

# 顺煤层钻孔瓦斯抽采时空演化规律研究

胡杰<sup>1,2</sup> 隆清明<sup>1,2,3</sup> 李建功<sup>1,2,3</sup> 吕贵春<sup>1,2</sup>

(1. 中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司 重庆 400039; 2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室 重庆 400037;  
3. 重庆大学 资源与环境科学学院 重庆 400030)

**摘要:** 为研究顺煤层钻孔瓦斯抽采效果与抽采半径、抽采时间的关系, 基于渗流理论、气体状态方程及瓦斯含量计算方程, 建立了本煤层瓦斯抽采时空演化规律数学模型。基于仲恒煤矿 1320\_1 工作面的工程背景, 采用 Comsol 数值模拟, 得到不同抽采时间下单一钻孔径向范围的瓦斯压力分布, 分析了抽采半径与抽采时间的动态变化关系, 进而推导出瓦斯抽采时空演化规律对数函数关系式, 进行了不同抽采半径条件下的钻孔瓦斯抽采对比试验, 求算并验证了当抽采半径小于 2 m 或抽采时间在 180 d 以内时, 瓦斯抽采时空演化规律函数关系式的合理性与正确性, 符合现场实际抽采规律。

**关键词:** 顺煤层钻孔; 瓦斯抽采; 抽采时间; 抽采半径; 时空演化规律

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)02-0083-06

## Study on time-space evolution law of gas drainage with drilling along coal seam

Hu Jie<sup>1,2</sup> Long Qingming<sup>1,2,3</sup> Li Jiangong<sup>1,2,3</sup> Lyu Guichun<sup>1,2</sup>

(1. Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400039, China;  
2. National Key Lab of Gas Disaster Monitoring and Control as well as Emergency Technology, Chongqing 400037, China;  
3. School of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between the gas drainage effect with drilling along coal seam and the drainage radius as well as the drainage time, based on the seepage theory, gas state equation and gas content calculation equation, a mathematical model of the time-space evolution law for the gas drainage in the mining seam was established. With the application of Comsol numerical simulation, based on the engineering background of No. 1320\_1 coal mining face in Zhongheng Mine, the gas pressure distribution within the radial scope of a single borehole under the different drainage time was obtained, a dynamic variation relationship between the drainage radius and the drainage time was analyzed and the logarithm function relationship of the time-space evolution in the process of the gas drainage was further derived. The comparison experiments of the borehole gas drainage under the condition of different drainage radius were conducted. The function relationship rationality and accuracy on the space and time evolution law of the gas drainage when the drainage radius less than 2 m or the drainage time within 180 days was calculated and verified. The function relationship conforms actual extraction law.

**Key words:** drilling along coal seam; gas drainage; drainage time; drainage radius; time-space evolution law

## 0 引言

预抽煤层瓦斯是主要的区域防突措施, 而提升煤层瓦斯抽采率是生产矿井急需解决的主要难题之一。在执行增透措施的情况下, 抽采钻孔间距的合理布置及抽采时间的有效选取是技术关键<sup>[1-3]</sup>。目前

煤矿现场抽采是否达标主要通过现场测试法进行评估, 而压力降低法是现场广泛采用的评估方法<sup>[4-6]</sup>。国内外学者对有效抽采半径与初始瓦斯压力、初始渗透率、煤层透气性系数、布孔方式等因素间的关系进行了研究, 并取得了一定的研究成果<sup>[7-11]</sup>。文献[12]研究得出煤层钻孔瓦斯流动同

收稿日期: 2016-08-12; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.02.014

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5130423); “两江学者”计划专项经费资助项目([2013]渝九证字第1406号)

作者简介: 胡杰(1989—), 男, 重庆开县人, 硕士。Tel: 13983876860, E-mail: leaderhj@126.com

引用格式: 胡杰, 隆清明, 李建功等. 顺煤层钻孔瓦斯抽采时空演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 83-88.

Hu Jie, Long Qingming, Li Jiangong, et al. Study on time-space evolution law of gas drainage with drilling along coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 83-88.

钻孔孔径、钻孔长度以及抽采负压的关系式，并得出了在一定范围内瓦斯流量与抽采负压成正比的结论。于不凡等<sup>[13]</sup>认为增大钻孔孔径对提高钻孔瓦斯流量没有明显效果，钻孔长度对提高瓦斯抽采效果是有益的，且流量同抽采负压在一定范围内成正比关系。文献[14]基于对现场试验数据的分析和计算机模拟，得出了抽采负压、抽采时间、钻孔间距以及钻孔孔径对煤层钻孔瓦斯抽采率的影响关系，结果表明在相同的抽采时间条件下，减小钻孔间距比增大钻孔直径更有利于提高瓦斯抽采率。针对钻孔施工工艺、封孔工艺及增透措施相对成熟的生产矿井的本煤层瓦斯抽采而言，抽采半径与抽采时间将直接影响到煤层的抽采效果，若抽采半径过大、抽采时间较短，则在抽采范围内形成抽采盲区，给安全生产带来严重隐患；反之若抽采半径过小、抽采时间较长，则会增加不必要的工程量及生产成本。因此研究抽采半径与抽采时间对抽采效果的综合影响有重要的意义。笔者基于抽采半径与抽采时间这2个因素，对煤层瓦斯抽采效果的时空演化规律进行研究。

## 1 抽采半径与抽采时间关系理论模型

煤体是由孔隙-裂隙组成的多孔介质，瓦斯在煤层中的流动，主要是扩散运动和层流渗透运动<sup>[15-18]</sup>。因此，笔者主要基于渗流理论建立抽采半径与抽采时间关系的数学模型。

### 1.1 理论假设

理论假设条件如下：①将煤层顶底板围岩视为不透气且不含瓦斯介质；②钻孔周围瓦斯压力均匀分布，且初始瓦斯压力为煤层原始瓦斯压力 $P_0$ ；③在同一水平，煤层中原始瓦斯压力、瓦斯含量和温度相同；④瓦斯在煤层渗流过程中按等温过程处理，并服从理想气体状态方程；⑤瓦斯吸附符合朗格缪尔方程，可忽略煤层瓦斯的解吸时间；⑥瓦斯在煤层中的流动服从达西定律，且渗流过程中符合质量守恒；⑦钻孔周围煤层渗透率各向同性；⑧忽略瓦斯沿钻孔轴向流动，将钻孔周围瓦斯流场视为轴对称径向流场。

### 1.2 数学模型建立

取半径为 $r$ 的薄壁单元体进行分析，沿轴向的宽度取单位宽度1，径向壁厚取 $dr$ 。 $r_0$ 为钻孔半径，钻孔周围瓦斯渗流单元体分析如图1所示。

在 $dt$ 时间内，单元体内瓦斯质量的增量 $\Delta M$ 为

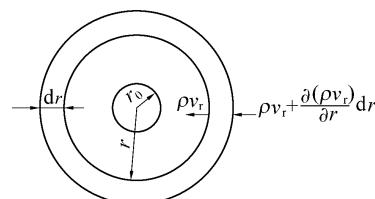


图1 钻孔周围瓦斯渗流单元体分析

Fig. 1 Analysis of gas flow unit body around drilling

$$\Delta M = 2\pi(r + dr) \left[ \rho v_r + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} dr \right] dt - 2\pi\rho v_r dt$$

将上式整理并略去高阶无穷小量，得：

$$\Delta M = 2\pi r \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \rho v_r dr dt \quad (1)$$

式中： $\rho$  为瓦斯密度； $r$ 、 $dr$  分别为单元体的半径及半径增量； $v_r$  为瓦斯径向流动的线速度。

从瓦斯含量变化的角度分析， $dt$  时间内单元体的瓦斯质量变化量为

$$\Delta M' = 2\rho\pi r dr \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2)$$

其中， $\frac{\partial w}{\partial t}$  为单元体瓦斯含量随时间的变化率。

由瓦斯流动过程中的质量守恒有  $\Delta M' = \Delta M$ ，得：

$$\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \rho v_r = \rho \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3)$$

根据达西定律、气体状态方程、瓦斯含量计算方程，可得：

$$v_r = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\rho_n p}{p_n} \quad (5)$$

$$W = \left( \frac{abpc}{1 + bp} + n \right) \rho \quad (6)$$

式中： $k$  为钻孔周围煤层渗透率； $\mu$  为瓦斯动力黏度系数； $\frac{\partial p}{\partial r}$  为钻孔周围瓦斯沿径向的压力梯度； $p$  为煤层瓦斯压力，MPa； $P_n$  为1个标准大气压，MPa； $\rho_n$  为瓦斯压力为 $P_n$ 时的瓦斯密度； $W$  为压力 $p$ 时煤层的瓦斯含量， $m^3/t$ ； $a$ 、 $b$  为吸附常数， $m^3/t \cdot MPa^{-1}$ ； $n$  为单位体积煤中所含游离瓦斯体积或为煤体孔隙率； $c$  为煤质指标， $c = 1 - A_d - M_{ad}$ ， $A_d$  为灰分， $M_{ad}$  为水分。

将式(4)—式(6)代入式(3)，可得到微分方程：

$$s(p) \left( \frac{\partial^2 p^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) = \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (7)$$

$$\text{式中: } s(p) = \frac{2 p_n p \lambda}{n + \frac{abcp(2 + bp)}{(1 + bp)^2}}; \lambda \text{ 为煤层透气性系}$$

$$\text{数, } \lambda = \frac{k}{2\mu p_n}.$$

式(7)即钻孔抽采情况下,钻孔周围瓦斯流动的非稳定径向渗流的动力学控制方程。

为分析钻孔的抽采效果,须寻求瓦斯压力以及压力梯度  $\frac{\partial p}{\partial r}$  的连续函数表达式,从而建立其与抽采半径、抽采时间之间的理论模型。对式(7)进行化简处理,基于拉普拉斯变化可得到  $\frac{\partial p}{\partial r}$  的表达式为

$$\frac{\partial p}{\partial r} = (p_0^2 - p_1^2) \frac{r_0}{2 p_0 r \sqrt{\pi s_0 t}} \exp \left[ - \left( \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{2 \sqrt{s_0 t}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中:

$$s_0 = s(p_0) = \frac{8 p_n p_0 \lambda}{(R_0 - r_0)^2 \left[ n + \frac{abc p_0 (2 + b p_0)}{(1 + b p_0)^2} \right]}$$

## 2 数值模拟分析

### 2.1 几何模型

根据上述基本假设与理论模型,并以仲恒煤矿1320-1回采工作面现场顺层钻孔抽采的实际情况为工程背景建立几何模型,设定计算区域如图2所示,模型为宽20 m、高2.2 m的矩形,钻孔位于矩形中央,孔径75 mm,抽采负压20 kPa。

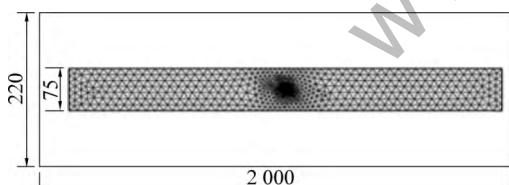


图2 煤层瓦斯单孔径向抽采几何模型

Fig. 2 The geometric model of single hole radial gas drainage in coal seam

仲恒煤矿20-1号煤层瓦斯基本参数如下:

煤体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	$1.29 \times 10^3$
动力黏度/(Pa·s)	$1.08 \times 10^{-5}$
原始瓦斯压力/MPa	1.25
煤层透气性系数/(m <sup>2</sup> ·MPa <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	1.179 1
渗透率/m <sup>2</sup>	$2.95 \times 10^{-17}$
吸附常数a/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	26.391 1

吸附常数 $b / \text{MPa}^{-1}$	1.186 1
孔隙率	0.044
煤的水分 $M_{ad} / \%$	1.52
煤的灰分 $A_d / \%$	16.15

### 2.2 初始条件和边界条件

初始条件:当  $t=0$  ( $r_0 < r < R_0$ ) 时,  $p = p_0$ , 即  $t=0$  时, 煤层原始瓦斯压力为 1.25 MPa;  $R_0$  为钻孔抽采的影响半径。

边界条件:假设煤层顶底板为不透气岩层, 数值模型外边界无压力梯度, 钻孔边界压力为抽采负压; 当  $r=r_0$  ( $t>0$ ) 时,  $p = p_1$ ; 当  $r=R_0$  ( $t>0$ ) 时,  $\frac{\partial p}{\partial r}=0$ 。其中  $p_1$  为钻孔的气体压力。

### 2.3 数值模拟

根据所设置的条件,应用 Comsol 软件模拟出不同抽采时间下,瓦斯抽采径向钻孔周围瓦斯压力变化云图,并提取出抽采时间为 30、60、90、120、180、360 d 时,瓦斯抽采钻孔的瓦斯压力变化情况,如图3 所示。

由图3可知,在相同的抽采时间条件下,距离钻孔垂直距离越大,云图颜色越深,即其残余瓦斯压力越大,抽采效果越差;随着抽采时间的延长,钻孔云图颜色逐渐变浅,即残余瓦斯压力逐渐变小,抽采效果越来越好,即抽采钻孔不间断抽采煤层瓦斯,钻孔周围瓦斯压力逐渐减小,在钻孔负压作用下形成的瓦斯流场范围逐渐增大,抽采影响范围逐渐增大。

### 2.4 结果分析

1) 抽采达标判定依据。判断瓦斯抽采达标常用残余瓦斯压力或残余瓦斯含量这 2 项指标,结合上述理论分析结果,本次研究采用残余瓦斯压力来标定抽采效果是否达标。根据国家及地方最新的规定及要求,选取瓦斯压力 0.60 MPa 为仲恒煤矿 20-1 煤层抽采效果(抽采达标)的界定值。

2) 有效抽采半径与抽采时间关系。根据数值模拟的结果,得到抽采时间分别为 30、60、90、120、180、360 d 时,至钻孔中心距离与瓦斯压力的变化曲线,如图4 所示。

通过数值模拟,可得煤层瓦斯压力降至 0.6 MPa 时,不同抽采时间下对应的有效抽采半径,如图5 所示。

从图5可知,抽采钻孔的抽采影响半径随着抽

采时间的延长而增大,而且增大的幅度会越来越小,

且满足对数函数关系。

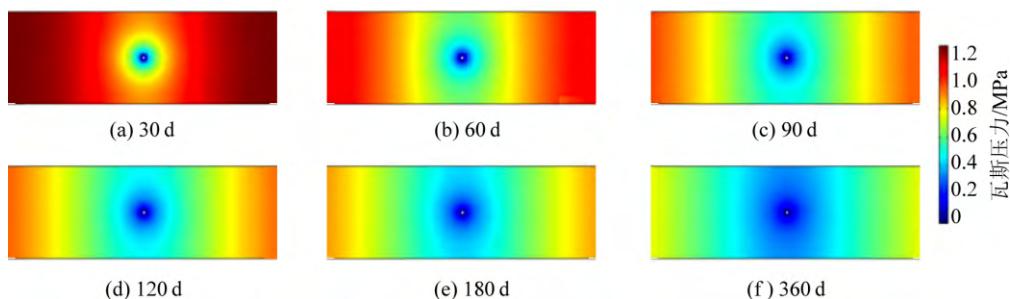


图3 不同抽采时间下沿钻孔径向瓦斯压力变化

Fig. 3 Gas pressure change at different extraction time along the drilling radial direction

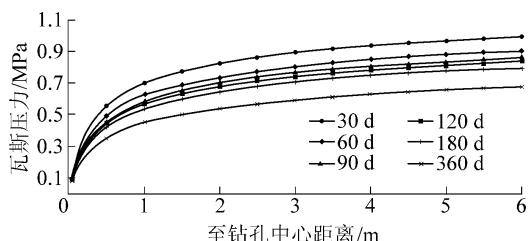


图4 瓦斯压力随至钻孔中心距离变化

Fig. 4 Gas pressure change with the distance to the centre of borehole

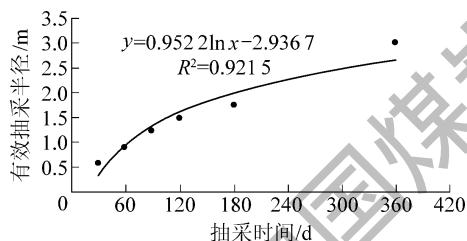


图5 有效抽采半径与抽采时间的拟合曲线

Fig. 5 Fitting graph of effective drainage radius with drainage time

### 3 现场试验

#### 3.1 试验工作面概况

仲恒煤矿位于贵州省六盘水市盘县红果镇,设计生产能力90万t/a。井田走向长2.13~3.15 km,倾斜宽0.68~1.23 km,开采深度标高:+1 200—+1 850 m,矿区面积2.907 7 km<sup>2</sup>,经鉴定为突出矿井。1320-1回采工作面平均走向长为1 300 m,平均倾向长97 m,煤层平均厚度2.2 m,原始瓦斯压力为1.25 MPa,工作面煤层标高+1 590—+1 644 m,埋深190~270 m。该工作面主采20-1号煤层,20-1号煤层为中灰、特低硫、特高热值气煤和肥煤,硬度较大,具有条带状结构。

#### 3.2 试验方法

根据仲恒煤矿的现场条件,在仲恒煤矿

1320-1工作面运输巷布置测点。设计施工6组钻孔,测试可得单孔有效抽采半径与抽采时间对应关系,考察瓦斯抽采演化规律空间与时间的变化规律。抽采半径分别为0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 m,组间距不小于20 m,钻孔孔径为75 mm,抽采负压为20 kPa。钻孔布置及参数如图6所示。钻孔施工完成后,立即接上抽采管道并装好压力表。

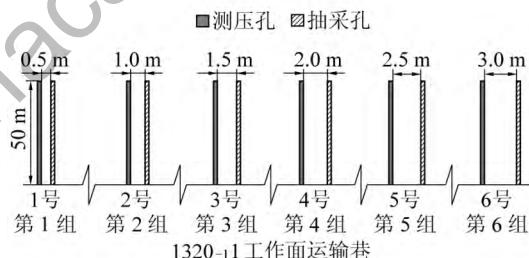


图6 钻孔布置示意

Fig. 6 The schematic of drilling arrangement

#### 3.3 试验结果

根据上述方法在仲恒煤矿1320-1工作面运输巷进行了现场试验,对试验数据进行优选,经整理得单钻孔抽采瓦斯压力变化情况,如图7所示。

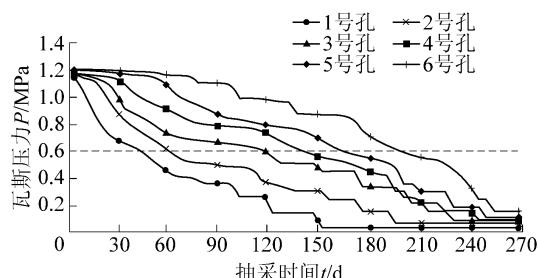


图7 抽采钻孔瓦斯压力变化曲线

Fig. 7 Gas pressure change graph of gas drainage drillings

由图7可知:1、2、3号孔瓦斯压力变化情况比较接近,即在抽采半径在1.5 m范围内时,前60 d

内,瓦斯压力呈明显的下降趋势,其后瓦斯压力变化趋势变缓,但随着抽采时间的增加,瓦斯压力逐渐减小,最终降至0.08 MPa以下,接近于0。4、5号孔瓦斯压力在前30 d内变化相对平缓,随着时间延长,瓦斯压力变化幅度增大,在180 d后瓦斯压力变化幅度再次变缓,最终降至0.1 MPa以下。在抽采半径为3 m时,6号钻孔瓦斯压力在前180 d内整体上变化趋势缓慢,且呈阶段性下降特点,其后瓦斯压力变化幅度增大,随着抽采时间的延长,最终降为0.09 MPa。由图7可知,在现场施工钻孔孔径为75 mm、抽采负压为20 kPa情况下,仲恒煤矿不同抽采半径下的单钻孔瓦斯抽采达标时间。同时,通过数值模拟结果得出拟合公式(图5),代入相应的抽采半径进行抽采达标时间计算,基于现场实际抽采情况,对数值模拟结果进行验证,对比情况见表1。

表1 数值模拟与现场实际瓦斯抽采达标时间对比

Table 1 Gas drainage time comparison between numerical simulation results and mine site situations

抽采半径/m	现场抽采 达标时间/d	模拟抽采 达标时间/d	相对误差/%
0.5	40	37	7.5
1.0	64	62	3.1
1.5	119	106	10.9
2.0	159	179	12.5
2.5	190	304	60.0
3.0	203	500	146.3

由表1可知:当抽采半径在2 m内时,数值模拟结果与实际抽采情况基本一致,相对误差不超过13%,最大仅为12.5%。验证了数值模拟结果推导关系式的准确合理性。如当抽采半径为1 m时,由关系式得抽采达标时间为62 d,通过现场施工验证得出实际抽采达标时间为64 d,抽采达标时间仅相差2 d,相对误差为3.1%,与数值模拟结果吻合,验证了理论结果的合理性。

由图5中的拟合公式:当有效抽采半径为2 m时,抽采达标时间为180 d,由此可得在给定抽采半径小于2 m或者抽采时间在180 d内时,可根据瓦斯抽采时空演化规律数值模拟结果公式来计算出合理的抽采达标时间或者有效抽采半径,以指导矿井的瓦斯抽采设计。

## 4 结论

1)以渗流理论为基础,结合气体状态方程以及瓦斯含量计算方程,推导出钻孔周围瓦斯流动的非稳定径向渗流动力学控制方程,建立了瓦斯抽采时空演化规律模型。

2)基于演化规律模型及仲恒煤矿实际条件对单个抽采钻孔周围瓦斯压力变化规律进行数值模拟,得出不同抽采时间下对应的有效抽采半径,并推导出有效抽采半径与抽采时间的数学关系式。

3)通过仲恒煤矿1320-1工作面的现场试验,得出当抽采半径小于2 m或抽采时间小于180 d时,有效抽采半径与抽采时间数学关系式是有效的,对瓦斯抽采有指导意义,具有一定的推广价值。

## 参考文献(References):

- [1] 程远平,付建华,俞启香.中国煤炭瓦斯抽采技术的发展[J].采矿与安全工程学报,2009,26(2):127-139.  
Cheng Yuanping, Fu Jianhua, Yu Qixiang. Development of gas extraction technology in coal mines of China [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 127-139.
- [2] 孙东玲,孙海涛.煤矿采动区地面井瓦斯抽采技术及其应用前景分析[J].煤炭科学技术,2014,42(6):49-52,39.  
Sun Dongling, Sun Haitao. Application prospect analysis on gas drainage technology of surface well in mining area [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 49-52, 39.
- [3] 林柏泉.影响煤层瓦斯抽采的因素及其分析[J].煤矿安全,1990,21(9):30-35.  
Lin Boquan. The factors and analysis of coal seam gas drainage [J]. Safety in Coal Mines, 1990, 21(9): 30-35.
- [4] 余淘,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] 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.
- [6] 徐三民.确定瓦斯有效抽采半径的方法探讨[J].煤炭工程师,1996(3):43-45.  
Xu Sanmin. Discussion on method for determining effective methane drainage radius [J]. Coal Engineer, 1996(3): 43-45.
- [7] 文光才,孙海涛.煤矿采动区地面井瓦斯抽采技术[J].煤矿安全,2015,46(11):26-30.  
Wen Guangcai, Sun Haitao. Ground well gas extraction techniques of mining area in coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(11): 26-30.

- (11):26-30.
- [8] 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.  
Lu Yi, Shen Hongmin, Qin Botao, et al. Gas drainage radius and borehole distance along seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2015, 32(1): 156-162.
- [9] 韩颖,张飞燕,程虹铭.基于灰关联分析的顺层钻孔瓦斯抽采有效半径主控因素研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(6):44-49.  
Han Ying, Zhang Feian, Cheng Hongming. Research on main controlling factors of effective radius for gas extraction using hole drilled along seam based on Grey Relational Analysis [J]. Journal of Safety Science and Technology 2015, 11(6): 44-49.
- [10] 郝福昌,刘明举,孙丽娟.基于多物理场耦合的瓦斯抽采半径确定方法[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.
- [11] 马耕,苏现波,魏庆喜.基于瓦斯流态的抽采半径确定方法[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.
- [12] 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.
- [13] 于不凡,王佑安.煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [14] 马丕梁,屠锡根.煤层瓦斯抽放参数计算[J].煤矿安全,2003,34(S1):75-77.  
Ma Piliang, Tu Xigen. The parameters calculation of coal seam gas drainage [J]. Safety in Coal Mines 2003, 34(S1): 75-77.
- [15] 周世宁.瓦斯在煤层中流动的机理[J].煤炭学报,1990,15(1):15-24.  
Zhou Shining. Mechanism of gas flowing in coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 15-24.
- [16] 袁亮.卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J].煤炭学报 2009,34(1):1-8.  
Yuan Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction [J]. Journal of China Coal Society 2009, 34(1): 1-8.
- [17] 惠国忠,王宏图,谭海祥,等.深部煤层气渗漏方程及其应用[J].中国矿业大学学报 2008,18(4):483-486.  
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.
- [18] Zhou Y, Rajapakse R, Graham J. A Coupled Thermoprelatic Model with thermo-osmosis and thermal-filtration [J]. International Journal of Solids and Structure, 1998, 35: 18-23.