

# Influence Radius Analysis of Gas Drainage by Strata Boreholes

Wende Sun<sup>1</sup>, Song Yang<sup>1</sup>, Yushun Yang<sup>2,3</sup>, Xiang Zhang<sup>2,3</sup>, Yanguang Xue<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Shanmushu Mine, FuRong Company, Sichuan Coal Group, Yibin Sichuan

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing

<sup>3</sup>College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing

Email: cqyysh@126.com

Received: Mar. 29<sup>th</sup>, 2018; accepted: Apr. 16<sup>th</sup>, 2018; published: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2018

---

## Abstract

The article theoretically analysis the working face of ShanMuShu mine, establishing the axisymmetric radial flow field, coming up with the radial flow field of gas seepage continuity equation and dynamic governing equations of the unsteady radial gas flowing around the boreholes. With the set of boundary conditions and the determining solution of gas radial flow field in semi-infinite coal seam solved with the Laplace transform method, we finally obtained the expression of gas pressure distribution around the borehole. Based on the basic parameters of coal seam gas accumulation in S3012 working face, we finally calculated the relationship between the gas pressure  $p$  and the influence radius, and the relationship between drilling distance and extraction time was gained at the same time. The measurement effective drainage radius was 0.5 m with the method of borehole gas flow to measure the 120 mm advanced bore.

## Keywords

Stratified Drilling, Theoretical Analysis, Gas Drainage, Influence Radius

---

# 顺层钻孔瓦斯抽采影响半径分析

孙文德<sup>1</sup>, 杨松<sup>1</sup>, 杨玉顺<sup>2,3</sup>, 张祥<sup>2,3</sup>, 薛燕光<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>四川芙蓉集团实业有限责任公司杉木树煤矿, 四川 宜宾

<sup>2</sup>重庆大学, 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆

<sup>3</sup>重庆大学, 资源及环境科学学院, 重庆

Email: cqyysh@126.com

收稿日期: 2018年3月29日; 录用日期: 2018年4月16日; 发布日期: 2018年4月23日

## 摘要

本文采用理论分析对杉木树矿S3012工作面,建立轴对称径向流场,得出径向流场瓦斯渗流的连续性方程和钻孔周围瓦斯流动的非稳定径向渗流的动力学控制方程,通过设定边界条件,利用拉普拉斯变换法对半无限煤层瓦斯径向流场的定解式求解析解,得出钻孔周围瓦斯压力分布规律表达式。依据S3012工作面煤层瓦斯赋存基本参数,计算出顺层预抽钻孔周围瓦斯压力 $p$ 与影响半径 $r$ 之间的关系,以及钻孔间距与抽采时间关系。利用钻孔瓦斯流量法测定直径120 mm超前钻孔有效抽放半径为0.5 m。

## 关键词

顺层钻孔, 理论分析, 瓦斯抽采, 影响半径

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

矿井瓦斯涌出量随着煤矿开采深度的增加逐渐增大,严重制约煤炭资源的安全高效开发与利用。矿井瓦斯抽采,尤其是对高瓦斯突出矿井的瓦斯抽采[1][2],已成为防治瓦斯灾害的重要手段。预抽煤层瓦斯是防治矿井瓦斯超限和煤与瓦斯突出的重要措施,可以起到缓解煤层开采的瓦斯问题,是矿井安全生产的重要保障。刘军等[3]建立了考虑煤体吸附膨胀和滑脱效应的含瓦斯煤体耦合模型,借助该软件对有效抽采半径进行了研究。马赞等[4]提出运用顶板走向高位钻孔瓦斯技术,解决了青龙煤矿采空区及邻近煤层瓦斯的涌入而造成的工作面上隅角瓦斯超限问题。蔡文鹏等[5]运用顶板走向高位钻孔瓦斯抽采技术,解决上隅角瓦斯超限问题。梁冰等[6]依据采动裂隙时空演化特征与瓦斯运移规律,对富含水厚煤层大采高工作面快速推进实施了确定卸压瓦斯抽采钻孔合理层位的试验。王兆峰等[7]提出利用变系数非线性瓦斯渗流方程来快速精确测定瓦斯抽采半径的数值计算方法。王宏图等[8]针对本煤层瓦斯抽采钻孔的合理布置问题,建立了钻孔抽采瓦斯的渗流场控制方程和煤层变形场控制方程。张超等[9]开发了“强弱强”带压封孔技术,从而改进了单一高瓦斯低透气性煤层近水平瓦斯抽采钻孔密封技术。尚群等[10]对分析瓦斯抽采钻孔封孔深度的影响因素以及与巷帮应力分布状态的关系,得出瓦斯抽采钻孔封孔深度必须穿过巷帮的煤层卸压带,进入应力集中带。

而抽采钻孔是指向工作面前方沿煤层打一定数量和长度的排放钻孔,以消除工作面附近一定范围内的突出危险。钻孔直径过小,瓦斯得不到应有排放且排放范围有限,但钻孔直径过大,钻头附近煤体瓦斯、地应力场急剧变化,容易诱导突出。因此,如果抽采钻孔参数设计不合理,预抽时间不足,将会影响煤层瓦斯预抽效果,从而起不到应有的瓦斯治理效果。而瓦斯抽放参数中,主要是指不同煤层的抽放半径,而煤层抽放半径与煤层的原始瓦斯压力、瓦斯含量、透气性系数、钻孔瓦斯流量衰减系数、抽放负压以及抽放钻孔直径等众多因素有关。如何确定煤层合理的抽放半径,对抽采钻孔的合理布置具有重要意义。因此,本文针对杉木树煤矿S3012工作面采用理论计算与现场验证相结合的方法进行抽放钻孔有效抽采半径的考察。

## 2. 工作面概况

四川芙蓉集团实业有限责任公司杉木树煤矿S3012工作面所采煤层为2+3#煤层,工作面走向长度

752 m, 工作面倾斜长度 136 m, 煤层倾角  $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$ , 煤厚 0.8 m~4.4 m, 平均 3.1 m。煤层直接顶为砂质泥岩, 厚度约 3.0 m。煤层与直接顶之间有一层约 0.4 m 的伪顶, 伪顶为薄层状泥岩-泥质灰岩, 易碎, 随采随冒, 厚度 3.0 m。基本顶为砂岩-炭质泥岩, 平均厚度 6 m。直接底为粘土岩, 松软遇水膨胀, 平均厚度为 2.8 m。基本底为砂质泥岩, 含砂岩, 平均厚度大于 5 m。2 + 3#煤层为煤与瓦斯突出煤层, 煤层瓦斯含量为  $17.37\text{ m}^3/\text{t}$ , 瓦斯压力为 1.32 MPa。工作面采用走向长臂后退式回采, 全部垮落法管理顶板, U 型通风方式。S3012 工作面巷道空间布置如图 1 所示。

### 3. 理论分析

#### 3.1. 基本假设

假设钻孔周围初始瓦斯压力均匀分布, 为煤层原始瓦斯压力  $P_0$  (MPa); 钻孔周围煤层渗透率各项同性, 渗透系数为  $k$ ; 瓦斯解析过程是等温过程; 瓦斯渗流过程质量守恒, 符合 Darcy 定律; 忽略瓦斯沿钻孔轴向流动, 钻孔周围瓦斯渗流场视为轴对称径向流场。

#### 3.2. 模型的建立

取如图 2 所示一个薄壁单元体, 沿轴向的宽度取单位宽度 1, 壁厚取  $dr$ 。

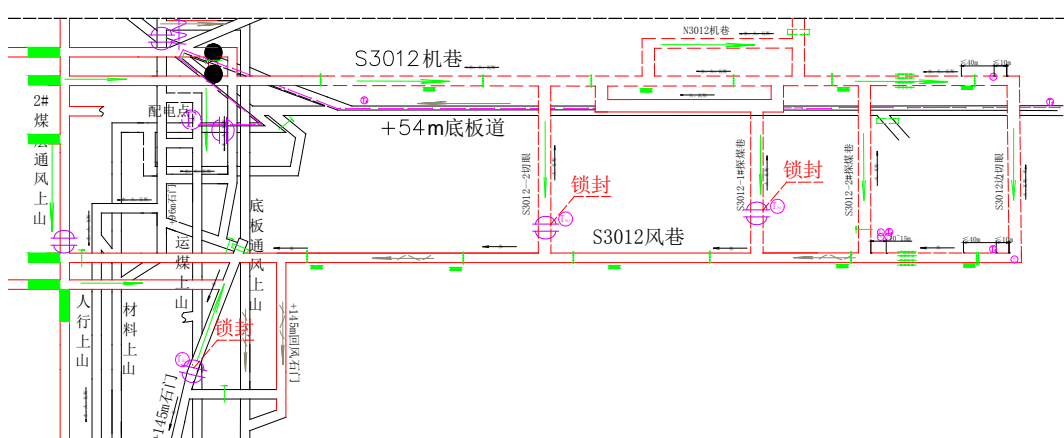


Figure 1. Layout of space roadway in S3012 working face  
图 1. S3012 工作面巷道空间布置图

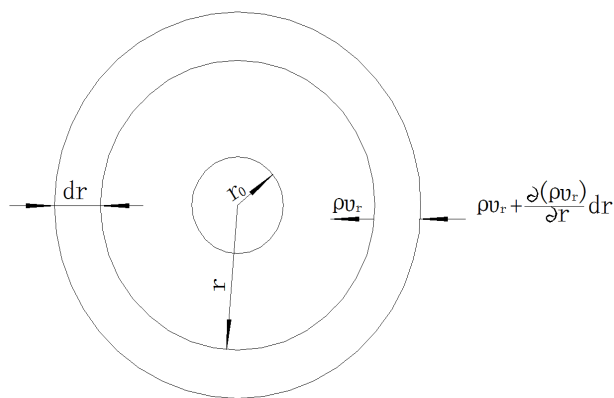


Figure 2. Analysis of gas seepage unit around the borehole  
图 2. 钻孔周围瓦斯渗流单元体分析示意图

在  $t$  时刻, 半径为  $r$  的圆壁上的质量速度为  $\rho v_r$ , 则半径为  $r + dr$  圆壁上的质量速度为:

$$\rho v_r + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} dr \quad (1)$$

给时间一个增量  $dt$ , 在  $dt$  时间内流入单元体的瓦斯量为:

$$M_1 = 2\pi r(r + dr) \left( \rho v_r + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} dr \right) dt \quad (2)$$

在  $dt$  时间内流出单元体的瓦斯量为:

$$M_2 = 2\pi r(\rho v_r) dr dt \quad (3)$$

则在  $dt$  时段内单元体内的瓦斯流体增量为:

$$\Delta M = M_1 - M_2$$

将上式整理并略去高阶无穷小量, 得:

$$\Delta M = 2\pi r \left( \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r}(\rho v_r) \right) dr dt \quad (4)$$

从瓦斯含量变化的角度考虑,  $dt$  时间内单元体的瓦斯质量变化量为:

$$\Delta M' = \rho(2\pi r dr) \frac{\partial w}{\partial t} dt \quad (5)$$

式中  $\rho$ ——压力为  $P$  时的瓦斯气体密度;  $r, dr$ ——为单元体的半径及半径增量;  $v_r$ ——瓦斯径向流动的线速度;  $\frac{\partial w}{\partial t}$ ——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定律有  $\Delta M = \Delta M'$ , 则联立式(4)、(5)得:

$$\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r}(\rho v_r) = \rho \frac{\partial w}{\partial t} \quad (6)$$

式(6)为径向流场瓦斯渗流的连续性方程。

根据 Darcy 定律有:

$$v_r = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \quad (7)$$

式中  $k$ ——钻孔周围煤层渗透率;  $\mu$ ——瓦斯动力粘度系数;  $\frac{\partial p}{\partial r}$ ——钻孔周围瓦斯沿径向的压力梯度。

根据气体状态方程有: 煤层内温度变化不大, 可视为等温过程, 则状态方程为:

$$\rho = \frac{\rho_a \cdot P}{P_a} \quad (8)$$

式中  $\rho, \rho_a$ ——分别为瓦斯压力为  $p, p_a$  时的瓦斯密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

根据瓦斯含量方程有:

$$w = \frac{abp}{1 + bp} \cdot B\rho + \varphi\rho \quad (9)$$

式中  $w$ ——压力为  $p$  时, 煤层的瓦斯含量;  $a, b$ ——煤层瓦斯吸附常数,  $\text{m}^3/\text{t}$ ;  $\varphi$ ——煤体孔隙度,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $c$ ——煤值指标,  $B = (1 - W^f - A^f)$ ,  $W^f$ ——灰份,  $A^f$ ——水份。

将式(7), (8), (9)代入径向流场瓦斯渗流的连续性方程(6), 得钻孔周围瓦斯流动的非稳定径向渗流的动力学控制方程

$$s(p) \cdot \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (10)$$

$$\text{式中 } s(p) = \frac{2p\rho_a\lambda}{\varphi + \frac{abB\rho(2+bp)}{(1+bp)^2}}, \quad \lambda = \frac{k}{2\mu p\rho_a}$$

### 3.3. 模型的定解问题的解析解

要求解式(10)动力控制方程需要确定方程的定解条件。

定解条件如下:

1) 初始条件

当  $t=0(a < r < R_0)$  时  $p = p_0$

2) 边值条件

当  $r=a(t > 0)$  时  $p = p_1$

当  $r=R_0(t > 0)$  时  $\frac{\partial p}{\partial r} = 0$

其中,  $p_0$  为煤层初始瓦斯压力;  $R_0$  为钻孔抽放的影响半径;  $p_1$  为钻孔的气体压力。

因此, 该问题的定解问题为

$$\begin{cases} s(p) \cdot \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} \\ p|_{t=0} = p_0 (a < r < R_0) \\ p|_{r=a} = p_1 (t > 0) \\ p|_{r=R_0} = p_0 (t > 0) \end{cases} \quad (11)$$

式(12)所确定的定解方程为二阶二元非线性偏微分方程, 为了分析钻孔的抽放影响半径, 求瓦斯压力以及压力梯度  $\frac{\partial p}{\partial r}$  的连续函数表达式, 必须对模型的定解问题求其解析解。

对于半无限煤层瓦斯径向流场的定解式(11)作拉普拉斯变换法求其解析解, 得出钻孔周围瓦斯压力分布规律表达式:

$$p^2(r, t) = p_1^2 + (p_0^2 - p_1^2) \operatorname{erf} \left( \frac{\ln(r/a)}{2\sqrt{s_0 \cdot t}} \right) \quad (t \geq 0, r \geq a) \quad (12)$$

式中  $\operatorname{erf}(u)$  为概率积分函数,

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-\xi^2} d\xi \quad (13)$$

$$s_0 = s(p_0) = \frac{8p\rho_a\lambda}{(R_0 - a)^2 \cdot \left[ \varphi + \frac{abB\rho(2+bp)}{(1+bp)^2} \right]} \quad (14)$$

式 (13)为钻孔周围瓦斯压力分布规律, 当  $r \rightarrow R_0$  时,  $p \rightarrow p_0$ , 即当  $r \rightarrow R_0$  时,  $\frac{\partial p}{\partial r} \rightarrow 0$

由(12)、(13)、(14)式求出  $\frac{\partial p}{\partial r}$  表达式如下:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = (p_0^2 - p_1^2) \frac{a}{2p_0 \sqrt{\pi s_0} \cdot t} \cdot \frac{1}{r} e^{-\left(\frac{\ln(r/a)}{2\sqrt{s_0} \cdot t}\right)^2} \quad (15)$$

## 4. 本煤层顺层抽采瓦斯流动规律

### 4.1. 模拟区域煤层瓦斯赋存特征

杉木树煤矿 2 + 3#煤层, 瓦斯压力  $P_0 = 1.32$  MPa, 瓦斯含量为  $17.37$  m<sup>3</sup>/t, 透气性系数  $\lambda = 2.44$  m<sup>2</sup>/(MPa<sup>2</sup>·d), 吸附常数  $a = 23.9692$  m<sup>3</sup>/t、 $b = 1.2697$  m<sup>3</sup>/t, 孔隙率  $\phi = 10.3\%$ , 煤的容重  $\gamma = 1.58$  t/m<sup>3</sup>, 灰分  $A_d = 26.67\%$ , 水分  $M_{ad} = 0.34\%$ , 瓦斯动力粘度系数:  $\mu = 1.08 \times 10^{-5}$  Pa·s。抽采负压为  $13$  kPa, 钻孔内混合气体的压力为  $p_1 = 0.09$  MPa。

根据上述参数, 结合式(14)和(15), 分别求出当  $t = 60、90、120、180$  天时, 钻孔周围瓦斯压力  $p$  与影响半径  $r$  之间的关系曲线, 如果瓦斯压力  $p$  降到  $0.74$  MPa 时所对应的的影响半径, 把此时的影响半径作为有效预抽半径。经计算得到 S3012 煤层本层预抽钻孔间距与抽采时间关系见表 1。

### 4.2. 抽放钻孔有效作用半径的测定

超前钻孔有效排放半径是指单个超前钻孔沿半径方向能够消除突出危险的最大范围, 其值不仅与煤层突出危险的大小及自身结构有关, 而且还与措施孔的排放时间有关。测定超前钻孔有效排放半径的原理是: 在措施孔一侧或四周布置若干个测量孔, 通过考察测量孔内瓦斯涌出量(或其它突出预测指标)的变化确定措施孔的排放范围。超前钻孔有效排放半径的测定方法有钻孔流量法、钻屑瓦斯解吸指标法等。本文采用钻孔瓦斯流量法进行抽放钻孔有效半径考察。

利用钻孔瓦斯流量法测定超前钻孔有效排放半径的步骤如下: 首先沿工作面软分层施工 3~5 个相互平行的测量钻孔, 孔径 42 mm, 孔长 5~7 m, 间距 0.3~0.5 m; 对各测量孔进行封孔, 封孔时应保证测量室长度为 1 m; 钻孔密封后, 立即测量钻孔瓦斯涌出量, 并每隔 2~10 min 测定一次, 每一测量孔测定次数不得少于 5 次。在距最边缘测量钻孔中心 0.5 m 处, 打一个平行于测量孔的直径为  $\Phi 120$  mm 超前钻孔。在打超前钻孔过程中, 记录钻孔长度、时间和各测量孔中的瓦斯涌出量变化; 超前钻孔打完后, 每隔 2~10 min 测定各测量孔的瓦斯涌出量, 并连续监测 2 h; 绘制各测量孔的瓦斯涌出量变化图; 如果连续 3 次测定测量孔的瓦斯涌出量都比打超前钻孔前增大 10%, 即表明该测量孔处于超前钻孔的有效排放半径之内。符合条件的上述的测量孔距排放钻孔的最远距离, 即为超前钻孔的有效排放半径。钻孔布置图见图 3。

各测量孔流量变化曲线如图 4 所示, 抽采孔施工前后钻孔 1#孔、2#孔和 3#孔的流量均出现下降趋势。而抽采孔施工过程中 4#孔的瓦斯涌出量大幅降低, 且施工后连续多次出现瓦斯流量大于抽采孔前 10%, 此时 4#孔距抽采孔间距为 0.5 m, 因此由于煤层赋存及测试误差的影响, 并考虑一定的安全系数, 确定 S3012 工作面直径  $\Phi 120$  mm 钻孔有效抽放半径为 0.5 m。

**Table 1.** Relationship between pre-pumping radius of coal seam and pre-pumping time  
**表 1.** 顺煤层预抽钻孔半径与预抽时间关系表

预抽时间(d) 预抽半径(m)	90	120	150	180	210	270	300	330
S3012 工作面	0.3	0.4	0.55	0.8	1	1.5	2.1	2.5

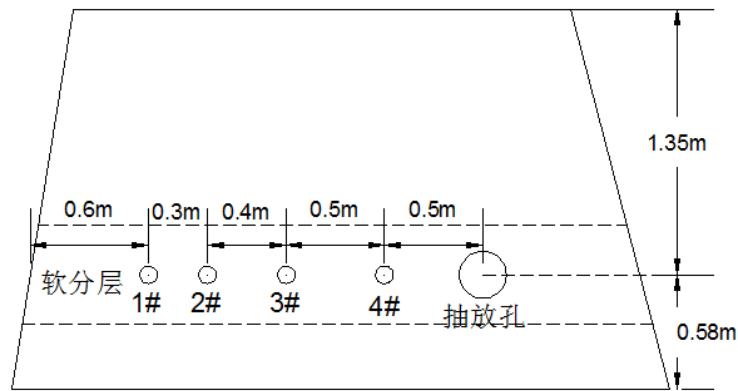


Figure 3. Working face roadway drilling effective emission radius inspection diagram

图 3. 工作面风巷钻孔有效排放半径考察示意图

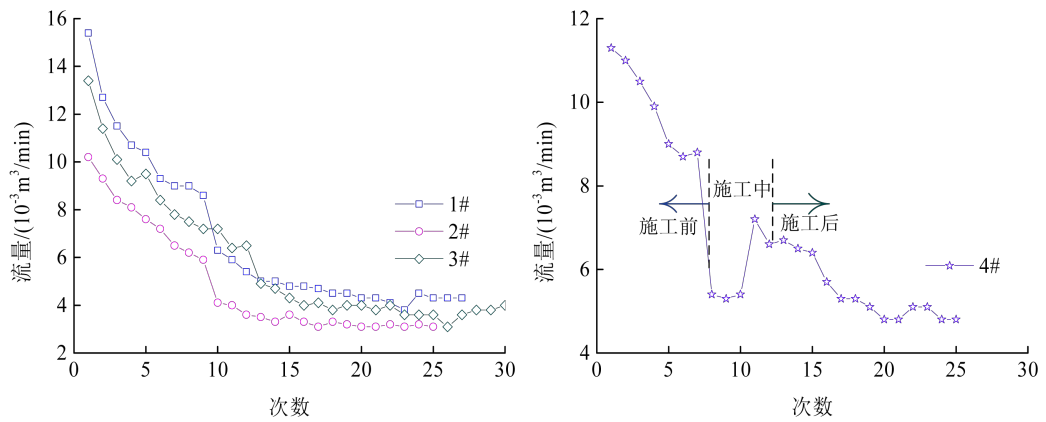


Figure 4. The flow curves of air way

图 4. 风巷钻孔流量变化曲线

## 5. 结论

- 1) 采用理论分析对杉木树矿 S3012 工作面，建立轴对称径向流场，得出径向流场瓦斯渗流的连续性方程和钻孔周围瓦斯流动的非稳定径向渗流的动力学控制方程，
- 2) 通过设定边界条件，利用拉普拉斯变换法对半无限煤层瓦斯径向流场的定解式求解析解，得出钻孔周围瓦斯压力分布规律表达式。
- 3) 依据 S3012 工作面煤层瓦斯赋存基本参数，计算出顺层预抽钻孔周围瓦斯压力  $p$  与影响半径  $r$  之间的关系，以及钻孔间距与抽采时间关系。
- 4) 利用钻孔瓦斯流量法，测定直径  $\Phi 120$  mm 超前钻孔有效抽放半径为 0.5 m。

## 资助项目

川煤集团资助项目：向斜轴部“三软厚煤层综采防突及顶板控制技术研究” (2017001)。

## 参考文献

- [1] 吴财芳, 曾勇, 秦勇. 煤与瓦斯共采技术的研究现状及其应用发展[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 137-140.

- [2] 辜敏, 陈昌国, 鲜学福. 抽放煤层气变压吸附过程的数学模拟[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 323-326.
- [3] 刘军, 孙东玲, 孙海涛, 等. 含瓦斯煤固气耦合动力学模型及其应用研究[J]. 中国矿业, 2013(11): 126-130.
- [4] 马赞, 张垒, 徐书荣. 顶板高抽钻孔抽采瓦斯的应用[J]. 科技创新导报, 2014(33): 76-77.
- [5] 蔡文鹏, 刘健, 孙东生, 等. 顶板走向高位钻孔瓦斯抽采技术的研究及应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2013(12): 35-38.
- [6] 梁冰, 赵海波, 王岩, 等. 确定卸压瓦斯抽采钻孔合理层位的试验[J]. 煤田地质与勘探, 2014(3): 96-99.
- [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, 1(6): 82-84.
- [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, 34(4): 24-29.
- [9] 张超, 林柏泉, 周延, 等. 本煤层近水平瓦斯抽采钻孔“强弱强”带压封孔技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 935-939.
- [10] 尚群. 赵庄矿 3#煤层瓦斯抽采钻孔合理封孔深度研究[D]. 河南理工大学, 2010.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7301, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [me@hanspub.org](mailto:me@hanspub.org)