

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0668
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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0668

裂隙岩体注浆扩散范围及注浆量数值模拟

王 强¹ 冯志强¹ 王理想² 唐德泓² 冯 春² 李世海²

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 为预测浆液在裂隙中的扩散范围, 建立二维正交裂隙网络宾汉浆液渗流模型, 采用中心型有限体积法进行数值模拟。分别研究不同参数下, 浆液在裂隙中的扩散范围, 给出多因素影响下的注浆扩散半径公式和注浆量公式。研究表明, 注浆压力、浆液黏度、浆液剪切强度、裂隙开度和裂隙粗糙度对浆液扩散半径起到主导作用; 注浆压力、钻孔长度和裂隙开度对注浆量起到主导作用。通过该公式可定量预测任意参量下浆液扩散范围和注浆量。

关键词: 浆液扩散范围; 注浆量; 离散裂隙网络; 裂隙岩体; 中心型有限体积法; 多参量研究

中图分类号: TD265.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2016)10-2588-08

Numerical analysis of grouting radius and grout quantity in fractured rock mass

WANG Qiang¹, FENG Zhi-qiang¹, WANG Li-xiang², TANG De-hong², FENG Chun², LI Shi-hai²

(1. Beijing Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To predict the grout spread in fractured rock mass, a two-dimensional Bingham grouting model was employed based on orthogonal fracture network and a cell-centered finite volume method was used for numerical analysis. The grout spread was numerically calculated under different grouting parameters. A grouting radius formula with a grout quantity formula was put forward with the consideration of those parameters. The study results indicates that the grouting pressure, the viscosity of grout, the shear strength of grout, the aperture of fracture and the roughness of fracture dominate the grouting radius, while the grouting pressure, drilling length and the aperture of fracture dominate the grout quantity. The formulas can be used to predict the grouting radius and the grout quantity under arbitrary parameters.

Key words: grouting radius; grout quantity; discrete fracture network (DFN); fractured rock masses; cell-centered finite volume method; multi-parameter study

注浆对于煤炭安全生产具有重要保障作用, 可有效防止煤矿不利地质构造引发的冒顶和突水事故, 从而保障煤炭生产安全和生产效率。但因为注浆工程具有隐蔽性, 所以难以通过观察了解注浆扩散范围, 确定注浆质量。工程中使用扩散半径^[1]表示注浆扩散范围, 但是很多注浆参量难以考虑, 如裂隙粗糙度、裂隙开度等。

基于数值模拟的方法可以计算任意参量下的注

浆扩散范围。Hässler 等^[2]率先使用数值模拟方法, 研究了宾汉浆液和牛顿浆液在二维裂隙网络中的流动规律。Eriksson 等^[3]考虑浆液过滤效应和裂隙开度变化, 研究了浆液扩散问题。Yang 等^[4]通过建立二维随机裂隙网络模型, 分析了各注浆因素的敏感性。郝哲等^[5]通过蒙特卡洛方法, 生成二维随机裂隙网络模型, 分析了山东莱芜铁矿谷家台矿区注浆实例。杨米加等^[6]研究了裂隙岩体网络注浆渗流规

收稿日期: 2016-05-19 修回日期: 2016-09-19 责任编辑: 常 琛

作者简介: 王 强(1970—), 男, 山西长治人, 博士研究生。通讯作者: 冯志强(1975—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 研究员, 博士。E-mail: feng-zhiqiang@163.com

律,并分析了渗流-应力耦合对注浆的影响。罗平等^[7]通过建立随机裂隙网络注浆模型,分析了复杂裂隙网络下的注浆扩散范围。刘健等^[8]使用 Comsol 软件模拟单裂隙的注浆扩散问题。以上数值模拟均建立在浆液在裂隙中扩散的基础之上。此外,还有学者研究浆液在孔隙基质中的扩散,如 Bolisetti 等^[9]和孙斌堂等^[10]。

裂隙岩体注浆中尚存在诸多问题^[11],如浆液种类选取、注浆控制因素取值等。阮文军^[12]通过试验,给出不同浆液的时变性质;El Tani^[13]研究水泥浆液性质对注浆影响;冯志强等^[14]通过试验调配出改性聚氨酯化学浆液。本文选择化学浆液作为研究对象,通过中心型有限体积法^[15-16],研究各种不同注浆控制因素取值对浆液扩散范围的影响问题,并给出注浆扩散半径公式和注浆量公式。

1 数学模型

分别介绍注浆模拟中的几何模型、宾汉浆液扩散模型、浆液时变模型和裂隙粗糙度模型。

1.1 几何模型

本文使用离散裂隙网络模型作为浆液扩散几何模型,包括随机裂隙网络模型和正交裂隙网络模型 2 种(图 1)。为了量化描述浆液扩散范围,选择正交裂隙网络模型进行模拟。

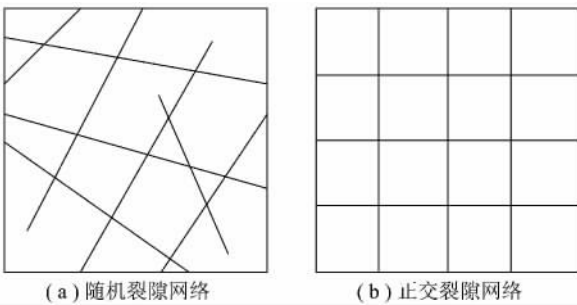


图 1 2 种裂隙网络几何模型

Fig. 1 Two geometrical models of DFN

1.2 单裂隙宾汉浆液扩散模型

图 2 为单裂隙内浆液扩散模型图。浆液在两块平行板间流动,平行板间距为 b ,倾角为 θ ,注浆孔半径为 r_0 ,流核半径为 y_0 。经推导,浆液速度为

$$\bar{u} = \frac{gb^2}{12\nu}(J - \sin \theta) - \frac{b\tau_0}{4\nu\rho} + \frac{\tau_0^3}{3\nu b\rho\gamma^2(J - \sin \theta)^2} \quad (1)$$

式中 J 为水力梯度; ρ 为浆液密度; g 为重力加速度; ν 为浆液运动黏性系数。

将式(1)改写为压力形式,考虑宾汉浆液性质

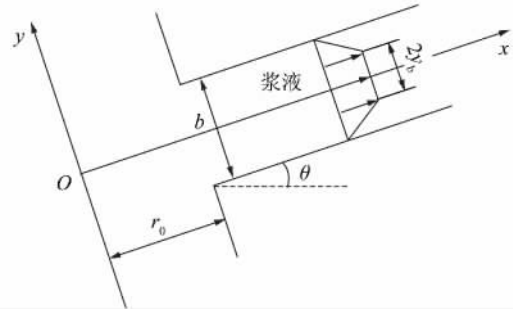


图 2 单裂隙内浆液扩散模型

Fig. 2 Grout spread model in a single fracture

$$\bar{u} = -\frac{\partial P}{\partial x} \frac{b^2}{12\mu} \left[1 - 3 \frac{Z}{b} + 4 \left(\frac{Z}{b} \right)^3 \right], \quad Z = \tau \left| \frac{\partial P}{\partial x} \right|^{-1} < \frac{b}{2} \quad (2)$$

式中 μ 为浆液动力黏性系数; τ 为浆液初始剪切强度; P 为压力与重力之和,称为总压力

$$P = p + \rho g x \sin \theta = \rho g (h + x \sin \theta) \quad (3)$$

单宽流量为

$$\bar{Q} = \bar{u} b = -\frac{\partial P}{\partial x} \frac{b^3}{12\mu} \left[1 - 3 \frac{Z}{b} + 4 \left(\frac{Z}{b} \right)^3 \right] \quad (4)$$

1.3 浆液时变模型

阮文军^[12]通过试验给出各种浆液的时变形式,其中化学浆液具有如下时变性:

$$\begin{cases} \mu(t) = \mu_0 e^{\alpha t} \\ \tau(t) = \tau_0 \quad \text{or} \quad \tau_0 e^{\beta t} \end{cases} \quad (5)$$

式中 μ_0 τ_0 分别为初始黏度系数和剪切强度; α β 分别为黏度和剪切强度增长因子。

1.4 裂隙粗糙度模型

裂隙相对粗糙度 R_f 对裂隙渗透性能产生影响,按照 Louis(1967)提出的公式修正为

$$K_f = \frac{b^2}{12(1 + 8.8R_f^{1.5})} \quad (6)$$

2 数值方法

使用中心型有限体积法^[15-16],对注浆裂隙网络进行数值模拟。对于图 3 中的 i 节点,其总压力为 P_i ,设其周围有 n 个节点,其总压力分别为 P_j ($j=1, 2, \dots, n$)。定义 X_i X_j 为分别为 i j 两点沿着 ij 方向的局部坐标,对于 i j 两点沿其局部坐标下的压力梯度为

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{ij} = \frac{P_j - P_i}{X_j - X_i} \quad (7)$$

将式(7)代入式(2)中的 Z , 并取 $\tau(t) = \tau_0$, 则

$$Z_{ij} = \tau_0 \left| \frac{X_j - X_i}{P_j - P_i} \right| \quad (8)$$

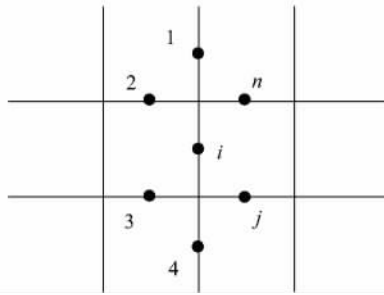


图 3 中心型有限体积注浆算法

Fig. 3 Cell-centered finite volume method for grouting

将式(7)代入式(4),则式(4)变为

$$Q_{ij} = \frac{P_j - P_i}{X_j - X_i} \frac{b^3}{12\mu} \left[1 - 3 \frac{Z_{ij}}{b} + 4 \left(\frac{Z_{ij}}{b} \right)^3 \right] \quad (9)$$

利用式(3)的关系,可得

$$P_i = p_i + \rho g X_i \sin \theta_i = p_i + \rho g_i X_i \quad (10)$$

式中, $g_i = g \sin \theta_i$ 为重力加速度沿裂隙方向的分量。

将式(10)代入式(9),并令

$$K_{ij} = \frac{b^3}{12\mu(X_i - X_j)} \left[1 - 3 \frac{Z_{ij}}{b} + 4 \left(\frac{Z_{ij}}{b} \right)^3 \right] \quad (11)$$

$$C_{ij} = \rho g_{ij} \frac{b^3}{12\mu} \left[1 - 3 \frac{Z_{ij}}{b} + 4 \left(\frac{Z_{ij}}{b} \right)^3 \right] \quad (12)$$

$$g_{ij} = \frac{g_j X_j - g_i X_i}{X_i - X_j} \quad (13)$$

则式(9)变为

$$Q_{ij} = K_{ij}(p_j - p_i) + C_{ij} \quad (14)$$

式中, K_{ij} 为 i, j 节点间的渗透系数; C_{ij} 为重力产生的流量。

对于 i 点所连接的所有 j 点进行流量求和, 可得 i 点处总流量

$$Q_i = \sum_{j=1}^n [K_{ij}(p_j - p_i) + C_{ij}] \quad (15)$$

3 计算工况

计算模型如图 4 所示, 图中模型宽度 $a = 25$ m, 模型长度 $l = 50$ m; 注浆管直径为 d , 钻孔长度(半长, 下同)为 L ; 裂隙间隔为 0.5 m, 网格尺寸为 $h = 0.1$ m。

注浆输入量包括 3 类: 注浆控制因素类、浆液性质因素类和裂隙性质因素类。其他输入量包括重力加速度、模型尺寸以及计算控制参数, 均为常数。注浆控制因素包括: 注浆压力 p 、注浆孔直径 d 、钻孔长度 L ; 浆液性质因素包括: 浆液密度 ρ 、浆液黏度 μ 和浆液剪切强度 τ ; 裂隙性质包括: 裂隙开度 b 和裂隙相对粗糙度 R_r 。

定义基准注浆工况: $p_0 = 1.0$ MPa, d_0 不考虑, $L_0 = 10$ m, $\rho_0 = 1\,400$ kg/m³, $\mu_0 = 100$ mPa·s, $\tau_0 = 10$

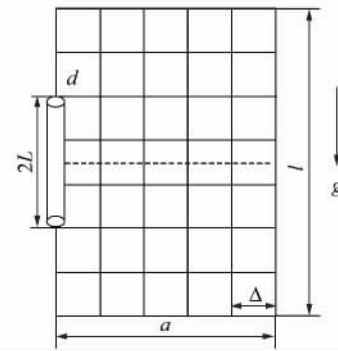


图 4 注浆计算模型

Fig. 4 Model for grouting analysis

Pa, $b_0 = 1$ mm, R_{r0} 为常数。

定义以下符号: 计算得到的基准注浆半径(水平、向上、向下)为: $R_{\sigma}^{\rightarrow}, R_{\sigma}^{\uparrow}, R_{\sigma}^{\downarrow}$, 基准注浆量为: Q_{σ} 。只考虑单因素 X 的注浆半径(水平、向上、向下)为: $R_X^{\rightarrow}, R_X^{\uparrow}, R_X^{\downarrow}$, 只考虑单因素 X (如 $X = p, d, \dots$) 的注浆量为: Q_X 。只考虑单因素 X 的注浆范围与基准算例注浆范围的比值分别为(水平、向上、向下): $f_X^{\rightarrow}, f_X^{\uparrow}, f_X^{\downarrow}$, 只考虑单因素 X 的注浆量与基准算例注浆量的比值为: f_X^Q 。一般情况下的注浆范围(水平、向上、向下)为: $R^{\rightarrow}, R^{\uparrow}, R^{\downarrow}$, 一般情况下的注浆量为: Q 。计算工况见表 1, 其他参数为 $g = 9.8$ m/s², $a = 25$ m, $l = 50$ m, $\Delta = 0.5$ m, $h = 0.1$ m, $\Delta t = 0.1$ s, $t = 3\,600$ s, $\alpha = 0.000\,5$ s⁻¹, $\beta = 0.000\,5$ s⁻¹, s (储水系数) = 0.3。

表 1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

参数	取值
p /MPa	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
d /mm	50, 70, 90, 110, ∞
L /m	5, 7.5, 10, 12.5, 15
ρ /(10 ³ kg·m ⁻³)	1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6
μ /(mPa·s)	100, 150, 200, 250, 300
τ /Pa	5, 10, 15, 20, 25
b /mm	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50
R_r	0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0

基准算例计算注浆范围结果如图 5 所示。按图 5 所示, 统计基准算例中水平、向上、向下注浆范围分别为 $R_{\sigma}^{\rightarrow} = 5.4$ m, $R_{\sigma}^{\uparrow} = 14.1$ m, $R_{\sigma}^{\downarrow} = 14.4$ m, 注浆量为 $Q_{\sigma} = 29.6$ m³, 用于后续各因素工况计算的标准值和无量纲化。以下分别介绍各因素单独作用下的注浆半径和注浆量计算结果。

4 单因素作用的模拟计算与分析

4.1 注浆压力

注浆压力对注浆范围影响如图 6 所示, 从图中可

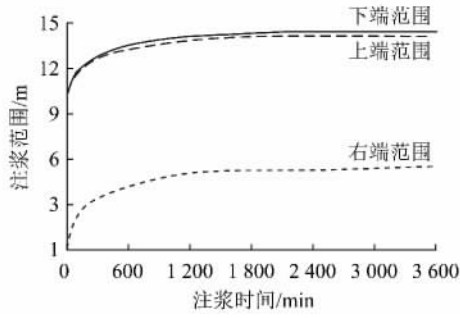


图 5 基准算例注浆范围随时间变化

Fig. 5 Grouting radius varies with time in the reference case

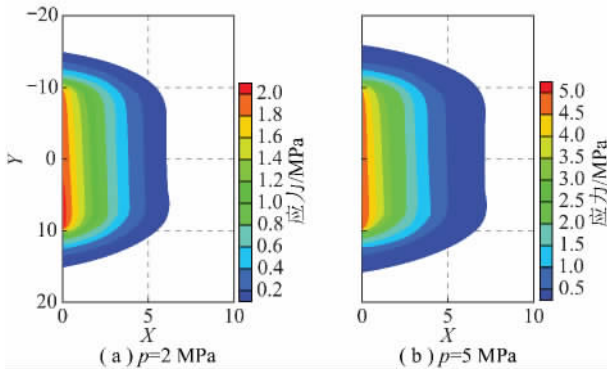


图 6 注浆压力对注浆范围影响

Fig. 6 Influence of pressure on grout spread

看出注浆压力越大,注浆范围越大。以本例与基准算例注浆半径之比作为无量纲化注浆半径,以本例与基准算例注浆压力之比作为无量纲化压力,以本例与基准算例注浆量之比作为无量纲化注浆量,作进一步定量分析,如图 7 所示。通过曲线拟合可知:无量纲化注浆半径与无量纲化注浆压力呈对数关系(式(16));无量纲化注浆量与无量纲化注浆压力呈线性关系(式(17)):

$$\begin{cases} f_p^{\rightarrow} = R_p^{\rightarrow} / R_{\sigma}^{\rightarrow} = 1.0 + 0.21 \ln(p/p_0) \\ f_p^{\uparrow} = R_p^{\uparrow} / R_{\sigma}^{\uparrow} = 1.0 + 0.08 \ln(p/p_0) \\ f_p^{\downarrow} = R_p^{\downarrow} / R_{\sigma}^{\downarrow} = 1.0 + 0.07 \ln(p/p_0) \end{cases} \quad (16)$$

$$f_p^0 = Q_p / Q_{\sigma} = p/p_0 \quad (17)$$

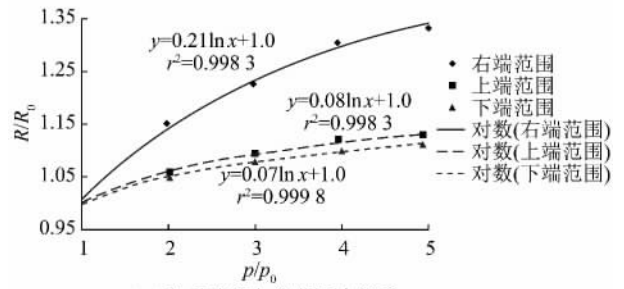
从式(16)和(17)可以看出,注浆压力对注浆半径和注浆量均起到主导作用。

4.2 注浆管直径

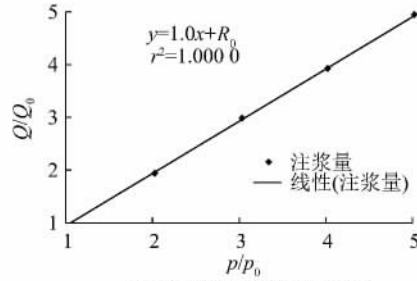
根据图 8 及定量化数值模拟结果表明,注浆管径对注浆范围和注浆量影响极小,这与 Gustafson 等^[17]理论一致。故 $f_d^{\rightarrow} = f_d^{\uparrow} = f_d^{\downarrow} = 1$, $f_d^0 = 1$ 。

4.3 钻孔长度

钻孔长度对注浆扩散范围影响的模拟结果如图 9 所示。可以看出,钻孔长度对右端注浆范围(即注浆半径)影响较小,对上端和下端注浆范围影响较大。以本例与基准算例注浆半径之比作为无量纲化



(a) 注浆半径与注浆压力关系



(b) 注浆量与注浆压力关系

图 7 注浆半径、注浆量与注浆压力关系

Fig. 7 Relationships between radius/quantity and pressure

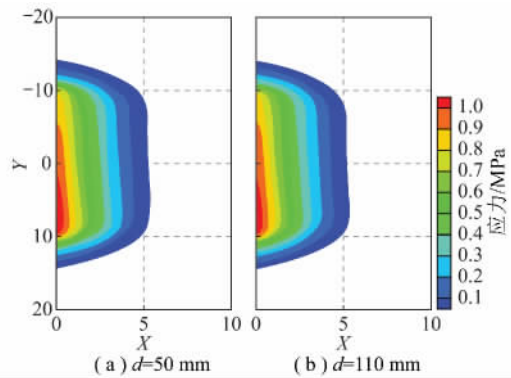


图 8 注浆管径对注浆范围影响

Fig. 8 Influence of diameter on grout spread

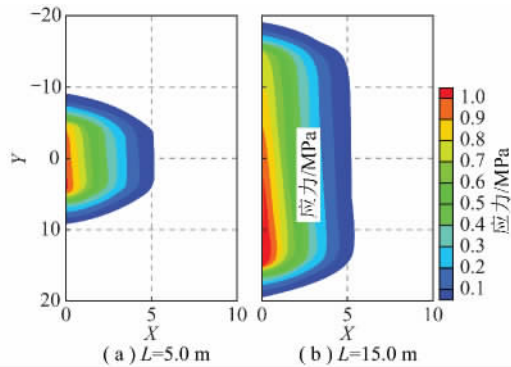


图 9 钻孔长度对注浆范围影响

Fig. 9 Influence of drilling length on grout spread

注浆半径,以本例与基准算例钻孔长度之比作为无量纲化钻孔长度,以本例与基准算例注浆量之比作为无量纲化注浆量,作进一步定量分析,如图 10 所示。通过曲线拟合可知:无量纲化注浆半径与无量纲化钻孔

长度(式(18))、无量纲化注浆量与无量纲化钻孔长度(式(19))均呈线性关系:

$$\begin{cases} f_L^{\rightarrow} = R_L^{\rightarrow} / R_{\sigma}^{\rightarrow} = 0.04(L/L_0) + 0.96 \approx 1.0 \\ f_L^{\uparrow} = R_L^{\uparrow} / R_{\sigma}^{\uparrow} = 0.7(L/L_0) + 0.3 \\ f_L^{\downarrow} = R_L^{\downarrow} / R_{\sigma}^{\downarrow} = 0.7(L/L_0) + 0.3 \end{cases} \quad (18)$$

$$f_L^0 = Q_L / Q_{\sigma} = L / L_0 \quad (19)$$

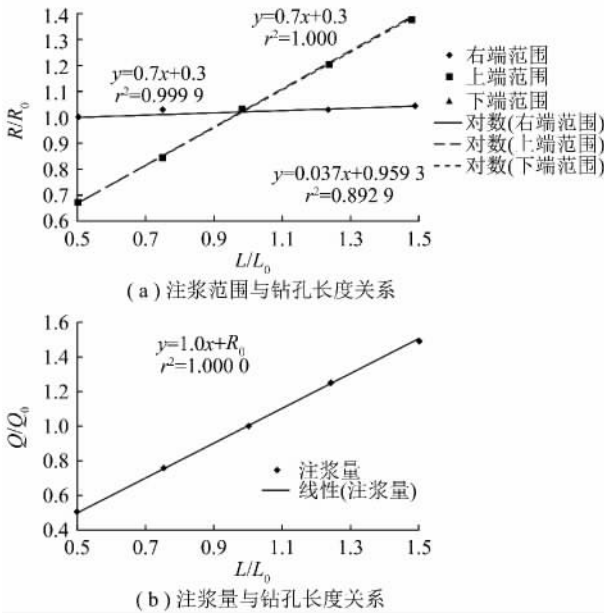


图 10 注浆范围、注浆量与钻孔长度关系

Fig. 10 Relationships between radius/quantity and drilling length

从式(18)和(19)可以看出钻孔长度对注浆量起到主导作用。

4.4 浆液密度

由于浆液密度变化幅度很小(1 200 ~ 1 600 kg/m³) 在变化范围内,浆液密度对注浆范围以及注浆量的影响几乎可以忽略不计。从图 11 中也可得出相同结论。故 $f_{\rho}^{\rightarrow} = f_{\rho}^{\uparrow} = f_{\rho}^{\downarrow} = 1$ $f_{\rho}^0 = 1$ 。

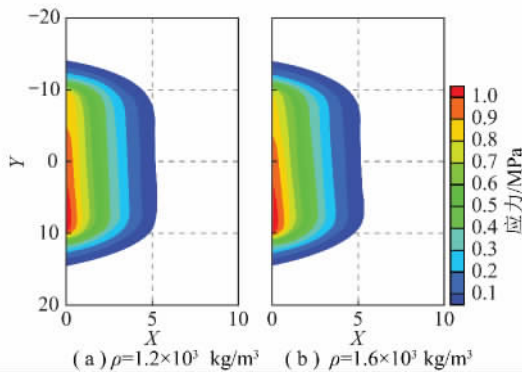


图 11 浆液密度对注浆范围影响

Fig. 11 Influence of grout density on grout spread

4.5 浆液黏度

浆液黏度对注浆范围影响如图 12 所示。以本例与基准算例注浆半径之比作为无量纲化注浆半径,以本例与基准算例浆液黏度之比作为无量纲化浆液黏度,作进一步定量分析,如图 13 所示。通过曲线拟合可知:无量纲化注浆半径与无量纲化浆液黏度呈幂函数关系:

$$\begin{cases} f_{\mu}^{\rightarrow} = R_{\mu}^{\rightarrow} / R_{\sigma}^{\rightarrow} = (\mu / \mu_0)^{0.4} \\ f_{\mu}^{\uparrow} = R_{\mu}^{\uparrow} / R_{\sigma}^{\uparrow} = (\mu / \mu_0)^{0.1} \\ f_{\mu}^{\downarrow} = R_{\mu}^{\downarrow} / R_{\sigma}^{\downarrow} = (\mu / \mu_0)^{0.1} \end{cases} \quad (20)$$

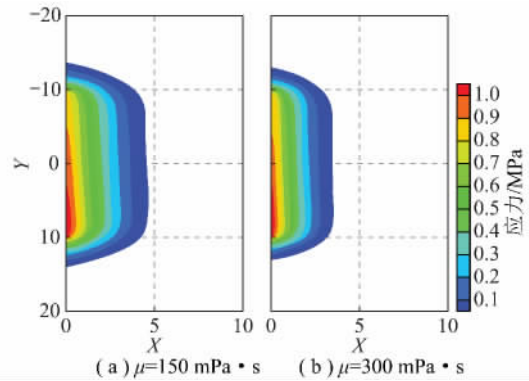


图 12 浆液黏度对注浆范围影响

Fig. 12 Influence of grout viscosity on grout spread

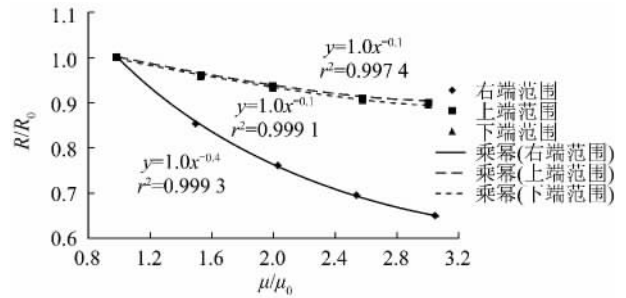


图 13 注浆范围与浆液黏度关系

Fig. 13 Relationship between radius and grout viscosity

式(20)表明浆液黏度对注浆范围起主导作用。此外 根据计算结果定量化描述,注浆量几乎不随浆液黏度改变,因此不再列出其图形 $f_{\mu}^0 = 1$ 。

4.6 浆液剪切强度

浆液剪切强度对注浆范围的影响如图 14 所示,对注浆范围影响较大。以本例与基准算例注浆半径之比作为无量纲化注浆半径,以本例与基准算例浆液剪切强度之比作为无量纲化浆液剪切强度,作进一步定量分析,如图 15 所示。通过曲线拟合可知:无量纲化注浆半径与无量纲化浆液剪切强度呈对数关系:

$$\begin{cases} f_{\tau}^{\rightarrow} = R_{\tau}^{\rightarrow} / R_{\sigma}^{\rightarrow} = 1.0 - 0.23 \ln(\tau / \tau_0) \\ f_{\tau}^{\uparrow} = R_{\tau}^{\uparrow} / R_{\sigma}^{\uparrow} = 1.1 - 0.07 \ln(\tau / \tau_0) \\ f_{\tau}^{\downarrow} = R_{\tau}^{\downarrow} / R_{\sigma}^{\downarrow} = 1.0 - 0.07 \ln(\tau / \tau_0) \end{cases} \quad (21)$$

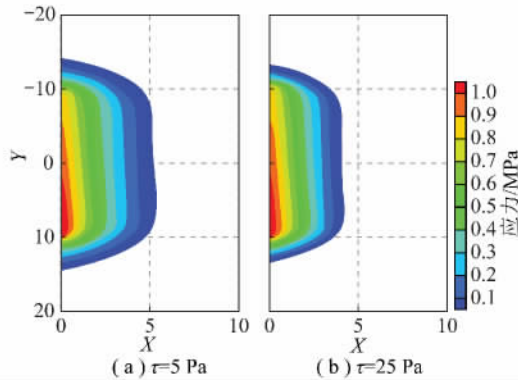


图 14 浆液剪切强度对注浆范围影响

Fig. 14 Influence of grout shear strength on grout spread

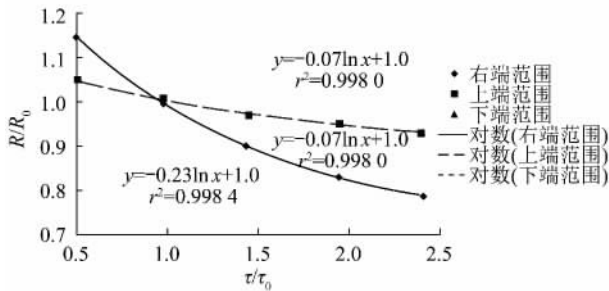


图 15 注浆范围与浆液剪切强度关系

Fig. 15 Relationship between radius and grout shear strength

根据计算结果的定量化描述,注浆量几乎不随浆液剪切强度改变,因此不再列出其图形 $f_r^Q = 1$ 。

4.7 裂隙开度

裂隙开度对注浆范围的影响如图 16 所示,对注浆范围影响较大。以本例与基准算例注浆半径之比作为无量纲化注浆半径,以本例与基准算例裂隙开度之比作为无量纲化裂隙开度,以本例与基准算例注浆量之比作为无量纲化注浆量,作进一步定量分析,如图 17 所示。通过曲线拟合可知:无量纲化注浆半径与无量纲化裂隙开度呈线性关系(式(22));无量纲化注浆量与无量纲化裂隙开度呈线性关系(式(23)):

$$\begin{cases} f_b^{\rightarrow} = R_b^{\rightarrow} / R_{\sigma}^{\rightarrow} = b / b_0 \\ f_b^{\uparrow} = R_b^{\uparrow} / R_{\sigma}^{\uparrow} = 0.7 + 0.3(b / b_0) \\ f_b^{\downarrow} = R_b^{\downarrow} / R_{\sigma}^{\downarrow} = 0.7 + 0.3(b / b_0) \end{cases} \quad (22)$$

$$f_b^Q = Q_b / Q_{\sigma} = b / b_0 \quad (23)$$

从式(22)和(23)可以看出裂隙开度对注浆量起到主导作用。

4.8 裂隙相对粗糙度

裂隙相对粗糙度对注浆范围的影响如图 18 所示,对注浆范围影响较大。裂隙粗糙度自身是无量纲量,通过曲线拟合可知,无量纲化注浆半径与裂隙粗糙度之间呈幂函数关系:

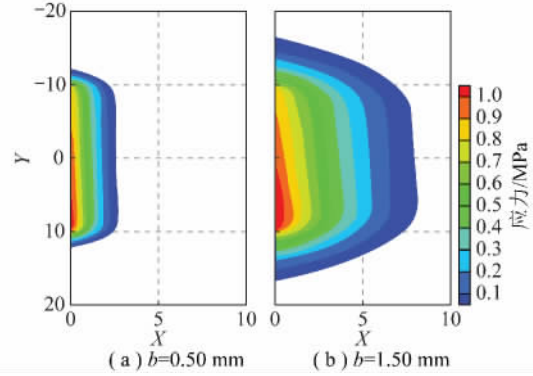
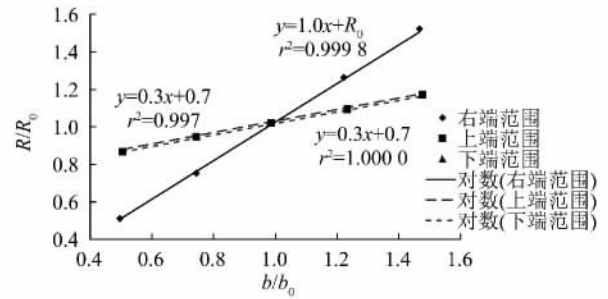
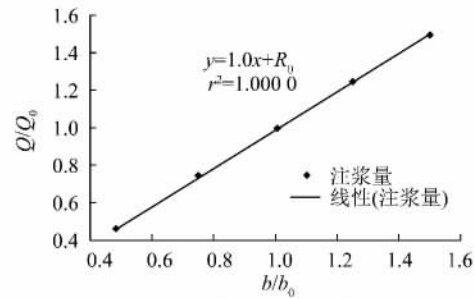


图 16 裂隙开度对注浆范围影响

Fig. 16 Influence of fracture aperture on grout spread



(a) 注浆范围与裂隙开度关系



(b) 注浆量与裂隙开度关系

图 17 注浆范围、注浆量与裂隙开度关系

Fig. 17 Relationships between radius/quantity and fracture aperture

$$\begin{cases} f_{R_r}^{\rightarrow} = R_r^{\rightarrow} / R_{\sigma}^{\rightarrow} = R_r^{-0.2} \\ f_{R_r}^{\uparrow} = R_r^{\uparrow} / R_{\sigma}^{\uparrow} = R_r^{-0.04} \\ f_{R_r}^{\downarrow} = R_r^{\downarrow} / R_{\sigma}^{\downarrow} = R_r^{-0.04} \end{cases} \quad (24)$$

从式(24)可以看出裂隙相对粗糙度对注浆量起到主导作用。此外,根据计算结果的定量化描述,裂隙相对粗糙度对注浆量影响可忽略不计,故取 $f_{R_r}^Q = 1$ 。

5 注浆范围及注浆量公式

通过总结第 4 节中单因素作用的模拟计算与分析,忽略各种注浆因素之间的相互影响,可得出注浆范围与注浆量公式:

$$R^{\rightarrow} = R_{\sigma}^{\rightarrow} f_{\rho}^{\rightarrow} f_d^{\rightarrow} f_L^{\rightarrow} f_{\rho}^{\rightarrow} f_{\mu}^{\rightarrow} f_{\tau}^{\rightarrow} f_b^{\rightarrow} f_{R_r}^{\rightarrow} =$$

$$R_{\sigma}^{-} [1.0 + 0.21\ln(p/p_0)] (\mu/\mu_0)^{0.4} \times [1.0 - 0.23\ln(\tau/\tau_0)] (b/b_0) R_r^{-0.2} \quad (25)$$

$$R^{\uparrow} = R_{\sigma}^{\uparrow} f_p^{\uparrow} f_d^{\uparrow} f_L^{\uparrow} f_{\rho}^{\uparrow} f_{\mu}^{\uparrow} f_{\tau}^{\uparrow} f_b^{\uparrow} f_R^{\uparrow} = R_{\sigma}^{\uparrow} [1.0 + 0.08\ln(p/p_0)] \times [0.7(L/L_0) + 0.3] \times (\mu/\mu_0)^{0.1} [1.1 - 0.07\ln(\tau/\tau_0)] [0.7 + 0.3(b/b_0)] R_r^{-0.05} \quad (26)$$

$$R^{\downarrow} = R_{\sigma}^{\downarrow} f_p^{\downarrow} f_d^{\downarrow} f_L^{\downarrow} f_{\rho}^{\downarrow} f_{\mu}^{\downarrow} f_{\tau}^{\downarrow} f_b^{\downarrow} f_R^{\downarrow} = R_{\sigma}^{\downarrow} [1.0 + 0.07\ln(p/p_0)] \times [0.7(L/L_0) + 0.3] (\mu/\mu_0)^{0.1} [1.0 - 0.07\ln(\tau/\tau_0)] [0.7 + 0.3(b/b)] R_r^{-0.05} \quad (27)$$

$$Q = Q_{\sigma} f_p^{\sigma} f_d^{\sigma} f_L^{\sigma} f_{\rho}^{\sigma} f_{\mu}^{\sigma} f_{\tau}^{\sigma} f_b^{\sigma} f_R^{\sigma} = Q_{\sigma} (p/p_0) (L/L_0) (b/b_0) \quad (28)$$

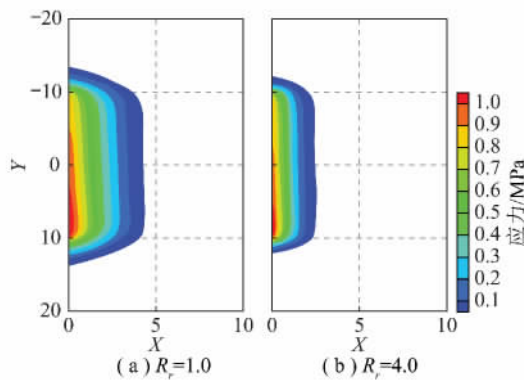


图 18 裂隙相对粗糙度对注浆范围影响

Fig. 18 Influence of relative fracture roughness on grout spread

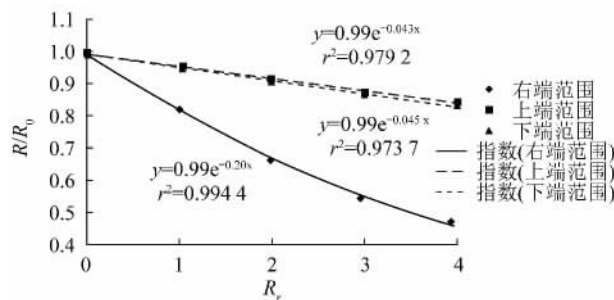


图 19 注浆范围与裂隙相对粗糙度关系

Fig. 19 Relationship between radius and relative fracture roughness

6 工程实例

对某煤矿巷道注浆工程进行量化研究。该工程中岩体裂隙发育,建成后有巷道渗水现象。采用化学浆液注浆堵水,注浆参数见表 2。

将表 3 中的参数代入到注浆半径式(25)中可以得到各注浆段的注浆半径,并与实测范围进行对比,如表 4 所示。从表中可以看出,式(25)计算的注浆半径比实测值稍大,满足工程精度要求,从而说明本文数值模拟的准确性。

表 2 注浆参数

Table 2 Grouting parameters

参数	注浆段 1	注浆段 2
p/MPa	0.3	0.4
d/mm	59	59
L/m	2.0	2.5
$\rho/(10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.4	1.4
$\mu/(\text{mPa} \cdot \text{s})$	70	70
τ/Pa	20	20
b/mm	1.0	1.0
R_r	4.0	4.0

表 3 注浆半径结果

Table 3 Grouting radius

注浆段	本文计算半径/m	实际扩散半径/m
1	2.2	1.5 ~ 2.0
2	2.4	1.5 ~ 2.0

7 结 语

通过建立二维正交裂隙网络宾汉浆液渗流模型,采用中心型有限体积法求解,模拟了不同参数下的化学浆液注浆范围,说明算法有效性。

研究表明:注浆压力、浆液黏度、浆液剪切强度、裂隙开度和裂隙粗糙度对注浆扩散范围起到主导作用;注浆压力、注浆管长度和裂隙开度对注浆量起到主导作用。忽略各种注浆因素之间的相互影响,可得到二维正交裂隙网络化学浆液扩散范围及注浆量公式。

参考文献:

[1] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 24(15): 2709 - 2714.
Ruan Wenjun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 24(15): 2709 - 2714.

[2] Hässler L, Håkansson U, Stille H. Computer-simulated flow of grouts in jointed rock [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1992, 7(4): 441 - 446.

[3] Eriksson M, Stille H, Andersson J. Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 353 - 364.

[4] Yang M J, Yue Z Q, Lee P K K, et al. Prediction of grout penetration in fractured rocks by numerical simulation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(6): 1384 - 1394.

[5] 郝哲, 王介强, 何修仁. 岩体裂隙注浆的计算机模拟研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 727 - 730.

- Hao Zhe ,Wang Jieqiang ,He Xiuren. Computerized simulation of crack grouting in rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1999 ,21(6) :727 - 730.
- [6] 杨米加 ,贺永年 ,陈明雄. 裂隙岩体网络注浆渗流规律[J]. 水利学报 2001(7) :41 - 46.
Yang Mijia ,He Yongnian ,Chen Mingxiong. Law of grouting penetrating through fracture network of rock mass[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2001(7) :41 - 46.
- [7] 罗平平 ,朱岳明 ,黄金桂 ,等. 二维随机裂隙岩体灌浆数值模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版 2006 ,34(3) :295 - 298.
Luo Pingping ,Zhu Yueming ,Huang Jingui ,et al. Two-dimensional numerical simulation of grouting in random fractured rock mass[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) ,2006 ,34(3) :295 - 298.
- [8] 刘健 ,刘人太 ,张霄 ,等. 水泥浆液裂隙注浆扩散规律模型试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报 ,2012 ,31(12) :2445 - 2552.
Liu Jian ,Liu Rentai ,Zhang Xiao ,et al. Diffusion law model test and numerical simulation of cement fracture grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012 ,31(12) :2445 - 2552.
- [9] Bolisetti T ,Reitsma S. Numerical simulation of chemical grouting in heterogeneous porous media[A]. Grouting and Ground Treatment. ASCE[C]. 2003 :1454 - 1465.
- [10] 孙斌堂 ,凌贤长 ,凌 晨 ,等. 渗透注浆浆液扩散与注浆压力分布数值模拟[J]. 水利学报 2007 ,37(11) :1402 - 1407.
Sun Bintang ,Ling Xianzhang ,Ling Chen ,et al. Numerical simulation for diffusion and pressure distribution of permeation grouting [J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2007 ,37(11) :1402 - 1407.
- [11] 冯志强 ,康红普 ,杨景贺. 裂隙岩体注浆技术探讨[J]. 煤炭科学技术 2005 ,33(4) :63 - 66.
Feng Zhiqiang ,Kang Hongpu ,Yang Jinghe. Discussion on grouting technology for crack rock mass[J]. Coal Science and Technology , 2005 ,33(4) :63 - 66.
- [12] 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 Wenjun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2005 27(1) :69 - 73.
- [13] El Tani M. Grouting rock fractures with cement grout[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering 2012 ,45(4) :547 - 561.
- [14] 冯志强 ,康红普 ,韩国强. 煤矿用无机盐改性聚氨酯注浆材料的研究[J]. 岩土工程学报 2013 ,35(8) :1559 - 1564.
Feng Zhiqiang ,Kang Hongpu ,Han Guoqiang. Polyurethane grouting materials modified by inorganic salts in coal mines [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2013 ,35(8) :1559 - 1564.
- [15] Wang L X ,Li S H ,Ma Z S. A finite volume simulator for single-phase flow in fractured porous media[A]. Proceedings of the 6th International Conference on Discrete Element Methods and Related Techniques[C]. 2013 :130 - 135.
- [16] 王理想 ,李世海 ,马照松 ,等. 一种中心型有限体积孔隙 - 裂隙渗流求解方法及其 OpenMP 并行化[J]. 岩石力学与工程学报 , 2015 ,34(5) :865 - 875.
Wang Lixiang ,Li Shihai ,Ma Zhaosong ,et al. A cell-centered finite volume method for fluid flow in fractured porous media and its parallelization with OpenMP [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2015 ,34(5) :865 - 875.
- [17] Gustafson G ,Claesson J ,Fransson Å. Steering parameters for rock grouting[J]. Journal of Applied Mathematics 2013 ,2013 :269594.