

# 超长掘进工作面风量预测关键技术

邢玉忠<sup>1</sup>, 侯水云<sup>2</sup>, 张国祥<sup>2</sup>, 任建峰<sup>2</sup>, 连清旺<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西焦煤西山煤电集团公司, 山西 太原 030000)

**摘要:**基于流体动力学和非线性渗流理论, 在分析计算漏风在风筒布中的临界渗透率、临界渗流速度和风筒布平均孔隙直径等参数的基础上, 建立了风筒漏风流态判定模型, 以典型矿井条件下风筒最大风压、百米漏风率等参数为基础, 得到矿井条件下风筒漏风的线性渗流分布规律。建立了风筒漏风数学模型, 以实际风筒入口风量、入口静压和风筒出口风量为边界条件, 对长距离掘进工作面风筒漏风分布和风压分布进行了模拟计算, 获得单位长度风筒风阻和单位长度风筒层流漏风风阻的反演计算理论, 数值模拟与实测结果相符。

**关键词:**风量预测; 线性渗流; 风筒参数; 风筒漏风流态; 诊断模型

**中图分类号:**TD722 **文献标志码:**A

## Key technology of wind forecast in a long heading face

XING Yu-zhong<sup>1</sup>, HOU Shui-yun<sup>2</sup>, ZHANG Guo-xiang<sup>2</sup>, REN Jian-feng<sup>2</sup>, LIAN Qing-wang<sup>1</sup>

(1. College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Coking Coal Group Xishan Coal and Electricity Group Co., Ltd., Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** According to the percolation theory of fluid dynamics and nonlinear, in calculating the critical penetration, the critical flow velocity and the average pores diameter of duct on the basis of parameters, the model determining duct leakage flow state was established. Based on the maximum duct pressure and hectometer of air leakage rate under a typical mine, the linear flow distribution of duct air leakage was obtained in mine conditions. The mathematical model of duct leakage was established. A boundary condition to actual duct inlet air volume and inlet air duct static pressure and air volume exports, the duct leakage and pressure distribution in heading face of long-distance was simulated. The inversion theory was got about the drag per unit length of duct and the laminar flow leakage drag unit length of duct. It is consistent with the measured results of numerical simulation.

**Key words:** wind forecast; linear seepage; air duct parameter; air duct leakage flow state; diagnostic model

随着矿井集约化生产的发展, 工作面巷道长度不断增加, 超长巷道掘进工作面通风技术成为制约超长巷道掘进的关键, 掘进工作面风量预测技术成为确定单巷掘进长度的关键。

要完成对掘进工作面风量的预测, 必须获得风筒的通风风阻和漏风风阻等参数, 长距离供风其风筒的漏风量不能忽略, 利用风筒平均风量直接计算风筒风阻的方法会带来不能忽略的误差, 必须在确定风筒漏风流态的基础上获得单位长度风筒参数、漏风分布、压力分布与风筒出口风量。

## 1 掘进工作面风筒漏风数学模型

### 1.1 风筒漏风的流态

根据前人对气体在多孔介质中渗流规律的探讨<sup>[1-5]</sup>, 空气穿过风筒布时的流态划分使用如下标准: 低速非线性渗流(包括扩散,  $Re < 10^{-4}$ )、线性渗流( $10^{-4} \leq Re \leq 10$ )、高速非线性渗流( $Re > 10$ )。典型低速非达西渗流的渗流速度  $v$  与驱替压力梯度  $P/L$  间的关系曲线如图1所示<sup>[6-7]</sup>,  $c$  点是非线性渗流到线性渗流的转折点(临界点), 通过室内实验, 得到

abc 非线性流动段端点 c 的驱替压力梯度与渗透率关系式<sup>[8]</sup>:

$$\left(\frac{P}{L}\right)_c = 4.144 \times 10^7 \left(\frac{k}{\mu}\right)^{-0.6023} \quad (1)$$

式中,  $P/L$  为驱替压力梯度, Pa/m;  $k$  为渗透率,  $10^{-15} \text{ m}^2$ ;  $\mu$  为空气的动力黏性系数,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

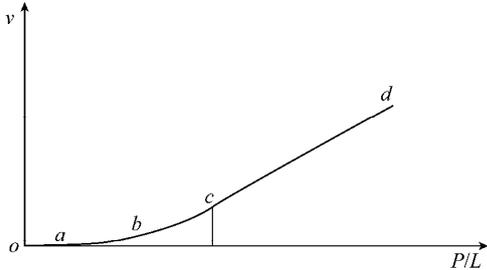


图 1 典型非达西渗流曲线

Fig. 1 Typical non-Darcy flow curve

取风筒内外压差  $P = 8\,000 \text{ Pa}$  (“MT164 - 2007 煤矿用涂覆正压风筒标准”要求  $\phi 800$ 、 $\phi 1\,000$  风筒能耐受  $8\,000 \text{ Pa}$  的风压), 风筒厚度  $L = 0.000\,8 \text{ m}$  (“GB/T 20105 - 2006 风筒涂覆布标准”要求风筒涂覆布厚度不得大于  $0.8 \text{ mm}$ ), 空气的动力黏性系数  $\mu = 1.808 \times 10^{-2} \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。把各参数代入式(1), 获得风筒线性渗流与非线性渗流的临界渗透率  $k_0 = 0.191\,56 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。由于临界点上渗流服从达西定律, 故:  $v_0 = 1 \times 10^{-15} (k_0/\mu) \times (P/L) = 1.059\,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。即在风筒内外压差  $P = 8\,000 \text{ Pa}$  条件下, 风筒线性渗流的下临界渗流速度为  $v_0 = 1.059\,5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。

“MT 164 - 2007 煤矿用涂覆布正压风筒”标准规定风筒百米漏风率  $< 4.0\%$ , 统计山西斜沟煤矿超千米风筒的百米漏风率为  $1.04\% \sim 2.91\%$ , 取风筒百米漏风率为  $4.0\%$ 。当风筒直径为  $0.8 \text{ m}$ 、风量为  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 风筒漏风的平均渗流速度为  $\bar{v} = 1.592 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。取风筒最大风压处 ( $P = 8\,000 \text{ Pa}$ ) 漏风的渗流速度  $v_{\max} = 2\bar{v} = 3.184 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 。

(1) 考察风筒最大风压 ( $P = 8\,000 \text{ Pa}$ ) 处漏风流态。由于  $v_{\max} \gg v_0$ , 故此处漏风不属于低速非线性渗流。根据  $v_{\max}$  和高速非线性渗流边界条件  $Re = 10$ , 可计算出相应的缝隙直径  $d_0 = 4.776 \times 10^{-9} \text{ m}$ 。理论研究表明渗透率与隙宽的立方成正比<sup>[8]</sup>, 据  $k_0 = 0.191\,56 \times 10^{-15} \text{ m}^2$  可得风筒孔隙的平均直径在  $10^{-5} \text{ m}$  数量级上, 远远大于高速非线性渗流边界  $d_0 = 4.776 \times 10^{-9} \text{ m}$ , 因此  $P = 8\,000 \text{ Pa}$  处风筒漏风属于线性渗流。

(2) 考察风筒内外压差减小到最大值的  $1\%$  ( $P = 80 \text{ Pa}$ ) 时的漏风流态。风筒渗流速度与风筒内外

压差成正比, 当风筒内外压差减小到最大值的  $1\%$  ( $P = 80 \text{ Pa}$ ) 时, 风筒漏风的渗流速度减为  $2.216\,7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , 仍大于  $v_0$ , 故此处漏风不属于低速非线性渗流。由于此处的渗流速度  $v < v_{\max}$ , 故其漏风属于线性渗流。

因此可以认为  $99\%$  的风筒漏风属于线性渗流, 使用 Darcy 定律<sup>[9-11]</sup> 来描述全部风筒漏风能够满足通风工程的计算精度。

## 1.2 风筒漏风数学模型

假设:

- (1) 正压风筒的漏风为线性渗流<sup>[12]</sup>;
- (2) 风流在风筒中的流动过程中, 空气密度不随压力而变化, 密度为常数<sup>[13]</sup>;
- (3) 风筒直径和质量均匀一致; 风筒水平放置, 无拐弯等局部阻力损失; 单位长度风筒的风阻值恒定;
- (4) 风筒漏风通道均匀、连续分布<sup>[14]</sup>, 漏风为不可压缩气体的稳定渗流<sup>[15]</sup>, 流态为层流; 对于特定掘进工作面供风系统, 单位长度风筒的漏风风阻为定值。

如图 2 所示, 研究  $dx$  段风筒, 由于风筒全长等断面且水平布置, 故风流在单位长度风筒中的静压变化等于摩擦阻力<sup>[16]</sup>, 即

$$\frac{dP}{dx} = R_d Q^2 \quad (2)$$

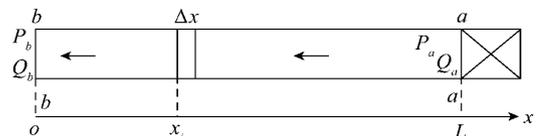


图 2 风筒坐标位置

Fig. 2 Hair Dryers coordinate position diagram

同时单位长度风筒中的层流漏风可表示<sup>[17]</sup> 为

$$\frac{dQ}{dx} = \frac{P}{R_l} \quad (3)$$

式中  $P$  为距风筒出口  $x$  处, 风筒中的静压, Pa;  $Q$  为距风筒出口  $x$  处, 风筒中的风量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $R_d$  为风流从风筒中流过时单位长度风筒风阻,  $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^9$ ;  $R_l$  为风流从风筒内向风筒外渗透时单位长度风筒的层流漏风风阻,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ 。

## 2 掘进工作面风筒漏风数值解方法

掘进工作面风量与风压分布计算的关键在于单位长度风筒风阻  $R_d$  和单位长度风筒漏风风阻  $R_l$  的获得, 由于风筒漏风的不均匀性, 在实践中很难用实测漏风量和漏风风压的方法计算  $R_l$ , 同时由于风筒中

风量的不均匀性,在实践中也很难用实测风筒风量和风压数据直接精确计算 $R_d$ 。

实际上对于一条直径、材质均匀的风筒,其单位长度的风阻 $R_d$ 和单位长度的层流漏风风阻 $R_l$ 均是恒定的,当局部通风机为其提供一定的风量、风压后,其出口风量、漏风量是一定的,其压力分布与漏风分布也是一定的。因此当风筒入口风量 $Q_a$ 、入口静压 $P_a$ 和风筒出口风量 $Q_b$ 确定后,风筒单位长度的风阻 $R_d$ 和单位长度的漏风风阻 $R_l$ 也是确定的。因此采用迭代法反演计算风筒参数 $R_d$ 和 $R_l$ 。

(1) 设置 $R_d$ 和 $R_l$ 的初值

$$R_{d0} = \frac{P_a}{Q_a Q_b}, R_{l0} = \frac{P_a}{Q_a - Q_b}$$

(2) 根据 $R_d$ 和 $R_l$ 的初值计算风筒压降 $P$ 和出口风量 $Q$ 。

当 $x=0$ 时 $P=P_b=0$ ,由式(2)和式(3)得

$$\Delta P_1 = R_d Q_b^2 \Delta x_1, P_1 = P_b + \Delta P_1 = \Delta P_1 \quad (4)$$

$$\Delta Q_1 = \frac{P_1}{R_l} \Delta x_1, Q_1 = Q_b + \Delta Q_1 \quad (5)$$

.....

$$\text{当 } x = x_i = \sum_{j=1}^i \Delta x_j \text{ 时 } P = P_i = \sum_{j=1}^i \Delta P_j; \\ \Delta P_{i+1} = R_d Q_i^2 \Delta x_{i+1} \quad (6)$$

$$\Delta Q_{i+1} = \frac{P_{i+1}}{R_l} \Delta x_{i+1}; Q_{i+1} = Q_b + \sum_{j=1}^{i+1} \Delta Q_j \quad (7)$$

.....

最后获得风筒入风口的计算风量 $Q'_a$ 和计算风压 $P'_a$ 与实测 $Q_a$ 、 $P_a$ 比较,若 $P'_a < P_a$ ,说明风筒单位长度的风阻 $R_d$ 取小了,应增加 $R_d$ 的取值,反之则应减少 $R_d$ 的值;若 $Q'_a > Q_a$ ,说明风筒单位长度的漏风风阻 $R_l$ 取小了,应增加 $R_l$ 的取值,反之则应减少 $R_l$ 的值。

(3) 设置计算精度。

通过调整 $R_d$ 和 $R_l$ 值,使得 $|Q'_a - Q_a| \leq \varepsilon$ ;  $|P'_a - P_a| \leq \xi$ ,获得能够满足工程需要的风筒单位长度的风阻 $R_d$ 值和风筒单位长度的漏风风阻 $R_l$ 值。其中 $\varepsilon$ 为计算风量与实测风量误差精度, $\xi$ 为计算风压与实测风压误差精度。

(4) 获得风量分布与风压分布。

计算出 $R_d$ 和 $R_l$ 值后,风筒中风量分布与风压分布也被同时获得。

### 3 掘进工作面风量预测

通过实测风筒入口风量 $Q_a$ 、入口静压 $P_a$ 和风筒出口风量 $Q_b$ ,利用上述方法便可计算出风筒单位长度的风阻 $R_d$ 和单位长度的漏风风阻 $R_l$ ,根据风筒的

( $R_d$   $R_l$   $L$ )参数,可预测掘进工作面的风量和单巷掘进最大长度。

#### 3.1 预测掘进工作面风量

掘进工作面的风量预测就是根据局部通风机的风压特性曲线( $h_f = C_2 Q^2 + C_1 Q + C_0$ )和风筒参数( $R_d$   $R_l$   $L$ ),求风筒的入口风量 $Q_a$ 、入口静压 $P_a$ 和出口风量 $Q_b$ 。

采用迭代法,先给出局部通风机出口风量的初值 $Q_f$ ,代入风压特性曲线( $h_f = C_2 Q^2 + C_1 Q + C_0$ )中,获得局部通风机静压 $h_f$ ,将 $Q_f$ 、 $h_f$ 作为风筒的入口风量和入口静压,代入式(4)~(7)获得风筒上的风压降 $P$ ,取 $(P + h_f)/2$ 作为风机静压重新计算风机出口风量和风筒上的风压降,直到满足精度要求为止。

当计算出的风筒压降与风机静压之差满足精度要求时,同时计算出的风筒出口风量 $Q_b$ 即为所预测掘进工作面风量。

#### 3.2 预测单巷掘进最大长度

预测单巷掘进最大风筒长度,就是在已知局部通风机风压特性曲线( $h_f = C_2 Q^2 + C_1 Q + C_0$ )、风筒参数( $R_d$   $R_l$   $L$ )、风筒出口风量 $Q_b$ 的条件下,求风筒的最大长度,其中 $Q_0$ 为掘进工作面允许最小风量。

先设定局部通风机出口风量 $Q_f$ ,代入风压特性曲线( $h_f = C_2 Q^2 + C_1 Q + C_0$ )中,获得局部通风机工况( $Q_f$   $h_f$ ),令 $Q_a = Q_f$   $P_a = h_f$ ,代入式(4)~(7)中,当风筒静压 $P=0$ 或风筒出口风量 $Q=Q_0$ 时,停止计算,若 $P=0$   $Q > Q_0$ 时,表明设定的风机风量大、风压小,应减小风机风量;若 $Q=Q_0$   $P > 0$ ,说明设定的风机风量小、风压大,应增加风机风量。

当 $P=0$ , $|Q - Q_0| \leq \varepsilon_1$ 时,满足精度要求,停止迭代;当 $Q=Q_0$ , $|P| \leq \xi_1$ 时,满足精度要求,停止迭代。其中 $\varepsilon_1$ 为风量误差精度, $\xi_1$ 为风压误差精度。

## 4 实例

山西斜沟煤矿18503副巷掘进工作面局部通风采用 $2 \times 30$  kW的FBDNo7.1对旋式局部通风机,风筒选用 $\phi 800$  mm的阻燃风筒,通风距离在2510 m时风筒入口风量为 $471 \text{ m}^3/\text{min}$ ,风筒出口风量为 $303 \text{ m}^3/\text{min}$ ;局部通风机风量为 $471 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,局部通风机静压4535 Pa。

#### 4.1 掘进工作面风筒参数与风量、风压分布计算

将以上参数代入式(4)~(7)进行迭代计算,取风量误差精度 $\varepsilon = 0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$ ,取风压误差精度 $\xi = 0.01 \text{ Pa}$ ,获得单位长度风筒风阻 $R_d = 0.050650922 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^9$ ,单位长度风筒层流漏风风

阻  $R_1 = 1\ 727\ 702\ \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^4$ 。同时获得风筒风压分布曲线  $P = 1.173\ 682 \times 10^{-7} x^3 - 1.215\ 897\ 8 \times 10^{-4} x^2 + 1.371\ 103\ 28x - 11.094\ 196\ 7$ , 拟合度  $R^2 = 0.999\ 988\ 484$ ; 风量分布曲线  $Q = 6.117\ 762 \times 10^{-11} x^3 + 2.625\ 097 \times 10^{-7} x^2 + 7.070\ 412 \times 10^{-5} x + 5.041\ 033$ , 拟合度  $R^2 = 0.999\ 984\ 8$ ; 风筒漏风的平均风速分布曲线为  $V = 2.702\ 974 \times 10^{-14} x^3 - 2.800\ 196 \times 10^{-11} x^2 + 3.157\ 632 \times 10^{-7} x - 2.554\ 978 \times 10^{-6}$  (拟合度  $R^2 = 9.999\ 885$ )。各分布曲线如图3~5所示。

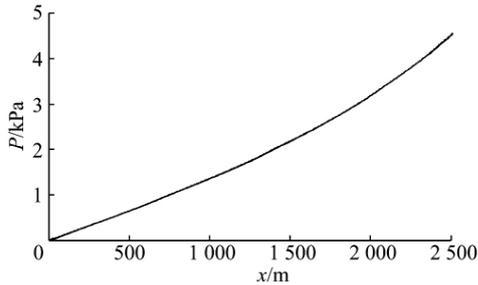


图3 风筒风压分布曲线

Fig. 3 Duct pressure distribution curve

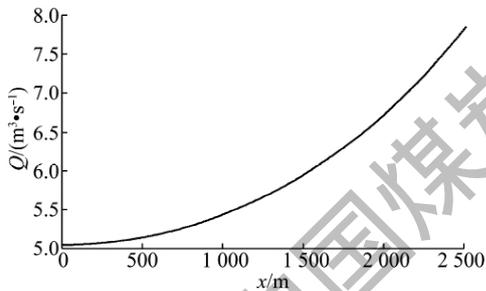


图4 风筒风量分布曲线

Fig. 4 Duct air volume distribution curve

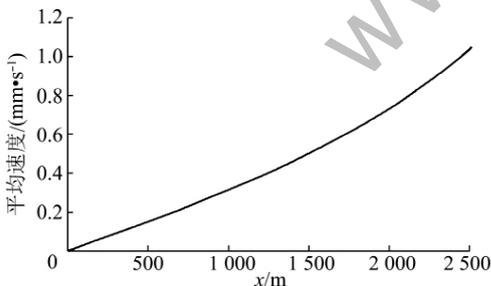


图5 风筒漏风平均风速分布曲线

Fig. 5 Average wind speed distribution curve of duct leakage

#### 4.2 掘进工作面风量预测

若风筒欲延长 500 m  $L = 2\ 510 + 500 = 3\ 010\ \text{m}$ , 设风机初始工况:  $Q_0 = 7.85\ \text{m}^3/\text{s}$ ,  $h_0 = 4\ 535\ \text{Pa}$ , 根据  $R_d, R_1, L$ , 令  $Q_a = Q_0$  代入式(4)~(7), 获得  $x = L$  处风筒出口风量  $Q_b$  和剩余阻力损失  $P_b$ , 根据  $P_b$  调整  $Q_f$ , 直到  $|P_b| < \xi$ ,  $\xi$  为设定精度  $\xi = 0.1\ \text{Pa}$ 。得  $Q_a = Q_f = 7.451\ 21\ \text{m}^3/\text{s}$ ,  $h_f = 4\ 668.95\ \text{Pa}$ ,  $Q_b = 4.453\ 28$

$\text{m}^3/\text{s} = 267.2\ \text{m}^3/\text{min}$ , 即风筒再延长 500 m 后, 掘进工作面风量能达到  $267.2\ \text{m}^3/\text{min}$ 。如图6所示, 图中“风筒1风压  $P_1$ ”表示风筒长  $L = 2\ 510\ \text{m}$  时, 风筒在不同长度上风压与风量关系曲线, “风筒2风压  $P_2$ ”表示风筒长  $L = 3\ 010\ \text{m}$  时, 风筒在不同长度上风压与风量关系曲线。

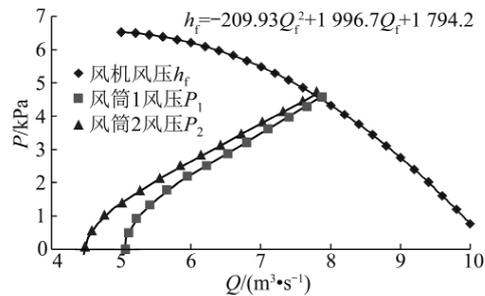


图6 风筒延长前后风机工况

Fig. 6 Fan conditions before and after duct extension

斜沟煤矿 +700 南翼回风大巷使用相同的风筒、风机, 掘进到 3 010 m 时实测风筒出风量为  $270\ \text{m}^3/\text{min}$ , 预测误差为 2.3%。

#### 4.3 单巷掘进最大长度预测

在确定掘进工作面需风量  $Q_b$  后, 可根据局部通风机能力和风筒的通风参数计算出风筒的最大供风长度。上例中若工作面需风量为  $Q_b = 360\ \text{m}^3/\text{min} = 6.0\ \text{m}^3/\text{s}$  ① 设置初值: 风量计算精度  $\varepsilon = 0.001\ \text{m}^3/\text{s}$ ,  $Q_a = 7.85\ \text{m}^3/\text{s}$ ,  $h_f = 4\ 535\ \text{Pa}$ ; ② 调整风机风量, 使风筒出风口  $P = 0$  时,  $Q = Q_b = 6.0\ \text{m}^3/\text{s}$ , 若  $P < 0.1\ \text{Pa}$  时  $Q_b > 6.0\ \text{m}^3/\text{s}$ , 则减小  $Q_a$  值, 反之则增加  $Q_a$  值, 直到  $|Q_b - 6.0| < \varepsilon$  为止; ③ 获得迭代结果:  $L = 1\ 872\ \text{m}$ ,  $Q_f = 8.071\ 37\ \text{m}^3/\text{s}$ ,  $h_f = 4\ 237.1\ \text{Pa}$ 。斜沟煤矿 +700 水平南翼辅运大巷采用 FBD $\text{No}7.1$  局部通风机,  $\phi 800\ \text{mm}$  风筒, 掘进到 1 870 m 时风筒出风量  $Q_b = 370\ \text{m}^3/\text{min} = 6.17\ \text{m}^3/\text{s}$ , 预测误差为 2.75%, 能够满足工程需要。

## 5 结 论

(1) 运用非线性渗流理论, 通过风筒漏风临界渗透率、临界渗流速度和风筒平均孔隙直径等参数的计算, 建立了风筒漏风流态的诊断模型。

(2) 以风筒实际参数为依据, 获得典型矿井条件下风筒漏风线性渗流分布范围的计算模型。依据流体动力学原理和非线性渗流理论, 建立了风筒漏风数学模型, 获得长距离掘进工作面风筒漏风分布和风压分布的计算模型。

(3) 给出了依据风筒入口风量、入口静压和风筒出口风量等实测数据, 获得单位长度风筒风阻和单位

长度风筒层流漏风风阻的计算理论与方法。

(4) 给出了掘进工作面风量预测的计算方法和单巷掘进最大长度的预测方法。

#### 参考文献:

- [1] 李爱芬,刘敏,张少辉,等. 特低渗透油藏渗流特征实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版) 2008, 23(2): 35-39.  
Li Aifen, Liu Min, Zhang Shaohui, et al. Experimental study on the percolation characteristic of extra low-permeability reservoir [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 23(2): 35-39.
- [2] 邓志刚,齐庆新,李宏艳,等. 采动煤体渗透率示踪监测及演化规律[J]. 煤炭学报 2008, 33(3): 273-276.  
Deng Zhigang, Qi Qingxin, Li Hongyan, et al. Evolution law of mining coal permeability by real-time tracer monitoring system [J]. Journal of China Coal Society 2008, 33(3): 273-276.
- [3] 计秉玉,李莉,王春燕. 低渗油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J]. 石油学报 2008, 29(2): 256-261.  
Ji Bingyu, Li Li, Wang Chunyan. Oil production calculation for area well pattern of low permeability reservoir with non-Darcy seepage flow [J]. Acta Petrolei Sinica 2008, 29(2): 256-261.
- [4] 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.
- [5] 曹树刚,郭平,李勇,等. 瓦斯压力对原煤渗透特性的影响[J]. 煤炭学报 2010, 35(4): 595-599.  
Cao Shugang, Guo Ping, Li Yong, et al. Effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(4): 595-599.
- [6] 鄂建,陈刚,孙爱荣. 考虑低速非Darcy渗流的饱和黏性土一维固结分析[J]. 岩土工程学报 2009, 31(7): 1115-1119.  
E Jian, Chen Gang, Sun Airong. One-dimensional consolidation of saturated cohesive soil considering non-Darcy flows [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2009, 31(7): 1115-1119.
- [7] 时佃海. 低渗透砂岩油藏平面径向渗流流态分布[J]. 石油勘探与开发 2006, 33(4): 491-494.  
Shi Dianhai. Flow state distribution of areal radial flow in low permeability sandstone reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development 2006, 33(4): 491-494.
- [8] 杨建平,陈卫忠,田洪铭,等. 应力-温度对低渗透介质渗透率影响研究[J]. 岩土力学 2009, 30(12): 3587-3594.  
Yang Jianping, Chen Weizhong, Tian Hongming, et al. Study of permeability evolutions in low permeability media under different stresses and temperatures [J]. Rock and Soil Mechanics 2009, 30(12): 3587-3594.
- [9] 周福宝,李金海,刘应科. 复合浆体喷涂新材料及其隔风特性[J]. 煤炭学报 2010, 35(7): 1155-1159.  
Zhou Fubao, Li Jinhai, Liu Yingke. A new spraying material of composite slurry and its property for air-isolation [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(7): 1155-1159.
- [10] 董贵明,束龙仓,王茂枚,等. 渗流-水平井流耦合数学模型和数值模拟[J]. 水科学进展 2009, 19(11): 830-837.  
Dong Guiming, Shu Longcang, Wang Maomei, et al. A coupled seepage-horizontal well flow model and numerical experiments [J]. Advances in Water Science 2009, 19(11): 830-837.
- [11] 郭晓华,蔡卫,马尚权,等. 基于稳态渗流的煤巷掘进瓦斯涌出连续性预测[J]. 煤炭学报 2010, 35(6): 932-936.  
Guo Xiaohua, Cai Wei, Ma Shangquan, et al. Continuity prediction of gas emission during drivage in coal seam based on stable percolation [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(6): 932-936.
- [12] 卢占国,姚军,王殿生,等. 正交裂缝网络中渗流特征实验研究[J]. 煤炭学报 2010, 35(4): 555-558.  
Lu Zhanguo, Yao Jun, Wang Diansheng, et al. Experimental study on fluid flow characteristic in orthogonal fracture network [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(4): 555-558.
- [13] 刘钊春,柴军瑞,贾晓梅,等. 压入式通风掘进面有害气体浓度扩散数值模拟[J]. 岩土力学 2009, 30(S2): 536-539.  
Liu Zhaochun, Chai Junrui, Jia Xiaomei, et al. Numerical simulation of concentration diffusion of harmful gas in heading face with forced ventilation [J]. Rock and Soil Mechanics 2009, 30(S2): 536-539.
- [14] 纪传仁,李宗翔,李建新. 采空区沿空通风巷道边界漏风分布的迭代计算[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版) 2009, 28(2): 165-168.  
Ji Chuanren, Li Zongxiang, Li Jianxin. Iterative algorithm of boundary air leakage in venting laneway along goaf [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science) 2009, 28(2): 165-168.
- [15] 李宗翔,题正义,孙洪峰. 锚支巷道沿空延迟冒落采空区风流规律研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版) 2007, 22(4): 15-18.  
Li Zongxiang, Ti Zhengyi, Sun Hongfeng. Air flow law of goaf with boundary of delayed caving bolt supporting roadways [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition) 2007, 22(4): 15-18.
- [16] 高建良,张生华. 压入式局部通风工作面风流分布数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报 2004, 14(1): 93-96.  
Gao Jianliang, Zhang Shenghua. Numerical simulation of airflow pattern at working face with forced auxiliary ventilation [J]. China Safety Science Journal 2004, 14(1): 93-96.
- [17] 周西华,王继仁,梁栋. 掘进巷道风流温度场分布规律的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报 2003, 22(1): 1-3.  
Zhou Xihua, Wang Jiren, Liang Dong. Study of airflow temperature distribution law in excavation roadway [J]. Journal of Liaoning Technical University 2003, 22(1): 1-3.