

文章编号: 0253-9993(2009)07-0865-06

浅埋煤层覆岩关键层结构分类

许家林¹, 朱卫兵¹, 王晓振¹, 伊茂森²

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国神华能源股份有限公司 神东煤炭分公司, 陕西 神木 719315)

摘要: 以神东矿区浅埋煤层开采为工程背景, 对浅埋煤层覆岩关键层结构的类型及其破断失稳特征进行了研究. 结果表明, 浅埋煤层覆岩关键层结构类型可分为单一关键层和多层关键层结构; 单一关键层结构又分为厚硬单一关键层结构、复合单一关键层结构、上煤层已采单一关键层结构3种类型. 单一关键层结构是导致浅埋煤层特殊采动损害现象的地质根源, 浅埋煤层单一关键层结构采动破断运动不仅对工作面矿压产生影响, 同时会影响顶板涌水溃沙和地表沉陷. 关键层破断块体结构承担的载荷层厚度大而不能满足砌体梁结构不发生滑落失稳的条件, 从而导致关键层破断块体滑落失稳, 这是导致神东矿区浅埋煤层单一关键层结构工作面易出现台阶下沉和压架出水等采动损害问题的力学机理. 确定了神东矿区浅埋煤层覆岩关键层结构类型的判别方法.

关键词: 浅埋煤层; 关键层; 涌水溃沙; 采动裂隙; 压架事故; 绿色开采

中图分类号: TD31 文献标识码: A

Classification of key strata structure of overlying strata in shallow coal seam

XU Jia-lin¹, ZHU Wei-bing¹, WANG Xiao-zhen¹, YI Mao-sen²

(1. State Key Laboratory of Coal Resource and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008; 2. Shendong Coal Company, China Shenhua Energy Company Limited, Shenmu 719315, China)

Abstract: Based on the engineer background of shallow coal seam extracted in Shendong coal field in China, both the structure type and the breakage and unbalance character of overburden key stratum (KS) were studied as the condition of shallow coal seam. The results show that the structure type of overburden KS can be classified into four groups within two types, single KS structure and multi-KS structure. Single KS structure is divided into thick-rigid group, compound group and over seam extracted group. The unbalance of single KS structure is the geologic season to the unusual mining subsidence phenomenon as in shallow coal seam, and its breakage process not only engenders huge effect to underground pressure around work face but also causes the water or sand rush from the roof and the surface subsidence. The block structure formed by the breakage of KS bears too much self-load to come to the sliding criteria of voussoir beam, so that the blocks slide down and the structure is unbalanced, which is the dynamic mechanism of frequent sidestep subsidence, water and sand rush, and mechanized supports crushing happened around workface covered by single KS in shallow coal seam extracted in Shendong coal field. The distinguishing method of overburden KS types in shallow coal seam extracted in Shendong coal field was defined.

Key words: shallow coal seam; key stratum; water and sand inrush; mining crack; fully mechanized supports crushing accident; green mining

收稿日期: 2008-07-30 责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2007CB209400); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-05-0478)

作者简介: 许家林(1966—), 男, 江苏句容人, 教授, 博士生导师. Tel: 0516-83885581, E-mail: cumtjxl@cumt.edu.cn

神东矿区浅埋煤层开采中遇到了一系列影响安全高效生产的采动损害问题,如工作面压架和冒顶事故、涌水溃沙事故、地表大面积塌陷且裂缝发育等^[1-5],需对此进行深入研究,以揭示其发生机理与产生条件,提出防范对策.神东矿区浅埋煤层开采中遇到的上述采动损害问题都是由采动覆岩破断运动所致,掌握浅埋煤层采动覆岩破断运动规律是解决上述问题的基础.岩层控制的关键层理论为浅埋煤层采动覆岩破断运动规律的研究提供了有力的理论工具.事实上,已有学者应用关键层理论对浅埋煤层采场矿压问题开展了卓有成效的研究工作,侯忠杰等应用岩层控制的关键层理论对神东矿区浅埋煤层上覆基岩全厚切落的机理进行了合理的解释,提出了浅埋煤层复合关键层的概念,并基于关键层理论建立了判别浅埋煤层覆岩是否为复合关键层及是否全厚切落的条件^[6-8].事实上,同样是浅埋煤层,由于其覆岩岩性结构组合关系的不同,工作面矿压显现呈现不同的特点,即使矿压显现都强烈,其产生的机理也不一定相同,如印度浅埋煤层与神东矿区浅埋煤层压架事故的机理是有差异的^[9-10].因此,有必要对浅埋煤层覆岩关键层结构类型进行分类,并提出具体条件下覆岩关键层结构类型的判别方法.

1 浅埋煤层覆岩关键层结构分类

根据不同矿区浅埋煤层覆岩赋存结构特征,将浅埋煤层覆岩关键层结构分为如图 1 所示的 2 类 4 种:第 1 类为单一关键层结构,包括厚硬单一关键层结构、复合单一关键层结构和上煤层已采单一关键层结构等 3 种;第 2 类为多层关键层结构 1 种.

1.1 厚硬单一关键层结构

厚硬单一关键层结构(图 2(a))指浅埋煤层基岩仅有一层硬岩层,其厚度和强度很大,距离煤层较近.该层硬岩层为覆岩中惟一关键层,即为主关键层,该主关键层的破断失稳对工作面矿压显现与地表沉陷都有直接的显著影响,尤其是对工作面矿压会造成严重的影响.

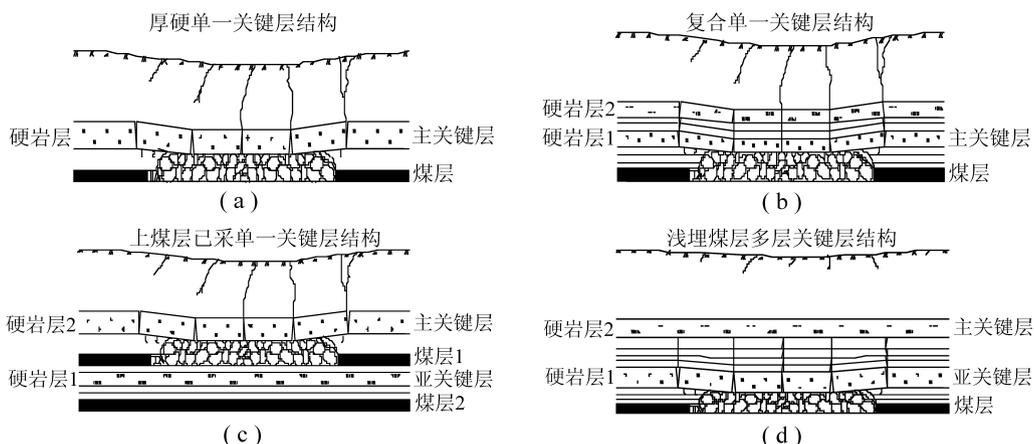


图 2 浅埋煤层覆岩关键层结构

Fig. 2 The key strata structure of overlying strata in shallow

神东矿区浅埋煤层覆岩不存在厚硬单一关键层结构,在我国的大同矿区浅埋煤层、印度部分浅埋煤层存在着此种厚硬单一关键层结构.图 3 为大同矿区马脊梁矿 402 盘区浅埋煤层覆岩关键层位置判别结果,可见,距主采煤层 2.06 m 处厚 45.65 m 的粗砂岩为覆岩中的惟一硬岩层,也是仅有的 1 层关键层,即主关键层.因此,覆岩关键层结构类型属于厚硬单一关键层结构.

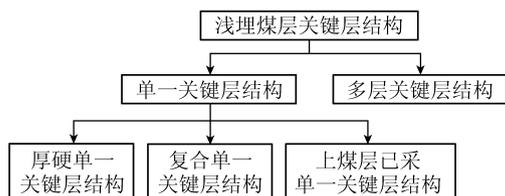


图 1 浅埋煤层覆岩关键层结构分类

Fig. 1 Structure classification of key strata of overlying strata in shallow coal seam

层号	厚度/m	埋深/m	岩性	关键层位置	备注	柱状
4	23.43	23.43	表土层			
3	45.65	69.08	粗砂岩	主关键层	硬岩层1	
2	2.06	71.14	砂砾岩			
1	6.32	77.46	煤			

图 3 马脊梁矿 38354 号钻孔柱状及覆岩关键层判别结果

Fig. 3 Histogram of No. 38354 drilling and key strata key distinguish results of Majiliang Mine

破断失稳对工作面矿压显现与地表沉陷同样有显著影响。

复合单一关键层结构类型在神东矿区浅埋煤层中普遍存在。图 4 (a) 为大柳塔煤矿 1203 工作面典型柱状进行关键层判别结果，基岩内存在 2 层硬岩层，由下往上分别为厚 2.2 m 的粉砂岩、厚 3.9 m 的中砂岩，但关键层仅有 1 层，即厚 2.2 m 的粉砂岩为主关键层，硬岩层 1 与硬岩层 2 之间产生复合效应并同步破断，形成了复合单一关键层结构。

大柳塔煤矿 1203 工作面						
层号	厚度/m	埋深/m	岩性	关键层位置	备注	柱状
11	27.0	27.0	风积沙			
10	3.0	30.0	风化砂岩			
9	2.0	32.0	粉砂岩			
8	2.4	34.4	砂岩			
7	3.9	38.3	中砂岩		硬岩层2	
6	2.9	41.2	砂质泥岩			
5	2.0	43.2	粉砂岩			
4	2.2	45.4	粉砂岩	主关键层	硬岩层1	
3	2.0	47.4	砂质泥岩			
2	2.6	50.0	砂质泥岩			
1	6.3	56.3	1 ⁻² 煤			

(a)

活鸡兔井 21304 工作面						
层号	厚度/m	埋深/m	岩性	关键层位置	备注	柱状
14	21.40	21.40	粉砂岩			
13	26.58	47.98	粉砂质泥岩		硬岩层5	
12	12.43	60.41	细粒砂岩	主关键层	硬岩层4	
11	3.19	63.60	粉砂质泥岩			
10	3.00	66.60	细粒砂岩			
9	7.84	74.44	砂泥岩互层		硬岩层3	
8	0.22	74.66	泥岩			
7	3.26	77.92	1 ⁻² 煤			
6	0.61	78.53	泥岩			
5	6.37	84.90	细粒砂岩		硬岩层2	
4	5.64	90.54	中粒砂岩	亚关键层	硬岩层1	
3	3.27	93.81	砂泥岩互层			
2	0.53	94.34	粉砂质泥岩			
1	4.84	99.18	1 ⁻² 煤			

(b)

图 4 大柳塔煤矿 1203 工作面和活鸡兔井 21304 工作面钻孔柱状及覆岩关键层判别结果

Fig. 4 Histogram drilling and key strata distinguish result of No. 1203 working face (Daliuta Mine) and 21304 working face (Huojiu Mine)

1.3 上煤层已采单一关键层结构

上煤层已采单一关键层结构 (图 2 (c)) 是指浅埋深两近距离煤层间的岩层中存在 1 层关键层，在上部煤层开采后，上部煤层覆岩关键层已经破断，开采下部煤层时两近距离煤层间的那层关键层成为覆岩主关键层，从而形成上煤层已采单一关键层结构。

上煤层已采单一关键层结构破断时会同时影响到矿压显现和地表沉陷，对矿压显现影响的强烈程度受上煤层关键层破断后是否形成稳定结构影响。图 4 (b) 为神东矿区大柳塔煤矿活鸡兔井三盘区北翼 37 号钻孔柱状及覆岩关键层判别结果，当 1⁻²煤开采后，其上部关键层破断后，采 1⁻²煤时 1⁻²煤与 1⁻²煤之间厚 5.64 m 的关键层便成为主关键层，形成上煤层已采单一关键层结构。

1.4 多层关键层结构

多层关键层结构 (图 2 (d)) 是指开采煤层上方有多层关键层，有亚关键层和主关键层。对于采深较大，基岩较厚的煤层，覆岩关键层结构一般为多层关键层结构。对如图 4 (a) 所示神东矿区大柳塔煤矿 1203 工作面的柱状，在岩层破断角与松散层载荷传递系数保持不变的条件下，将风积沙厚度由 27 m 减小至 23 m 时，覆岩关键层判别结果如图 5 所示，2 层硬岩层中厚 3.9 m 的中砂岩为主关键层，而厚 2.2 m

1.2 复合单一关键层结构

复合单一关键层结构 (图 2 (b)) 是指浅埋煤层基岩中存在 2 层或 2 层以上的硬岩层，但硬岩层间产生复合效应并同步破断，使得靠近煤层的第 1 层硬岩层成为基岩中的唯一关键层，即主关键层。此类关键层结构中的硬岩层厚度与强度都不大，然而由于主关键层与其上方多层硬岩层处于整体复合破断关系，导致其

层号	厚度/m	埋深/m	岩性	关键层位置	备注	柱状
11	23.0	23.0	风积沙			
10	3.0	26.0	风化砂岩			
9	2.0	28.0	粉砂岩			
8	2.4	30.4	砂岩			
7	3.9	34.3	中砂岩	主关键层	硬岩层2	
6	2.9	37.2	砂质泥岩			
5	2.0	39.2	粉砂岩			
4	2.2	41.4	粉砂岩	亚关键层	硬岩层1	
3	2.0	43.4	砂质泥岩			
2	2.6	46.0	砂质泥岩			
1	6.3	52.3	1 ⁻² 煤			

图5 风积沙厚度对关键层判别结果的影响

Fig. 5 Effect of the depth of aeolian sand on key strata distinguish

的粉砂岩转变为亚关键层,表明这2层硬岩层之间的破断顺序是逐层破断的,整个覆岩关键层结构转由复合单一关键层结构转变为多层关键层结构.由此可见,在基岩条件不变的情况下,风积沙厚度是影响神东矿区浅埋煤层关键层结构类型的重要因素.

2 浅埋煤层单一关键层结构破断失稳特征

利用砌体梁结构的“S-R”稳定理论可以对神东矿区浅埋煤层开采覆岩单一关键层结构破断失稳为何易引起工作面台阶下沉和压架作出解释.关键层破断块体形成的砌体梁结构不发生滑落失稳的条件^[11]为

$$h + h_1 \leq \frac{\sigma_c}{30\rho g} (\tan \varphi + \frac{3}{4} \sin \theta_1)^2, \quad (1)$$

式中, h 为承载层厚度; h_1 为承载层所负载荷岩层厚度; σ_c 为承载层的抗压强度; ρg 为岩体的体积力; θ_1 为砌体梁中暴露岩块断裂后的回转角; $\tan \varphi$ 为岩块间的摩擦因数.

由式(1)可知,要想关键层稳定、不发生滑落失稳,关键层和基岩层的厚度之和必须满足此公式.当模型中关键层的厚度、关键层的抗压强度、岩体的体积力、岩体间的摩擦因数和砌体梁中暴露岩块断裂后的回转角都是定值时,此公式相当于关键层和关键层所负载荷岩层厚度之和小于或等于一个常数.当覆岩呈复合单一关键层结构时,关键层所负载荷岩层厚度之和增加,不再满足式(1),导致关键层滑落失稳,关键层和上部的基岩整体垮落.工作面顶板岩层出现复合单一关键结构破断时,开采工作面将形成一定范围内的岩层“全厚切落式”垮落,顶板出现台阶下沉,同时伴随着来压强度大,速度快,具有较强的冲击力等特点,如果支架的强度不够大,易出现支架压死现象,造成工作面压架冒顶事故.

对于上煤层已采单一关键层结构,其破断失稳特征与上部煤层开采后其覆岩关键层破断块体结构是否失稳关系很大.如果上部煤层开采后其覆岩关键层破断块体结构是稳定的,即上煤层开采后关键层破断后的块体在下煤层开采时能相互咬合,则下部煤层开采时其覆岩单一关键层结构破断后的砌体梁结构一般是稳定的,工作面矿压显现一般不会出现复合单一关键层结构条件下的压架事故.如果上部煤层开采后其覆岩关键层破断块体结构是失稳的,即上煤层开采后关键层破断后的块体在下煤层开采时不能相互咬合,则下部煤层开采时其覆岩单一关键层结构破断后的砌体梁结构易出现滑落失稳,工作面矿压显现异常强烈,易出现类似于复合单一关键层结构条件下的压架事故.其原因是上部煤层失稳的块体结构不能承担载荷,而将所有岩层载荷作用于下部煤层的单一关键层上,即 h_1 过大使得单一关键层破断后的砌体梁结构不能满足式(1)砌体梁结构的滑落失稳条件.如活鸡兔井21304工作面开采1⁻²煤层,其上部的1^{-2上}煤层已开采,工作面覆岩关键层结构类型属于上煤层已采单一关键层结构(图4(b)).21304工作面开采过程中曾发生了3次强烈的矿压显现,在30~78号支架间发生了端面冒顶和台阶下沉.对应于井下工作面冒顶位置的地面在21304工作面采到以前存在较明显的台阶下沉,说明上部1⁻²煤层开采后其上覆关键层破断块体结构是处于滑落失稳状态的,从而造成了21304工作面的动载矿压灾害.对于上分层已采单一关键层结构,如何判别上部煤层开采后其上覆关键层破断块体结构的稳定状态及其影响条件,如地表沟壑的影响等,是有待深入研究的问题.

3 神东矿区浅埋煤层覆岩关键层结构类型的判别方法

在对神东矿区浅埋煤层覆岩关键层结构分类的基础上,可以采用已有的关键层判别软件(KSPB)进

行具体条件下覆岩关键层结构类型的判别^[11-13]。在用关键层判别软件(KSPB)进行判别的时候,需要输入一系列判别参数:岩层厚度、密度、抗拉强度、弹性模量、岩性、岩层破断角、松散层载荷传递系数。其中岩层厚度、岩性可以通过矿区钻孔柱状图获得;密度、抗拉强度、弹性模量可以通过制作标准岩样进行岩石物理参数测试试验获得;但对判别结果起直接影响作用的岩层破断角、松散层载荷传递系数并不能直接获得。对于岩层破断角,可以通过现场地表沉陷实测结果,得出开采对地表影响的充分采动角,所得角度与判别软件中岩层破断角相近。对于松散层载荷传递系数的选取,要以表土层厚度、颗粒黏结程度、土质性质等相关土力学参数为参考。

通过大量的判别和开采实际的对比,同时通过钻孔原位观测的工程验证,确定的神东矿区浅埋煤层覆岩关键层判别软件中岩层破断角取值范围为 $75 \sim 85^\circ$,载荷传递系数取值范围为 $0.6 \sim 0.8$ 。上述岩层破断角和载荷传递系数在煤层埋深越小,则取值越往上限。如埋深60 m时,岩层破断角可取 85° ,载荷传递系数可取0.8。实际应用证明,上述关键层判别软件中的岩层破断角和载荷传递系数的取值基本符合神东矿区浅埋煤层实际。

4 结 论

(1) 将浅埋煤层覆岩关键层结构分为2类4种,即单一关键层结构和多层关键层结构,单一关键层结构包括厚硬单一关键层、复合单一关键层、上煤层已采单一关键层结构等类型。

(2) 可以采用关键层判别软件KSPB对具体条件浅埋煤层覆岩关键层结构类型进行判别,对于神东矿区浅埋煤层,关键层判别软件中的岩层破断角可取 $75 \sim 85^\circ$,载荷传递系数可取 $0.6 \sim 0.8$ 。

(3) 对于浅埋煤层单一关键层结构,关键层破断块体结构不能满足砌体梁结构不发生滑落失稳的条件,从而导致工作面易出现台阶下沉和压架等强烈的矿压显现。对于上分层已采单一关键层结构,上部煤层开采后其覆岩关键层破断块体结构的稳定状态是影响下部煤层开采时工作面矿压显现强烈程度的重要因素。

参考文献:

- [1] 张俊云,侯忠杰,田瑞云,等.浅埋采场矿压及覆岩破断规律[J].矿山压力与顶板管理,1998(3):9-11.
Zhang Junyun, Hou Zhongjie, Tian Ruiyun, et al. Superficial underground pressure and rupture rule of overlying strata [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1998 (3): 9-11.
- [2] 黄庆享.浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000.
Huang Qingxiang. Study on roof structure and ground control in shallow seam longwall mining [M]. China University of Mining and Technology Press, 2000.
- [3] 魏秉亮.神府矿区突水溃沙地质灾害研究[J].中国煤田地质,1996,8(2):28-30.
Wei Bingliang. Study on geological harm of blouning out water and bursting sand in Shenfu coal mining area [J]. Coal Geology of China, 1996, 8 (2): 28-30.
- [4] 杨鹏,冯武林.神府东胜矿区浅埋煤层涌水溃砂灾害研究[J].煤炭科学技术,2002,30(S):65-69.
Yang Peng, Feng Wulin. Research on disaster of water inrush and sand inrush in shallow seam of Shenfu Dongsheng mining area [J]. Coal Science and Technology, 2002, 30 (S): 65-69.
- [5] 魏秉亮,范立民,杨宏科.浅埋近水平煤层采动地面变形规律研究[J].中国煤田地质,1999,11(3):44-47.
Wei Bingliang, Fan Limin, Yang Hongke. On the surface deformation of coal mining in shallow coal seam [J]. Coal Geology of China, 1999, 11 (3): 44-47.
- [6] 侯忠杰.浅埋煤层关键层研究[J].煤炭学报,1999,24(4):359-363.
Hou Zhongjie. Study on key stratum in shallow seam [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24 (4): 359-363.
- [7] 侯忠杰.组合关键层理论的应用研究及其参数确定[J].煤炭学报,2001,26(6):611-615.
Hou Zhongjie. Study on application of combinatorial key stratum theory and parameters determining [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26 (6): 611-615.

- [8] 侯忠杰. 地表松散层浅埋煤层组合关键层的稳定性分析 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (2): 127-131.
Hou Zhongjie. Analysis of combinatorial key strata stability in shallow coal seam with thick loose bed [J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25 (2): 127-131.
- [9] 赵宏珠. 印度浅埋深难垮顶板煤层地面爆破综采研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1999 (4): 57-61.
Zhao Hongzhu. The study of top-coal caving by surface blasting under conditions of shallow buried seams and poor main roof in india [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999 (4): 57-61.
- [10] 赵宏珠. 浅埋采动煤层工作面矿压规律研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1996 (2): 23-27.
Zhao Hongzhu. Study on strata behavior regularity in the face of superficial coal mine [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1996 (2): 23-27.
- [11] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
Qian Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin, et al. Theory of key stratum in ground control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [12] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法 [J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29 (5): 463-467.
Xu Jialin, Qian Minggao. Distinguishing method of position of overlying key stratum [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29 (5): 463-467.
- [13] 许家林, 吴朋, 朱卫兵. 关键层判别方法的计算机实现 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2000 (4): 29-31.
Xu Jialin, Wu Peng, Zhu Weibing. Computer realization of judging key stratum [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2000 (4): 29-31.

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。欲订读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