

不同侧压力系数下瓦斯抽采孔 最佳布孔间距数值模拟

邓宗萍¹, 王卫军^{1,2*}, 彭绍明³, 袁超^{1,2}, 马谕杰¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
3. 湖南省煤业集团 嘉禾矿业有限公司, 湖南 郴州 423000)

摘要: 为探究不同侧压力系数下瓦斯抽采孔的最佳布孔间距, 采用数值模拟的方式, 建立基于塑性破坏的流固耦合模型, 模拟钻孔周围的塑性区分布以及塑性区连接状态。研究表明: 瓦斯单孔抽采时, 抽采钻孔形成的塑性区半径随侧压力系数呈指数增长, 塑性区半径越大, 裂隙分布更广, 利于瓦斯流通; 多孔抽采时, 瓦斯流场范围与侧压力系数呈正相关, 抽采时间与侧压力系数呈负相关; 由于多孔抽采存在叠加效应, 布孔间距大于单孔抽采的塑性区半径的 2 倍; 采用数值软件模拟侧压力系数为 2.48 时的最佳布孔间距为 3.4 m, 与嘉禾煤矿 2365 工作面的实际布孔间距一致。模拟结果具有一定的参考价值, 在实际工程中可将瓦斯抽采钻孔布置在侧压力系数高的区域, 或者人为增加偏应力以便于瓦斯抽采。

关键词: 瓦斯抽采; 布孔参数; 蝶形; 塑性区; 数值模拟

中图分类号: TD712.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)04-0017-09

Numerical Simulation Study on Optimal Hole Spacing of Gas Drainage Holes Under Different Lateral Pressure Coefficients

DENG Zongping¹, WANG Weijun^{1,2*}, PENG Shaoming³, YUAN Chao^{1,2}, MA Yujie¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Jiahe Mining Co., Ltd., Hunan Coal Industry Group, Chenzhou 423000, China)

Abstract: In order to explore the optimal spacing of gas holes under different lateral pressure coefficients, a numerical simulation method is used to establish a fluid solid coupling model based on plastic failure, simulating the distribution of the plastic zone around the borehole and the connection state of the plastic zone. The research results show that during single hole gas drainage, the radius of the plastic zone formed by gas drainage boreholes increases exponentially with the lateral pressure coefficient, and a large number of cracks are formed in the plastic zone, which is conducive to gas flow. That is, a high lateral pressure coefficient is a necessary and sufficient condition for increasing the spacing of gas drainage holes. During multi hole extraction, the range of gas flow field is positively correlated with the lateral pressure coefficient, while the extraction time is negatively correlated with the lateral pressure coefficient. Due to the superimposed effect of multi hole pumping, the spacing between holes is greater than twice the radius of the plastic zone of single hole pumping. Using numerical software to simulate the optimal hole spacing when the lateral pressure coefficient is 2.48, the optimal hole spacing is 3.4 m, which is consistent with the actual hole spacing of the 2365 working face of Jiahe Coal Mine. The simulation results have some referential value. In practical engineering, gas drainage boreholes

收稿日期: 2022-10-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374088)

* 通信作者, E-mail: wjwang@hust.edu.cn

can be arranged in areas with high lateral pressure coefficient, or the bias stress can be artificially increased for gas extraction.

Keywords: gas extraction; hole layout parameters; butterfly shape; plastic zone; numerical simulation

我国大部分矿区煤层瓦斯含量较高,瓦斯灾害防控压力大,制约了矿井安全生产^[1-4].钻孔抽采瓦斯技术是降低煤体瓦斯含量,预防瓦斯事故发生,实现煤与瓦斯安全开采的根本措施^[5-8].影响钻孔抽采瓦斯的因素有很多,其中钻孔之间的距离是一个较为重要的影响因素.

郝富昌、张超林等^[9-10]认为有效抽采半径受渗透率和孔隙率综合作用的影响,并分析了抽采过程中这些参数的演变规律以及对瓦斯抽采有效区域的影响程度;Li、范超军等^[11-12]探讨流-固-热耦合状态下深部煤层气抽采过程中,Langmuir 吸附常数、Klinkenberg 因子、垂直地应力、储层压力和温度等因素对煤层渗透率的影响程度.文献[13-15]将相邻钻孔结合做研究,发现它们之间存在叠加效应;许江、彭守建等^[16-17]的研究表明钻孔之间的叠加效应会影响有效抽采范围.瓦斯抽采孔附近的裂隙大小决定着瓦斯抽采的效率,而钻孔周围塑性区在一定程度上可代表煤体裂隙的分布范围及特征,对于塑性区的研究可以参考巷道围岩的研究成果,本文主要参考“蝶形塑性区”这一方面的研究成果.文献[18-20]发现新的巷道围岩塑性区分布形状,初步尝试某种特定形势下的蝶形塑性区;赵志强^[21]根据弹塑性力学理论,得到双向不等压孔洞附近的理论公式;马念杰等^[22]在此基础上,引入偏应力分量,弥补该理论的缺失;袁越等^[23]在引入偏应力分量的理论基础上,阐明了蝶形塑性区形成的力学条件;王卫军等^[24]基于 M-C 准则,代入 Kirsch 解得到圆形巷道围岩塑性区边界隐性方程,进一步运用于岩层控制研究.类推这些研究成果,煤体钻孔也会得到以上结论.煤与瓦斯共采受地应力与采矿活动的影响,使钻孔周围的应力分布发生变化,进而导致形成比孔洞大的蝶形塑性区.本文主要从侧压系数对蝶形塑性区的影响入手研究瓦斯抽采通道连接情况.

目前研究布孔间距的文献都是塑性区为圆形的情况,但实际井下煤体受压情况比较复杂,垂直压力和水平压力往往并不相等,这导致塑性区并不是规则的圆形分布.为了使瓦斯抽采效果达到最佳,研究瓦斯抽采孔布孔间距与钻孔周围塑性区分布的关系,并确定相邻钻孔最佳塑性区连接状态具有重要意义.由于现场实测与模型试验中,煤体受力形成的塑性破坏无法直接观测,而数值模拟研究却可以突破现场及模型试验条件的束缚,给出侧压力系数与瓦斯抽采布孔间距之间的规律,故本文在前人的研究基础上,运用数值模拟软件研究不同侧压力系数下瓦斯抽采孔最佳布孔间距,所得结论可以为相似工程提供一定参考.

1 数值计算模型

1.1 模型及计算参数

模拟的几何模型如图 1 所示.为消除边界的影响,建立 40 m×30 m 的矩形区域,远大于钻孔的塑性区半径.模型上方施加垂直应力,两边施加水平应力,钻孔半径为 52.5 mm^[25].二维模型是真实三维煤层的简化,不会影响计算的精度.煤体基本参数如表 1 所示.

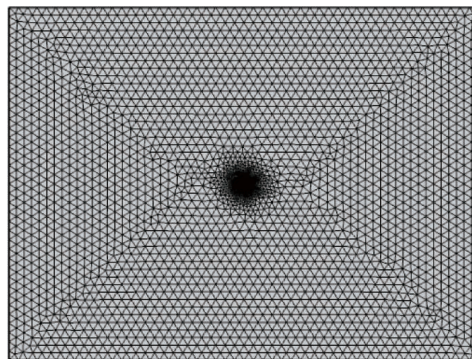


图 1 几何模型

表1 模型参数

参数名称	数值	参数名称	数值
煤的杨氏模量 E/MPa	1 200	煤层初始瓦斯压力 P_0/Pa	1.75×10^6
煤骨架杨氏模量 E_m/MPa	3 600	瓦斯的气体分子质量/ $(\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1})$	0.016
煤泊松比 ν	0.3	气体状态数/ $(\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1})$	8.413 5
煤的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 350	煤层温度/ K	293
煤的初始渗透率/ m^2	1×10^{-16}	Langmuir 压力常数/ Pa	1×10^6
煤的初始孔隙率	0.074	Langmuir 体积常数/ $(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.02
瓦斯的动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.84×10^{-5}		

1.2 模型物理场介绍

数值模拟软件是通过添加物理场来对模型进行仿真分析,为了让模型更加贴合煤体内瓦斯流动及煤体受力情况,建立瓦斯渗流场、基质瓦斯扩散场、煤体变形场这3个物理场。

1.2.1 基质瓦斯扩散

瓦斯不仅会在裂隙中流动,也会在煤基质中流动,而煤基质的瓦斯流动也遵循质量守恒方程^[26],即:

$$\frac{\partial m_m}{\partial t} = -Q_s; \quad (1)$$

$$\begin{cases} m_m = \frac{V_L p_m}{p_m + p_L} \frac{M_g}{V_M} \rho_c + \frac{\varphi_m M_g p_m}{RT}; \\ Q_s = \frac{M_g}{\tau RT} (p_m - p_f). \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_m 为单位体积煤基质中的瓦斯质量, kg ; t 为抽采时间, d ; Q_s 为单位体积煤基质同裂隙系统的质量交换率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; 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 ; V 为气体摩尔体积, $0.022\ 4\ \text{m}^3/\text{mol}$; ρ_c 为煤体视密度, kg/m^3 ; φ_m 为煤基质孔隙率, %; R 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 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(2)代入质量守恒式(1),得基质内瓦斯流动方程,即:

$$\frac{\partial p_m}{\partial t} = - \frac{V_M (p_m - p_f) (p_L + p_m)^2}{\tau RT V_L p_L \rho_c + \tau \varphi_m V_M (p_L + p_m)^2}. \quad (3)$$

基质瓦斯扩散场选用数值模拟软件中的 PDE 模块, PDE 模块可以通过输入合适的控制方程和初始边界条件来实现模拟,式(1)~式(3)即为 PDE 所需要输入的控制方程.模型的四周为零通量边界,钻孔为狄利克雷边界。

1.2.2 瓦斯渗流场

在渗流场中,煤体实质是多孔介质,煤体的孔隙率和渗透率是影响瓦斯抽采的重要因素,含瓦斯的煤孔隙率动态变化方程^[27]:

$$\varphi = \frac{1}{1+S} [(1+S_0)\varphi_0 + \alpha(S-S_0)]; \quad (4)$$

$$S = \varepsilon_v + \frac{P}{K_S} - \varepsilon_s; \quad (5)$$

$$S_0 = \frac{p_0}{K_S} - \frac{\varepsilon_L p_0}{p_0 + p_L}; \quad (6)$$

$$\alpha = 1 - \frac{E}{K_S}. \quad (7)$$

式中: φ 为孔隙率, %; S 为煤体应变变量, 取 1; φ_0 为初始孔隙率, %; S_0 为初始应变变量, 取 1; ε_v 为含瓦斯煤的体积应变, 取 1; ε_s 瓦斯的吸附和解吸体积应变, 取 1; P 为瓦斯压力, MPa ; K_S 为煤基质体积模量, MPa ; p_0 为初始瓦斯压力, MPa ; ε_L 为 Langmuir 体积应变常, 取 1; MPa ; E 为煤的体积模量; α 为煤基质孔隙对应

的Biot系数.

含瓦斯煤渗透率的动态变化方程^[27]:

$$k = k_0 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3. \quad (8)$$

式中: k 为瓦斯煤渗透率, %; k_0 为初始渗透率, %.

裂隙中瓦斯质量的变化与孔隙扩散的瓦斯质量满足质量守恒^[27], 即

$$\frac{\partial m_f}{\partial t} = -\nabla(\rho_f v_f) + Q_s; \quad (9)$$

$$\begin{cases} m_f = \frac{\varphi M_g p_f}{RT}; \\ v_f = -\frac{k}{\mu} \nabla p_f. \end{cases} \quad (10)$$

式中: m_f 为单位体积煤体裂隙瓦斯质量, kg; ρ_f 为裂隙瓦斯密度, kg/m^3 ; v_f 为煤体裂隙瓦斯流动速度, m/s ; μ 为甲烷动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

将式(10)代入质量守恒式(9), 得裂隙瓦斯流动的方程为

$$\varphi \frac{\partial p_f}{\partial t} = \nabla \left(\frac{k}{\mu} p_f \nabla p_f \right) + \frac{1}{\tau} (p_m - p_f). \quad (11)$$

以上公式是假设瓦斯在煤体裂隙中的流动符合达西定律而进行计算的, 所以瓦斯渗流场选用数值模拟软件中的达西定律板块进行模拟, 模型初始瓦斯压力为 1.75×10^6 MPa, 四周为无流动边界, 钻孔为抽采负压边界, 设定抽采负压为 0.02 MPa.

1.2.3 煤体变形场

含瓦斯煤的变形模型^[21]:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\gamma H}{2} \left[(1 + \eta) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + (\eta - 1) \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]; \\ \sigma_\theta = \frac{\gamma H}{2} \left[(1 + \eta) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - (\eta - 1) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]; \\ \tau_{r\theta} = \frac{\gamma H}{2} (\eta - 1) \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta. \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ_r 为任一点的径向应力; σ_θ 为任一点的环向应力; $\tau_{r\theta}$ 为任一点的剪应力; γ 为岩石容重; H 为巷道埋深; η 为侧压系数; a 为圆形钻孔的半径; r, θ 为任一点的极坐标.

1.2.4 塑性区边界方程

在矿山压力的作用下, 瓦斯抽采孔周围会出现一定范围的塑性区, 在塑性区范围内的煤体会形成大量裂隙, 导致瓦斯渗透率会增加, 利于瓦斯抽采. 图2为瓦斯抽采钻孔的受力模型.

根据岩石力学侧压力系数计算方法可知:

$$\eta = \frac{P_3}{P_1} \quad (13)$$

式中: P_1 为煤体受到的垂直应力, MPa; P_3 为煤体受到的水平应力, MPa.

从力学本质上看, 煤体的变形问题就是弹塑性解问题, 实际上煤体的变形问题与巷道围岩的变形问题一致. 基于摩尔-库伦破坏准则, 能得到关于 r, θ 的双向不等压圆形巷道塑性区边界的隐形方程^[24]:

$$f(r, \theta) = \{P_1(\eta + 1) (R_0^2/r^2) - P_1(\eta - 1) \cos 2\theta [1 + 3 (R_0^2/r^2)^2 - 2(R_0^2/r^2)]\}^2 + \{P_1(\eta - 1) \sin 2\theta [1 - 3 (R_0^2/r^2)^2 + 2(R_0^2/r^2)]\}^2 -$$

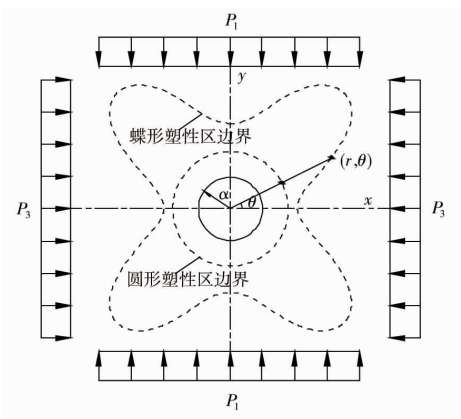


图2 瓦斯抽采钻孔受力模型

$$\frac{(1 - \cos 2\omega)}{2} \{ [P_1(\eta + 1) - 2\cos 2\theta (R_0^2/r^2) P_1(\eta - 1)]^2 - 4c^2 \} - 2c \sin 2\omega [P_1(\eta + 1) - 2(R_0^2/r^2) P_1(\eta - 1) \cos 2\theta] - 4c^2. \quad (14)$$

式中: c 为黏聚力, kN/m^2 ; ω 为内摩擦角, $^\circ$; R_0 为钻孔半径, m ; η 为侧压力系数; P_1 为垂直有效应力, MPa .

固体变形场运用蝶形破坏理论进行模拟, 钻孔为自由边界条件, 上边界为边界载荷施加垂直应力, 左右边界为边界载荷施加水平应力, 下边界为辊支撑.

2 单孔塑性区半径的研究

为研究侧压力系数对单孔塑性区半径的影响, 将实测垂直地应力的平均值 $\sigma_v = 5.4 \text{ MPa}$ 作为数值模拟中的垂直地应力, 通过改变模型的水平应力来调整侧压力系数. 不同侧压力系数下钻孔周围的塑性区分布如图 3 所示, 塑性区半径与侧压力系数的关系如图 4.

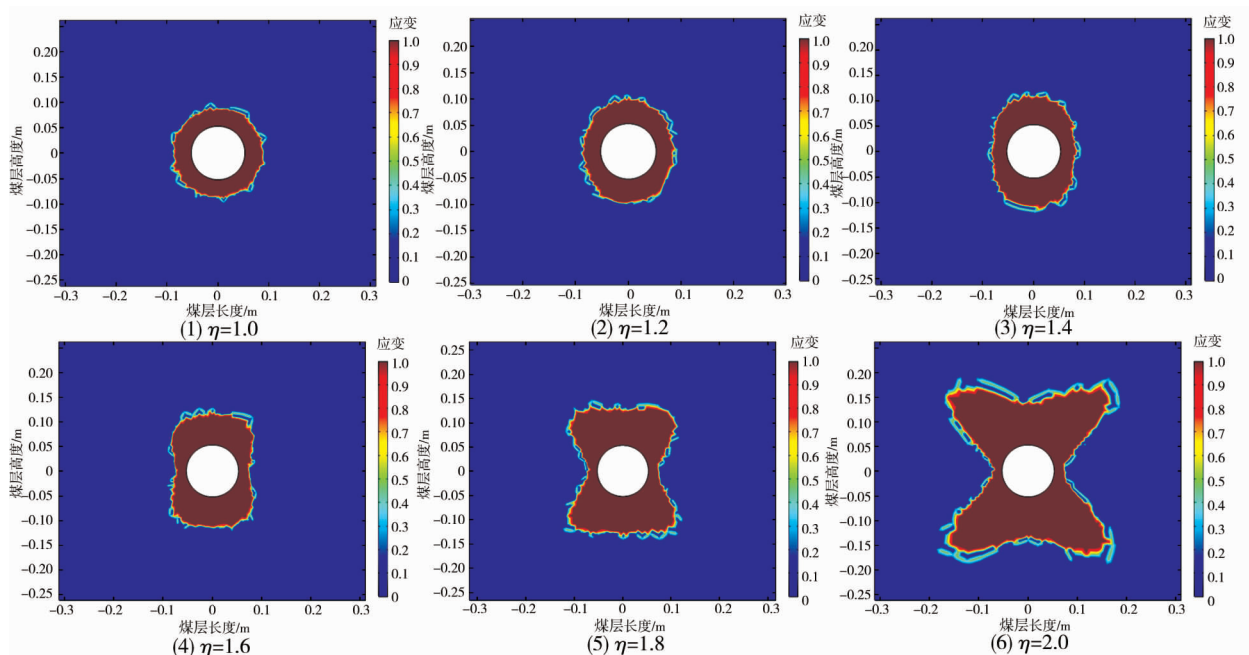


图 3 不同侧压力系数条件下钻孔周围的塑性区分布

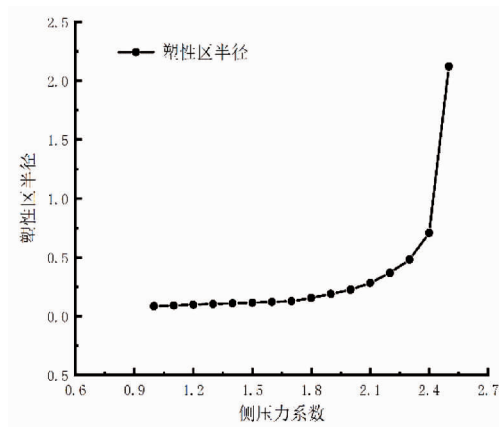


图 4 不同侧压力系数条件下钻孔周围的塑性区半径

由图 3 和图 4 可知: 随着侧压力系数的增大, 塑性区从圆形过渡到椭圆形再过渡到蝶形, 塑性区范围也在不断增大. 当其他条件相同时, 侧压力系数从 1.0 增加到 2.5 时, 塑性区半径由 0.087 m 增加到 2.121 m. 侧压力系数为 1.0~1.7 时, 即圆形过渡到蝶形期间, 塑性区增大趋势缓慢; 侧压力系数在进入 1.7 后, 塑性区四角开始凸出, 即塑性区进入蝶形分布, 塑性区增大趋势显著提高; 当侧压力系数增加到 2.5 时, 蝶形塑性区

的蝶叶存在着陡然增大的趋势。

瓦斯抽采过程中瓦斯流动分为在煤基质扩散和在裂隙中渗流,其中裂隙中渗流是瓦斯抽采的主要来源,而塑性区实质是煤体发生塑性破坏,形成大量裂隙,隙覆盖范围随之增大,而裂隙的增多有利于瓦斯流动,因此猜想侧压力系数越大越利于瓦斯抽采,并且利于增大瓦斯抽采的布孔间距。

3 不同侧压力系数多孔瓦斯抽采钻孔布置参数

3.1 多孔瓦斯抽采最佳布孔间距

瓦斯抽采中裂隙渗流起主要作用,而塑性区覆盖范围就是裂隙覆盖范围,本文定义塑性区呈现连接状态且钻孔涵盖范围最广的布孔间距为最佳布孔间距。

为研究不同侧压力系数条件下瓦斯抽采布孔间距,模拟通过固定侧压力系数改变瓦斯抽采的布孔间距(L)来观察塑性区连接状态变化情况.塑性区形态各选取一个圆形、椭圆形、蝶形作为研究对象,即选取侧压力系数为 1.0,1.5,2.5 做研究,模型中布置 3 行 3 列的瓦斯抽采孔,以便模拟塑性区连接状态,观察多孔瓦斯抽采的效果.在模拟的一系列孔距塑性区分布情况中,选取最佳孔间距及其他相近的 3 幅图做对比,见图 5~图 7。

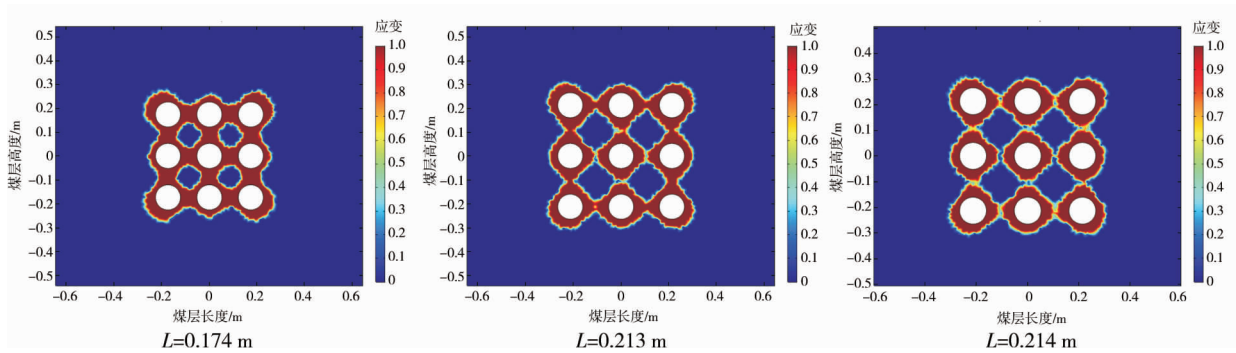


图 5 $\eta = 1.0$ 时不同间距塑性区连接分布

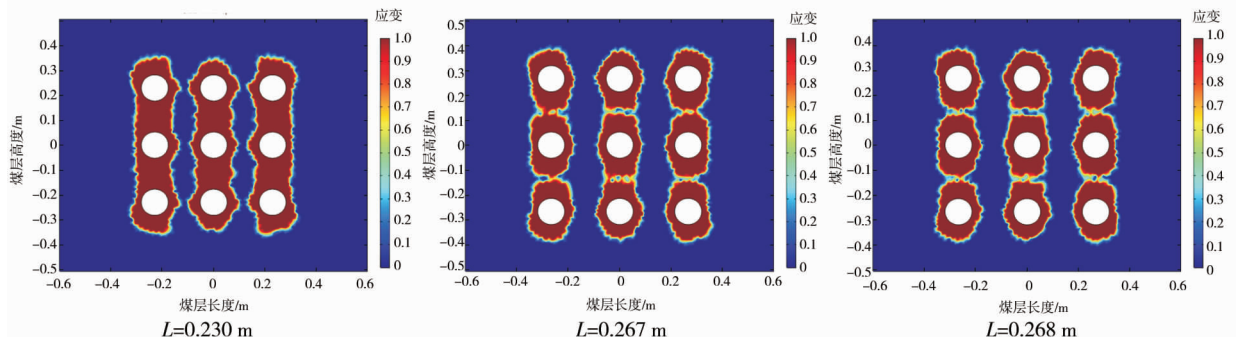


图 6 $\eta = 1.5$ 时不同间距塑性区连接分布

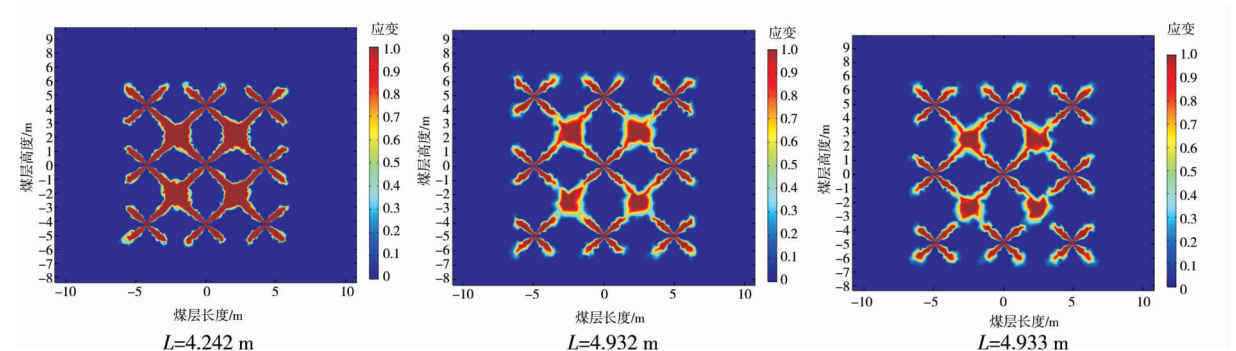


图 7 $\eta = 2.5$ 时不同间距塑性区连接分布

由图 5 可知:布孔间距 L 为 0.174 m 时,塑性区连接状态紧密且连接区域不再维持单孔的圆形塑性

区,但是覆盖面积相对较小;当布孔间距 L 增加到0.213 m时,塑性区连接状态依旧紧密;直到 L 增加到0.214 m时,各个钻孔周围的塑性区开始分离;随着布孔间距继续增大,塑性区逐渐分离,塑性区逐渐恢复成单孔的圆形状态.当侧压力系数为1.0时,最佳布孔间距 L 为0.213 m.

由图6可知:布孔间距 L 为0.230 m时,塑性区连接紧密且连接区域不再维持单孔的椭圆形塑性区,但是覆盖面积相对较小;当布孔间距 L 增加到0.267 m时,塑性区连接状态依旧紧密;直到布控间距 L 增加到0.268 m时,各个钻孔周围的塑性区开始分离;随着布孔间距继续增大,塑性区逐渐分离,塑性区逐渐恢复成单孔的圆形状态.当侧压力系数为1.5时,最佳布孔间距 L 为0.267 m.

由图7可知:布孔间距 L 为4.242 m时,塑性区连接状态紧密,但是覆盖面积相对较小;当布孔间距 L 增加到4.932 m时,塑性区连接状态依旧紧密;直到 L 增加到4.933 m时,四周的塑性区开始分离;随着布孔间距继续增大,塑性区逐渐分离开来.因此,当侧压力系数为2.5时,最佳布孔间距 L 为4.932 m.与单孔做对比,多孔抽采的布孔间距大于单孔抽采塑性区半径的2倍,说明多孔抽采存在叠加效应.

3.2 最佳孔间距瓦斯压力变化

根据上一节的研究,侧压力系数为1.0时,塑性区形态为圆形,最佳布孔间距为0.213 m;侧压力系数为1.5时,塑性区形态为椭圆形,最佳布孔间距为0.267 m;侧压力系数为2.5时,塑性区形态为蝶形,最佳布孔间距为4.932 m.选取侧压力系数为1.0,1.5,2.5,并选用各侧压力系数对应的最佳布孔间距进行钻孔周围瓦斯压力变化研究,得到不同抽采时间下最佳布孔间距的瓦斯压力分布图(图8).

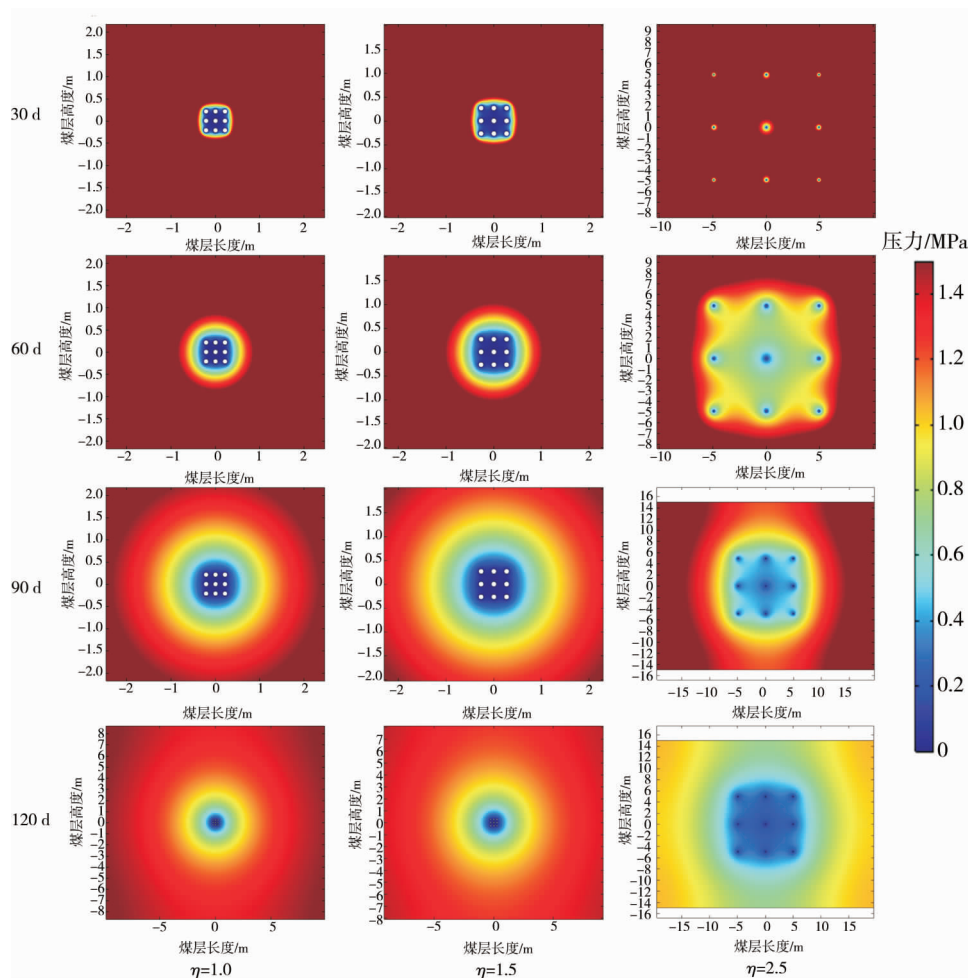


图8 不同抽采时间下最佳布孔间距的瓦斯压力分布

由图8可知:在相同侧压力系数条件下,随着钻孔瓦斯抽采时间的增加,瓦斯抽采孔附近煤体的瓦斯压力不断减小,在钻孔赋予的抽采负压作用下,钻孔周围形成的瓦斯流场范围逐渐增大;在相同抽采时间的情况下,随着侧压力系数的增加,钻孔附近的瓦斯压力减小,瓦斯流场范围显著增大.

在其他条件相同的情况下,侧压力系数较高区域的瓦斯钻孔抽采时间短,并且高侧压力系数区域的布

孔间距大于低侧压力区域系数的布孔间距,这就导致抽采相同含量的瓦斯,高侧压力系数下的瓦斯抽采孔的数量会相对较少,有利于节省施工时间.

4 实际测压力系数模拟分析

嘉禾煤矿 2365 工作面实际侧压力系数达到 2.48,为研究侧压力系数 $\eta=2.48$ 时钻孔间距对钻孔周围塑性区分布的影响,模拟孔距从 2.828~3.885 的塑性区分布情况,选取最佳孔间距及其他相近的 3 幅图做对比,如图 9 所示.

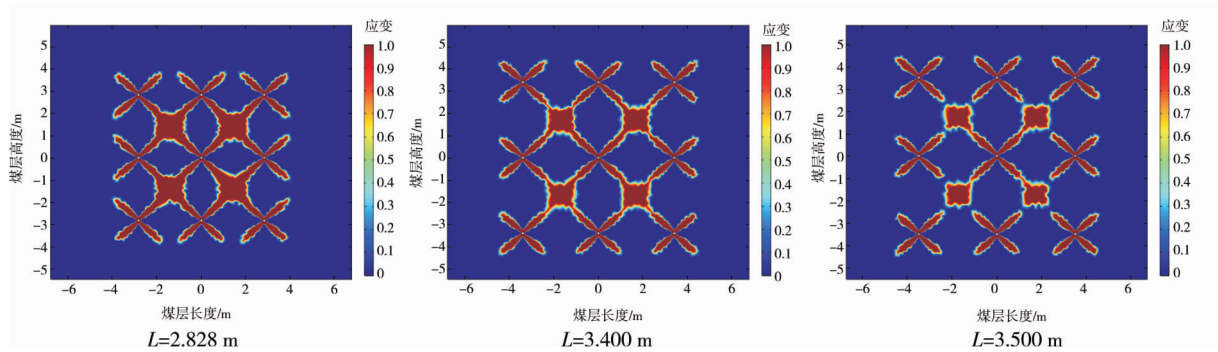


图 9 $\eta=2.48$ 时不同间距塑性区连接分布

在孔间距不断缩小的系列塑性区分布图中发现:孔间距 L 为 2.828 m 时,塑性区连接紧密,但是覆盖面积相对较小;当孔间距 L 为 3.400 m 时,塑性区连接紧密;直到孔间距 L 增加到 3.500 m 时,四角上的钻孔塑性区开始脱离中间钻孔的塑性区,随着孔间距的继续增大,各钻孔的塑性区逐渐分离开来.最佳布孔间距即为塑性区连接状态良好,且覆盖范围最广,因此侧压系数为 2.48 的最佳布孔间距为 3.400 m.

嘉禾煤矿 2365 工作面的实际钻孔布置间距为 3.400 m,模拟结果与实际钻孔布置间距一致,并且瓦斯抽采效果良好.

5 结论

1) 单孔瓦斯抽采时,瓦斯抽采钻孔形成的塑性区半径随侧压力系数呈类指数增长,塑性区内形成大量裂隙,利于瓦斯流通,即高侧压力系数是增大瓦斯抽采的布孔间距的必要和充分条件.

2) 多孔抽采时,瓦斯流场范围与侧压力系数正相关,抽采时间与侧压力系数呈负相关;由于多孔抽采的叠加效应,布孔间距大于单孔抽采的塑性区半径的 2 倍.

3) 采用数值软件模拟侧压力系数为 2.48 时的最佳布孔间距,得到最佳布孔间距为 3.400 m,与嘉禾煤矿 2365 工作面的实际布孔间距一致,模拟结果具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] 钱鸣高,许家林,王家臣.再论煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2018,43(1):1-13.
- [2] 王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.
- [3] YUAN L. Control of coal and gas outbursts in Huainan mines in China: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2016,8(4):559-567.
- [4] LIU Y W, LIU M J, WEI J P. Regional outburst-prevention technique by gas pre-drainage based on large diameter boreholes along coal seams under deep mining[J]. Procedia Engineering,2011,26:623-629.
- [5] 程远平,付建华,俞启香.中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J].采矿与安全工程学报,2009,26(2):127-139.
- [6] 谢雄刚,李希建,余照阳.顺层钻孔预抽突出煤层瓦斯技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(1):78-81.
- [7] 鲁义,申宏敏,秦波涛,等.顺层钻孔瓦斯抽采半径及布孔间距研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(1):156-162.
- [8] 林海飞,刘思博,李树刚,等.稳压条件下煤体稳定特性钻孔倾角效应的试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,

38(3):575-583.

- [9] 郝富昌,刘彦伟,龙威成,等.蠕变-渗流耦合作用下不同埋深有效抽采半径研究[J].煤炭学报,2017,42(10):2616-2622.
- [10] 张超林,王恩元,许江,等.煤层瓦斯压力对瓦斯抽采效果的影响[J].采矿与安全工程学报,2022,39(3):634-642.
- [11] LI S, FAN C J, HAN J, et al. A fully coupled thermal-hydraulic-mechanical model with two-phase flow for coalbed methane extraction[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 324-336.
- [12] 范超军,李胜,罗明坤,等.基于流-固-热耦合的深部煤层气抽采数值模拟[J].煤炭学报,2016,41(12):3076-3085.
- [13] LIU Z D, CHENG Y P, JIANG J Y, et al. Interactions between coal seam gas drainage boreholes and the impact of such on borehole patterns[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 38: 597-607.
- [14] ZHAO D, LIU J, PAN J T. Study on gas seepage from coal seams in the distance between boreholes for gas extraction [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 54: 266-272.
- [15] ZHANG C L, XU J, PENG S J, et al. Experimental study of drainage radius considering borehole interaction based on 3D monitoring of gas pressure in coal[J]. Fuel, 2019, 239: 955-963.
- [16] 许江,宋肖徵,彭守建,等.顺层钻孔布置间距对煤层瓦斯抽采效果影响的物理模拟试验研究[J].岩土力学,2019,40(12):4581-4589.
- [17] 彭守建,李正一,许江,等.基于不同钻孔间距的瓦斯抽采效果实验研究[J].煤炭工程,2020,52(1):95-99.
- [18] 侯朝炯.巷道围岩控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2013.
- [19] MA N, HOU C. A research into plastic zone of surrounding strata of gate way effected by mining abutment stress[C]. The 31st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Golden, Colorado, 1990.
- [20] 马念杰,侯朝炯.采准巷道矿压理论及应用[M].北京:煤炭工业出版社,1995.
- [21] 赵志强.大变形回采巷道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
- [22] 马念杰,李季,赵志强.圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
- [23] 袁越,王卫军,袁超,等.深部矿井动压回采巷道围岩大变形破坏机理[J].煤炭学报,2016,41(12):2940-2950.
- [24] 王卫军,董恩远,袁超.非等压圆形巷道围岩塑性区边界方程及应用[J].煤炭学报,2019,44(1):105-114.
- [25] 谷旺鑫,鲁义,施式亮,等.基于瓦斯抽采效果的钻孔塑性区范围优化及应用[J].中国安全生产科学技术,2021,17(1):25-30.
- [26] 王亮,廖晓雪,褚鹏,等.瓦斯抽采穿层钻孔扩造穴卸压增透机理研究[J].煤炭科学技术,2021,49(5):75-82.
- [27] 俞启香,程远平.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,2012.