

文章编号: 0253-9993(2008)08-0914-06

基于 LBM 方法的裂隙煤体内瓦斯抽放的模拟分析

滕桂荣, 谭云亮, 高明, 赵志刚

(山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建教育部重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 基于格子玻尔兹曼方法 (Lattice Boltzmann Method, LBM) 建立了可模拟裂隙煤体内瓦斯抽放的二维动力学模型, 对流场压力和流动速度的分布规律进行了模拟。模拟结果表明: 抽放压力、钻孔位置对抽放效果有很大影响, 抽放压力增大, 瓦斯流动速度加快, 瓦斯抽放率提高; 但是当抽放压力达到某一值时, 抽放率反而下降, 这说明抽放压力存在一最佳值; 改变钻孔的位置, 在流场上、下侧偏心开孔时, 抽放率低于在流场中心开孔, 且流场中出现了涡流, 流体在涡流处有较大的压力梯度。

关键词: 格子玻尔兹曼方法; 瓦斯抽放; 数值模拟; 瓦斯渗流

中图分类号: TD712.6 **文献标识码:** A

Simulation of gas drainage in fissured coal based on Lattice Boltzmann Method

TENG Gui-rong, TAN Yun-liang, GAO Ming, ZHAO Zhi-gang

(Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: A dynamic model for simulation of two-dimensional gas drainage in fissured coal was constructed based on Lattice Boltzmann Method (LBM), a numerical program to simulate the distribution rule of gas pressure and velocity was developed, and the gas drainage ratio was calculated by statistical method. The simulation results demonstrate that the drainage pressure and the position of drainage pore have great impacts on the gas drainage: with the increment of drainage pressure, the pressure gradient of gas round drainage pore turns bigger, and the velocity of gas flow turns faster, the gas drainage ratio becomes higher. But, as the drainage pressure reaches a certain value, the drainage ratio becomes lower. It is shown that the drainage pressure exists a critical value. As the drainage pore is in flank position, the turbulence occurs, and the gas drainage ratio is lower than that in core position. With offset relative to core position increments, the effects become more obvious. It is shown that the drainage effect in core position is better than that in flank position. The simulation results based on LBM coincide well with the related conclusions of gas flow by other methods, but the simulation program is concise and the gas pressure can be calculated directly.

Key words: Lattice Boltzmann Method (LBM); gas drainage; numerical simulation; gas seepage

煤层中赋存的瓦斯气体, 既是一种灾变因素, 又是一种洁净、高效的能源。如果在采煤之前和采煤期间, 采用技术可行、经济合理的方法, 将瓦斯从煤层中抽出并加以利用, 既可从根本上消除矿井瓦斯突出灾害, 又可获得廉价洁净的能源供应^[1]。

收稿日期: 2007-09-01 责任编辑: 毕永华

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50534080, 50674063); 山东省自然科学基金资助项目 (Y2004F11); 山东省教育厅资助项目 (J06N04); 教育部矿山灾害预防与控制重点实验室开放基金资助项目; 山东省泰山学者工程建设专项基金资助项目

作者简介: 滕桂荣 (1971—), 女, 山东青岛人, 讲师, 博士研究生。E-mail: tgrzxl@163.com

目前瓦斯抽放系统的设计主要依据经验进行, 对不同含气量和构造地质条件的预测和考虑处于定性阶段, 对抽放后瓦斯浓度和压力分布没有清楚的认识. 这样就存在瓦斯抽放孔布置不合理、瓦斯抽放时间不确定、抽放后瓦斯压力分布难以预测等问题, 而数值模拟方法可有效地解决这一问题.

20 世纪 80 年代基于分子运动论发展起来的格子波尔兹曼方法 (Lattice Boltzmann Method, 简称 LBM), 在对物理系统细观运动描述的基础上, 建立模拟物理系统演化的格子气模型. 流体的宏观特性直接由演化方程来计算, 从而建立了宏观物理量与细观结构运动演化的相互联系. 与采用传统的数值方法^[2-5]相比, LBM 方法具有如下优点: 采用显式时间推进格式, 算法简单, 基本上不存在截断误差和计算不稳定性问题; 并行性高; 压力可直接计算; 边界处理方便等. 其中压力可直接计算是其最具吸引力的地方. 目前 LBM 在多相流、化学反应扩散流、渗流、粒子悬浮流等多个领域得到成功的应用^[6-9]. 本文应用 LBM 对抽放压力和钻孔位置对瓦斯抽放效果的影响进行了模拟分析.

1 瓦斯抽放率

在煤层内钻孔, 并在钻孔处施加较大的抽放压力, 根据孔口处的瓦斯涌出量和从整个煤壁流出的瓦斯量, 计算瓦斯抽放率. 瓦斯抽放率 η 定义

$$\eta = \frac{V_{\text{pore}}}{V_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, V_{pore} 为抽放孔的瓦斯涌出量, $V_{\text{pore}} = \int dt \iint_{\Sigma_1} v_1 ds$, m^3 ; V_{total} 为巷道煤壁及抽放孔的瓦斯涌出总量,

$V_{\text{total}} = \int dt \iint_{\Sigma_1} v ds + \int dt \iint_{\Sigma_2} v_1 ds$, m^3 ; v_1 为抽放孔处瓦斯的流动速度; v 为自由渗出边界瓦斯的流动速度.

瓦斯抽放效果以抽放率为指标, 抽放率越高, 瓦斯抽放效果越好.

2 瓦斯抽放模型的建立

2.1 基于 LBM 的抽放瓦斯的基本原理

LBM 方程^[10]的标准形式为

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{\text{eq}}(x, t)], \quad (2)$$

式中, $\tau = \tau_0 / \Delta t$ 为无量纲松弛时间; $f_i(x, t)$, $f_i^{\text{eq}}(x, t)$ 表示在 t 时刻 x 处的局部分布函数和局部平衡态分布函数.

对于渗流问题, 考虑孔隙度 ϕ 的影响, 平衡态分布函数可修正^[11]为

$$f_i^{\text{eq}} = \omega_i \rho \left[1 + \frac{eu}{c_s^2} + \frac{uu : (e_i e_i - c_s^2 \mathbf{I})}{2\phi c_s^4} \right], \quad (3)$$

式中, ω_i 为权系数; ρ 为流体宏观密度; e 为瓦斯分子的流动速度; u 为瓦斯流体的宏观速度; c_s 为声速, 取值取决于选用的 LBM 模型; uu : 为瓦斯流动宏观速度的三阶张量的双点积运算; e_i 为沿 i 方向粒子的流动速度; \mathbf{I} 为单位矩阵.

对目前广泛选用的 D2Q9 模型, 离散速度方向如图 1 所示.

$$e_0 = 0 \quad (i = 0),$$

$$e_i = (\cos \theta_i, \sin \theta_i) c \quad \left(\theta_i = \frac{(i-1)\pi}{2}, i = 1 \sim 4 \right),$$

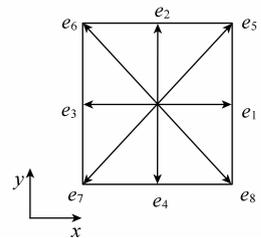


图 1 D2Q9 模型粒子速度矢量

Fig. 1 Particle velocity vector of D2Q9 mode

$$e_i = \sqrt{2}(\cos \theta_i, \sin \theta_i)c \quad \left(\theta_i = \frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}, i = 5 \sim 8\right), \quad (4)$$

式中, $c = dx/dt$ 为粒子迁移速度。

对式 (2) 等号左边在 (x, t) 作 Taylor 展开, 得

$$f_i(x + \varepsilon e_i, t + \varepsilon) - f_i(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon^n}{n!} \left(\frac{\partial}{\partial t} + e_i \frac{\partial}{\partial x} \right)^n f_i(x, t). \quad (5)$$

假定系统在平衡态附近, 利用 Chapman - Enskog 多尺度技术对方程 (5) 进行分析: 引入渗流时间尺度 t_1 和扩散时间尺度 t_2 及空间尺度 x_1 , 并将其导数展开为

$$\partial_t = \varepsilon \partial_{t_1} + \varepsilon^2 \partial_{t_2}, \quad \partial_x = \varepsilon \partial_{x_1}. \quad (6)$$

同时, 将 f_i 在 $f_i^{(eq)}$ 附近展开成 ε 幂级数形式, 即

$$f_i = \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon^n f_i^{(n)} = f_i^{(eq)} + \varepsilon f_i^{(1)} + \varepsilon^2 f_i^{(2)} + \varepsilon^3 f_i^{(3)} + \dots \quad (7)$$

忽略式 (5), (7) 中三阶以上无穷小量, 由 $\varepsilon, \varepsilon^2$ 的系数分别相等得到

$$\varepsilon^0: f_i^{(0)} = f_i^{(eq)}; \quad (8)$$

$$\varepsilon^1: \frac{\partial f_i^{(eq)}}{\partial t} + e_{i\alpha} \frac{\partial f_i^{(eq)}}{\partial x} = -\frac{1}{\tau} f_i^{(1)}; \quad (9)$$

$$\varepsilon^2: \frac{\partial f_i^{(1)}}{\partial t} + e_i \frac{\partial f_i^{(eq)}}{\partial t_1} + e_i \frac{\partial f_i^{(1)}}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial t} + e_i \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 f_i^{(eq)} = -\frac{1}{\tau} f_i^{(2)}. \quad (10)$$

对式 (9) 求零阶矩和一阶速度矩, 得到 t_1 时间尺度上的宏观方程; 对式 (10) 求零阶矩和一阶速度矩, 得到 t_2 时间尺度上的宏观方程。

通过对 t_1 和 t_2 尺度上的宏观方程进行多尺度黏合, 得到宏观的流体动力学方程为

$$\begin{cases} \nabla \cdot u = 0, \\ \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \left(\frac{u}{\phi} \right) = -\frac{1}{\rho} \nabla (\phi p) + \nu \nabla^2 u, \end{cases} \quad (11)$$

式中, p 为流体压力, $p = c_s^2 \rho / \phi$; ν 为瓦斯黏性系数, $\nu = c_s^2 (\tau - 0.5) \Delta t$ 。

对于方程 (11), 若选取孔隙度 $\phi = 1$, 则方程退化为一般流体动力学方程, 说明模型符合物理背景。至此, 完成了从 LBM 方程到宏观渗流方程的还原过程。

根据质量守恒定律和动量守恒定律, 可计算流场节点的宏观密度和宏观速度分别为

$$\sum_i f_i^{(eq)} = \rho, \quad \sum_i c_i f_i^{(eq)} = \rho u. \quad (12)$$

2.2 建模条件

为了计算简便, 对裂隙煤体中瓦斯流动模型作如下假设:

- (1) 裂隙煤体均质各向同性;
- (2) 上下顶、底板为不透气层, 且不含有瓦斯;
- (3) 流场的温度变化不大, 瓦斯在裂隙煤层中的流动按等温过程处理;
- (4) 忽略瓦斯体积力的影响。

根据上述建模条件, 瓦斯在煤层中的流动可简化为在一维无限域平行流场中的流动, 压力边界下的瓦斯抽放模型如图 2 所示。图中 p_{in} 为煤层原始瓦斯压力; p_{out} 为煤壁处的大气压力; p_{pore} 为抽放孔的抽放压力。本模型适用于单一煤层未卸压顺层钻孔抽放的情况。

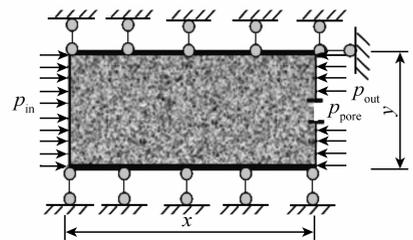


图 2 LBM 瓦斯抽放模型

Fig. 2 LBM model of gas drainage

3 煤层瓦斯抽放的 LBM 模拟分析

依据 2.2 建立的抽放模型, 根据 LBM 计算原理编制数值计算程序, 模拟流场尺寸为煤层厚度 $y = 5 \text{ m}$, 顺层钻孔方向 $x = 5 \text{ m}$, 将整个瓦斯流场划分为 80×80 个正方形网格. 程序设计中对流场尺寸、压力、速度均采用无量纲化处理. 抽放压力、钻孔位置对煤层瓦斯抽放效果有很大的影响, 研究这些参数的变化对瓦斯抽放效果的影响具有工程意义.

3.1 抽放压力的影响

与图 2 所示的抽放模型相对应, 在右边界的中心 30 ~ 50 格点处开孔, 孔的直径为 20 个网格, 左边界输入压力 $p_{\text{in}} = 1.01$, 右边界自由渗流输出压力 $p_{\text{out}} = 1$, 抽放孔压力 p_{pore} 分别设定为 0.9, 0.8, 0.7, 0.6.

图 3, 4 分别为抽放压力变化时的流场压力和速度矢量.

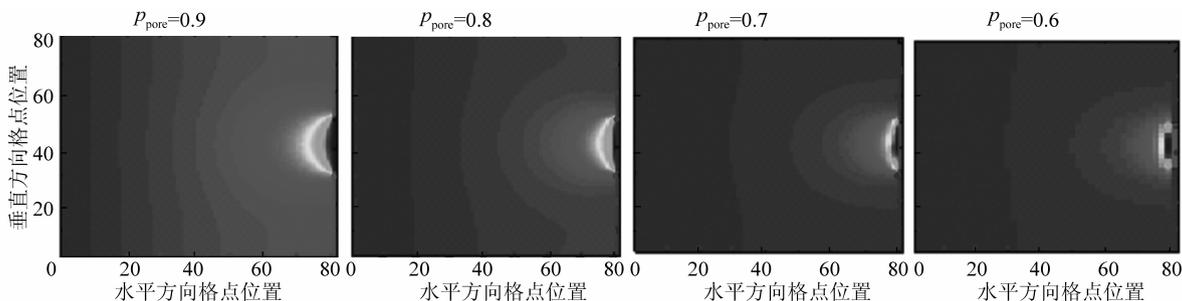


图 3 裂隙煤层中瓦斯压力分布

Fig. 3 Gas pressure distribution in fissured coal

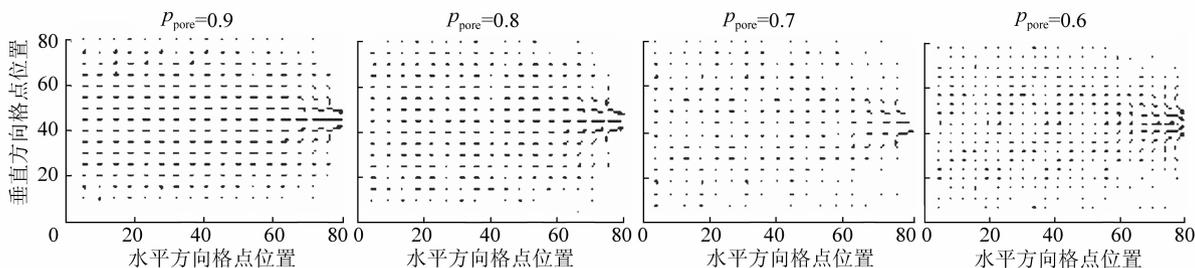


图 4 瓦斯流动的速度矢量

Fig. 4 Velocity vector graph of gas flow

与 4 种抽放压力相对应的瓦斯抽放率分别为

- (1) $p_{\text{pore}} = 0.9$, $\eta_1 = 0.691\ 808$;
- (2) $p_{\text{pore}} = 0.8$, $\eta_2 = 0.730\ 188$;
- (3) $p_{\text{pore}} = 0.7$, $\eta_3 = 0.764\ 660$;
- (4) $p_{\text{pore}} = 0.6$, $\eta_4 = 0.630\ 484$.

对图 3, 4 进行分析, 得到如下结论: (1) 钻孔抽放瓦斯, 钻孔附近区域瓦斯为径向流动, 远离孔口的区域为层流, 与文献 [12] 的结论相吻合; (2) 随着抽放压力的增大, 抽放率先是增大; 当抽放压力超过某一值时, 抽放率反而下降, 这是由于抽放压力过大, 裂隙煤体骨架被压实, 孔隙度减小; (3) 钻孔附近煤壁的压力梯度随着抽放压力的增大而增大. 根据氏平增之的研究结果^[13], 煤层内瓦斯压力梯度过大, 容易造成瓦斯突出, 所以在确定抽放压力时要综合考虑抽放效果和对煤与瓦斯突出的诱发作用.

3.2 开孔位置的影响

图 5, 6 为抽放压力不变, 钻孔位置变化时的压力分布、瓦斯流动速度矢量.

抽放压力不变而钻孔位置变化时, 抽放率分别为

- (1) 30 ~ 50 格点处开孔, $\eta = 0.691\ 808$;
- (2) 20 ~ 40 格点处开孔, $\eta = 0.668\ 631$;
- (3) 50 ~ 70 格点处开孔, $\eta = 0.632\ 917$;
- (4) 10 ~ 30 格点处开孔, $\eta = 0.632\ 917$.

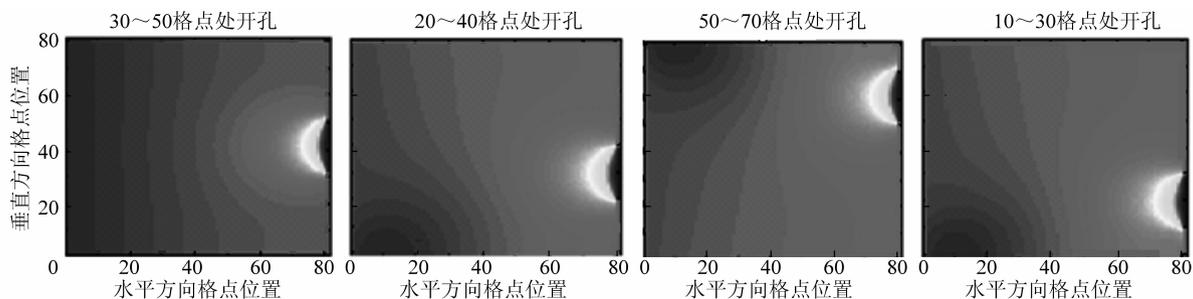


图 5 瓦斯压力的分布

Fig. 5 Gas pressure distribution in fissured coal

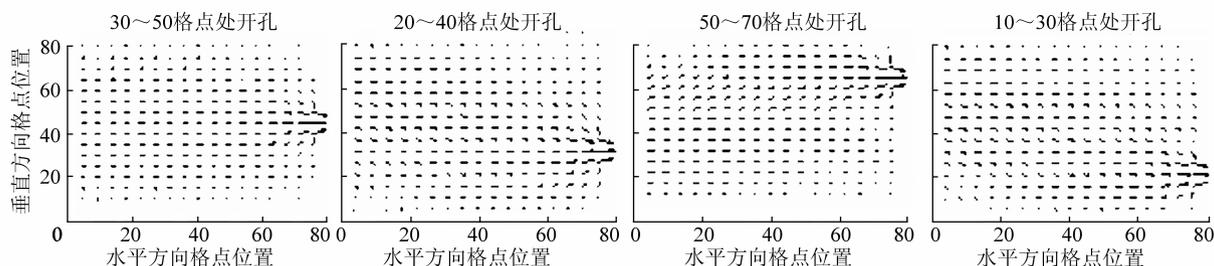


图 6 瓦斯流场速度矢量

Fig. 6 Velocity vector graph in gas flow field

(3), (4) 两种情况孔口位置对称, 抽放效果相同. 抽放压力相同时, 偏心开孔的抽放率低于中心开孔的情况, 抽放孔偏离流场中心距离越远, 抽放率越低.

4 结 论

(1) 基于 LBM 建立了可模拟裂隙煤体内瓦斯抽放的二维动力学模型, 根据 LBM 计算原理开发了数值计算程序, 对瓦斯的压力分布规律和流动速度进行了模拟, 通过统计得到瓦斯抽放率. 模拟结果表明, 抽放压力对瓦斯的抽放效果有显著影响: 抽放压力越大, 抽放率越高, 瓦斯抽放效果越好; 但当抽放压力超过某一特定值时, 抽放率反而下降, 这说明抽放压力存在一最佳值.

(2) 在煤层厚度中心开孔的抽放率高于在偏心开孔的抽放率; 开孔位置离中心越远, 抽放率越低, 抽放效果越差.

(3) LBM 能有效地模拟瓦斯在裂隙煤体中的运移规律, 这为进一步探讨瓦斯抽放机理提供了新的技术手段.

参考文献:

- [1] 俞启香. 矿井瓦斯防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1993.
Yu Qixiang. Gas prevention and cure on coal mine [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1993.
- [2] 赵阳升. 煤体-瓦斯耦合数学模型与数值解法 [J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13 (3): 229-239.
Zhao Yangsheng. Coupled mathematical model on coal mass-gas and its numerical method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13 (3): 229-239.
- [3] Ren T X, Edwards J S, David J. Simulation of methane drainage boreholes using computational fluid dynamics [J]. American Society of Mechanical Engineers Pressure Vessels and Piping Division, 1999, 397: 319-326.
- [4] 朱诗山, 刘向阳. 低透气性薄煤层瓦斯抽放方法 [J]. 煤炭技术, 2003, 22 (8): 75-76.
Zhu Shishan, Liu Xiangyang. Way of exhausting gas from low permeability thin seam [J]. Coal Technology, 2003, 22 (8):

75 - 76.

- [5] 李宗翔. 综放工作面采空区瓦斯涌出规律的数值模拟研究 [J]. 煤炭学报, 2002, 27 (2): 173 - 178.
Li Zongxiang. Study on numerical simulation of gas emission regularity and boundary condition of the goaf in coal caving of the fully-mechanized [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27 (2): 173 - 178.
- [6] Spaid M A A, Phelan F R J. Lattice Boltzmann methods for modeling microscale flow in fibrous porous media [J]. Physical Fluids, 1997, 9: 2 468 - 2 474.
- [7] Hou S, Zou Q, Chen S, et al. Simulation of cavity flow by the Lattice Boltzmann method [J]. Computation Phys., 1995, 118: 329 - 347.
- [8] Succi S, Foti E, Higuera F. Three dimensional flows in complex geometries with the Lattice Boltzmann method [J]. Europe Phys., 1989, lett. 10: 433 - 438.
- [9] 许友生. 用晶格 Boltzmann 方法研究多孔介质内流体的复杂动力学特征 [D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
Xu Yousheng. Lattice boltzmann method for complex fluids in porous media [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006.
- [10] 郭照立, 郑楚光, 李青, 等. 流体动力学的格子 Boltzmann 方法 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002.
Guo Zhaoli, Zheng Chuguang, Li Qing, et al. Lattice boltzmann method for hydro dynamics [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2002.
- [11] Guo Zhaoli. Lattice Boltzmann model for incompressible flows through porous media [J]. Phys. Rev. E., 2002, 66 (3): 036304 - 1 - 9.
- [12] 孙培德. Sun 模型及其应用——煤层气越流固气耦合模型及可视化模拟 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
Sun Peide. Sun model and its applications: the gas leak flow and visual simulations [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002.
- [13] 氏平增之, 刘冠玉. 瓦斯突出危险区域的爆破 [J]. 煤矿安全与环保, 1989 (5): 46 - 53.
Shi Pingzengzhi, Liu Guanyu. Exploding unsafe area of gas outburst [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1989 (5): 46 - 53.

2009 年《煤炭学报》征订启事

《煤炭学报》是中国煤炭学会主办的、向国内外发行的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》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值, 被 Ei、IEA Coal Abstract CD-ROM、中国科学引文数据库、科学技术文摘速报 (日本)、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖, 获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖, 获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖, 获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获首届国家期刊奖。2004, 2007 年分别入选第三、第六届百种中国杰出学术期刊。

《煤炭学报》深受广大作者、读者的爱护和支持, 也受到各级部门的重视, 在学术水平上具有较高的地位, 很多单位都将在《煤炭学报》发表的论文作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊, 每期 144 页, 每册订价 31 元, 全年共收费 372 元。欲订者可直接与本编辑部联系, 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, E-mail: mtxbbyh@126.com, mtxb@vip.163.com