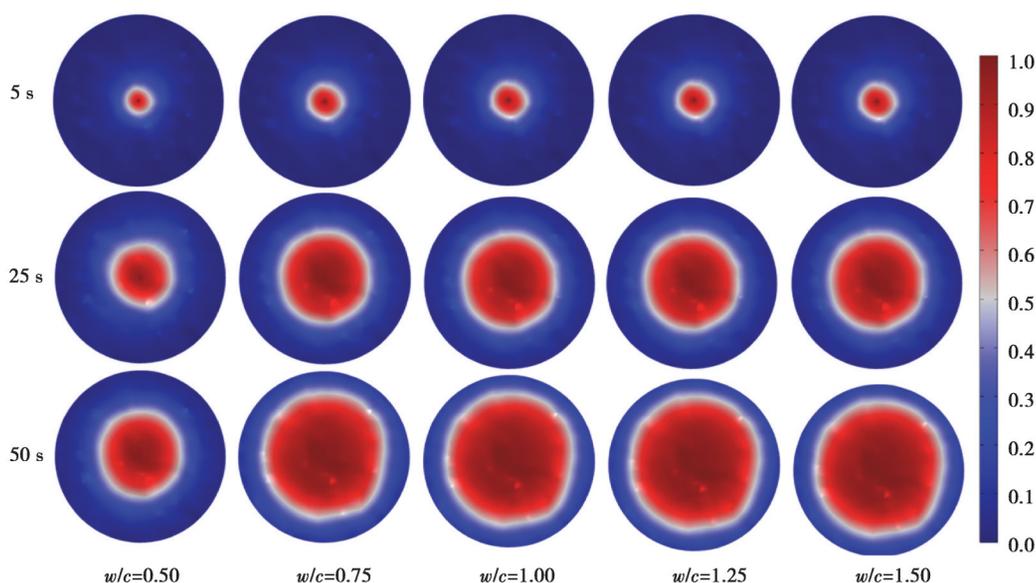


图 26 浆液不同黏度时裂隙中浆液扩散分布

Fig. 26 The grout diffused and distributed in fractures with different viscosities

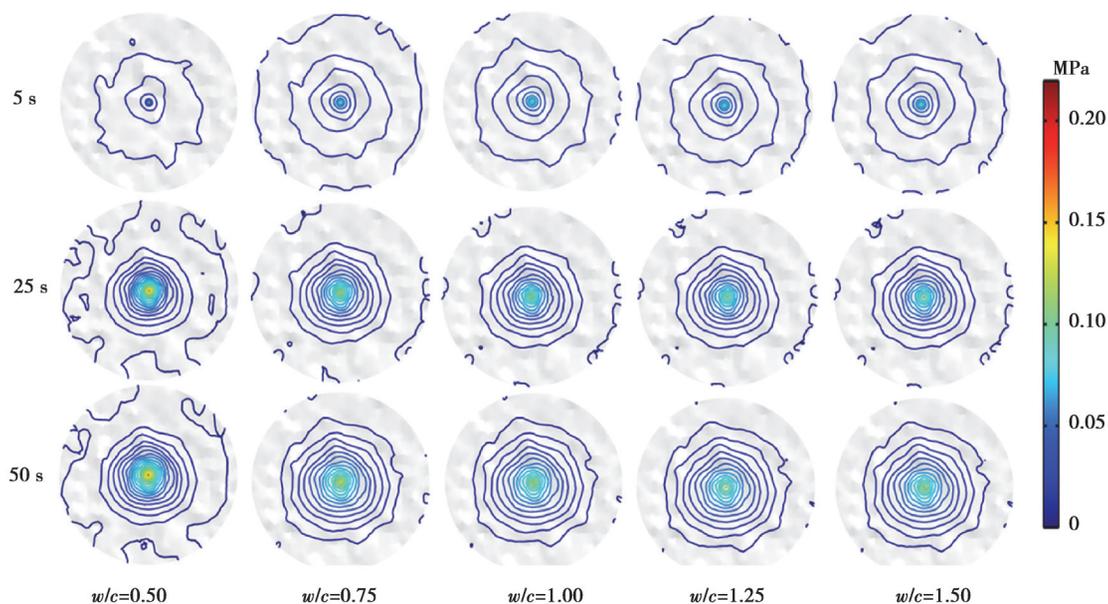


图 27 裂隙中不同水灰比的浆液的压力等值线分布

Fig. 27 Contour distribution of pressure in grout with different viscosities

因浆液黏度对浆液扩散规律有较大影响,图29给出了浆液不同水灰比与注浆速率之间的关系。浆液水灰比 $w/c > 1.0$ 时,注浆速率达到稳定,不再发生变化;水灰比在 $0.5 \leq w/c \leq 0.75$ 时,注浆速率随水灰比的增大迅速增大,但其增长速率不断降低,当 $0.75 \leq w/c \leq 1.0$ 时,注浆速率的增长非常缓慢。水灰比越小,浆液扩散

规律对浆液黏度越敏感,而当浆液黏度增大至 $w/c \geq 1.0$,浆液扩散过程便对浆液的黏度不再敏感。

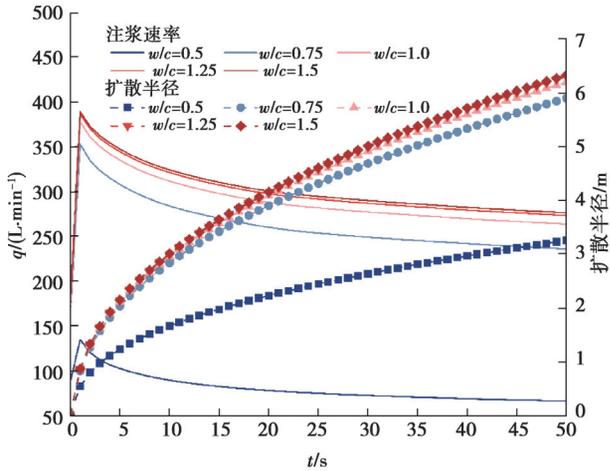


图 28 不同浆液黏度裂隙注浆速率及浆液扩散半径变化曲线
Fig. 28 Change curve of grouting rate and grout diffusion radius in fractures with different grout viscosities

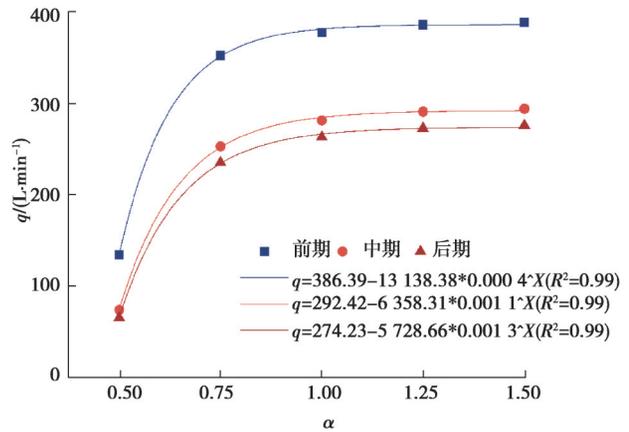


图 29 不同注浆阶段的注浆速率与浆液黏度之间关系曲线
Fig. 29 The relation curve between grouting rate and grout viscosity at different grouting stages

图 30 显示了不同水灰比时不同截线处沿裂隙开度方向的浆液扩散速度曲线。由图可知,浆液的黏度并不会影响开度方向浆液速度的分布,只有浆液的水灰比 $w/c = 0.5$ 时,各截线处的浆液流速均最小;当浆液水灰比 $w/c > 0.5$ 时,浆液扩散速度的大小基本无变化。表明注浆效果对浆液黏度的敏感性很高,存在 1 个水灰比阈值 0.5,当水泥浆液的水灰比 $0.5 < w/c \leq 1.5$ 时,浆液的黏度改变对注浆效果影响甚微,但若浆液水灰比小于阈值 0.5,浆液的扩散速度会急剧减小,注浆效果随之变差。因此,工程中需将水泥浆液的水灰比控制在恰当的范围,提高注浆效率。

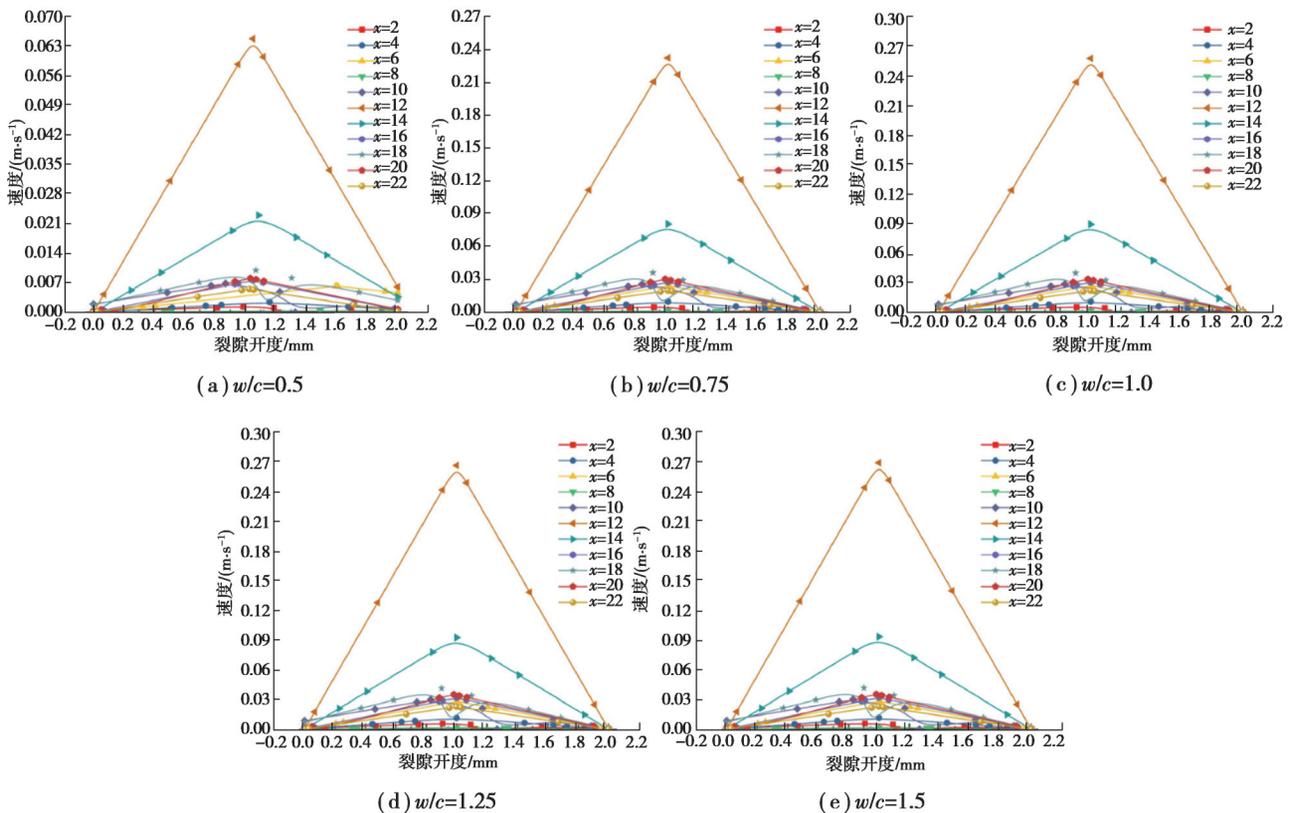


图 30 不同水灰比时各截线上流速分布
Fig. 30 Velocity distribution on each section line with different water-cement ratios

3 结 论

文中基于分形几何法构建了采空区工程尺度的三维粗糙单裂隙注浆模型,从多因素影响角度揭示了裂隙岩体中浆液流动规律,得出以下结论:

1)裂隙面粗糙度影响浆液扩散面轮廓,粗糙度越大,则浆液扩散的阻力越大,浆液扩散各向异性显著。裂隙面的粗糙度和裂隙开度均会影响浆液扩散半径的大小,裂隙表面大尺度的起伏对浆液扩散半径的影响要比小尺度上的凹凸更大;注浆速率与开度满足二次多项式关系,且裂隙开度越大,注浆过程中注浆速率的损失就越小。

2)注浆压力不影响浆液扩散轮廓,仅改变浆液的扩散半径,注浆压力与扩散半径之间正相关,与注浆速率呈二次多项式关系,且注浆压力越大,注浆速率的损耗越低。小开度裂隙的倾角对黏度大的浆液流动的扩散轮廓和扩散半径无明显影响,实际工程中,可适当放宽对裂隙倾角的勘测精度。

3)浆液黏度对浆液的扩散规律的影响视浆液的黏度范围而定。当浆液的水灰比为 $0.5 \leq w/c \leq 0.75$ 时,浆液扩散规律对黏度非常敏感,而当浆液黏度增大至 $w/c \geq 1.0$ 时,浆液扩散过程对浆液的黏度便不再敏感。浆液黏度并不会影响其扩散的各向异性,只改变浆液扩散的范围。

参考文献

- [1] He M C. Latest progress of soft rock mechanics and engineering in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(3): 165-179.
- [2] Chang X, Wang G Z, Liang Z Z, et al. Study on grout cracking and interface debonding of rockbolt grouted system[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 665-673.
- [3] Amadei B, Savage W Z. An analytical solution for transient flow of Bingham viscoplastic materials in rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(2): 285-296.
- [4] 刘泉声, 卢超波, 刘滨, 等. 深部巷道注浆加固浆液扩散机理与应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 333-339.
Liu Q S, Lu C B, Liu B, et al. Research on the grouting diffusion mechanism and its application of grouting reinforcement in deep roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(3): 333-339.(in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 S C, Liu R T, Zhang Q S, 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.(in Chinese)
- [8] 高圣元. 基于宾汉姆流体的微裂隙岩体注浆扩散影响机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S2): 3492-3500.
Gao S Y. Analysis of influence mechanism of grouting diffusion in micro-fractured rock mass based on Bingham fluid[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S2): 3492-3500.(in Chinese)
- [9] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 流变参数时变性幂律型水泥浆液的柱形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1415-1425.
Yang Z Q, Niu X D, Hou K P, et al. Columnar diffusion of cement grout with time dependent rheological parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1415-1425.(in Chinese)
- [10] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 幂律型流体柱形渗透注浆机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 178-183.
Yang Z Q, Niu X D, Hou K P, et al. Column penetration grouting mechanism researches based on Power-law fluid[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 178-183.(in Chinese)
- [11] 李术才, 郑卓, 刘人太, 等. 考虑浆-岩耦合效应的微裂隙注浆扩散机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 812-820.
Li S C, Zheng Z, Liu R T, et al. Analysis on fracture grouting mechanism considering grout-rock coupling effect[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 812-820.(in Chinese)
- [12] Shi H, Zhang Y B, Tang L. Physical test of fracture development in the overburden strata above the goaf and diffusion process of permeable grout slurry[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 4791-4802.
- [13] Saeidi O, Stille H, Torabi S R. Numerical and analytical analyses of the effects of different joint and grout properties on the rock mass groutability[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2013, 38: 11-25.
- [14] Xie L Z, Gao C, Ren L, et al. Numerical investigation of geometrical and hydraulic properties in a single rock fracture during shear displacement with the Navier - Stokes equations[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(11): 7061-7074.
- [15] 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 P, Sun X Q. Rough single fracture grouting numerical simulation in hydrodynamic environment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(4): 950-954.(in Chinese)
- [16] Mu W, Li L, Yang T, 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.
- [17] Xiong F, Jiang Q H, Ye Z Y, et al. Nonlinear flow behavior through rough-walled rock fractures: the effect of contact area[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 102: 179-195.
- [18] Ge Y F, Kulatilake P H S W, Tang H M, et al. Investigation of natural rock joint roughness[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 290-305.
- [19] Li M, Liu X S, Li Y, et al. Effect of contact areas on seepage behavior in rough fractures under normal stress[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(4): 04022019.
- [20] Kulatilake P H S W, Balasingam P, Park J, et al. Natural rock joint roughness quantification through fractal techniques[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, 24(5): 1181-1202.
- [21] 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.
- [22] Ye Z Y, Liu H H, Jiang Q H, et al. Two-phase flow properties of a horizontal fracture: the effect of aperture distribution[J]. Advances in Water Resources, 2015, 76: 43-54.
- [23] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69-73.
Ruan W J. Study on grouting diffusion and some basic properties of grout[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 69-73.(in Chinese)
- [24] Zou L C, Cvetkovic V. Impact of normal stress-induced closure on laboratory-scale solute transport in a natural rock fracture [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(4): 732-741.

(编辑 陈移峰)