



瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用

刘厅 林柏泉 赵洋 翟成 邹全乐

引用本文:

刘厅, 林柏泉, 赵洋, 等. 瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 217-231.

LIU Ting, LIN Baiquan, ZHAO Yang. Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 217-231.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0969>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究

Research on gas extraction technology: hydraulic stamping and hydrofracture to pressure relief and permeability improvement
煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/62c6392e-04d4-4beb-b8b3-fa0a487156e6>

冲煤率对煤层卸压增透及瓦斯抽采的影响规律研究

Study on influence laws of coal flushing rate on coal seam stress relief and gas extraction

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 102-109 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f956c730-5ac6-4139-a95a-2c7f30678e31>

低透气煤层超高压水力割缝与水力压裂联合增透技术

Combined permeability enhancement technology of ultra-high pressure hydraulic slot and hydraulic fracturing in low permeability coal seam

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/51492a42-787a-4dc3-b85d-ec94592a1dda>

水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯时空演化规律

Spatio temporal evolution of geostress and gas field around hydraulic punching borehole in coal seam

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/be7ccfe5-4a06-4f00-8b0c-c877a924b542>

密集水力冲孔增透抽采瓦斯试验研究

Experimental study on gas extraction with intensive hydraulic punching and penetration enhancement

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 142-148 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e4972e9c-9ecb-421c-b59d-c9758eba0db1>

高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究

Study on coal pressure relief and permeability increase through ultra-high pressure hydraulic slotting in high outburst and low permeability coal seam

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e4ddb25b-4c38-4f8b-9682-0accd87bach1>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘 厅, 林柏泉, 赵 洋, 等. 瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 217-231.

LIU Ting, LIN Baiquan, ZHAO Yang, *et al.* Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 217-231.

瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用

刘 厅^{1,2}, 林柏泉^{1,2}, 赵 洋³, 翟 成^{1,2}, 邹全乐⁴

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232000; 4. 重庆大学 资源与环境科学学院, 重庆 400030)

摘 要:为实现瓦斯非均衡赋存煤层的精准卸压增透, 基于理论建模、数值模拟和现场试验的方法研究了水力冲孔关键工艺参数的判定准则和优化方法。构建了卸压煤层多场耦合模型, 分析了冲孔最优出煤量的判定指标体系, 提出了冲孔最优出煤量的判定准则及方法, 绘制了水力冲孔关键工艺参数优化图谱, 提出了瓦斯非均衡赋存煤层梯级精准增透强化抽采技术。结果表明: ①抽采时间一定时, 随着冲孔出煤量的增加, 煤层残余瓦斯含量逐渐降低, 而由于孔间应力集中程度的升高, 残余瓦斯压力先降低后升高; ②冲孔最优出煤量的判定准则包括瓦斯抽采达标约束和巷道失稳风险和施工成本最小化约束, 当残余瓦斯含量和压力均小于临界值时, 认为抽采达标, 在满足抽采达标的前提下, 应尽量减小冲孔出煤量以保证煤巷稳定、降低工程成本; ③冲孔最优出煤量随地应力的升高而降低, 随黏聚力、瓦斯压力和钻孔间距的增大而升高。对于给定煤层, 冲孔出煤量存在最大值, 抽采达标时间存在最小值; ④综合考虑煤层瓦斯压力、出煤量、钻孔间距及抽采达标时间之间的关联关系, 绘制了冲孔关键参数的优化图谱, 提出了瓦斯非均衡赋存煤层梯级精准增透强化抽采技术, 融合煤层瓦斯赋存特征和冲孔关键参数的优化图谱, 确定不同瓦斯赋存区域对应的冲孔工艺参数, 实现瓦斯非均衡赋存煤层的精准卸压增透。

关键词: 水力冲孔; 最优出煤量; 判定准则; 多场耦合; 卸压增透

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)02-0217-15

Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas

LIU Ting^{1,2}, LIN Baiquan^{1,2}, ZHAO Yang³, ZHAI Cheng^{1,2}, ZOU Quanle⁴

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, Ministry of Education, Xuzhou 221116, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China; 4. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: To realize the precise stress relief and permeability enhancement of the coal seam with non-uniformly distributed gas, the criterion and optimization method of key construction parameters of hydraulic flushing was studied by modeling, numerical simulation and field tests. First, the multiphysics coupling model for stress-relieved coal seam was developed and index of optimal coal discharged was analyzed. Then the criterion and determination method of optimal coal discharged was put forward. Finally, the determination map of key construction parameters of hydraulic flushing was drawn, and a precise permeability enhancement technique for coal seam with non-uniformly distributed gas was proposed. The main conclusions are shown as follows: ① for a given gas extraction time, the residual gas content decreases while the residual gas pressure reduces followed by an increase with a rise of coal discharged; ② the criterion of optimal coal discharged includes the constraints of gas extraction reaching standard and minimization of roadway instability risk and construction cost. When the residual gas content and pressure are less than the critical values, it is considered that the gas extraction reaches the standard. On the premise of meeting the standard of extraction, the coal discharged should be reduced as far as possible to ensure the stability of

收稿日期: 2022-08-05 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0969

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004276); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20200636)

作者简介: 刘 厅(1991—), 男, 江苏连云港人, 副教授, 博士。Email: tingliu@cumt.edu.cn

coal roadway and reduce the project cost; ③ The optimal coal discharged decreases with the increase of ground stress, and increases with the increase of cohesion, gas pressure and borehole spacing. For a given coal seam, there is a maximum value of coal discharged and a minimum value of extraction time reaching standard; ④ comprehensively considering the correlation between coal seam gas pressure, coal yield, borehole spacing and extraction time reaching standard, the optimization map of key parameters of hydraulic flushing is drawn. Based on the map, a precise pressure relief and permeability enhancement technology for coal seams with non-uniformly distributed gas is put forward. In this technique, the construction parameters of hydraulic flushing corresponding to various gas occurrence areas can be determined, with the combination of gas occurrence and optimization map of key parameters, realizing the precise permeability enhancement of the coal seams with non-uniformly distributed gas.

Key words: hydraulic flushing; optimal coal discharged; criterion; multiphysics coupling; stress relief and permeability enhancement

0 引言

深部煤层的高地应力、高地温和高瓦斯压力的特性导致其普遍具有微孔隙、低渗透和强吸附的特征,瓦斯抽采极为困难^[1-2]。煤储层人工改造是实现我国煤层瓦斯高效抽采的重要路径^[3]。

保护层开采被实践证明是煤层群条件下最有效的瓦斯治理技术^[4-5]。但是,随着开采深度的增加,许多首采层逐渐转变为突出煤层;此外,我国还存在大量不具备保护层开采条件的单一高瓦斯突出煤层,如何实现这些煤层瓦斯的高效抽采是学术界和工业界必须面临的重要难题^[2]。目前,包括水力压裂、水力割缝、水力冲孔、松动爆破等在内的一系列孔内致裂及卸压增透措施被广泛应用于煤矿强化瓦斯抽采的工程实践^[6-7]。一般认为水力压裂和水力割缝等技术主要适用于硬度较高的煤层,而水力冲孔则被广泛应用于松软低透气性煤层^[8]。

水力冲孔是利用高压水冲击钻孔壁,诱导含瓦斯软煤发生可控喷孔,在煤层内创造卸压空间,引导应力转移,在钻孔周围创造大量扰动裂隙,为瓦斯流动构建优势通道。在现有的研究中,冲孔后钻孔周围应力场、裂隙场以及瓦斯流场的分布演化是关注的重点。前人通过数值模拟得出水力冲孔后钻孔周围煤体应力显著降低,有利于瓦斯流动,并且冲孔出煤量越大,卸压范围越大^[9-10]。根据不同位置处卸压程度的不同,可将钻孔周围煤体划分为卸压区、过渡区和原始应力区^[11]。冲孔后应力的变化势必会引起煤体塑性变形以及裂隙扩展。数值模拟结果指出钻孔周围塑性区的范围随着出煤量的增加逐渐增大,且塑性区的范围随着抽采也会相应扩展^[9,12]。基于电磁辐射和直流电阻率等的现场测试也表明冲孔后钻孔周围确实存在一定范围的裂隙区^[13-14]。钻孔周围扰动裂隙的形成改变了瓦斯流场的分布。理论分析显示冲孔后钻孔周围渗透率大幅提高,增幅可达上百倍,从而显著改善了瓦斯抽采效果^[11]。此外,

现场瓦斯流场测试结果表明,距离钻孔不同位置处,瓦斯压力降低速度不同,据此可将钻孔周围煤体划分为瓦斯充分排放区、瓦斯排放区、瓦斯压力过渡区和原始瓦斯压力区^[15]。

尽管目前针对水力冲孔已开展了大量研究,且该技术在现场应用方面也已较为成熟,但仍然存在一些关键难题亟待解决。工程实践发现冲孔过后煤层松软破碎,导致目标区域煤巷失稳风险增大,后期维护更加困难、成本更高。其次,受地质构造的影响,同一煤层瓦斯赋存差异大,存在明显的非均衡赋存特征,对此应当采取分区治理、精准增透的瓦斯治理策略。针对水力冲孔存在的问题,从应力场-裂隙场-瓦斯流场 3 场互馈的角度出发,首先构建卸压煤层多场耦合模型,通过关键指标分析,提出了冲孔最优出煤量的判定准则及方法,阐明了冲孔最优出煤量的主控因素,绘制了水力冲孔关键参数优化图谱,提出了瓦斯非均衡赋存煤层梯级精准增透技术,并开展了现场试验。

1 卸压煤层瓦斯运移多场耦合模型

卸压煤层瓦斯运移是一个涉及应力场、裂隙场、瓦斯扩散和渗流场互馈的复杂多场耦合过程。为揭示水力冲孔后煤层瓦斯运移规律,笔者构建了卸压煤层瓦斯运移多场耦合模型,该模型充分考虑了卸压引起的煤体塑性变形对瓦斯扩散和渗流过程的影响。基于该模型研究水力冲孔关键参数的判定方法,此处仅给出关键物理场的控制方程,详细的推导过程及模型验证参考文献^[16]。

1.1 模型假设

为构建卸压煤层瓦斯运移多场耦合理论模型,作如下假设: ①煤体为弹塑性双重孔隙介质,由裂隙和基质组成,其中基质由孔隙和煤体骨架构成; ②含瓦斯煤为恒温系统,瓦斯为理想气体,其在煤体裂隙内的运移满足 Darcy 定律,在基质孔隙中的运移服从 Fick 扩散定律; ③煤体发生塑性破坏后,其在某一

方向上产生的塑性变形等于该方向上新生裂隙的开启之和。

1.2 煤体应力场控制方程

作为吸附性双重孔隙介质,煤体的变形同时受外部应力、孔隙压力以及瓦斯吸附膨胀等的影响,基于广义胡克定律,含瓦斯煤应力-应变关系可表示^[17]为

$$Gu_{i,kk} + \frac{G}{1-2\nu}u_{k,ki} - \alpha p_{fi} - \beta p_{mi} - K\Delta\epsilon_{mi}^s + F_i = 0 \quad (1)$$

式中, G 为煤的剪切模量, GPa; E 为煤的弹性模量, GPa; ν 为泊松比; α 和 β 为 Boit 系数; p_f 和 p_m 分别为裂隙和基质孔隙内的瓦斯压力, MPa; K 为煤的体积模量, GPa; $\Delta\epsilon_m^s$ 为基质吸附变形增量; F_i 为体积力, MPa; u 为位移, m; 下标“ i ”和“ k ”分别为 i 方向和 k 方向, $u_{i,kk}$ 为对变量 u_i 求 k 方向的二阶导数; $u_{k,ki}$ 为对变量 u_k 先求 k 方向的导数,再求 i 方向的导数。

受水力冲孔卸压扰动的影响,煤体常发生塑性破坏。采用 Drucker-Prager(D-P) 准则匹配 Mohr-Coulomb(M-C) 准则表征煤体损伤破坏(式(2))^[18]。

$$F - (\sqrt{J_2} - \alpha_{D-P}I_1 - k_{D-P}) = 0 \quad (2)$$

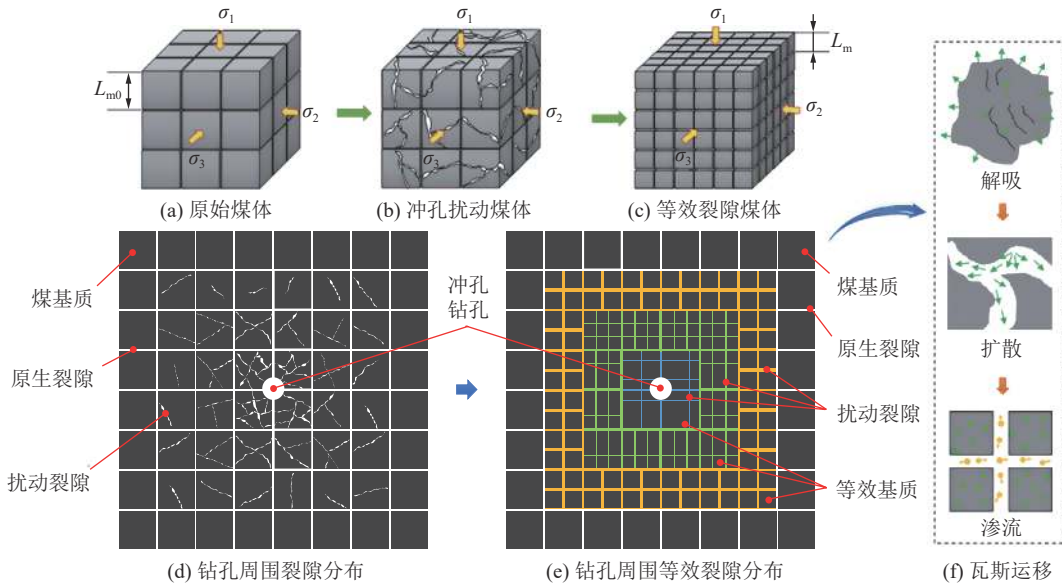


图 1 等效裂隙煤体模型及其在卸压煤体结构表征方面的应用

Fig.1 Equivalent fractured coal model and its application in characterization of coal structure

1.4 卸压煤层瓦斯扩散控制方程

水力冲孔后,钻孔周围煤体发生塑性破坏,基质尺度减小,从而改变了瓦斯的扩散路径。结合式(3),可以得到卸压煤体基质与裂隙间传质过程控制方程:

$$Q_m = \left(\frac{\phi_{f0} + \epsilon_b^p}{\phi_{f0}} \right)^2 \frac{1}{\tau_0} \frac{M_C}{RT} (p_m - p_f) \quad (4)$$

式中, J_2 为第 2 偏应力不变量, MPa^2 ; I_1 为第 1 应力不变量, MPa; α_{D-P} 和 k_{D-P} 分别为材料常数, $\alpha_{D-P} = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)}$, $k_{D-P} = \frac{2\sqrt{3}C\cos\phi}{(3-\sin\phi)}$, C 为煤体的黏聚力, MPa; ϕ 为煤体的内摩擦角, $(^\circ)$ 。

1.3 等效裂隙煤体模型

原始煤体是由基质和裂隙组成的双孔介质,其结构可由立方模型表征。受水力冲孔卸压扰动的影响,煤体内常产生大量的扰动裂隙,这些裂隙在空间上随机分布,传统方法难以定量表征。针对该难题,笔者提出了“等效裂隙煤体”的概念模型(图 1)^[19]。基于该模型,结合假设(3)可获得冲孔钻孔周围煤体基质结构和裂隙数量的空间分布特征(式(3))。

$$L_m = \frac{1}{n+1}L_{m0} = \frac{\phi_{f0}}{\epsilon_b^p + \phi_{f0}}L_{m0} \quad (3)$$

式中, ϵ_b^p 为煤基质的塑性体积应变; n 为单个煤基质在指定方向上的新生裂隙数量; ϕ_{f0} 为煤体的初始裂隙率, $\phi_{f0} = 3L_{f0}/L_{m0}$ ^[20]; L_{m0} 和 L_{f0} 分别为原始煤体的基质尺寸和裂隙尺寸, m。

式中, Q_m 为质量交换量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; M_C 为甲烷的摩尔质量, g/mol; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为煤层温度, K; D 为瓦斯扩散系数, m^2/s ; τ_0 为原始煤层中煤基质的吸附时间, s。

根据质量守恒定律,单位体积煤基质中瓦斯含量的变化量与基质和裂隙间的质量交换量相等,从而可以得到煤基质内瓦斯运移过程的控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{M_C \rho_c}{V_m} \frac{V_L p_m}{p_L + p_m} + \phi_m \frac{M_C p_m}{RT} \right\} = - \left(\frac{\phi_{f0} + \varepsilon_b^p}{\phi_{f0}} \right)^2 \frac{1}{\tau_0} \frac{M_C}{RT} (p_m - p_f) \quad (5)$$

式中, ρ_c 为煤体密度, kg/m^3 ; V_m 为气体摩尔体积, 22.4 L/mol ; V_L 为 Langmuir 体积常数, m^3/kg ; p_L 为 Langmuir 体积常数, MPa ; ϕ_m 为煤基质孔隙率。

1.5 卸压煤层瓦斯渗流控制方程

根据质量守恒定律, 单位煤体中裂隙内瓦斯含量的变化量等于煤基质与裂隙间的质量交换量和从裂隙流入钻孔的瓦斯量之差, 瓦斯在煤体裂隙内的运移过程可由式 (6) 表示:

$$\phi_f \frac{\partial p_f}{\partial t} + p_f \frac{\partial \phi_f}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} p_f \nabla p_f \right) = \left(\frac{\phi_{f0} + \varepsilon_b^p}{\phi_{f0}} \right)^2 \frac{1}{\tau_0} (p_m - p_f) \quad (6)$$

式中: ϕ_{f0} 为煤体的裂隙率; ρ_f 为裂隙内瓦斯密度, kg/m^3 , $\rho_f = p_f M_C / RT$; k 为煤体渗透率, m^2 ; μ 为 CH_4 的动力黏度。

1.6 耦合项

在前期的研究中, 笔者考虑应力和基质收缩效应的影响构建了弹性煤体渗透率模型^[19]。在此基础上, 结合“等效裂隙煤体”模型, 进一步考虑了煤体塑性变形的影响, 构建了卸压煤层渗透率模型。当煤体处于弹性阶段时渗透率主要受有效应力及基质收缩的影响; 当煤体处于应变软化阶段时, 渗透率快速升高; 而在残余阶段, 渗透率几乎保持不变, 这与试验研究结果一致^[21]。

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\phi_f}{\phi_{f0}} \right)^3 = \begin{cases} \left[\frac{\phi_{f0} + \varepsilon_b^p}{\phi_{f0}} \left(1 - \frac{3g}{\phi_{f0}} \Delta \varepsilon_m^s - \frac{\Delta \sigma^{\text{eff}}}{K_f} \right) \right]^3 & (\varepsilon_b^p \leq \varepsilon_{bc}^p) \\ \left[\frac{\phi_{f0} + \varepsilon_{bc}^p}{\phi_{f0}} \left(1 - \frac{3g}{\phi_{f0}} \Delta \varepsilon_m^s - \frac{\Delta \sigma^{\text{eff}}}{K_f} \right) \right]^3 & (\varepsilon_b^p > \varepsilon_{bc}^p) \end{cases} \quad (7)$$

式中, ε_{bc}^p 为残余阶段起点对应的煤体塑性体积应变; g 为内膨胀系数, 此处取 1; $\Delta \sigma^{\text{eff}}$ 为有效应力增量, MPa ; K_f 为裂隙体积模量, MPa 。

瓦斯抽采过程中, 受应力变化和瓦斯解吸的影响, 煤基质孔隙率处于动态变化中。采用的煤基质孔隙率控制方程由式 (8) 表示^[22]:

$$\phi_m = \phi_{m0} \exp \left[\frac{1 - \phi_{m0}}{\phi_{m0}} \left(\Delta \varepsilon_m^s - \frac{\Delta \sigma^{\text{eff}}}{K_m} \right) \right] \quad (8)$$

式中, ϕ_{m0} 为煤基质的初始孔隙率; K_m 为煤基质的体积模量, MPa 。

2 几何模型与定解条件

河南永煤集团某矿为突出矿井。矿井主采 2 号煤层, 埋深 $-300 \sim -900 \text{ m}$, 平均煤厚为 3.73 m , 煤层透气性平均约为 $0.46 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。实测煤层瓦斯吸附常数 a 和 b 分别为 $18.08 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 1.34 MPa^{-1} , 煤体密度 1.12 t/m^3 。煤的坚固性系数平均为 0.91 , 瓦斯放散初速度平均值为 1915.2 Pa 。为提高瓦斯抽采效率, 实现煤层快速消突, 该煤层工作面采用穿层钻孔水力冲孔进行卸压增透。

为研究该工作面水力冲孔的合理工艺参数, 建立了图 2 所示的冲孔卸压强化瓦斯抽采的几何模型。模型长 36 m , 高 10 m , 顶底板厚度各为 3 m , 煤层厚度为 4 m 。为考虑不同钻孔间的叠加效应, 该模型内设置 6 个冲孔钻孔, 孔间距为 6 m 。模型顶部为恒定载荷边界, 施加地应力 20 MPa (模拟埋深 750 m), 底部为固定边界, 两侧为辊支边界。煤层的初始瓦斯压力为 2.0 MPa , 模型四周设置为零流量边界, 钻孔为恒定压力边界, 指定压力为 0.085 MPa 以模拟 15 kPa 的抽采负压。模型计算涉及的关键参数通过现场或试验测试获得, 具体见表 1。为便于数据提取, 在模型中线位置设置测线 AB , 中心位置设置测点 M 。

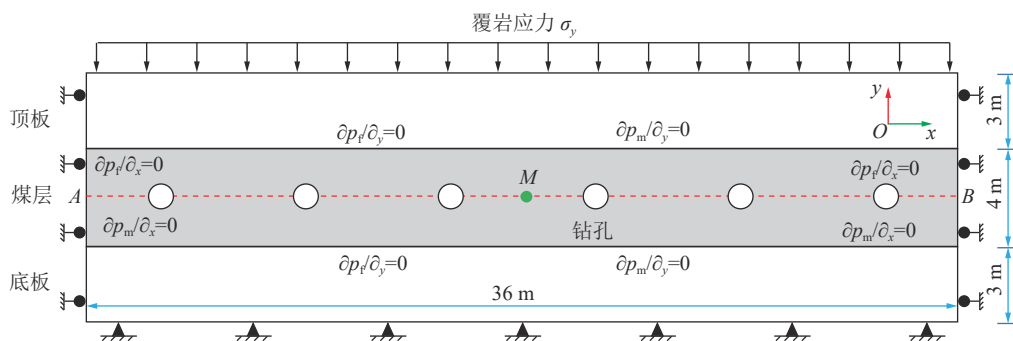


图 2 几何模型与边界条件

Fig.2 Geometric model and boundary conditions

表 1 模型输入参数
Table 1 Parameter input in the model

参数	取值	参数	取值
煤体黏聚力 C_0/MPa	1.98	煤层初始渗透率 k_0/m^2	1.15×10^{-17}
内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	25.2	Langmuir 体积常数 $V_L/(\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	0.018
煤层弹性模量 E/GPa	0.81	Langmuir 压力常数 p_L/MPa	0.75
泊松比 ν	0.32	煤层初始裂隙率 φ_0	0.02
残余段起点塑性应变 ε_{bc}^p	0.012	基质初始孔隙率 φ_{m0}	0.045
煤层温度 T/K	303	煤体密度 $\rho_c/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	1.120
原始煤层吸附时间 τ_0/d	10	甲烷动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.84×10^{-5}
裂隙压缩系数 K_f/MPa	12	煤基质的体积模量 E_m/GPa	8.4

3 冲孔最优出煤量的判定指标及准则

3.1 冲孔最优出煤量的判定指标体系

合理的冲孔出煤量是保证煤层卸压增透效果的关键。根据《防治煤与瓦斯突出细则》规定,突出煤层经过预抽后当残余瓦斯含量小于 $8\text{ m}^3/\text{t}$,且残余瓦斯压力小于 0.74 MPa 时方可进行采掘作业。因此,煤层残余瓦斯含量和压力应当作为确定冲孔最优出煤量的刚性约束指标。此外,随着冲孔出煤量的增加,冲孔施工成本线性升高,并且煤巷失稳风险显著升高,后期维护成本大幅提升。因此,冲孔施工成本以及巷道失稳风险(维护成本)应当作为最优出煤量判定的柔性约束指标。针对不同因素对冲孔最优出煤量的影响作系统分析。为便于分析,以等效孔径代表冲孔出煤量,通过等效孔径和煤体密度即可获

得每米钻孔的冲孔出煤量。

3.1.1 冲孔出煤量对残余瓦斯含量的影响

图 3 为不同冲孔出煤量下煤层残余瓦斯含量的变化规律。图 3a 中随着抽采时间的增加,瓦斯含量逐渐降低。在相同抽采时间下,冲孔出煤量越高,对应的煤层残余瓦斯含量越低。图 3b 给出了不同抽采时间下煤层残余瓦斯含量随冲孔出煤量的变化规律。此处的残余瓦斯含量指的是目标区域的平均残余瓦斯含量。初期阶段($t<100\text{ d}$),残余瓦斯含量随冲孔出煤量的增加呈近似线性降低。后期($t\geq 100\text{ d}$),随着出煤量的增加,残余瓦斯含量呈先快速降低后逐渐趋缓的变化趋势。总体上看,出煤量的增加有利于快速降低煤层残余瓦斯含量。因此,仅从残余瓦斯含量的角度看,冲孔出煤量的增加有助于快速消除煤层突出危险性。

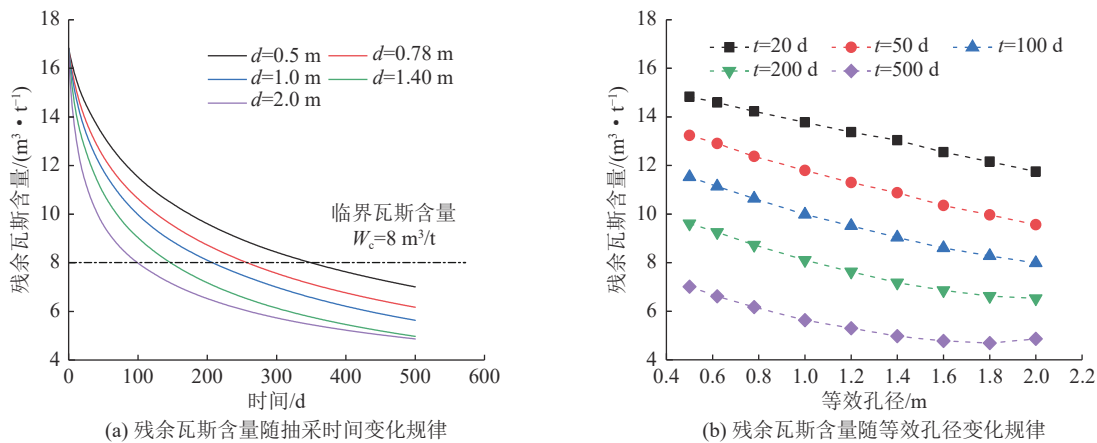


图 3 不同冲孔出煤量下煤层残余瓦斯含量的变化规律
Fig.3 Change of residual gas content with time under various coal discharged

3.1.2 冲孔出煤量对残余瓦斯压力的影响

图 4 为不同冲孔出煤量下测点 M 处残余瓦斯压力的演化规律。选择 M 点作为监测点主要是因为该点位于两孔中心位置,瓦斯压力降低最慢,若该点已

经达标,则其他位置也已达标。图 4a 中不同出煤量下残余瓦斯压力随着时间的增加逐渐降低,但不同出煤量下降幅度不同。图 4b 为残余瓦斯压力随冲孔出煤量的变化规律。随着出煤量的增加,残余瓦

斯压力并非单调变化,而是呈先降低后升高的变化趋势。以 $t=200$ d 为例, $d=0.5$ m 时对应的残余瓦斯压力为 0.73 MPa; 随着出煤量的增加,瓦斯压力缓慢

降低, $d=1.2$ m 时达到最小值 0.63 MPa; 随着出煤量的进一步增大,残余瓦斯压力快速升高, $d=2.0$ m 时达到 1.30 MPa。

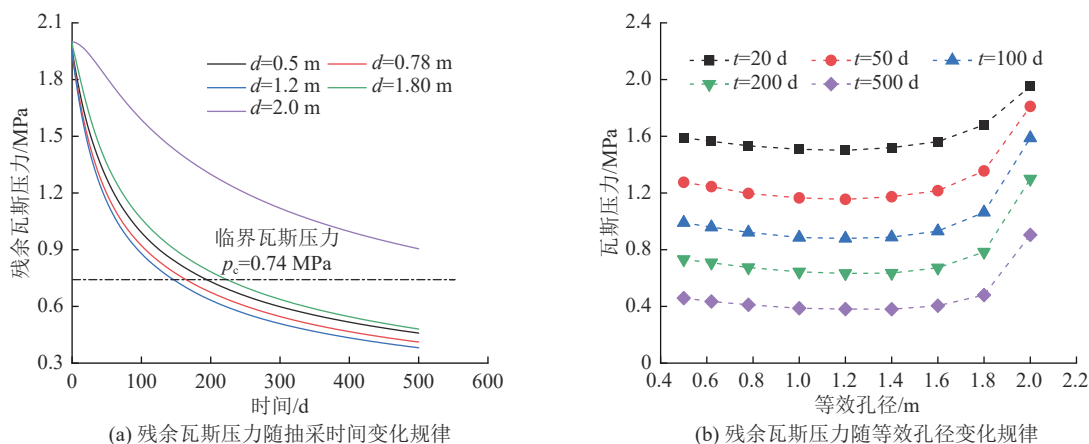


图4 不同冲孔出煤量下煤层残余瓦斯压力的变化规律

Fig.4 Change of residual gas pressure with time under various coal discharged

为探索残余瓦斯压力随出煤量变化的内在机制,沿测线 AB 提取了模型中部 2 个钻孔之间的垂向应力和渗透率分布曲线,结果如图 5 所示。图 5a 中,应力整体呈“双峰”形分布,钻孔附近一定范围内为卸压区,该处应力向外转移形成应力峰值区。随着出煤量的增加,卸压区范围逐渐增大,应力集中区范

围减小,但应力集中程度显著升高。对应地,在卸压区煤体渗透率大幅升高,增幅可达 10~20 倍。在应力集中区,煤体渗透率显著降低,当 $d=0.5$ m 时渗透率约为初始值的 0.2 倍;随着出煤量的增加,渗透率逐渐降低,当 $d=2.0$ m 时渗透率降低到不足初始值的 1%。

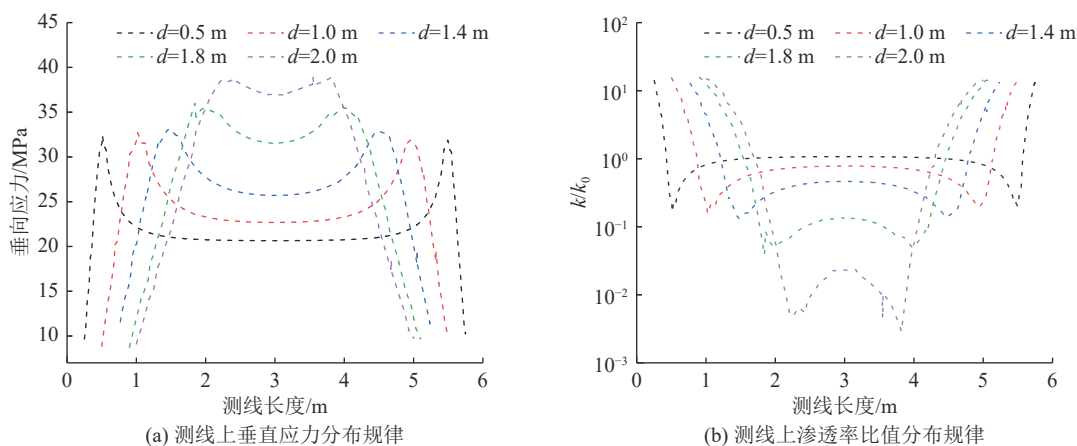


图5 不同出煤量下煤层应力和渗透率的分布规律

Fig.5 Distributions of stress and permeability under various coal discharged

上述分析表明:水力冲孔的卸压增透效果由煤体的卸压损伤以及应力分布共同决定。当冲孔出煤量较小时,钻孔周围的应力集中程度较低(图 6a),但同时钻孔的扰动范围也较小,抽采一段时间后,两孔连线的中点位置(A 点)瓦斯压力降幅较小。随着冲孔出煤量的增大,钻孔周围卸压区范围逐渐扩大,同时应力集中程度也随之提高,该阶段卸压扰动作用主导 A 点的瓦斯流动,因而瓦斯压力随着出煤量的

增加逐渐降低。随着出煤量的进一步增加,钻孔周围的卸压增透范围进一步提高,但与此同时,钻孔之间出现了显著的应力集中, A 点渗透率急剧降低,瓦斯流动难,瓦斯压力降幅小,形成高地应力和高瓦斯压力共存区,给后期煤层的采掘埋下安全隐患。

图 6b 为 A 点的瓦斯压力随出煤量的变化关系示意。在指定抽采时间的条件下,随着出煤量的增加, A 点瓦斯压力先降低后升高,出现一个瓦斯压力

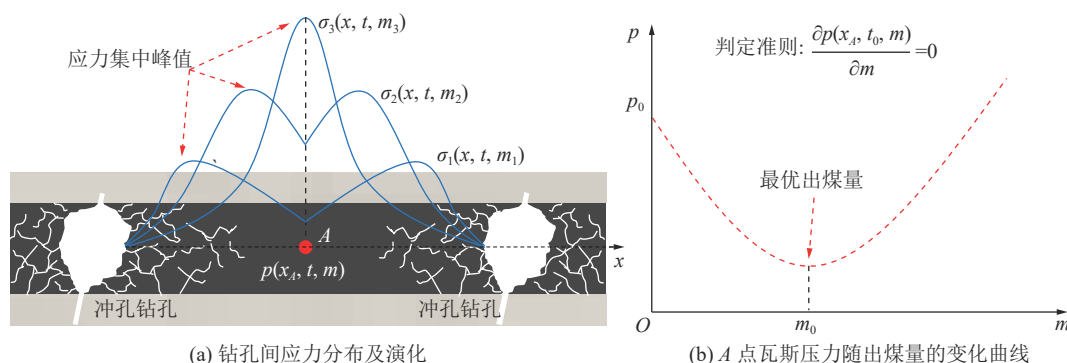


图 6 基于残余瓦斯压力的冲孔最优出煤量判定准则

Fig.6 Criterion of optimal coal discharged based on residual gas pressure

最小值点。仅从残余瓦斯压力看, 瓦斯压力最低点对应的出煤量应为最优出煤量。

3.1.3 冲孔出煤量的柔性约束指标

水力冲孔技术因其高效的卸压增透效果而被广泛应用于松软低透煤层强化瓦斯抽采、实现煤巷条带快速消突的工程实践中。该技术通过高压水射流冲击在煤体内构建卸压空间, 使煤体卸压、破碎, 从而提高瓦斯抽采效果。但是, 当冲孔出煤量过大时, 目标区域煤体破碎严重, 煤巷容易出现两帮变形严重、坍塌等问题, 给巷道维护带来了极大的挑战。因此, 寻求通过冲孔实现煤层快速抽采达标与保障煤巷稳定性之间已然形成了难以调和的矛盾, 是煤矿现场面临的切实难题。此外, 冲孔出煤量的增加也增加了工程施工的成本, 式 (9) 给出了指定区域水力冲孔施工的总成本, 可以看出随着出煤量的增加, 成本呈逐渐升高。因此, 仅从提高巷道稳定性、降低煤巷维护和冲孔施工成本的角度看, 冲孔出煤量应当尽量小。

$$TC = L_w L_b \left(\frac{\pi d^2 \rho_c a + 4b}{4L} \right) \quad (9)$$

式中, TC 为给定区域冲孔总成本; L_w 为目标区域的长度; L_b 为单个钻孔的长度; L 为钻孔间距; d 为冲孔钻孔的孔径; ρ_c 为煤的密度; a 为每冲出 1 t 煤的成本; b 为施工 1 m 常规钻孔的成本。

3.2 冲孔最优出煤量的综合判定准则及方法

上述分析结果表明: 从单一指标看, 冲孔出煤量越大, 煤层残余瓦斯含量降低越明显; 煤层残余瓦斯压力与出煤量之间呈非线性变化关系, 存在最优出煤量使得残余瓦斯压力最低; 从维护巷道稳定性、降低工程成本的角度看, 出煤量越小效果越好。

事实上, 不同约束指标间是相互影响的, 应当统筹考虑构建一个综合的冲孔最优出煤量的判定指标体系。为此, 在综合考虑残余瓦斯含量、残余瓦斯压

力等刚性约束指标以及巷道稳定性、工程成本等柔性约束指标的基础上, 构建了“区域与局部评价相结合, 刚性与柔性约束相协同”的水力冲孔最优出煤量的判定准则 (图 7)。该判定准则由两部分构成: ①瓦斯抽采最大化, 确保抽采达标; ②在满足抽采达标的前提下考虑巷道失稳风险和施工成本的最小化。抽采达标评价包括区域评价和局部评价两部分, 其中, 区域评价采用残余瓦斯含量来判定, 当残余瓦斯含量小于 $8 \text{ m}^3/\text{t}$ 时则认为满足要求; 局部评价采用两孔之间瓦斯压力的最大值作为判定指标, 当最大残余瓦斯压力小于 0.74 MPa 则认为满足要求。当残余瓦斯含量和残余瓦斯压力均小于临界值时, 则认为抽采达标, 煤层已消除了突出危险性。在满足抽采达标的前提下, 应尽量减少冲孔出煤量以保证煤巷稳定、降低工程成本。通过以上指标的约束, 可确定冲孔的最优出煤量。

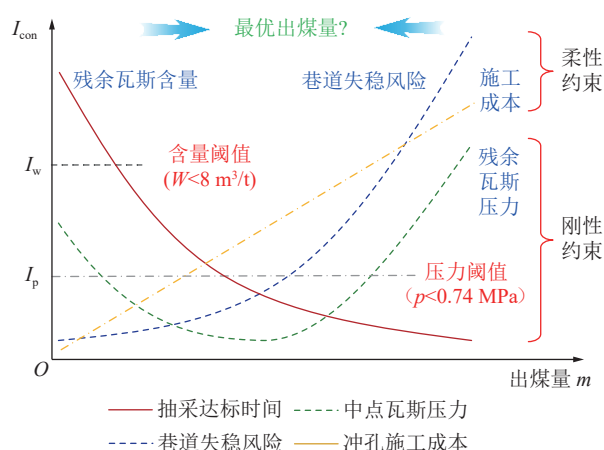


图 7 冲孔最优出煤量的判定准则

Fig.7 Criterion of coal discharged by hydraulic flushing

基于以上判定准则, 提出了冲孔最优出煤量的判定方法, 具体流程如图 8a 所示。首先, 通过现场实测和实验室测试确定煤层的地质力学参数以及瓦斯赋存基本特征。基于地质力学与瓦斯赋存关键参

数计算获得残余瓦斯含量达标时间与出煤量之间的函数关系 $T_1=f(d)$ 以及残余瓦斯压力达标时间与出煤量之间的函数关系 $T_2=h(d)$ 。函数 $T_1=f(d)$ 和 $T_2=h(d)$ 存在交点 $B(d_{up}, t_{low})$ (图 8b), 基于该交点可以确定出冲孔出煤量的上限 d_{up} 和抽采达标时间的下限 t_{low} , 即当冲孔出煤量大于 d_{up} 或抽采达标时间小于 t_{low} 时, 则无法实现抽采达标。根据煤矿采掘接替规划, 确定目标煤层抽采达标时间 t_0 , 从而可获得对应的合理冲孔出煤量范围。最后, 结合失稳风险和工程成本最低化原则, 确定冲孔最优出煤量。

4 冲孔最优出煤量的影响因素分析

4.1 单因素影响分析

为确定冲孔最优出煤量的主控因素, 首先进行了单因素分析, 包括煤层地质力学参数 (垂向应力 σ_v 、黏聚力 C_0)、瓦斯赋存参数 (初始瓦斯压力 p_0) 以及施工和抽采参数 (钻孔间距 L 、抽采达标时间 t 、抽采负压 p_0) 等。通过分析发现抽采负压对冲孔出煤量的影响较小, 可忽略不计, 重点分析了其余 5 个因素对冲孔出煤量的影响, 结果如图 9 所示。

随着预期抽采达标时间的增加, 冲孔出煤量均呈降低趋势。但不同影响因素下冲孔出煤量的数值及降幅不同。图 9a 中, 相同预抽达标时间下, 随着地应力的升高, 冲孔最优出煤量逐渐降低。这是因为随着地应力的升高两孔中心位置的应力集中更加明显, 导致该点瓦斯压力降低难。图中每条曲线的

起点代表图 8b 中 B 点, 据此可以确定预抽达标时间的最小值以及冲孔出煤量的最大值。随着地应力的升高, 预抽达标时间的最小值逐渐升高, 冲孔最优出煤量的最大值逐渐降低, 如 σ_v 由 10 MPa 升高到 28 MPa, 预抽达标时间的最小值由 90.4 d 增加到 181.8 d, 出煤量等效孔径由 2.6 m 降低到 1.0 m, 表明深部煤层应当采取低出煤量、长周期的瓦斯抽采策略。图 9b 中, 冲孔最优出煤量随着煤体黏聚力的升高而逐渐增大, 表明对于强度较高的煤体, 需要通过增大冲孔出煤量以实现较好的卸压增透效果。此外, 黏聚力对抽采达标时间最小值的影响较小, 而对于冲孔出煤量的最大值影响较大。 C_0 由 1.5 MPa 升高到 5.0 MPa, 对应的等效孔径由 1.1 m 增加到 1.95 m。对于松软煤体, 冲孔过程中其出煤量不能过大, 否则会导致两孔中心位置无法消突。图 9c 中, 随着瓦斯压力的升高, 冲孔最优出煤量逐渐增大, 说明对于高瓦斯煤层应当通过增大冲孔出煤量以实现煤层快速消突。此外, 随着瓦斯压力的增大, 冲孔出煤量的最大值小幅降低, 而预抽达标时间的最小值有明显升高。因此, 对于高瓦斯煤层, 应当通过适当降低冲孔出煤量、延长预抽时间以确保煤层消突。图 9d 中, 随着钻孔间距的增大, 冲孔最优出煤量显著增加。此外, 冲孔出煤量的最大值以及预抽达标时间的最小值均随着钻孔间距的增大而显著增加。

4.2 多参量耦合影响分析

冲孔最优出煤量受多种因素的影响, 且不同因

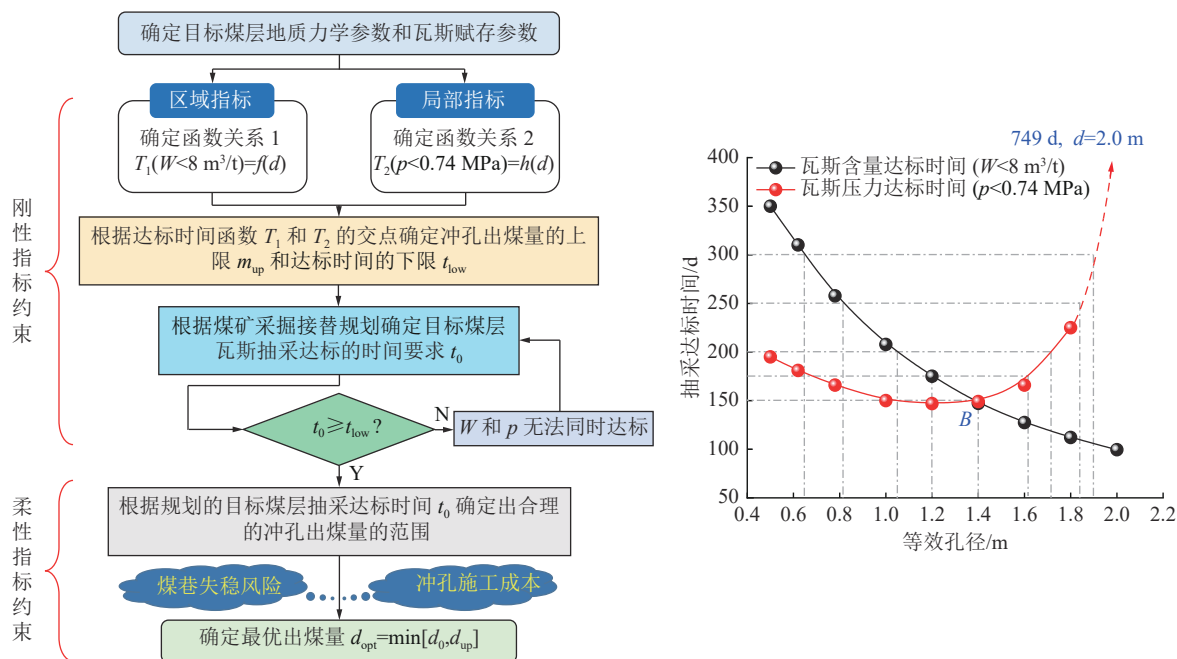


图 8 冲孔最优出煤量的判定方法

Fig.8 Determination method of optimal coal discharged by hydraulic flushing

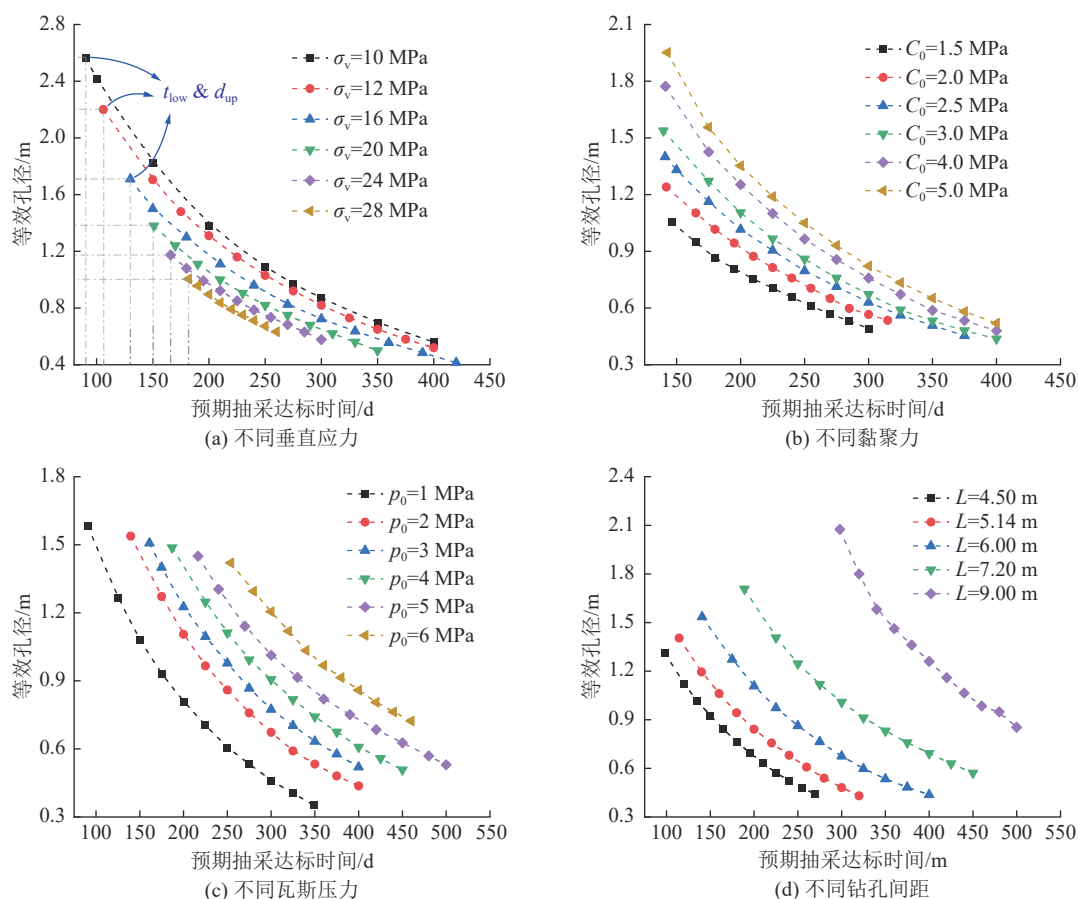


图 9 冲孔最优出煤量的单因素影响规律

Fig.9 Influence of single factor on coal discharged by hydraulic flushing

素间相互耦合。为探究多因素交互作用对最优出煤量的影响,采用响应面法中的中心复合设计方法进行了 5 因素 5 水平设计,获得了对应条件下的冲孔最优出煤量,建立了最优出煤量的多参量耦合模型:

$$d = 1.589 - 0.032\sigma_v + 0.03C_0 + 0.105p_0 + 0.113L - 0.01t_0 + 0.027C_0L - 0.026p_0L + 0.0007p_0t_0 + 0.0006Lt_0 \quad (10)$$

式中: d 为冲孔最优出煤量对应的等效孔径, m; σ_v 为煤层垂直应力, MPa; C_0 为煤体黏聚力, MPa; p_0 为煤层初始瓦斯压力, MPa; L 为钻孔间距, m。

模型的拟合度 R^2 为 0.938, 且由图 10a 可以看出模型的预测值与真实值散点均分布于直线 $y=x$ 附近, 表明模型拟合度较好。图中预测值指的是采用式 (10) 的预测结果, 真实值指的是数值模拟结果。模型

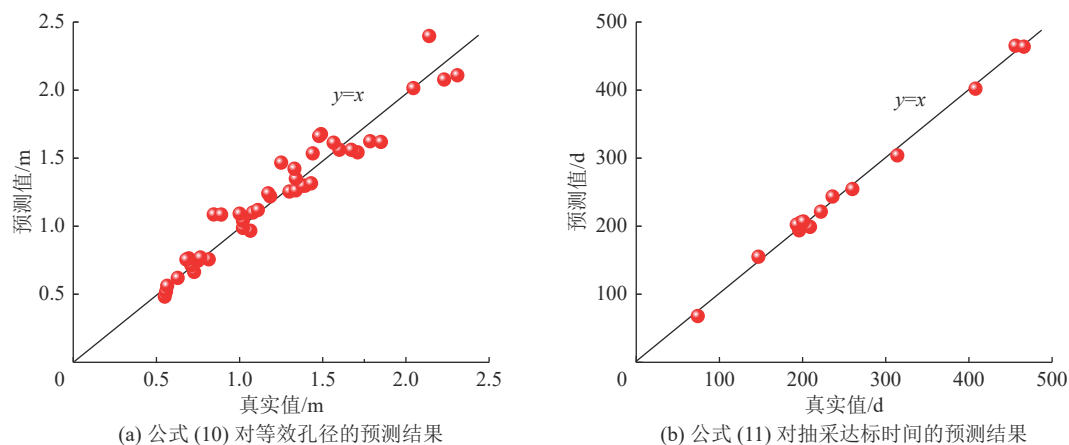


图 10 模型预测值与真实值之间的关系

Fig.10 Relation between predicting value and actual value

以及模型中各因素是否显著主要看 P 值, $P < 0.05$ 说明模型或因素显著, 反之则不显著; 而当 $P < 0.01$ 时, 说明模型或因素非常显著^[23-24]。从分析结果看, 模型及其 5 个独立因素对应的 P 值均小于 0.01, 说明均达到了非常显著水平。

式 (9) 显示垂直应力与其他 4 个因素间不存在明显的交互作用, 而煤体黏聚力、初始瓦斯压力以及预抽达标时间与钻孔间距之间、初始瓦斯压力与预抽达标时间之间存在明显的交互作用。图 11 展示了地质因素 (C_0, p_0) 和工程因素 (L, t_0) 交互作用对冲孔最优出煤量的影响。4 个因素中钻孔间距对最优

出煤量的影响最为显著, 其次是黏聚力和抽采达标时间, 影响最小的是初始瓦斯压力。图 11a 中, 钻孔间距的增加导致最优出煤量逐渐升高, 这与单因素分析结果一致; 而随着黏聚力的降低, 最优出煤量的增幅逐渐减小, 表明 L 与 C_0 之间存在明显的交互作用。此外, 最优出煤量随钻孔间距的变化幅度随着初始瓦斯压力的增加以及预抽达标时间的降低而逐渐减小 (图 11b、图 11d); 最优出煤量随预抽达标时间的变化幅度随着初始瓦斯压力的增加而逐渐减小。以上结果表明煤层地质-工程因素间存在显著的交互作用, 在最优出煤量判定时不可忽视。

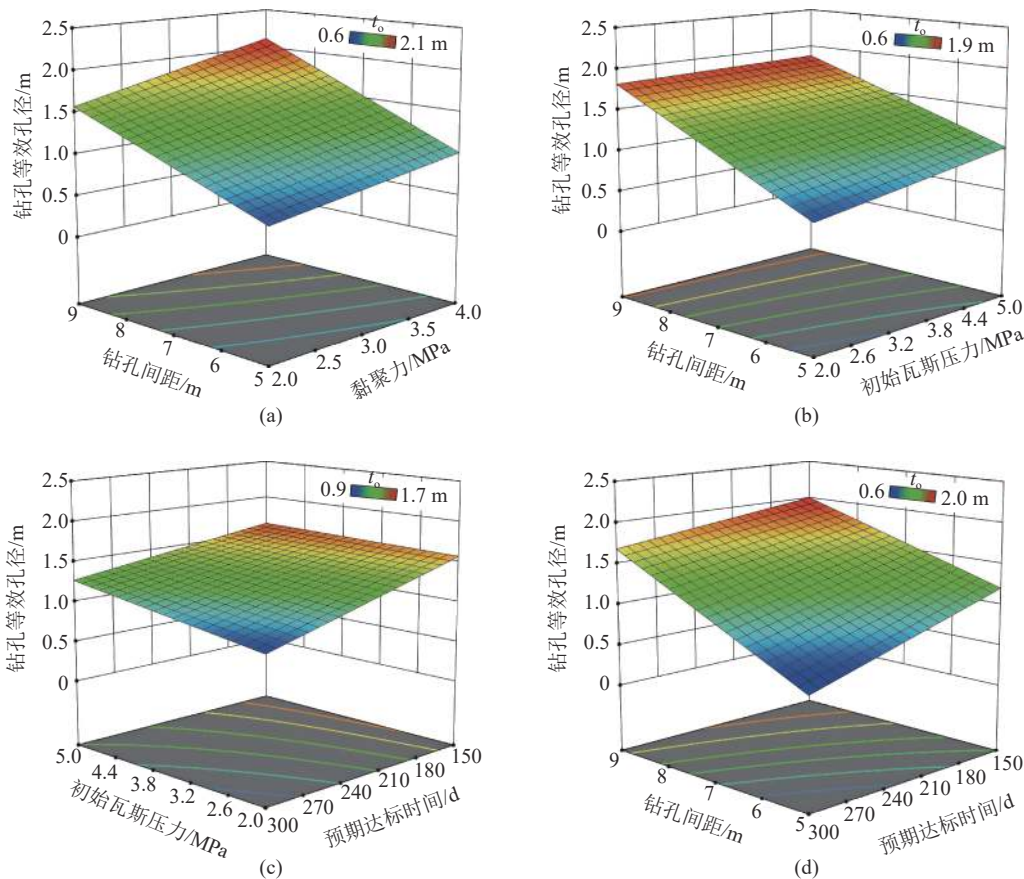


图 11 地质-工程因素交互作用对最优出煤量的影响规律

Fig.11 Effect of interaction of geological and engineering factors on optimal coal discharged

5 水力冲孔强化瓦斯抽采工艺参数的优化与应用

5.1 水力冲孔关键参数优化方法

对于给定煤层, 其地质力学参数和瓦斯赋存特征均已确定。水力冲孔过程中能够人为调控的主要是工程因素, 包括冲孔出煤量、钻孔间距、预期抽采达标时间以及抽采负压等。研究发现抽采负压对抽采达标时间的影响不足 1%, 可以忽略^[25], 此处主要

考虑冲孔出煤量、钻孔间距、初始瓦斯压力的影响。

式 (10) 表明, 在不同因素均处于动态变化且相互关联的条件下, 无法独立确定某个工艺参数。为系统确定水力冲孔的最优参数集, 考虑初始瓦斯压力、钻孔间距和出煤量的影响, 采用响应面法构建了预期抽采达标时间响应模型:

$$t_0 = 42.69 - 16.28p_0 + 74.60L - 422.57d + 11.05p_0L - 10.05p_0d - 40.55Ld + 260.87d^2 \quad (11)$$

该模型的拟合系数 R^2 达到了 0.996, 且由图 10b 看出模型的真实值和预测值沿 $y=x$ 直线分布, 表明该模型具有较好的预测精度。此外, 模型及其 3 个因素对应的 P 值均小于 0.01, 表明其都处于非常显著水平。

式 (10) 表明初始瓦斯压力、钻孔间距和出煤量之间存在交互作用, 其对预抽达标时间的影响如图 12 所示。图 12a 中预抽达标时间随着钻孔间距和初始瓦斯压力的增大而逐渐升高, 且随着瓦斯压力的增大, 抽采达标时间随着钻孔间距的增幅逐渐增大, 表明钻孔间距一定时, 煤层瓦斯压力越高抽采达标时间越长。图 12b 中, 抽采达标时间随出煤量的增大先降低后升高, 且在低瓦斯压力下抽采达标时间的变化更为明显, 这是冲孔卸压与孔间应力集中共同作用的结果。图 12c 中, 在低钻孔间距下, 抽采达标时间随出煤量的变化更为明显, 这是因为钻孔间距较小时, 钻孔间应力叠加效应更加明显, 因而冲孔出煤量对抽采达标时间的影响更加显著。

5.2 非均衡赋存煤层精准增透强化瓦斯抽采技术

根据式 (10), 可以绘制出煤层水力冲孔关键参数的优化图谱, 如图 13 所示。在给定预抽达标时间的

前提下, 可以得到不同初始瓦斯压力下冲孔出煤量与钻孔间距的关系曲线, 可以看出冲孔出煤量与钻孔间距是相互制约的。以 $t_0=150$ d、初始瓦斯压力 $p_0=1$ MPa 为例, 可以得到出煤量与钻孔间距的关系曲线 (图 13 左上黑色曲线)。将该曲线的起点定义为 $C(L_{\min}, d_{\min})$, 最右侧的顶点定义为 $D(L_{\max}, d_{\max})$, 很显然 D 点向上部分对应的工艺参数从经济性角度来说是不合理的, 由此可以确定出钻孔间距和冲孔出煤量的合理范围为 $L=[L_{\min}, L_{\max}]$, $d=[d_{\min}, d_{\max}]$ 。若要确定钻孔间距和冲孔出煤量的最优值, 则需结合工程成本最小化原则进行确定。对于给定长度的煤层区域, 钻孔间距增大则打钻成本降低, 而在曲线 CD 段, 冲孔出煤量随钻孔间距单调上升, 冲孔出煤量的增大导致水力冲孔施工成本升高, 因而在 CD 段必然存在一个最优的冲孔出煤量和钻孔间距使得整个工程 (打钻+冲孔) 施工成本最低。当预期抽采达标时间和煤层初始瓦斯压力发生变化时, 同样可以在对应的曲线上找到最优的冲孔出煤量和钻孔间距。

图 13 中, 在相同的抽采达标时间下, 当煤层初始瓦斯压力不同时, 其对应的最优施工参数显然是不同的。大量的工程实践表明, 同一个煤层, 甚至是

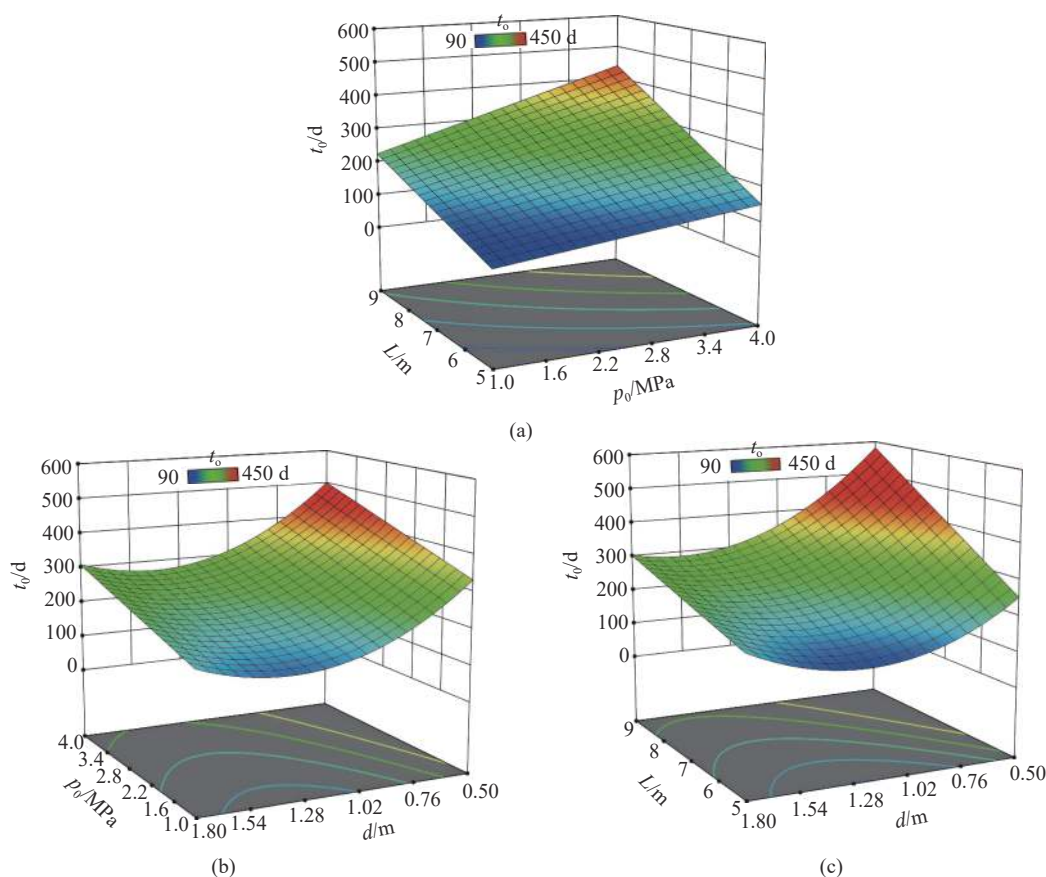


图 12 地质-工程多因素耦合对抽采达标时间的影响规律

Fig.12 Effect of interaction of geological and engineering factors on time reaching standard

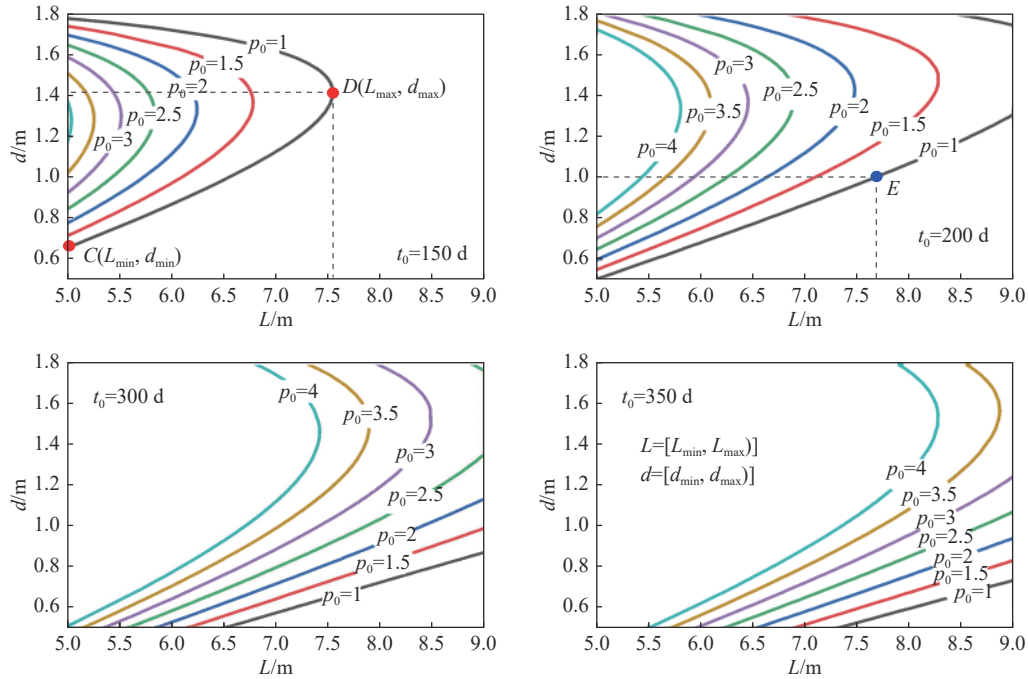


图 13 水力冲孔关键工艺参数优化图谱

Fig.13 Optimization maps of key parameters of hydraulic flushing

同一个工作面,由于地质构造等原因,煤层内瓦斯赋存在不同区域存在显著差异,称之为“瓦斯非均衡赋存煤层”。针对此类煤层,现场实施水力冲孔过程中,如果按照低瓦斯区域进行钻孔布置设计则可能会导致高瓦斯区在预期抽采达标时间内无法实现煤层消突;而如果按照高瓦斯区域进行钻孔布置设计,则可能会导致低瓦斯区域长时间低效率的抽采,导致人力、物力、财力的严重浪费。针对这一工程实际问题,

提出了基于水力冲孔的梯级精准增透强化瓦斯抽采方法,如图 14 所示。首先,通过现场实测和实验室测试获得煤层的瓦斯赋存特征,并根据瓦斯压力或含量进行区域划分(高瓦斯区、中等瓦斯区以及低瓦斯区,对应的分区指标临界值 W_1 和 W_2 根据实际情况确定)。然后,以残余瓦斯压力和残余瓦斯含量为抽采达标判据,构建如图 13 所示的水力冲孔关键施工参数优化图谱,获得不同区域对应瓦斯压力条件

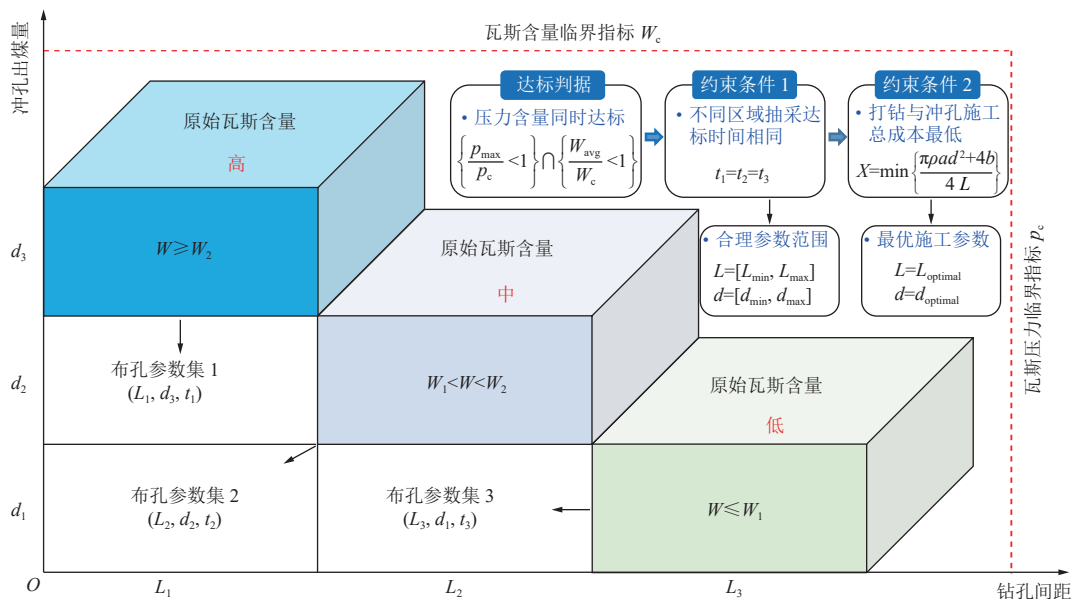


图 14 瓦斯非均衡赋存煤层梯级精准增透强化抽采技术

Fig.14 Precise permeability enhancement technique for coal seams with non-uniformly distributed gas

下的冲孔出煤量和钻孔间距的函数关系及其合理取值范围。最后,对于同一个工作面,要求不同区域抽采达标时间相同,同时打钻和冲孔的施工成本最低(判定公式如图 14 所示),则可以确定不同区域水力冲孔的最优出煤量和钻孔间距。

5.3 工程应用

河南永煤集团某矿为突出矿井,受构造影响,区

内瓦斯分布差异较大。试验地点为该矿的 21210 工作面,该工作面瓦斯地质条件复杂,在断层发育处和煤层变厚处形成了局部的瓦斯异常带。如该工作面中部存在一断层,将工作面分为两部分,断层左侧实测的瓦斯含量为 $3.20 \sim 7.93 \text{ m}^3/\text{t}$,右侧为 $9.35 \sim 11.17 \text{ m}^3/\text{t}$ 。21210 工作面断层分布、瓦斯含量测点以及测试结果如图 15 所示。

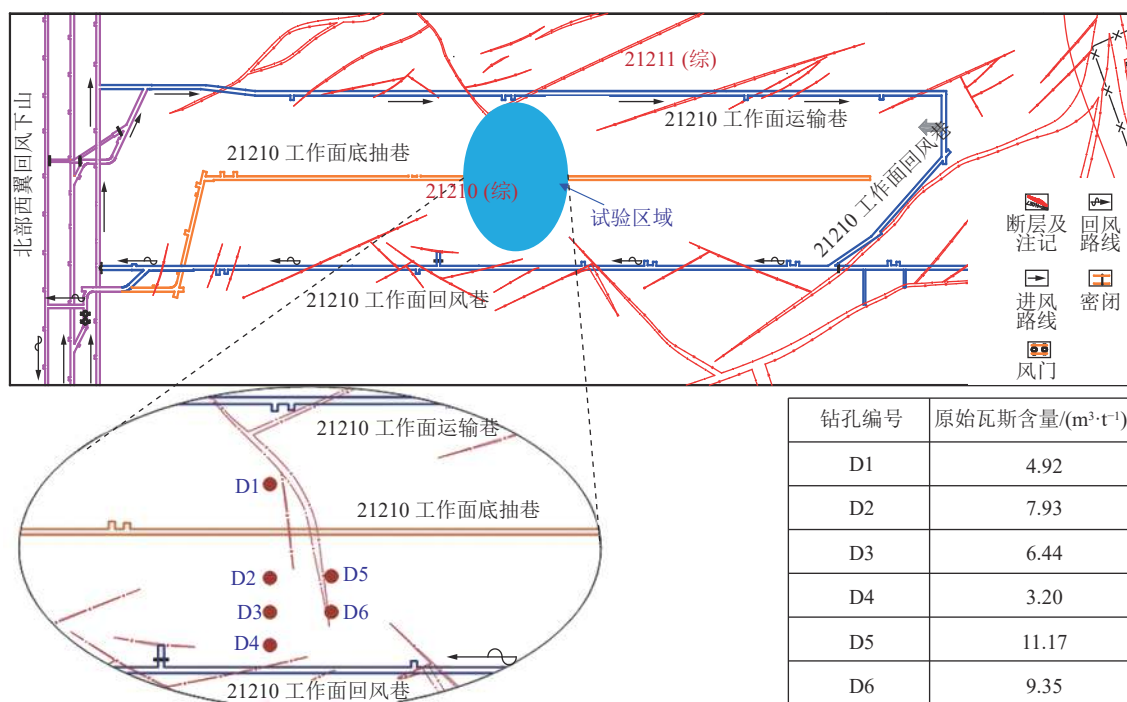


图 15 试验地点工作面布置示意及煤层瓦斯含量测试结果

Fig.15 Layout of working face at the test site and coal seam gas content

由于试验区域煤层透气性低,为此采用水力冲孔强化瓦斯抽采。针对该工作面不同区域瓦斯赋存差异大的问题,提出采用梯级布孔的方式实现煤层的精准增透和快速消突。以断层两侧实测瓦斯含量的最大值为目标值,反演获得了断层左右两侧的最大瓦斯压力分别为 0.52 MPa 和 0.97 MPa 。以 200 d 作为预期抽采达标时间,可确定出断层右侧区域对应的冲孔钻孔间距为 7.6 m (图 13 中的 E 点),考虑一定的安全系数,施工时孔间距设为 7 m 。断层左侧,由于瓦斯压力和含量均低于临界值,因此可适当增大钻孔间距为 9 m 。

为考察煤层卸压增透效果,在断层两侧分别选取 2 个钻孔进行瓦斯流量考察,结果如图 16 所示。图中 1 号和 2 号钻孔位于断层左侧区域,3 号和 4 号钻孔位于断层右侧区域。断层左侧钻孔初期瓦斯流量位于 $0.98 \sim 1.39 \text{ m}^3/\text{min}$,明显高于断层右侧的 $0.39 \sim 0.67 \text{ m}^3/\text{min}$,这是因为 3 号和 4 号钻孔距离断

层较近,受断层影响明显,透气性差。但是,从瓦斯流量衰减看,1 号和 2 号钻孔由于对应位置瓦斯含量较低而衰减相对较快,后期,3 号和 4 号钻孔的瓦斯流量明显高于 1 号和 2 号钻孔。达标评判结果表明,该工作面各区域均已达到了消突的标准。

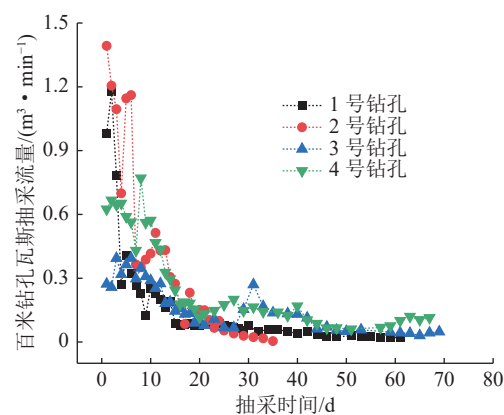


图 16 百米钻孔瓦斯抽采流量随抽采时间的变化规律

Fig.16 Change of gas flowrate with extraction time

6 结 论

1) 考虑煤体塑性破坏的影响, 构建了冲孔卸压煤层瓦斯运移多场耦合模型, 分析了煤层残余瓦斯含量和残余瓦斯压力随冲孔出煤量的变化规律, 发现: 抽采时间一定时, 随着冲孔出煤量的增加, 煤层残余瓦斯含量逐渐降低, 而由于孔间应力集中程度的升高, 残余瓦斯压力先降低后升高。

2) 提出了水力冲孔最优出煤量的判定准则, 该判定准则由两部分构成: ①瓦斯抽采达标; ②巷道失稳风险和施工成本最小化。抽采达标评价以残余瓦斯含量 ($<8 \text{ m}^3/\text{t}$) 和残余瓦斯压力 ($<0.74 \text{ MPa}$) 作为判定指标, 当残余瓦斯含量和压力均小于临界值时, 则认为抽采达标。在满足抽采达标的前提下, 应尽量减小冲孔出煤量以保证煤巷稳定、降低工程成本。

3) 煤层冲孔最优出煤量随地应力的升高而降低, 随黏聚力、瓦斯压力和钻孔间距的增大而升高。对于给定煤层, 冲孔出煤量存在最大值, 抽采达标时间存在最小值。出煤量的最大值随地应力和瓦斯压力的升高而降低, 随黏聚力和钻孔间距的升高而增大。抽采达标时间的最小值随地应力、瓦斯压力和钻孔间距的增大而升高, 黏聚力对抽采达标时间的最小值影响较小。

4) 综合考虑煤层瓦斯压力、出煤量、钻孔间距及抽采达标时间之间的关联关系, 绘制了冲孔关键参数的优化图谱。提出了瓦斯非均衡赋存煤层梯级精准增透强化抽采技术, 根据煤层瓦斯赋存特征, 结合冲孔关键参数的优化图谱, 可确定不同瓦斯赋存区域对应的冲孔施工参数, 实现煤层的精准卸压增透。采用优化后的冲孔施工参数, 试验工作面在预期时间内实现了抽采达标。

参考文献(References):

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深部开采的定量界定与分析[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 1-10.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, *et al.* Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 1-10.
- [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] 王亮, 陈大鹏, 郭品坤, 等. 深部煤层渗透特征及首采关键层卸压改造技术[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(6): 17-23.
WANG Liang, CHEN Dapeng, GUO Pinkun, *et al.* Permeability characteristics of deep coal seam and pressure relief technologies of the key first mined coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(6): 17-23.
- [4] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 1-6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 1-6.
- [5] 王伟, 程远平, 袁亮, 等. 深部近距离上保护层底板裂隙演化及卸压瓦斯抽采时效性[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 138-148.
WANG Wei, CHENG Yuanping, YUAN Liang, *et al.* Floor fracture evolution and relief gas drainage timeliness in deeper underground short-distance upper protective coal seam extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 138-148.
- [6] 王耀锋, 何学秋, 王恩元, 等. 水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(10): 1945-1955.
WANG Yaofeng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, *et al.* Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(10): 1945-1955.
- [7] 林柏泉, 邹全乐, 沈春明, 等. 双动力协同钻进高效卸压特性研究及应用[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(6): 911-917.
LIN Baiquan, ZOU Quanle, SHEN Chunming, *et al.* Investigation on highly effective depressurization property of dual-power drilling and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(6): 911-917.
- [8] 蔺海晓, 苏现波, 刘晓, 等. 煤储层造缝及卸压增透实验研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(S2): 432-435.
LIN Haixiao, SU Xianbo, LIU Xiao, *et al.* Experimental study of permeability enhancement in coal layers by fracture making or unloading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(S2): 432-435.
- [9] 高亚斌, 林柏泉, 杨威, 等. 高突煤层穿层钻孔“钻-冲-割”耦合卸压技术及应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(1): 177-184.
GAO Yabin, LIN Baiquan, YANG Wei, *et al.* “Drilling-flushing-slotting” intercoupling pressure-relief technology of cross-measure boreholes and its application in high gassy outburst coal seam[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2017, 34(1): 177-184.
- [10] YANG Wei, LIN Baiquan, GAO Yabin, *et al.* Optimal coal discharge of hydraulic cutting inside coal seams for stimulating gas production: A case study in Pingmei coalfield[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 28: 379-388.
- [11] 王凯, 李波, 魏建平, 等. 水力冲孔钻孔周围煤层透气性变化规律[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(5): 778-784.
WANG Kai, LI Bo, WEI Jianping, *et al.* Change regulation of coal seam permeability around hydraulic flushing borehole[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2013, 30(5): 778-784.
- [12] CHEN Dongdong, HE Wenrui, XIE Shengrong, *et al.* Increased permeability and coal and gas outburst prevention using hydraulic flushing technology with cross-seam borehole[J]. *Journal of*

- Natural Gas Science and Engineering, 2020, 73: 103067.
- [13] QIU Liming, SONG Dazhao, WANG Enyuan, *et al.* Determination of hydraulic flushing impact range by DC resistivity test method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 107: 127–135.
- [14] SHEN Rongxi, QIU Liming, LYU Ganggang, *et al.* An effect evaluation method of coal seam hydraulic flushing by EMR[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 54: 154–162.
- [15] 王新新, 石必明, 穆朝民. 水力冲孔煤层瓦斯分区排放的形成机理研究[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 467–471.
- WANG Xinxin, SHI Biming, MU Chaomin. Study on formation mechanism of gas emission partition in hydraulic flushing coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 467–471.
- [16] LIU Ting, LIN Baiquan, FU Xuehai, *et al.* Modeling coupled gas flow and geomechanics process in stimulated coal seam by hydraulic flushing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142: 104769.
- [17] 林柏泉, 刘 厅, 杨 威. 基于动态扩散的煤层多场耦合模型建立及应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 32–40.
- LIN Baiquan, LIU Ting, YANG Wei. Solid-gas coupling model for coal seams based on dynamic diffusion and its application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 32–40.
- [18] 卢义玉, 贾亚杰, 葛兆龙, 等. 割缝后煤层瓦斯的流-固耦合模型及应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(1): 23–29.
- LU Yiyu, JIA Yajie, GE Zhaolong, *et al.* Coupled fluid-solid model of coal bed methane and its application after slotting by high-pressure water jet[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(1): 23–29.
- [19] LIU Ting, LIN Baiquan, FU Xuehai, *et al.* A new approach modeling permeability of mining-disturbed coal based on a conceptual model of equivalent fractured coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 79: 103366.
- [20] LIU Ting, LIN Baiquan, YANG Wei. Impact of matrix–fracture interactions on coal permeability: model development and analysis[J]. *Fuel*, 2017, 207: 522–532.
- [21] CHEN Dong, PAN Zhejun, SHI Jiquan, *et al.* A novel approach for modelling coal permeability during transition from elastic to post-failure state using a modified logistic growth function[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 163: 132–139.
- [22] LIU Ting, LIN Baiquan, FU Xuehai, *et al.* Modeling air leakage around gas extraction boreholes in mining-disturbed coal seams[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 141: 202–214.
- [23] 张 超, 王星龙, 李树刚, 等. 基于响应面法治理煤矿硫化氢的改性碱液配比优化[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(8): 2926–2932.
- ZHANG Chao, WANG Xinglong, LI Shugang, *et al.* Optimization of the ratio of modified alkaline solution for hydrogen sulfide treatment in coal mine based on response surface method[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8): 2926–2932.
- [24] 邹全乐, 林柏泉, 郑春山, 等. 基于响应面法的钻割一体化喷嘴稳健性优化[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(6): 905–910.
- ZOU Quanle, LIN Baiquan, ZHENG Chunshan, *et al.* Robustness optimization of drilling-slotting integration nozzle based on response surface methodology[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(6): 905–910.
- [25] 林海飞, 季鹏飞, 孔祥国, 等. 顺层钻孔预抽煤层瓦斯精准布孔模式及工程实践[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(3): 1220–1234.
- LIN Haifei, JI Pengfei, KONG Xiangguo, *et al.* Precise borehole placement model and engineering practice for pre-draining coal seam gas by drilling along seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(3): 1220–1234.