

文章编号: 1673-3363-(2015)01-0156-07

# 顺层钻孔瓦斯抽采半径及布孔间距研究

鲁义<sup>1</sup>, 申宏敏<sup>1</sup>, 秦波涛<sup>1</sup>, 张雷林<sup>1</sup>, 马洪芬<sup>2</sup>, 毛桃良<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 国投昔阳能源有限责任公司黄岩汇矿, 山西 昔阳 045300)

**摘要** 为合理确定本煤层瓦斯抽采钻孔的布孔间距, 通过煤层瓦斯渗流场控制方程、煤体孔隙率和渗透率耦合方程及煤层变形场控制方程, 建立了钻孔抽采条件下瓦斯渗流固气耦合数学模型; 采用数值模拟计算方法, 得出顺层瓦斯抽采钻孔的抽采半径, 并推导出瓦斯抽采钻孔布孔间距与单钻孔抽采半径的关系式。以黄岩汇矿 15107 工作面为应用实例, 通过在该工作面进行单钻孔和多钻孔瓦斯抽采试验, 求算并验证了抽采半径及布孔间距与抽采半径关系式的正确性, 为现场瓦斯抽采提供科学依据。

**关键词** 钻孔; 布孔间距; 抽采半径; 瓦斯压力; 数值模拟

**中图分类号** TD 712 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.01.025

## Gas drainage radius and borehole distance along seam

LU Yi<sup>1</sup>, SHEN Hongmin<sup>1</sup>, QIN Botao<sup>1</sup>, ZHANG Leilin<sup>1</sup>, MA Hongfen<sup>2</sup>, MAO Taoliang<sup>2</sup>

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Huangyanhui Coal Mine, SDIC Xiyang Energy Co. Ltd, Xiyang, Shanxi 045300, China)

**Abstract** To determine the reasonable distance of gas drainage boreholes in coal seam being mined, based on the control equations of seepage and deformation fields, and the coupling equations of porosity and permeability, the solid and gas coupling mathematical model of gas seepage in drilling extraction was established. The drainage radius of gas extraction borehole in current coal seam was calculated by numerical simulation, and the relation between the borehole distance and extraction radius of single-borehole was deduced. Taking coalface 15107 of Huangyanhui coal mine for example, by the gas drainage experiments of single drilling and multiple drillings in this face, the correctness of the drainage radius, and the relation between borehole distance and extraction radius were calculated and verified. The research results provide a scientific basis for gas extraction.

**Key words** borehole; drilling distance; extraction radius; gas pressure; numerical simulation

煤矿瓦斯抽采是降低矿井瓦斯涌出量、降低煤层瓦斯压力以及防止煤与瓦斯突出灾害的重要技术措施。其中, 合理布置抽采钻孔间距是保证抽采效果的重要因素: 钻孔间距过大, 在抽采范围内易形成抽采盲区; 钻孔间距过小, 会造成人力、物力的浪费。所以, 瓦斯抽采钻孔的设计应以钻孔的有

效抽采半径为依据<sup>[1-3]</sup>。

目前, 确定有效抽采半径的方法主要有现场测试法和理论计算法 2 类。现场测试法主要有压力降低法和示踪气体法, 其中压力降低法是在抽采钻孔两边间隔布置多个测压钻孔, 通过观测测压钻孔瓦斯压力的变化确定钻孔有效抽采半径<sup>[4]</sup>; 示踪气体

收稿日期: 2013-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51476184); 江苏省杰出青年基金项目(BK20140005); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 鲁义(1986—), 男, 江西省新干县人, 博士研究生, 从事矿井瓦斯与火灾防治方面的研究。

通信作者: 秦波涛

E-mail: luyijx@163.com

Tel: 15896428465

法是采用 SF<sub>6</sub> 检漏仪测定不同抽采时间下可检测出 SF<sub>6</sub> 的最远距离,通过数据分析和处理得出某一时间下的抽采影响半径。在理论计算方面,主要是根据钻孔周围瓦斯流动理论与特征确定出有效抽采半径<sup>[5-9]</sup>。前人采用上述方法测试有效半径取得了较好的成果,但并没有明确指出抽采钻孔的布孔间距与抽采半径的关系,由于在多孔抽采过程中各钻孔之间存在抽采叠加现象,在其作用下,钻孔布孔间距可适当增大;此外,在理论计算方面,前人所建立的钻孔周围瓦斯流动模型并没有考虑孔隙率、渗透率变化规律以及游离瓦斯压力变化对煤岩体骨架体积变形和孔隙率的影响<sup>[10-11]</sup>。因此,本文基于固气耦合理论,考虑了钻孔抽采过程中游离瓦斯压力的改变引起煤体骨架变形对瓦斯流动以及煤层的综合影响,结合渗流力学和弹塑性力学以及 Terzaghi 有效应力理论,建立了含瓦斯煤岩流固耦合控制方程,采用数值软件模拟了顺层钻孔预抽煤层瓦斯的有效抽采半径,通过分析单孔抽采和多孔抽采煤层瓦斯压力变化规律,得出了布孔间距与单孔抽采半径的关系,并经现场测试进行了验证。

## 1 理论模型的建立

### 1.1 钻孔抽采瓦斯渗流场控制方程

钻孔预抽瓦斯时,煤层中瓦斯由煤体裂隙流向外部空间基本符合 Darcy 渗流定律,由煤体微孔隙流向裂隙符合 Fick 扩散定律。因此,在钻孔抽采条件下煤层中瓦斯的运动方程可由 Darcy 方程和 Fick 方程表示。

由于多孔介质中气体的渗流符合质量守恒方程,单位体积煤中煤层瓦斯流动方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为煤层瓦斯密度, kg/m<sup>3</sup>;  $v$  为瓦斯渗流速度, m/s;  $C$  为单位体积煤中瓦斯含量, kg/m<sup>3</sup>。

若视瓦斯为理想气体,其在煤层中的渗流过程为等温过程,由于含瓦斯煤层渗透系数较小,在钻孔抽采过程中瓦斯压力变化剧烈,则可不考虑瓦斯解吸过程,因此单位体积煤中瓦斯含量  $C$  由游离瓦斯  $C_g$  和吸附瓦斯  $C_a$  两部分组成。结合瓦斯状态方程和 Langmuir 方程<sup>[12-13]</sup>有

$$C = C_g + C_a = \beta p \varphi + \frac{abcp\beta p_n}{1+bp} \quad (2)$$

式中:  $\varphi$  为煤层孔隙率;  $p$  为瓦斯压力, Pa;  $\beta$  为瓦斯压缩系数, kg/(m<sup>3</sup>·Pa);  $\beta = M_g/(RT)$ ,  $M_g$  为瓦斯气

体分子量, kg/kmol;  $R$  为理想气体常数, kJ/(kmol·K);  $T$  为绝对温度, K;  $a$  为单位质量煤最大吸附瓦斯量, m<sup>3</sup>/kg;  $b$  为煤的吸附常数, MPa<sup>-1</sup>;  $c$  为煤校正参数,  $c = \rho_s \frac{1}{1+0.31M} \frac{1-A-M}{1}$ , kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_s$  为煤的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $A$  为煤的灰分;  $M$  为煤的水分;  $p_n$  为标准大气压, Pa。

考虑瓦斯压力及应力变化对煤体孔隙率的影响,可认为煤体孔隙率是动态的<sup>[14]</sup>。煤体孔隙率可表示为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = a \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{1-\varphi}{k_s} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

式中:  $a$  为等效孔隙压力系数;  $\varepsilon_v$  为体积应变;  $k_s$  为煤体骨架模量。

将钻孔抽采条件下煤层瓦斯运动方程与式(1)~(3)进行耦合,并考虑 Klinkenberg 效应,整理后可得瓦斯在煤层中渗流方程:

$$2ap \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + 2 \left[ \frac{abcp_n}{(1+bp)^2} + \frac{p(1-\varphi)}{k_s} + \varphi \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \left[ p \frac{k}{\mu} \left( 1 + \frac{m}{\mu} \right) \nabla p \right] = 0 \quad (4)$$

式中:  $k$  为煤层渗透率, m<sup>2</sup>;  $\mu$  是瓦斯动力黏度系数, Pa·s;  $m$  为 Klinkenberg 系数, Pa。

### 1.2 孔隙率和渗透率耦合方程

根据孔隙率  $\varphi$  的定义<sup>[15]</sup>,若不考虑温度及煤体瓦斯解吸对煤岩变形的影响,则煤岩骨架受游离瓦斯压力变化影响发生变形导致孔隙率的变化为

$$\varphi = 1 - \frac{1-\varphi_0}{1+\varepsilon_v} \left( 1 - \frac{\Delta p}{k_s} \right) \quad (5)$$

式中:  $\varphi_0$  为煤岩初始孔隙率;  $\Delta p$  为瓦斯压力变化。

同理,煤体渗透率也是动态的。根据 Carman-Kozeny 经验公式<sup>[16]</sup>,可得渗透率方程为

$$k = \frac{k_0}{1+\varepsilon_v} \left\{ 1 + \frac{\varepsilon_v + \Delta p(1-\varphi_0)/k_s}{\varphi_0} \right\}^2 \quad (6)$$

式中  $k_0$  为初始渗透率。

### 1.3 钻孔抽采过程中煤层变形场控制方程

煤体是由分子尺度的颗粒组成的骨架及颗粒间裂隙共同组成的孔隙介质。理论研究表明,地下煤体的变形可视为是煤体的压缩变形,其变形的几何方程满足柯西方程,据弹性力学理论可确定煤岩体本构方程<sup>[17]</sup>;假设煤层为各向同性,考虑游离瓦斯压力的改变引起的应变,并结合修正的 Terzaghi 有效应力定律,可得含瓦斯煤岩体变形控制方程为

$$G \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{G}{1-2\nu} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_j}{\partial x_j \partial x_i} - \frac{(3\lambda-2G)}{3k_s} \frac{\partial p}{\partial x_i} + a \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i = 0 \quad (7)$$

式中:  $\lambda$ ,  $G$  为拉梅常数;  $F_i$  为体积力。

则由式(4)~(7)可得出煤层瓦斯流动的流固耦合控制方程:

$$\begin{cases} 2ap \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + 2 \left[ \frac{abcp_n}{(1+bp)^2} + \frac{p(1-\varphi)}{k_s} + \varphi \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \left[ p \frac{k}{\mu} \left( 1 + \frac{m}{\mu} \right) \nabla p \right] = 0 \\ \varphi = 1 - \frac{1-\varphi_0}{1+\varepsilon_v} \left( 1 - \frac{\Delta p}{k_s} \right) \\ k = \frac{k_0}{1+\varepsilon_v} \left\{ 1 + \frac{\varepsilon_v + \Delta p(1-\varphi_0)/k_s}{\varphi_0} \right\}^2 \\ G \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{G}{1-2\nu} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_j}{\partial x_j \partial x_i} - \frac{(3\lambda-2G)}{3k_s} \frac{\partial p}{\partial x_i} + a \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i = 0 \end{cases} \quad (8)$$

## 2 数值模拟分析

### 2.1 几何模型

根据上述基本假设和黄岩汇矿 15107 工作面现场顺层钻孔抽采的实际情况, 设定计算区域如图 1。煤层瓦斯基本参数如表 1。上覆岩层为 350 m, 煤层厚 5.3 m, 长为 30 m。钻孔半径为 0.056 5 m, 各钻孔以一定的间距分布在煤层的中心位置。

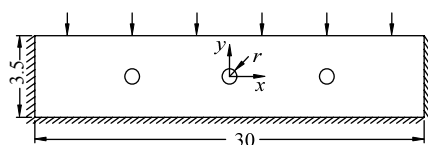


图 1 几何模型

Fig.1 Geometric model

表 1 煤层瓦斯基本参数

Table 1 The basic parameters of methane in coal seam

参数	值
煤的弹性模量 $E/\text{Pa}$	$2.56 \times 10^9$
煤的泊松比 $\nu$	0.12
煤的密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1400
初始孔隙率 $\varphi_0$	0.04
煤层透气性系数 $\lambda/(\text{m}^2 \cdot \text{MPa}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	0.0708
瓦斯动力黏度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$1.08 \times 10^{-8}$
岩石泊松比 $\nu$	0.16
煤的吸附常数 $a/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$41.61 \times 10^{-3}$
煤的吸附常数 $b/\text{MPa}^{-1}$	1.281
煤的水分 $M/\%$	1.89
煤的灰分 $A/\%$	17.43

### 2.2 初始条件和边界条件

初始条件:  $t=0$  时, 煤层原始瓦斯压力  $p(x,y,0)=0.25 \text{ MPa}$ , 应力场初始位移  $u_i=0(i=1,2)$ 。

边界条件: 假设煤层顶底板为不透水岩层, 则渗流场边界条件为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, x = \pm 15$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0, y = \pm 2.65 \quad t \in [0, \infty) \quad (9)$$

$$p(x, y, t) = p_0, x^2 + y^2 = r^2$$

式中  $p_0$  为抽放负压, Pa。

应力边界条件: 煤层顶部边界( $y=2.65$ )承受上覆岩层的应力为 9 MPa。

位移边界条件: 在计算区域的下部边界( $y=-2.65$ )及左右边界( $x=\pm 15$ )为位移约束条件。

### 2.3 数值模拟结果

#### 2.3.1 单钻孔瓦斯抽采

单钻孔抽采瓦斯时, 不同抽采时间下钻孔周围瓦斯压力分布云图如图 2。随着抽采钻孔不间断抽采煤层瓦斯, 钻孔周围煤层瓦斯压力逐渐减小, 在钻孔负压作用下形成的瓦斯流场范围逐渐增大。为了定量分析抽采钻孔周围煤层瓦斯压力的分布情况, 选取计算区域内端点为(0.056 5, 0)和(15, 0)的某一剖面线, 并对其上的瓦斯压力变化规律进行分析。图 3 为不同抽采时间剖面上瓦斯压力变化图。

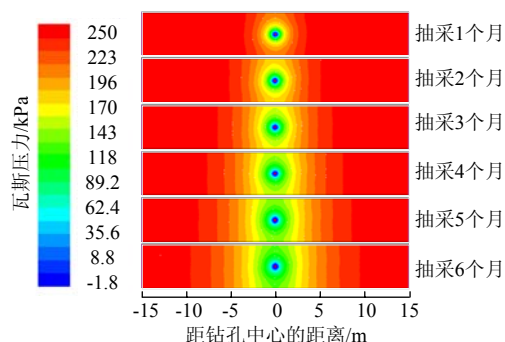


图 2 不同抽采时间钻孔周围瓦斯压力分布云图  
Fig.2 Gas pressure distribution contours around the borehole under different times

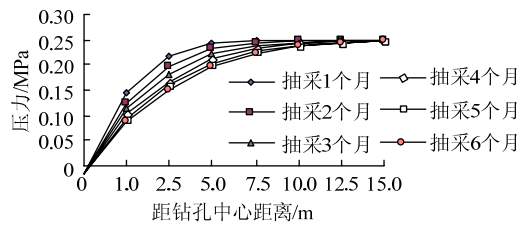


图3 不同抽采时间钻孔周围瓦斯压力变化  
Fig.3 Gas pressure change around the borehole under different times

由图 3 可以看出，当钻孔抽采时间由 1 个月增加至 6 个月时，受抽采钻孔影响的瓦斯流场范围从 0.84 m 增加到了 1.62 m。钻孔抽采初期，钻孔周围较小范围内瓦斯压力下降较快，瓦斯压力梯度较大，随着抽采时间的增加，瓦斯压力梯度逐渐减小。这是由于在钻孔施工过程中，钻孔周围较小范围内煤体产生卸压和应力集中现象，卸压煤体渗透率增加，应力集中煤体渗透率减小，因此在抽采初期瓦斯压力梯度较大；随着抽采时间的增加，钻孔周围煤体内游离瓦斯被抽出，煤体内游离瓦斯压力逐渐减小，煤体发生变形，孔隙率和渗透率逐渐增加，瓦斯压力梯度逐渐减小。

根据文献[1-2]，确定钻孔瓦斯抽采影响半径的指标为瓦斯压力下降 10%，确定有效抽采半径的指标为瓦斯压力下降 51%以上。根据这个指标，不同抽采时间下，单个钻孔的抽采影响半径和有效抽采半径如表 2 所示。

表 2 不同抽采时间下的抽采半径  
Table 2 The extraction radius under different times

抽采时间/月	影响半径/m	有效半径/m
1	3.00	0.84
2	4.22	0.99
3	5.31	1.17
4	6.28	1.34
5	7.15	1.48
6	7.93	1.62

2.3.2 多钻孔瓦斯抽采

通过对单钻孔有效抽采半径分析，得出在不同抽采时间时的有效抽采半径。但在井下实际瓦斯抽采工程中瓦斯抽采钻孔都是相邻布置的，若要合理确定抽采钻孔的布孔间距，则需考虑相邻抽采钻孔的抽采叠加效应<sup>[18]</sup>。根据上述模拟顺层单钻孔抽采 6 个月时所确定的有效抽采半径，模拟布孔间距为 2 倍有效半径时多个钻孔周围瓦斯压力分布状况。图 4 为抽采 6 个月后钻孔周围瓦斯压力等值线图。

由图 4 可以看出，在多钻孔抽采叠加效应的作用下，两钻孔中心位置处的瓦斯压力明显低于钻孔另一侧相同距离位置处的瓦斯压力。为了更准确地得出多孔抽采的瓦斯变化规律，选取在计算区域内某一直线上的瓦斯压力进行定量分析。图 5 为多孔抽采瓦斯时煤层瓦斯压力分布规律。

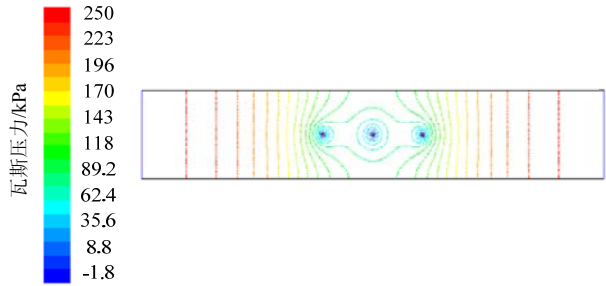


图 4 多孔抽采瓦斯压力等值线图  
Fig.4 Gas pressure contours in multiple drillings drainage

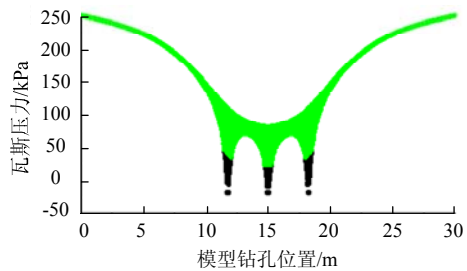


图 5 多孔抽采瓦斯压力分布规律  
Fig.5 Gas pressure distribution rule in multiple drilling drainage

由图 5 可以看出：多钻孔抽采瓦斯时，相邻两钻孔中心位置处，即距离两抽采孔均为 1.62 m 处的瓦斯压力为 0.068 MPa，远小于单孔抽采瓦斯时距钻孔中心相同位置处的瓦斯压力 0.123 MPa，且相比于单孔抽采时下降了 44.7%。这表明顺层多钻孔抽采瓦斯时，在抽采叠加效应的影响下，距钻孔不同距离处煤层瓦斯压力降低的幅度比单钻孔抽采时更大。因此，多钻孔抽采煤层瓦斯时，钻孔的布孔间距可大于 2 倍有效抽采半径。

2.3.3 布孔间距与抽采半径的关系

钻孔抽采瓦斯时，钻孔抽采的强影响区域为钻孔的有效半径范围内，弱影响区域为有效抽采半径外至钻孔流场外边界。当相邻钻孔间距大于 2 倍单孔有效抽采半径时，在钻孔强影响区域内，煤层瓦斯压力降低主要受抽采钻孔的影响，相邻钻孔对该区域内瓦斯压力影响较小；在各钻孔弱影响区域内，相邻钻孔的抽采叠加作用较明显，煤层瓦斯压力受两孔的叠加影响降低较快。若在某一弱影响区

域内, 相邻两钻孔对该区域的影响综合效果等于钻孔强影响区域的效果, 则这样一个区域可考虑放入钻孔间距内。经过大量模拟研究确定该区域为单钻孔有效抽采半径外至瓦斯压力降至 70% 处的边界, 并得出了布孔间距与单钻孔抽采半径的关系:

$$2r \leq L \leq r + R \quad (10)$$

式中:  $r$  为单钻孔有效抽采半径, m;  $L$  为布孔间距, m;  $R$  为单钻孔抽采时瓦斯压力降至 70% 的影响半径, m。

### 3 现场试验

#### 3.1 试验地点概况

黄岩汇煤矿主采 15 号煤层位于石炭系上统太原组底部, 煤层基本顶为中砂岩或粉砂岩, 厚度 8 m; 直接顶为砂质泥岩, 厚度 6.9 m; 伪顶为砂质泥岩, 厚度 1.5~2.0 m。煤层直接底为泥岩, 厚度约 7 m; 底板为 K1 砂岩, 厚度 10.0~12.0 m, 局部破碎不整合, 渗透性较强。15 号煤为中灰、低磷、富硫、含少量高硫煤的高变质无烟煤, 一般硬度较大, 具有条带状结构, 块状构造。宏观煤岩类型以光亮型、半亮型煤为主, 少数为半暗型煤。煤的平均容重为  $1.4 \text{ t/m}^3$ , 坚固性系数在 0.08~0.42 之间。

15107 工作面位于矿井井底车场西南部, 工作面长 180 m, 设计走向长度 1 282 m。煤层瓦斯含量 4.78~12.92  $\text{m}^3/\text{t}$ , 瓦斯压力 0.1~0.4 MPa, 煤层厚 4.3~9.5 m, 平均为 5.93 m, 倾角  $4^\circ \sim 17^\circ$  之间, 赋存稳定。煤层上部局部含 1~2 层夹矸, 夹矸厚 0.2~0.4 m。煤层透气性系数  $0.0708 \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ , 钻孔瓦斯流量衰减系数  $0.3434 \text{ d}^{-1}$ , 属于较难抽采煤层。

#### 3.2 试验方法

根据黄岩汇煤矿实际生产情况, 测试地点选择在 15107 胶顺。设计施工 2 组钻孔测试单钻孔抽采的有效抽采半径。待确定单钻孔有效抽采半径后, 依据布孔间距与有效半径的关系, 设计施工 1 组钻孔测试多钻孔抽采时的煤层瓦斯压力变化, 钻孔布置及参数见图 6 所示。

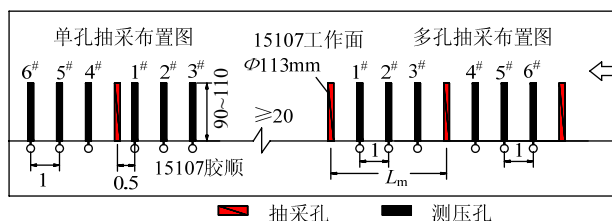


图 6 钻孔布置示意图 (m)

Fig.6 Drilling arrangement diagram

#### 3.3 试验结果

根据上述方法在 15107 胶顺进行了试验, 并获取了大量试验数据, 得到了不同抽采时间内不同距离测压钻孔的瓦斯压力变化曲线。从设计方案中优先选取数据较全面的测试钻孔作为考察对象, 单钻孔抽采瓦斯压力变化情况如图 7 所示。

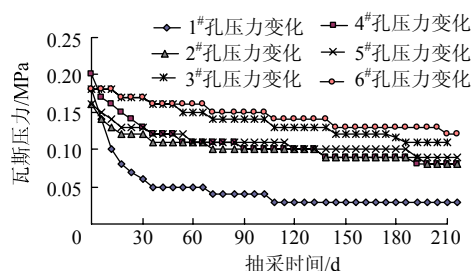


图 7 单钻孔抽采瓦斯压力变化曲线图

Fig.7 Gas pressure change curve in single drilling drainage

由图 7 可知: ① 1#孔在抽采的前 30 d 瓦斯压力呈明显下降趋势, 由 0.18 MPa 迅速降至 0.05 MPa, 降幅达 72.2%, 此后瓦斯压力开始变为缓慢下降。抽采 180 d 时瓦斯压力降至 0.03 MPa, 基本接近于 0。② 4#孔瓦斯变化情况与 1#孔比较接近, 在抽采前 30 d 瓦斯压力降低幅度比较大, 由 0.2 MPa 下降至 0.12 MPa, 其后瓦斯压力变化趋于变缓, 抽采 76 d 时瓦斯压力下降至 0.1 MPa, 抽采 180 d 时瓦斯压力降至 0.08 MPa。③ 2#孔瓦斯压力变化相比于 1#和 4#孔较为平缓, 抽采 60 d 时瓦斯压力由 0.16 MPa 降至 0.1 MPa, 至 166 d 时降至 0.08 MPa。④ 5#孔在抽采前瓦斯压力变化较为明显, 抽采 26 d 时由 0.16 MPa 降至 0.12 MPa, 之后瓦斯压力变化十分缓慢, 抽采 180 d 时瓦斯压力降至 0.09 MPa。⑤ 3#和 6#孔瓦斯压力变化比较相似, 随着抽采时间的增加, 瓦斯压力逐渐减小, 但变化十分缓慢, 抽采 180 d 时瓦斯压力分别由 0.18 MPa 降至 0.11 MPa 和 0.12 MPa。

由以上结果分析可知: 在孔径为 113 mm, 抽采负压为 18 kPa 时, 黄岩汇矿单钻孔瓦斯抽采有效半径为: 抽采 30 d 时小于 1 m, 抽采 76 d 时为 1 m 左右, 抽采 166 d 时为 1.5 m, 抽采 180 d 时超过 1.5 m 但小于 2 m。抽采钻孔周围瓦斯压力降低 70% 的半径为: 抽采 21 d 时为 1 m, 抽采 51 d 时为 2 m 左右, 抽采 120 d 时为 2.5 m, 抽采 180 d 时超过 3 m。这与模拟结果相吻合。

为验证布孔间距与抽采半径的关系的正确性, 根据所确定的单钻孔抽采有效半径, 设计多钻孔抽



采试验组的布孔间距为  $L=r+R=1.5\text{ m}+3\text{ m}=4.5\text{ m}$ 。经过 180 d 不间断抽采, 观测多孔抽采条件下煤层瓦斯压力变化。由于 2<sup>#</sup>孔和 5<sup>#</sup>孔布置位置相似, 1<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>和 6<sup>#</sup>孔布置位置相似, 为简化分析过程, 只对 2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>孔瓦斯压力变化进行分析, 2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>孔瓦斯压力变化情况如图 8 所示。

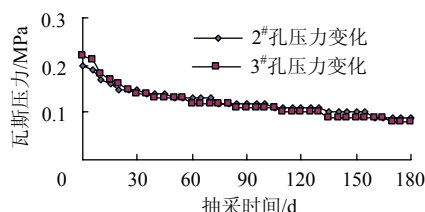


图 8 多孔抽采瓦斯压力变化曲线图

Fig.8 Gas pressure change curve in multiple drillings drainage

由图 8 可知: ① 2<sup>#</sup>孔瓦斯压力一直在下降, 且压力变化趋势线明显呈下降趋势, 抽采的前 21 d, 瓦斯压力由 0.2 MPa 降至 0.15 MPa, 降幅达 25%, 此后瓦斯压力下降逐步趋于变缓, 抽采至 136 d 时瓦斯压力降至 0.1 MPa, 抽采 180 d 时瓦斯压力降至 0.09 MPa, 降幅 55%; ② 3<sup>#</sup>孔瓦斯压力变化趋势与 2<sup>#</sup>孔相似, 瓦斯压力一直在下降, 且压力变化趋势线明显呈下降趋势, 抽采 86 d 时瓦斯压力从 0.22 MPa 降至 0.11 MPa, 降幅 50%左右, 抽采 180 d 时瓦斯压力降至 0.08 MPa, 降幅 36.3%。

由以上结果分析可以看出, 多孔抽采在按式(10)设计布孔间距为  $L=r+R=1.5\text{ m}+3\text{ m}=4.5\text{ m}$  下, 抽采 86 d 时, 单个钻孔有效抽采半径为 1.25 m, 比相同时间单钻孔抽采时增加约 25%; 抽采 180 d 时, 有效抽采半径可达到 2.25 m, 增幅超过 50%。因此, 在布孔间距为 4.5 m 时, 抽采 180 d 可以满足瓦斯抽采率达到 30%的要求, 这也验证了式(10)的正确性。黄岩汇矿顺层预抽钻孔预抽时间为 6 个月, 在不延长抽采时间和保证抽采效果的情况下, 可适当调整布孔间距, 以减少施工钻孔的工程量的。

## 4 结 论

1) 从煤层瓦斯流动的基本假设出发, 基于固气耦合理论, 考虑到在钻孔抽采过程中煤层瓦斯压力变化引起煤层孔隙率、渗透率变化以及煤体骨架变形的关系, 建立了含瓦斯煤岩流固耦合控制方程。

2) 采用数值软件对单钻孔和多钻孔抽采条件下钻孔周围瓦斯压力变化规律进行了模拟, 得出单钻孔瓦斯有效抽采半径为 1.62 m, 并推导出布孔间

距与单钻孔抽采半径的关系。

3) 通过对黄岩汇矿 15107 工作面现场试验得出, 单钻孔预抽煤层瓦斯的有效抽采半径为 1.5 m, 多钻孔预抽煤层瓦斯的合理布孔间距为 3~4.5 m, 验证了抽采半径及布孔间距与抽采半径关系式的准确性。

## 参考文献:

- [1] 刘三钧, 马耕, 卢杰, 等. 基于瓦斯含量的相对压力测定有效半径技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1715-1719.  
LIU Sanjun, MA Geng, LU Jie, et al. Relative pressure determination technology for effective radius found on gas content[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1715-1719.
- [2] 梁冰, 袁新鹏, 孙维吉, 等. 分组测压确定瓦斯有效抽采半径试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 132-135.  
LANG Bing, YUAN Xinpeng, SUN Weiji, et al. Grouped pressure test to determine effective gas drainage radius [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 132-135.
- [3] 杜泽生, 罗海珠. 煤矿瓦斯有效抽采半径的测定计算方法[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(2): 59-62.  
DU Zesheng, LUO Haizhu. Measuring and calculation method of borehole effective gas drainage radius[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(2): 59-62.
- [4] 余陶, 卢平, 孙金华, 等. 基于钻孔瓦斯流量和压力测定有效抽采半径[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 596-600.  
YU Tao, LU Ping, SUN Jinhua, et al. Measurement of effective drainage radius based on gas flow and pressure of boreholes[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 596-600.
- [5] 孙培德. 煤层抽放瓦斯钻孔合理布置探讨[J]. 阜新矿业学院学报, 1989, 8(3): 44-50.  
SUN Peide. A probe into the rational arrangement bores of drainage gas in coal seams[J]. Journal of Liaoning Technical University, 1989, 8(3): 44-50.
- [6] 徐三民. 确定瓦斯有效抽放半径的方法探讨[J]. 煤炭工程师, 1996(3): 43-45.  
XU Sanmin. Discussion on method for determining effective methane drainage radius[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1996(3): 43-45.
- [7] 王兆丰, 周少华, 李志强. 瓦斯抽采钻孔有效抽采半径的数值计算方法[J]. 煤炭工程, 2011(6): 82-84.  
WANG Zhaofeng, ZHOU Shaohua, LI Zhiqiang. Numerical calculation method of effective drainage radius for gas drainage borehole[J]. Coal Engineering, 2011(6):

- 82-84.
- [8] 刘清泉, 程远平, 王海峰, 等. 顺层钻孔有效瓦斯抽采半径数值解算方法研究[J]. 煤矿开采, 2012, 17(2): 5-7.  
LIU Qingquan, CHENG Yuanping, WANG Haifeng, et al. Numerical resolving of effective methane drainage radius in drill hole along seam[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(2): 5-7.
- [9] 马耕, 苏现波, 魏庆喜. 基于瓦斯流态的抽放半径确定方法[J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 501-504.  
MA Geng, SU Xianbo, WEI Qingxi. The determination method of coal gas drainage radius based on methane flow state[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 501-504.
- [10] 司鸽, 郭涛, 李晓红. 钻孔抽放瓦斯流固耦合分析及数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(11): 106-110.  
SI Hu, GUO Tao, LI Xiaohong. Analysis and numerical simulation of fluid-structure coupling of gas drainage from boreholes[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(11): 106-110.
- [11] 郝福昌, 刘明举, 孙丽娟. 基于多物理场耦合的瓦斯抽放半径确定方法[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 106-111.  
HAO Fuchang, LIU Mingju, SUN Lijuan. Determination method of gas drainage radius based on multi-physics coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 106-111.
- [12] 李志强, 鲜学福, 姜永东, 等. 地球物理场中煤层气渗流控制方程及其数值解[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 3226-3233.  
LI Zhiqiang, XIAN Xuefu, JIANG Yongdong, et al. Seepage control equation of coalbed methane in geophysical field and its numerical solutions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 3226-3233.
- [13] 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): 483-486.
- [14] ZHOU Y, RAJAPAKSE R, GRAHAM J. A coupled thermoprelatic model with thromo-osmosis and thermal-filtration[J]. International Journal of Solids and Structure, 1998, 35: 18-23.
- [15] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型 [J]. 水动力力学研究与进展, 2003, 30(10): 419-426.  
LI Peichao, KONG Xiangyan, LU Detang. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structure coupling effect[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 30(10): 419-426.
- [16] 卢平, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 岩样应力应变全过程中的渗透性表征与试验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(6): 6782-6784.  
LU PING, SHEN Zhaowu, ZHU Guiwang, et al. Characterization of and experimental study on the permeability of rock-samples during complete stress-strain course[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2002, 32(6): 6782-6784.
- [17] 孙培德, SUN 模型及应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 21-26.
- [18] 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, 1996: 34-37.