

煤层底板多分支水平井渗透注浆扩散规律 数值模拟研究

程万¹, 孙家应², 张毅², 李华², 石耀军³

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 安徽省煤田地质局第一勘探队, 安徽 淮南 232052;
3. 安徽省煤田地质局勘查研究院, 安徽 合肥 230094)

摘要:多分支水平井注浆堵水技术在矿井水害治理工程中应用很广泛,但深部地层注浆扩散范围缺乏定量表征方法,分支井水平间距、埋深设计因此缺乏理论依据。本文针对多分支水平井渗透注浆工艺,满足考虑岩层渗透率各向异性和水泥浆液、孔隙水两相渗流行为,构建了渗透注浆扩散的数值模型和简化的扩散半径理论模型,并结合实际工程案例开展了渗透注浆浆液扩散数值模拟工作。结果表明,各向异性地层中渗透浆液扩散范围呈现椭圆形,椭圆长轴沿着渗透率较大的顺层方向,椭圆短轴则垂直于层理面方向,为分支井间距、埋深设计和渗透注浆关键参数优化提供了参考依据。

关键词:渗透注浆;水平井;矿井水害防治;各向异性;分支井

中图分类号:P634.7;TD74 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)05-0133-07

Numerical simulation research on diffusion law of seepage grouting in multi-branch horizontal well of coal seam floor

CHENG Wan¹, SUN Jiaying², ZHANG Yi², LI Hua², SHI Yaojun³

(1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. First Exploration Team of Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Huainan Anhui 232052, China;

3. Exploration Research Institute, Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Hefei Anhui 230094, China)

Abstract: Grouting sealing technology in multi-branch horizontal wells has been widely used in the water hazard control of mining wells. However, the quantitative characterization method for diffusion range of grouting in the deep formation is lack of research, therefore references for space and buried depth of multi-branch horizontal wells are inadequate. Aiming at seepage grouting technology for multi-branch horizontal wells and considering the anisotropic permeability, two phase flow of cement grouting and porous water, a numerical diffusion model for seepage grouting and a theoretical model for simplified diffusion radius are built in this paper, and the numerical simulations on the seepage grouting are conducted combining with actual engineering cases. The results show that the seepage diffusion area in anisotropic formations tends to be ellipse. The major axis of ellipse is along the bedding plane which has a larger permeability, while the minor axis is perpendicular to the bedding plane. These researches provide some references for the design of space and buried depth of multi-branch horizontal wells and key parameters optimization for seepage grouting.

Key words: seepage grouting; horizontal well; water hazard control in mining wells; anisotropy; multi-branch well

收稿日期:2023-01-29; 修回日期:2023-06-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.019

基金项目:安徽省煤田地质局重点科技攻关项目“两淮矿区地面定向多分支水平井高效钻进技术体系研究”(编号:皖煤地科2020-2)

第一作者:程万,男,汉族,1987年生,副研究员,博士生导师,地质工程专业,博士,长期从事非常规地质能源井壁稳定、水力压裂、钻井力学方面的教学与科研工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,chengwancup@163.com。

引用格式:程万,孙家应,张毅,等.煤层底板多分支水平井渗透注浆扩散规律数值模拟研究[J].钻探工程,2023,50(5):133-139.

CHENG Wan, SUN Jiaying, ZHANG Yi, et al. Numerical simulation research on diffusion law of seepage grouting in multi-branch horizontal well of coal seam floor[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(5):133-139.

0 引言

两淮煤田在开采过程中受到了煤层下部奥陶系岩溶水害的威胁^[1],煤矿突水、淹井事故时有发生,造成了巨大的经济损失。多分支水平井注浆堵水技术^[2]是煤田深部水害治理的核心技术之一,该技术主要采用多分支水平井对煤层底板某一深度的含水层进行注浆,分支井主要呈现水平展布,各分支按照一定的顺序进行钻孔和注浆施工,在奥灰含水层和煤层之间形成一定厚度的隔水层。它主要封堵岩层中的裂隙、断层、陷落柱等导水通道,从而避免采煤巷道、工作面突水致灾事故发生^[3]。

国内外学者针对渗透注浆技术,从理论和试验两方面开展了研究,主要是为了明确浆液扩散范围、注浆压力、地层渗透率、注浆液量、注浆排量、浆液流变性之间的规律,形成了多个渗透注浆扩散理论模型,包括球形扩散模型^[4]、柱形扩散模型^[5]、平行板扩散模型^[6-7]、圆管扩散模型^[8-9]、裂隙网格扩散模型^[2,10-11]等。这些理论模型大多适用于浅层砂砾土或具有足够开度的裂隙性岩体,针对于深部多分支水平井注浆扩散机理的研究仍有很多需要改进的地方^[12-16]。煤层底板多分支水平井注浆技术与传统的注浆技术相比,还需要明确分支井水平段的间距、分支井距离煤层底板的深度。孟凡丁等^[12]针对多分支水平井注浆,构建了深埋和渗透率各向同性条件下的水泥浆液-孔隙水两相流动数值模型,并分析了渗透率、孔隙度、注浆压力、水灰比等因素对注浆扩散距离的影响规律^[17]。然而,深部沉积岩的渗透率往往存在各向异性,垂向于层理面的渗透率一般远小于顺层的渗透率,这使得浆液扩散趋向于渗透率更大的方向^[18-19]。考虑水泥浆液-孔隙水两相渗透的浆液扩散模型因计算公式复杂、参数多,在工程应用时不便捷。因此,还需针对多分支水平井渗透注浆浆液-孔隙水两相渗透行为,构建简化的扩散半径理论模型。

鉴于此,本文针对多分支水平井渗透注浆工艺,考虑岩层渗透率各向异性和水泥浆液-孔隙水两相渗流行为,构建了渗透注浆扩散数值模型和简化的扩散半径理论模型,并针对两淮煤田水害防治问题开展了数值模拟研究,为多分支井间距设计、埋深设计和注浆关键参数优化提供了参考依据。

1 基本假设与模型构建

1.1 基本假设

为了构建渗透注浆两相流数学模型,需要作出以下基本假设:(1)裂隙、孔隙发育的底板灰岩地层等效为各向异性孔隙介质,水泥浆液在底板灰岩中的渗流为多孔介质达西渗流;(2)水泥浆液和原孔隙水为两种相态的流体介质,且都为均质的不可压缩的牛顿流体,忽略浆水相交界面水对浆液的稀释作用;(3)底板灰岩中原始裂隙为水饱和状态,水泥浆液注入后为两相共存;(4)分支井眼长达数百米,故假设井眼轴线横截面上水泥浆液渗流满足二维径向渗流,如图1所示。图1中 p_w 为井眼内的流体压力, r_w 为井眼半径, a 为水泥浆液水平扩散半径, b 为水泥浆液垂向扩散半径。由于水平方向一般为顺层方向,且顺层渗透率一般远高于垂直于层理面的渗透率,浆液扩散区域呈现椭圆展布,则 a 为椭圆长轴, b 为椭圆短轴。

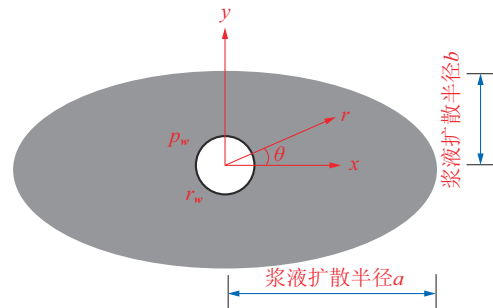


图1 注浆井筒与浆液扩散区域示意

Fig.1 Sketch of grouting borehole and diffusion area

1.2 数学模型

1.2.1 数值模型

水泥浆液在岩层中的运动过程实质上是浆液驱替地下水并填充多孔介质中裂隙、孔隙和断层带等导水通道的过程。孔隙水在底板灰岩中流动时的质量守恒方程为:

$$\begin{cases} -\frac{\partial}{\partial x}(\rho_w V_{wx}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho_w V_{wy}) = \frac{\partial(\phi \rho_w S_w)}{\partial t} \\ -\frac{\partial}{\partial x}(\rho_c V_{cx}) - \frac{\partial}{\partial y}(\rho_c V_{cy}) = \frac{\partial(\phi \rho_c S_c)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{wx} 、 V_{wy} —— x 和 y 方向上孔隙中水相渗流速度, m/s; V_{cx} 、 V_{cy} —— x 和 y 方向上孔隙中水泥浆液渗流速度, m/s; ρ_c 、 ρ_w ——孔隙中水泥浆液和水的密

度, kg/m^3 ; S_c, S_w ——孔隙中水泥浆液和水的饱和度, 无量纲; ϕ ——平均有效孔隙率, 无量纲。

在不可压缩流体体积法中, 浆水流体的混合密度会随运动位置的变化而变化:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (2)$$

混合液密度和粘度可为水泥浆液与孔隙水的加权平均:

$$\begin{cases} \rho = \rho_c S_c + \rho_w S_w \\ \mu = \mu_c S_c + \mu_w S_w \end{cases} \quad (3)$$

式中: μ_w ——水的粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_c ——水泥浆液的粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ ——混合液的密度, kg/m^3 ; μ ——混合液的粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

根据广义达西定律, 流体渗流速度为:

$$\begin{aligned} V_x &= -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ V_y &= -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: k_x, k_y ——岩体在 x 方向和与 y 方向的渗透率, m^2 。

孔隙水和水泥浆液在底板灰岩中流动时速度为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{wx} \\ V_{wy} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} S_w \\ \begin{bmatrix} V_{cx} \\ V_{cy} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} S_c \end{aligned} \quad (5)$$

孔隙水和水泥浆液两相饱和度之和为1。初始条件:

$$\begin{aligned} S_w(r, t=0) &= 1 \\ S_c(r, t=0) &= 0 \\ p(r, t=0) &= p_0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: p_0 ——灰岩地层原始孔隙压力, Pa 。

边界条件:

$$\begin{cases} S_w(r=r_w, t>0) = 0 & S_c(r=r_w, t>0) = 1 \\ p(r=r_w, t>0) = p_w \text{ 或 } \lim_{r \rightarrow r_w} \frac{2\pi r k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} = q(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: q ——单位长度井眼上的注浆排量, m^2/s ; r_w ——井眼半径, m ; k ——岩体等效渗透率, $k = \sqrt{k_x k_y}$, m^2 。

1.2.2 简化的理论模型

在各向异性渗透率的地层注浆过程中, 孔隙压

力等值线呈现近似椭圆形分布, 椭圆长轴与较大的主渗透率方向重合。水泥浆液粘度远大于孔隙水粘度, 注浆过程实际上可等同于高粘度流体驱替低粘度流体的物理过程。根据注浆区域全局范围内体积平衡, 注浆扩散区域满足:

$$(\pi ab - \pi r_w^2) \phi L + \pi r_w^2 L = Q_{in} \quad (8)$$

式中: L ——分支井眼水平长度, m ; Q_{in} ——分支井眼累计注浆量, m^3 。

注浆扩散区域成椭圆形, 其长轴短轴满足:

$$ab = \frac{Q_{in} - \pi r_w^2 L}{\pi \phi L} + r_w^2 \quad (9)$$

在各向异性渗流条件下, 注浆扩散区域椭圆长轴与短轴之比为 $\beta = \sqrt{k_x/k_y}$, 则椭圆形扩散区域长轴为:

$$a = \sqrt{\beta \left(\frac{Q_{in} - \pi r_w^2 L}{\pi \phi L} + r_w^2 \right)} \quad (10)$$

2 案例分析

两淮煤田某煤矿地层渗透率变化范围为 $1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, 水平方向大致为顺层方向, 其水平渗透率是垂向渗透率 $10 \sim 1000$ 倍, 孔隙率变化范围为 $0.01 \sim 0.05$ 。孔口注浆压力最高为 9.6 MPa , 井底注浆压力最高约为 15 MPa 。煤层底板隔水层承受的水压约 6.2 MPa , 底板隔水层厚度要求大于 62 m 。注浆层位到1煤底板间岩层在注浆后可视为相对隔水层, 1煤下 80 m 作为注浆目的层。浆液的水灰比变化范围为 $1.2:1 \sim 1.4:1$, 模拟时长设为 24 h 。

由于太灰含水层和奥灰顶板渗透率、孔隙率变化较大, 且实际注浆过程中水灰比和注浆压力也是一个范围, 故设定一系列参数进行注浆数值模拟。在各向同性渗透率的情况下, 注浆 24 h 的扩散半径数值解和简化的理论解如表1所示, 二者吻合良好。由公式(10)可知, 水泥浆浆液扩散范围主要取决于注浆浆液量和地层的有效孔隙度。

根据表1中第1行的主要参数开展注浆浆液扩散数值模拟, 获得了浆液和水饱和度如图2所示。在各向同性渗透率的情况下, 水泥浆液扩散区域呈现圆形分布。图2(a)为各向同性渗透率条件下注浆 24 h 井周地层孔隙水饱和度分布, 深红色区域的孔隙水饱和度为1, 蓝色区域孔隙水饱和度为0, 过渡带较窄。图2(b)为各向同性渗透率条件下注浆 24 h 井周

表1 各向同性地层注浆24 h的扩散半径

Table 1 Diffusion radius of grouting for 24-hours in isotropic formation

编号	孔隙率	渗透率/ D	注浆压力/ MPa	水灰比	单位长度井段上累 计注浆量/m ³	浆液扩散半径 (数值解)/m	浆液扩散半径(理 论解)/m	相对误差/ %
1	0.01	10	15	1.3	45.46	38.8	38.0	1.96
2	0.03	10	15	1.3	49.75	23.2	23.0	0.87
3	0.05	10	15	1.3	51.85	18.28	18.16	0.66
4	0.03	1	15	1.3	6.4	7.88	8.0	2.03
5	0.03	5	15	1.3	26.33	16.78	16.7	0.40
6	0.03	1	12.5	1.3	5.18	7.28	7.40	0.48
7	0.03	1	10	1.3	4.22	6.48	6.68	0.13
8	0.03	1	15	1.2	5.16	7.28	7.38	1.54
9	0.03	1	15	1.4	7.12	8.57	8.68	1.17

地层孔隙中水泥浆饱和度分布,深红色区域的水泥浆饱和度为1,对应的水泥浆液完全充填区,浆液凝固后胶结紧密,将该区域的半径视为数值模拟的扩散半径;图2(b)深蓝色区域表示水泥浆液饱和度为0,对应裂隙二次发育水体充填区和原生裂隙区;在深红色与深蓝色之间的区域,浆液饱和度介于0~1之间,对应非完全充填的过渡区。

图3为各向同性渗透率条件下的水泥浆液动态扩散过程中,围岩孔隙压力、孔隙水饱和度和孔隙中水泥浆饱和度随注浆时间的变化规律。随着注浆时间的推进,水泥浆浆液驱替孔隙水沿着径向方向运动。井周围岩的浆液扩散范围逐步增大,而孔隙水饱和度逐渐降为零,水泥浆浆液与原孔隙水过渡界限明显。如果岩层渗透率增加但孔隙率保持不变,则说明死孔隙减少而有效孔隙增多,有利于浆液的扩散。对于相同岩性的地层,孔隙率和渗透率一般为同步增长和减少;而对于不同岩性地层,存在孔隙率相同而渗透率不同的情况。当渗透率一定时,介质的孔隙率越大,则浆液扩散半径越小,如表1所示,原因为扩散导致死孔隙的存在;当孔隙率一定时,介质的渗透率越高,则浆液的扩散越快。

对比分析表1,可以发现注浆压力越大,浆液扩散速度越快;对于低渗透地层,可通过提高注浆压力来驱使水泥浆浆液扩散更远。浆液的水灰比越高,则浆液的粘度则越小,浆液扩散阻力越小,则浆液扩散速度越快,但是水泥浆浆液与原孔隙水过渡带越宽。在保证浆液能够有效封固地层的前提下,适当提高水灰比可以提高注浆效率。

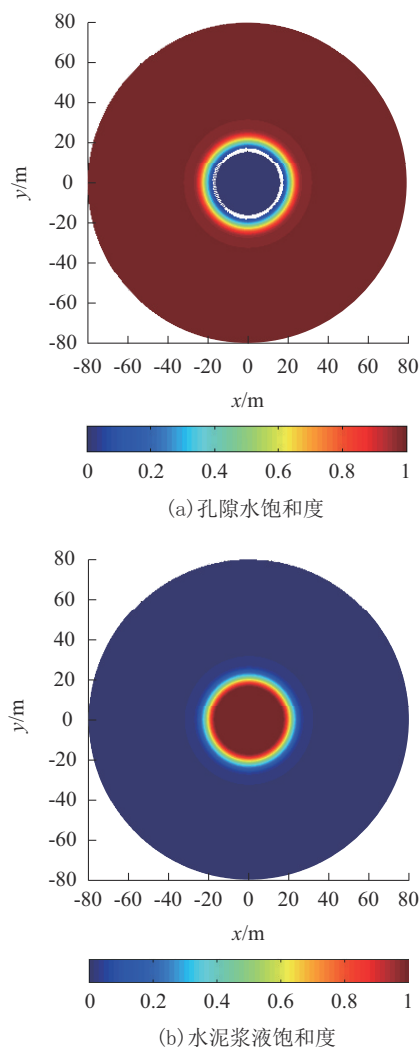


图2 各向同性地层注浆孔隙水饱和度和水泥浆液饱和度分布
Fig.2 Saturation distribution of pore water and cement grouting around the borehole in the isotropic formation

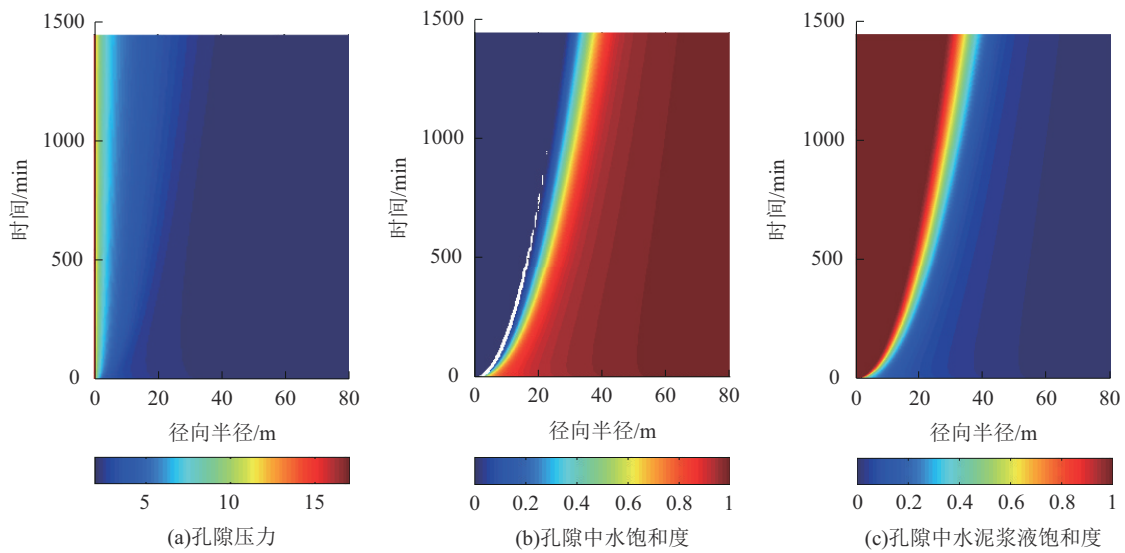


图 3 注浆过程中孔隙压力和饱和度随注浆时间的变化规律(表 1 中第 1 行案例)

Fig.3 Change law of pore pressure and pore water saturation with time in the process of cement grouting

在各向异性渗透率的情况下,注浆 24 h 的浆液者吻合良好,表明简化的理论模型可靠性较高。水平扩散半径数值解和简化的理论解如表 2 所示,二

表 2 各向异性注浆 24 h 的扩散半径

Table 2 Diffusion radius after 24-hour grouting in anisotropic formation

编号	孔隙率	水平渗透率/D、 垂向渗透率/D	注浆压力/ MPa	水灰比	单位长度井段上 累计注浆量/m ³	浆液水平扩散半 径(数值解)/m	浆液水平扩散半 径(理论解)/m	相对误差/ %
1	0.03	100、1	15	1.3	47.75	75.4	71.17	5.94
2	0.05	100、1	15	1.3	52.15	59.4	57.61	3.10
3	0.07	100、1	15	1.3	55.45	52.7	50.21	4.96
4	0.05	10、0.1	15	1.3	6.5	22.7	20.32	11.71
5	0.05	25、1	15	1.3	29.5	32.4	30.63	5.78
6	0.05	100、1	12.5	1.3	44.15	55.7	53.01	5.07
7	0.05	100、1	10	1.3	36.50	51.4	48.19	6.66
8	0.05	100、1	15	1.2	41.65	52.5	51.48	2.0
9	0.05	100、1	15	1.4	63.04	64.2	63.34	1.4

在各向异性渗透率的地层中注浆,水泥浆液扩散区域呈现椭圆形分布,水泥浆液和原孔隙水饱和度分布如图 4 所示。椭圆长轴与较大的水平渗透率方向重合,椭圆短轴则垂直于层理面。水平方向渗透率与垂向渗透率比值越高,浆液水平扩散距离越远;扩散区域椭圆长轴可定义为水泥浆液在水平方向上的扩散半径,短轴可定义为水泥浆液在垂向的扩散半径。在水泥浆液饱和度超过 90% 的区域,水泥浆液凝固后具有很好的密封性,能够起到防治灰岩水害的目的,分支井水平段的间距可设计为不大

于浆液水平扩散半径的 2 倍。为了防治煤矿巷道和 工作面冒浆等不良现象,分支井水平段距离目标煤层底板垂向距离建议不小于浆液垂向扩散半径。

3 结论

(1) 本文针对多分支水平井渗透注浆工艺,考虑岩层渗透率各向异性和浆液、孔隙水两相渗流行为,构建了多分支水平井渗透注浆扩散范围的数值模型和简化的理论模型。在各向异性渗透率的地层中注浆时,在垂直于井眼轴线的截面上,水泥浆液扩散区

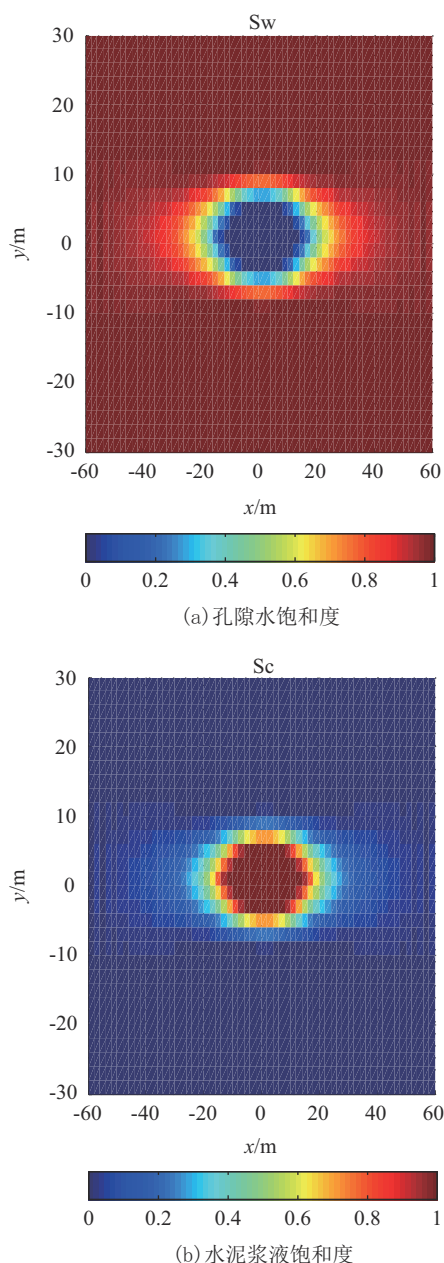


图4 各向异性地层注浆时饱和度分布

Fig.4 Saturation distribution around the borehole when grouting in anisotropic formation

域呈现椭圆形分布。

(2) 分支井间距的确定应依据该地区地层条件下注浆浆液的扩散范围,分支井水平段的间距可设计为不大于浆液水平扩散半径的2倍。为了防止巷道和工作面冒浆,分支井水平段距离目标煤层底板垂向距离建议不小于浆液垂向扩散半径。

(3) 在保证浆液凝固后能够有效封固地层的前提下,适当提高水灰比可以提高注浆效率。

参考文献(References):

- [1] 解保磊. 淮南煤田新集煤矿水平多分支定向注浆防治水技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
XIE Baolei. Study on the technology of multi-branch directional grouting by multi-branch horizontal well for water control in Xinji Coal Mine, Huainan Coalfield[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [2] 胡焮彭. 煤层底板注浆加固多分支水平井钻井工艺技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
HU Xinpeng. Research on drilling technology of multilateral horizontal reinforced by grouting in coal seam floor[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2020.
- [3] 赵伟, 张跃恒, 董振国, 等. 敏东一矿软岩区地下水注浆治理技术及应用研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(6): 87-94.
ZHAO Wei, ZHANG Yueheng, DONG Zhenguo, et al. Application research on groundwater grouting treatment technology in the soft rock area of Mindong No.1 Mine[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6): 87-94.
- [4] 秦鹏飞. 砂砾石土渗透注浆浆液扩散规律及扩散半径影响因素试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(5): 368-374.
QIN Pengfei. Test research on cement slurry diffusion feature of penetration grouting and its influence factors in sand and gravel layer[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(5): 368-374.
- [5] 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, 38(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, 38(11): 1402-1407.
- [6] 许兴亮, 刘为民, 宋志坚, 等. 单裂隙模型水泥浆液渗透扩散规律研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(12): 103-106.
XU Xingliang, LIU Weimin, SONG Zhijian, et al. Study on permeation and diffusion law of cement slurry in single fracture mode[J]. Coal Engineering, 2018, 50(12): 103-106.
- [7] 胡少银, 刘泉声, 李世辉, 等. 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): 112-126.
HU Shaoyin, LIU Quansheng, LI Shihui, et al. Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 112-126.
- [8] 杨秀竹, 王星华, 雷金山. 宾汉体浆液扩散半径的研究及应用[J]. 水利学报, 2004(6): 75-80.
YANG Xiuzhu, WANG Xinghua, LEI Jinshan. Study on grouting diffusion radius of Bingham fluids[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 75-80.
- [9] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1803-1806.
YANG Xiuzhu, LEI Jinshan, XIA Linong, et al. Study on

- grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005,26(11):1803-1806.
- [10] 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.
- [11] 林涛,赵志宏,周书明.裂隙岩体注浆块体离散元方法模拟分析[J].*地下空间与工程学报*,2021,17(4):1080-1090.
LIN Tao, ZHAO Zhihong, ZHOU Shuming. Block-based DEM modeling on grout penetration in fractured rock masses [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021,17(4):1080-1090.
- [12] 孟凡丁,许光泉,孙贵,等.深埋条件下水平分支孔注浆模拟分析[J].*绿色科技*,2021,23(14):194-213.
MENG Fanding, XU Guangquan, SUN Gui, et al. Grouting simulation with horizontal branch drilling under deep buried condition[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2021,23(14):194-213.
- [13] 韩磊,陈建生,陈亮.帷幕灌浆扩散半径及数值模拟的研究[J].*岩土力学*,2012,33(7):2235-2240.
HAN Lei, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Research on diffusion radius and numerical simulation in curtain grouting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012,33(7):2235-2240.
- [14] 程桦,刘向阳,荣传新,等.深立井地面注浆浆液渗流规律数值模拟与应用[J].*安徽理工大学学报*,2018,38(1):10-16.
CHENG Hua, LIU Xiangyang, RONG Chuanxin, et al. Numerical simulation and application of seepage regularity of ground grouting in deep vertical shaft[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology*, 2018,38(1):10-16.
- [15] 孙小康.深部裂隙岩体注浆浆液扩散机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
SUN Xiaokang. Study on the diffusion mechanisms of grouting within fractured rock mass under deep ground [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [16] 朱合轩.深部随机开度裂隙岩体渗透注浆扩散机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
ZHU Hexuan. Research on study on diffusion mechanism of seepage grouting in deep fractured rock mass with random opening[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [17] 谢俊.压密注浆浆液以及扩散半径的参数分析[J].*探矿工程*, 1998(S1):69-72.
XIE Jun. Compaction grouting fluid and parametrial analysis of its dispersion radius [J]. *Exploration Engineering*, 1998(S1): 69-72.
- [18] 代永文,李建强,林恩,等.强岩溶地区盾构隧道注浆处理方案设计[J].*钻探工程*,2021,48(6):118-125.
DAI Yongwen, LI Jianqiang, LIN En, et al. Grouting design for shield tunnels in strong karst areas [J]. *Drilling Engineering*, 2021,48(6):118-125.
- [19] 张正雄.岩溶坝基帷幕灌浆高注浆量控制措施与效果分析[J].*钻探工程*,2021,48(7):121-125.
ZHANG Zhengxiong. Measures and effect of high grouting volume control in curtain grouting for karst dam foundation [J]. *Drilling Engineering*, 2021,48(7):121-125.

(编辑 荐华)