



移动扫码阅读

王 亮,廖晓雪,褚 鹏,等.瓦斯抽采穿层钻孔钻扩造穴卸压增透机理研究[J].煤炭科学技术,2021,49(5): 75-82.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.05.010

WANG Liang, LIAO Xiaoxue, CHU Peng, et al. Study on mechanism of permeability improvement for gas drainage by cross-seam cavitation borehole [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 75-82. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.05.010

瓦斯抽采穿层钻孔钻扩造穴卸压增透机理研究

王 亮¹,廖晓雪¹,褚 鹏¹,张晓磊²,刘清泉¹

(1.中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221008;2.常州大学 环境与安全工程学院,江苏 常州 213100)

摘 要:随着我国煤矿开采逐渐向深部开拓,煤层瓦斯压力增大、含量增加,煤层渗透率普遍较低,增加了瓦斯抽采的难度。钻孔钻扩造穴卸压增透技术能提高煤层渗透率,是增加瓦斯抽采效率的有效手段。为解决寺家庄煤矿 15 号煤层渗透率低,瓦斯难抽采的问题,以寺家庄煤矿北翼辅助运输巷 15 号煤层抽采钻孔造穴为工程背景,以弹性力学应变软化模型和扩散-渗流煤层瓦斯流动理论模型为基础,建立了穿层钻孔钻扩造穴后煤层渗透率演化方程和穿层钻孔造穴煤层瓦斯流动方程。通过 COMSOL Multiphysics 多物理场数值模拟软件对方程进行解算,分析了钻孔造穴的增透机理和渗透率分布规律,得到了瓦斯抽采量、瓦斯压力分布以及渗透率等关键参数;结合模拟结论与现场条件,确定了钻孔钻扩造穴的最优造穴半径为 0.6 m,最佳布孔间距为 6.0~7.0 m,为现场施工造穴半径和钻孔间距的确定提供了指导。最后,在寺家庄煤矿 15 号煤层实施普钻钻孔与造穴钻孔,进行了瓦斯抽采效果对比。试验结果表明:实施水力钻扩造穴技术后,瓦斯抽采率、抽采浓度和抽采纯量相对普钻钻孔分别提高了约 2.7、2.0、5.7 倍;瓦斯抽采周期、钻孔施工工程量降低了约 2 倍,提高了瓦斯抽采技术经济效益,应用结果验证模拟结果可靠,抽采设计可行,可以指导现场施工。

关键词:穿层钻孔;钻扩造穴增透;流固耦合;瓦斯抽采

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)05-0075-08

Study on mechanism of permeability improvement for gas drainage by cross-seam cavitation borehole

WANG Liang¹, LIAO Xiaoxue¹, CHU Peng¹, ZHANG Xiaolei², LIU Qingquan¹

(1.Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2.School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213100, China)

Abstract: As coal mining gradually extends to the deep level, the pressure and content of coal seam gas increase, and the permeability of coal seam is generally low, which increases the difficulty of gas extraction. The technology of pressure relief by cavity drilling is an effective method to improve the permeability of coal seam and the efficiency of gas extraction. Based on the engineering background of No.15 coal seam cavity drilling in the auxiliary transportation roadway of north-wing of Sijiazhuang Coal Mine, and according to the elastic mechanics softening model and diffusion-seepage coal seam gas flow theoretical model, the authors established the evolution equation of coal seam permeability and the gas flow equation of cross-seam cavitation borehole. Using COMSOL Multiphysics software, the models were calculated, and the permeability increasing mechanism and distribution law after cross-seam cavitation borehole were analyzed. The gas extraction amount, gas pressure distribution and permeability were obtained. Combining the simulation results with field conditions, the optimal cavity radius was 0.6 m, and the optimal hole spacing was 6.0~7.0 m. It provided a guidance for the borehole radii and spacing in field construction. Finally, the conventional drilling and cavity drilling were carried out in No.15 coal seam of Sijiazhuang Coal Mine, and the gas extrac-

收稿日期:2021-02-28; **责任编辑:**曾康生

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(51974300);中央高校基本科研业务资助项目(2020ZDPY0224);江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20190931);中国博士后科学基金批面上资助项目(2019M652023)

作者简介:王 亮(1982—),男,江苏东海人,教授,博士生导师,博士。E-mail:liangw1982@126.com

通讯作者:张晓磊(1984—),男,安徽淮北人,讲师,博士。E-mail:sinozxl@163.com

tion effect was compared. Results showed that the gas drainage rate, gas concentration and purity were increased by 2.7, 2.0 and 5.7 times compared with the conventional drilling after the implementation of hydraulic cavity drilling technology. The period of gas drainage and the amount of drilling construction were reduced about 2 times, which improved the economic benefits of gas drainage technology. Thus, the simulation results are reliable and the gas drainage design is feasible, which can guide the field construction.

Key words: cross-seam drilling; cavity drilling; fluid-solid coupling; gas extraction

0 引言

煤炭是我国的主导能源,2019年在我国能源的消费比例约占57.7%。煤层瓦斯作为煤的伴生产物,是储量丰富的优质清洁能源,同时也是威胁煤矿安全生产的主要灾害之一。煤与瓦斯突出和瓦斯爆炸事故常造成重大的人员伤亡和经济损失,而瓦斯抽采是消除瓦斯事故、保障安全开采的主要方法,同时能够使瓦斯得到充分利用^[1]。煤层渗透率是决定瓦斯抽采质量和产量的关键因素^[2],然而,由于我国煤层地质条件复杂,煤体渗透率普遍偏低,通常在 $1 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ 以下,导致瓦斯抽采难度大,抽采效率低^[3-4]。

为提高煤层渗透率,促进瓦斯高效抽采,有学者提出水力压裂、水力割缝等技术措施,通过水的高压作用在周围煤体产生人工裂隙,促使煤体内部瓦斯渗流,达到增透的目的^[5-7]。然而,水力割缝对软煤的持久性差,在地应力大的情况下裂隙容易闭合;水力压裂易导致煤体局部应力集中,影响增透效果,两者对松软构造煤的瓦斯抽采效果较差。钻孔钻扩造穴扩大钻孔是近年来广泛应用的增透技术,钻扩造穴是在钻刀切割煤体的过程中,同时打开高压水泵,利用高压水射流动力软化、破碎钻孔周围的煤体,再将破碎的煤体冲出钻孔,构建大尺寸孔洞,使周围煤体卸压。造穴过程中,钻孔周围煤体应力重新分布,当煤体强度不足以承受重新分布的应力时,煤体就会发生破坏^[8-9]。研究表明,煤体破坏后,渗透率能增加几十至几千倍^[10-11]。钻孔钻扩造穴技术集钻孔-冲孔为一体,克服了水力压裂、水力割缝和传统水力冲孔方法的不足,出煤量大,增透有效^[12]。

根据瓦斯抽采钻孔形式,钻孔造穴有穿层钻孔和顺层钻孔2种形式,穿层钻孔是从岩石巷道向煤层打钻孔穿透煤层。因穿层钻孔在岩石中比顺层钻孔更加稳固,抽采服务时间更久。近年来,水力钻扩造穴技术,特别是实施穿层钻孔抽采瓦斯时的钻扩造穴,在国内煤矿得到了广泛应用。孙四清等^[13]对松软突出煤层进行穿层钻孔造穴瓦斯抽采后,瓦斯抽采量增加了6.6倍。杜昌华等^[14]对大倾角松软厚煤层实施穿层水力扩孔技术后,造穴钻孔瓦斯抽

采量和单孔瓦斯体积分数分别增加了2.8和1.4倍,并且扩孔半径越大,煤中残余瓦斯含量越低。牟全斌等^[15]对芦岭煤矿Ⅲ1013工作面实施了机械造穴穿层钻孔后,单孔瓦斯抽采浓度和瓦斯抽采纯量相应提高了2.73~3.39倍、2.63~5.11倍。以上研究表明,实施穿层钻孔造穴卸压增透后,煤层瓦斯抽采率显著提高。为了获得最有效的增透效果,降低施工成本,郝丛猛等^[16]根据不同煤层的特点,采用数值模拟软件对造穴半径、布孔间距等参数进行了合理设计,为现场工程提供了指导。于宝种^[18]建立了冲孔造穴过程中煤体的渗透率演化模型,模拟了不同造穴半径对煤层渗透率的影响,并在新景煤矿进行了工程验证,试验结果表明冲孔造穴能够减少钻孔工作量,提高瓦斯抽采效率。

根据现场突出危险性鉴定,寺家庄煤矿15号煤层为突出煤层。受强构造应力影响,该煤层渗透率低,煤质极松软。为了防止北翼辅助运输大巷掘进过程发生煤与瓦斯突出,必须预先抽采瓦斯,再掘进施工。由于普通钻孔瓦斯抽采应力扰动范围小,抽采效率低,抽采时间长,因此采用水力钻扩造穴技术提高煤层的瓦斯抽采效率。作者以弹性力学软化理论和双孔介质瓦斯流动理论为基础建立了造穴钻孔周围煤体渗透率演化模型和瓦斯运移模型,并利用COMSOL Multiphysics多物理场数值模拟软件对建立的模型进行解算,分析了造穴钻孔周围煤体的渗透率和应力分布规律,对比了不同钻孔半径和钻孔间距下的煤层瓦斯压力、瓦斯抽采量,并在寺家庄煤矿15号煤层对模拟结果进行了现场验证。

1 钻扩造穴卸压增透机理及瓦斯流动模型

1.1 钻扩造穴卸压增透机理

1.1.1 钻孔周围煤体应力分布

煤体是一种弹塑性材料,当所受应力超过峰值应力后会表现出应变软化特性,采取水力造穴措施可使钻孔周围煤体应力重新分布。根据煤岩体力学特性应变软化模型,煤体受力破坏的应力变化过程可分为3个阶段(图1):弹性阶段、软化阶段和残余阶段。钻扩造穴施工后,在钻孔周围的煤体相应形成弹性区、塑性区和破碎区^[19]。

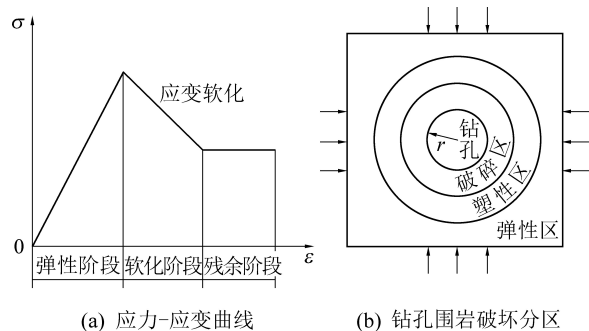


图1 煤岩体应变软化模型及钻孔周围煤体应力分布特征
Fig.1 Coal and rock mechanics model and stress distribution around borehole

等效塑性剪切应变可以作为描述应变软化过程的软化参数^[20-21]为

$$\gamma_p = \sqrt{2/3(\varepsilon_{1,p}^2 + \varepsilon_{2,p}^2 + \varepsilon_{3,p}^2)} \quad (1)$$

式中: γ_p 为等效塑性剪切应变; $\varepsilon_{1,p}$ 、 $\varepsilon_{2,p}$ 、 $\varepsilon_{3,p}$ 为沿3个主应变方向的塑性主应变。

应变软化过程是在内摩擦角不变的情况下失去黏聚力的过程,黏聚力随着等效塑性剪切应变的增加而呈线性减小,在塑性条件下,全应力应变曲线上的黏聚力可以表示的等效塑性剪切应变分段线性函数^[22]为

$$c = \begin{cases} c_0 - (c_0 - c_r) \frac{\gamma_p}{\gamma_p^*} & (\gamma_p < \gamma_p^*) \\ c_r & (\gamma_p \geq \gamma_p^*) \end{cases} \quad (2)$$

式中: c 为黏聚力; c_0 为初始黏聚力; c_r 为残余黏聚力; γ_p^* 为临界塑性剪切应变。

数值模拟中,通常使用 Mohr-Coulomb (M-C) 准则的六边形与 Drucker-Prager (D-P) 失稳准则外接圆进行匹配作为岩石的破坏准则^[23]。D-P 准则考虑了静水压对岩石破坏的影响,认为材料的破坏由偏应力第一不变量和第二不变量共同决定,其表达式为

$$\begin{cases} \sqrt{I_2} + \alpha I_1 = \kappa \\ \alpha = \frac{\tan \varphi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}} \\ \kappa = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_1 、 I_2 为偏应力第一不变量、第二不变量,MPa; α 和 κ 为材料常数; φ 为煤的内摩擦角,°。

1.1.2 渗透率模型

煤层渗透率是控制煤层瓦斯流动的关键参数,主要受地应力改变引起的煤体裂隙变化影响。水力冲孔使煤层应力重新分布,煤体发生变形和破坏,裂

隙宽度增大,数量增多,进而煤层渗透率增加。煤体所处的应力状态不同,发生的变形不同,因此渗透率随地应力状态的变化遵循不同的函数关系。根据前人研究,在弹性阶段($\gamma_p = 0$)、塑性软化阶段($0 < \gamma_p < \gamma_p^*$)、残余阶段($\gamma_p \geq \gamma_p^*$),水力冲孔钻孔周围煤体渗透率与体积应力变化量的关系满足下式^[24-26],即

$$k = \begin{cases} k_0 e^{-c_f(\Delta\sigma_v)} & (\gamma_p = 0) \\ k_0 \left(1 + \frac{\gamma_p}{\gamma_p^*} \xi\right) e^{-c_f(\Delta\sigma_v)} & (0 < \gamma_p < \gamma_p^*) \\ k_0 (1 + \xi) e^{-c_f(\Delta\sigma_v)} & (\gamma_p \geq \gamma_p^*) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为渗透率, m^2 ; k_0 为初始渗透率, m^2 ; c_f 为裂隙压缩因子, MPa^{-1} ; σ_v 为体积应力,MPa; ξ 为渗透率跃变系数。

1.2 瓦斯流动模型

1.2.1 基质瓦斯扩散

煤基质的瓦斯流动遵循质量守恒方程为

$$\frac{\partial m_m}{\partial t} = -Q_s \quad (5)$$

$$\begin{cases} m_m = \frac{V_L p_m}{p_m + p_L} \frac{M_g}{V_M} \rho_c + \frac{\varphi_m M_g p_m}{RT} \\ Q_s = \frac{M_g}{\tau RT} (p_m - p_f) \end{cases} \quad (6)$$

式中: m_m 为单位体积煤基质中的瓦斯质量, kg/m^3 ; Q_s 为单位体积煤基质同裂隙系统的质量交换率, $kg/(m^3 \cdot s)$; V_L 为朗格缪尔体积, m^3/kg ; p_m 为孔隙瓦斯压力,MPa; p_L 为朗格缪尔压力,MPa; M_g 为甲烷的摩尔质量, kg/mol ; ρ_c 为煤体视密度, kg/m^3 ; V_M 为气体摩尔体积, $0.0224 m^3/mol$; φ_m 为煤基质孔隙率,%; R 为理想气体常数, $J/(mol \cdot K)$; T 为煤层温度,K; τ 为吸附时间,等于煤体中63.2%的瓦斯解吸出来的时间,d; p_f 为裂隙瓦斯压力,MPa。

将式(6)代入质量守恒式(5),得基质瓦斯流动方程,即

$$\frac{\partial p_m}{\partial t} = - \frac{V_M (p_m - p_f) (p_L + p_m)^2}{\tau R T V_L p_L \rho_c + \tau \varphi_m V_M (p_L + p_m)^2} \quad (7)$$

1.2.2 裂隙瓦斯渗流

裂隙中瓦斯流动满足质量守恒方程为

$$\frac{\partial m_f}{\partial t} = -\nabla(\rho_f \cdot v_f) + Q_s \quad (8)$$

$$\begin{cases} m_f = \frac{\varphi_f M_g p_f}{RT} \\ v_f = -\frac{k}{\mu} \nabla p_f \end{cases} \quad (9)$$

式中： m_f 为单位体积煤体裂隙瓦斯质量，kg； φ_f 为煤体裂隙率，%； ρ_f 为裂隙瓦斯密度，kg/m³； v_f 为煤体裂隙瓦斯流动速度，m/s； k 为渗透率，m²； μ 为甲烷动力黏度，Pa·s。

将方程(9)代入质量守恒式(8)，得裂隙瓦斯流动的方程为

$$\varphi_f \frac{\partial p_f}{\partial t} = \nabla \left(\frac{k}{\mu} p_f \nabla p_f \right) + \frac{1}{\tau} (p_m - p_f) \quad (10)$$

2 模拟与结果

以上建立了可用于数值模拟的钻扩造穴后煤层渗透率演化和瓦斯流动方程。笔者采用 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件对以上方程进行了计算求解，数值模拟中选用了 COMSOL 软件中的 3 个模块：钻孔开挖选择固体力学模块，基质瓦斯扩散选择 PDE 模块，裂隙瓦斯渗流选择达西定律模块。

2.1 模型描述和输入参数

根据山西阳煤寺家庄煤矿北翼辅助运输大巷底板预抽巷道现场穿层水力冲孔情况，本次模拟的几何模型及边界条件如图 2 所示。为消除边界的影响，建立了 40 m×40 m 的矩形区域，远大于钻孔的增透区。二维模型是真实三维煤层的简化，2D 模型不会影响计算的精度，并且利于显示应力和瓦斯压力分布^[27-28]。对于固体变形模型，模型的左边和上边为恒定应力条件，代表煤层的水平地应力，右边和下边为滚轴边界。对于瓦斯抽采模型，钻孔内为恒定压力边界，四周为无流动边界条件。

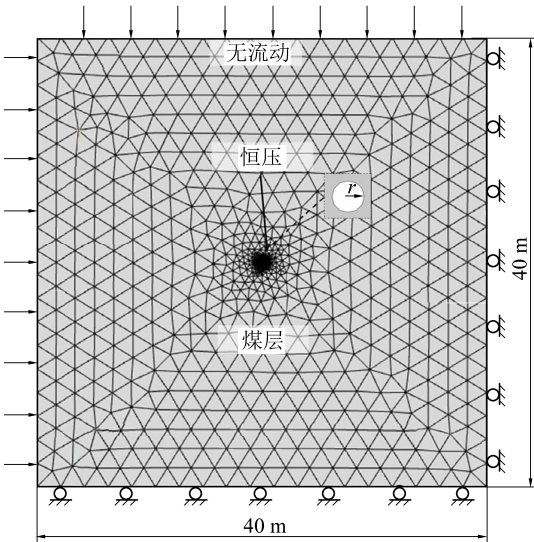


图 2 几何模型和边界条件

Fig.2 Geometric model and boundary conditions

所有参数均通过实验室试验获得或现场测量得到。模拟中所用参数如下：

煤层泊松比 ν_c	0.3
煤层弹性模量 E/MPa	1 000
初始水平应力 σ_h/MPa	10
原始瓦斯压力 p_0/MPa	2.0
煤层初始黏聚力 c_0/MPa	0.6
煤层残余黏聚力 c_r/MPa	0.5
煤体视密度 $\rho_c/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	1.3
煤层内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	30
煤层软化参数的临界值 $\gamma_p^*/10^{-2}$	0.01
原始渗透率 k_0/m^2	5×10^{-18}
渗透率突变系数 ξ	25
裂隙压缩因子 c_f/MPa	0.10
煤体裂隙率 φ_f	0.012
基质孔隙率 φ_m	0.065
CH ₄ 朗格缪尔体积 $V_L/(m^3 \cdot t^{-1})$	48.16
CH ₄ 朗格缪尔压力 p_L/MPa	1.35
CH ₄ 摩尔质量 $M_g/(g \cdot \text{mol}^{-1})$	16
气体摩尔体积 $V_M/(L \cdot \text{mol}^{-1})$	22.4
CH ₄ 动力黏度 $\mu/(Pa \cdot s)$	1.08×10^{-5}
气体常数 $R/(J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot K^{-1})$	8.314
吸附时间 τ/d	0.52
煤层温度 T/K	293

2.2 造穴半径对增透效果的影响

以造穴半径 0.6 m 为例，分析钻孔周围煤体的应力、等效塑性应变分布。钻孔施工后，钻孔周围煤的径向应力、切向应力、体积应力和等效塑性剪切应变 γ_p 如图 3 所示。根据平面应变假设， σ_2 为常数，体积应力为 σ_1 和 σ_3 之和。由图 3 可知，钻孔周围的 $\gamma_p \gg 0$ ，体积应力很小。随着距钻孔的距离增加，等效塑性应变急剧下降，体积应力增加。 $\gamma_p > 0$ 时，煤体处于应变软化阶段； $\gamma_p = 0.01\%$ 时，煤体处于残余阶段，发生塑性破坏。因此，钻孔周围塑性破坏区为 0.96 m，软化区的范围为 0.29 m，增透区的厚度为 1.25 m，即等效增透半径为 1.85 m。当距钻孔中心

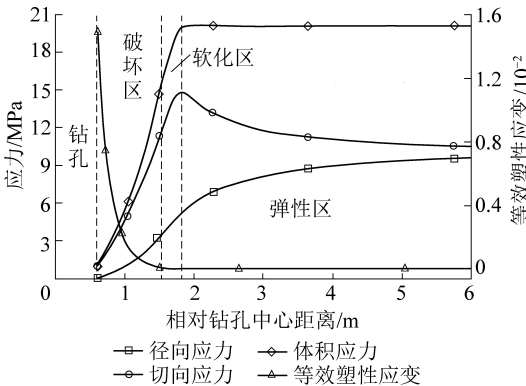


图 3 造穴钻孔周围应力和等效塑性应变分布

Fig.3 Distribution of stress and equivalent plastic strain around a borehole

距离超过 1.85 m 时, $\gamma_p = 0$, 体积应力为原始值, 煤体处于弹性阶段。

为研究造穴半径对煤体渗透率分布的影响, 确定合理的造穴半径, 分别对造穴半径为 0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8 m 情况下钻孔周围煤体的渗透率演化特征和瓦斯压力进行了对比分析。如图 4a 所示, 实施水力造穴后, 钻孔周围煤体渗透率得到提高, 且距钻孔越近, 煤层渗透率越大, 不同造穴半径下煤层渗透率的最大值均为原始渗透率的 1 250 倍。随着距离远离钻孔, 煤体渗透率与原始煤层渗透率比 (k/k_0) 逐渐减小, 最终趋近于 1, 即煤体渗透率等于

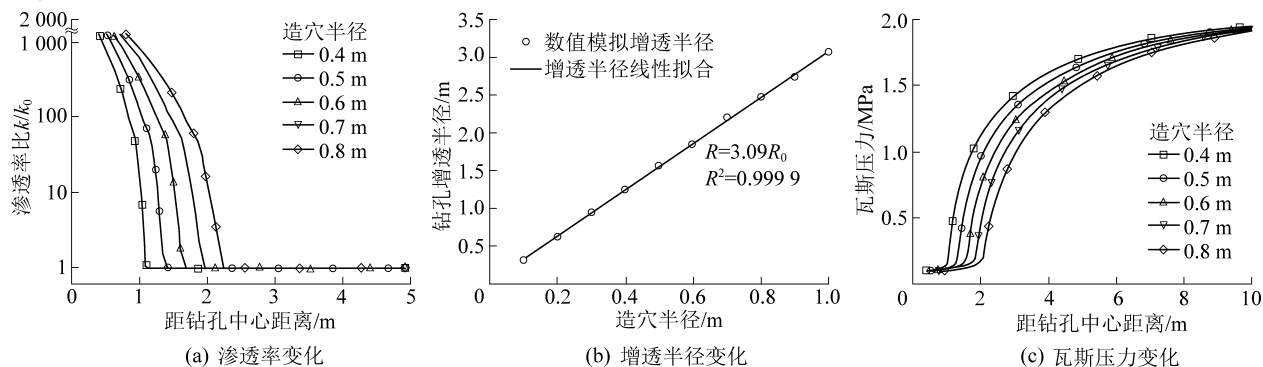


图 4 不同造穴半径钻孔周围渗透率、增透半径及瓦斯压力分布

Fig.4 Permeability, permeability increase zone and gas pressure distribution around boreholes with different cavitation radii

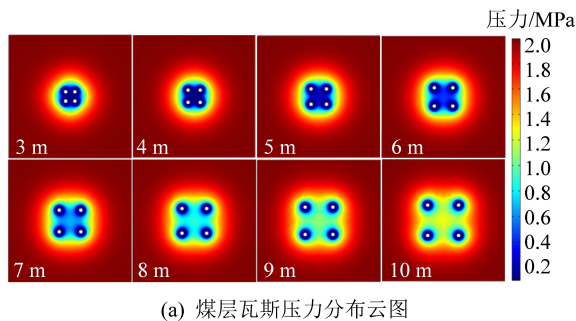
由图 4 可知, 造穴半径越大, 增透范围越大, 越利于瓦斯抽采, 但这并不表明现场工程实施时造穴半径越大越好, 一方面造穴半径过大会造成单个钻孔的成本增加, 另一方面造穴半径受技术和钻机的条件限制。由于现场施工过程中, 机械钻杆刀臂的最大半径为 0.6 m, 因此, 结合现场条件, 施工造穴半径采用 0.6 m。

2.3 钻孔间距对瓦斯抽采的影响

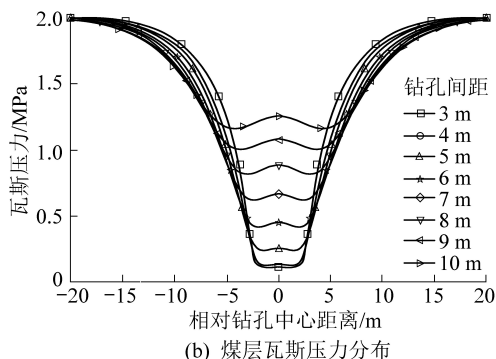
井下煤层瓦斯抽采极其复杂, 1 个区域内有大量的抽采钻孔, 因此钻孔间距是影响瓦斯抽采的 1 个重要因素。对于同 1 个抽采区域, 钻孔间距越小, 钻孔数量越多, 同时抽采效率越高。但是钻孔数量的增加意味着成本的增加, 因此, 确定合理的钻孔间距是非常重要的。当钻孔半径为 0.60 m 时, 单个钻孔的增透半径为 1.85 m。为了使煤层的增透效果最优化, 钻孔间距应为 3.70 m。然而, 由于多孔抽采孔间互扰的影响, 钻孔间距过小会降低每个钻孔的抽采效率。因此, 为确定合理的钻孔间距, 模拟了钻孔间距为 3~10 m 共 8 种工况下的瓦斯抽采情况。

不同钻孔间距下抽采 10 d 后煤层瓦斯压力云图如图 5a 所示, 煤层中间监测线瓦斯压力分布如图 5b 所示。根据图 5 可以看出, 钻孔间距为 3 m 时, 4 个钻孔间煤层瓦斯压力最低, 随着钻孔间距的增大, 瓦斯

原始煤层渗透率。随着造穴半径的增大, 煤层增透范围增大, 表明造穴半径越大, 钻孔增透半径越大。如图 4b 所示, 钻孔增透半径随造穴半径呈线性增加, 增透半径约为造穴半径的 3.09 倍, 说明瓦斯抽采影响半径随着造穴半径的增加而增大。同时, 图 4c 显示了不同造穴半径抽采 10 d 后的煤层瓦斯压力, 随着造穴半径增加, 煤体瓦斯压力减小, 且随着距离钻孔中心距离的增加瓦斯压力逐渐增大, 最终趋近于恒定值(煤层原始瓦斯压力 2 MPa), 表明通过水力钻扩造穴技术增加钻孔的半径可以对钻孔周围较大范围内的煤体进行卸压增透。



(a) 煤层瓦斯压力分布云图



(b) 煤层瓦斯压力分布

图 5 不同钻孔间距的煤层瓦斯压力分布

Fig.5 Coal seam gas pressure distribution under

different borehole spacing

压力逐渐增加。以消除煤层突出危险性的瓦斯压力界限 0.74 MPa 为界, 钻孔间距小于 7 m 均符合要求。

不同钻孔间距下 10 d 内的抽采瓦斯累积量(图 6)。相同时间内, 瓦斯抽采总量随着钻孔间距的增

加而增加,但增加量逐渐减小。钻孔间距为 3、4、5 和 6 m 时,10 d 内瓦斯抽采总量分别为 2 895.28、3 534.47、4 091.75 和 4 503.44 m^3 ,相比于前一种工况分别增加 22.07%、15.77% 和 10.06%。钻孔间距为 7、8、9 和 10 m 时,10 d 内瓦斯抽采总量分别为 4 782.13、4 948.15、5 039.98 和 5 079.98 m^3 ,相比于前一种工况分别增加 6.19%、3.47%、1.86% 和 0.79%。因此,为减少钻孔之间互相干扰的影响,若以增长率 10% 为标准,合理的钻孔间距为 6 m;若以增长率 5% 为标准,合理的钻孔间距为 7 m。

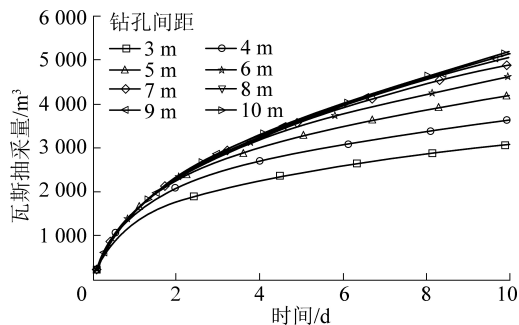


图6 不同钻孔间距的瓦斯抽采量

Fig.6 Gas drainage volume of different borehole spacing

3 现场应用试验

考察地点位于阳泉矿区寺家庄煤矿 15 号煤层北翼辅助运输大巷。在巷道的掘进过程中,由于煤层的起伏,需要进行石门揭煤。揭煤区域全长 220 m,平均煤厚 5.47 m,煤层原始瓦斯含量为 8.21 ~ 10.38 m^3/t ,煤层具有突出危险性。在大巷掘进前,

沿着巷道方向分别布置普钻区和造穴区,以穿层钻孔的方式进行瓦斯抽采。普通钻孔区域长度为 65 m,钻孔间排距为 5 m,布置 1—14 共 14 排瓦斯抽采钻孔,每排含 9 个瓦斯抽采钻孔,巷道两侧钻孔布置范围分别为 20 和 15 m。在普钻区之后,布置造穴钻孔区,钻孔区域长度为 50 m,巷道两侧钻孔布置范围不变。造穴区布置 15—25 共 11 排钻孔,钻孔排间距为 5 m。在奇数排(15、17、19、21、23、25 排)施工 1、3、5、7、9 号钻孔并进行水力钻扩造穴,在偶数排(16、18、20、22、24 排)施工 2、4、6、8 号钻孔并进行水力钻扩造穴。图 7 为普钻钻孔与造穴钻孔布置平面图和剖面图。

造穴钻孔施工过程中,钻杆通过穿层钻孔的方式深入到巷道周围煤体内,同时打开高压水射流泵,高压水射流从钻冲两用钻头上的造穴喷嘴喷出,形成造穴孔洞,并在钻穴孔段中往复钻进-回退钻杆,通过水流的作用将破碎煤冲出孔洞。当孔洞出煤停止,冲出的水流变清时,停止造穴,从而实现煤体的高效卸压增透。巷道造穴区施工过程中造穴水压为 16~20 MPa,平均水压约 18 MPa;单穴造穴时间和出煤量分别为 70~290 min、5~19 t;根据出煤量、煤层厚度和煤的密度计算出实际单穴造穴半径平均值为 0.65 m。然而,第 2.2 节确定的最优单穴造穴半径为 0.60 m,这是由于现场施工过程中采用机械和水力联合造穴,机械钻杆刀臂的最大半径为 0.60 m,而高压水射流增大了造穴半径,因此实际造穴半径均大于设计的 0.60 m。

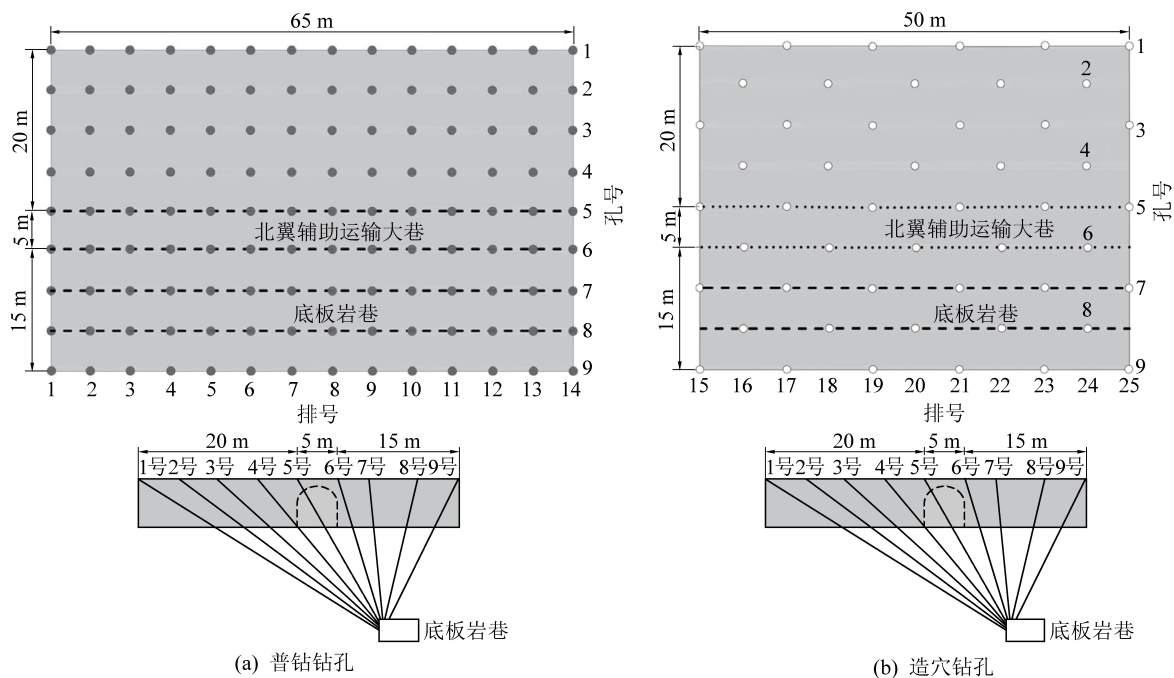


图7 普钻钻孔与造穴钻孔布置平剖面示意

Fig.7 Layout of general boreholes and cavitation boreholes

在寺家庄矿 15 号煤层不同区域的瓦斯抽采过程中,对普钻区和造穴区的瓦斯抽采数据进行了计量,普钻区瓦斯抽采时间约 6 个月,造穴区瓦斯抽采时间约 2 个月。图 8 记录了瓦斯抽采措施实施 60 d 以来,普钻区和造穴区的瓦斯抽采纯量和抽采浓度的情况。图 8a 表明,抽采过程中,普钻区瓦斯抽采纯量为 $0.10 \sim 0.25 \text{ m}^3/\text{min}$,而造穴区瓦斯抽采纯量为 $0.75 \sim 1.26 \text{ m}^3/\text{min}$,明显高于普钻区,且修正后造穴区的平均瓦斯抽采纯量约为普钻区的 5.7 倍。图 8b 表明,普钻区瓦斯抽采体积分数为 $11\% \sim 38\%$,平均瓦斯抽采体积分数约 25%;而造穴区瓦斯抽采体积分数为 $26\% \sim 58\%$,平均瓦斯抽采体积分数可达 50%,相对普钻区提高了 2 倍左右。

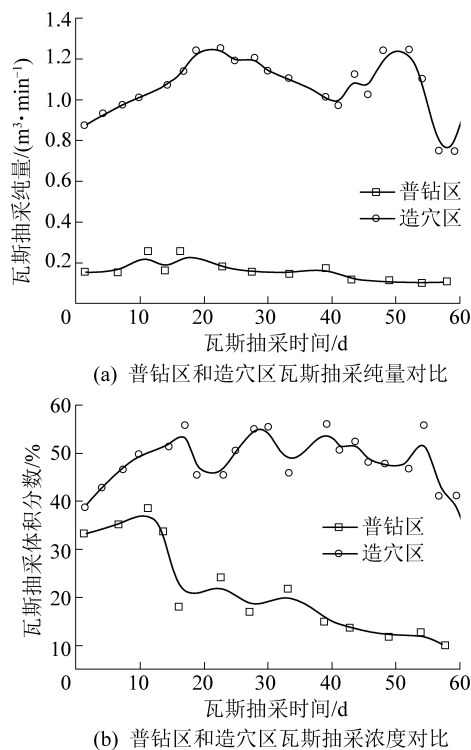


图 8 普钻区和造穴区瓦斯抽采纯量和瓦斯抽采浓度对比

Fig.8 Comparison of purity and concentration of gas drainage in general boreholes and cavitation holes

北翼辅运底抽巷普通穿层钻孔和水力钻扩造穴钻孔瓦斯抽采技术的经济效益情况如图 9 所示。对普钻区进行 6 个月的瓦斯抽采后,共抽采瓦斯 $44\,800 \text{ m}^3$;而对造穴区进行 2 个月的瓦斯抽采后,共抽采瓦斯 $83\,600 \text{ m}^3$,瓦斯抽采总量约提高了 2.2 倍;瓦斯抽采率由原来的 20.9% 提高到目前的 56.4%,提高了约 2.7 倍;瓦斯抽采纯量由原来的 $0.15 \text{ m}^3/\text{min}$ 提高到目前的 $0.85 \text{ m}^3/\text{min}$,提高了约 5.7 倍。采用新技术之后,瓦斯抽采周期由原来的 180 d 降低为目前的 60 d (含钻孔施工过程中的瓦斯抽采);钻孔施工工程量由原来的 3.1 km (煤层进

尺 $1\,539 \text{ m}$) 降低为目前的约 1.06 km (煤层中进尺 477 m); 50 m 长度区域的钻孔数量由原来的 99 个减少为目前的 50 个。以上结果均表明,实施水力钻扩造穴技术后,瓦斯抽采经济效益显著提高。

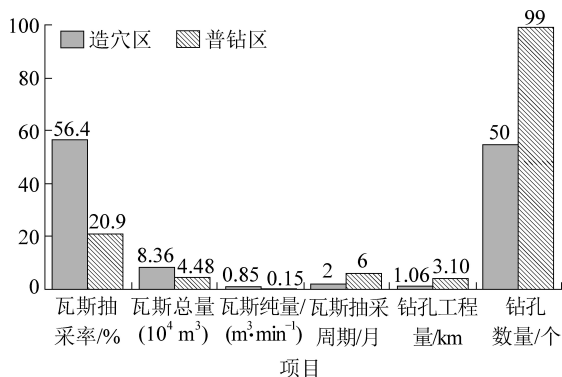


图 9 瓦斯抽采技术经济效益对比分析

Fig.9 Comparative analysis of economic benefits of gas drainage technology

4 结 论

1) 以弹性力学应变软化模型为基础建立了钻孔扩造穴后煤层的渗透率演化方程,分析了钻孔造穴的增透机理,并以扩散-渗流煤层瓦斯流动理论模型为基础建立了穿层钻孔造穴煤层瓦斯流动方程。

2) 利用 COMSOL Multiphysics 多物理场数值模拟软件求解了寺家庄煤矿北翼辅助运输大巷底板预抽巷道对 15 号煤层进行钻扩造穴情况,分析了造穴钻孔周围煤层渗透率分布和瓦斯抽采情况,并得出了合理的造穴半径 0.6 m ,钻孔间距 $6.0 \sim 7.0 \text{ m}$ 。

3) 经现场工程试验 15 号煤层的瓦斯抽采过程,实施水力钻扩造穴技术后,瓦斯抽采率、抽采浓度和抽采纯量分别提高了约 2.7、2.0、5.7 倍;普钻区经 6 个月的瓦斯抽采后,共抽采瓦斯 $44\,800 \text{ m}^3$;造穴区经 2 个月的瓦斯抽采后,共抽采瓦斯 $83\,600 \text{ m}^3$,瓦斯抽采总量约提高了 2.2 倍,施工工程量和瓦斯抽采周期降低了约 2 倍。

参考文献 (References):

- [1] AGUADO M B D, NICIEZA C G. Control and prevention of gas outbursts in coal mines, Riosa-Olloniego Coalfield, Spain [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 69(4): 253-266.
- [2] PAN Z J, CONNELL L D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 92: 1-44.
- [3] NI Guanhua, DONG Kai, LI Shang, et al. Gas desorption characteristics effected by the pulsating hydraulic fracturing in coal [J]. Fuel, 2019, 236(3): 190-200.
- [4] LU Yiyu, LIU Yong, LI Xiaohong, et al. A new method of drilling long

- boreholes in low permeability coal by improving its permeability[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84(2): 94-102.
- [5] 王永革, 令狐建设. 地面井水力压裂增透技术在立井快速揭煤中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(5): 77-80.
- WANG Yongge, LINGHU Jianshe. Application of permeability enhanced technology of hydraulic fracturing of ground well in quick coal[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(5): 77-80.
- [6] 曹建军. 超高压水力割缝卸压抽采区域防突技术应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 88-94.
- CAO Jianjun. Application research on regional outburst prevention technology of ultra-high pressure hydraulic slot pressure in relief drainage area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 88-94.
- [7] 邓强. 水力压裂消突技术在低透气性煤层瓦斯治理的应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(1): 98-102.
- DENG Qiang. Application of anti-outburst technology of hydraulic fracturing in gas treatment of low permeability coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(1): 98-102.
- [8] 刘明举, 崔凯, 刘彦伟, 等. 深部低透气性煤层水力冲孔措施防突机理分析[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 45-48.
- LIU Mingju, CUI Kai, LIU Yanwei, et al. Analysis on outburst prevention mechanism of borehole hydraulic flushing measures for deep and low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 45-48.
- [9] 王峰, 陶云奇, 刘东. 水力冲孔卸压范围及瓦斯抽采规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 96-100.
- WANG Feng, TAO Yunqi, LIU Dong. Study on pressure released scope of hydraulic flushing and gas drainage law[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 96-100.
- [10] YIN Guangzhi, JIANG Changbao, WANG Jianguo, et al. Combined Effect of Stress, Pore pressure and temperature on methane permeability in anthracite coal: an experimental study[J]. Transport in Porous Media, 2013, 100(1): 1-16.
- [11] WANG Shugang, ELSWORTH D, LIU Jishan. Permeability evolution during progressive deformation of intact coal and implications for instability in underground coal seams[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 58: 34-45.
- [12] 刘东, 刘文. 水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 136-141.
- LIU Dong, LIU Wen. Research on gas extraction technology: hydraulic stamping and hydrofracture to pressure relief and permeability improvement[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 136-141.
- [13] 孙四清, 张俭, 安鸿涛. 松软突出煤层穿层洞穴完井钻孔瓦斯抽采实践[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 49-51, 55.
- SUN Siqing, ZHANG Jian, AN Hongtao. Practices on gas drainage with cavity completion borehole passing through soft and outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 49-51, 55.
- [14] 杜昌华, 冯仁俊. 低透松软破碎厚煤层水力扩孔增透技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 152-156.
- DU Changhua, FENG Renjun. Study on hydraulic creaming technology in low permeability and soft friable thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 152-156.
- [15] 牟全斌, 赵继展. 基于机械造穴的钻孔瓦斯强化抽采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 58-61, 86.
- MOU Quanbin, ZHAO Jizhan. Study on enhanced gas drainage technology of borehole gas based on mechanical borehole reaming[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 58-61, 86.
- [16] 郝从猛, 刘洪永, 程远平. 穿层水力造穴钻孔瓦斯抽采效果数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(5): 1-4.
- HAO Congmeng, LIU Hongyong, CHENG Yuanping. Numerical simulation study on gas drainage effect by through-beds hydraulic flushing hole[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(5): 1-4.
- [17] 赵继展. 井下瓦斯抽采钻孔机械造穴技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(6): 66-68, 72.
- ZHAO Jizhan. Study of mechanical cavity-forming technology for underground gas drainage hole drilling[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(6): 66-68, 72.
- [18] 于宝钟. 松软低透煤层高压射流造穴强化抽采技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 42-46, 52.
- YU Baozhong. Enhanced extraction technology of high pressure jet in soft and low permeability coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(6): 42-46, 52.
- [19] 张浩. 构造煤层掘进工作面区域性顺层水力造穴强化瓦斯抽采机理与工程应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [20] ALONSO E, ALEJANO L R, VARAS F, et al. Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27(13): 1153-1185.
- [21] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2003, 18(1): 35-48.
- [22] LEE Y K, PIETRUSZCZAK S A. A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2008, 23(5): 588-599.
- [23] LABUZ J F, ZANG A. Mohr-Coulomb failure criterion[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(6): 975-979.
- [24] SOMERTON W H, SOYLEMEZOGLU I M, DUDLEY R C. Effect of stress on permeability of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1975, 12: 129-145.
- [25] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. Engineering Geology, 2002, 63(3/4): 291-300.
- [26] AN Fenghua, CHENG Yuanping, WANG Liang, et al. A numerical model for outburst including the effect of adsorbed gas on coal deformation and mechanical properties[J]. Computers & Geotechnics, 2013, 54(10): 222-231.
- [27] PERERA M S A, RANJITH P G, CHOI S K, et al. A parametric study of coal mass and cap rock behaviour and carbon dioxide flow during and after carbon dioxide injection[J]. Fuel, 2013, 106(2): 129-138.
- [28] YE Zhihui, CHEN Dong, WANG J G. Evaluation of the non-Darcy effect in coalbed methane production[J]. Fuel, 2014, 121(2): 1-10.