

考虑浆液黏度时变性的底板含水层注浆充填改造机制研究

程帅帅¹ 黄存捍² 张伟³ 翟明磊¹ 王文强¹ 曹正正¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 资源环境学院, 454000;
3. 河南省新郑煤电有限责任公司赵家寨煤矿, 河南 新郑 451184)

[摘要] 注浆是防治煤层底板含水层突水灾害的主要技术手段之一。通过注浆改造底板灰岩含水层, 改变其为隔水层或弱含水层, 可有效根治底板水害, 实现矿井安全高效开采。本文基于宾汉体浆液, 建立了恒定注浆速率下考虑浆液黏度时变性的一维渗流注浆理论模型, 分析了裂隙注浆液扩散距离与注浆压力之间的定量关系, 研究了水平裂隙浆液扩散规律, 揭示了水平裂隙注浆浆液扩散机理。利用该模型, 如果已知含水层静水压力和注浆流量, 可以得到预定浆液扩散半径所需的注浆压力。最后, 结合赵家寨煤矿22采区L₁₋₂灰岩含水层现场注浆改造工程, 对研究成果进行验证。注浆加固改造结果显示, 注浆质量均达到设计要求, L₁₋₂灰岩含水层得到有效改造。

[关键词] 裂隙含水层; 宾汉流体; 黏度时变性; 浆液扩散; 注浆充填

[中图分类号] TD853

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2024)06-0028-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.06.004

0 前言

随着我国煤炭资源逐步向深部开采, 底板水对煤矿安全开采的威胁也越来越明显^[1-5]。注浆改造技术作为防治底板水害技术的一种方法, 常用于改造煤层底板隔水层, 消除煤层底板突水威胁。注浆改造工程中浆液扩散规律是迫切需要解决的难题^[6-9]。

[收稿日期] 2024-12-09

[基金项目] 河南省科技攻关计划项目(232102321098); 河南省自然科学基金资助项目(242300421246); 河南省双一流学科建设专项项目(AQ20240724)。

[作者简介] 程帅帅(2001—), 男, 河南太康人, 硕士研究生, 主要从事注浆充填及保水采煤等研究工作。

[通信作者] 黄存捍(1978—), 男, 安徽桐城人, 副教授, 博士, 主要从事矿山固废充填采矿理论与技术等研究工作。

[引用格式] 程帅帅, 黄存捍, 张伟, 等. 考虑浆液黏度时变性的底板含水层注浆充填改造机制研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(6): 28-34.

CHENG Shuaishuai, HUANG Cunhan, ZHANG Wei, et al. Study on the grouting filling reconstruction mechanism of floor aquifer considering the time-varying grout viscosity[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(6): 28-34.

目前, 国内外许多学者对浆液扩散规律进行了研究, 并取得了丰硕的成果^[10-15]。现有的注浆理论主要有孔隙岩体注浆理论、裂隙岩体注浆理论、劈裂注浆理论、压实注浆理论、动水注浆理论等。理论分析是研究浆液扩散规律的有效手段, 其中单裂隙注浆浆液流动规律是研究浆液扩散规律的基础。李华茂等^[16]通过对裂隙渗透注浆扩散规律的研究, 得到了层流状态下的牛顿液体在渗透注浆过程中各个参数之间的关系。李术才等^[17]通过平板裂隙注浆模拟试验研究, 分析了定注浆流量条件下的水泥-玻璃浆液扩散的压力场分布规律, 建立了单一平板裂隙的注浆压力分布方程。肖同强等^[18]通过研究深部巷道围岩裂隙注浆加固浆液扩散规律, 得到裂隙开度对浆液扩散半径影响显著, 而裂隙粗糙度的影响较小的结论。然而, 上述研究在分析注浆浆液扩散规律时并未考虑浆液黏度时变性, 其理论值与注浆工程中实际相差较大, 研究成果并不能很好地指导工程实际应用。

为此, 郑志民等^[19]通过构建考虑浆液自重的竖向单裂隙注浆扩散理论模型, 推导了考虑浆液自重及黏度时变性的竖向裂隙注浆扩散控制方程, 得到了竖向裂隙中浆液扩散机理。张庆松等^[20]通过研究考虑浆液黏度的速凝类浆液双液混合注浆方式扩散机制, 得到了注浆压力与注浆时间及浆液扩散半

径的关系。范利丹等^[21]通过开展不同温度条件下水泥注浆液性能的实验研究,发现低水灰比时,随温度升高黏度增大,水灰比达到一定高度时,温度对黏度的影响不明显。张彦奇等^[22]通过开展超细水泥浆液流变性能试验研究,得到了水灰比和高效减水剂对超细水泥浆液黏度的影响规律、超细水泥浆液黏度时变性特点以及减水剂对时变性的影响规律。此外,许多学者利用数值模拟软件研究了水泥浆液在平面裂隙中的扩散规律,得到了水泥浆液的扩散半径、注浆压力等参数。但是,上述研究未考虑普通硅酸盐水泥作为注浆充填材料时的浆液扩散规律,理论成果并不能很好地为实际工程提供参考。

为了解决上述问题,充分考虑浆液黏度时变性对浆液扩散距离的影响,本文基于宾汉流体,推导了考虑浆液黏度时变性条件下浆液扩散距离与注浆压力关系的方程。最后,结合现场注浆改造工程,验证了理论模型的合理性。

1 浆液扩散的理论分析

1.1 浆液流动模型基本假设

为了构建水平裂隙下注浆浆液扩散数学模型,作出以下假设^[17]:

- 1) 浆液均质不可压缩且为各向同性。
- 2) 不考虑裂隙粗糙度的影响,注浆浆液在裂隙壁上的速度恒为0。
- 3) 浆液在流动过程中不会进入岩体内部,也不会穿透裂隙壁。
- 4) 注浆方法采用恒压匀速注浆。
- 5) 裂缝水平均匀分布,忽略重力对浆液扩散过程的影响。
- 6) 静水中浆液运动锋面是突变的,忽略浆液运动和地下水位引起的附加应力。

忽略重力对等开口单板裂隙中浆液的影响,可以将其简化为二维问题,因此浆液扩散形式应为轴对称扩散。以裂缝中心的对称轴和垂直方向建立平面直角坐标系,如图1所示,裂隙中心为对称轴,从浆液的微观因素出发,对其进行应力分析。

图1中, b 为裂隙宽度; p_0 为静水压力; dx 是微元长度; dp 为单位体积浆液压力增量; h 为微元高度的一半; τ 为剪切应力; r_0 为流核区半径; v 为速度。

根据裂隙任意位置处截面剪力分布公式,通过对微元单位的应力分析,得到剪切应力 τ 沿裂隙宽度方向的分布规律。

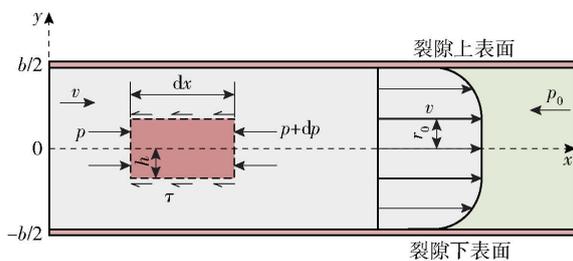


图1 浆液运动的受力分析

$$\tau = -y \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

在 x 方向上压力梯度的阶为:

$$A = -\frac{dp}{dx} \quad (2)$$

此外,宾汉流体在裂缝中流动时存在流核,流核位于裂隙中心的对称区域,如图2所示。

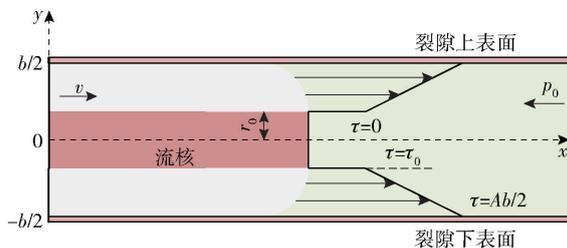


图2 截面剪力分布

假设流核区边缘剪切应力为0,则剪切应力的分布为:

$$\tau = \begin{cases} 0, & -r_0 < y < r_0 \\ \tau_0, & y = \pm r_0 \\ Ay, & r_0 < |y| < \frac{b}{2} \\ \frac{Ab}{2}, & y = \pm \frac{b}{2} \end{cases} \quad (3)$$

因此,可以得到:

$$\tau_0 = -r_0 \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

即流核区半径为:

$$r_0 = -\tau_0 A^{-1} \quad (5)$$

此外,流核宽度不大于裂缝宽度:

$$r_0 \leq \frac{b}{2} \quad (6)$$

可以得到:

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

由式(7)可知,宾汉流体浆液流动时存在启动压力梯度 λ :

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

已有研究表明^[23], 不经过原点的宾汉流体的流变方程表达式为:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{i_0} e^{kt} \dot{\gamma} \quad (9)$$

式中, μ_{i_0} 为浆液黏度; k 为黏度时变系数; $\dot{\gamma}$ 为工程应变速率张量。

结合式(9)和式(1)可得:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\tau_0}{\mu_{i_0} e^{kt}} + \frac{y}{\mu_{i_0} e^{kt}} \frac{dp}{dx} \quad (10)$$

边界条件设为:

$$\begin{cases} y = \pm \frac{b}{2}, v = 0 \\ y \leq r_0, v = v \\ r_0 \leq \frac{b}{2} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10), 则浆液沿裂隙宽度的速度分布表示为:

$$v = \begin{cases} -\frac{b^2 - 4y^2}{8\mu_{i_0} e^{kt}} \frac{dp}{dx} - \frac{\tau_0}{\mu_{i_0} e^{kt}} \left(\frac{b}{2} - |y| \right), & r_0 \leq |y| \leq \frac{b}{2} \\ -\frac{b^2 - 4r_0^2}{8\mu_{i_0} e^{kt}} \frac{dp}{dx} - \frac{\tau_0}{\mu_{i_0} e^{kt}} \left(\frac{b}{2} - r_0 \right), & |y| \leq r_0 \end{cases} \quad (12)$$

对裂隙宽度方向的浆液速度进行积分和平均, 得到裂隙内浆液平均速度为:

$$\bar{v} = \frac{-b^2}{12\mu_{i_0} e^{kt}} \left[\frac{dp}{dx} + \frac{3\tau_0}{b} + \frac{4\tau_0^3}{b^3} \left(\frac{dp}{dx} \right)^{-2} \right] \quad (13)$$

设注浆流量为 Q , 则:

$$Q = 2\pi x b \bar{v} = \frac{-b^3 \pi x}{6\mu_{i_0} e^{kt}} \left[\frac{dp}{dx} + \frac{3\tau_0}{b} + \frac{4\tau_0^3}{b^3} \left(\frac{dp}{dx} \right)^{-2} \right] \quad (14)$$

考虑到注浆工程中浆液压力梯度一般远大于自身的剪切屈服应力, 可忽略式(14)中的高次次要项, 对 x 进行积分, 得到:

$$p = -\frac{3\tau_0}{b} x - \frac{6\mu_{i_0} e^{kt} Q}{\pi b^3} \ln x + C \quad (15)$$

根据质量守恒定律, 浆液的注入量等于浆液在裂隙中的扩散量, 可以得到:

$$Qt = b\pi(r_i^2 - r_c^2) \quad (16)$$

式中, Q 为注浆流量; r_c 为注浆孔半径; r_i 为注浆扩散距离。

由于注浆孔尺寸与浆液扩散面积相比很小, 则注浆孔半径 r_c 可以忽略, 式(16)可以写为:

$$t = \frac{Q}{\pi b r_i^2} \quad (17)$$

随着浆液的扩散, 裂隙内的浆液压力逐渐减小, 当浆液扩散到最远点 r_i 时, 浆液停止扩散, 可以得到:

$$\begin{cases} x = r_i, p = p_0 \\ x = r_c, t = 0 \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)代入式(15), 得到注浆压力与浆液扩散距离的关系:

$$p = p_0 + \frac{3\tau_0}{b}(r_i - r_c) + \frac{6\mu_{i_0} e^{\frac{kQ}{\pi b r_i^2}} Q}{\pi b^3} \ln \frac{r_i}{r_c} \quad (19)$$

由式(19)可知, 已知含水层静水压力和注浆流量, 即可得到预定浆液扩散半径的注浆压力。

1.2 浆液流动模型数值模拟

基于浆液扩散理论模型, 应用 COMSOL Multiphysics 软件构建裂隙模型, 研究浆液黏度时变性影响下浆液扩散规律, 验证浆液扩散理论分析的科学性。如图3所示, 裂隙尺寸为 $1400 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ 的矩形, 裂隙开度为 0.5 mm , 注浆孔半径为 10 mm , 裂隙四周设置为无流动边界。

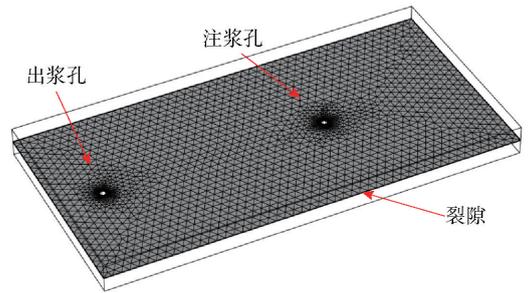


图3 浆液扩散裂隙模型

结合式(19), 注浆浆液灰比为 1.0 时的浆液黏度分布函数为 $\mu_i = 0.134 e^{\frac{kQ}{\pi b r_i^2}}$, 在数值模型中输入浆液黏度分布函数参数 μ_i 。注浆流量为 50 L/min 时, 得到不同时间下浆液压力分布云图(图4)。从图4中可以看出, 注浆压力与浆液扩散距离呈非线性衰减关系, 随着注浆时间的增长及浆液扩散距离的增加, 浆液黏度逐渐增大, 对浆液扩散距离的影响也逐渐增大, 浆液流动时需要的剪切力逐渐变大。注浆孔附近浆液压力最大, 而后浆液压力向四周沿浆液扩散方向逐渐减小, 在注浆口附近, 浆液压力的衰减最为显著。这是由于浆液注入裂隙后, 其流动空间扩大, 浆液压力瞬间释放。

在浆液黏度时变性影响下浆液体积分数随时间

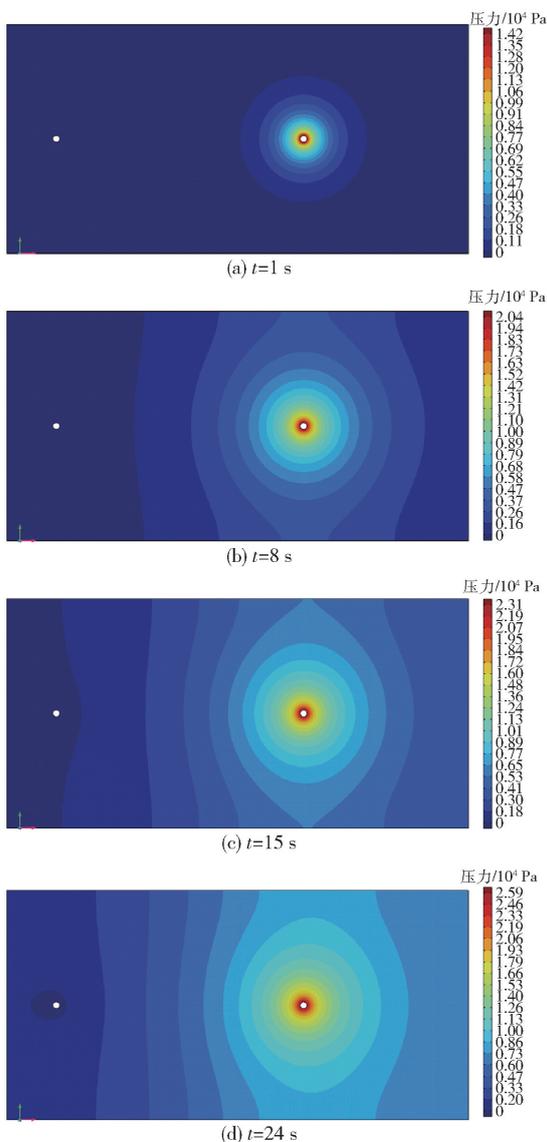


图 4 不同时间下浆液压力分布

变化曲线图如图 5 所示。注浆孔位于 $x=0.9\text{ m}$ 处。由图 5 可以看出,随着注浆时间的延长,浆液黏度增大,浆液流动阻力逐渐变大,导致相同时间间隔(3 s)内浆液扩散距离逐渐减小,浆液最大扩散距离的增长速率逐渐减缓,验证了理论分析与数值模拟的合理性。

2 浆液扩散影响因素分析

以河南省新郑市赵家寨煤矿 22 采区底板灰岩含水层注浆改造为工程背景,分析注浆流量、裂隙开度等因素对浆液扩散过程的影响,模型所使用参数均参照该工程实例。根据水压观测资料,得知该区域静水压力 p_0 为 1.92 MPa。注浆采用普通硅酸盐水泥,其水泥浆液水灰比 w/c 为 1.0^[23],可知黏度时

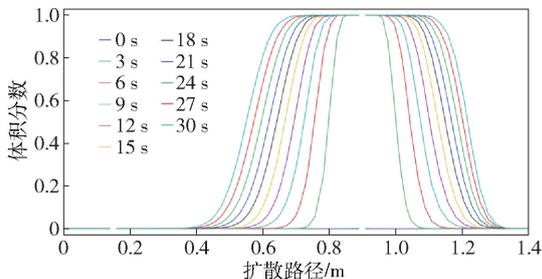


图 5 不同时间下浆液扩散距离变化曲线

变系数 $k=0.000\ 1$,初始塑性黏度 $\mu_0=0.134\text{ Pa}\cdot\text{s}$,浆液剪切屈服应力 $\tau_0=6.739\text{ Pa}$ 。

2.1 注浆流量对浆液扩散的影响

当注浆流量 Q 分别为 40 L/min、50 L/min、60 L/min、70 L/min 时,结合式(19)可得到不同注浆流量下预定浆液扩散距离与注浆压力的关系(图 6)。由图 6 可知,在不同注浆流量下,注浆压力与浆液扩散距离均呈非线性关系,注浆压力随着预定浆液扩散距离的增加而增大,但增长速率逐渐减小。当注浆流量恒定时,注浆压力改变量随着浆液扩散距离在裂隙开度方向上的增加而逐渐降低。例如当注浆流量为 50 L/min 时,注浆压力在浆液扩散距离方向上的改变量分别为 26.2%、17.6%、13.6%、10.0%、9.7%、9.2%、8.6%。注浆压力恒定时,浆液扩散距离随着注浆流量的增大而减小,这主要是因为随着注浆距离的增加,需要克服的阻力增大,需要的注浆压力也越大。

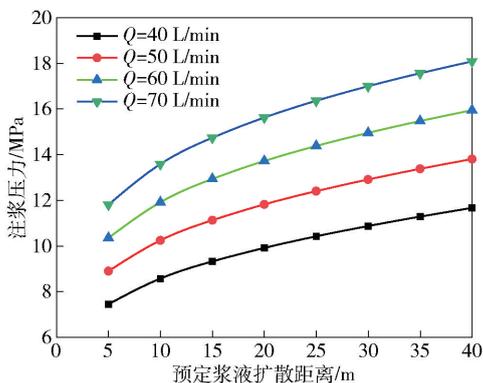


图 6 不同注浆流量下注浆压力与浆液扩散距离的关系

2.2 裂隙开度对浆液扩散的影响

裂隙开度 b_0 分别为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm 时,结合式(19)可得到不同裂隙开度下注浆压力与预定浆液扩散距离的关系(图 7)。由图 7 可以看出,不同裂隙开度条件下,注浆压力随着预定浆液扩散距离的增加而增大。当裂隙开度为 0.5 mm 时,注浆压力与浆液扩散距离的变化趋势更

明显。当裂隙开度为 0.5 mm, 浆液扩散距离从 5 m 增加到 40 m 时, 注浆压力增大了 14.0%, 而裂隙开度分别为 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm 时, 压力分别增大了 3.4%、1.7%、0.9%, 远远小于裂隙开度为 0.5 mm 的增长量。

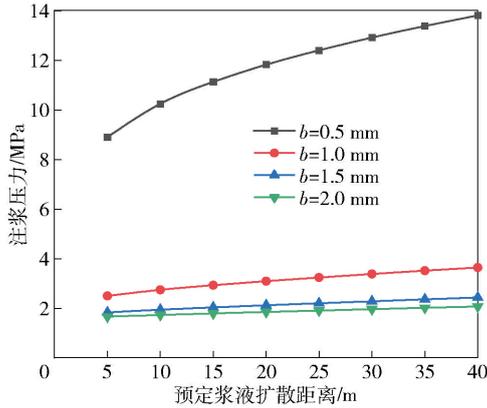


图 7 不同裂隙开度下注浆压力与浆液扩散距离的关系

3 工程实例验证

3.1 赵家寨煤矿概况

河南省新郑市赵家寨煤矿以二叠系山西组二₁煤为主采煤层, 煤层底板存在突水威胁较大的太原组上统 L₁₋₂灰岩含水层, 其富水性强, 距二₁煤底约为 60 m (图 8), 水压 1.92 MPa, 对煤层开采威胁较大。现场实践表明, 仅通过疏放水方法已不能有效降低 L₁₋₂灰岩含水层水压。对 L₁₋₂灰岩含水层进行注浆改造, 增加二₁煤底板隔水层厚度, 阻断下部灰岩导水通道, 可实现二₁煤安全开采。

地层		柱状	平均厚度/m	岩性	间距/m
系	组				
石炭系	太原组		6.59	二 ₁ 煤	60
			3.59	L ₈ 灰岩	
			5.71	L ₇ 灰岩	
			2.95	L ₄ 灰岩	
			2.16	L ₃ 灰岩	
			14.82	L ₁₋₂ 灰岩	

图 8 22 采区底板单孔柱状图

3.2 注浆改造方案

对 L₁₋₂灰岩含水层采用地面超前区域治理注浆

加固技术进行防治水工作, 注浆采用孔口封闭静压前进式注浆法, 通过注浆泵及注浆管路向注浆孔内进行注浆, 对地层破碎区域、漏失区域、隔水层薄弱区进行注浆加固治理。

根据现场注浆工况, 采用以下参数确定注浆压力: 静水压力 p_0 为 1.92 MPa, 注浆孔半径 r_c 为 7.6×10^{-2} m, 注浆流量 Q 为 50 L/min, 选择普通硅酸盐水泥作为注浆材料进行注浆。根据现场岩芯取样和压水试验结果, 为了保证底板含水层裂隙开度较大 ($b_0 = 0.5$ mm) 的裂缝得到充分封堵, 选择浆液水灰比为 1.0 的宾汉流体。

一般情况下, 注浆压力越大, 浆液扩散距离越远, 但注浆压力过大可导致巷道底板隆起, 浆液扩散到不需要加固的裂隙中, 因此应合理确定注浆压力。根据相关矿区工程经验, 设计浆液扩散半径为 20 m, 结合式 (19) 得到所需注浆压力 12.0 MPa, 实际工程中采用注浆压力为 12.0 MPa 对 22 采区 L₁₋₂灰岩含水层进行注浆改造。

3.3 注浆加固效果检验

现场进行注浆的钻孔总共分为注 1 孔、注 2 孔和注 3 孔三个主孔, 注 1 孔下附带 11 个分支孔、注 2 孔下附带 10 个分支孔, 注 3 孔下附带 6 个分支孔, 共施工 3 个孔组 27 个分支孔, 钻孔位置主要分布在 22 采区东部区域。钻孔布置示意图如图 9 所示, 部分钻孔注浆情况见表 1, 注浆施工现场图如图 10 所示。

依据 22 采区底板区域水害治理注浆改造施工情况, 共施工 3 个孔组 27 个分支孔, 累计完成进尺 24 944.44 m, 累计注浆量 105 339.26 t, 注浆终压 12.0 MPa, 区域内底板 L₁₋₂灰岩地面钻孔钻探和注浆工艺、各项注浆参数满足要求, 并且对三孔组定向分支孔受注段注浆后进行了压水试验, 显示在 3 ~ 6 min 内孔口压力迅速升至 11 ~ 13 MPa, 吸水率远小于设计要求的 0.01 (L/min·m·m), 注浆质量均达到设计要求。L₁₋₂灰岩含水层得到有效改造。

4 结论

1) 本文将浆液视为具有黏度时变性的宾汉流体, 研究了浆液在水平裂隙中的扩散机理; 建立了恒定注浆速率下考虑浆液黏度时变性的一维渗透注浆理论模型。在该模型中, 如果已知含水层静水压力和注浆流量, 即可得到预定浆液扩散半径所需要的注浆压力。

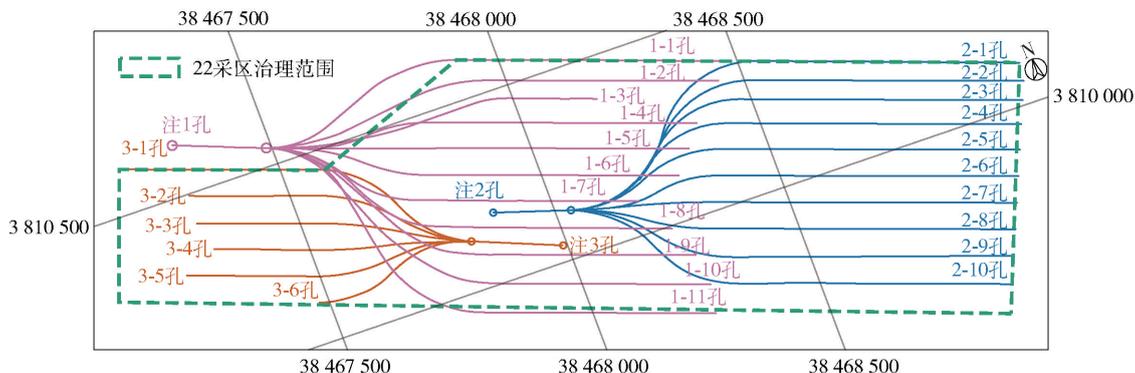


图9 钻孔布置示意图

表1 部分钻孔注浆情况

钻孔编号	设计孔深/m	实际完钻孔深/m	孔径 Φ /mm	钻探进尺/m	注入浆液量/t	平均单位吸浆量/ ($t \cdot m^{-1}$)
1-1	1 373.55	1 466.00	152	996.62	2 046.93	2.050
1-2	1 434.51	1 435.00	152	965.62	475.210	0.490
1-3	1 405.42	1 405.88	152	936.50	2 815.08	3.000
2-1	1 540.54	1 540.54	152	1 097.98	860.370	0.330
2-2	1 502.82	1 502.82	152	1 060.26	423.340	0.400
2-3	1 477.59	1 478.00	152	1 035.44	8 173.04	7.890
3-1	1 242.32	1 243.00	152	774.00	13 745.9	17.76
3-2	1 216.12	1 073.69	152	604.69	16 421.4	27.16
3-3	1 043.26	1 044.00	152	575.00	3 589.65	6.420



图10 注浆施工现场

2) 为了保证赵家寨煤矿 22 采区工作面的安全开采,根据地质勘探材料,对 L_{1-2} 灰岩含水层进行了注浆充填改造,使底板成为工作面安全隔水层。通过现场钻孔,确定了裂隙含水层的注浆区域,利用浆液扩散理论模型确定了预定浆液扩散距离下的注浆压力。

3) 在赵家寨煤矿对浆液扩散模型进行了现场验证。当设计浆液扩散距离为 20 m 时,注浆压力设置为 12.0 MPa 时,注浆加固效果良好。实践证明在 22 采区工作面生产过程中,针对底板含水层进行注浆充填改造,可有效防控底板突水风险,保障矿井安全生产。

[参考文献]

- [1] 李昂,杨钧皓,王峰,等. 深部高承压水多层结构底板破坏机理及应用研究[J]. 煤炭科学技术, 1-17.
- [2] 张党育,武斌,贾靖,等. 基于微震数据及模型的煤矿水害“双驱动”预警体系构建与应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 242-255.
- [3] 曾一凡,于超,武强,等. 煤矿防治水“三区”划分方法及其水害防治意义[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3605-3618.
- [4] 余国锋,袁亮,任波,等. 底板突水灾害大数据预测预警平台[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3502-3514.
- [5] 尹尚先,王屹,尹慧超,等. 深部底板奥灰薄灰突水机理及全时空防治技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1855-1864.
- [6] 谢经鹏,杨柳华,郑攻关,等. 充填料浆泌水特性及其微观结构演变[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(4): 1-7.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 魏建平, 姚邦华, 刘勇, 等. 裂隙煤体注浆浆液扩散规律及变质量渗流模型研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 204-212.
- [10] 尚宏波, 靳德武, 赵春虎, 等. 砾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.
- [11] 荣阳阳. 石粉-水泥底板注浆材料及工程应用研究[D]. 河南理工大学, 2023.
- [12] 贺敬平, 周景凯, 刘培跃. 注浆改造顶-底板灰岩含水层技术应用实践研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(1): 67-76.
- [13] 董书宁, 刘其声, 王皓, 等. 煤层底板水害超前区域治理理论框架与关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 185-195.
- [14] 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.
- [15] 谷拴成, 孙冠临, 苏培莉, 等. 岩体裂隙动水注浆扩散半径影响试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 144-149.
- [16] 李华茂, 黄小广, 梁为民, 等. 椭圆形裂隙中渗透注浆扩散规律的研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2008, 27(5): 573-576.
- [17] 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.
- [18] 肖同强, 余子豪, 李怀珍, 等. 深部巷道围岩裂隙注浆加固浆液扩散规律研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(1): 16-24.
- [19] 郑志民. 基于浆液黏度时变性的竖向裂隙注浆扩散规律研究[J]. 铁道建筑技术, 2024, (8): 105-108, 148.
- [20] 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.
- [21] 范利丹, 胡彪, 邵红超. 不同温度条件下水泥注浆液性能的实验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 274-280.
- [22] 张彦奇, 刘超, 吕言新. 超细水泥浆液流变性能试验研究[J]. 中国矿山工程, 2012, 41(2): 56-58.
- [23] ZHAI M, MA D, BAI H. Diffusion Mechanism of slurry during grouting in a fractured aquifer: a case study in chensilou coal mine, China [J]. Mathematics 2022, 10, 1345.

Study on the Grouting Filling Reconstruction Mechanism of Floor Aquifer Considering the Time-varying Grout Viscosity

CHENG Shuaishuai¹, HUANG Cunhan², ZHANG Wei³, ZHAI Minglei¹, WANG Wenqiang¹, CAO Zhengzheng¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. Zhaojiazhai Coal Mine, Henan Xinzheng Coal Electricity Co., Ltd., Xinzheng 451184, China)

Abstract: Grouting is one of the main technical means to prevent water inrush disaster of aquifer in coal seam floor. By grouting reconstruction of floor limestone aquifer, it can be changed into water barrier or weak aquifer, which can effectively cure floor water damage and realize safe and efficient mining. In this paper, based on Bingham grout, a one-dimensional seepage grouting theoretical model with time-varying slurry viscosity under constant grouting rate was established. The quantitative relationship between the diffusion distance and grouting pressure of fissure grout was analyzed. The diffusion law of horizontal fissure grout was studied, and the diffusion mechanism of horizontal fissure grout was revealed. In this model, the grouting pressure required for a predetermined grout diffusion radius can be obtained by using known aquifer hydrostatic pressure and grouting flow. Finally, combined with the field grouting reconstruction project of L_{1-2} limestone aquifer in Zhaojiazhai 22 mining area, the research results were verified. The results of grouting reinforcement and reconstruction show that the grouting quality meets the design requirements, and the L_{1-2} limestone aquifer is effectively reconstructed.

Key words: fractured aquifer; bingham fluid; viscosity time variation; slurry diffusion; grouting filling