



# 煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

## 基于浆液岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制研究

翟明磊 白海波

引用本文:

翟明磊, 白海波. 基于浆液岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 158–167.

ZHAI Minglei, BAI Haibo. Research on the mechanism of fracture grouting diffusion and its application based on slurry-rock mass coupling effect[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 158–167.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1239>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 裂隙岩体水平孔注浆浆液扩散规律研究

Study on diffusion law of grouting slurry in horizontal hole in fractured rock mass

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 233–243 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/aa5717b9-82cf-4be5-9c6b-57d9db04f4fe>

##### 裂隙岩体注浆理论研究进展及展望

Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 112–126 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8b89b4c2-0db0-4d63-984e-6ea5c668fa1f>

##### 地下含水层帷幕注浆单液水泥浆扩散规律研究

Research on diffusion law of pure liquid cement slurry for curtain grouting in underground aquifer

煤炭科学技术. 2021, 49(11): 134–141 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a6f2f491-d613-49e6-b6b3-e6a645300a26>

##### 三软煤层巷道掘进防漏顶预注浆液扩散规律研究

Study on diffusion law of pre-grouting slurry for leakproof roof of roadway development in coal seam with soft floor, soft roof and soft coal

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/53545e78-5d6d-40f2-8bfe-a2be334420d4>

##### 劈裂注浆加固技术及研究进展

Technology and research progress of split grouting reinforcement

煤炭科学技术. 2020, 48(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1ad8cdc1-041b-4792-af52-11c67d3d5835>

##### 黔南灯影组巨厚含水层立井井筒帷幕注浆参数研究

Study on curtain grouting parameters of vertical shaft in Dengying formation of southern Guizhou with thick aquifer

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 71–77 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.008>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

翟明磊, 白海波. 基于浆液-岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 158-167.  
ZHAI Minglei, BAI Haibo. Research on the mechanism of fracture grouting diffusion and its application based on slurry-rock mass coupling effect[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 158-167.

## 基于浆液-岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制研究

翟明磊<sup>1,2</sup>, 白海波<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000; 3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 华北型煤田深部开采过程中受底板灰岩含水层水害威胁程度高, 通过合理布设注浆孔向直接威胁煤层安全开采的含水层大量灌注浆液, 使强含水层成为弱含水层或隔水层, 是解决此类水害问题的主要手段。在微裂隙注浆工程中, 浆液-岩体耦合效应对浆液扩散过程影响显著。为此, 开展煤层底板裂隙含水层高压注浆过程中浆液-岩体相互作用及浆液扩散机制问题研究, 基于黏度时变性宾汉流体浆液扩散运动方程和裂隙开度控制方程, 建立了考虑浆液流动与岩体变形耦合作用的裂隙注浆扩散理论模型, 分析了浆液压力和裂隙开度在浆液扩散方向上的空间分布特征, 揭示了浆液-岩体耦合作用对浆液扩散的影响规律, 并利用恒定裂隙开度注浆模型进行了对比分析。结果表明: 浆液压力和裂隙开度变化在浆液扩散方向上衰减趋势一致且均具有明显的非线性特征, 在裂隙入口区域衰减较快; 浆液-岩体耦合作用程度随裂隙开度增加而减小, 裂隙开度较小时不考虑浆液-岩体耦合作用将导致注浆压力设计值偏大; 随着裂隙开度增加, 注浆压力逐渐成为影响浆液扩散距离的主控因素。最后, 结合鲁西煤矿下组煤底板灰岩含水层注浆改造工程实例, 验证了理论模型的正确性。

**关键词:** 裂隙含水层; 注浆改造; 浆液扩散; 裂隙开度; 应力耦合

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)07-0158-10

## Research on the mechanism of fracture grouting diffusion and its application based on slurry-rock mass coupling effect

ZHAI Minglei<sup>1,2</sup>, BAI Haibo<sup>3</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The deep mining process of North China type coalfields is highly threatened by the threat of water damage from the floor limestone aquifer. By arranging grouting holes reasonably to inject a large amount of slurry into the aquifer that directly threatens the safety of coal seam mining, making the strong aquifer a weak aquifer or an impermeable layer is the main means to solve such water damage problems. In microfracture grouting engineering, the slurry-rock mass coupling effect has a significant impact on the diffusion process of slurry. To this end, the interaction between slurry and rock mass and the diffusion mechanism of slurry during high-pressure grouting of coal seam floor aquifers was studied, a single fracture grouting diffusion theoretical model was established that considers the slurry flow-rock mass deformation coupling effect, based on the viscosity time varying Bingham slurry diffusion equation and fracture aperture control equation. The spatial distribution characteristics of slurry pressure and fracture aperture in the slurry diffusion direction were analyzed, and the effect rules of slurry-rock mass coupling effect on slurry diffusion was revealed, and the results were compared with the grouting model with constant fracture aperture. The results showed that the attenuation trend of slurry pressure and fracture aperture in the slurry diffusion direction was consistent, and both had obvious nonlinear characteristics, and the attenuation was faster in the fracture entrance area. The degree of slurry-rock mass coupling effect decreased with the increase of fracture aperture, and the design value of grouting pres-

收稿日期: 2023-10-20

责任编辑: 常 琛

DOI: 10.12438/cst.2023-1239

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流资助项目(52061135111)

作者简介: 翟明磊(1990—), 男, 河南上蔡人, 讲师, 博士。Tel: 0391-3987901, E-mail: minglzcumt@126.com

sure will be too high if fracture aperture was small and the slurry-rock mass coupling effect was not considered. The grouting pressure became the main controlling factor affecting the slurry diffusion distance gradually as the fracture aperture increased. By comparing the theoretical results with an example of grouting transformation of the limestone aquifer in the lower coal seam floor of Luxi coal mine, the validity of the theoretical model was verified.

**Key words:** fractured aquifer; grouting transformation; slurry diffusion; fracture aperture; stress coupling

## 0 引言

我国能源资源禀赋特征决定了煤炭在近期内对能源供应的贡献不会显著降低。山东省拥有较为丰富的煤炭资源,根据煤田勘探划分,山东省所有含煤区均属于华北型煤田,石炭-二叠系煤炭资源储量占总储量的94.1%,下组煤回采时受到底板太灰和奥灰高承压岩溶含水层威胁,易发生底板突水灾害。特别是奥灰含水层具有厚度大、涌水量大和水压高的特点,常通过断层或陷落柱与太灰发生水力联系,导致工作面底板突水系数超过《煤矿水防治细则》中要求的临界值( $T_s$ ),无法进行安全带压开采<sup>[1-3]</sup>。为了解决这一问题,许多矿山采用人工干预方法。例如在井下工作面或地面采取人工注浆措施以改变灰岩含水层的性质并堵塞导水裂缝,或采取封闭和半封闭岩溶地下水系统的疏水降压措施以降低灰岩含水层水压,或两者结合满足带压开采的要求<sup>[4-5]</sup>。其中注浆技术已在矿山底板水害防治工程中得到广泛应用,对保护矿区水资源、确保煤炭开采本质安全具有重要意义。

裂隙产状特征和浆液性质是影响注浆效果的主要因素<sup>[6-9]</sup>。面片状裂隙易被钻孔揭露,具有空间延伸的特点,其对浆液扩散的影响方式是注浆堵水的技术难点,主要体现在浆液扩散距离和改造后岩体的堵水能力方面<sup>[10-11]</sup>。因此,迫切需要探索浆液在微裂隙中的扩散规律。为了研究浆液在裂隙中的扩散规律,学者们进行了一系列广泛的研究。张庆松等<sup>[12]</sup>提出了考虑浆液黏度时空变化的水平裂隙注浆扩散理论模型,分析了浆液压力的空间分布特征。尚宏波等<sup>[13]</sup>建立了考虑浆液重力及裂隙倾角影响的水平孔注浆扩散控制方程。ZHAI等<sup>[14]</sup>推导了恒定注浆速率下考虑浆液黏度变化的一维注浆理论模型。然而,上述研究均假设裂隙开度在注浆过程中保持不变,事实上,浆液在裂隙中的扩散过程是浆液渗流和岩体变形相互作用的结果。注浆过程中,浆液的运移过程受到裂隙侧壁及其自身黏度的阻力,导致浆液压力沿浆液扩散方向衰减。裂隙两侧岩体受到浆液压力的作用,产生垂直于浆液扩散方向的变形,导致裂隙开度增加。浆液压力场的分布决定裂隙的

变形状态,同时,由于裂隙开度沿浆液扩散方向衰减,不同位置的裂隙侧壁对浆液扩散的阻力不同,即裂隙变形状态也会影响裂隙内的浆液流场。

为此,李术才等<sup>[15]</sup>建立了考虑浆液-岩体耦合效应的注浆扩散公式。RAFI等<sup>[16]</sup>研究了裂隙开度张开变形机理及对注浆效果的影响。然而,上述研究假设浆液压力沿扩散方向线性衰减,这与实际情况明显不同。考虑到浆液流场对裂隙两侧岩体的单向作用,郑卓等<sup>[17]</sup>建立了浆液-岩体单向耦合的裂隙岩体注浆理论模型。虽然上述研究已经充分探讨了注浆压力作用下裂隙岩体变形行为,但由于预先假设了浆液压力的分布特征,因此忽略了裂隙变形对浆液扩散过程的影响。

为了克服上述问题,充分考虑裂隙岩体注浆过程中的浆液-岩体耦合效应,基于宾汉流体本构模型推导了浆液流动控制方程,通过引入半无限平面受力模型得到了裂隙开度变化控制方程,进而建立了考虑浆液-岩体耦合效应的注浆扩散理论方程。分析了浆液压力和裂隙开度在浆液扩散方向上的空间分布特征,利用恒定裂隙开度注浆模型对比分析了注浆压力设计时考虑浆液-岩体耦合作用的必要性。最后,通过现场实践验证了理论模型的合理性。

## 1 裂隙注浆扩散理论分析

### 1.1 浆液本构方程

以目前注浆工程中广泛使用的水泥浆液作为研究对象开展相关理论研究,并进行了一些简化和假设<sup>[17]</sup>。研究表明,浆料流型分属3种流型,而不是单一流型。水灰比( $w/c$ )为0.5~0.7的水泥浆为幂律流体, $w/c$ 为0.8~1.0和2.0~10.0分别为宾汉流体和牛顿流体<sup>[18]</sup>。注浆过程中浆液流型保持不变,黏度随时间呈指数变化关系(图1):

$$\mu(t) = \mu_0 e^{kt} \quad (1)$$

注浆实践中,常用的浆液水灰比为0.8~1.0,属于宾汉流体。浆液的屈服剪切应力( $\tau_0$ )随时间变化基本不变,可视为一常数。宾汉流体的本构方程为

$$\tau = \tau_0 + \mu(t) \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

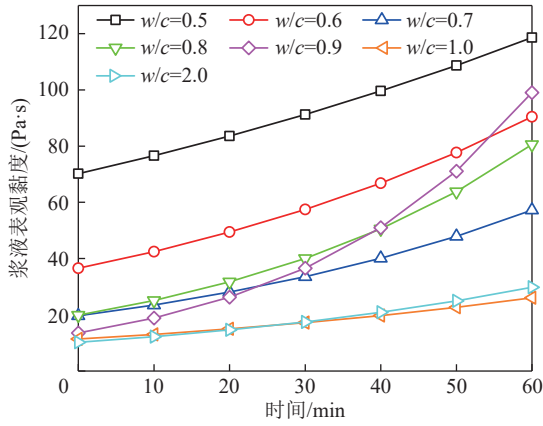


图1 水泥浆液的黏度时变曲线

Fig.1 Slurry viscosity as a function of time

结合式 (1)、式 (2) 得到考虑黏度随时间变化的宾汉体浆液流动本构方程:

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 e^{kt} \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

式中,  $\tau$  为剪切应力, Pa·s;  $\tau_0$  为屈服剪切应力, Pa·s;  $\mu_0$  为初始塑性黏度, Pa·s;  $k$  为时变黏度系数, 可通过试验测定;  $t$  为注浆时间;  $v$  为流速, m/s;  $y$  为垂直于速度方向的距离, m。

## 1.2 浆液流动控制方程

在等开度单一平板裂隙中, 忽略重力对微裂隙注浆扩散的影响, 则浆液以注浆孔为中心呈圆形轴对称扩散, 可简化为二维问题进行研究<sup>[19]</sup>(图2)。沿注浆孔轴线取剖面, 建立以裂隙对称中心线和通过注浆孔中心的竖直线为坐标轴的直角坐标系, 以裂隙中心线为对称轴取浆液微元体开展受力分析(图3)。

设裂隙宽度为  $b$ , 静水压力为  $p_0$ , 则裂隙内任意位置浆液微元体在任意  $x$  点的力学平衡方程为

$$2\tau dx + 2y_0 dp = 0 \quad (4)$$

式中,  $dx$  为微元体长度;  $y_0$  为微元体高度的一半;  $dp$  为单位体积浆液压力增量。

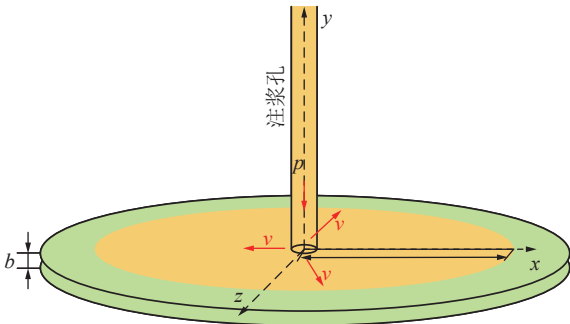


图2 单裂隙注浆模型

Fig.2 Grouting model of single fracture

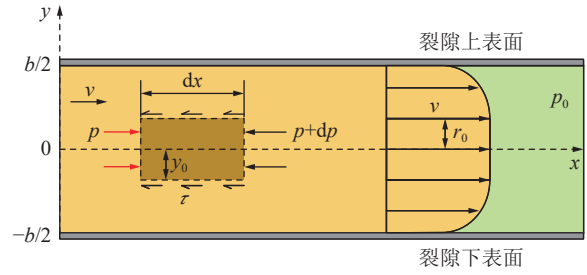


图3 浆液流动受力分析

Fig.3 Force analysis of slurry motion

可得剪切应力沿裂隙宽度方向的分布规律:

$$\tau = -y_0 \frac{dp}{dx} \quad (5)$$

当  $\tau \leq \tau_0$  时, 宾汉流体浆液颗粒之间不发生相对运动, 存在中心留核区, 留核区边界剪切应力为

$$\tau_0 = -r_0 \frac{dp}{dx} \quad (6)$$

式中,  $r_0$  为中心留核区半径。

由于留核区高度不大于裂隙宽度, 即  $r_0 \leq b/2$ , 因此留核区满足以下条件:

$$-\frac{dp}{dx} \geq \frac{2\tau_0}{b} \quad (7)$$

式 (7) 表明, 由于宾汉体浆液存在屈服剪切应力  $\tau_0$ , 浆液流动存在启动压力梯度。令式 (7) 中:

$$\lambda = \frac{2\tau_0}{b} \quad (8)$$

式中,  $\lambda$  为启动压力梯度。

将式 (3) 代入式 (6) 得:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\tau_0}{\mu_0 e^{kt}} + \frac{y}{\mu_0 e^{kt}} \frac{dp}{dx} \quad (9)$$

浆液流动过程中存在以下边界条件:

$$\begin{cases} v = 0, & y = \pm \frac{b}{2} \\ v = v, & y \leq r_0 \end{cases} \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (9), 得到浆液沿裂隙宽度的速度分布:

$$v = \begin{cases} -\frac{b^2 - 4y^2}{8\mu_0 e^{kt}} \frac{dp}{dx} - \frac{\tau_0}{\mu_0 e^{kt}} \left( \frac{b}{2} - |y| \right), & r_0 \leq |y| \leq \frac{b}{2} \\ -\frac{b^2 - 4r_0^2}{8\mu_0 e^{kt}} \frac{dp}{dx} - \frac{\tau_0}{\mu_0 e^{kt}} \left( \frac{b}{2} - r_0 \right), & |y| \leq r_0 \end{cases} \quad (11)$$

浆液的平均流速可表示为

$$\bar{v} = \frac{1}{b} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} v dy \quad (12)$$

将式 (11) 代入式 (12), 得到:

$$\bar{v} = \frac{-b^2}{12\mu_0 e^{kt}} \left[ \frac{dp}{dx} + \frac{3\tau_0}{b} + \frac{4\tau_0^3}{b^3} \left( \frac{dp}{dx} \right)^{-2} \right] \quad (13)$$



在注浆过程中,可以忽略式 (13) 中的高阶项,因为  $-dp/dx$  通常远大于  $\lambda$ ,则式 (13) 可简化为

$$\bar{v} = \frac{-b^2}{12\mu_0 e^{kt}} \left( \frac{dp}{dx} + \frac{3\tau_0}{b} \right) \quad (14)$$

设注浆流量为  $q$ , 则:

$$q = 2\pi x b \bar{v} \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (14), 得到裂隙中宾汉体浆液流动压力梯度方程:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{6q\mu_0 e^{kt}}{\pi x b^3} - \frac{3\tau_0}{b} \quad (16)$$

### 1.3 裂隙变形控制方程

注浆过程中,浆液对裂隙两侧施加垂直于裂隙侧壁表面的压力,产生垂直于裂隙表面的位移。裂隙开度增量取决于裂隙受到的浆液压力。浆液压力对裂隙通道两侧岩体的作用力与垂直于浆液扩散方向存在微小夹角。由于浆液扩散范围远大于裂隙开度,可忽略此夹角对浆液沿程压力计算结果的影响。考虑到浆液压力在浆液扩散方向上衰减过程较慢,则可采用均布压力计算裂隙两侧岩体变形<sup>[20]</sup>。将裂隙两侧岩体变形过程简化为半无限空间弹性体受均布压力作用模型,得到浆液压力与裂隙开度变化关系方程。以裂隙对称中心线和通过注浆孔中心的竖直线为坐标轴建立直角坐标系 (图 4)。

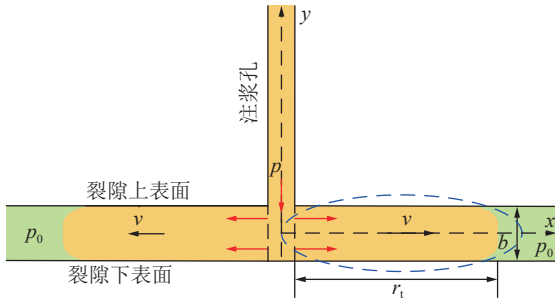


图 4 单裂隙内浆液流动示意

Fig.4 Schematic of slurry flow in fracture

浆液压力  $p$  所引起的附加应力  $p'$  作为均匀荷载直接作用于裂隙两侧岩体,满足条件:

$$p' = p - p_0 \quad (17)$$

下面计算由附加应力  $p'$  引起的裂隙开度变化。在该弹性体中任一垂直于  $oxz$  面的平面均为对称面,因此,可建立如图 5 所示的三维空间直角坐标系,  $x, z$  方向的位移  $U, W$  均为 0,  $y$  方向竖直位移为  $V$ 。

此时,位移分量如下:

$$\begin{cases} U = W = 0 \\ V = V(y) \end{cases} \quad (18)$$

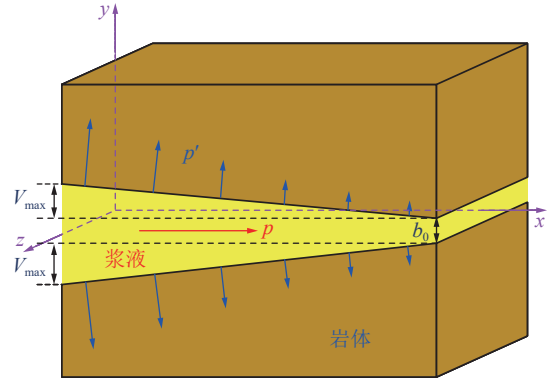


图 5 注浆过程中裂隙变形示意

Fig.5 Schematic of fracture deformation during grouting

且满足以下条件:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \varepsilon_z = 0 \\ \sigma_x = \sigma_z \end{cases} \quad (19)$$

根据弹性力学物理方程:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $E$  为岩体弹性模量;  $\nu$  为泊松比。

将式 (19) 代入式 (20), 得到  $y$  方向岩体应变:

$$\varepsilon_y = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)\sigma_y}{(1-\nu)E} \quad (21)$$

又有:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} \quad (22)$$

则由受力分析可知裂隙单侧在  $y$  方向所受到的应力为  $\sigma_y = p'$ , 根据式 (17)、式 (21)、式 (22), 得到裂隙在  $y$  方向的位移为

$$V = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)(p-p_0)}{(1-\nu)E} y + C \quad (23)$$

式中,  $C$  为待求常数。

求常数  $C$  需利用位移边界条件。设浆液压力对裂隙两侧岩体的极限影响距离为  $D$ , 即在  $y=D/2$  处岩体沿  $y$  方向的位移为 0。将此边界条件代入式 (23), 得到位移方程:

$$V = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)(p-p_0)}{(1-\nu)E} \left( \frac{D}{2} - y \right) \quad (24)$$

由式 (24) 可知,  $y$  方向上的最大位移发生在浆液-岩体接触界面上:

$$V_{\max} = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)(p-p_0)D}{2(1-\nu)E} \quad (25)$$

根据图 5, 裂隙开度增量为

$$b' = 2V_{\max} \quad (26)$$

则浆液压力作用下裂隙通道宽度可表示为

$$b = b_0 + \frac{(1-2\nu)(1+\nu)(p-p_0)D}{(1-\nu)E} \quad (27)$$

令:

$$G = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)D}{(1-\nu)E} \quad (28)$$

则有:

$$b = b_0 + G(p-p_0) \quad (29)$$

综上, 裂隙开度与注浆压力的关系方程为

$$b = \begin{cases} b_0, & p \leq p_0 \\ b_0 + G(p-p_0), & p > p_0 \end{cases} \quad (30)$$

#### 1.4 浆液压力空间分布方程

由式 (16)、式 (30), 得到裂隙开度  $b$  与浆液扩散距离  $x$  的微分方程:

$$\frac{db}{dx} = -G \left[ \frac{6q\mu(t)}{\pi x b^3} + \frac{3\tau_0}{b} \right] \quad (31)$$

根据《煤矿防治水细则》, 注浆终压总是须满足“大于底板岩溶含水层的静水压力”的条件, 所以在注浆压力作用下浆液有效扩散范围内, 可用式 (29) 表征裂隙开度变化。

将式 (29) 代入式 (16), 积分可得:

$$p = -\frac{6q\mu(t)}{\pi[b_0 + G(p-p_0)]^3} \ln x - \frac{3\tau_0}{b_0 + G(p-p_0)} x + C \quad (32)$$

由边界条件:

$$p = p_0, (x = r_i) \quad (33)$$

式中,  $x=r_i$  处为浆液扩散锋面。

将式 (33) 代入式 (32) 可得:

$$C = \frac{6q\mu(t)}{\pi b_0^3} \ln r_i + \frac{3\tau_0}{b_0} r_i + p_0 \quad (34)$$

将式 (34) 代入式 (32) 得到宾汉体浆液扩散区的压力分布方程:

$$p = \frac{6q\mu(t)}{\pi b_0^3} \ln r_i - \frac{6q\mu(t)}{\pi[b_0 + G(p-p_0)]^3} \ln x + \frac{3\tau_0}{b_0} r_i - \frac{3\tau_0}{b_0 + G(p-p_0)} x + p_0 \quad (35)$$

令式 (35) 中  $x=r_c$ , 得到注浆孔压力:

$$p_c = p(r_c, t) \quad (36)$$

则注浆孔压力  $p_c$  与浆液扩散距离  $r_i$  的关系方程为

$$p_c = \frac{6q\mu(t)}{\pi b_0^3} \ln r_i - \frac{6q\mu(t)}{\pi[b_0 + G(p_c - p_0)]^3} \ln r_c + \frac{3\tau_0}{b_0} r_i - \frac{3\tau_0}{b_0 + G(p_c - p_0)} r_c + p_0 \quad (37)$$

式 (37) 表明, 浆液在裂隙中的扩散距离由注浆孔压力、注浆流量、浆液性质、裂隙开度、岩体性质和静水压力共同决定。

## 2 浆液扩散影响因素分析

以山东省鲁西煤矿 16104 工作面底板灰岩含水层注浆改造工程为背景开展浆液扩散机制研究及影响因素分析, 注浆计算模型参数取值均参照工程实例。经测试得到灰岩含水层参数为: 弹性模量  $E=30$  GPa, 泊松比  $\nu=0.3$ , 静水压力  $p_0=3.8$  MPa。

注浆用普通硅酸盐水泥浆液水灰比  $w/c=1.0$ , 实验室测得浆液屈服剪切应力  $\tau_0=6.73$  Pa, 初始塑性黏度  $\mu_0=0.134$  Pa·s, 时变黏度系数  $k=0.0001$ 。取注浆孔半径  $r_c=0.045$  m, 注浆速率  $q=50$  L/min, 注浆影响范围  $D=5$  m, 浆液扩散锋面处浆液压力等于含水层静水压力。将上述参数代入式 (35)、(29) 和 (37), 分别得到浆液压力空间分布曲线、裂隙开度空间分布曲线和浆液扩散距离随注浆孔压力的变化曲线, 并与恒定裂隙开度注浆模型对比分析<sup>[21]</sup>。

### 2.1 浆液压力的空间分布

图 6 为裂隙初始开度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm, 浆液扩散距离为 20 m 时浆液压力的空间分布曲线。可以看出, 随着裂隙初始开度的变化, 浆液-岩体耦合作用对浆液压力的空间分布特征有较大影响。分析可知:

1) 浆液压力由注浆孔沿浆液扩散方向呈非线性衰减, 且衰减速率逐渐减小, 不考虑浆液-岩体耦合作用时, 浆液压力衰减速率更快。裂隙开度为 0.5 mm 时, 恒定开度注浆模型裂隙入口浆液压力计算值为 18.59 MPa, 而考虑时仅为 6.68 MPa, 所以不考虑浆液-岩体耦合作用导致浆液压力被高估。

2) 浆液-岩体耦合作用对浆液压力空间分布的影响随着裂隙开度增加而减弱。裂隙开度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm 时, 恒定裂隙开度注浆模型裂隙入口浆液压力分别为 18.59、6.09、4.67、4.28 MPa, 较考虑浆液-岩体耦合作用时浆液压力分别增加 11.920、0.810、0.310、0.097 MPa, 增幅分别为 64.1%、16.5%、8.3%、2.3%。故对于开度较小的裂隙, 浆液压力的变化对浆液-岩体耦合作用更为敏感; 对于开度较大的裂隙, 不考虑浆液-岩体耦合作用引起的误差较小。

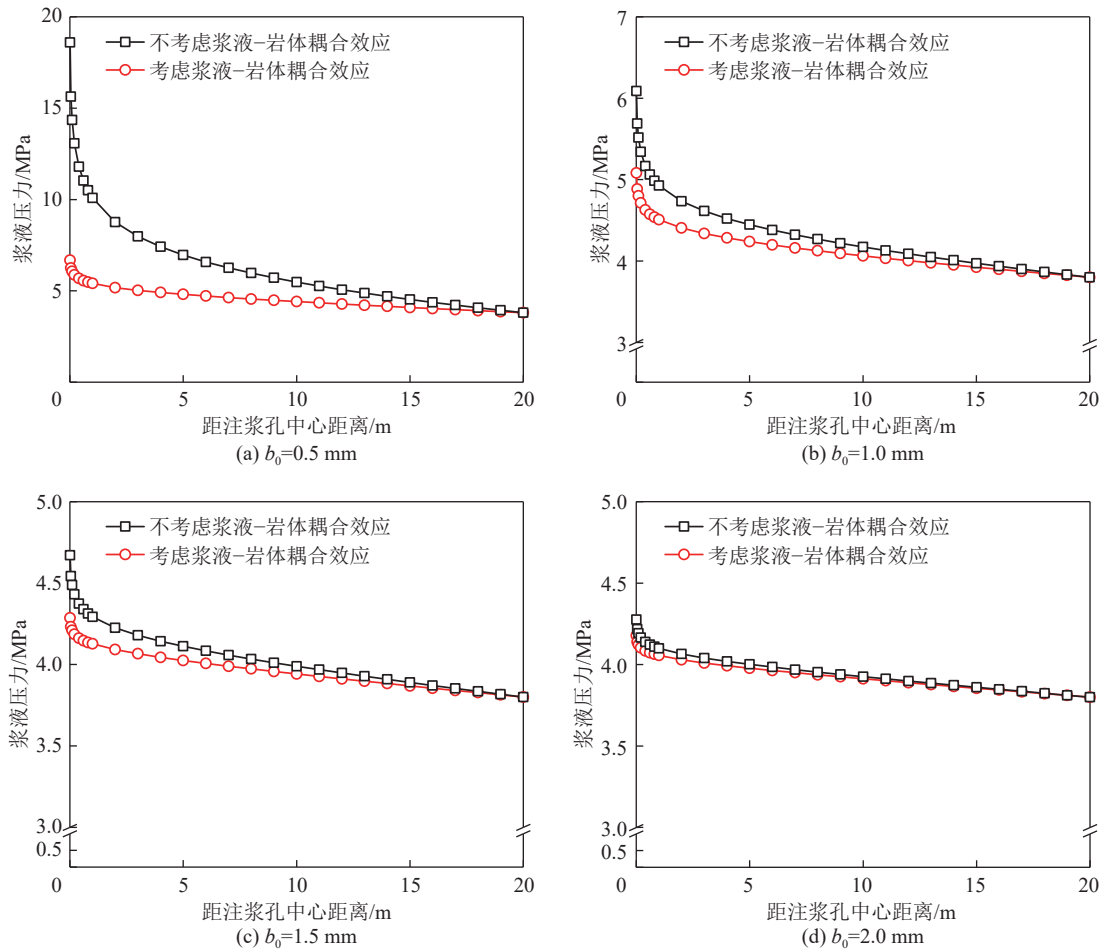


图 6 浆液压力的空间分布曲线

Fig.6 Spatial distribution of slurry pressure under different fracture aperture

## 2.2 裂隙开度的空间分布

图 7 为裂隙初始开度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm，浆液扩散距离为 20 m 时裂隙开度的空间分布曲线。可以看出，随着裂隙初始开度的变化，浆液-岩体耦合作用对裂隙开度的空间分布特征有较大影响。分析可知：

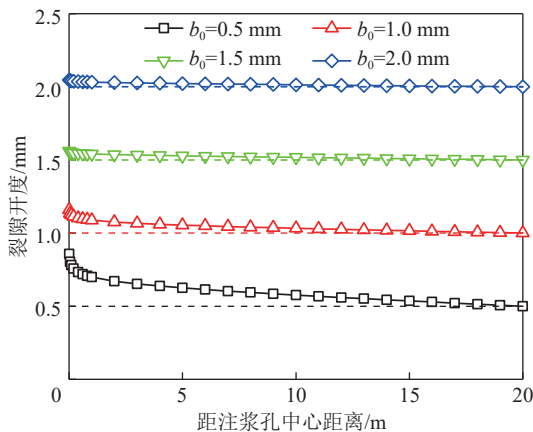


图 7 裂隙开度的空间分布曲线

Fig.7 Spatial distribution of fracture aperture

1) 不考虑浆液-岩体耦合作用时，裂隙开度保持不变。考虑浆液-岩体耦合作用时，裂隙开度在裂隙入口处变形最大，变形程度沿浆液扩散方向衰减且衰减速率逐渐减小，这与浆液压力在扩散方向上的分布规律一致，原因是裂隙开度变化是由作用于两侧裂隙的浆液压力引起。在浆液扩散锋面处，浆液压力等于含水层静水压力，浆液扩散距离达到最大值，裂隙不再发生变形。

2) 裂隙开度越小，浆液-岩体耦合作用下裂隙变形越显著。裂隙初始开度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm 时，考虑浆液-岩体耦合作用时裂隙入口开度分别达到最大值 0.86、1.16、1.56 和 2.05 mm，与初始开度比值分别为 1.72、1.16、1.04 和 1.03，这表明随着裂隙开度的增加，浆液-岩体耦合作用程度逐渐减弱。

3) 裂隙开度为 0.5 mm 时入口变形量为 0.36 mm，较初始开度增加 72%；而裂隙开度为 2.0 mm 时入口变形量为 0.05 mm，仅增加 2.5%。裂隙开度变形量均小于浆液扩散距离 5~6 个数量级，验证了 1.3 节“忽略此夹角对浆液沿程压力计算结果的影响”假设

的合理性。

2.3 浆液扩散距离与注浆压力的关系

图 8 为裂隙初始开度分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm 时浆液扩散距离与注浆压力的关系曲线。分析可知:

- 1) 注浆压力较小时,浆液扩散距离极小。此时裂隙开度几乎无变化,浆液流动阻力较大,浆液-岩体耦合作用可忽略。
- 2) 随着注浆压力逐渐增大,浆液-岩体耦合作用

逐渐显现。裂隙开度增加导致浆液流动阻力减小,高注浆压力和流动阻力小两个因素共同导致浆液扩散距离增速变大。

3) 注浆压力较大时,相同注浆压力下考虑浆液-岩体耦合作用时的浆液扩散距离较恒定裂隙开度时大,尤其以裂隙开度较小时更为明显。裂隙开度较大时,初始裂隙开度已不是影响浆液扩散的决定性因素,注浆压力成为影响浆液扩散距离的主控因素。

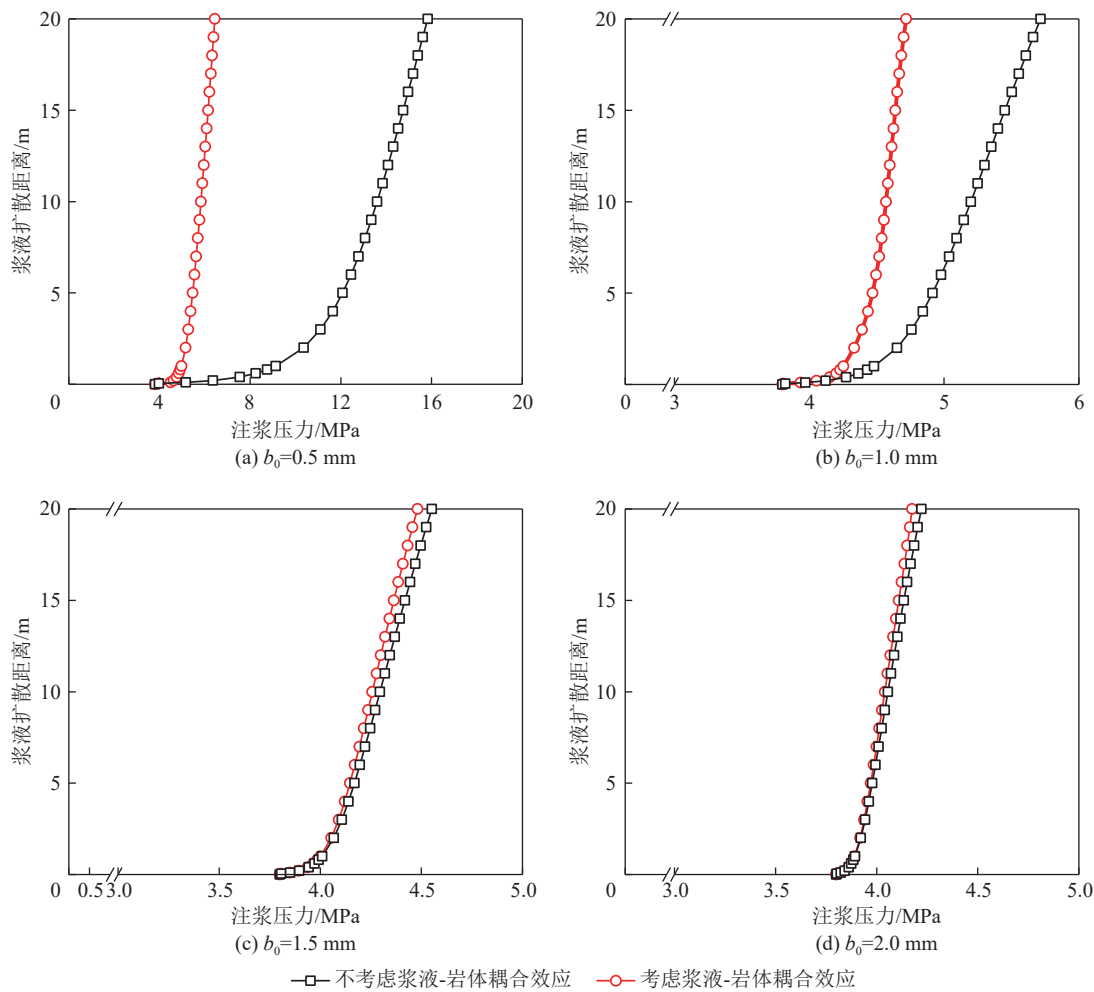


图 8 浆液扩散距离与注浆压力的关系曲线  
Fig.8 Relationship between slurry diffusion distance and grouting pressure

3 工程实例验证

3.1 工程概况

山东鲁西煤矿是典型的华北型煤田矿井,为保证矿井产量,亟待开采下组煤 16 煤。太原组十四灰含水层下距 16 煤 33 m,水压 3.8 MPa,突水系数大于《煤矿防治水细则》中的安全系数,不能安全带压开采(图 9)。抽水试验表明,十四灰含水层与其下方的奥灰强岩溶含水层(距 16 煤底板 46.5 m,水压

4.2 MPa) 存在强水力联系,通过疏放水方法已不能实现十四灰含水层水压的有效降低,对其注浆改造使成为隔水层或弱含水层可实现 16 煤安全带压开采。

网络并行电法 (NPEM) 对煤层底板探查结果表明,工作面底板 0 ~ 45 m 和 45 ~ 90 m 范围内存在多个富水区域(图 10),31 个十四灰钻孔涌水量表明含水层岩溶裂隙发育且富水性具有不均一的特点(图 11)。



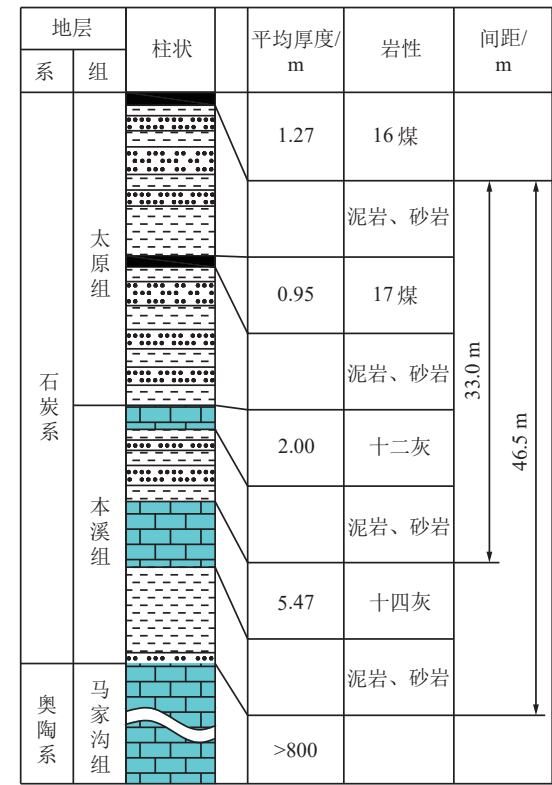


图 9 16104 工作面底板钻孔柱状  
Fig.9 Composite column of floor of 16104 working face

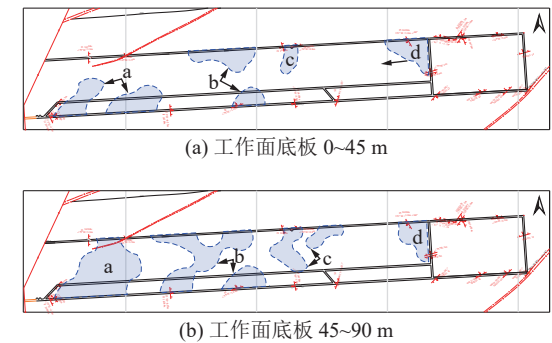


图 10 网络并行电法探测到的工作面底板富水区域  
Fig.10 Water-rich areas of working face floor detected by NPEM

3.2 注浆改造方案

对十四灰含水层注浆改造遵循先疏后密的全面改造钻孔布置原则。每个钻场钻孔设计为 2 个序列施工,第 1 序列主要检查含水层的岩溶发育情况和富水性,初步注浆和调整注浆参数。根据第 1 序列注浆情况,在相应钻场施工第 2 序列钻孔,检查注浆效果和补充注浆。

根据注浆现场工况,采用以下参数设计注浆压力值:静水压力  $p_0=3.8\text{ MPa}$ ,注浆孔半径  $r_c=4.45\times10^{-2}\text{ m}$ ,注浆流量  $q=50\text{ L/min}$ ,注浆材料选用普通硅酸盐水

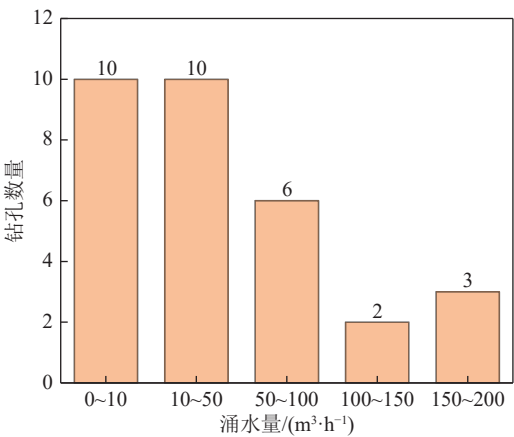


图 11 不同涌水量的钻孔数量  
Fig.11 Number of boreholes with different water inflow

含水层中对涌水量有较大影响的裂隙得到充分封堵,裂缝宽度  $b_0=0.5\text{ mm}$ 。为保证封堵效果,浆液选择为水灰比为 1.0 的宾汉流体。

理论上,随着注浆压力增大,浆液扩散距离逐渐增加。然而实际工程中,由于裂隙开度不均一性、地应力场复杂等因素,浆液一般不能达到理论计算方法所得到的浆液扩散距离,因此应合理确定注浆压力。根据焦作、峰峰、永城等矿区工程经验,钻孔间距设计为 40 m 较为合理,即浆液扩散距离设计  $r_t=20\text{ m}$ 。根据式 (37) 计算可知,  $r_t=20\text{ m}$  时需要的注浆压力为 6.44 MPa。考虑到浆液流动过程中的能耗,理论计算值与实际工况误差范围取 25%<sup>[23]</sup>,因此注浆压力设定为 8.0 MPa。

研究表明,煤系含水层中通常孕育成组岩石裂隙,工程实践中,注浆孔将穿过许多裂隙。裂隙组中注浆时,窄裂隙开度增加,而宽裂隙开度减小,开度减小后的宽裂隙入口可能小于浆液可注临界开度。注浆工程完成后,入口被封堵的宽裂隙在承压水作用下重新张开,形成水流通道。因此,仅通过增加注浆压力不能提高对宽裂缝的封堵效果。对于十四灰含水层,按照浆液扩散距离进行多次注浆(至少两次扫孔注浆),确保裂隙被充分封堵。

3.3 注浆效果检验

对十四灰含水层完成注浆钻孔 104 个,注浆量 1 310 t。注浆改造后对工作面底板再次进行网络并行电法探测。相较于第 1 次网络并行电法探测结果,第 2 次探测到的富水异常区域较第 1 次明显减小或消失(图 12)。每个钻场施工的验证钻孔涌水量小于 5 m³/h,表明对底板含水层富水区域的治理效果显著。

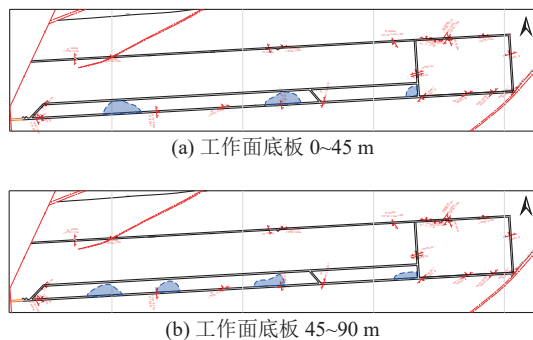


图12 注浆后网络并行电法探测到的工作面底板富水区域  
Fig.12 Water-rich areas working face floor detected by NPEM after grouting

## 4 结 论

1) 基于宾汉流体浆液扩散运动方程和裂隙开度控制微分方程,建立了考虑浆液流动与岩体变形耦合作用的裂隙注浆扩散理论模型,得到了浆液压力和裂隙开度的空间分布方程,获得了考虑浆液-岩体耦合作用的浆液扩散距离与注浆压力计算公式。

2) 浆液压力和裂隙开度在浆液扩散方向上衰减趋势一致,均具有明显的非线性特征,且在裂隙入口区域衰减较快。

3) 浆液-岩体耦合作用程度随裂隙开度增加而减小。随着裂隙开度增加,注浆压力逐渐成为影响浆液扩散距离的主控因素。与恒定裂隙开度注浆模型对比分析表明,裂隙开度较小时不考虑浆液-岩体耦合作用将导致注浆压力设计值偏大。

4) 结合典型矿井下组煤底板灰岩含水层注浆改造工程实例,根据浆液-岩体耦合作用机理,优化设计了注浆参数,提出了顺原注浆孔再扫孔注浆的方法,有效实现了预期改造治理目的。

### 参考文献(References):

- [1] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
- [2] 虎维岳, 赵春虎, 吕汉江. 煤层底板水害区域注浆治理影响因素分析与高效布孔方式 [J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 134-143.  
HU Weiyue, ZHAO Chunhu, LYU Hanjiang. Main influencing factors for regional pre-grouting technology of water hazard treatment in coal seam floor and efficient hole arrangement [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 134-143.
- [3] 曾一凡, 武强, 赵苏启, 等. 我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 1-14.  
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.
- [4] 施龙青, 邱梅, 牛超, 等. 肥城煤田奥灰顶部注浆加固可行性分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 356-362.  
SHI Longqing, QIU Mei, NIU Chao, et al. Feasibility analysis of grouting reinforcement of Ordovician top in Feicheng coalfield [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(3): 356-362.
- [5] 张二蒙, 沈星宇, 苗葳, 等. 奥灰顶部含水层注浆改造浆液扩散主要影响因素试验研究 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3536-3549.  
ZHANG Ermeng, SHEN Xingyu, MIAO Wei, et al. Experimental study on the influence of grouting diffusion in fissure aquifer at the top Ordovician limestone [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3536-3549.
- [6] 郭艳, 桂和荣, 魏久传, 等. 区域注浆扰动下渗流场-化学场演化及耦合作用 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 152-166.  
GUO Yan, GUI Herong, WEI Jiuchuan, et al. Evolution and coupling of "seepage field and chemical field" under regional grouting disturbance [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 152-166.
- [7] 胡少银, 刘泉声, 李世辉. 裂隙岩体注浆理论研究进展及展望 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 105-111.  
HU Shaoyin, LIU Quansheng, LI Shihui. Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 105-111.
- [8] 隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控Ⅲ: 防水闸墙围岩 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 36-43.  
SUI Wanghua. Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass Ⅲ [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 36-43.
- [9] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 水泥-水玻璃浆液裂隙注浆扩散的室内试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2159-2168.  
ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, LIU Rentai, et al. Laboratory experimental study of cement-silicate slurry diffusion law of crack grouting with dynamic water [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(8): 2159-2168.
- [10] 董书宁, 柳昭星, 王皓, 等. 导水断层破碎带注浆浆液扩散机制试验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 174-183.  
DONG Shuning, LIU Zhaoxing, WANG Hao, et al. Experimental study on serum diffusion mechanism during grouting in water conducting fault fracture zone [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 174-183.
- [11] 柳昭星, 董书宁, 王皓. 倾斜裂隙水平孔注浆浆液扩散规律 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(S1): 135-151.  
LIU Zhaoxing, DONG Shuning, WANG Hao. Law of grout diffusion of horizontal hole grouting in inclined crack [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(S1): 135-151.
- [12] 张庆松, 张连震, 张霄, 等. 基于浆液黏度时空变化的水平裂隙岩体注浆扩散机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1198-1210.  
ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, ZHANG Xiao, et al. Grouting diffusion in a horizontal crack considering temporal and spatial variation of viscosity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1198-1210.
- [13] 尚宏波, 王皓. 裂隙岩体水平孔注浆浆液扩散规律研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 233-243.

- SHANG Hongbo, WANG Hao. Study on diffusion law of grouting slurry in horizontal hole in fractured rock mass[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 233–243.
- [14] ZHAI M L, MA D, BAI H B. Diffusion mechanism of slurry during grouting in a fractured aquifer: a case study in Chensilou Coal Mine, China[J]. *Mathematics*, 2022, 10(8): 1345.
- [15] 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 Shucai, ZHENG Zhuo, LIU Rentai, *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.
- [16] RAFI J Y, STILLE H. Basic mechanism of elastic jacking and impact of fracture aperture change on grout spread, transmissivity and penetrability[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49: 174–187.
- [17] 郑卓, 李术才, 刘人太, 等. 裂隙岩体注浆中的浆液-岩体耦合效应分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S2): 4054–4062.
- ZHENG Zhuo, LI Shucai, LIU Rentai, *et al.* Analysis of coupling effect between grout and rock mass during jointed rock grouting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S2): 4054–4062.
- [18] 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.
- [19] 徐斌, 董书宁, 尹尚先, 等. 倾斜裂隙中宾汉姆流体非稳定浆液运移机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(11): 4083–4093.
- XU Bin, DONG Shuning, YIN Shangxian, *et al.* Mechanism of inclined fracture slurry transport based on non-stable Bingham fluid[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(11): 4083–4093.
- [20] 张庆松, 张连震, 刘人太, 等. 基于“浆-土”界面应力耦合效应的劈裂注浆理论研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(2): 323–330.
- ZHANG Qingsong, ZHANG Lianzhen, LIU Rentai, *et al.* Split grouting theory based on slurry-soil coupling effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 323–330.
- [21] 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.
- [22] ZHAI M L, BAI H B, WU L Y, *et al.* A reinforcement method of floor grouting in high-water pressure working face of coal mines: a case study in Luxi coal mine, North China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(28): 1–17.
- [23] 张连震, 张庆松, 刘人太, 等. 基于浆液-岩体耦合效应的微裂隙岩体注浆理论研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(11): 2003–2011.
- ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, *et al.* Grouting mechanism in fractured rock considering slurry-rock stress coupling effects[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(11): 2003–2011.