

# 煤矿顺层钻孔瓦斯抽采合理布孔间距研究

李 波<sup>1,2,3</sup> 孙东辉<sup>1</sup> 张路路<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室 河南 焦作 454000;  
3. 河南理工大学 煤炭安全生产协同创新中心 河南 焦作 454000)

**摘 要:** 为确定顺层钻孔瓦斯抽采合理布孔间距, 基于实际煤层赋存条件, 采用压降法对钻孔抽采半径进行试验研究。通过 Comsol Multiphysics 数值模拟软件建立三维抽采钻孔模型, 根据单孔模拟结果, 得到了钻孔的抽采有效半径  $r$ 、抽采影响半径  $R$  的变化规律, 与压降法实测结果高度吻合, 验证了三维模型的可靠性。通过分析钻孔周围瓦斯流态及抽采叠加效应的作用机理, 模拟研究不同布孔间距下的瓦斯抽采效果, 得到顺层瓦斯抽采合理的布孔间距为:  $2r \leq L \leq R$ 。在实际瓦斯抽采工作中可根据矿井采掘计划, 确定合理的布孔间距, 在降低抽采成本的同时确保矿井安全生产。

**关键词:** 瓦斯抽采; 布孔间距; 抽采有效半径; 抽采影响半径

**中图分类号:** TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)08-0121-06

## Study on rational space between gas drainage boreholes passing through seam in coal mine

Li Bo<sup>1,2,3</sup> Sun Donghui<sup>1</sup> Zhang Lulu<sup>1</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering Henan Polytechnic University Jiaozuo 454000 China;  
2. Henan Provincial Key Lab of Biogenic Traces and Mineralizing Process Henan Polytechnic University Jiaozuo 454000 China;  
3. Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production Henan Polytechnic University Jiaozuo 454000 China)

**Abstract:** In order to determine the rational space between the boreholes for gas drainage with the boreholes in and along the seam in coal mine based on the actual seam deposition conditions, a pressure drop method was applied to experiment study on the gas drainage radius of the borehole. A 3D gas drainage borehole model was established by Comsol Multiphysics numerical simulation software. According to the simulation results of a single borehole, the variation laws of gas drainage effective radius  $r$  and gas drainage influence radius  $R$  of the borehole were obtained, and the variation law was highly met with the actual measured results of the pressure drop method. The reliability of the 3D model was verified. With the analysis on the gas flow state around the borehole and the function mechanism of the gas superposition effect, the paper had a simulation study on the gas drainage effect under different space between the boreholes. The rational space between the boreholes for gas drainage along the seam was  $2r \leq L \leq R$ . In the actual gas drainage operation, according to the mining and excavation schedule of mine, the rational space between boreholes could be set up and the mine safety production would be ensured while the drainage cost was reduced.

**Key words:** gas drainage; space between boreholes; gas drainage effective radius; gas drainage influence radius

## 0 引 言

煤炭资源作为我国的重要基础能源, 对我国经济发展尤为重要。近年来, 随着煤矿开采强度不断

加大, 煤与瓦斯突出等瓦斯动力灾害严重影响着我国煤矿企业的安全生产。本煤层钻孔抽采瓦斯是治理瓦斯事故的主要技术手段, 能够快速降低、消除瓦斯突出危险性。顺层瓦斯抽采合理的布孔间距是瓦

收稿日期: 2016-03-22; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.08.021

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2014M552003); 河南省生物遗迹与成矿过程重点实验室基金资助项目(OTMP1410); 2015年度河南省高等学校重点科研资助项目(15A440001); 河南理工大学博士基金资助项目(B2015-05)

作者简介: 李 波(1985—), 男, 河南周口人, 讲师, 博士。Tel: 13839117169 E-mail: anquanlibo@163.com

引用格式: 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, 155.

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, 155.

斯抽采工作的一项重要参数,若布孔间距过大,在抽采钻孔之间会形成抽采盲区;若布孔间距过小,会导致施工大量钻孔,增加抽采工作成本负担。因此,瓦斯抽采设计应以抽采半径为依据<sup>[1-3]</sup>。

目前,关于测定抽采半径的方法可分为现场实测法和数值模拟法。现场实测法主要有压降法、流量法和 $\text{SF}_6$ 气体示踪法。压降法和流量法是通过监测检测孔内瓦斯压力和流量的变化确定钻孔的抽采有效半径,此方法施工量较大,且施工过程中存在人为操作失误,测定结果存在较大误差; $\text{SF}_6$ 气体示踪法是利用 $\text{SF}_6$ 检测仪监测不同抽采时间下能够检测出 $\text{SF}_6$ 气体的最远距离,通过数据分析和数据处理得出在一定条件下抽采时间对抽采有效影响半径的关系<sup>[4-7]</sup>。数值模拟法以钻孔周围瓦斯流动理论为基础,利用计算机模拟软件对其编程开发进行数值计算,能够更加直接反映瓦斯抽采效果,以往大量的研究是将瓦斯流动场简化为二维平面模型,通过数值计算近似地分析钻孔周围瓦斯含量及瓦斯压力等参数变化,无法模拟真实煤岩体开挖后应力分布及三维空间下瓦斯流动形态<sup>[8-15]</sup>;在实际瓦斯抽采工作中,相邻钻孔之间会产生一定的抽采叠加效应,不同布孔间距下叠加效应的强弱直接影响着瓦斯抽采的效果。对于叠加效应的作用机理、如何确定合理的布孔间距的问题目前却鲜有研究<sup>[16-18]</sup>。笔者在前人研究的基础上,以某矿为例,利用 Comsol Multiphysics 多物理场软件建立能够更加真实地反应煤岩体开挖状态的三维抽采钻孔模型,模拟研究三维空间下煤层内瓦斯压力、抽采半径的变化规律,分析不同的布孔间距对瓦斯抽采效果的影响,确定合理的布孔间距,为瓦斯抽采工作提供了可靠的技术指导。

## 1 现场试验

确定顺层瓦斯抽采合理布孔间距应以钻孔抽采半径为依据,笔者以某矿为研究背景,采用压降法对该矿钻孔抽采半径进行现场测定。

### 1.1 试验区概况

试验区选定为井下未进行过瓦斯抽采、新暴露煤层的 21007 掘进工作面,煤层瓦斯压力 0.6~1.1 MPa;试验区为煤巷掘进巷道,主采二<sub>1</sub>煤层,煤层平均厚度为 6.1 m,煤层倾角 8°~13°,巷道坡度 0°~-10°,地质构造简单,整体呈单斜构造,局部煤底板有起伏现象;北部为未开采的 21003 工作面原煤区,南

部为已经回采结束的 21005 工作面,相邻东部为 21采区后期煤柱;试验区平面布置如图 1 所示。

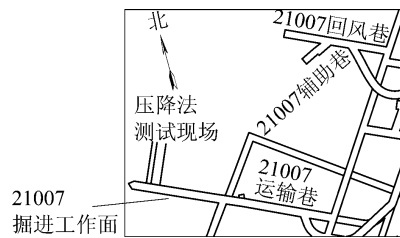


图1 试验区平面示意

Fig. 1 Test area plan

### 1.2 压降法测定原理

压降法测定原理是根据钻孔预抽煤层瓦斯时,在煤层内瓦斯压力和钻孔抽采负压的共同影响下,钻孔周围煤层内瓦斯不断流入抽采钻孔,导致煤层瓦斯压力降低,形成以钻孔为中心的类似于圆形的抽采影响区域,抽采影响区域半径称为钻孔抽采影响半径;在规定时间内,煤层残余瓦斯压力降低至抽采指标范围内最远位置处距钻孔中心的距离称为钻孔抽采有效半径。随抽采时间的增加,钻孔抽采影响半径、钻孔抽采有效半径会逐渐扩大,直到煤层内瓦斯压力与钻孔抽采负压之差不足以克服深部煤层内瓦斯运移到钻孔的阻力时为止。

按照《防治煤与瓦斯突出规定》《煤矿安全规程》等相关规定,以及国内判定钻孔抽采半径的通用指标<sup>[19-22]</sup>:确定钻孔抽采有效半径和抽采影响半径的依据为煤层瓦斯抽采率分别达到 30% 和 10%;根据周世宁提出的煤层瓦斯压力与瓦斯含量之间存在抛物线型关系<sup>[23]</sup>,可知其对应煤层瓦斯压力分别下降 51% 和 19%。

### 1.3 钻孔抽采有效半径测定

根据压降法原理,在试验区 21007 掘进工作面附近选一煤层稳定、无地质构造区域作为试验地点,垂直于煤壁方向分别施工 2 个测压孔(1、2 号),两测压孔间距 1.5 m,采用主动测压方式进行瓦斯压力测定,经过 15 d 的测试,待 1、2 号测压孔所测瓦斯压力最终稳定在 0.95 MPa 和 1.1 MPa 后,在两测压孔之间预留位置处施工 3 号抽采孔,3 号抽采孔距 1、2 号测压孔间距分别为 0.5、1.0 m,待将 3 号抽采孔施工完毕后接入抽采系统,进行瓦斯抽采,抽采负压为 13 kPa;3 个钻孔沿同一水平布置,孔径为 94 mm,如图 2 所示。测试期间记录 2 号测压孔和 3 号测压孔的瓦斯压力变化示数。

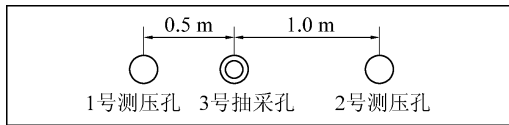


图 2 钻孔布置

Fig. 2 Arrangement of drillings

图 3 为测试期间 1 号和 2 号测压孔瓦斯压力变化曲线; 由图 3 可以看出, 3 号抽采孔的抽采负压为 13 kPa, 抽采 90 天的情况下, 2 个测压孔检测的瓦斯压力均呈现不断下降趋势, 1 号测压孔由初始时刻瓦斯压力 0.95 MPa 下降至 0.31 MPa, 当抽采工作分别进行至 9 天和 34 天时, 1 号测压孔瓦斯压力分别为 0.77、0.46 MPa, 相对于初始时刻瓦斯压力分别下降了 19%、51%; 2 号测压孔由初始时刻瓦斯压力 1.10 MPa 下降至 0.51 MPa, 当抽采工作分别进行至 15 天和 85 天时, 2 号测压孔瓦斯压力分别为 0.89、0.53 MPa, 相对于初始时刻瓦斯压力分别下降了 19%、51%; 因此在目前抽采条件下可定性判断: 当抽采时间分别进行至 34 天和 85 天时, 钻孔抽采有效半径分别达到 0.5、1.0 m; 当抽采时间分别进行至 9 天和 15 天时, 钻孔抽采影响半径分别为 0.5、1.0 m。

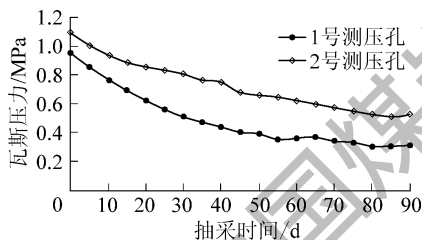


图 3 瓦斯压力变化曲线

Fig. 3 Curves of gas pressure change

## 2 钻孔瓦斯抽采三维数值模拟

笔者利用 Comsol Multiphysics 多物理场耦合分析软件, 在软件系统型偏微分方程和固体力学的基础上, 对其修改并进行二次开发, 以实际自定义控制过程, 采用有限元方法进行高速求解, 模拟研究三维空间下钻孔抽采半径的变化规律以及不同布孔间距下的瓦斯抽采效果。

### 2.1 三维模型的建立

以掘进工作面煤层赋存条件为基础, 建立三维抽采钻孔模型; 模拟煤层几何边界为: 100 m×60 m×6.1 m (长×宽×高), 煤层上部加载 10 m 厚上覆岩层, 下部为 5 m 厚底板, 煤层中开掘中宽、中高均为 4 m 的半圆拱形巷道, 由巷道内向煤层中布置抽采

钻孔, 孔径 94 mm, 孔深 70 m, 抽采负压 13 kPa, 模型共划分 559 064 个单元, 如图 4 所示。

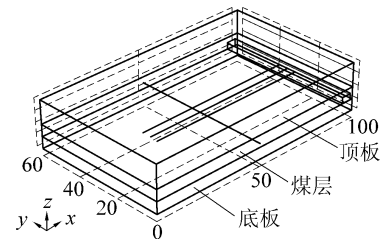


图 4 三维模型示意

Fig. 4 Map of 3D model

### 2.2 模型计算条件及方案

1) 初始及边界条件: 煤层初始瓦斯压力为 1.1 MPa, 模型煤层顶部自由, 加载 9 MPa 岩层重力, 底部为固定约束, 四周设为辊支承, 模型内部加载自重载荷。

2) 模拟主要计算参数如下:

初始瓦斯压力 $p_0$ / MPa	1.1
含瓦斯煤岩初始孔隙率 $\varphi_0$	0.035 5
含瓦斯煤岩初始渗透率 $k_0$ / $\text{m}^2$	$3.67 \times 10^{-17}$
吸附常数 $a$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	32.35
吸附常数 $b$ / $\text{MPa}^{-1}$	2.51
含瓦斯煤岩的灰分 $A$	0.046 75
含瓦斯煤岩的水分 $M$	0.002 19
含瓦斯煤岩视密度 $\rho$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$1.42 \times 10^3$
含瓦斯煤岩弹性模量 $E$ / MPa	$2.0 \times 10^9$
含瓦斯煤岩泊松比 $\nu$	0.31

3) 计算方案: 模拟研究钻孔不同抽采时间下的煤层瓦斯压力、钻孔抽采有效半径的变化规律, 以及不同布孔间距下的抽采效果。

## 3 单孔数值模拟结果分析

### 3.1 瓦斯压力变化规律

图 5 为钻孔周围瓦斯压力分布曲线, 从图中可以看出, 随抽采时间增加, 钻孔周围煤层瓦斯压力不断降低, 瓦斯下降率也逐渐减小; 同一时刻下, 由钻孔中心至煤层边界, 瓦斯压力下降率逐渐减小, 瓦斯压力恢复至初始状态; 这是由于钻孔的施工破坏了原始煤层的应力状态, 钻孔周围形成一定范围的卸压区域, 此范围内煤层透气性系数增大, 在抽采初期阶段高瓦斯压力梯度下, 该范围内煤层瓦斯压力下降速率较快; 随着时间的推移, 煤层瓦斯含量减少、瓦斯压力降低、煤体所受有效应力增大, 导致煤体内

孔隙、裂隙被压缩,渗透率降低,抽采难度加大,经过一段时间抽采后,瓦斯抽采效果趋于稳定。

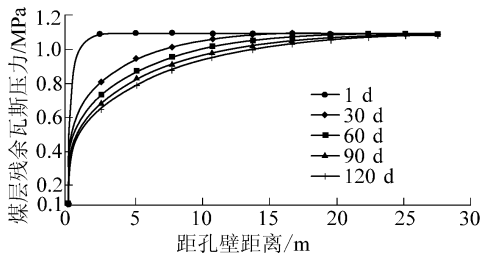


图5 瓦斯压力分布曲线

Fig. 5 Curves of gas pressure distribution

### 3.2 抽采半径变化规律

经模拟计算,不同抽采时间下钻孔抽采有效半径、抽采影响半径变化结果如图6、图7所示;可以看出,在抽采初期的0~60天内,钻孔抽采有效半径、抽采影响半径扩大较为显著,随着时间的推移,两者虽持续增大,但增长速率减小,经过一定时间后趋于定值;图6表明:在抽采时间为34、86天时钻孔抽采有效半径分别达到0.5、1.0 m,抽采120天时钻孔抽采有效半径基本稳定至1.19 m;图7表明:在抽采时间为8、15天时钻孔抽采影响半径分别达到0.5、1.0 m,抽采120天时钻孔抽采影响半径基本稳定在5.43 m。

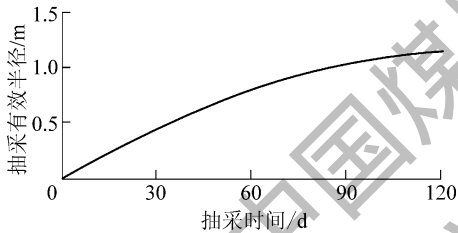


图6 抽采有效半径变化曲线

Fig. 6 Curve of gas drainage effective radius change

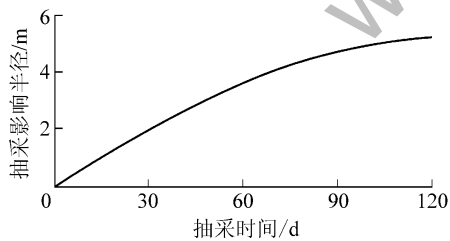


图7 抽采影响半径变化曲线

Fig. 7 Curve of gas drainage influence radius change

将降压法现场实测结果与模拟结果进行对比,见表1;可知两者高度吻合,由于本文三维模型是基于煤层各向同性的假设条件建立的,考虑到实际煤层的各向异性及地质构造复杂性,个别实测结果与

模拟结果略有差异,符合现场实际情况,从而验证了笔者建立三维模型的准确性及可靠性,能够反映钻孔周围煤层内瓦斯运移情况。

表1 不同抽采时间下实测结果与模拟结果对比

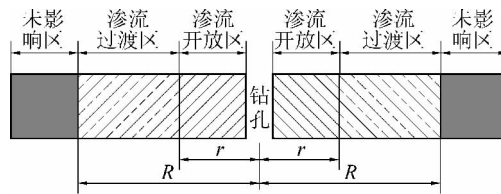
Table 1 Comparison between measured results and simulation results under different drainage time

抽采有效半径/m	实测时间/d	模拟时间/d
0.5	34	34
1.0	85	86
0.5	9	8
1.0	15	15

## 4 顺层瓦斯抽采合理布孔间距

### 4.1 抽采叠加效应作用机理

在大量顺层瓦斯抽采实测考察中发现,相邻钻孔之间会发生抽采叠加效应,相对于单个抽采钻孔而言,相邻钻孔之间瓦斯压力下降更为显著。通过对单孔的模拟结果可知:在钻孔抽采有效半径范围内,由于受到钻孔卸压的影响,煤体已发生破坏变形,大量孔隙、裂隙连通,宏观裂隙、煤体渗透性大幅提高,可认为该范围内煤层瓦斯以线性渗流形式流向抽采钻孔,形成渗流开放区;在钻孔抽采有效半径以外至有效影响半径以内,煤体受钻孔影响较小,新生孔隙、裂隙发育不充分,可认为瓦斯以低速非线性渗流为主,形成渗流过渡区;在钻孔抽采影响半径范围以外,煤体基本上未受到钻孔影响,煤体仍处于原岩应力状态;因此,以钻孔为中心随着距孔壁距离的增加可依次分为:渗流开放区、渗流过渡区和未影响区,如图8所示。



$r$ —抽采有效半径;  $R$ —抽采影响半径

图8 钻孔周围瓦斯流态分布

Fig. 8 Gas flow distribution around the drilling

在顺层瓦斯抽采工作中,确定合理的钻孔间距 $L$ ,既要避免钻孔间距过大形成抽采盲区,也要避免钻孔间距过小导致增加抽采成本。根据钻孔周围瓦斯流态的分析,在渗流开放区内煤层瓦斯压力下降速率较为显著,是影响瓦斯压力降低的主要影响区

域; 相比之下渗流过渡区瓦斯压力下降速率较为缓慢, 是影响瓦斯压力降低的次要影响区域; 因此, 在顺层瓦斯抽采设计中, 要以钻孔周围不同区域煤体渗透变化特性为依据, 防止渗流开放区高渗透性之间的交叉重复影响, 同时应考虑将渗流过渡区进行叠加, 加快瓦斯压力的降低。

基于以上分析, 在确定钻孔抽采有效半径  $r$ 、抽采影响半径  $R$  的前提下, 根据布孔间距的不同, 抽采叠加效应可分 3 种情况: ① 1 个渗流开放区与 2 个渗流过渡区的叠加: 布孔间距为  $2r \leq L < R$ ; ② 1 个渗流开放区与 1 个渗流过渡区的叠加: 布孔间距为  $R \leq L < R+r$ ; ③ 2 个渗流过渡区之间的叠加: 布孔间距为  $R+r \leq L < 2R$ , 如图 9 所示。

#### 4.2 不同布孔间距下瓦斯抽采效果研究

根据上述布孔方式, 模拟研究不同布孔间距下的瓦斯抽采效果, 以单孔抽采 120 天时的模拟结果

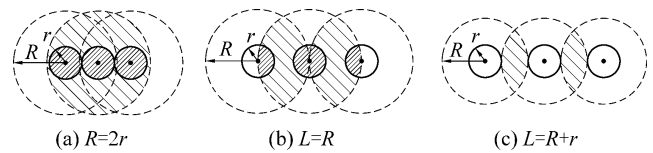


图 9 布孔间距示意

Fig. 9 Diagram of the space between drillings

(抽采有效半径  $r = 1.19$  m, 抽采影响半径  $R = 5.43$  m) 为依据, 按照图 9 中 3 种不同布孔间距(间距分别为 2.38、5.43、6.62 m)进行数值模拟, 对比分析不同布孔间距下顺层钻孔瓦斯抽采效果。

图 10 为不同布孔间距下的瓦斯压力分布曲线。从图 10 可以看出: 在同一布孔间距下, 随着抽采时间增加, 钻孔周围瓦斯压力将持续降低, 抽采初期相邻钻孔之间煤层瓦斯压力下降迅速, 随抽采时间推移, 相邻钻孔间瓦斯压力降低速率逐渐减小, 瓦斯压力下降缓慢, 最终瓦斯抽采效果趋于稳定; 对比同一

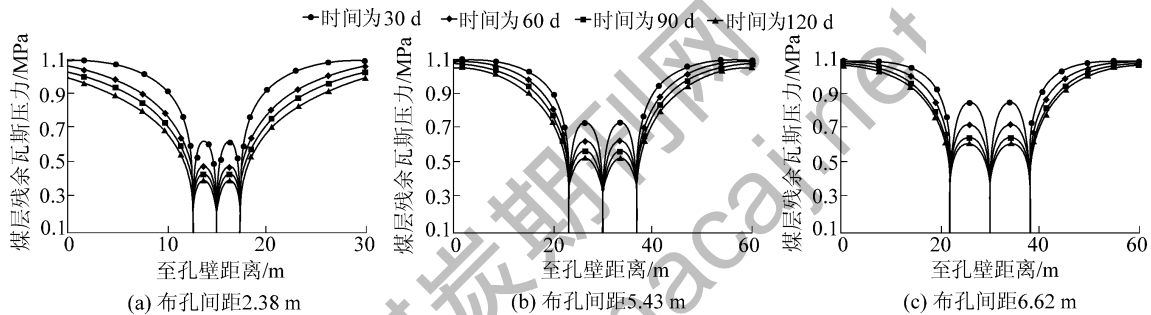


图 10 不同布孔间距下的瓦斯压力分布曲线

Fig. 10 Curves of gas pressure distribution with different drilling space

时刻、不同布孔间距的瓦斯抽采效果可以看出, 钻孔间距越小, 相邻钻孔中心位置处瓦斯压力越低、瓦斯压力下降速率越大, 抽采叠加效应越为显著, 说明抽采叠加效应的强度与布孔间距成反比。

图 11 为相邻两钻孔中心位置处瓦斯压力随抽采时间的变化曲线。根据模型计算结果, 在布孔间距分别为 2.38、5.43、6.62 m 抽采 120 天的情况下, 相邻钻孔中心位置处瓦斯压力分别为 0.39、0.52、0.61 MPa, 对应瓦斯抽采量分别 40.46%、31.24%、25.53%; 由此看出, 在布孔间距为  $L=2r$  和  $L=R$  时, 瓦斯抽采率大于 30%, 达到抽采指标, 而布孔间距为  $L=R+r$  未能达到抽采指标; 其结果说明相邻钻孔之间 2 个渗流开放区的叠加可更大程度上提高瓦斯抽采效率, 一个渗流开放区与一个渗流过渡区的叠加几乎等同于单个钻孔渗流开放区的抽采效果, 而 2 个渗流过渡区之间叠加未能提高抽采

效率。

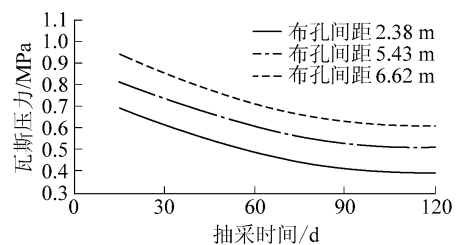


图 11 瓦斯压力变化曲线

Fig. 11 Curves of gas pressure change

通过三维空间下对瓦斯抽采的数值模拟研究, 在确定单个钻孔抽采有效半径  $r$ 、抽采影响半径  $R$  的前提下, 煤矿顺层瓦斯抽采钻孔之间合理的布孔间距为

$$2r \leq L \leq R$$

从安全角度出发, 在瓦斯抽采的实际工作中, 可按照矿井采掘计划, 选择适当的布孔间距和抽采时间进行瓦斯抽采; 从经济角度出发, 在不受采掘接替

影响时,可适当增大钻孔间距,延长抽采时间,有效地抽采煤层瓦斯、消除煤层突出危险性,同时最大程度上降低了抽采成本,确保了矿井安全、经济生产,对今后瓦斯抽采工作具有科学的指导意义。

## 5 结 论

1) 以实际煤层赋存参数为背景,利用 Comsol Multiphysics 多物理场耦合分析软件,对其进行二次开发实现自定义控制过程,在三维空间下对模型内煤岩体进行开挖处理,建立顺层瓦斯抽采三维模型,并通过压降法进行现场实测,验证了模型的可靠性。

2) 根据对单孔的模拟结果,得到了钻孔周围瓦斯流态的变化规律、分析了抽采叠加效应作用机理,在确定单孔抽采有效半径  $r$ 、抽采影响半径  $R$  的情况下,得到顺层瓦斯抽采合理的布孔间距:  $2r \leq L \leq R$ 。

3) 根据本文研究结果,在实际瓦斯抽采工作中可根据矿井实际采掘计划,在合理布孔间距  $2r \leq L \leq R$  范围内,确定布孔参数与抽采时间;在降低抽采成本的同时也确保了矿井的安全生产。

## 参考文献(References):

- [1] 杜泽生,罗海珠.煤矿瓦斯有效抽放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.
- [2] 于不凡.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,2000:237-242.
- [3] 李建云.煤层瓦斯预抽方案优化设计[J].煤炭科学技术,2011,39(6):46-48.  
Li Jianyun. Optimized design of seam gas pre-drainage plan [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6): 46-48.
- [4] 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 exits problems [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(12): 55-58.
- [5] 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):576-600.  
Yu Tao, Lu Ping, Sun Jinhua, et al. Drainage radius measurement based on gas flow field [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 576-600.
- [6] 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, et al. The determination method of coal gas drainage radius based on methane flow state [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 501-504.
- [7] 郑雷.SF<sub>6</sub>气体示踪法测定低透气性高瓦斯煤层瓦斯抽放半径[J].煤田地质与勘探,2015,43(3):122-124.  
Zheng Lei. Determination of the gas drainage radius of low permeability and high gas coal seam by SF<sub>6</sub> gas tracer [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(3): 122-124.
- [8] 王宏图,江记记,王再清,等.本煤层单一顺层瓦斯抽采钻孔的渗流场数值模拟[J].重庆大学学报,2011,32(4):24-29.  
Wang Hongtu, Jiang Jiji, Wang Zaiqing, et al. Numerical simulation of seepage field of gas extraction drilling of single bedding of mining-coal bed [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 32(4): 24-29.
- [9] 胡国忠,许家林,王宏图,等.低渗透煤与瓦斯的固-气动态耦合模型及数值模拟[J].中国矿业大学学报,2011,40(1):1-6.  
Hu Guozhong, Xu Jialin, Wang Hongtu, et al. Research on a dynamically coupled deformation and gas flow model applied to low permeability coal [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(1): 1-6.
- [10] 司 鹄,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] 秦玉金,罗海珠,姜文忠,等.非等温吸附变形条件下瓦斯运移多场耦合模型研究[J].煤炭学报,2011,36(3):412-416.  
Qin Yujin, Luo Haizhu, Jiang Wenzhong, et al. The research of gas migration multi-physics coupling model under the non-isothermal adsorption distortion [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 412-416.
- [12] 汪有刚,刘建军,杨景贺,等.煤层瓦斯流固耦合渗流的数值模拟[J].煤炭学报,2001,26(3):285-289.  
Wang Yougang, Liu Jianjun, Yang Jinghe, et al. Simulation of fluid solid coupling flow of coal-bed methane [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 285-289.
- [13] Zhang Chunhui, Zhao Quansheng, Yu Yongjiang. Model of coupled gas flow and deformation process in heterogeneous coal seams and its application [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2011, 17(1): 76-80.
- [14] Sun Peide, Guo Maoxin. A new numerical approach of coupled modeling for solid deformation and gas leak flow in multi-coal-seams [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2005, 11(1): 36-39.
- [15] 张学博,姬忠超,高建良.顺层钻孔有效抽放半径影响因素的数值分析[J].安全与环境学报,2013,13(2):157-160.  
Zhang Xuebo, Ji Zhongchao, Gao Jianliang. Numerical simulation for the influential factors of the effective drainage radius of boring hole [J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(2): 157-160.
- [16] 卢平,李平,周德永,等.石门揭煤防突抽放瓦斯钻孔合理布置参数的研究[J].煤炭学报,2002,27(3):244-248.

(下转第155页)

- Cao Jianming. Review of international evolvement on spray investigation [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 82-86.
- [17] 马素平, 寇子明. 喷雾降尘机理的研究 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 297-300.
- Ma Suping, Kou Ziming. Study on mechanism of reducing dust by spray [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 297-300.
- [18] 时训先, 蒋仲安, 周姝嫣, 等. 综采工作面粉尘分布规律的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1117-1121.
- Shi Xunxian, Jiang Zhongan, Zhou Shuyan, et al. Experimental study on dust distribution regularity of fully mechanized mining face [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1117-1121.
- [19] 周 刚, 程为民, 王 刚, 等. 综放工作面粉尘场与雾滴场耦合关系的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1660-1662.
- Zhou Gang, Cheng Weimin, Wang Gang, et al. Experiment research of the coupling relationship between dust field and drop-let field about fully mechanized and roof caving workface [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1660-1662.
- [20] 黄 俊. 水射流除尘技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993: 114-131.
- [21] 吴应豪. 巷道粉尘沉降规律与转载点喷雾降尘系统研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007: 10-12.
- [22] 王晓倩, 张德生, 赵继云, 等. 雾化喷嘴及其设计浅析 [J]. 煤矿机械, 2008, 29(3): 14-16.
- Wang Xiaoqian, Zhang Desheng, Zhao Jiyun, et al. Analysis on spraying nozzle and design [J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(3): 14-16.
- [23] 程卫民, 周 刚, 左前明, 等. 喷嘴喷雾压力与雾化粒度关系的实验研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1309-1312.
- Cheng Weimin, Zhou Gang, Zuo Qianming, et al. Experimental research on relationship between nozzle spray pressure and atomization particle [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1309-1312.
- [24] 马素平, 寇子明. 喷雾降尘效率及喷雾参数匹配研究 [J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(5): 84-88.
- Ma Suping, Kou Ziming. Study on efficiency of dust suppression by mist spray and its matched parameters [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(5): 84-88.
- (上接第 126 页)
- Lu Ping, Li Ping, Zhou Deyong, et al. Study on proper layout parameters of the gas drainage drills of outburst prevention in rock cross-cut coal uncovering [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 244-248.
- [17] 梁 冰, 袁欣鹏, 孙维吉. 本煤层顺层瓦斯抽采渗流耦合模型及应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 208-213.
- Liang Bing, Yuan Xinpeng, Sun Weiji. Seepage coupling model of in-seam gas extraction and its applications [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 208-213.
- [18] 黄 兴, 胡国忠, 李子玉, 等. 底板岩巷穿层瓦斯抽采钻孔的优化布置 [J]. 中国科技论文, 2015, 10(3): 275-279.
- Huang Xing, Hu Guozhong, Li Ziyu, et al. Optimization design of the cross-measure boreholes for gas pre-extraction in floor rock road way [J]. China Science Paper, 2015, 10(3): 275-279.
- [19] 季淮君, 李增华, 杨永良, 等. 基于瓦斯流场的抽采半径确定方法 [J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 917-921.
- Ji Huaijun, Li Zenghua, Yang Yongliang, et al. Drainage radius measurement based on gas flow field [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 917-921.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 郝天轩, 宋 超. 数值模拟结合 SF<sub>6</sub> 示踪法确定煤层钻孔瓦斯抽采有效半径 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(1): 22-27.
- Hao Tianxuan, Song Chao. Determining gas extraction effective radius of bore-hole in coal seam by numerical simulation and SF<sub>6</sub> gas tracer method [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(1): 22-27.
- [23] 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, 1998.