

文章编号:1000-582X(2011)04-024-06

本煤层单一顺层瓦斯抽采钻孔的渗流场数值模拟

王宏图^{1a,b}, 江记记^{1a,b}, 王再清², 胡国忠^{1b,3}, 袁志刚^{1a,b}

(1. 重庆大学 a. 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室;
b. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044,
2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042 3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:针对本煤层瓦斯抽采钻孔的合理布置问题,通过建立钻孔抽采瓦斯的渗流场控制方程和煤层变形场控制方程,结合钻孔抽采瓦斯的初始及边界条件,推导出钻孔抽采瓦斯渗流的固气耦合数学模型。以石壕煤矿本煤层单一顺层钻孔瓦斯抽采为工程实例,基于研究区域的煤层瓦斯赋存特征,采用数值模拟计算方法,获得了本煤层单一顺层钻孔周围煤层瓦斯压力、煤层瓦斯渗透率、煤层瓦斯渗流速度和煤层变形的分布规律。确定了本煤层单一顺层钻孔抽采瓦斯的有效影响半径,从而为本煤层单一顺层瓦斯抽采钻孔的优化布置提供了依据。研究结果表明,石壕煤矿本煤层单一顺层钻孔抽采瓦斯的有效半径分别为4 m左右;在延长钻孔抽放时间不到20%的情况下,减少了钻孔工程量50%左右,抽采效果良好。

关键词:采矿工程;瓦斯抽采;渗流场

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Numerical simulation of seepage field of gas extraction drilling of single bedding of mining-coal bed

JIANG Jiji^{1a,b}, WANG Hongtu^{1a,b}, WANG Zai-qing², HU Guo-zhong^{1b,3}, YUAN Zhi-gang^{1a,b}

(1. a. State and Local Joint Engineering laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam;
b. Key Laboratory for Exploitation of China Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, P. R. China;
3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: Aiming at the problem of reasonable decorate of coal gas extraction drilling, combining with the initial and boundary condition of borehole extraction, the solid and gas coupling mathematical model of gas seepage of borehole extraction is deduced based on established control equations of seepage field and deformation field. Taking gas extraction of stone coal slit as an example, according to the characteristics of coal seam in the research, the numerical simulation method is used to obtain the distribution rule of gas pressure, coalbed gas permeability, and coalbed gas seepage velocity as well as seam deformation. The effective radius of gas extraction drilling of single bedding about mining-coal bed is determined, which pro-

收稿日期:2010-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774106);国家自然科学基金创新群体基金资助项目(50921063);房屋管理局技术计划项目资助项目(2009-1);重庆市国土房管局科技计划资助项目(2009-01);川煤集团科技项目(2009-08)

作者简介:王宏图(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事矿山安全和煤层气理论及其工程应用领域的研究,
(E-mail)htwang@cqu.edu.cn。

vides the basis for optimum arrangement of gas extraction drilling of single bedding. The results show that the effective radius of stone coal is about 4 m. If the prolonging drilling drainage time is less than 20%, the drilling quantities would reduce by about 50%.

Key words: mining engineering; gas extraction; seepage field

随着煤矿开采深度的增加,煤层的瓦斯含量、瓦斯压力逐渐增大,工作面发生煤与瓦斯突出的危险性也日渐俱增^[1-6]。保护层开采和煤层瓦斯预抽作为突出煤层的强制性区域防突措施在我国已得到广泛的应用。由于我国煤层的低渗透性、地面地形条件复杂,尤其是西南地区无保护层可采的单一煤层,井下钻孔抽采成为防治瓦斯突出的主要技术措施,因此,研究本煤层瓦斯抽采钻孔的煤层瓦斯渗流规律,合理优化布置瓦斯抽采钻孔,对于有效进行煤层瓦斯预抽、保证区域性防突措施的实施效果具有重要意义。

瓦斯抽采过程中瓦斯的渗流和煤体变形变化非常复杂,是一个瓦斯渗流和煤层变形之间相互耦合的复杂过程。文献[1-3]在瓦斯抽采方面进行了试验和数值模拟研究。本文以石壕煤矿为工程实例,建立考虑煤层瓦斯吸附、解吸、扩散的渗流-应力耦合的耦合模型,研究本煤层瓦斯抽采钻孔的渗流场分布规律,为瓦斯抽采钻孔的合理优化布置提供理论依据。

1 研究区域的煤层瓦斯赋存特征

石壕煤矿属煤与瓦斯突出矿井,本次研究区域为6#煤层S1632工作面,该工作面开采之前,需进行煤层瓦斯抽采,煤层可采走向长度918 m,斜长147 m,平均埋深385 m,平均煤厚0.84 m,原始瓦斯含量为12.32 m³/t,瓦斯压力为2.41 MPa,煤层坚固性系数 f 为0.56,煤层透气性系数 1.511×10^{-3} 达西。由煤样分析及实验室模拟,该煤层渗透率的动态表达式为

$$k = 3.035 \times 10^{-17} e^{-1.0 \times 10^{-7} (\Theta/3+p)} \quad (1)$$

式中, Θ 为煤体的体积应力,Pa。

2 钻孔抽采瓦斯渗流的数学模型

2.1 钻孔抽采瓦斯的渗流场控制方程

2.1.1 钻孔抽采瓦斯的运动方程

钻孔抽采条件下,本煤层瓦斯由煤体裂隙向外空间流动基本符合Darcy渗流规律;同时,煤层瓦斯由煤体微孔隙向外裂隙流动符合Fick扩散定律。因此,钻孔抽采条件下煤层瓦斯的运动方程可用Darcy方程和Fick方程表示^[4-9]。

2.1.2 钻孔抽采瓦斯的连续性方程

由于多孔介质的气体渗流符合质量守恒定律,用无穷小量分析法可推导出钻孔抽采条件下单位体积煤体的瓦斯渗流连续性方程为^[4]

$$\text{div}(\mathbf{Q}_g) + \frac{\partial C}{\partial t} = Q_s \quad (2)$$

式中, \mathbf{Q}_g 为单位体积含瓦斯煤体的渗流瓦斯量, $\mathbf{Q}_g = \rho_g \mathbf{q}_g$, kg/m³; Q_s 为单位体积含瓦斯煤体内单位时间由源或汇产生或吸收的瓦斯质量, kg/(m³·s); $\partial C/\partial t$ 为煤层瓦斯源的质量强度, kg/(m³·s); C 为单位体积含瓦斯煤体内的瓦斯质量, kg/m³。

2.1.3 钻孔抽采瓦斯的的状态方程

煤层瓦斯被看作理想气体,钻孔抽采条件下煤层瓦斯流动过程视为等温过程,则其状态方程如下:

$$\rho_g = \beta \cdot p \quad (3)$$

式中, β 为瓦斯的压缩因子, kg/(m³·Pa)。

2.1.4 钻孔抽采瓦斯含量方程

一般而言,煤层瓦斯含量包括吸附瓦斯含量 C_f 和游离瓦斯含量 C_a 。单位体积含瓦斯煤体中的煤层瓦斯含量 C 为

$$C = C_f + C_a = \rho_g \frac{\varphi p}{p_n} + \frac{\rho_g b_1 p \rho_c}{p + b_2} (1 - A - B) \quad (4)$$

式中: C_f 、 C_a 分别为单位体积煤体的游离瓦斯含量和吸附瓦斯含量, kg/m³; p_n 为大气压; ρ_c 为煤体的密度; φ 为含瓦斯煤体的动态孔隙率; φ_0 为无荷载作用下煤的初始孔隙率; ε_v 为含瓦斯煤体的体积应变; b_1 为煤的极限吸附量, m³/kg; b_2 为煤的Langmuir压力参数, Pa; A 为煤体中的灰分; B 为煤体中的水分。

2.1.5 钻孔抽采瓦斯的渗流方程

将钻孔抽采条件下煤层瓦斯的运动方程、连续性方程、状态方程和瓦斯含量方程进行耦合,并令 $b' = \rho_c (1 - A - B)$,则整理后可得^[7-15]

$$\nabla \left(-\frac{\beta p k}{\mu_g} \cdot \nabla p \right) + \beta \left[\frac{2\varphi p}{p_n} + \frac{(1-\varphi)p^2}{E_s p_n} + \frac{2b_1 b' p}{p + b_2} - \frac{b_1 b' p^2}{(p + b_2)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\beta \alpha p^2}{p_n} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (5)$$

式中, E_s 为含瓦斯煤体的体积弹性模量, Pa; α 为Biot有效应力系数。

式(5)即为考虑煤层孔隙率动态变化、煤层渗透

率动态变化和煤层瓦斯渗透与扩散的共同作用机制的钻孔抽采条件下煤层瓦斯渗流方程。

2.2 钻孔抽采过程中煤层变形场的控制方程

假设煤岩体骨架所发生的变形为小变形。因此,可由弹性力学理论,确定煤岩体本构方程;由多相介质的动量守恒定律和修正的 Terzaghi 有效应力原理^[4-6],确定含瓦斯煤岩体的应力平衡方程。

2.3 钻孔抽采瓦斯渗流的固气耦合方程

通过耦合钻孔抽采瓦斯的渗流方程和变形场的控制方程,可得到煤层钻孔抽排瓦斯流动的固气动态耦合方程,即

$$\left. \begin{aligned} \nabla \left(-\frac{\beta p k}{\mu_g} \cdot \nabla p \right) + \beta \left[\frac{2\varphi p}{p_n} + \frac{(1-\varphi)p^2}{E_s p_n} + \frac{2b_1 b' p}{p + b_2} - \frac{b_1 b' p^2}{(p + b_2)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\beta \alpha p^2}{p_n} \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t}, \\ \varphi = \frac{\varphi_0 + \epsilon_v}{1 + \epsilon_v} = 1 - \frac{1 - \varphi_0}{1 + \epsilon_v}, \\ k = \frac{\varphi^3}{k_k (S_m \rho_{ARD})^2}, \\ (\sigma_e)_{ij} + \alpha \delta_{ij} p + F_i = 0, \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \\ \sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_v + 2G \epsilon_{ij}. \end{aligned} \right\} (6)$$

式中, σ_{ij} 为应力张量, $(i, j=1, 2, 3)$; λ 为Lame常数; G 为剪切模量; δ_{ij} 为Kronecker符号; ϵ_{ij} 为应变张量; $(\sigma_e)_{ij}$ 为含瓦斯煤岩体有效应力张量; σ'_{ij} 为总应力张量; F_i 为体积力。

3 本煤层单一顺层瓦斯抽采钻孔的渗流场计算与分布规律

3.1 单一顺层瓦斯抽采钻孔模型的建立

1) 几何物理模型

对于顺层钻孔,取沿煤层走向、钻孔剖向为平面计算模型。根据研究工作面的煤层赋存条件、开采技术条件、地应力状态和瓦斯钻孔抽排设计条件,建立了其几何物理模型,如图1。

2) 模型计算参数

本模型研究对象中的6#煤层及其顶底板的力学特性参数和其它基本物性参数见表1所示。

3) 初始及边界条件

在煤层中取一研究域 V ,其初始和边界条件定义如下:

① 煤层瓦斯抽采分析域的初始条件

$$p(t) |_{t=0} = p_0. \quad (7)$$

式中, p_0 为煤层抽采瓦斯前的瓦斯压力初始值。

② 瓦斯抽采分析域的压力和流量边界条件

压力边界

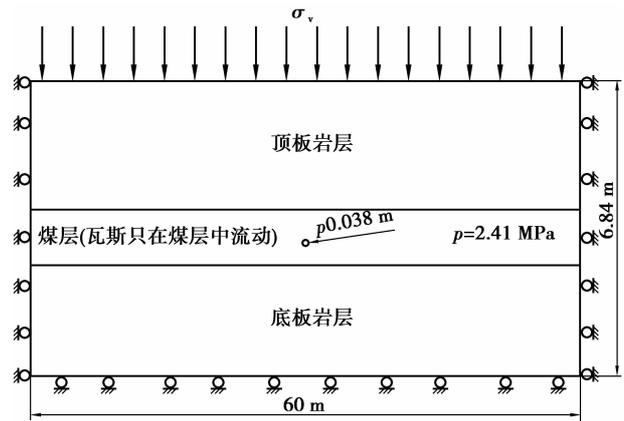


图1 单一顺层钻孔抽排瓦斯数值模拟的几何模型

$$P(x, y, t) = \bar{P}(x, y, t), t \in [0, \infty]. \quad (8)$$

流量边界

$$\frac{k_g}{\mu_g} \text{grad} P = \bar{Q}(x, y, t), t \in [0, \infty]. \quad (9)$$

式中, $\bar{P}(x, y, t)$, $\bar{Q}(x, y, t)$ 分别是已知的压力和流量边界。

4) 计算方法

煤层钻孔瓦斯抽采的固气耦合模型是一个多物理场耦合的偏微分方程组,采用平面二维模型来进行数值求解。

表1 煤岩层物理力学特性参数

顶板岩石弹性模量 E/GPa	顶板岩石泊松比 ν
29.43	0.371
顶板岩石密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	底板岩石弹性模量 E/GPa
2.375×10^3	29.43
底板岩石泊松比 ν	底板岩石密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
0.371	2.375×10^3
煤的弹性模量 E/GPa	煤的泊松比 ν
0.64	0.295
煤的密度 $\rho_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	煤层初始孔隙率 φ_0
1.56×10^3	0.015
最大吸附常数 $b_1/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	吸附常数 b_2/Pa
32.52×10^{-3}	6.25×10^5
煤体中的灰分 $A/\%$	煤体中的水分 $B/\%$
39.95	1.40
瓦斯密度 $\rho_n/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	瓦斯的压缩因子 $\beta/(\text{kg} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-3})$
1.29	0.9982×10^{-5}
瓦斯的动力黏度 $\mu_g/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	瓦斯扩散系数 $D_n/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
1.09×10^{-6}	5.59×10^{-12}

3.2 单一钻孔周围瓦斯压力的分布规律

以抽采瓦斯时间为6个月、抽放负压为0.01~0.1 MPa、瓦斯自然排放的边界条件为0.1 MPa。图2为钻孔自然排放和负压抽瓦斯后钻孔周围煤层的瓦斯压力分布图。由图2可知,距钻孔中心的距离越远,瓦斯压力下降的幅度越小。这是由于钻孔周围局部煤层得到卸压,煤层瓦斯压力下降。无论是自然排放还是负压抽放,其瓦斯压力下降的趋势是一致的,不同的只是负压抽放使得钻孔周围局部煤层的瓦斯压力下降幅度略大于自然排放的情况。相对于钻孔自然排放瓦斯,即便煤层采用钻孔负压抽放瓦斯,也只会使钻孔周围5 m范围内的煤层卸压加速,瓦斯压力下降的幅度增大。

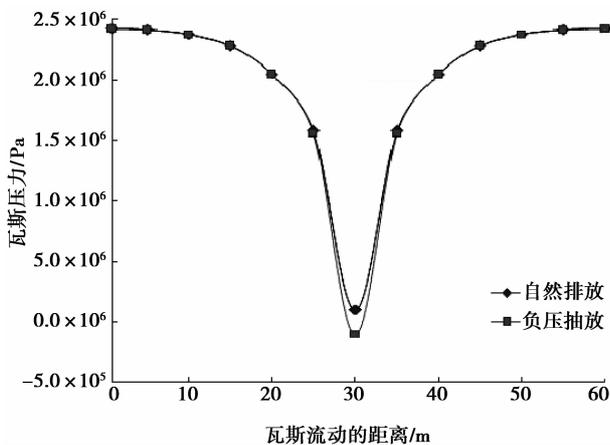


图2 单一钻孔抽排瓦斯时瓦斯压力分布($t=6$ 月)

图3为钻孔抽排放瓦斯时周围煤层瓦斯压力下降率 p/p_0 ($t=6$ 个月)的分布图。由图可知,从钻孔中心往钻孔四周方向,煤层瓦斯压力的下降率开始急剧减小,而后趋于平缓。在钻孔中心周围3 m范围内的煤层瓦斯压力下降幅度超过了60%,钻孔负压抽放瓦斯的影响范围只比自然排放的情况稍大。

3.3 单一钻孔周围煤层渗透率的分布规律

煤层钻孔抽排瓦斯后,煤层的渗透率发生变化,一方面是由于瓦斯的排放使煤体发生收缩变形造成的,另一方面则是由于瓦斯压力的下降造成的。煤体经过一定时间的抽排后,低透气性煤体的透气性会增大。

由图4、图5可知,无论是自然排放还是负压排放,其钻孔周围一定范围内的煤层由于卸压作用使得其渗透率得到提高,在抽排6个月后,其渗透率增长了近2倍;同时,负压抽放要比自然排放引起煤层渗透率增长的幅度大。

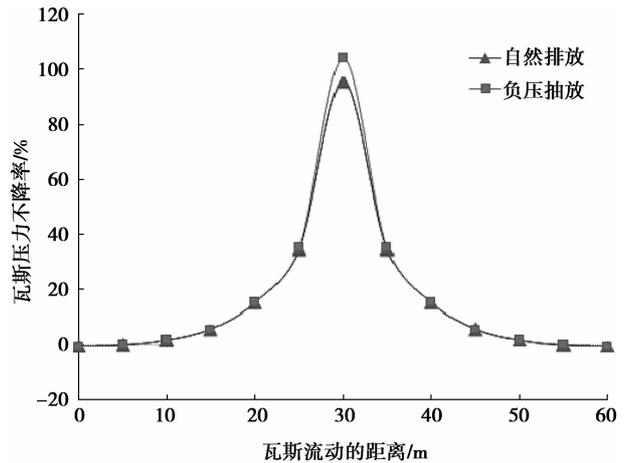


图3 单一钻孔抽排瓦斯时瓦斯压力下降率($t=6$ 月)

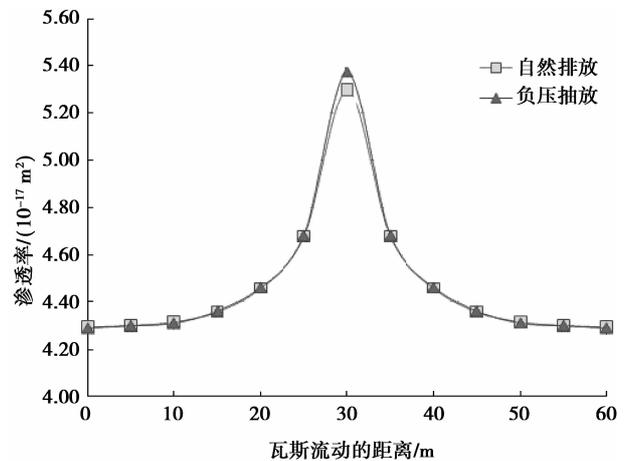


图4 单一钻孔抽排瓦斯时煤层渗透率分布($t=6$ 月)

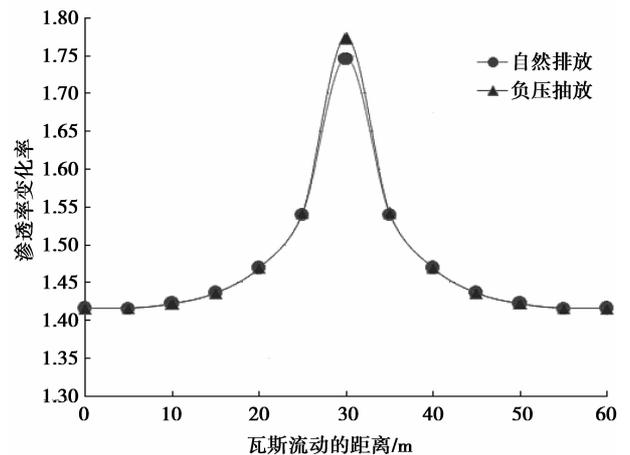


图5 单一钻孔抽排瓦斯时渗透率变化率($t=6$ 月)

3.4 单一钻孔周围渗流速度的分布规律

图6为单一顺层钻孔抽排6个月的瓦斯后钻孔周围煤层瓦斯渗流速度的分布图。由图可知,钻孔抽排瓦斯后,钻孔周围煤层得到卸压,从钻孔四周往钻孔中心方向,其煤层瓦斯压力下降、渗透率增大,

在瓦斯压力梯度的作用下,煤层中的瓦斯渗流速度也会有同样的规律;越靠近钻孔,瓦斯压力梯度越大,煤层中的瓦斯渗流速度越大;由于负压抽放使钻孔周围煤层中的瓦斯压力梯度相对于同一位置的自然排放要大,使得负压抽放时煤层中的瓦斯渗流速度比自然排放时要大,且越靠近钻孔,负压抽放时煤层中瓦斯的渗流速度比自然排放情况的增长幅度越大。

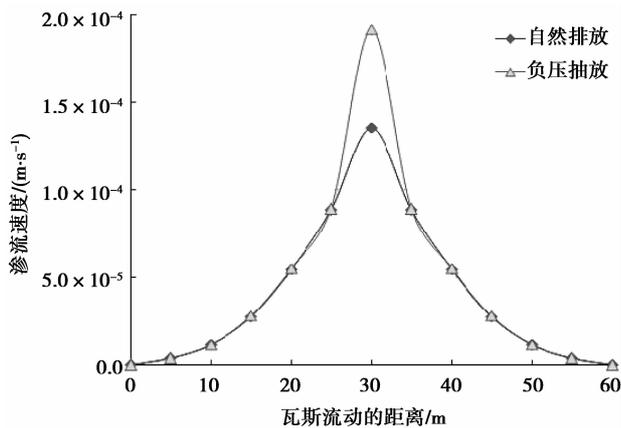


图 6 单一顺层钻孔抽排瓦斯时煤层瓦斯渗流速度分布 ($t=6$ 月)

3.5 单一钻孔周围煤层变形的分布规律

煤层瓦斯被抽排到一定程度后,煤体透气性增加的一个重要原因为煤体发生了收缩变形。根据煤吸附瓦斯前后分子间距的测定结果表明:煤体在吸附瓦斯前,平均分子间距为 1.03 nm;吸附瓦斯后,分子平均间距为 1.14 nm;排放瓦斯后为 1.04 nm。这说明了煤体吸附瓦斯后发生膨胀变形,而排放瓦斯后则发生收缩变形。

图 7 为单一顺层钻孔抽排 6 个月的钻孔周围煤层的收缩变形图。由图可知,无论是负压抽放瓦

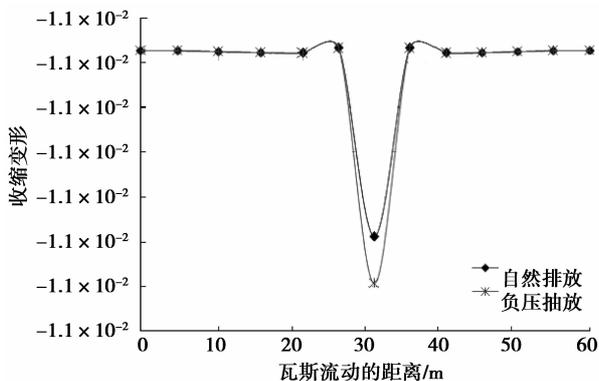


图 7 单一钻孔抽排瓦斯时煤体收缩变形 ($t=6$ 月)

斯,还是自然排放瓦斯,其钻孔周围的煤层都将发生收缩变形,从钻孔中心往钻孔四周方向,其煤层的收缩变形逐渐减低;负压抽放时煤层发生的收缩变形要比同一位置的自然排放时的数据,这与以往的煤吸附瓦斯前后分子间距的测定结果是一致的。

4 单一顺层钻孔抽采瓦斯的有效影响半径

通过分析石壕煤矿单一顺层钻孔自然排放和抽采瓦斯 6 月后的钻孔周围煤层的瓦斯压力、煤层渗透率和煤层瓦斯渗流速度等参数的分布规律,可初步确定其钻孔负压抽采瓦斯的有效影响半径为 4 m 左右。

实践考察并证明,石壕煤矿原采取的顺层钻孔布置间距 3 m 偏小,后优化调整为间距 4~5 m,根据同样抽采参数条件下的后期考察,其抽采效果良好;因此,通过本研究,在延长钻孔抽放时间不到 20% 的情况下,减少了钻孔工程量 50% 左右,抽采效果良好,既做到了抽采达标,也节约了工程量。

5 结论

1) 在煤层施工钻孔后,钻孔周围局部煤层得到卸压,煤层瓦斯压力下降;无论是自然排放还是负压抽放,其瓦斯压力下降的趋势是一致的。相对于钻孔自然排放瓦斯,钻孔负压抽采瓦斯会使得钻孔周围一定范围内(本文为钻孔中心周围 5 m 范围内)的煤层卸压加速,瓦斯压力下降的幅度增大。

2) 随着煤层钻孔抽排瓦斯的进行,其钻孔周围一定范围内的煤层,由于卸压作用使得其渗透率得到提高,在抽排 6 个月后,其渗透率增长了近 2 倍;同时,负压抽放要比自然排放引起煤层渗透率增长的幅度大。

3) 在钻孔抽排瓦斯后,单一顺层钻孔周围煤层得到卸压,从钻孔四周往钻孔中心方向,其煤层瓦斯压力下降、渗透率增大,在瓦斯压力梯度的作用下,煤层中的瓦斯渗流速度也会有同样的规律;越往钻孔中心方向,煤层中的瓦斯渗流速度越大;负压抽放时煤层中的瓦斯渗流速度比自然排放时要大,且越往钻孔中心方向,负压抽放时煤层中瓦斯的渗流速度比自然排放情况的增长幅度越快。

4) 煤层瓦斯抽排到一定程度时煤体透气性增加的原因为煤体发生了收缩变形。无论是负压抽放瓦斯,还是自然排放瓦斯,其钻孔周围的煤层都将发生收缩变形,其中从钻孔中心往钻孔四周方向,其煤层的收缩变形逐渐减低;负压抽放时煤层发生的收缩

变形要大于同一位置自然排放时的数据,这与以往的煤吸附瓦斯前后分子间距的测定结果是一致的。

5)通过本研究,在延长钻孔抽放时间不到20%的情况下,减少了钻孔工程量50%左右,抽采效果良好,既做到了抽采达标,也节约了工程量。

参考文献:

- [1] 梁冰,章梦涛,王泳嘉. 煤层瓦斯渗流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2): 135-142.
LIANG Bing, ZHANG Meng-tao, WANG Yongqia. Mathematical model and numerical method for coupled gas flow in coal seams and coal deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2): 135-142.
- [2] VALLIAPPAN S, ZHANG W H. Numerical modelling of methane gas migration in dry coal seams[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods In Geomechanics, 1996, 20: 571-593.
- [3] ZHAO Y S, HU Y Q, ZHAO B H, et al. Nonlinear coupled mathematical model for solid deformation and gas seepage in fractured media [J]. Transport in Porous Media, 2004, 55: 119-136.
- [4] HU G Z, WANG H T, FAN X G, et al. Mathematical model of coalbed gas flow with Klinkenberg effects in multi-physical fields and its analytic solution [J]. Transport in Porous Media, 2009, 76(3): 407-420.
- [5] HU GUO-ZHONG, WANG HONG-TU, TAN HAI-XIA, et al. Gas seepage equation of deep mined coal seams and its application [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(4): 483-487.
- [6] 胡国忠,王宏图,范晓刚,等. 俯伪斜上保护层保护范围的瓦斯压力研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 328-332.
HU GUO-ZHONG, WANG HONG-TU, FAN XIAO-GANG, et al. Gas pressure investigation on protection region of up-protective layer of pitching oblique mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 37(3): 328-332.
- [7] HARPALANI S, CHEN G L. Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1997, 15(4): 303-325.
- [8] 唐巨鹏,潘一山,李成全,等. 固流耦合作用下煤层气解吸-渗流实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 274-278.
TANG JU-PENG, PAN YI-SHAN, LI CHENG-QUAN, et al. Experimental study of desorption and seepage of coalbed methane under solid-fluid coupling [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35(2): 274-278.
- [9] 曹树刚,鲜学福. 煤岩固-气耦合的流变力学分析[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 362-265.
CAO SHU-GANG, XIAN XUE-FU. Research on solid-gas coupling model of coal and rock [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2001, 30(4): 362-265.
- [10] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases [C]// Drill Production Practices. New York: American Petroleum Institute, 1941: 200-213.
- [11] 胡国忠,王宏图,范晓刚,等. 低渗透突出煤的瓦斯渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2527-2534.
HU GUO-ZHONG, WANG HONG-TU, FAN XIAO-GANG, et al. Investigation on the law of methane gas flow in coal with coal-gas burst hazard and low permeability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2527-2534.
- [12] 冉启全,李士伦. 流固耦合油藏数值模拟中物性参数动态模型研究[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(3): 61-65.
RAN QI-QUAN, LI SHI-LUN. Study on dynamic model of reservoir parameters in the coupling simulation of multiphase flow and reservoir deformation [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(3): 61-65.
- [13] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [14] SAGHAFI A, FAIZ M, ROBERTS D. CO₂ storage and gas diffusivity properties of coals from Sydney Basin, Australia [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70: 240-254.
- [15] ZHOU Y, RAJAPAKSE R K N D, GRAHAM J. A coupled thermo-poroelastic model with thermo-osmosis and thermal-filtration [J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(34): 4659-4683.

(编辑 张小强)