

# 基于千米定向钻孔瓦斯抽采影响半径的测定技术研究

张德森

国家能源集团乌海能源有限责任公司老石旦煤矿，内蒙古 乌海

收稿日期：2022年6月19日；录用日期：2022年7月21日；发布日期：2022年7月28日

---

## 摘要

千米定向钻孔瓦斯抽采影响半径测定工作长期以来一直是困扰着瓦斯抽采的重大难题，本论文根据瓦斯抽采工程的现场实际情况以神华乌海能源有限责任公司五虎山煤矿903综采工作面千米定向钻孔瓦斯抽采影响半径的测定为背景，提出了将相对瓦斯压力测定法与数值分析中的插值思想有机结合的二分法测定千米定向钻孔瓦斯抽采影响半径，现场运用二分法测定了千米定向水平长钻孔抽采半径为6.25 m，在该抽采半径条件下布置瓦斯抽采钻孔，矿井瓦斯抽采率提高了24%。

## 关键词

千米定向钻孔，瓦斯抽采影响半径，二分法

---

# Research on Measuring Radius of Influenced Gas Extraction Based on Kilometer Directional Drilling

Desen Zhang

Laoshidan Coal Mine, National Energy Group Wuhai Energy Co., Ltd., Wuhai Inner Mongolia

Received: Jun. 19<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Jul. 28<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

The determination of the influence radius of gas drainage by kilometer directional drilling has been a major problem in gas drainage for a long time. According to the actual situation of the gas drainage project, this paper uses the Wuhushan Coal Mine of Shenhua Wuhai Energy Co., Ltd. Based

on the determination of the influence radius of gas drainage in 903 fully mechanized mining face, a dichotomy method, which combines the relative gas pressure measurement method and the interpolation idea in numerical analysis, is proposed to measure the influence of gas drainage in 1000-meter directional drilling. The dichotomy method was used to determine the drainage radius of the 1000-meter directional horizontal long borehole to be 6.25 m. Under the condition of this drainage radius, the gas drainage hole was arranged, and the gas drainage rate of the mine was increased by 24%.

## Keywords

Kilometer Directional Drilling, Gas Drainage Influence Radius, Dichotomy

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

瓦斯事故是煤矿的第一杀手，目前煤矿安全生产的重大技术难题和研究方向是怎样实现瓦斯灾害的有效治理，遏制重大瓦斯灾害事故的发生[1]。在煤矿瓦斯治理过程中人们通常将瓦斯抽采作为解决煤矿瓦斯突出和瓦斯爆炸的行之有效的技术手段而广泛地加以应用[2]。国内外大量研究表明，瓦斯涌出非常有效的有效手段是增大孔壁的暴露面积即增加瓦斯抽采钻孔的孔深，其不但在降低瓦斯抽采费用上非常明显，而且在瓦斯抽采率和抽采量的提高方面作用也非常显著[3]。千米定向钻孔瓦斯抽采技术是伴随着我国煤矿井下广泛推广使用了千米定向钻机技术发展起来的，为高突矿井的瓦斯抽采技术带来了革命性变革[4]。但是在工程实践中对千米定向长钻孔的瓦斯抽采影响半径缺失系统研究，瓦斯抽采钻孔的间距布置较为盲目，严重影响了瓦斯抽采率。

传统的瓦斯抽采影响半径测定方法通常采用相对瓦斯压力测定法、示踪气体法。相对瓦斯压力测定法最早是由中国矿业大学林柏泉教授提出的[5]；SF<sub>6</sub>示踪气体测试法最早是由煤炭科学研究总院马丕梁教授提出的[6]，这些方法在工程实践中的广泛应用有力地促进了瓦斯钻孔的抽采半径测定技术的发展。但是在工程实践中也暴露出一些问题，例如相对瓦斯压力测定法施工的特点是先施工完钻孔后立即用马丽散封孔，其次才开启阀门抽采，最后长期观测钻孔内瓦斯压力、瓦斯浓度等参数的变化趋势。由于煤体的完整性在施工钻孔时遭到了破坏，从而使相邻钻孔之间煤层透气性增加了许多，这就会使测试的结果与实际情况之间存在一定的偏差；而 SF<sub>6</sub> 示踪气体测试法虽然能够进行瓦斯抽采半径的测试，但是只能定性描述瓦斯抽采半径的大概范围，而无法定量描述，因此在现场运用时也存在一定的局限性。

本论文有针对性地采用二分法进行千米定向钻孔瓦斯抽采影响半径的现场实测，为瓦斯治理提供了技术支持。

## 2. 工作面概况

五虎山煤矿 2017 年绝对瓦斯涌出量为 92.91 m<sup>3</sup>/min，矿井相对瓦斯涌出量为 40.51 m<sup>3</sup>/t；采煤工作面最大绝对瓦斯涌出量为 13.23 m<sup>3</sup>/min；掘进面最大绝对瓦斯涌出量 4.28 m<sup>3</sup>/min，鉴定为高瓦斯矿井。

五虎山煤矿 903 工作面南部为 9<sup>#</sup>回风上山，该工作面以北方向是矿区边界的煤柱，该工作面以西方

向是露天正断层,工作面倾斜长度 185 m,走向长度 1100 m,工作面采高 3.2 m,工作面埋藏深度 200 m,煤层倾角 7°,采煤工作面面积: 203,500 m<sup>2</sup>。采用了走向长壁式采煤法,综合机械化开采工艺,一次采全高,全部垮落法控制顶板。903 综采工作面煤层瓦斯含量为 29.7 m<sup>3</sup>/t,工作面的绝对瓦斯涌出量为 53.4 m<sup>3</sup>/min,相对瓦斯涌出量为 21.9 m<sup>3</sup>/t,属于高瓦斯矿井超长采煤工作面回采范畴。采用了以千米定向长钻孔进行区域性预先抽采为主,顶板高位水平钻孔为辅的综合抽采技术,收到了良好的抽采效果,但是在工程实践中也暴露出一些问题。主要是以往采用千米定向长钻孔进行区域性预先抽采没有认真地考察研究过千米定向长钻孔的抽采半径,主要是依靠经验为主致使煤层中存在许多瓦斯抽采盲区,严重地制约了工作面安全高效地回采,本论文正是基于这种工程实践中面临的现实技术难题展开了技术研究,收到了良好的抽采效果,具有重大的理论和现实意义。

### 3. 利用二分法测试千米定向钻孔的瓦斯抽采影响半径技术研究

#### 3.1. 插值法概述

在已知的函数表中,插入一些表中没有列出的、所需要的中间值的方法叫做插值法。若函数  $f(x)$  在自变量  $x$  一些离散值所对应的函数值为已知,则可以作一个适当的特定函数  $p(x)$ ,使得  $p(x)$  在这些离散值所取的函数值,就是  $f(x)$  的已知值。插值法在天文学、数学中得到了广泛的应用[7]。常用的插值方法分述如下:

##### 1) Newton 插值

$n$  次多项式插值通常称为 Newton 插值法,它是一种构造插值多项式的方法,具有易于变动节点和承袭性的特点是它与 Lagrange 插值法最本质的区别。首先把待求的  $n$  次插值多项式  $P_n(x)$  改写为具有承袭性的形式,然后利用插值条件确定  $P_n(x)$  的待定系数,以求出所要的插值函数是其基本思想所在[8]。

##### 2) Lagrange 插值

运用构造插值基函数的方法解决求  $n$  次多项式插值函数的方法叫做 Lagrange 插值法。首先把待求的  $n$  次多项式插值函数  $P_n(x)$  改写成另一种表示方式,再利用插值条件确定其中的待定函数,从而求出插值多项式是其基本思想的体现[9]。

##### 3) 分段插值

$a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ : 取  $[a, b]$  上  $n+1$  个节点并给定在这些节点上的函数值  $f(x_R) = y_R$ ;  $R = 0, 1, \dots, n$ , 这就是分段多项式插值的定义[10]。

如果函数  $\Phi(x)$  满足条件:

1)  $\Phi(x)$  在  $[a, b]$  上连续

2)  $\Phi(x_R) = y_R, R = 0, 1, \dots, n$

3)  $\Phi(x)$  在每个小区间  $[x_R, x_{R+1}]$  是  $m$  次多项式,

$R = 0, 1, \dots, n-1$  则称  $\Phi(x)$  为  $f(x)$  在  $[a, b]$  上的分段  $m$  次插值多项式

实用中,常用次数不超过 5 的底次分段插值多项式,首先把被插值函数  $f(x)$  的插值节点由小到大排序,然后每对相邻两个节点为端点的区间上用  $m$  次多项式去近似  $f(x)$  是其基本思想所在[11]。

##### 4) Hermite 插值

运用未知函数  $f(x)$  在插值节点上的函数值及导数值来构造插值多项式的方法称为 Hermite 插值法,具体描述为:给定  $n+1$  个互异的节点  $x_0, x_1, \dots, x_n$  上的函数值和导数值求一个  $2n+1$  次多项式  $H_{2n+1}(x)$  满足插值条件,如式 1 和 2 所示:

$$H_{2n+1}(x_k) = y_k \quad (1)$$

$$H'_{2n+1}(x_k) = y'_k; \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

如上求出的  $H_{2n+1}(x)$  称为  $2n+1$  次 Hermite 插值函数, 利用 Lagrange 插值函数的构造方法, 先设定函数形式, 再利用插值条件求出插值函数是其基本思想所在[12]。

#### 5) 样条插值

样条插值定义是若函数在区间  $[a, b]$  上给定节点  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$  及其函数值  $y_j$ , 则函数  $S(x)$  满足:

$$S(x_j) = y_j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

在机械设计、道路桥梁、电子信息工程等很多工科领域的优化方法广泛使用了插值法思想[13]。二分法插值思想是利用样条插值法, 但是每次插入的数值是上一级插入数值的二分之一, 即将上一级数值平均进行分, 详细描述见二分法测定千米定向长钻孔抽采半径在现场应用的部分中。

### 3.2. 二分法测定千米定向长钻孔抽采半径新方法具体思路

在这次确定千米定向长钻孔瓦斯抽采半径时将相对瓦斯压力测定法与数值分析中的插值思想有机地结合了起来, 首次提出来二分法思想来现场测定千米定向长钻孔的抽采半径的新方法, 具体思路如下: 煤层瓦斯压力  $P$  和瓦斯含量  $X$  在保证工业应用误差允许前提下, 存在着一个抛物线关系, 如式4所示, 即:

$$X = \alpha\sqrt{P} \quad (4)$$

在公式里面:  $X$ ——煤层气体含量,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;

$a$ ——煤层气体含量系数,  $\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{MPa}^{0.5})$ ;

$p$ ——煤层气体压力,  $\text{MPa}$ 。

《煤矿安全规程》明确规定: 预抽煤层瓦斯后, 必须对预抽瓦斯防治突出效果进行检验, 其检验的指标之一就是煤层瓦斯预抽率大于30%, 这就意味着进行瓦斯抽采后的煤层残余瓦斯含量下降到煤层原始瓦斯含量70%及其以下[14], 经计算, 抽采煤层的残余瓦斯压力为原煤层瓦斯压力的49%, 瓦斯压降为51% [15]。在此先转变思路将抽采钻孔与观测孔平行布置改变为相互垂直布孔方法进行测定千米定向长钻孔瓦斯压力变化, 其次利用二分法插值思想实施观测孔, 每次插入的数值是上一级插入数值的二分之一, 即将上一级数值平均进行分, 逐渐逼近千米定向瓦斯抽采钻孔, 直到观测孔的瓦斯压力下降51%以后并确保一定的合理精度就停止施工, 进而确定千米定向长钻孔的瓦斯抽采影响半径。

### 3.3. 二分法测定千米定向长钻孔抽采半径的现场应用

#### 1) 方法选择

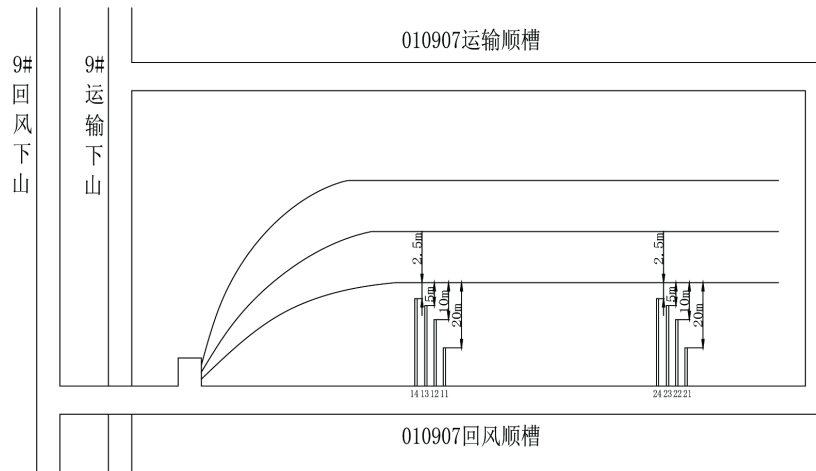
所需材料和物质如下:

- ① ZDY1900L 型全液压坑道钻机一台,  $\Phi 75$  mm 钻杆 65 m,  $\Phi 94$  mm 三翼合金钻头 4 个;
- ② 封孔使用的  $\Phi 50$  mm 钢管 60 m (每个孔封孔长度为 5 m);
- ③ WYY-I 型瓦斯压力测定仪 12 个, U 型压差计 8 个, 乳胶管适量;
- ④ 封孔用的马丽散 1600 kg;
- ⑤  $\Phi 50$  mm 变径三通 12 个, 便携式瓦斯检查仪 2 个;
- ⑥ 煤气表 2 个, 高浓度瓦斯检查仪 1 个, 变径挡板 12 个;
- ⑦ 计时用表 1 块, 记录本 1 个。

#### 2) 二分法的操作步骤

- ① 如图 1 所示, 这次现场测定首先在 903 回风顺槽朝向工作面一侧的煤壁布置两个测点, 在第一

个测点距离 903 切眼 970 m 位置, 第二个测点距离 903 切眼 160 m 的位置, 两个测点所处巷道位置顶板支护良好, 巷道平直、无杂物, 便于摆放钻机。由于这次试验是用二分法接近 1#千米定向长钻孔施工的, 因此现场无法事先知道钻孔的个数和孔深, 通过现场施工观测钻孔和瓦斯压力实测效果, 经过整理后 1#观测点观测孔施工参数如表 1 所示。



**Figure 1.** Schematic diagram of the test method for the gas extraction radius of long boreholes

**图 1.** 长钻孔瓦斯抽采半径试验方法示意图

**Table 1.** 1# observation point observation drilling construction parameter list

**表 1.** 1#观测点的观测钻孔施工参数表

孔号	1#	2#	3#	4#	5#
孔径(mm)	94	94	94	94	94
距 1#抽采孔距离(m)	20	10	5	7.5	6.25
倾角(°)	1	1	1	1	1
方位(°)	132	1321	1321	132	132
封孔长度(m)	5	5	5	5	5
钻孔间距(m)	5	5	5	5	5
孔距底板高度(m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

② 其次, 通过千米长钻孔轨迹运行图测算出 1#千米瓦斯抽采钻孔距离 903 回风顺槽煤壁的间距和距回风顺槽底板的高度。一般情况下人们是根据煤层的地质条件、煤层的透气性系数、地质构造特征和坚固性系数等参数来具体确定观测周期的, 这里确定的观测周期为 20 天, 现场测定的 1#千米瓦斯抽采钻孔的负压为 14.2 KPa、瓦斯浓度为 38.1%, 抽采效果比较理想。由于现场观测数据太多, 为了方便起见在这里只节选出观测孔每个观测周期的时间节点上的瓦斯压力来进行统计, 1#观测点的各个观测孔的瓦斯压力观测数据如表 3 所示。由于二分法和普通的相对瓦斯压力法测定步骤不同, 它是逐孔尝试、逐渐逼近 1#千米长钻孔的, 因此现场采取了逐孔尝试法。首先现场垂直于 1#抽采孔施工 1#观测孔, 然后逐个比较后再依右向左的顺序依次打各个观测孔, 打好孔后立即用钢管和聚氨酯进行封孔并安装上瓦斯压力测定仪进行瓦斯压力观测, 各个观测孔之间间距为 5 m, 且相互平行, 设定的千米定

向长钻孔抽采半径的精度已经事先定好在 0.5 m~1.5 m 之间; 其次设每个观测孔的原始瓦斯压力为

$P_0$ ，每个观测孔在时间节点上实测瓦斯压力为  $P$ 。经现场观测整理后发现逐次施工的各个观测孔的相关瓦斯压力如表 2 所示，由表 2 可知 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>观测孔的  $P_0$  分别为 658 Pa、614 Pa、675 Pa、716 Pa、691 Pa，则各孔  $51\% \cdot P_0$  取值分别为 335.6 Pa、313.1 Pa、344.2 Pa、365.2 Pa、352.4 Pa，各孔的时间节点上观测的  $P$  值分别为 543 Pa、409 Pa、329 Pa、452 Pa、348 Pa，通过比较发现 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>孔的  $P$  值分别大于各自身孔的  $51\% \cdot P_0$  值，而 3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>孔的  $P$  值分别小于各自身孔的  $51\% \cdot P_0$  值，则 1<sup>#</sup>观测点施工步骤如图 2 所示。

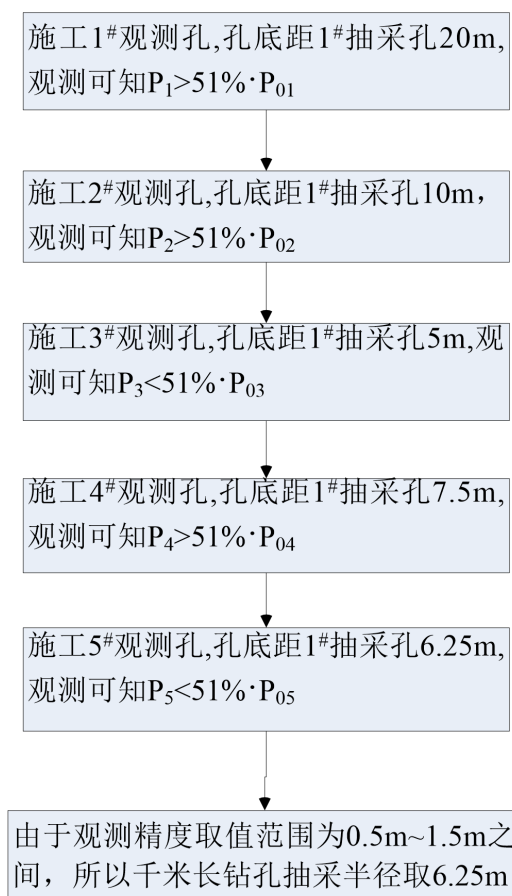


Figure 2. Flow chart of dichotomous determination of long borehole gas extraction radius

图 2. 二分法测定长钻孔瓦斯抽采半径流程图

在此还可以无限期地进行插值细化，但是这在工程上是没有必要的，工程上只要有一个精度范围能够满足工程需要即可，因此这里取精度范围 0.5~1.5 m 之间，通过二分法计算得到走向长钻孔的瓦斯抽采半径为 6.25 m。另外现场在第二个测点同样施工了 5 个观测孔，观测孔施工参数和 1<sup>#</sup>观测点的参数一样，如表 3 所示，按照第一个观测点的方法和步骤观测各个观测孔的压力得出的结论走向长钻孔的瓦斯抽采半径也是 6.25 m，但是各个观测孔的瓦斯压力值与 1<sup>#</sup>观测点的各个观测孔的瓦斯压力值不同。

#### 4. 效果分析

经过对 903 综采工作面千米定向水平长钻孔的瓦斯抽采影响半径测定后我们开始在 903 综采工作面施工千米定向水平长钻孔，收到了良好的瓦斯抽采效果，具体优化分析情况如表 4 所示。

**Table 2.** 1<sup>#</sup> observation point gas pressure observation data**表 2.** 1<sup>#</sup>观测点瓦斯压力观测数据

日期	1 <sup>#</sup> 压力(Pa)	2 <sup>#</sup> 压力(Pa)	3 <sup>#</sup> 压力(Pa)	4 <sup>#</sup> 压力(Pa)	5 <sup>#</sup> 压力(Pa)
2016.06.01	658	/	/	/	/
2016.06.20	543	614	/	/	/
2016.07.10	/	409	675	/	/
2016.07.30	/	/	329	716	/
2016.08.19	/	/	/	452	691
2016.09.08	/	/	/	/	348

注：表中没有观测到的压力值均用/来表示。

**Table 3.** 2<sup>#</sup> observation point gas pressure observation data**表 3.** 2<sup>#</sup>观测点瓦斯压力观测数据

日期	1 <sup>#</sup> 压力(Pa)	2 <sup>#</sup> 压力(Pa)	3 <sup>#</sup> 压力(Pa)	4 <sup>#</sup> 压力(Pa)	5 <sup>#</sup> 压力(Pa)
2016.09.10	813	/	/	/	/
2016.09.30	651	879	/	/	/
2016.10.20	/	604	730	/	/
2016.11.09	/	/	364	856	/
2016.11.29	/	/	/	525	784
2016.12.19	/	/	/	/	375

注：表中没有观测到的压力值均用/来表示。

**Table 4.** Analysis of extraction effect before and after optimization of gas extraction parameters for 903 working face in Wuhushan Mine**表 4.** 五虎山矿 903 工作面瓦斯抽采参数优化前后抽采效果分析表

项目	优化前	优化后
矿井瓦斯抽采率(%)	27	51
瓦斯抽采主管内瓦斯浓度(%)	15~22	39~54
瓦斯抽采钻场抽采管内负压(KPa)	12.7	13.4
月度瓦斯抽采纯量(万 m <sup>3</sup> )	55.2	67.9
回风流平均瓦斯浓度(%)	0.78	0.29
工作面推进度(m/月)	51	76
工作面月平均产量(万 t/月)	5.4	7.9

由表 4 可以看到对五虎山煤矿 903 综采工作面千米定向水平长钻孔的瓦斯抽采影响半径参数的优化后收到了非常好的瓦斯抽采效果，其中矿井的瓦斯抽采率由优化前的 27% 提高到 51%，瓦斯抽采率提高了 24%，瓦斯抽采主管内瓦斯浓度比优化前提高了 24~32 个百分点，瓦斯抽采浓度明显增加，月度瓦斯抽采纯量提高了 12.7 万 m<sup>3</sup>；与此同时 903 采煤面回风顺槽的风流中瓦斯浓度从 0.78% 降到了 0.29%，下降幅度非常明显，903 采煤面月出煤量由原来的 5.4 万吨提高到 7.9 万吨，煤炭产量明显有了大幅度的提高，确保了矿井的安全生产，有非常好的安全效益和经济效益。

## 5. 结论

1) 现场运用二分法现场来测定了千米定向水平长钻孔的抽采半径, 测定结果是走向长钻孔的瓦斯抽采半径为 6.25 m;

2) 在千米定向钻孔瓦斯抽采影响半径的测定技术方面进行了有益的探索和研究, 为千米定向钻孔瓦斯抽采影响半径的参数优化提供科学依据和理论指导, 具有重要的理论和现实意义。

## 基金项目

内蒙古自治区科技创新引导奖励资金项目资助项目(REPORT-52685114930)。

## 参考文献

- [1] 胡千庭, 蒋时才, 苏文叔. 我国煤矿瓦斯灾害防治对策[J]. 矿业安全与环保, 2000, 2(1): 91-92.
- [2] 徐小荷, 余静编著. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 73-74.
- [3] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995: 61-63.
- [4] 张玉贵. 构造煤的动力变质作用及其灾害性[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2007: 67-68.
- [5] 林伯泉. 瓦斯抽采钻孔有效抽采半径的测定[J]. 煤炭工程, 2009(9): 88-90.
- [6] 陈金玉, 马丕梁, 孔一凡, 马超. SF<sub>6</sub>气体示踪法测定钻孔瓦斯抽采有效半径[J]. 煤矿安全, 2008, 39(9): 23-25.
- [7] Mitra, A., Harpalani, S. and Liu, S. (2012) Laboratory Measurement and Modeling of Coal Permeability with Continued Methane Production: Part 1-Laboratory Results. *Fuel*, **94**, 110-116. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.052>
- [8] An, F.H., Cheng, Y.P., Wang, L., et al. (2013) A Numerical Model for Outburst Including the Effect of Adsorbed Gas on Coal Deformation and Mechanical Properties. *Computers and Geotechnics*, **54**, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.07.013>
- [9] 杨更社, 周春华, 田应国. 寒区软岩隧道的水热耦合数值模拟与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1258-1262.
- [10] 付坤霞, 朱煜, 张鸣. 基于非等温条件的空气静压轴承润滑问题研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(1): 117-119.
- [11] 孙培德, 杨东全, 陈亦柏. 多物理场耦合模型及数值模拟导论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [12] William B.J. Zimmerman 主编. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [13] Majewska, Z. and Zietek, J. (2007) Acoustic Emission and Sorptive Deformation Induced in Coals of Various Rank by the Sorption-Desorption of Gas. *Acta Geophysica*, **55**, 324-343. <https://doi.org/10.2478/s11600-007-0022-6>
- [14] 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): 43-44+18.
- [15] 罗新荣, 余其祥. 煤层瓦斯运移的物理模拟与分析[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 4(1): 24-31.