

导气管阻力特性对钻孔瓦斯涌出初速度的影响

高建良^{1,2}, 尚 宾¹, 张学博¹

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003)

摘 要: 建立了瓦斯在煤层运移、向测量室涌出、测量室瓦斯压力变化、瓦斯沿导气管流出的数学模型。利用有限差分法解算了测量室动态压力边界条件下钻孔周围煤层瓦斯流动、得到测量室瓦斯压力变化及钻孔瓦斯流量随时间的变化规律。分析了导管阻力对钻孔瓦斯流量的影响。结果表明: 导气管的长度、材质和管径不同时, 测定的钻孔瓦斯流量最大值出现的时间、大小不同; 导管管径对测定值的影响最大; 导气管摩擦风阻越小, 钻孔瓦斯流量越大, 测得的瓦斯涌出初速度越大。

关键词: 导气管; 钻孔; 瓦斯涌出初速度; 测量室; 瓦斯流量

中图分类号: TD712.52

文献标志码: A

The influence of airway resistance on the initial velocity of gas emission from borehole

GAO Jian-liang^{1,2}, SHANG Bin¹, ZHANG Xue-bo¹

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The mathematical model of gas flow in the coal seam, gas flow into the measuring chamber, gas pressure change in the measuring chamber, and gas flow out of the chamber through the airway was established. Using the finite difference method, gas flow around borehole with measuring chamber was measured under dynamic boundary conditions. The variation rule of gas pressure in the measuring chamber and the gas flow quantity in borehole with time was obtained. The influence of airway resistance on initial velocity of gas emission from borehole was analyzed. Results show that when airway length, material and diameter is not the same, the maximum value and appear time of gas flow quantity is different. Airway diameter has great impacts on the value of gas flow in borehole. When the airway resistance is smaller, the gas flow quantity is bigger, and the initial velocity of gas emission from borehole is bigger too.

Key words: airway; borehole; initial velocity of gas emission; measuring chamber; gas flow

开采突出危险性煤层, 必须要对工作面前方的突出危险性进行预测。钻孔瓦斯涌出初速度是预测煤与瓦斯突出危险或防突措施效果的一项重要指标。钻孔瓦斯涌出初速度的布置方法为: 沿工作面采掘方向, 在煤层内打直径42 mm、长3.5 m的钻孔, 在封孔后2 min时测定的经导气管流出的瓦斯流量就是钻孔瓦斯涌出初速度。实际操作中, 普遍将煤气表或流量计中读到的瓦斯流量最大值作为钻孔瓦斯涌出初

速度。测定方法如图1所示。

钻孔瓦斯涌出初速度主要取决于煤层原始瓦斯压力、瓦斯含量、渗透率、煤的吸附常数、煤体强度和测定仪器的阻力影响等因素。目前钻孔瓦斯涌出初速度指标和测定方法已经广泛应用于煤矿实际生产之中。国内外许多学者对钻孔瓦斯涌出进行了研究。周世宁等将其提出的煤层瓦斯运移数学模型应用到钻孔瓦斯流量研究中, 为计算钻孔瓦斯流量提供了理

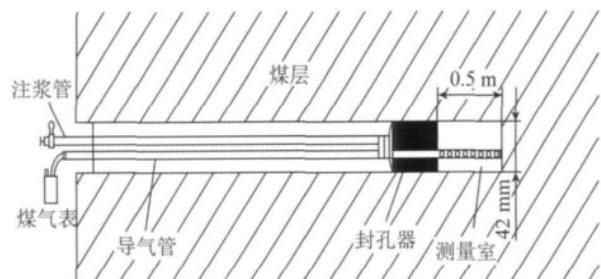


图1 钻孔瓦斯涌出初速度测定方法示意

Fig. 1 The layout drawing of initial speed from borehole gas emission

论基础^[1-3]。魏晓林对有钻孔煤层瓦斯流动方程的应用做了大量研究^[4]。王克全等分析了瓦斯涌出初速度与渗透率、煤的内聚力及内摩擦角、开采深度等因素的关系,并用钻孔瓦斯流量反演分析法研究钻孔周围的瓦斯流动,得出了瓦斯径向流动微分方程的解析解^[5-7]。王凯等通过数值模拟,研究了钻孔瓦斯动态涌出规律、特征及其与煤层突出危险性的关系^[8-9]。在煤层瓦斯流动和钻孔瓦斯方面其他学者也做了大量的研究^[10-14]。

但是以上研究都没有考虑封孔后测压室瓦斯压力变化动态边界条件,也没有考虑导气管阻力损失对钻孔瓦斯涌出初速度的影响。在相同条件下采用不同的导气管测定的钻孔瓦斯流量是否相同、差别多大需要进行研究。

1 钻孔瓦斯涌出初速度计算数学模型

1.1 煤层瓦斯流动的基本方程

瓦斯在煤层中流动是一种十分复杂的渗流过程。为了简化问题,对煤层瓦斯流动的动力模型作如下假设:煤层中原始瓦斯压力分布均匀;煤层顶底板不透气且不含瓦斯;煤层流动过程为等温过程;瓦斯可被视为理想气体,并服从理想气体状态方程;瓦斯在煤层中流动符合达西定律;煤层中的吸附瓦斯量符合朗格缪尔方程;测量室周围煤层初始压力不受打钻过程影响。

(1) 煤层瓦斯流动的连续性方程。

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}\right] = \frac{\partial(\rho n)}{\partial t} \quad (1)$$

式中, ρ 为瓦斯压力为 p 时的密度, kg/m^3 ; v 为煤层瓦斯流动速度, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; n 为孔隙率, %。

(2) 煤层瓦斯的流动方程。

煤层瓦斯流动符合达西定律,即

$$v = -\lambda \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

式中, λ 为煤层透气性系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$, $\lambda = K/$

$(2\mu p_0)$; 其中, p_0 为标准大气压力, MPa , K 为煤层渗透率, m^2 , μ 为瓦斯动力黏度, $\text{MPa} \cdot \text{s}$; P 为煤层中瓦斯压力的平方, MPa^2 。

(3) 煤层瓦斯气体状态方程。

煤层瓦斯视为理想气体,因此有

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (3)$$

式中, p 为煤层中瓦斯压力, MPa ; R 为煤层中瓦斯的气体常数, $R = 587.2 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为煤层中瓦斯的绝对温度, K 。

(4) 煤层瓦斯含量方程。

煤层瓦斯含量为游离瓦斯和吸附瓦斯量之和。

$$X = \frac{VpT_0}{T p_0 \xi} + \left[\frac{abp}{1 + bp} e^{\bar{n}(t_0 - t)} \times \frac{1}{1 + 0.31 M_{ab}} \frac{100 - A_{ab} - M_{ab}}{100} \right] \quad (4)$$

式中, X 为煤层瓦斯含量, m^3/t ; V 为单位质量煤的孔隙体积, m^3 ; T_0, p_0 为标准状态下的绝对温度、压力, 分别取值为 273 K , 0.101325 MPa ; ξ 为瓦斯压缩系数; t_0 为实验室测定煤的吸附常数时的实验温度, $^\circ\text{C}$; t 为

煤层温度, $^\circ\text{C}$; $\bar{n}$ 为经验系数, 一般可按下式确定

$$\bar{n} = B \frac{0.02}{0.993 + 0.07p}$$

B 为系数, MPa^{-1} , 取值为 1; a, b 为吸附常数; A_{ab}, M_{ab} 为煤中的水分和灰分, %。

(5) 煤层瓦斯流动的控制方程。

根据式(1)~(4)可推导出煤层瓦斯流动的控制方程,即

$$\frac{\partial p}{\partial t} f(p) = \frac{K}{2\mu p_0} \left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

其中, $f(p) = \frac{n}{p_0} + \frac{abr}{(1 + bp)^2}$, r 为煤的密度, t/m^3 。

1.2 涌入测量室瓦斯量及测量室瓦斯压力计算

由于煤层内存在着瓦斯压力梯度,煤层瓦斯从煤层内部流向测量室周围煤壁。煤壁瓦斯涌出量主要取决于煤层瓦斯压力和测量室煤壁处瓦斯压力之差。通常用煤壁节点与煤层内相邻节点的压力梯度来近似作为测量室壁面处的瓦斯压力梯度。如果想要得到更准确的结果,可根据瓦斯压力拟合曲线计算煤壁瓦斯压力梯度^[15]。

假设在 t_1 时刻测量室瓦斯质量为 m_1 , 据式(2)可以计算测量室钻孔煤壁单位面积瓦斯流量,从而可以计算出在 dt 时间内涌入测量室的瓦斯质量 dm_1 , 在 dt 时间间隔内经导管从测量室流出的瓦斯质量为 dm_2 。那么经过 dt 时间间隔后, t_2 时刻测量室瓦斯质

量为 m_2 , 建立测量室质量平衡方程为

$$m_2 = m_1 + dm_1 - dm_2 \quad (6)$$

根据气体状态方程, 计算测量室压力为

$$p_c = m_2 RT / (M_g V) \quad (7)$$

式中, p_c 为测量室瓦斯压力, MPa; M_g 为瓦斯的摩尔质量, kg/mol; V 为测量室体积, m^3 。

1.3 流量计瓦斯涌出初速度计算

测量室瓦斯压力增加, 瓦斯沿导气管流出, 根据圆管沿程阻力损失的公式可求得此刻钻孔瓦斯涌出量为

$$p_c - p_a = R_f Q^2 \quad (8)$$

$$R_f = \lambda_d \frac{l}{d} \frac{\rho}{2S^2}$$

式中, p_a 为巷道内气体压力, Pa; R_f 为导气管的风阻, kg/m^7 ; λ_d 为沿程损失系数; l 为导气管长度, m; d 为导气管直径, m; S 为导气管截面积, m^2 ; Q 为沿导气管流出的瓦斯量, m^3 。

联立式 (5) ~ (8) 即可得到测量室动态压力边界条件下钻孔瓦斯流量。解算步骤如下:

- (1) 根据方程 (5), 首先利用差分法解算初始钻孔瓦斯压力条件下煤层瓦斯压力分布;
- (2) 根据方程 (6) 可得到涌入测量室的瓦斯量;
- (3) 根据方程 (7) 计算测压室瓦斯压力;
- (4) 根据方程 (8) 计算沿导气管瓦斯流量;
- (5) 根据方程 (7) 重新计算测压室瓦斯压力;
- (6) 在新的测量室压力下, 返回步骤 (1) 重新下一轮计算。

2 钻孔瓦斯涌出初速度计算分析

测量室内压力用于克服瓦斯在导管流动和通过流量计的阻力。经常用煤气表代替流量计测量钻孔瓦斯涌出初速度, 按照国家技术监督局行业标准 GB/T 6968—1997 中关于煤气表压力损失的规定, 煤气表的阻力很小, 而且不同量程煤气表压力损失相差也不大。测量室压力主要用于克服导管阻力损失。假设煤层瓦斯赋存参数如下: $p_0 = 0.1$ MPa, $p = 2.0$ MPa, $K = 3.6 \times 10^{-17} m^2$, $a = 23.4 \times 10^{-3} m^3/kg$, $b = 0.26 MPa^{-1}$, $\rho = 1.5 \times 10^3 kg/m^3$, $A_{ab} = 22.63\%$, $M_{ab} = 8.0\%$, $n = 0.1$, $\mu = 1.08 \times 10^{-6} Pa \cdot s$ 。铜管和铁管的当量粗糙度取值分别为 0.01 和 0.15 mm, 在上述条件下解算分析导气管风阻对仪器测得钻孔瓦斯涌出的影响。

2.1 导管长度对钻孔瓦斯流量的影响

当管径为 1 cm、管长分别为 3 和 4 m 时经过铜管的钻孔瓦斯流量随时间变化如图 2 所示。由图 2 可

见: 封孔后钻孔瓦斯流量迅速增加, 很快达到最大值, 而后开始衰减, 衰减幅度越来越小。导气管长 3 m 时瓦斯流量最大值出现在 148 s, 为 144.4 L/min。导气管 4 m 时瓦斯流量最大值出现在 168 s, 为 136.5 L/min。与 3 m 导气管相比, 4 m 导气管钻孔瓦斯流量最大值出现时间推迟了 20 s, 最大值减小 7.9 L/min, 降低 5.5%。随着时间增长, 导气管阻力特性不同引起的瓦斯流量之间的差别逐渐减小, 在 10 min 时, 二者之间的差别不到 1%。

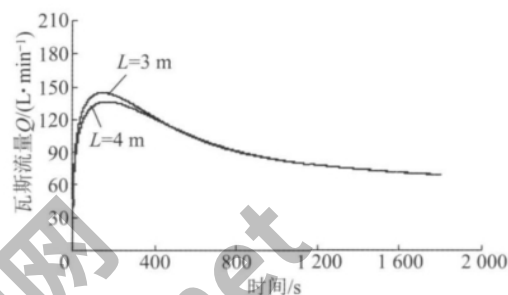


图 2 不同管长时钻孔瓦斯流量随时间变化对比曲线

Fig. 2 Contrast curves of variation of gas flow quantity with time under different airway length

2.2 管材对钻孔瓦斯流量的影响

当管径为 1 cm、管长为 3 m 时流过铜管和铁管的钻孔瓦斯流量随时间变化如图 3 所示。由图 3 可见: 导气管为铜管时钻孔瓦斯流量最大值出现在 148 s, 为 144.4 L/min。导气管为铁管时最大值出现在 219 s, 为 120.7 L/min。与铜导气管相比, 铁导气管粗糙度大, 风阻值高, 钻孔瓦斯流量最大值出现时间推迟了 71 s, 测定值减小 23.7 L/min, 降低 16.4%。

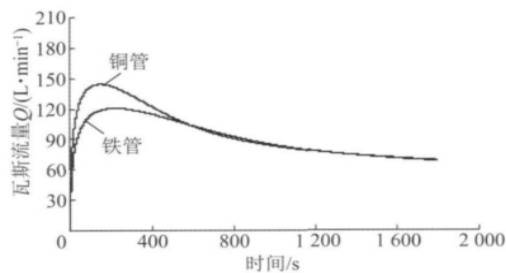


图 3 不同管材时钻孔瓦斯流量随时间变化对比曲线

Fig. 3 Contrast curves of variation of gas flow quantity with time under different pipe

2.3 管径对钻孔瓦斯流量的影响

当管长都为 3 m、管径分别为 0.8、1.0、1.2 cm 时流过铜管的钻孔瓦斯流量随时间变化如图 4 所示。由图 4 可见: 管径为 0.8 cm 时钻孔瓦斯流量最大值出现在 290 s, 为 105.6 L/min; 管径为 1.0 cm 时最大值出现在 148 s, 为 144.4 L/min; 管径为 1.2 cm 时最大值出现在 85 s, 为 182.1 L/min。与管径为 1.0 cm

导气管相比: 管径为 0.8 cm 时钻孔瓦斯流量最大值出现时间推迟了 142 s, 钻孔瓦斯流量最大值减小了 23.7 L/min, 降低 26.9%; 管径为 1.2 cm 时钻孔瓦斯流量最大值出现时间提前了 63 s, 钻孔瓦斯流量最大值增大 23.7 L/min, 增加 26.1%。

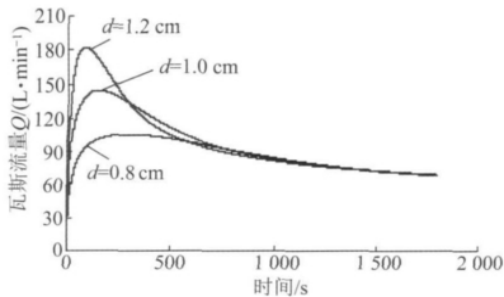


图 4 不同管径时钻孔瓦斯流量随时间变化曲线
Fig. 4 Contrast curves of variation of gas flow quantity with time under different airway diameter

表 1、2 列出了不同导气管测定的钻孔瓦斯流量最大值出现时间和大小、钻孔瓦斯流量衰减率与时间的关系。在相同条件下, 钻孔瓦斯流量最大值的大小、出现时间与导气管阻力特性有关。导气管摩擦风阻越大, 测得的钻孔瓦斯涌出初速度越小, 出现时间越晚; 阻力差别越大, 测得的瓦斯涌出初速度间的差别越大。因为不同管径的阻力差别很大, 所以在相同条件下, 不同的管径对钻孔瓦斯涌出初速度的影响最大。导气管阻力越大钻孔瓦斯流量达到峰值后衰减速度越慢, 随着时间增长, 不同阻力特性管道测得的钻孔瓦斯流量间的差别越来越小。

表 1 不同导气管测定的钻孔瓦斯流量峰值大小和出现时间对比

Table 1 Contrast of maximum gas flow quantity and appear time under different airway				
导管 材质	管长/ m	管径/ cm	峰值大小/ (L·min ⁻¹)	峰值出现 时间/s
铜	3.0	0.8	105.6	290
铁	3.0	1.0	120.7	219
铜	4.0	1.0	136.5	168
铜	3.0	1.0	144.4	148
铜	3.0	1.2	182.1	85

3 结 论

(1) 封孔后钻孔瓦斯流量迅速增加, 很快达到最大值, 而后开始衰减, 衰减幅度越来越小。衰减幅度与导气管风阻有关, 风阻越小, 衰减速度越快。当导气管为管长 3 m、管径 1.2 cm 铜管时, 在最大值出现

后 15 min, 钻孔瓦斯流量衰减了 54.9%。

表 2 不同导气管测定的钻孔瓦斯流量衰减率随时间变化值
Table 2 Variation of gas flow quantity attenuation rate with time under different airway

导管 材质	管长/ m	管径/ cm	钻孔涌出速度达到高峰后随时间衰减率/%				
			1 min	2 min	3 min	15 min	30 min
铜	3	0.8	0.4	1.4	2.8	25.0	38.3
铁	3	1.0	0.7	2.5	4.9	33.1	44.9
铜	4	1.0	1.3	4.2	7.9	40.3	50.6
铜	3	1.0	1.7	5.3	9.8	43.4	53.0
铜	3	1.2	4.9	13.8	22.6	54.9	62.7

(2) 导气管风阻不同钻孔瓦斯流量最大值出现的时间、大小不同。导气管的风阻越小, 测定的钻孔瓦斯流量最大值出现的时间越早, 测得的钻孔瓦斯流量越大。达到峰值后, 差别逐渐减小。当管径为 1.0 cm、管长分别为 3 和 4 m 时, 经过铜管的钻孔瓦斯流量在封孔后的 10 min 时, 测定的钻孔瓦斯流量差别只有 1%。

(3) 导气管风阻不同钻孔瓦斯流量峰值的大小不同。导气管的风阻越小, 测得的峰值越大, 其中管径的影响最大。当管长都为 3 m 铜管时, 流过管径 1.2 cm 的钻孔瓦斯流量最大值比流过管径 0.8 cm 的最大值高达 76%。

因此, 管道风阻对钻孔瓦斯涌出初速度测定值有重要影响, 在测定钻孔瓦斯涌出初速度时, 应对测定导气管进行规范。

参考文献:

[1] 周世宁, 孙辑正. 煤层瓦斯流动理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1965, 2(1): 24-37.
Zhou Shining, Sun Jizheng. The theory of gas flow in coal seams and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1965, 2(1): 24-37.

[2] 周世宁. 瓦斯在煤层中的流动机理[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 15-24.
Zhou Shining. Mechanism of gas flow in coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 15-24.

[3] 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, 1999: 69.

[4] 魏晓林. 有钻孔煤层瓦斯流动方程及其应用[J]. 煤炭学报, 1988, 13(1): 85-96.
Wei Xiaolin. Equation of gas flow in seams with boreholes and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1988, 13(1): 85-96.

[5] 王克全, 于不凡. 钻孔瓦斯涌出初速度影响因素分析[J]. 煤炭工程师, 1989(2): 32-36.
Wang Kequan, Yu Bufan. Analysis the influence factors of initial velocity of gas emission from borehole[J]. Coal Engineer, 1989(2):

- 32-36.
- [6] 王克全. 煤层钻孔周围瓦斯压力分布的流量反演分析法[J]. 西安矿业学院学报, 1993, 13(4): 309-315.
Wang Kequan. Back analysis method of gas flow for determining gas pressure distribution around bore in coal seam[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1993, 13(4): 309-315.
- [7] 王克全. 瓦斯径向流动理论研究[J]. 煤炭工程师, 1993(2): 35-38.
Wang Kequan. Study of gas radial flow theory[J]. Coal Engineer, 1993(2): 35-38.
- [8] 王凯, 俞启香, 蒋承林. 钻孔瓦斯动态涌出的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 279-284.
Wang Kai, Yu Qixiang, Jiang Chenglin. Study of dynamic gas emission during boring process by using numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 279-284.
- [9] 王凯, 俞启香. 钻孔法测定煤体强度的研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(6): 601-605.
Wang Kai, Yu Qixiang. Study on determination of coal mass strength by boring method[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(6): 601-605.
- [10] 罗新荣. 煤层瓦斯运移物理与数值模拟分析[J]. 煤炭学报, 1992, 17(2): 49-56.
Luo Xinrong. Physical and numeric simulation of methane migration in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 1992, 17(2): 49-56.
- [11] 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.
- [12] 魏风清, 张晋京. 钻孔瓦斯涌出初速度测试深度的探讨[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(5): 61-64.
Wei Fengqing, Zhang Jinjing. Discussion on test depth of initial speed from borehole gas emission[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(5): 61-64.
- [13] 刘海波, 程远平, 王海锋, 等. 突出煤层卸压前后钻孔瓦斯涌出初速度的变化规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 225-228.
Liu Haibo, Cheng Yuanping, Wang Haifeng, et al. Change rule of initial speed of gas emission from borehole in outburst coal seam before and after pressure relief[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 225-228.
- [14] 高建良, 侯三中. 掘进工作面动态瓦斯压力分布及涌出规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1127-1131.
Gao Jianliang, Hou Sanzhong. Dynamic distribution of gas pressure and emission around a diving roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1127-1131.
- [15] 高建良, 吴金刚. 煤层瓦斯流动数值解算时空步长的选取[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(7): 9-12.
Gao Jianliang, Wu Jingang. Determination of time step and space interval in numerical simulation of gas flow in coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(7): 9-12.

2012 年《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》(《煤炭学报》英文版) 征订启事

《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING(CHINA)》是由中国煤炭学会主办的、向国内外公开发行的英文版煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》英文版《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING(CHINA)》是向世界传播我国煤炭科学技术的重要媒体,对加强中外科学技术交流,宣传我国煤炭科学成就,提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用。及时报道我国煤炭科技新理论、新技术、新经验也是《煤炭学报》英文版的主要任务。《煤炭学报》英文版和中文版具有不同的刊登内容和各自的特点。

《煤炭学报》英文版为季刊,每期 112 页,每册国内订价 28 元,全年共收费 112 元。订阅者可直接和本编辑部联系,订单函索即寄,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部

邮政编码:100013

联系电话:(010) 84262930 联系人:毕永华

E-mail: mtxbbyh@126.com