



## 基于浆液扩散辐射角的倾斜裂隙注浆扩散规律研究

严良欢 常聚才 乔龙全 齐潮 王宏达 赵君儒

### 引用本文：

严良欢, 常聚才, 乔龙全, 等. 基于浆液扩散辐射角的倾斜裂隙注浆扩散规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 418–431.  
YAN Lianghuan, CHANG Jucai, QIAO Longquan. Study on diffusion law of inclined fracture grouting based on slurry diffusion radiation angle[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 418–431.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-1548>

### 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>

##### 基于浆液岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制研究

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

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 158–167 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1239>

##### 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>

##### 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>

##### 再生顶板裂隙注泡沫流体扩散模型及参数敏感性分析

Foam fluid diffusion model for recycled roof cracks and its parameter sensitivity analysis

煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2a29c95b-a054-46da-8ef6-efdff01e67b1>

##### 煤炭地下气化污染物富集和迁移规律——以王村矿煤矿为例

The law of pollutant enrichment and migration in underground coal gasification in Wangcun mine

煤炭科学技术. 2022, 50(9): 240–248 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a5322f2c-30ab-437e-ac5f-4a7b97357adf>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

严良欢, 常聚才, 乔龙全, 等. 基于浆液扩散辐射角的倾斜裂隙注浆扩散规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 418-431.

YAN Lianghuan, CHANG Jucai, QIAO Longquan, et al. Study on diffusion law of inclined fracture grouting based on slurry diffusion radiation angle[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 418-431.

## 基于浆液扩散辐射角的倾斜裂隙注浆扩散规律研究

严良欢<sup>1,2,3</sup>, 常聚才<sup>1,2,3</sup>, 乔龙全<sup>1,2,3</sup>, 齐潮<sup>1,2,3</sup>, 王宏达<sup>1,2,3</sup>, 赵君儒<sup>1,2,3</sup>

(1. 安徽理工大学 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 矿业工程学院, 安徽 淮南 232001;

3. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**注浆加固作为封堵裂隙和修复岩体的主要手段,明晰巷道帮部围岩水平注浆孔倾斜裂隙注浆扩散规律对注浆参数设计与实践至关重要。以宾汉姆浆液和任意倾斜有限边界光滑平板裂隙为研究对象,基于黏度时变性宾汉姆流体流动方程,构建考虑浆液扩散辐射角的倾斜裂隙注浆扩散理论模型;通过有限元法求解液-气两相界面控制方程和Navier-Stokes方程,采用体积分数法定量表征浆液扩散的迹线形态和扩散距离,对比验证理论计算结果;最后探索不同注浆压差、裂隙开度和裂隙倾角影响下倾斜裂隙注浆扩散迹线形态和扩散距离的变化规律。结果表明:理论模型与数值模拟得到的倾斜裂隙注浆扩散规律基本一致,注浆孔上方和下方裂隙区域扩散距离最大误差分别为5.6%和6.1%,验证了理论模型的可行性;当浆液扩散辐射角为0°和180°时,扩散距离分别达到最大和最小值,裂隙开度越大差异性越显著;当裂隙倾角为0°时,裂隙区域内浆液沿注浆孔呈中心对称圆形形态,随裂隙倾角增大,浆液扩散形态演化为沿注浆孔轴对称的类椭圆形态;上方裂隙区域中部迹线伴随有凹陷特征且上方裂隙迹线范围和最大扩散距离均小于下方裂隙,随注浆时间增加,微凹陷特征逐渐弱化,类椭圆形态持续扩展,上方裂隙区域浆液扩散迹线范围增加幅度和最大扩散距离增幅均小于下方裂隙。

**关键词:**扩散辐射角;倾斜裂隙;宾汉姆体浆液;迹线形态;扩散距离

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)06-0418-14

## Study on diffusion law of inclined fracture grouting based on slurry diffusion radiation angle

YAN Lianghuan<sup>1,2,3</sup>, CHANG Jucai<sup>1,2,3</sup>, QIAO Longquan<sup>1,2,3</sup>, QI Chao<sup>1,2,3</sup>, WANG Hongda<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Junru<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal and Environment Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Grouting reinforcement is the main means to seal cracks and repair rock mass. It is very important for the design and practice of grouting parameters to clarify the grouting diffusion law of inclined cracks in horizontal grouting holes of surrounding rock of roadway side. This study focuses on Bingham fluid flow within arbitrarily inclined, finite-boundary smooth parallel-plate fractures. A theoretical model for grouting diffusion in inclined fractures was established, incorporating the time-dependent viscosity of Bingham fluid and the grout diffusion radiation angle. The liquid-gas two-phase interface control equations and Navier-Stokes equations were solved using the finite element method, with the volume fraction method employed to quantitatively characterize grout diffusion patterns and distances, validating theoretical results through comparative analysis. Furthermore, the influence of grouting pressure differentials, fracture apertures, and fracture inclination angles on diffusion morphology and distance was systematically investigated. The results show that the theoretical

收稿日期: 2024-10-29 策划编辑: 朱恩光 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.12438/cst.2024-1548

基金项目: 安徽理工大学研究生创新基金资助项目(2024cx1018); 国家自然科学基金资助项目(52174105); 安徽省优秀科研创新团队资助项目(2023AH010023)

作者简介: 严良欢(1996—), 男, 江西上饶人, 博士研究生。E-mail: 2110584861@qq.com

常聚才(1979—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士。E-mail: cjeminecoal@163.com

model is basically consistent with the grouting diffusion law of inclined fracture obtained by numerical simulation. The maximum error of diffusion distance in the fracture area above and below the grouting hole is 5.6 % and 6.1 % respectively, which verifies the feasibility of the theoretical model. When the slurry diffusion radiation angle is 0° and 180°, the diffusion distance reaches the maximum and minimum respectively, and the larger the fracture opening is, the more significant the difference is. When the dip angle of the fracture is 0°, the slurry in the fracture area shows a central symmetrical circular shape along the grouting hole. With the increase of the dip angle of the fracture, the diffusion form of the slurry evolves into an elliptical shape symmetrically along the grouting hole. The trace line in the middle of the fracture area above is accompanied by depression characteristics, and the range and maximum diffusion distance of the fracture trace line above are smaller than those of the fracture below. With the increase of grouting time, the micro-depression characteristics gradually weaken, and the ellipse-like shape continues to expand. The increase of the range and the maximum diffusion distance of the slurry diffusion trace line in the fracture area above are smaller than those of the fracture below.

**Key words:** diffusion radiation angle; inclined cracks; Bingham body slurry; trace shape; diffusion distance

## 0 引言

随着煤炭资源开采逐渐向深部转移<sup>[1-2]</sup>,深部岩体受巷道开挖卸荷作用下帮部围岩易破裂产生裂隙<sup>[3]</sup>,而高强度回采加剧了内部节理、裂隙等结构的扩展和贯通<sup>[4]</sup>,导致岩体破裂失稳严重影响巷道围岩稳定性<sup>[5]</sup>。注浆技术作为修复巷道围岩裂隙及提升围岩强度的核心技术之一,其作用不可替代<sup>[6-7]</sup>。然而,在实施深部巷道帮部围岩注浆工程过程中面临诸多挑战,围岩孔隙、裂隙及节理的分布具有高度不确定性,另外,注浆过程本身复杂且具有隐蔽性和随机性,致使过度依赖经验判断<sup>[8]</sup>,缺乏对巷道围岩裂隙中浆液扩散规律的明确认识,造成材料浪费且注浆效果欠佳<sup>[9]</sup>。因此,开展巷道帮部围岩水平注浆孔倾斜裂隙注浆扩散规律研究,对指导巷道帮部围岩注浆设计与实践具有重要意义。

国内外学者在裂隙注浆扩散方面进行了大量研究,揭示了浆液在裂隙内的扩散规律,阮文君<sup>[10]</sup>通过大量物理试验,验证了水泥基浆液具有黏度时变性的特点,并构建了考虑黏度时变性宾汉姆浆液光滑平板裂隙注浆扩散模型;李术才等<sup>[11]</sup>和张庆松等<sup>[12]</sup>基于黏度时变性浆液,建立了水平裂隙注浆扩散模型,并推导出注浆压力与扩散距离的方程。刘人太等<sup>[13]</sup>和张连震等<sup>[14]</sup>利用 COMSOL 建立了三维水平裂隙注浆扩散数值模型,研究了黏度时变性、浆液流速等因素对注浆扩散的影响。以上研究聚焦于浆液在垂直注浆孔水平裂隙中扩散规律的探讨,但是,深部巷道帮部围岩裂隙分布呈现复杂多样的特点<sup>[15]</sup>,对倾斜裂隙注浆扩散规律研究仍需丰富和完善。在倾斜裂隙注浆中,浆液的扩散受到重力与黏滞阻力的共同影响。注浆孔上方裂隙的浆液必须克服自重分量和黏滞阻力,而位于注浆孔下方裂隙的浆液则仅需克服黏滞阻力,自重分量在此过程中起到推动

浆液扩散的正功作用,这种差异导致了上方和下方裂隙在扩散过程中的作用机制存在显著不同,从而使得浆液的扩散迹线形态并非传统的圆形。因此,研究倾斜裂隙的注浆扩散规律显得尤为重要。在倾斜裂隙注浆扩散规律方面,柳昭星等<sup>[16]</sup>构建了倾斜裂隙水平注浆孔上方和下方裂隙区域牛顿流体和黏时变性流体浆液扩散距离的力学模型,通过模型试验和数值模拟验证,得到了牛顿流体和黏时变性流体浆液在水平注浆孔倾斜裂隙中的扩散规律;HU 等<sup>[17]</sup>建立了倾斜管状裂隙注浆扩散模型,发现不同类型的浆液对浆液扩散距离影响程度不同;戚绪尧等<sup>[18]</sup>以倾斜平板裂隙和宾汉姆流体为研究对象,构建了浆液高位流动数学模型,获得了恒定速率条件下的解析解;徐斌等<sup>[19]</sup>基于 Navier-Stokes 和改进的模型试验,系统分析了浆液扩散距离的影响因素;张佳兴<sup>[20]</sup>通过倾斜裂隙注浆模型试验,从浆液扩散迹线和扩散速度方面揭示了浆液扩散规律。虽然上述学者对倾斜裂隙注浆扩散规律提供了有益参考,但鲜有学者针对宾汉姆流体在倾斜裂隙注浆扩散过程中建立相应的理论模型描述浆液扩散迹线形态的变化,并深入分析浆液在倾斜裂隙中的扩散规律。

鉴于此,笔者以宾汉姆浆液和任意倾斜有限边界光滑平板裂隙为研究对象,基于黏度时变性宾汉姆流体流动方程,结合浆液扩散辐射角与注浆孔上方和下方裂隙区域受力特点,构建考虑浆液扩散辐射角的倾斜裂隙注浆扩散理论模型,获得浆液扩散迹线时空分布方程,通过有限元法求解液-气两相界面控制方程和 Navier-Stokes 方程,采用体积分数法定量表征浆液扩散的迹线形态和扩散距离,并对理论计算结果进行对比验证理论计算结果;最后分析探索不同注浆压差、裂隙开度和裂隙倾角影响下倾斜裂隙注浆扩散迹线形态和扩散距离的变化规律,以期为巷道帮部围岩注浆参数设计与实践提供借鉴。

## 1 宾汉姆流体倾斜注浆扩散理论模型

### 1.1 模型基本假设

针对宾汉姆流体倾斜裂隙扩散理论模型,宾汉姆浆液在裂隙中流动时需遵循以下基本假设<sup>[21-22]</sup>:①浆液为均质流体且具有不可压缩特性。②浆液视为时变黏度宾汉姆流体,在裂隙内运动过程中以层流方式流动浆液流型和水灰比保持恒定。③裂隙的上下2个壁面满足无滑移边界,忽略浆液向裂隙上下2个壁面渗透的损失。④浆液完全驱替裂隙中的流体,忽略两相界处对浆液的稀释效应。⑤裂隙通道内部各位置处浆液的黏度随时间变化一致。

### 1.2 黏度时变性宾汉姆流体流动方程

水泥浆液颗粒相对较细,能够进入微小的裂隙,具有较好的可注性,是巷道围岩注浆加固过程使用最广泛的注浆材料,根据水泥浆液水灰质量比( $w/c$ )的不同将浆液划分为3种流体,当 $w/c=0.5\sim0.7$ 时为幂律流体,当 $w/c=0.8\sim1.0$ 和 $w/c=2.0\sim10.0$ 时分别为宾汉姆流体和牛顿流体<sup>[23]</sup>。其中, $w/c$ 不大于1的浆液可视为黏度时变性流体, $w/c$ 大于1的浆液视为无黏度时变性流体<sup>[24]</sup>。

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

式中: $t$ 为注浆时间,s; $\mu_0$ 为初始塑性黏度,Pa·s; $k$ 为黏度时变系数。

注浆工程中使用最广泛的水泥浆液水灰比为 $0.8\sim1.0$ ,属于宾汉姆流体,其本构方程表示为

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

式中: $\tau_0$ 为屈服剪切应力,Pa; $\tau$ 为剪切应力,Pa; $y$ 为与浆液流向垂直的距离,m; $v$ 为浆液流速,m/s。

联立式(1)和式(2)得到考虑黏度时变特性广义宾汉姆流体本构方程:

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

### 1.3 宾汉姆流体倾斜裂隙注浆扩散力学模型

深部巷道开挖后围岩应力向巷道深部转移,在采动应力影响下促进了浅部及深部围岩中孔隙及裂隙的再发育<sup>[25]</sup>,导致原生孔隙结构和次生裂隙相互贯通,形成了复杂的浆液通道。通过注浆孔将水泥浆液注入裂隙通道,可以有效封堵裂隙增加围岩的承载能力和抵抗变形能力。针对巷道帮部围岩水平孔注浆时,注浆孔与裂隙之间的相对位置往往呈现斜交、垂直或平行状态。其中,注浆孔与裂隙通道的夹角在水平和垂直状态下分别为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ ,此时,水

平注浆孔与裂隙的夹角则与裂隙的倾角相等,水平孔倾斜裂隙注浆扩散示意如图1所示。

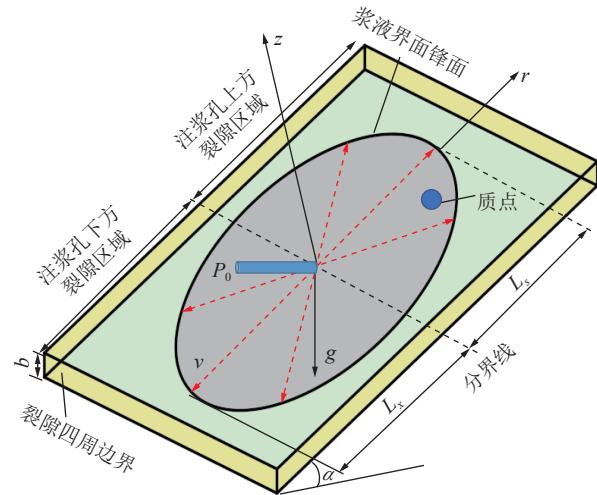


图1 水平孔倾斜裂隙注浆扩散示意

Fig.1 Horizontal hole inclined fracture grouting diffusion diagram

浆液在注浆压力 $P_0$ 作用下从注浆管注入到裂隙通道内部,其运动过程中受到裂隙壁表面摩擦阻力和浆液重力作用。随机取浆液扩散区域内1个浆液微单元体进行受力分析,考虑水平注浆管与倾斜裂隙之间的夹角 $\alpha$ ,当浆液进入裂隙通道后,对浆液扩散区域内部浆液单位质量力进行受力分解,在倾斜裂隙方向产生重力分量 $g \sin \alpha$ (图2a)。该分量沿浆液扩散方向进一步分解为 $g \sin \alpha \cos \theta$ (图2b),对于注浆孔上方裂隙区域该分量表现为阻力作用,而下方裂隙区域则表现为动力作用。

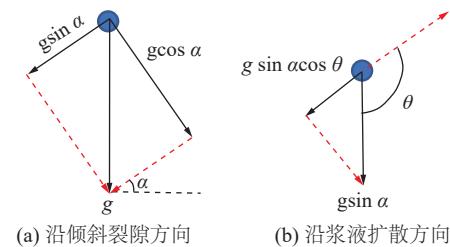


图2 浆液扩散区域内部浆液单位质量力受力分解

Fig.2 Decomposition of unit mass force of slurry in slurry diffusion area

浆液扩散辐射角 $\theta$ 表示沿着 $\alpha$ 方向垂直重力分量与浆液微团流向之间的夹角,当 $\theta \in (0, 90^\circ) \cup (270^\circ, 360^\circ)$ 时,浆液扩散区域位于注浆孔下方裂隙;当 $\theta \in (90^\circ, 270^\circ)$ 时,浆液扩散区域则位于注浆孔上方裂隙。对裂隙流场中任意的流体微元六面体进行受力分析如图3所示。

根据牛顿第二定律,裂隙中的浆液满足阻力与

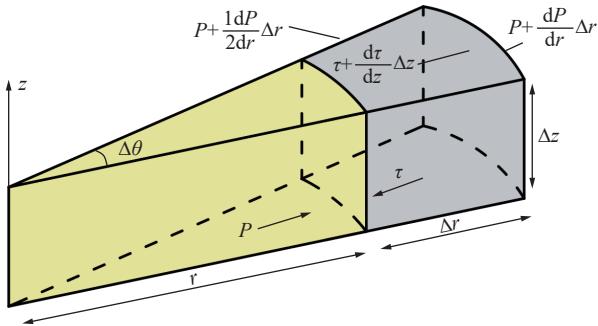


图 3 微元六面体受力分析示意

Fig.3 Micro hexahedron force analysis sketch

压差动力相等时扩散距离达到最大值,对于无压缩特性的黏性流体 Navier-Stokes 方程成立,得出柱坐标系中沿  $r$  轴方向的分量方程<sup>[19]</sup>:

$$\frac{dv_r}{dt} = \mu_s \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right\} + \frac{f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}}{ } \quad (4)$$

式中:  $v_r$  为沿  $r$  轴的流速分量,  $\text{m/s}$ ;  $\alpha$  为水平注浆孔与裂隙的倾角,  $(^\circ)$ ;  $\rho$  为浆液密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $P$  为浆液平均法向应力,  $\text{kPa}$ ;  $\mu_s$  为运动黏滞系数, 其大小表示为  $\mu_s = \mu/\rho$ 。

宾汉姆浆液为不可压缩黏性流体,在流动过程中密度不发生改变,满足质量守恒定律,其连续性方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_\theta)}{\partial r} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

式中:  $v$  为浆液的流速,  $\text{m/s}$ ;  $v_r$ 、 $v_z$  分别为沿  $r$  轴和  $z$  轴方向的速度分量;  $v_\theta$  为沿圆周切线方向的流速分量。

由于浆液在开度相对较小的裂隙中流动,在柱坐标系中可忽略竖向速度和切向速度满足:

$$\begin{cases} v_\theta \approx 0, v_z = 0, v_r = vb_h \\ f_r = g \sin \alpha \cos \theta \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)—式(6)和代入式(4)进行化简,并略去微量单元为

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho g \sin \alpha \cos \theta + \mu_0 e^{kt} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (7)$$

在柱坐标系中,可将式(3)表示为

$$\tau = \tau_{zr} = \tau_0 + \mu_0 e^{kt} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (8)$$

式中:  $\tau_{zr}$  为平行于  $z$  轴和  $r$  轴方向剪切应力,  $\text{Pa}$ 。

在  $z$  轴方向上,对式(7)求偏导数,可得

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{d\tau}{dz} = \mu_0 e^{kt} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (9)$$

将式(8)代入式(6),化简动量方程的黏性动量项,并忽略微量单元<sup>[26]</sup>得

$$\frac{d\tau}{dz} = \frac{dP}{dr} - \rho g \sin \alpha \cos \theta \quad (10)$$

令  $P^* = P - \rho g r \sin \alpha \cos \theta$ , 将式(10)对  $z$  进行积分,代入临界条件,  $z=0, \tau=0$ , 可得

$$\tau = \frac{dP^*}{dr} z \quad (11)$$

宾汉姆浆液在裂隙中扩散时存在中心流核区<sup>[27]</sup>,且流核区高度随压力梯度变化。通过注浆孔选取垂直于裂隙的平面对浆液微元体进行受力分析,如图 4 所示。

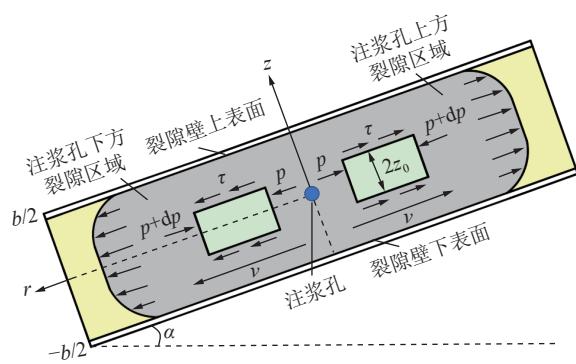


图 4 浆液在倾斜裂隙扩散受力示意

Fig.4 Slurry diffusion stress in inclined fracture

设等效水力裂隙宽度为  $b$ <sup>[28]</sup>, 以注浆孔为坐标原点, 并将裂隙中心视为对称轴, 建立直角坐标系,  $r$  轴为裂隙倾斜方向,  $z$  轴指向裂隙高度方向。考虑宾汉姆浆液流核区时, 假设其高度为  $2z_0$ , 且在该区域内无相对滑移, 则满足流核区边界条件:  $z=z_b, du/dz=0$ , 将其代入式(11)可得

$$\tau_0 = \frac{dP^*}{dr} z_0 \quad (12)$$

将式(11)—式(12)代入式(7)化简得

$$\frac{dv}{dz} = \frac{1}{\mu_0 e^{kt}} \frac{dP^*}{dr} (z - z_0) \quad (13)$$

将式(13)从  $|z|=z_0$  到  $|z|=b/2$  进行积分, 代入浆液壁面无滑移条件  $|z|=b/2, v=0$ , 可以分别得出水平孔下方裂隙截面上、中、下 3 部分内任意一点的流速表达式  $v$ :

$$\begin{cases} \frac{-1}{2\mu_0 e^{kt}} \frac{dp^*}{dr} \left[ \frac{b^2}{4} - z^2 - 2z_0 \left( \frac{b}{2} - z \right) \right], z_0 \leq z \leq \frac{b}{2} \\ \frac{-1}{2\mu_0 e^{kt}} \frac{dp^*}{dr} \left( \frac{b}{2} - z_0 \right)^2, -z_0 \leq z \leq z_0 \\ \frac{-1}{2\mu_0 e^{kt}} \frac{dp^*}{dr} \left[ \frac{b^2}{4} - z^2 - 2z_0 \left( \frac{b}{2} + z \right) \right], -\frac{b}{2} \leq z \leq -z_0 \end{cases} \quad (14)$$

由此可得, 注浆孔下方裂隙截面处留核区内和

流核区外的浆液平均流速:

$$\bar{v} = \frac{b^2}{12\mu_0 e^{kt}} \frac{d(P - \rho g r \sin \alpha \cos \theta)}{dr} \left[ -1 + 3 \frac{z_0}{b} - 4 \left( \frac{z_0}{b} \right)^3 \right] \quad (15)$$

#### 1.4 宾汉姆流体扩散迹线时空分布方程

根据质量守恒定律,在注浆时间  $t$  内,注浆孔下方裂隙注浆量  $Q_r$  为

$$Q_r = \pi r b \bar{v} t \quad (16)$$

联立式(15)和式(16)并积分得到注浆孔下方裂隙注浆压力控制方程的解为

$$P_r = \frac{12Q_r \mu_0 e^{kt}}{\pi b^3 t \left[ -1 + 3 \frac{z_0}{b} - 4 \left( \frac{z_0}{b} \right)^3 \right]} \ln \left| \frac{r}{r_0} \right| + \rho g r \sin \alpha \cos \theta + C \quad (17)$$

假设倾斜裂隙与水平注浆孔相交处孔口注浆压力为  $P_0$ ,  $t$  时刻注浆孔下方裂隙浆液最终扩散距离为  $r$ , 浆液扩散锋面前端压力为  $P_r$ , 满足边界条件  $P = P_0 (r=r_0)$ ,  $P = P_r (r=r_t)$ 。

令  $A = -1 + 3 \frac{z_0}{b} - 4 \left( \frac{z_0}{b} \right)^3$ , 可得下方裂隙注浆压力控制方程

$$P_r = P_0 + \frac{12Q_r \mu_0 e^{kt}}{A \pi b^3 t} \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) + \rho g (r - r_0) \sin \alpha \cos \theta \quad (18)$$

当浆液扩散方向沿  $r$  轴正方向即满足  $r > 0$  时, 则注浆孔下方裂隙中浆液流量  $q_r$  为

$$q_r = \frac{A \pi b^3}{12 \mu_0 e^{kt}} (P_r - P_0 - L_r \rho g \sin \alpha \cos \theta) \quad (19)$$

在单位时间内, 通过注浆孔流入到裂隙的注浆量应与扩大扩散半径所需注浆量相等<sup>[29]</sup>。将浆液流量  $q_r$  对注浆时间  $t$  积分则满足:

$$\int_0^t q_r dt = \int_{r_0}^{L_r} \pi b L_r dL \quad (20)$$

联立式(19)和式(20), 可得出下方裂隙中浆液扩散距离时空分布方程:

$$t = \frac{6u_0 e^{kt} (L_r^2 - r_0^2)}{Ab^2 (P_r - P_0 - L_r \rho g \sin \alpha \cos \theta)}, \quad (21)$$

$$\theta \in (0, 90^\circ) \cup (270^\circ, 360^\circ)$$

可将式(21)进一步化简得出, 在注浆压力为  $P_0$  下宾汉姆浆液注浆管下方裂隙扩散距离  $L_r$  的表达式为

$$L_r = \frac{-6u_0 e^{kt} (L_r^2 - r_0^2) + A(P_r - P_0)b^2 t}{Ab^2 t \rho g \sin \alpha \cos \theta}, \quad (22)$$

$$\theta \in (0, 90^\circ) \cup (270^\circ, 360^\circ)$$

式(22)表明, 浆液在倾斜裂隙中的扩散距离由浆液扩散辐射角、注浆压差、浆液密度、浆液黏度、

注浆孔与裂隙倾角、裂隙开度等因素共同影响。对于上方和下方裂隙区域扩散距离  $L_r$  的表达式相同, 但两者之间区别在于浆液扩散辐射角取值范围, 便于区别描述采用  $L_s$  和  $L_x$  分别表示上方和下方裂隙区域浆液最大扩散距离, 其中, 上方裂隙区域为  $\theta \in (90^\circ, 270^\circ)$ , 而下方裂隙区域为  $\theta \in (0, 90^\circ) \cup (270^\circ, 360^\circ)$ 。

## 2 数值模拟验证

### 2.1 模型构建及参数设置

利用 COMSOL 两相流层流模块, 建立尺寸为  $4000 \text{ mm} \times 4000 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的倾斜裂隙注浆扩散数值模型。模型中的裂隙倾角设置为  $60^\circ$ , 注浆孔半径为  $10 \text{ mm}$ , 位于模型的中心位置并且与裂隙方向垂直。为提高模型计算的精度, 模型采用自由三角形单元划分网格, 同时将注浆孔周围的网格进行了加密处理, 裂隙模型网格剖分及边界条件如图 5 所示, 首先将倾斜裂隙数值模型中充满空气, 浆液由注浆孔流入裂隙内部驱替裂隙中的空气, 将浆液和空气分别视作 2 种不同的流体, 浆液和空气在裂隙中流动为两相流。在注浆孔中心轴线上布置 2 条相互垂直的测线, 其中测线 1 和测线 2 分别表征浆液从注浆孔流出后沿裂隙倾斜方向和裂隙走向的流场分布。

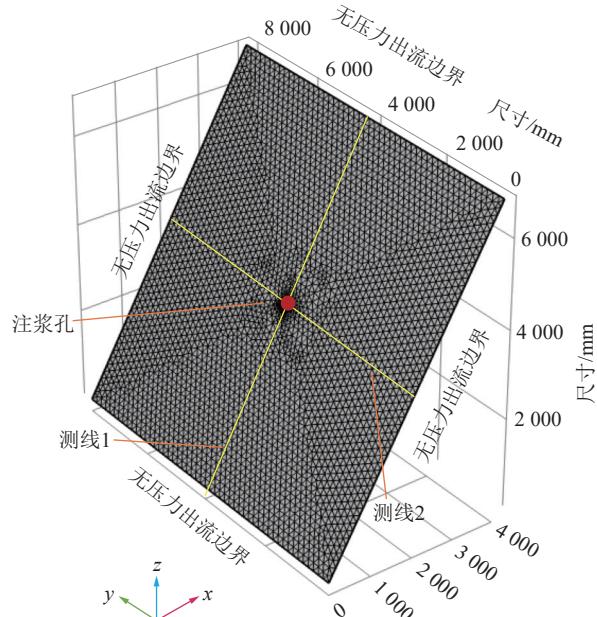


图 5 裂隙模型网格剖分及边界条件

Fig.5 Mesh generation and boundary conditions of fracture model

在数值参数设置时, 将三维裂隙模型中出口压力边界和注浆孔入口压力分别设置  $0 \text{ MPa}$  和  $1 \text{ MPa}$  保证注浆压差恒定为  $1 \text{ MPa}$ , 水泥浆液黏度时变方程

参考文献[23]的研究成果,水灰比为0.8的浆液黏度为 $0.1611e^{0.0001t}$ 。其中,注浆压差为1 MPa,裂隙倾角为60°,裂隙开度为1 mm,浆液密度为1 446 kg/m<sup>3</sup>,空气密度为 $\rho=1.29$  kg/m<sup>3</sup>,重力加速度为 $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>,动力黏度为 $\mu=17.9\times10^{-6}$  Pa·s。液-气界面厚度参数 $\zeta_{ls}$ 选择数值模型中最大网格边长的1/2,并在层流模块中选择重力标签,利用瞬态求解进行计算。

## 2.2 控制方程

浆液在裂隙通道中流动满足流体流动 Navier-Stokes 方程,三维条件下浆液流动方程为

$$\rho\omega(v\cdot\nabla)v+\rho\frac{\partial v}{\partial t}=\nabla\cdot[-pI+\mu(\nabla v+(\nabla v)^T)]+F+\rho g \quad (23)$$

式中:  $\nabla$ 为哈密顿算子;  $v$ 为流体流速矢量, m/s;  $I$ 为三阶单位矩阵,  $F$ 为流体所受体积力, N;  $p$ 为流体压力, Pa。

浆液在倾斜裂隙扩散过程中,若不考虑流体的压缩特性,空气和浆液的密度可视为常数。因此,在浆液驱替空气的过程中,所有裂隙区域均应遵循质量守恒方程:

$$\rho\nabla v=0 \quad (24)$$

浆液与空气交界面处会形成液-气混合区,为了便于模拟追踪浆液驱替气体过程的液-气界面,采用水平集法将求解得出的速度矢量进行对流传输以实现追踪,进而表征液-气界面的运动特征。两相流界面控制方程为

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}+\nu\nabla\varphi=\gamma\nabla\left[\zeta_{ls}\nabla\varphi-\varphi(1-\varphi)\frac{\nabla\varphi}{|\nabla\varphi|}\right] \quad (25)$$

其中,  $\varphi$ 为水平集变量,表示流体在裂隙空间内体积分数,其数值满足 $0\leq\varphi\leq1$ ;  $\zeta_{ls}$ 为控制液-气界面厚度的参数;  $\gamma$ 为初始化参数。在模型液-气界面位置处网格节点的动力黏度和流体密度分别满足式(26)—式(27):

$$\mu=\mu_A+(\mu_S-\mu_A)\varphi \quad (26)$$

$$\rho=\rho_A+(\rho_S-\rho_A)\varphi \quad (27)$$

式中:  $\mu_A$ 为空气的黏度, Pa·s;  $\mu_S$ 为浆液的黏度, Pa·s;  $\rho_A$ 为空气的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_S$ 为浆液的密度, kg/m<sup>3</sup>。在裂隙中液-气两相流时,  $\varphi=0$  代表空气流体,  $\varphi=1$  表示浆液流体。 $0<\varphi<1$  表示液-气两相界面具有一定厚度。

## 2.3 计算结果对比

在裂隙注浆过程中,可将空气和浆液视为2种流体,并采用体积分数法对数值模拟结果进行定量分析,以表征浆液的动态扩散形态<sup>[30]</sup>。在计算初始

化后,浆液从注浆孔进入裂隙内部,驱替裂隙模型中的空气,数值模拟结果浆液体积分数动态演化如图6所示,其中蓝色区域代表空气,而红色区域代表浆液,两者之间满足关系式

$$V_S+V_A=1 \quad (28)$$

式中:  $V_S$ 为浆液体积分数;  $V_A$ 为空气体积分数。

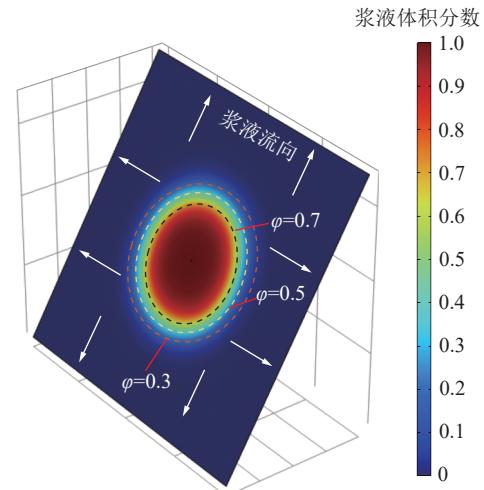


图6 浆液体积分数变化形态

Fig.6 Variation of slurry volume fraction

在裂隙区域 $\varphi=0.3$ 以外,浆液体积分数较小可忽略不计;而在裂隙区域 $\varphi=0.7$ 以内,显示出该区域充满了浆液,浆液体积分数接近于1。浆液体积分数随等值线 $\varphi$ 增加而逐渐增大,此时,浆液体积分数越大的裂隙区域表现为深红色,而浓度较低的裂隙区域表现为深蓝色。因此,在数值模拟结果的后处理中,可以将等值线 $\varphi=0.5$ 视作浆液与空气的分界面,进一步分析浆液在倾斜裂隙中液-气界面的演化规律,得到浆液扩散的迹线形态。在考虑浆液扩散辐射角条件下,基于宾汉姆浆液黏度时空分布方程,利用 Matlab 编程分析求解出浆液扩散距离 $L_r$ 和浆液扩散形态迹线形态随注浆时间的变化关系。理论计算和数值模拟分别记录1、150、300、450、600 s时浆液扩散迹线形态和扩散距离,分别如图7—图8所示。可以看出理论计算和数值计算得到的浆液扩散迹线形态和最大扩散距离的变化规律基本一致,即浆液从注浆孔流出后,呈现出沿着倾斜裂隙向四周辐射扩散的特征,浆液辐射扩散的迹线范围和最大扩散距离随着注浆时间的延长而逐渐增大,但增幅逐渐减小。注浆孔上方裂隙区域浆液扩散迹线范围和扩散距离小于下方裂隙,并随着注浆时间增加差异更加明显,整体上浆液迹线形态呈现微凹陷特征的椭圆形。将理论计算和数值模拟计算得到的浆液最大扩

散距离采用文献[31]提出的误差处理方式为

$$\delta = (|A_T - A_N| / |A_T + A_N|) \times 100\% \quad (29)$$

对于注浆孔上方裂隙浆液最大扩散距离两者计算的最大误差为5.6%，而下方裂隙两者计算的最大误差为6.1%，表明笔者建立的注浆扩散迹线理论模型能较好地描述宾汉姆浆液在倾斜裂隙中的扩散规律。另外，理论计算得到的注浆孔上方和下方裂隙区域浆液扩散迹线范围及最大扩散距离略大于数值模拟计算值。分析原因理论计算中假设浆液在流动过程中完全驱替了裂隙中的空气，未考虑液-气两界面处流体间的相互作用，界面处的黏度等于浆液黏度，而数值模拟计算中考虑了液-气两界面处的相互作用。

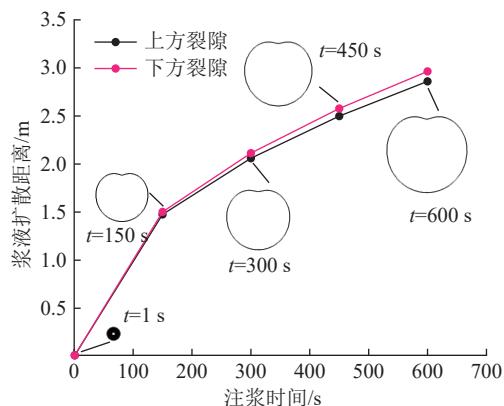


图7 理论计算结果

Fig.7 Theoretical calculation results

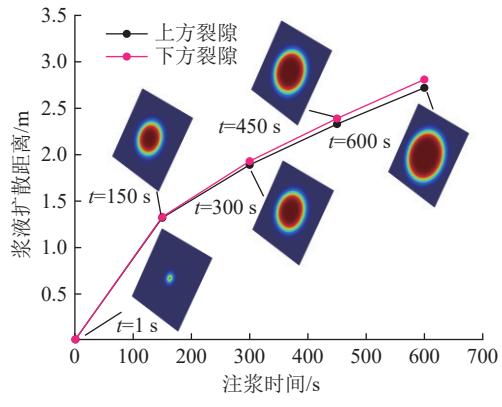


图8 数值模拟结果

Fig.8 Numerical simulation results

在注浆初期阶段，浆液扩散迹线范围和最大扩散距离随着注浆时间增加而显著增加，进入注浆中后期，浆液扩散迹线范围和最大扩散距离的增幅逐渐减小，2种方式计算结果基本一致。此现象原因在于浆液黏度的显著增加，导致浆液在倾斜裂隙扩散过程中的黏滞阻力更大，抑制了浆液扩散迹线范围

和最大扩散距离的扩展。值得注意的是，理论计算得出的注浆孔上方裂隙区域中部迹线形态呈较为明显的微凹陷现象，而数值计算结果并未体现。究其原因为，一是理论计算使用流体动力学方程描述流动时，利用流体的连续性能较好地反映浆液局部流动特征，而数值模拟在离散化过程中导致浆液细微的流动特征被平滑或忽略，特别是在处理复杂边界条件时，这种微凹陷的局部特征未能体现；另外，理论模型假设是理想的无滑移边界，而数值模拟则需要考虑边界和流体与裂隙壁面的相互作用等情况，边界条件的不同也是导致两者差异性的重要原因。

### 3 倾斜裂隙注浆扩散规律

在倾斜裂隙注浆过程中，浆液扩散迹线形态和扩散距离受到注浆压差、裂隙倾角、裂隙开度等诸多因素控制，为定量分析不同因素影响下注浆浆液扩散迹线形态和扩散距离随注浆时间变化关系，在考虑浆液扩散辐射角下，基于宾汉姆浆液黏度时空分布方程，采用单因素控制变量法，利用MATLAB分析求解不同注浆压差 $\Delta P$ 、裂隙倾角 $\alpha$ 、裂隙宽度 $b$ 影响下宾汉姆浆液扩散距离 $L$ 和浆液扩散形态迹线形态随注浆时间的变化规律，具体计算参数见表1。

表1 宾汉姆浆液扩散规律理论分析计算参数

Table 1 Theoretical analysis and calculation parameters of Bingham slurry diffusion law

工况	注浆压差/ MPa	裂隙倾角/ °	裂隙宽度/ mm	水灰比	黏度/ Pa
1	1	60	1	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
2	2	60	1	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
3	3	60	1	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
4	4	60	1	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
5	1	0	1	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
6	1	30	1	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
7	1	90	1	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
8	1	60	2	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
9	1	60	3	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$
10	1	60	4	0.8	$0.1611e^{0.0001t}$

#### 3.1 注浆压差对倾斜裂隙注浆扩散的影响

为探讨注浆压差对浆液迹线形态及扩散距离的影响，计算不同注浆压差(1、2、3、4 MPa)条件下，宾汉姆浆液在倾斜裂隙中的扩散理论迹线形态。为便于描述浆液扩散迹线形态的变化，笔者以注浆时间610~650 s之间的5个时刻，每10 s为1个时间间隔为例，不同注浆压差影响下浆液扩散迹线形态的

变化曲线如图9所示。在注浆时间和注浆压差相同条件下,注浆孔上方裂隙区域中部迹线形态呈“微凹陷”特征,从整体上看浆液扩散迹线形态为类椭圆形态,并且沿着注浆孔中心轴对称。位于注浆孔上方裂隙区域的浆液扩散迹线形态小于下方裂隙,当浆液扩散辐射角分别位于180°和0°临界位置时,浆液扩散距离分别为最小和最大值。其原因在于,注浆孔上方裂隙区域浆液流向与其重力方向夹角大于90°,需克服重力分量做功,增加了浆液在上方裂隙区域扩散的阻力,相比之下,下方裂隙区域浆液流向与重力方向夹角小于90°,重力分量对其做正功,促进了下方裂隙区域浆液的扩散,导致下方裂隙区域浆

液迹线范围大于上方裂隙区域,且这种效应沿着注浆孔中心轴线向裂隙左右两侧逐渐减弱。倾斜裂隙导致的重力分异效应与浆液黏度时变特性显著影响了浆液扩散迹线形态特征,注浆压差通过增强浆液的驱动力短暂扩大浆液扩散迹线形态,而浆液的黏度时变性导致扩散增幅衰减;随着注浆时间增加,下方裂隙区域浆液沿重力势能方向优先达到裂隙区域,而上方裂隙区域浆液沿逆向重力分量做负功,浆液扩散迹线形态逐渐扩展,上方裂隙区域扩展幅度小于下方裂隙区域,注浆孔上方裂隙区域中部迹线的微凹陷特征逐渐弱化,浆液整体迹线形态呈沿注浆孔轴对称的类椭圆形态。

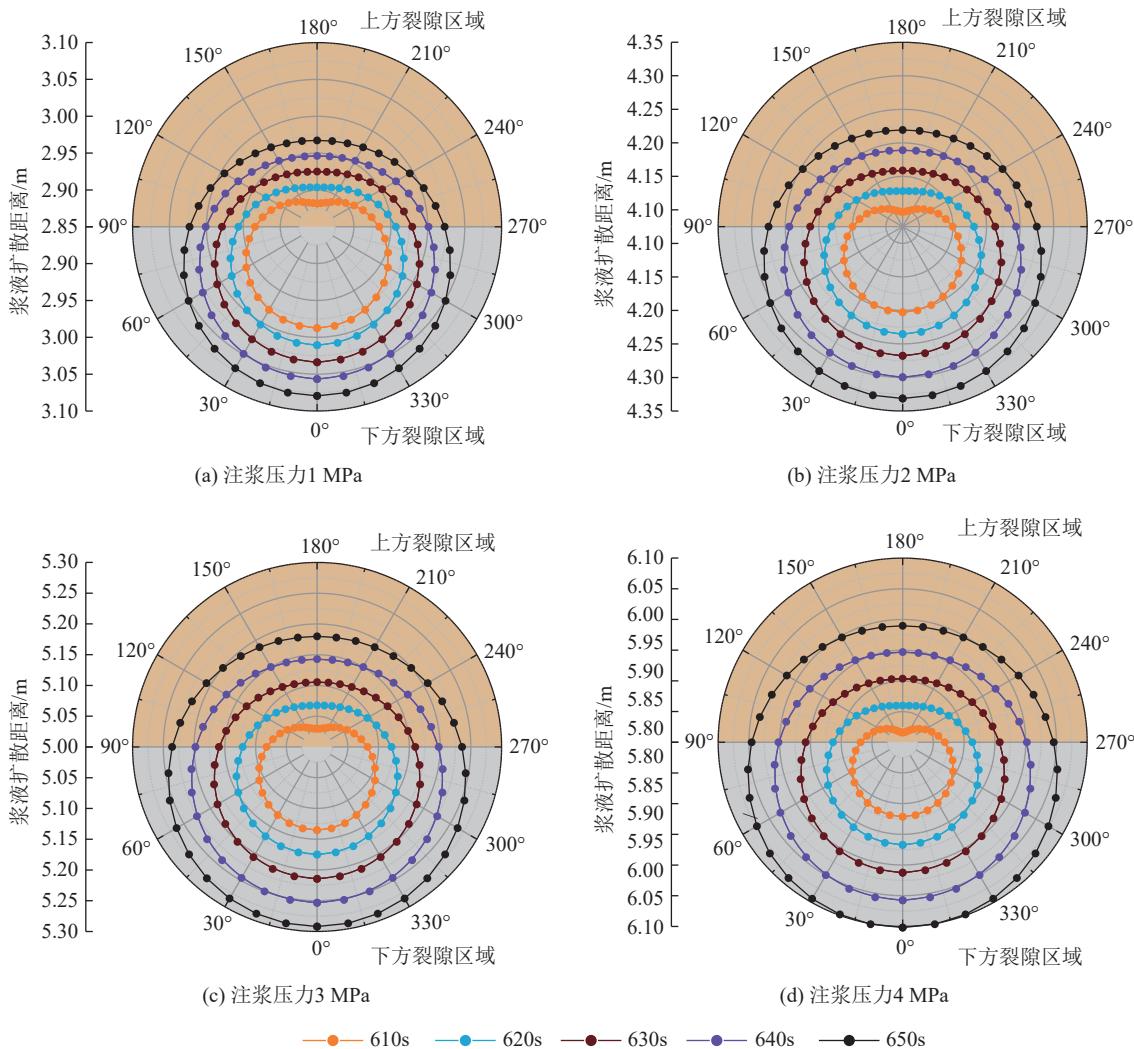


图9 注浆压差影响下浆液扩散迹线形态的变化曲线

Fig.9 Change curve of slurry diffusion trace shape under the influence of grouting pressure difference

当浆液扩散辐射角为0°时,浆液扩散距离达到最大值,因此可得注浆压差影响下浆液最大扩散距离时程曲线如图10所示。在注浆压差相同时,浆液最大扩散距离随着注浆时间增加而增大,但其增加

速率逐渐减小。在相同注浆压差下,注浆孔上方裂隙浆液扩散距离始终小于下方裂隙,且随着注浆时间增加,上方和下方裂隙之间扩散距离差异逐渐显现。当注浆时间  $t=650$  s 时,不同注浆压差下浆液最

大扩散距离增幅变化如图11所示。当注浆压差分别为1、2、3、4 MPa时,下方裂隙浆液扩散距离增幅分别为42.2%、22.8%、15.6%,上方裂隙浆液扩散距离增幅分别为40.7%、22.2%、15.3%,上方和下方裂隙增幅均随注浆压差增加而逐渐减小,但下方裂隙扩散距离增幅大于上方裂隙。

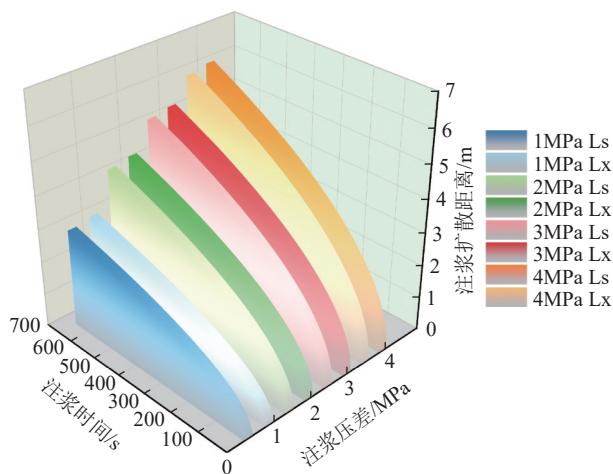


图10 注浆压差影响下浆液最大扩散距离时程曲线

Fig.10 Time history curve of maximum slurry diffusion distance under the influence of grouting pressure difference

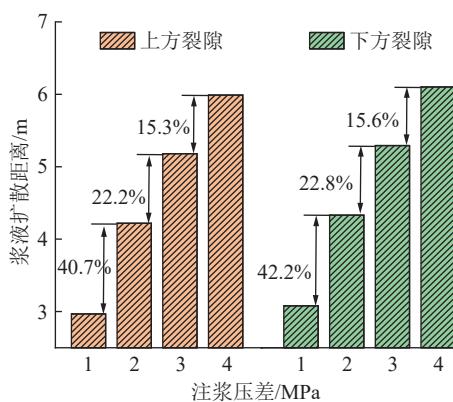


图11 注浆压差影响下浆液最大扩散距离增幅变化

Fig.11 Increase of maximum diffusion distance of slurry under the influence of grouting pressure difference

推断其原因为:增大注浆压差,提高了浆液在裂隙中流动时的驱动力,对于下方裂隙区域中的浆液受到重力和压差共同作用,有效推动了浆液的扩散。随着注浆时间增加,浆液黏度迅速提升,导致浆液在裂隙扩散过程中的黏滞阻力增大,扩散距离增幅逐渐减小。

### 3.2 裂隙开度对倾斜裂隙注浆扩散的影响

图12和图13分别为裂隙开度(1、2、3、4 mm)影响下浆液扩散迹线形态和最大扩散距离时程曲线。

当注浆时间相同时,浆液扩散迹线范围随着裂隙开度呈显著正相关,且呈明显的空间异质性,具体表现为:上方裂隙区域最大浆液扩散距离始终小于下方裂隙,这种空间差异性随裂隙开度增加而呈现扩大的趋势。值得注意的是,与注浆压差影响下浆液扩散规律存在异同点:不同点是随裂隙开度增大,上方裂隙区域中部迹线呈现出的微凹陷特征更加明显;相同点是凹陷特征随着注浆时间增加而逐渐减弱,凹陷特征弱化的幅度逐渐降低。究其原因为,裂隙开度增大,相同时间内通过裂隙通道的浆液量增加,提高了上方裂隙区域浆液的重力分量,浆液在流动过程此分量远大于由于裂隙开度增大,而减小的黏滞阻力,从而增加了流动阻力,导致浆液在扩散过程中形成的凹陷特征随着裂隙开度增加逐渐凸显。

由图14可知,当裂隙开度相同时,下方裂隙区域增加幅度大于上方裂隙区域且随着裂隙开度增大而逐渐减小。当注浆开度由1 mm增至2 mm时,上方和下方裂隙区域浆液最大扩散距离增幅分别提高了96.3%和103.7%。此外,当开度从2 mm增至3 mm时,上方和下方裂隙区域浆液最大扩散距离增幅分别为47.2%和52.8%,而进一步增大至4 mm时,增幅减小至30.9%和35.8%。

### 3.3 裂隙倾角对倾斜裂隙注浆扩散的影响

不同裂隙倾角(0°、30°、60°、90°)影响下,浆液扩散迹线形态和最大扩散距离分别如图15—图16所示。当裂隙倾角大于0°时,呈现下方裂隙区域浆液扩散迹线形态大于上方裂隙的类椭圆形态。当裂隙倾角为0°时,上方和下方裂隙区域浆液扩散迹线范围变化截然不同,浆液扩散迹线形态呈现标准圆形特征,注浆孔上方和下方裂隙区域的浆液扩散迹线范围相同,并随着注浆时间增加逐渐向外部扩展。

由图17可知,在裂隙倾角为0°时,注浆孔上方与下方裂隙浆液最大扩散距离相等。在相同注浆时间且裂隙倾角大于0°的条件下,注浆孔下方裂隙区域浆液最大扩散距离随裂隙倾角增加而增大,而上方裂隙最大扩散距离则逐渐减小,两者变化幅度相对较小。当裂隙倾角分别为0°、30°、60°、90°时,下方裂隙浆液最大扩散距离增加幅度分别为1.3%、0.7%、0.3%,上方裂隙浆液最大扩散距离减幅与下方裂隙增幅一致,下方裂隙最大扩散距离较上方裂隙扩散距离分别增加0%、2.0%、3.7%、4.4%。究其原因为,随着注浆时间增加,浆液黏度显著提升,增加了浆液在裂隙扩散过程中产生的黏滞阻力,增加的

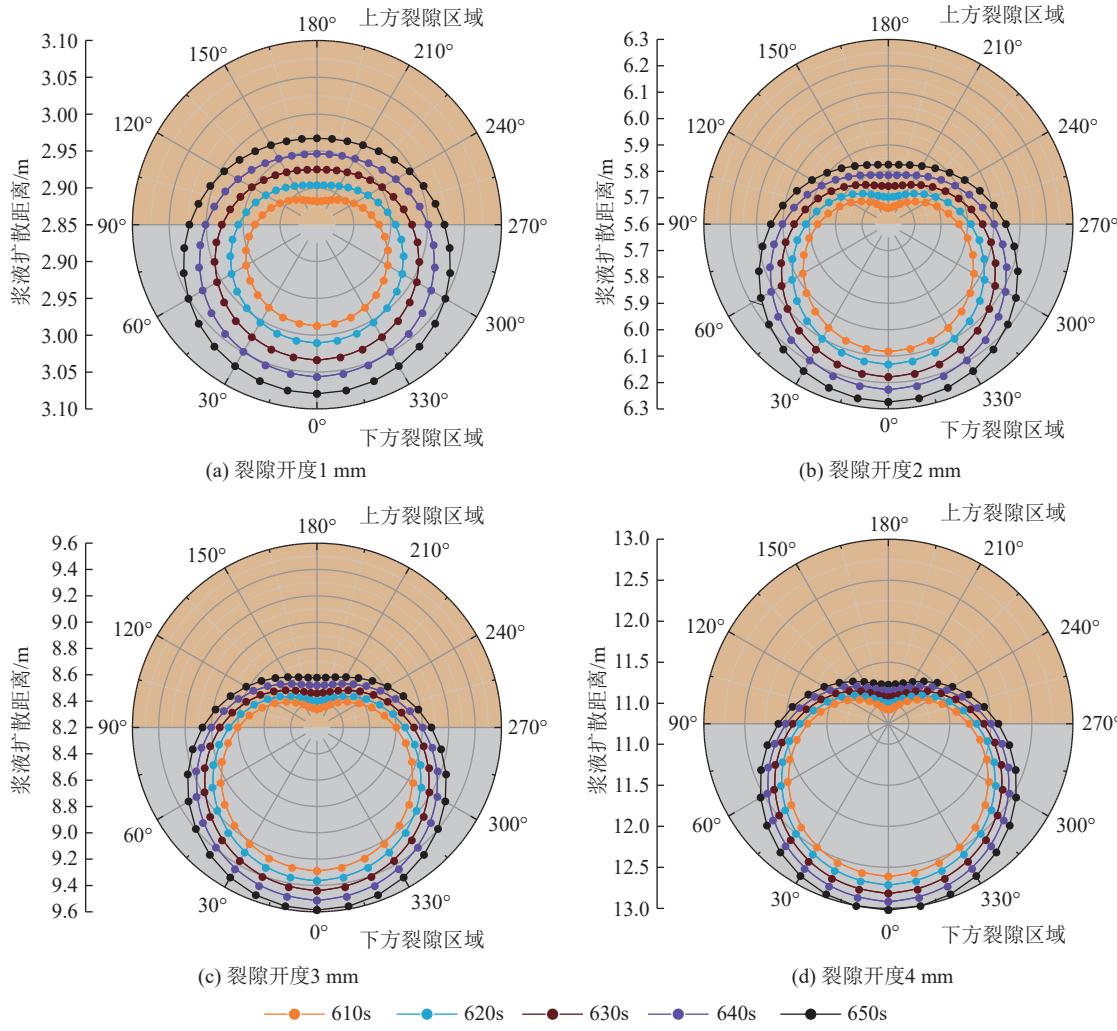


图 12 裂隙开度影响下浆液扩散迹线形态的变化曲线

Fig.12 Change curve of slurry diffusion trace shape under the influence of fracture opening

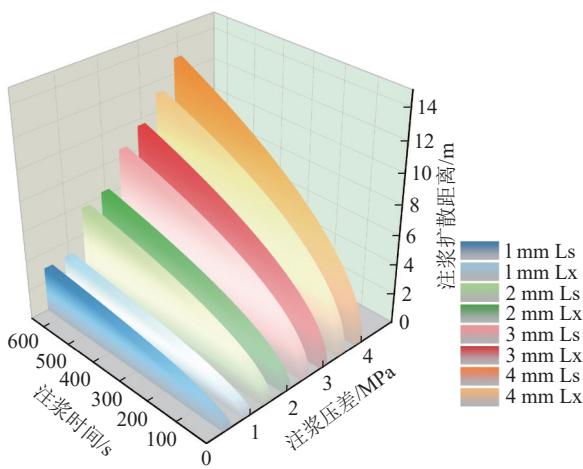


图 13 裂隙开度影响下浆液最大扩散距离时程曲线

Fig.13 Maximum diffusion distance time history curve of slurry under the influence of fracture opening

阻力抵消了由于裂隙倾角增大而引起的浆液自重应力分量的提升。此外,笔者所采用的裂隙开度为1 mm相对较小,导致浆液扩散迹线形态范围和最大

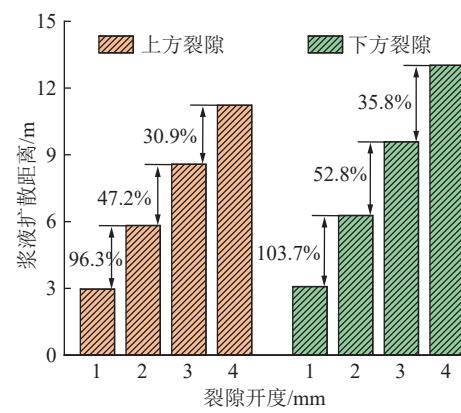


图 14 裂隙开度影响下浆液最大扩散距离增幅变化

Fig.14 Change of the maximum diffusion distance of slurry under the influence of fracture opening

扩散距离随裂隙倾角变化幅度不明显,当裂隙开度较大时,浆液重力分量的增加显著大于浆液在倾斜裂隙中扩散时所受的黏滞阻力,从而使黏滞效应逐渐减弱。

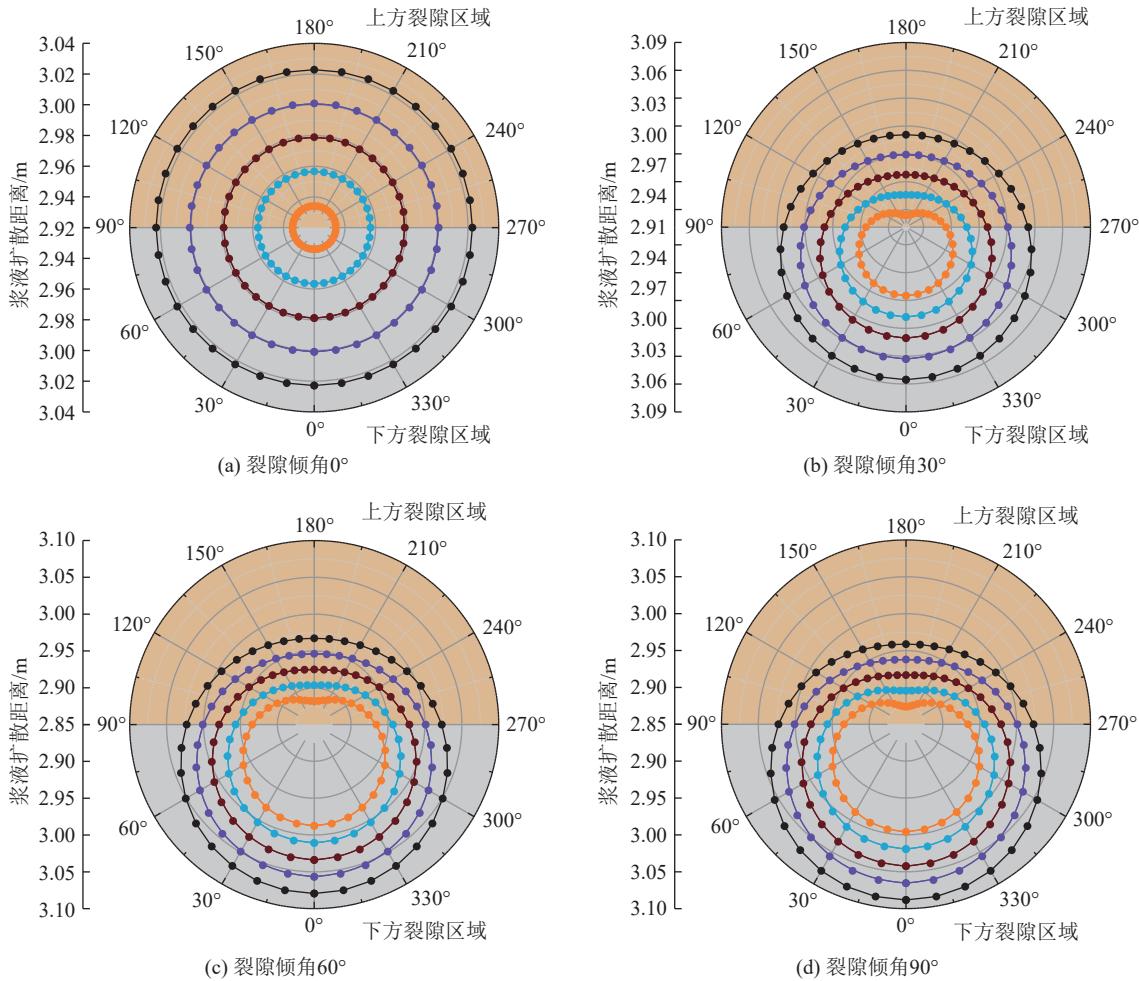


图 15 裂隙倾角影响下浆液扩散迹线形态的变化曲线

Fig.15 Change curve of slurry diffusion trace shape under the influence of fracture dip angle

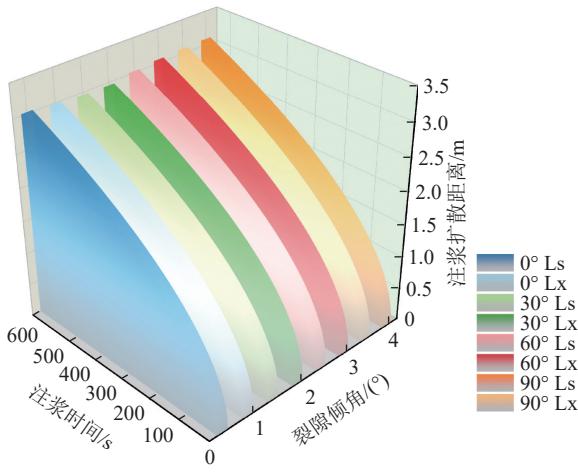


图 16 裂隙倾角影响下浆液最大扩散距离时程曲线

Fig.16 Maximum diffusion distance time history curve of slurry under the influence of fracture dip angle

#### 4 工程借鉴

1) 深部巷道帮部围岩中裂隙通道的不确定性及注浆过程中的隐蔽性使得实时监测注浆加固极为困

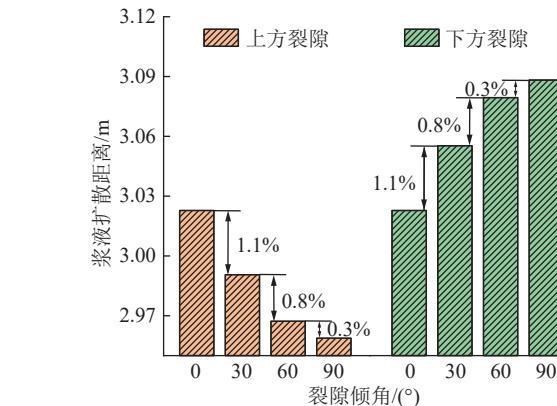


图 17 裂隙倾角影响下浆液最大扩散距离增幅变化

Fig.17 Change of the maximum diffusion distance of slurry under the influence of fracture dip angle

难。因此,提高注浆加固效果的关键在于系统分析浆液扩散辐射角和注浆孔上方、下方的受力特点及各因素对任意倾斜裂隙注浆扩散规律的影响进一步优化注浆参数设计。对于注浆孔上方裂隙,浆液流向与自重方向呈钝角,黏滞阻力和自重分量共同抑

制流动,而下方裂隙,浆液流向与重力方向成锐角,自重分量则促进流动,黏滞阻力仍然存在抑制作用。浆液扩散的迹线形态并未呈现出传统的标准圆形特征,注浆孔上方和下方裂隙浆液在不同扩散辐射角方向上的扩散迹线和扩散距离差异显著,逐渐呈现沿注浆孔中心轴对称且下方裂隙区域大于上方裂隙区域的类椭圆形态。因此,在实际注浆设计中注浆孔间排距时应充分考虑浆液扩散辐射角、浆液重力及裂隙倾角的影响,设水平方向注浆孔排距为 $a$ ,沿垂直方向注浆孔间距为 $b$ ,如图18所示,可适当增大注浆孔排距,满足条件 $a>b$ ,有助于减少注浆孔数量,降低施工成本。

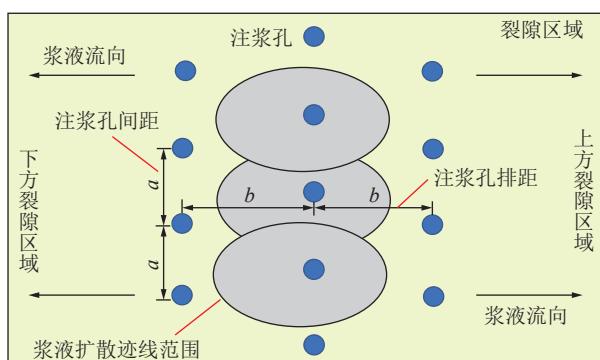


图 18 巷道帮部围岩水平注浆孔布置原理示意  
Fig.18 Schematic diagram of layout principle of horizontal grouting holes in surrounding rock of roadway side

2) 随着注浆压差和裂隙开度增加,浆液扩散迹线形态范围和最大扩散距离均显著逐渐增大,上方与下方裂隙之间的扩散距离差距随着注浆压差和裂隙开度的增加而扩大。在实际注浆工程中,针对裂隙开度大且发育明显的区域,建议采用五花眼布置注浆孔(图18),通过多个注浆孔的辐射布局,形成1个多点注浆网络,以确保浆液在多个方向的均匀分布;对于围岩发育不明显或整体性较好的岩层,则可采用均匀间隔的注浆孔布置。而在层理分明或裂隙特征明显的区域,宜采用深浅孔相结合的注浆孔布置,以更有效地针对不同深度段的岩体特性进行加固。

3) 在巷道帮部围岩采用水平孔注浆时,浆液扩散过程受到多种因素影响。当裂隙分布复杂且存在多条开度较大的倾斜裂隙时,单位时间内通过注浆孔进入裂隙通道的浆液量显著增加,在注浆压差、浆液自重和黏滞阻力的共同作用下,注浆孔下方的裂隙区域的浆液先于上方裂隙充填饱和。若继续注浆,随着下方区域浆液压力急剧上升,一旦注浆压差超过裂隙的抗拉强度,岩体可能发生二次劈裂,进而导

致裂隙扩展并形成新的裂隙通道,在此情况下,采用间歇式注浆方式中止持续注浆,通过控制注浆时间间隔,使注入后的浆液充分扩散和凝固,在注浆压力驱动下,浆液将沿注浆孔上方裂隙区域扩散,直至充分充填整个裂隙区域后,从而有效完成注浆作业。

## 5 结 论

1) 基于黏度时变性宾汉姆流体流动方程,构建了考虑浆液扩散辐射角的倾斜裂隙注浆扩散理论模型,获得了浆液扩散迹线时空分布方程,通过数值模拟对理论计算进行验证可知,2种方法获得的浆液扩散迹线形态及扩散距离变化规律基本一致,但浆液扩散迹线和最大扩散距离也存在一定差异,其中下方裂隙最大扩散距离最大误差为6.1%,而上方裂隙最大误差仅为5.6%,验证了理论模型的可行性。

2) 当裂隙倾角为0°时,浆液扩散迹线呈现标准圆形特征,且注浆孔上方和下方裂隙区域迹线形态及最大扩散距离变化一致,随着裂隙倾角增大,上方裂隙区域浆液扩散迹线范围和最大扩散距离逐渐减小,而下方裂隙区域浆液扩散迹线范围和最大扩散距离逐渐增大,浆液最大扩散距离分别在浆液扩散辐射角为0°和180°时,达到最大和最小值,并且裂隙开度越大,上方和下方裂隙区域的浆液扩散特征差异越明显。

3) 当裂隙倾角大于0°时,浆液重力在注浆孔上下方裂隙区域分别发挥阻力和动力作用。浆液扩散迹线形态整体呈现出沿注浆孔中心轴对称的类椭圆形态,且上方裂隙区域中部迹线伴随有凹陷特征。上方裂隙区域的迹线范围和最大扩散距离均小于下方裂隙,随着注浆时间增加,微凹陷特征逐渐减弱,椭圆形态随之扩展,上方裂隙区域迹线范围的增加幅度和最大扩散距离增幅均小于下方裂隙。

4) 在实际巷道帮部围岩水平注浆孔参数设计过程中注浆孔间排距时应充分考虑注浆区域的裂隙发育情况和浆液自身的特性,适宜的注浆参数设计结合间歇式注浆方法,可以有效提高浆液在复杂裂隙结构中均匀扩散,降低施工成本,并防止因裂隙扩展引发的二次破坏和次生灾害,从而确保注浆作业的安全性与有效性。

## 参考文献(References):

- [1] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,2024,49(1):75-99.  
HE Manchao, WU Yiyi, GAO Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society,

- 2024, 49(1): 75–99.
- [2] 谢和平, 张茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3959–3978.  
XIE Heping, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3959–3978.
- [3] 许文松, 赵光明, 孟祥瑞, 等. 真三轴加卸载岩体各向异性及能量演化机制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1502–1515.  
XU Wensong, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui, et al. Anisotropy and energy evolution mechanism of rock mass under true tri-axial loading-unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1502–1515.
- [4] 王磊, 陈礼鹏, 谢广祥, 等.  $\text{CO}_2$ 荷载耦合作用下煤体细观统计损伤本构模型及验证[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2630–2642.  
WANG Lei, CHEN Lipeng, XIE Guangxiang, et al. Meso-statistical damage constitutive model and validation of coal under  $\text{CO}_2$ -load coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2630–2642.
- [5] 孟庆彬, 宋子鸣, 刘滨, 等. 深部软岩巷道围岩与锚喷U型钢支护结构相互作用研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 23–36.  
MENG Qingbin, SONG Ziming, LIU Bin, et al. Interaction study on surrounding rock and bolting-shotcrete U-shaped steel support structure in deep soft rock roadway[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 23–36.
- [6] 刘泉声, 周越识, 卢超波, 等. 含裂隙泥岩注浆前后力学特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(3): 509–514, 520.  
LIU Quansheng, ZHOU Yueshi, LU Chaobo, et al. Experimental study on mechanical properties of mudstone fracture before and after grouting[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(3): 509–514, 520.
- [7] 侯凯, 王帅, 姚顺, 等. 矿用聚氨酯类注浆材料改性研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 28–34.  
HOU Kai, WANG Shuai, YAO Shun, et al. Research progress on modification of polyurethane grouting materials in mines[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10): 28–34.
- [8] 陶志刚, 孙吉浩, 曹振生, 等. 穿断层破碎带隧道围岩大变形控制双梯度注浆机制[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(6): 1194–1213.  
TAO Zhigang, SUN Jihao, CAO Zhensheng, et al. Mechanism of double-gradient grouting for large deformation control of surrounding rock in tunnels crossing fault fracture zones[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(6): 1194–1213.
- [9] 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.
- [10] 阮文军. 基于浆液粘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, 2005, 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, 2005, 24(15): 2709–2714.
- [11] 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.
- [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] 刘人太, 张连震, 张庆松, 等. 速凝浆液裂隙动水注浆扩散数值模拟与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3297–3306.  
LIU Rentai, ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation and experimental validation of fast-setting slurry fracture dynamic water grouting diffusion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3297–3306.
- [14] 张连震, 张庆松, 刘人太, 等. 考虑浆液黏度时空变化的速凝浆液渗透注浆扩散机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 443–452.  
ZHANG Lianzhen, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, et al. Penetration grouting mechanism of quick setting slurry considering spatiotemporal variation of viscosity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 443–452.
- [15] 黄炳香, 张农, 靖洪文, 等. 深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 911–926.  
HUANG Bingxiang, ZHANG Nong, JING Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911–926.
- [16] 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.
- [17] HU Y, LIU W Q, SHEN Z, et al. Diffusion mechanism and sensitivity analysis of slurry while grouting in fractured aquifer with horizontal injection hole[J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35(2): 49.
- [18] 戚绪尧, 王涛, 陈良舟. 煤岩裂隙高位注浆浆液扩散规律[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1098–1109.  
QI Xuyao, WANG Tao, CHEN Liangzhou. Diffusion law of high-position grouting in coal and rock fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1098–1109.
- [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 Bing, DONG Shuning, YI Shangxian, et al. Mechanism of

- unsteady slurry transport of Bingham fluid in tilted fractures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(11): 4083–4093.
- [20] 张佳兴. 粘度时变浆液流变-固化特性与注浆扩散机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- ZHANG Jiaxing. Study on the properties of rheology-solidification of time-depending viscous grout and diffusion mechanism[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [21] 王晓晨. 基于水泥浆液析水效应的裂隙岩体注浆扩散与加固机理[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- WANG Xiaochen. Mechanism of grouting diffusion and reinforcement of rock fracture based on the bleeding effect of cement slurry[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [22] 裴启涛, 丁秀丽, 黄书岭, 等. 速凝浆液岩体倾斜裂隙注浆扩散模型研究[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(12): 83–90.
- PEI Qitao, DING Xiuli, HUANG Shuling, et al. Grouting diffusion model of quick setting slurry in dip crack rock masses[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(12): 83–90.
- [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 Wenjun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(1): 69–73.
- [24] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [25] 王想君, 李英明, 赵光明, 等. 深井软弱围岩联合控制技术及耦合叠加拱承载效应研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(6): 2496–2512.
- WANG Xiangjun, LI Yingming, ZHAO Guangming, et al. Study on combined control technology of weak surrounding rock in deep well and bearing effect of coupled superimposed arch[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(6): 2496–2512.
- [26] 郑玉辉. 裂隙岩体注浆浆液与注浆控制方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- ZHENG Yuhui. Research on grouts and controllable method of grouting in rock mass of fissures[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [27] 翟明磊. 裂隙含水层注浆浆液-岩体耦合作用机理及突水防治应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- ZHAI Minglei. Mechanism of Slurry-Rock Mass Coupling Effect of Grouting in Fractured Aquifer and Application of Water Inrush Prevention[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [28] 柳昭星. 煤层底板水害超前区域治理关键注浆参数控制机制[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
- LIU Zhaoxing. The control mechanism of key grouting parameters for advanced regional control of water disaster in the coal seam floor[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [29] 尚宏波, 靳德武, 赵春虎, 等. 砂岩含水层帷幕浆液运移规律与改性效果分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2460–2469.
- SHANG Hongbo, JIN Dewu, ZHAO Chunhu, et al. Transport law of curtain grouting fluid in conglomerate aquifer and evaluation of rock mass modification effect[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2460–2469.
- [30] 张嘉凡, 孙晓东, 刘洋, 等. 倾斜裂隙水注浆扩散规律及堵水关键域研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(S2): 575–588.
- ZHANG Jiafan, SUN Xiaodong, LIU Yang, et al. Study on diffusion law of dynamic water grouting in inclined fracture and key areas of water plugging[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S2): 575–588.
- [31] 常聚才, 齐潮, 殷志强, 等. 爆破扰动高应力巷道围岩力学响应特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(6): 1–13.
- CHANG Jucai, QI Chao, YIN Zhiqiang, et al. Study on the dynamic response characteristics of surrounding rock in high stress tunnel under blasting disturbance[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(6): 1–13.