

文章编号:1671-251X(2019)06-0058-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019010048

平行钻孔有效抽采半径及合理钻孔间距研究

桑乃文^{1,2,3}, 杨胜强^{1,2,3}, 宋亚伟^{1,2,3}



扫码移动阅读

- (1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;
2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为确定平行钻孔瓦斯抽采合理钻孔间距,通过推导煤层瓦斯运移方程、煤岩体变形方程及渗流场与应力场耦合方程,建立了瓦斯抽采流固耦合模型;根据某矿21219工作面实际地质条件,利用COMSOL Multiphysics软件对平行钻孔间抽采叠加效应影响下瓦斯压力、有效抽采半径的变化规律进行了数值模拟研究,并结合钻孔有效抽采半径,得出了合理的钻孔间距。数值模拟结果表明,随着钻孔间距的增大,抽采后煤体瓦斯压力增大;随着煤体距钻孔距离减小,煤体瓦斯压力呈先缓慢减小、后快速下降的趋势;随着抽采时间的增加,瓦斯压力不断降低,钻孔有效抽采半径变大。现场应用结果验证了钻孔间距布置的合理性。

关键词:煤炭开采; 瓦斯抽采; 平行钻孔抽采; 有效抽采半径; 抽采叠加效应; 钻孔间距

中图分类号:TD712.6 文献标志码:A

Research on effective drainage radius and rational borehole spacing of parallel boreholes

SANG Naiwen^{1,2,3}, YANG Shengqiang^{1,2,3}, SONG Yawei^{1,2,3}

- (1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract:In order to determine rational borehole spacing of parallel boreholes for gas drainage, a fluid-solid coupling model of gas drainage was established by deducing gas migration equation of coal seam, deformation equation of coal and rock, and coupling equation of seepage field and stress field. According to actual geological conditions of 21219 working face in a mine, variation law of gas pressure and effective drainage radius under influence of drainage superposition effect between parallel boreholes were numerically simulated by COMSOL Multiphysics software, and rational borehole spacing was obtained by combining with effective drainage radius of borehole. The numerical simulation results show that gas pressure of coal body after drainage increases with the increase of borehole spacing. As the distance between coal body and borehole decreases, gas pressure of coal body decreases slowly at first and then decreases rapidly. With the increase of drainage time, gas pressure decreases continuously and effective drainage radius increases. The field application results verify rationality of borehole spacing arrangement.

Key words:coal mining; gas drainage; parallel borehole drainage; effective drainage radius; drainage superposition effect; borehole spacing

收稿日期:2019-01-11;修回日期:2019-05-24;责任编辑:盛男。
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807900);中国矿业大学双一流建设自主创新专项项目(2018ZZCX05)。
作者简介:桑乃文(1995—),男,河南禹州人,硕士研究生,主要研究方向为矿井瓦斯防治,E-mail:872527698@qq.com。
引用格式:桑乃文,杨胜强,宋亚伟. 平行钻孔有效抽采半径及合理钻孔间距研究[J]. 工矿自动化,2019,45(6):58-62.

SANG Naiwen, YANG Shengqiang, SONG Yawei. Research on effective drainage radius and rational borehole spacing of parallel boreholes[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(6): 58-62.

0 引言

平行钻孔抽采是针对无保护层开采突出矿井的一种基本防突措施。在钻孔抽采设计中,钻孔间距是重要参数。当钻孔间距过大,在抽采范围内容易导致瓦斯抽采不彻底、回采过程中瓦斯涌出量较大甚至瓦斯超限等问题;当钻孔间距过小,在工程上造成浪费,还可能出现“串孔”等问题。钻孔间距是基于钻孔有效抽采半径确定的,因此有效抽采半径是否可靠尤为重要^[1-2]。

传统的钻孔有效抽采半径测定方法包括压降法、流量法和示踪气体法^[3],但都需要较长的观测时间和较大的工程量。随着煤层瓦斯渗流理论不断完善及计算机模拟技术的发展,通过数值模拟确定钻孔有效抽采半径被广泛应用^[4-6]。但目前大部分数值模拟研究针对单钻孔有效抽采半径,未考虑邻近抽采钻孔的影响,而平行钻孔抽采都是多钻孔联合布置,在抽采过程中会受相邻钻孔的影响,所以确定平行钻孔有效抽采半径时必须考虑平行钻孔间抽采叠加效应。

本文通过推导煤层瓦斯运移方程、煤岩体变形方程及渗流场与应力场耦合方程,建立了瓦斯抽采流固耦合模型,根据某矿 21219 工作面实际地质条件,利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟分析了平行钻孔间抽采叠加效应影响下瓦斯压力、有效抽采半径的变化规律,从而确定合理的钻孔间距,并通过现场应用进行验证。

1 瓦斯抽采流固耦合模型建立

为对煤层瓦斯抽采过程进行简化,本文作出以下假设:① 煤岩体视为各向同性的弹性介质;② 瓦斯吸附/解吸作用在瞬间完成,符合 Langmuir 吸附平衡曲线规律^[7];③ 将瓦斯视为一种理想气体;④ 忽略煤层温度的影响;⑤ 瓦斯在煤层中渗流过程符合 Darcy 定律^[8];⑥ 煤层顶底板视为不透气岩层。

1.1 煤层瓦斯运移方程

根据质量守恒定律,瓦斯在煤层中的流动方程为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla(\rho V) = Q \quad (1)$$

式中: m 为单位体积煤体中游离瓦斯质量, kg/m^3 ; t 为时间, s ; ρ 为瓦斯密度, kg/m^3 ; V 为瓦斯渗流速度, m/s ; Q 为瓦斯质量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

考虑 Klinkenberg 效应,则

$$V = -\frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{\eta}{p}\right) \nabla p \quad (2)$$

式中: k 为煤层渗透率, m^2 ; μ 为瓦斯动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η 为 Klinkenberg 系数, Pa ; p 为煤层瓦斯压力, Pa 。

将式(2)代入式(1),并联立 Langmuir 瓦斯吸附方程和气体状态方程可得煤层瓦斯渗流方程^[9-11]:

$$\frac{M}{RT} \left[\frac{\varphi}{2p} + \frac{abc\rho_s}{1+bp} - \frac{ab^2c\rho_s}{2(1+bp)^2} p \right] \frac{\partial p^2}{\partial t} - \nabla \left[\frac{M}{2RT} \frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{\eta}{p}\right) \nabla p^2 \right] = Q \quad (3)$$

式中: M 为瓦斯的分子量, kg/mol ; R 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K ; φ 为孔隙率; a 为单位质量煤的最大吸附瓦斯量, m^3/t ; b 为吸附常数, MPa^{-1} ; c 为校正参数, kg/m^3 ; ρ_s 为煤体密度, kg/m^3 。

1.2 煤岩体变形方程

由弹性力学平衡方程可得

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\alpha p \delta_{ij})}{\partial x_j} + F_i = 0 \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 为 i, j ($i, j=1, 2, 3$, 表示煤体微单元体三轴方向)方向煤岩体总应力, MPa ; x_j 为 j 方向坐标, m ; α 为 Biot 耦合系数, 本文取 1; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; F_i 为体积力 i 方向分量, N/m^3 。

由几何方程可得

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中: ϵ_{ij} 为应变张量; u_i, u_j 分别为 i, j 方向位移, m ; x_i 为 i 方向坐标, m 。

根据广义 Hooke 定律,煤岩体变形的本构方程可表示为

$$\sigma_{ij} = 2G \epsilon_{ij} + \frac{2G\nu}{1-2\nu} e \delta_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (6)$$

式中: G 为剪切模量, MPa ; ν 为泊松比; e 为体积应变。

联合式(4)一式(6),可得瓦斯抽采过程中煤岩体变形控制方程^[12-14]:

$$G \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial^2 u_j}{\partial (x_j x_i)} - \alpha p + F_i = 0 \quad (7)$$

1.3 渗流场与应力场耦合方程

瓦斯抽采过程涉及瓦斯运移和煤层变形之间的相互耦合。一方面抽采会造成煤岩体有效应力发生改变,从而影响煤层孔隙率和渗透率;另一方面煤层孔隙率和渗透率的变化又会反过来影响瓦斯渗流过程^[15-16]。瓦斯渗流场与煤岩体应力场之间相互作用关系为

$$\begin{cases} \varphi = (\varphi_0 - \varphi_r) \exp(f_\varphi \bar{\sigma}) + \varphi_r \\ \bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} + \alpha p \\ k = k_0 \exp \left[22.2 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \end{cases} \quad (8)$$

式中： φ_0 为零应力状态下孔隙率； φ_r 为高压压缩应力下孔隙率； f_φ 为渗透率应力敏感系数， MPa^{-1} ； $\bar{\sigma}$ 为平均有效应力， MPa ； $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为三轴方向主应力， MPa ； k_0 为零应力状态下渗透率， m^2 。

2 数值模拟

2.1 模拟参数

某矿 21219 工作面标高 $-440 \sim -540 \text{ m}$ ，地面标高 $+101.2 \text{ m}$ ，平均走向长 $1\,119.4 \text{ m}$ ，平均倾向长 150 m ；主采煤层为 2 号煤层，沉积较稳定，结构复杂，煤层厚度有一定变化，平均厚度为 4 m ，煤层倾角为 $2 \sim 8^\circ$ ，原始煤层瓦斯含量为 $11.26 \text{ m}^3/\text{t}$ ，瓦斯压力为 0.97 MPa ；采用单一厚煤层一次采全高走向长壁后退式全部跨落法进行综合机械化采煤。抽采设计钻孔直径为 90 mm ，抽采负压为 15 kPa ，预抽期为 180 d 。收集相关资料，确定主要模拟参数，见表 1。

表 1 主要模拟参数
Table 1 Main simulation parameters

参数	数值	参数	数值
单位质量煤的最大吸附瓦斯量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	27.32	泊松比	0.29
吸附常数/ MPa^{-1}	0.63	煤体弹性模量/ MPa	7 748
煤体密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 550	零应力状态下孔隙率	0.043
水分/%	1.65	高压压缩应力下孔隙率	0.026
灰分/%	12.70	渗透率应力敏感系数/ MPa^{-1}	0.05
瓦斯动力黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.54×10^{-5}	零应力状态下渗透率/ m^2	5×10^{-6}
Klinkenberg 系数/ Pa	0.317	原始应力/ MPa	8.41

2.2 几何模型

根据试验矿井主采煤层的实际情况，在 COMSOL Multiphysics 软件二维模式下建立一个长 50 m 、宽 4 m 的几何模型。在模型内部从左至右依次设置 1—6 号钻孔，钻孔直径为 90 mm ，自由剖分网格，单元尺寸为较细化，如图 1 所示。

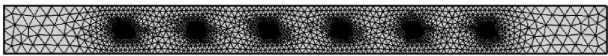


图 1 几何模型网格
Fig. 1 Geometric model grid

2.3 边界条件

- (1) 应力场：上边界施加荷载 8.41 MPa ，模拟上覆岩层重力作用；下边界设为固定约束边界；左右边界设为辊支撑边界；钻孔边界设为自由边界。
- (2) 渗流场：上下边界设为零通量边界；左右边界设为固定压力边界；钻孔边界设为压力出口边界。

2.4 模拟结果

抽采 180 d 后不同钻孔间距下瓦斯压力分布云图如图 2 所示（从上至下钻孔间距分别为 $2, 3, 4, 5, 6 \text{ m}$ ）。

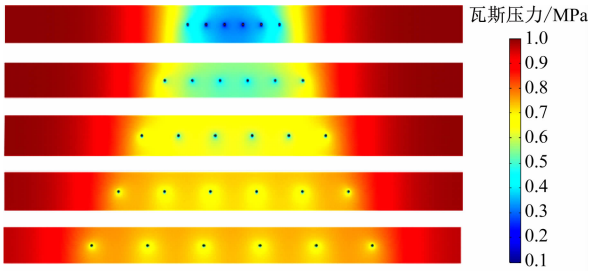


图 2 不同钻孔间距下瓦斯压力分布云图
Fig. 2 Cloud map of gas pressure distribution under different borehole spacing

从图 2 可看出，在抽采 180 d 后，钻孔间距分别为 $2, 3, 4, 5, 6 \text{ m}$ 时，3 号和 4 号钻孔中间区域煤体瓦斯压力分别为 $0.2 \sim 0.3, 0.4 \sim 0.5, 0.5 \sim 0.6, 0.6 \sim 0.7, 0.65 \sim 0.75 \text{ MPa}$ ，表明随着钻孔间距的增大，瓦斯压力增大。

抽采 180 d 后不同钻孔间距情况下，3 号钻孔周围煤体瓦斯压力随煤体距钻孔距离变化曲线如图 3 所示，3 号和 4 号钻孔中间区域煤体瓦斯压力随抽采时间变化曲线如图 4 所示。

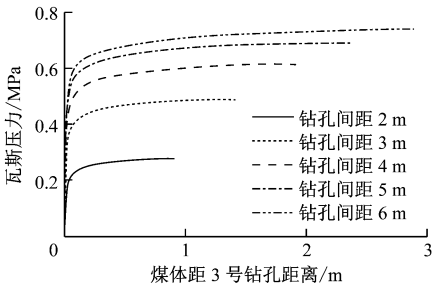


图 3 瓦斯压力随煤体距钻孔距离变化曲线
Fig. 3 Curves of gas pressure variation with distance between coal body and borehole

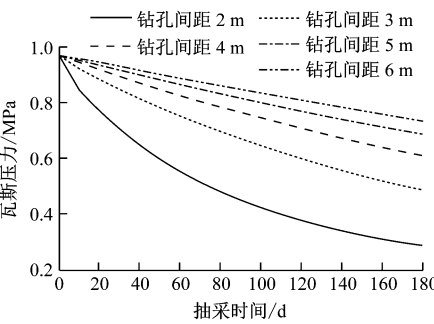


图 4 瓦斯压力随抽采时间变化曲线
Fig. 4 Curves of gas pressure variation with drainage time

从图 3 可看出，随着煤体距钻孔距离减小，煤体瓦斯压力呈先缓慢减小、后快速下降的趋势。这是由于在钻孔周围小范围内，单孔抽采影响远大于平

行钻孔间抽采叠加效应,所以煤体距钻孔距离会很大程度上影响瓦斯压力降低速度;而当煤体距钻孔距离较远时,平行钻孔间抽采叠加效应占据优势,瓦斯压力受煤体距钻孔距离的影响变小。

根据AQ 1026—2006《煤矿瓦斯抽采基本指标》相关规定,在抽采钻孔有效抽采半径内,需要将煤层瓦斯压力降至0.74 MPa以下才能在区域内进行安全生产。从图4可看出,随着抽采时间的增加,瓦斯压力不断降低;钻孔间距为2 m时,抽采24 d时,3号和4号钻孔中间区域煤体瓦斯压力降到0.74 MPa,即抽采24 d时,有效抽采半径为1.0 m;同理,抽采66,104,142,180 d时有效抽采半径分别为1.5,2.0,2.5,3.0 m,可见钻孔有效抽采半径随抽采时间的增加而变大。因此当预抽期为180 d时,钻孔间距应小于2倍的有效抽采半径,即应小于6 m,为保证一定的抽采能力富余,确定合理的钻孔间距为4 m。

3 现场应用

在21219工作面实际应用中,根据模拟结果设置平行钻孔间距为4 m,抽采负压为15 kPa,钻孔长度为90 m,钻孔直径为90 mm,经过180 d预抽后,将工作面沿走向每40 m划分为1个单元,共划分28个单元。在每个单元内进风巷侧布置1个抽采效果检验钻孔,用于测定煤层残余瓦斯含量,抽采效果检验钻孔由进风巷开口至切眼依次编号1—28。抽采效果检验钻孔参数:方位角为90°,倾角为5°,孔深为50 m。同时在进风巷侧和回风巷侧各布置36个区域验证钻孔,保证每个单元内沿工作面倾向方向至少布置2个区域验证钻孔,用于测定钻屑瓦斯解吸指标 K_1 和钻屑量 S ,从进回风巷开口至切眼依次编号1—36。

根据残余瓦斯含量测定结果,4号抽采效果检验钻孔残余瓦斯含量最大,为4.63 m³/t,28号抽采效果检验钻孔残余瓦斯含量最小,为1.68 m³/t,平均残余瓦斯含量为3.51 m³/t,抽采率为68%,煤层瓦斯含量降到突出危险性预测临界值8 m³/t以下,达到消突效果。

将区域验证钻孔测定结果与预抽前所测钻屑瓦斯解吸指标 K_1 和钻屑量 S 进行对比,如图5所示。

从图5(a)可看出,平行钻孔抽采前,钻屑瓦斯解吸指标 K_1 最小值为0.57 mL/(g·min^{1/2}),平均值为0.62 mL/(g·min^{1/2});平行钻孔抽采后,区域验证钻孔钻屑瓦斯解吸指标 K_1 最大值为0.32 mL/(g·min^{1/2}),均降到 K_1 参考临界值0.5 mL/(g·min^{1/2})以下。从图5(b)可看出,虽然

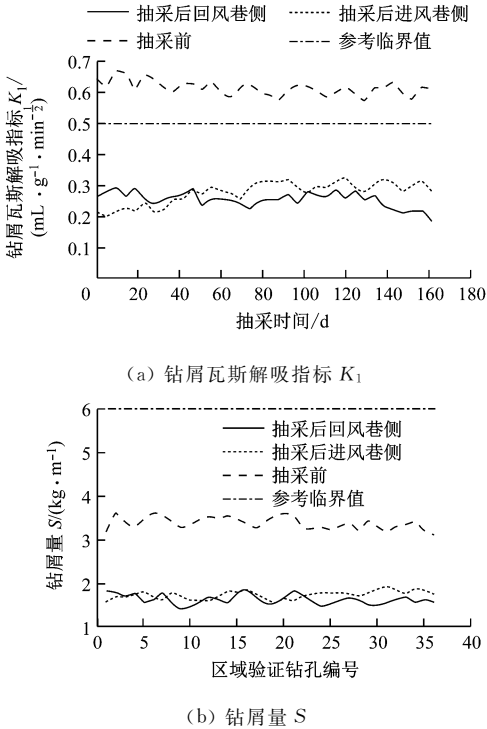


图5 抽采前后钻屑瓦斯解吸指标 K_1 和钻屑量 S 对比
Fig. 5 Comparison of gas desorption index K_1 of drilling cuttings and drilling cuttings weight S before and after drainage

抽采前后钻屑量 S 均没有超过参考临界值,但平行钻孔抽采前,钻屑量 S 最小值为3.2 kg/m,平行钻孔抽采后,区域验证钻孔钻屑量 S 均降到1.9 kg/m以下。钻屑瓦斯解吸指标 K_1 和钻屑量 S 的测定结果验证了钻孔间距布置的合理性。

4 结论

(1) 数值模拟结果表明,随着钻孔间距的增大,抽采后煤体瓦斯压力增大;随着煤体距钻孔距离减小,煤体瓦斯压力呈先缓慢减小、后快速下降的趋势;随着抽采时间的增加,瓦斯压力不断降低,钻孔有效抽采半径变大。根据数值模拟结果,确定预抽期为180 d时的合理钻孔间距为4 m。

(2) 现场应用结果表明,平行钻孔抽采后,瓦斯含量降到4.63 m³/t以下,钻屑瓦斯解吸指标 K_1 降到0.32 mL/(g·min^{1/2})以下,钻屑量 S 降到1.9 kg/m以下,取得了良好的消突效果,验证了钻孔间距布置的合理性。

参考文献(References):

[1] 杨宏民,刘冠鹏,刘军. 穿层钻孔与顺层钻孔抽采半径差异性研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016,35(2):149-155.
YANG Hongmin, LIU Guanpeng, LIU Jun. Study on difference of drainage radius comparison crossing hole

- with bedding hole[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2016, 35(2): 149-155.
- [2] 李润芝, 梁冰, 孙维吉, 等. 顺层钻孔瓦斯抽采半径及布孔间距试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(10): 133-138.
- LI Runzhi, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. Experimental study on both gas drainage radius and bedding borehole space [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(10): 133-138.
- [3] 郝富昌, 刘明举, 孙丽娟. 瓦斯抽采半径确定方法的比较及存在问题研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(12): 55-58.
- HAO Fuchang, LIU Mingju, SUN Lijuan. Study on comparison of methods to determine gas drainage radius and existed problems [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(12): 55-58.
- [4] 魏国营, 秦宾宾. 煤体钻孔瓦斯有效抽采半径判定技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 754-758.
- WEI Guoying, QIN Binbin. Technology for determining effective drainage radius of coal seam drill hole [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(6): 754-758.
- [5] 舒龙勇, 樊少武, 张浪, 等. 基于临界残余瓦斯压力的有效抽采半径确定方法[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 81-85.
- SHU Longyong, FAN Shaowu, ZHANG Lang, et al. Method to determine effective gas drainage radius based on critical residual gas pressure [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 81-85.
- [6] 魏风清, 程沛栋, 张钧祥, 等. 煤层钻孔有效抽采半径数值模拟研究[J]. 工矿自动化, 2016, 42(7): 25-29.
- WEI Fengqing, CHENG Peidong, ZHANG Junxiang, et al. Study on numerical simulation of effective drainage radius of drilling hole in coal seam [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(7): 25-29.
- [7] XIA Tongqiang, ZHOU Fubao, GAO Feng, et al. Simulation of coal self-heating processes in underground methane-rich coal seams [J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 141/142: 1-12.
- [8] HU Guozhong, WANG Hongtu, TAN Haixiang, et al. Gas seepage equation of deep mined coal seams and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(4): 483-487.
- [9] 王兆丰, 李炎涛, 夏会辉, 等. 基于 COMOSOL 的顺层钻孔有效抽采半径的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2012, 43(10): 4-6.
- WANG Zhaofeng, LI Yantao, XIA Huihui, et al. Numerical simulation on effective drainage radius of drill hole along coal seam based on comsol[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(10): 4-6.
- [10] 张波, 谢雄刚, 许石青. 某矿顺层钻孔瓦斯抽采及布孔参数数值模拟[J]. 工矿自动化, 2018, 44(11): 49-56.
- ZHANG Bo, XIE Xionggang, XU Shiqing. Numerical simulation on gas drainage and borehole arrangement parameters of bedding borehole in a coal mine [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(11): 49-56.
- [11] 李波, 孙东辉, 张路路. 煤矿顺层钻孔瓦斯抽采合理布孔间距研究 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 121-126.
- LI Bo, SUN Donghui, ZHANG Lulu. Study on rational space between gas drainage boreholes passing through seam in coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 121-126.
- [12] 王青元, 杨天鸿, 陈仕阔, 等. 高位顺层钻孔瓦斯抽放数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 116-119.
- WANG Qingyuan, YANG Tianhong, CHEN Shikuo, et al. Numerical simulation of gas drainage with high-position boreholes along coal seam [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(1): 116-119.
- [13] 张玉莹. 钻孔瓦斯抽采有效半径的数值模拟研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- [14] 刘泉霖, 王恩元, 李忠辉, 等. 夹矸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.
- [15] 徐涛, 杨天鸿, 唐春安, 等. 含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(3): 293-296.
- XU Tao, YANG Tianhong, TANG Chun'an, et al. Numerical simulation on coupled solid-gas flow in failure process of gaseous coal and rock [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, 26(3): 293-296.
- [16] 魏国营, 娄振, 陶东东, 等. 钻孔瓦斯抽采气固耦合模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(2): 75-80.
- WEI Guoying, LOU Zhen, TAO Dongdong, et al. Solid-gas coupling model for gas drainage from boreholes and its application [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(2): 75-80.