

文章编号: 1671-251X(2023)01-0146-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022060110

叠加效应下多孔水力割缝联合抽采参数优化研究

倪兴^{1,2}

- (1. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122;
2. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 针对低透高瓦斯煤层在水力割缝过程中存在割缝扰动范围不清、割缝钻孔最佳布孔间距不明确的问题,以贵州豫能高山煤矿1908工作面为研究背景,在建立水力割缝煤体瓦斯抽采流固耦合模型的基础上,借助COMSOL数值模拟软件对高山煤矿1908工作面水力割缝钻孔有效抽采半径、孔周瓦斯压力变化情况进行了研究,并依据模拟结果深入分析了水力割缝钻孔在多孔布置时,受孔间抽采叠加效应影响下有效抽采范围及孔间瓦斯压力变化情况,最终得出其最佳布孔间距及抽采时间。结果表明:①水力割缝钻孔单孔抽采效果随割缝深度显著提升,但钻孔有效抽采半径增速变缓,为得到最佳割缝深度,对各钻孔有效抽采半径进行三项式拟合,随着水力割缝深度的增加,有效抽采半径范围在快速增加后放缓且最终趋于平稳,并得出了高山煤矿最佳割缝深度为1.5 m,有效抽采半径达为3.1 m。②在相同抽采时间下,煤体内瓦斯压力随两孔距的缩短而降低,说明孔间距越小,孔间受水力割缝所造成的扰动越剧烈,抽采叠加效应影响越显著。③在保证消突达标的前提下,选择孔距为7 m进行水力割缝钻孔布置效果最佳。④原本在“正方形”布孔方式中,孔心位置可能出现抽采盲区的点最大瓦斯压力仅为0.67 MPa,小于临界值,“正方形”布孔较“正三角”布孔的有效覆盖面积更大且减少了抽采重复区域,从而减少了钻孔施工量,提高了瓦斯治理效率。⑤通过现场试验得出在60 d抽采周期内,水力割缝钻孔布置采用孔距为7 m的“正方形”布孔可有效提高瓦斯抽采浓度及抽采纯量,并达到了延长高效抽采周期的效果,且可消除孔间煤体瓦斯抽采空白带,实现孔间区域煤体消突达标。

关键词: 瓦斯抽采; 水力割缝; 割缝钻孔; 叠加效应; 有效抽采半径; 布孔优化

中图分类号: TD712

文献标志码: A

Optimization of multi-hole hydraulic cutting combined extraction parameters under superposition effect

NI Xing^{1,2}

(1. CCTEG Shengyang Research Institute, Fushun 113122, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: In the process of hydraulic cutting in low permeability and high gas coal seams, there are problems such as unclear cutting disturbance range and unclear optimal hole spacing for cutting drilling. In order to solve the above problems, the 1908 working face of Gaoshan Coal Mine in Yuneng, Guizhou Province is taken as the research background. On the basis of establishing the fluid-solid coupling model of gas extraction in coal body with hydraulic cutting, with the help of COMSOL numerical simulation software, the effective extraction radius of hydraulic cutting borehole and the change of gas pressure around the borehole in the 1908 working face of Gaoshan Coal Mine are studied. Based on the simulation results, the effective extraction range and gas pressure change between holes are analyzed under the influence of the extraction superposition effect between holes when the hydraulic cutting drilling holes are arranged in multiple holes. Finally, the optimal hole spacing and extraction

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-08-29; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YF080420701)。

作者简介: 倪兴(1987—), 男, 山东临朐人, 助理研究员, 硕士, 主要从事矿井灾害防治研究工作, E-mail: nixing1960@163.com。

引用格式: 倪兴. 叠加效应下多孔水力割缝联合抽采参数优化研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 146-152.

NI Xing. Optimization of multi-hole hydraulic cutting combined extraction parameters under superposition effect[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 146-152.



扫码移动阅读

time are obtained. The results show the following points. ① The single hole extraction effect of hydraulic cutting drilling is significantly improved with the cutting depth. However, the effective extraction radius of the borehole increases slowly. In order to obtain the best cutting depth, the effective extraction radius of each borehole is fitted in a trinomial way. With the increase of hydraulic cutting depth, the range of effective extraction radius slows down after rapid increase and finally tends to be stable. The optimal cutting depth of Gaoshan Coal Mine is 1.5 m, and the effective extraction radius is 3.1 m. ② Under the same extraction time, the gas pressure in the coal body decreases with the shortening of the distance between two holes. It shows that the smaller the hole spacing is, the more serious the disturbance caused by hydraulic cutting between holes is, and the more significant the influence of the extraction superposition effect is. ③ On the premise of ensuring that the outburst elimination meets the standard, it is best to choose a hole spacing of 7 m for arranging hydraulic cutting drilling. ④ Originally, in the "square" hole arrangement, the maximum gas pressure at the point where the blind area may occur at the hole center is only 0.67 MPa, which is less than the critical value. The effective coverage area of the "square" hole arrangement is larger than that of the "triangle" hole arrangement, and the repeated area of drainage is reduced. This reduces the amount of drilling and improves the efficiency of gas control. ⑤ Through field test, it is concluded that in the 60 d extraction period, the hydraulic cutting drilling arrangement with a hole spacing of 7 m and a "square" hole arrangement can effectively improve the concentration and purity of gas extraction. It can also extend the period of high efficiency extraction. It can eliminate the blank zone of gas extraction in the coal body between boreholes to eliminate the outburst of the coal body in the area between boreholes.

Key words: gas extraction; hydraulic cutting; cutting drilling; superimposed effect; effective extraction radius; hole layout optimization

0 引言

通过向煤层中施工钻孔是如今解决煤层瓦斯问题最为普遍的一种方式^[1],而在低透高瓦斯矿井的日常瓦斯治理工作中,施工普通钻孔往往面临瓦斯抽不出、治理周期长等问题,严重制约煤矿安全生产工作。

许多学者针对低透高瓦斯矿井瓦斯治理方法进行了大量的试验与研究。袁亮等^[2]提出了水力化技术需要克服的关键技术难题,为水力割缝技术指明了研究方向。许克南等^[3]考虑剪胀性对于煤体孔隙率、渗透率的影响,构建了瓦斯抽采钻孔的渗流动态流固耦合模型。杜金磊等^[4]针对厚煤层增透卸压效果较差的问题,提出了上下分层水力割缝协同卸压增透技术,在厚煤层中形成互相贯通的立体裂隙网络,增大了有效抽采面积。刘生龙等^[5]针对割缝过程中微裂缝大量发育与连通的物理机制,提出了评价增透效果的指标并确定了割缝最优空间分布模式。孙鑫等^[6]针对增透时喷嘴旋转参数的确定问题,通过相似模拟试验得到了转速、切缝时间、切削半径之间的关系。袁本庆^[7]针对水力化卸压增透技术效果评价指标不明的现状,通过分析水力化措施的技术原理,确定了基于坚固性系数的适用条件及卸压变形量等评价指标。上述研究不仅考虑了水力

化措施下煤体的内在破碎机理,还分析了水力化措施在不同工况下的适用性,优化了抽采参数。然而,现有研究仍存在2个方面不足:①以弹塑性本构为理论模型难以确定割缝周围裂隙发育形成的有效扰动范围。②受割缝钻孔孔间叠加效应影响,割缝多孔之间相互扰动作用尚不明确。

针对低透高瓦斯煤层在水力割缝过程中存在割缝扰动范围不清、割缝钻孔最佳布孔间距不明确的问题,本文在建立水力割缝煤体瓦斯抽采流固耦合模型的基础上,以贵州豫能高山煤矿1908工作面为研究背景,借助COMSOL数值模拟软件对水力割缝钻孔有效抽采半径、孔周瓦斯压力变化情况进行研究,得出了最佳割缝深度。对相邻孔间扰动及多孔连抽造成叠加效应下水力割缝的有效抽采半径进行模拟研究,得出了最佳布孔间距及抽采时间。对水力割缝钻孔在多孔多排布置时,受孔间抽采叠加效应影响下有效抽采范围及孔间瓦斯压力变化情况进行了分析,对水力割缝钻孔不同布孔方式进行了分析比较,并进行了现场试验。

1 水力割缝煤体瓦斯抽采流固耦合模型

为构建水力割缝煤体瓦斯抽采流固耦合模型,将煤体假定为多孔、均匀、各向同性介质,将原始煤体及割裂煤体内流动的瓦斯假定为服从达西定律且不受温度影响的理想气体。

在煤体中渗流的瓦斯遵循质量守恒定律。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho_0 v) = 0 \quad (1)$$

式中： ρ 为煤体的密度， kg/m^3 ； t 为瓦斯流动时长， s ； ∇ 为梯度函数； ρ_0 为原始煤层内瓦斯密度， kg/m^3 ； v 为煤体内瓦斯渗流速度， m/s 。

瓦斯在割裂破碎煤体及原始煤体内流动遵守达西流动定律^[8]。

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (2)$$

式中： k 为孔周煤体渗透率， m^2 ； μ 为瓦斯动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； p 为煤体内瓦斯压力， MPa 。

经水力割缝后，钻孔四周煤体呈割裂破碎状态，煤体内的瓦斯大多受扰动后逸散，瓦斯压力极小，因此将该部分煤体瓦斯流动视为一常量。原始煤体孔隙率受煤体架构变化影响，煤体孔隙率变化为^[9-10]

$$q = 1 - \frac{(1 - q_0)}{1 + \varepsilon_v} \left(1 - \frac{\Delta p}{K_s} \right) \quad (3)$$

式中： q_0 为原始煤体孔隙率； ε_v 为煤体体积应变； Δp 为瓦斯压力变化量， MPa ； K_s 为煤体架构体积模量， MPa 。

割裂破碎部分煤体渗透率可结合 Kozeny-Carman 方程得到^[10]。

$$k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left[1 + \frac{\varepsilon_v}{q_0} + \frac{\Delta p(1 - q_0)}{q_0 K_p} \right]^3 \quad (4)$$

式中： k_0 为煤体初始渗透率， m^2 ； K_p 为固体骨架体积模量， MPa 。

割裂煤体应变张量总和用几何方程表示为^[11-12]

$$\varepsilon_{i,j} = (\partial u_{i,j} + \partial u_{j,i}) / 2 \quad (5)$$

式中 $u_{i,j}$, $u_{j,i}$ 分别为在方向 i, j 下的位移量。

联立式(2)一式(5)建立经水力割缝后孔周割裂煤体与瓦斯流固耦合模型。

2 水力割缝煤体扰动范围数值模拟研究

2.1 工程背景

贵州豫能高山煤矿为煤与瓦斯突出矿井，1908 工作面煤层埋深约为 547 m，平均厚度为 7.4 m 且厚度变化较大，原始瓦斯压力为 1.04 MPa，瓦斯含量为 $9.3 \text{ m}^3/\text{t}$ ，煤层透气性系数为 $0.07 \text{ m}^2 \cdot (\text{MPa}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ，属于难抽采煤层。

2.2 数值模拟参数设定

借助 COMCOL 数值模拟软件模拟高山煤矿 1908 工作面第 3 循环阶段现场实际情况，具体参数见表 1。

表 1 数值模拟基础参数

Table 1 Numerical simulation of the basic parameters

参数	参数值
煤层初始瓦斯压力/MPa	1.04
孔隙率	0.048
煤体初始渗透率/ m^2	5.7×10^{-15}
割裂煤体渗透率/ m^2	3.4×10^{-11}
煤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 492
瓦斯密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.719
泊松比	0.29
黏聚力/MPa	0.92
瓦斯动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.71×10^{-5}
空气动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.07×10^{-5}

2.3 几何模型

结合高山煤矿 1908 工作面第 3 循环内煤岩情况，设置长度为 50 m，高度为 10 m 的二维几何模型，如图 1 所示。钻孔位于二维几何模型正中，划分自由度物理场控制网，数量为 6 580。

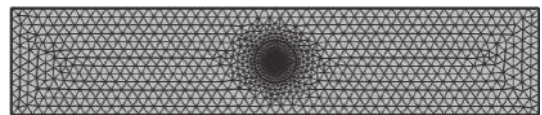


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

几何模型上边界设置上覆岩体均布载荷，下边界为固定约束，左右边界为辊支撑，钻孔及割缝边界为自由边界^[12]。

2.4 模拟结果与分析

为对比分析未施工水力割缝钻孔与施工水力割缝后不同破碎范围钻孔的卸压情况，自上而下设置了 6 组钻孔进行对比。第 1 组为未实施水力割缝钻孔，第 2—第 6 组钻孔为施工水力割缝后煤体受扰动破碎范围，分别为 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 m。模拟瓦斯抽采 60 d 后，钻孔四周煤体瓦斯压力分布情况如图 2 所示。可看出当钻孔未实施水力割缝时，瓦斯抽采 60 d 时，其钻孔四周煤体瓦斯压力变化区间明显小于施工水力割缝钻孔，其钻孔有效影响范围难以满足瓦斯治理基本要求。随着水力割缝造成扰动裂隙范围的增大，其孔周瓦斯影响范围逐渐增大，可见高压下割缝效果及瓦斯治理效果更佳。

经过瓦斯抽采后钻孔四周煤体瓦斯压力降至 0.74 MPa 以下的范围为钻孔有效抽采半径^[9]。通过对未实施水力割缝钻孔与不同割裂深度水力割缝钻孔进行对比，对照水平方向各组钻孔四周煤体瓦斯压力变化情况，结果如图 3 所示。

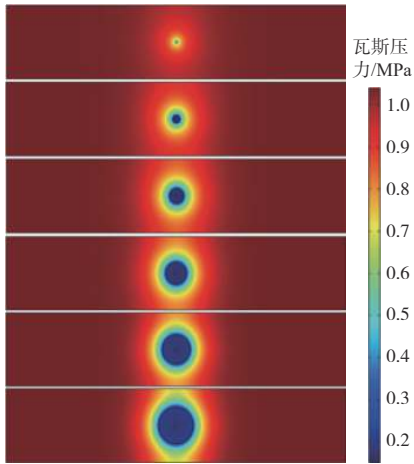


图2 抽采 60 d 后各钻孔四周煤体瓦斯压力分布

Fig. 2 The gas pressure distribution around each borehole after 60 days of extraction

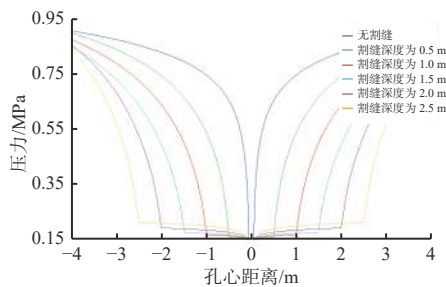


图3 钻孔四周瓦斯压力变化曲线

Fig. 3 Gas pressure variation curves around the borehole

由图3可看出,未实施水力割缝钻孔与割裂深度分别为0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 m的5组钻孔有效抽采半径分别为1.3, 2, 2.6, 3.1, 3.3, 3.5 m, 5组水力割缝钻孔相较于未实施水力割缝钻孔的有效抽采半径分别提高了53.85%, 100%, 138.46%, 153.85%, 169.54%,可见水力割缝钻孔单孔抽采效果随割缝深度显著提升,但钻孔有效抽采半径增速变缓。

为得到最佳割裂深度,对各钻孔有效抽采半径进行三项式拟合,拟合度 R^2 为0.999 2,有效抽采半径 y 随割缝深度 x 变化趋势如图4所示。

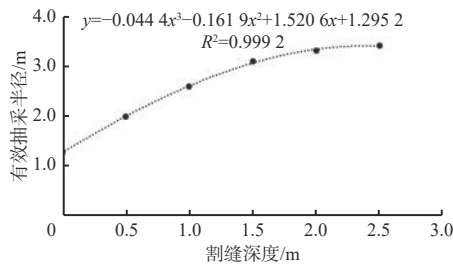


图4 有效抽采半径随割缝深度变化趋势

Fig. 4 The variation trend of the effective extraction radius varies with the cutting depth

从图4可看出:当钻孔水力割缝扰动深度超过1.5 m时,有效抽采半径呈现增势衰退,这是由于当

水力割缝到达一定深度后,进入煤体应力集中区时,割缝宽度及造成的扰动裂隙随割缝深度增加而减少,且割缝区域受煤岩体应力影响会出现闭合现象,瓦斯流动释放通道必然减少,此时继续增加水力割缝深度所增加的成本将远远大于钻孔有效抽采半径的增量,实际意义不大。因此,当高山煤矿1908工作面水力割缝深度为1.5 m时,有效抽采半径达3.1 m,其瓦斯治理效果最佳。

3 水力割裂钻孔布置参数优化研究

根据煤矿抽采经验,单排单钻孔难以实现厚煤层全覆盖消突达标的目的,难免会造成抽采空白带,因此,需研究瓦斯治理过程中多钻孔排布。通过模拟钻孔施工水力割缝造成的相邻孔间扰动及多孔连抽造成的叠加效应^[9,12],得出在最佳割裂深度下特定抽采时间的最优抽采孔距及最优布孔方式。掌握多孔多排钻孔最大孔间有效抽采范围,充分发挥该钻孔的时效性,减少煤矿瓦斯治理成本,缩短瓦斯治理周期。

3.1 单排多孔布孔优化研究

为模拟施工水力割缝措施中单排多孔布置下的有效抽采半径,自上而下设置了孔距分别为5, 6, 7, 8 m的双孔模型,如图5所示。

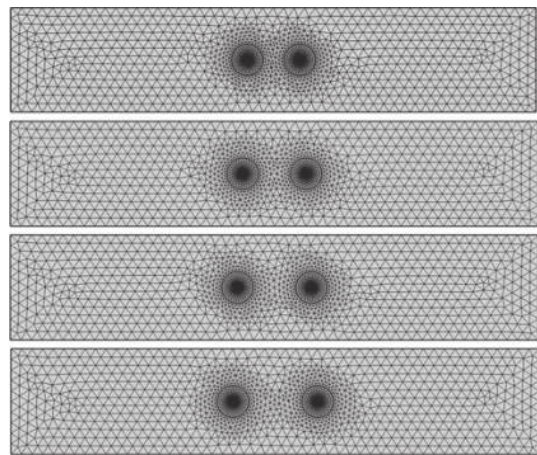


图5 不同孔距双孔模型

Fig. 5 The double borehole model with different borehole spacing

在1.5 m割缝深度前提下,模拟不同孔距钻孔瓦斯压力随抽采时间的变化情况,如图6所示。可看出在相同抽采时间下,煤体内瓦斯压力随两孔距的缩短而降低,说明孔间距越小,孔间受水力割缝所造成扰动越剧烈,因此孔间距越小,抽采叠加效应影响越显著。

不同孔距及抽采时间下孔周瓦斯压力分布曲线如图7所示。可看出两孔中心位置为孔间瓦斯压力峰值点,当该峰值点瓦斯压力降至0.74 MPa以下时,

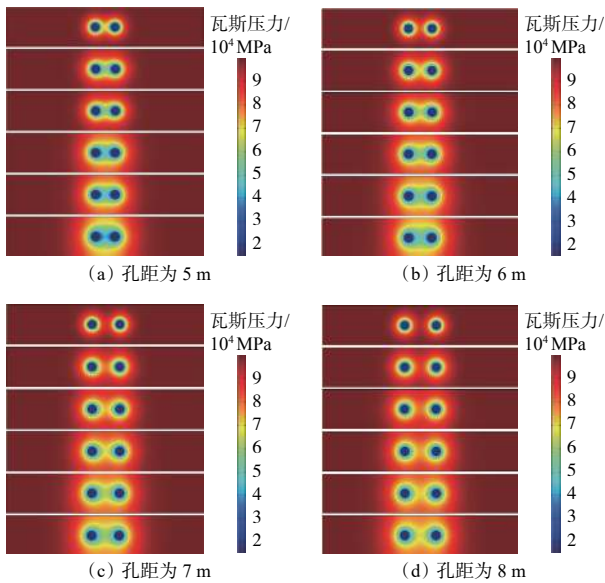


图 6 不同孔距钻孔瓦斯压力随抽采时间变化云图

Fig. 6 Cloud chart of gas pressure variation with extraction time in boreholes with different borehole spacing

可认为此孔距范围内瓦斯消突达标。当孔距为 5, 6, 7, 8 m 的钻孔抽采 60 d 时, 其孔间瓦斯压力峰值分别为 0.34, 0.47, 0.62, 0.71 MPa。在保证消突达标的前提下, 尽可能减少施工量, 则选择孔距为 7 m 或 8 m 进行布孔均满足消突要求。但当选择孔距为 8 m 进行布孔时, 抽采 60 d 孔间最大瓦斯压力为 0.71 MPa, 接近临界值 0.74 MPa, 为了保证一定的安全系数, 选择孔距为 7 m 进行布置水力割缝, 钻孔效果最佳。

3.2 多孔联同布孔方案研究

由于单排钻孔抽采无法实现对 1908 工作面厚煤层全方位覆盖, 往往在煤层顶底板处留有治理空白区域, 因此需在 1908 工作面布置双排钻孔。常见的双排布孔方式包括“正方形”布孔与“正三角”布孔, 如图 8 所示。可看出“正方形”布孔的覆盖面积较“正三角”布孔的更大, 但在孔心位置是否会存在抽采空白带需进一步验证。

运用数值模拟方法对“正方形”布孔与“正三角”布孔 2 种布孔方式的瓦斯抽采空白区域对消突效果进行对比研究, 如图 9 所示。

由图 9 可看出, 无论是“正方形”布孔还是“正三角”布孔, 其孔间区域煤体瓦斯压力均受到了影响, 特别是“正方形”布孔方式下, 原本孔心位置存在的抽采空白带, 受水力割缝扰动及孔间叠加效应影响, 该区域煤体瓦斯同样出现了降低的现象。

为更直观地表示孔心区域煤体瓦斯压力情况, 绘制了 2 种布孔方式下抽采 60 d 孔周瓦斯压力分布曲线, 如图 10 所示。可看出原本在“正方形”布孔方式中, 孔心位置可能出现抽采盲区的点最大瓦斯压

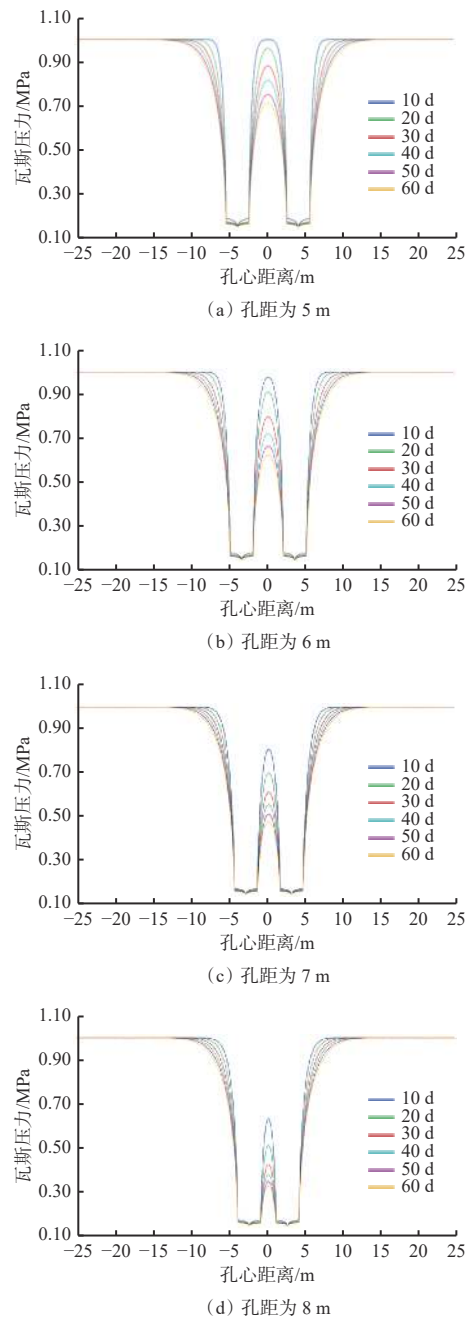


图 7 不同孔距及抽采时间下孔周瓦斯压力分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of borehole gas pressure under different borehole distance and extraction time

力仅为 0.67 MPa, 小于临界值, 说明“正方形”布孔和“正三角”布孔均可在 60 d 内完成区域内瓦斯消突任务。而“正方形”布孔较“正三角”布孔的有效覆盖面积更大且减少了抽采重复区域, 从而减少了钻孔施工量, 提高了瓦斯治理效率。

3.3 现场应用

在高山煤矿 1908 工作面第 3 循环区域施工水力割缝钻孔后, 采用孔距为 7 m 的“正方形”布孔方式, 如图 11 所示。

在试验区段外施工一个未使用水力割缝的普通

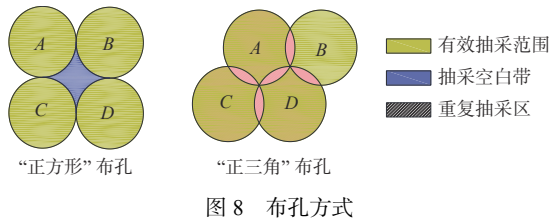


图 8 布孔方式

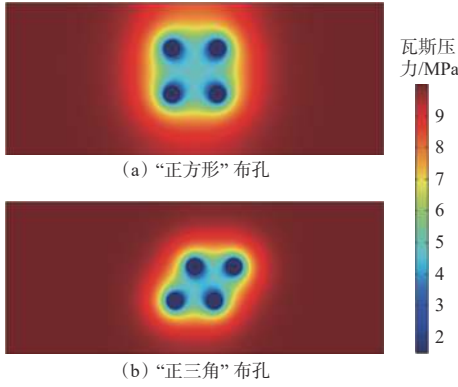


图 9 不同布孔方式的瓦斯抽采空白区域对消突的效果

Fig. 9 Outburst elimination effect of gas extraction blank zone with different borehole layout methods

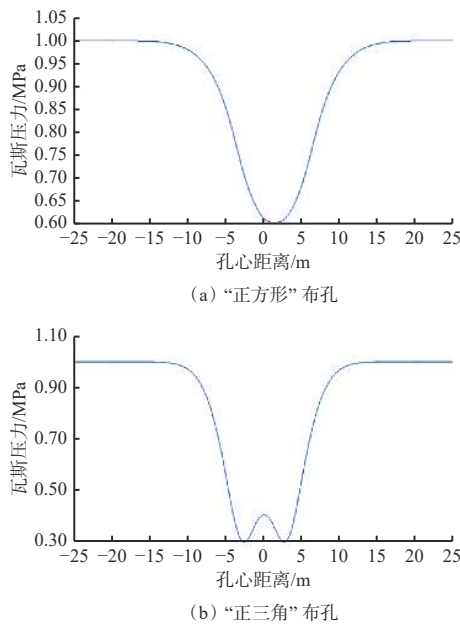


图 10 不同布孔方式抽采 60 d 孔周瓦斯压力分布曲线

Fig. 10 Gas pressure distribution curve around boreholes for 60 days with different borehole layout methods

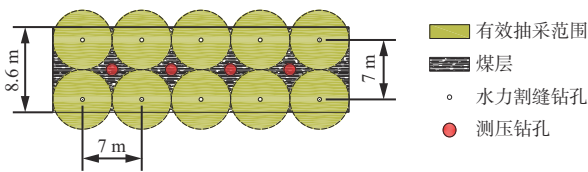


图 11 钻孔现场布置

Fig. 11 Site layout of boreholes

抽采钻孔, 与优化水力割缝参数的抽采钻孔进行对比, 每天观测两者瓦斯抽采体积分数及纯量, 观测结

果如图 12 和图 13 所示。

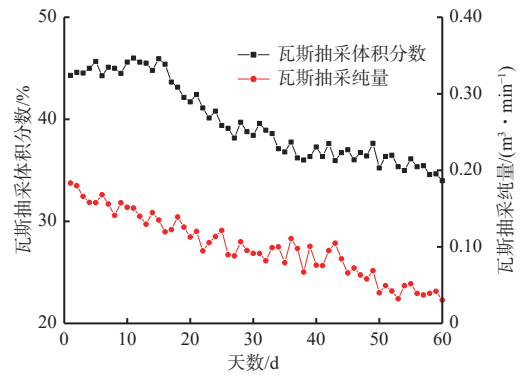


图 12 未使用水力割缝的抽采钻孔瓦斯参数

Fig. 12 Gas parameters of extraction boreholes without hydraulic cutting

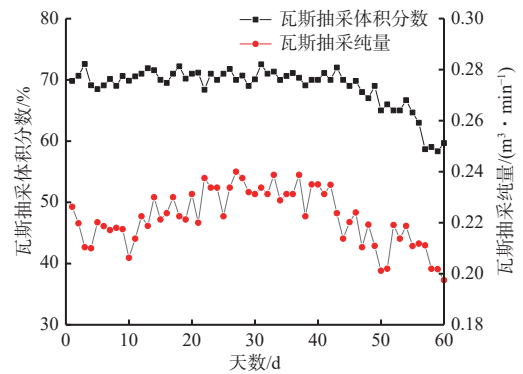


图 13 水力割缝抽采钻孔瓦斯参数

Fig. 13 Gas parameters of extraction borehole with hydraulic cutting

由图 12、图 13 对比可看出, 经水力割缝后的抽采钻孔最高瓦斯抽采体积分数、最高瓦斯抽采纯量分别为 72.53%、0.238 m³/min, 较未使用水力割缝的抽采钻孔最高瓦斯抽采体积分数、最高瓦斯抽采纯量分别提升了 58%、23%。在 60 d 抽采周期内, 瓦斯体积分数在 60% 以上的抽采天数达到了 56 d, 说明经水力割缝后的钻孔抽采效果更好。

为更清楚地表达消突情况, 采用“正方形”布孔方式抽采 60 d 后, 在孔心处施工钻孔取样并测压, 所得残余瓦斯压力、瓦斯含量数据见表 2。

表 2 试验测点残余瓦斯压力、瓦斯含量

Table 2 Residual gas pressure and gas content of test measuring points

孔号	残余瓦斯压力/MPa	残余瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)	抽采率/%
1	0.61	2.7	62.50
2	0.57	3.3	54.17
3	0.59	3.1	57.04
4	0.62	2.9	59.72

由表 2 可看出, 测压孔 1—4 号残余瓦斯压力均小于 0.74 MPa、残余瓦斯含量均小于 6 m³/t, 均符合

煤矿消突标准。其结果与模拟研究吻合,证明了该布孔方式的可行性,为应用水力割缝钻孔煤层布孔优化问题提供了理论指导。

4 结论

(1) 数值模拟结果表明:增加钻孔水力割缝深度可有效提高其有效抽采半径,但其增幅随割缝深度增加而逐渐减缓并最终趋于平稳,通过改变割缝深度,在 60 d 抽采周期内,其最佳钻孔水力割缝深度为 1.5 m,对应的有效抽采半径为 3.1 m。

(2) 钻孔经水力割缝后,四周煤体受割缝扰动影响,其瓦斯抽采过程中随临孔间距减少,抽采叠加效应显著。在 60 d 瓦斯抽采周期内,选择邻孔间距为 7 m 施工时,其孔间煤体瓦斯压力可降至 0.74 MPa 以下,达到了消突、减少施工量的目标。

(3) 针对厚煤层水力割缝钻孔多排布孔问题,采用孔间距为 7 m 的“正方形”布孔,水力割缝钻孔可有效消除孔心抽采空白带。

(4) 通过现场试验得出,经水力割缝后的钻孔其瓦斯抽采浓度及瓦斯抽采纯量更高且高浓度抽采周期持续时间更长,在经过 60 d 抽采后其孔心煤体瓦斯压力均降至 0.74 MPa 以下,实现了整个煤层的消突达标。

参考文献(References):

- [1] 荆俊杰,于丽雅,延婧.高瓦斯低渗煤层水力造穴增透技术优化研究[J].煤矿安全,2022,53(1):8-14,23.
JING Junjie, YU Liya, YAN Jing. Research on optimization of hydraulic flushing and permeability enhancement technology in high gas and low permeability coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(1): 8-14, 23.
- [2] 袁亮,林柏泉,杨威.我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J].煤炭科学技术,2015,43(1):45-49.
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 45-49.
- [3] 许克南,王佰顺,刘青宏.基于动态流固耦合模型的瓦斯抽采半径及孔间距研究[J].煤炭科学,2018,46(5):102-108.
XU Kenan, WANG Baishun, LIU Qinghong. Study on gas drainage radius and distance between boreholes based on dynamic fluid-solid coupling model[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 102-108.
- [4] 杜金磊,张民波,张电吉,等.低透气突出煤层水力割缝协同卸压增透技术[J].工矿自动化,2021,47(7):98-105.
DU Jinlei, ZHANG Minbo, ZHANG Dianji, et al. Hydraulic cutting cooperative pressure relief and permeability enhancement technology in low permeability outburst coal seam[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 98-105.
- [5] 刘生龙,朱传杰,林柏泉,等.水力割缝空间分布模式对煤层卸压增透的作用规律[J].采矿与安全工程学报,2020,37(5):983-990.
LIU Shenglong, ZHU Chuanjie, LIN Baiquan, et al. The effect of spatial distribution mode of hydraulic slotting on pressure relief and permeability enhancement of the coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 983-990.
- [6] 孙鑫,王海东,路丽刚.煤层水力割缝转速对切割半径影响规律研究[J].煤炭工程,2020,52(5):116-120.
SUN Xin, WANG Haidong, LU Ligang. Research on the influence of coal seam hydraulic cutting speed on cutting radius[J]. Coal Engineering, 2020, 52(5): 116-120.
- [7] 袁本庆.煤巷条带水力化增透技术措施适用条件及评价指标初探[J].煤矿安全,2018,49(12):164-168.
YUAN Benqing. Application conditions and evaluation indexes of hydraulic permeability enhancement technology in coal roadway strip mining[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(12): 164-168.
- [8] 林柏泉,赵洋,刘厅,等.水力割缝煤体多场耦合响应规律研究[J].西安科技大学学报,2017,37(5):662-667.
LIN Baiquan, ZHAO Yang, LIU Ting, et al. Coupling response law of multi-field in coal seam after hydraulic slotting[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(5): 662-667.
- [9] 徐刚,张凯文,范亚飞.叠加效应影响下钻孔有效抽采半径的数值模拟及布孔间距优化[J].矿业安全与环保,2021,48(1):91-96.
XU Gang, ZHANG Kaiwen, FAN Yafei. Numerical simulation of effective drainage radius and optimization of hole spacing under the influence of stack effect[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(1): 91-96.
- [10] ZHANG Hongbin, LIU Jishan, ELSWORTH D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: a new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1226-1236.
- [11] 刘泉霖,王恩元,李忠辉,等.夹研对煤层瓦斯抽采影响的数值模拟研究[J].工矿自动化,2018,44(2):55-62.
LIU Quanlin, WANG Enyuan, LI Zhonghui, et al. Numerical simulation study on influence of gangue on coal seam gas drainage[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 55-62.
- [12] 李文,王广宏,欧聪,等.不同布孔方式下梳状定向长钻孔水力压裂数值模拟及工程应用[J].煤矿安全,2021,52(5):72-77.
LI Wen, WANG Guanghong, OU Cong, et al. Numerical simulation and engineering application of comb-shaped directional long borehole hydraulic fracturing under different arrangement of holes[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 72-77.