

文章编号:0253-9993(2013)02-0177-06

煤岩组合结构失稳滑动过程的实验研究

姜耀东^{1,2},王涛^{1,3},宋义敏⁴,王欣²,张伟²

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;
3. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083;4. 北方工业大学建筑工程学院,北京 100144)

摘要:为了研究结构失稳型冲击地压机理,依据双面剪切实验模型设计了砂岩-煤组合试样在不同轴向荷载下的滑动摩擦实验,运用数码相机和声发射记录仪搭建了声光监测系统,克服以往煤岩摩擦实验不易进行位移观测的难题。实验研究了煤岩组合样本失稳滑动的产生条件、特定条件下的滑动类型、位移演化规律以及滑动过程所伴随的声发射特征。实验发现:组合结构的滑动形式与轴向荷载具有相关性,轴向荷载越大,越易于出现失稳滑动;失稳滑动前无明显的位移征兆,失稳滑动后,滑动位移快速增长;产生滑动时的剪切应力峰值与轴向荷载呈正相关性,而失稳滑动产生的位移量与轴向荷载无相关性,本次实验一次失稳滑动产生的最大滑动位移为 35.5 μm ,最小为 5.6 μm ;试件滑动前有较为密集的声发射事件出现,稳定滑动后,声发射数降低。实验模拟了结构失稳型冲击地压的发生过程,并对于认识断层活化,以及煤体克服顶底板夹持作用突然滑出的物理过程具有重要意义。

关键词:煤岩;结构失稳;声发射;冲击地压;数字散斑

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A

Experimental study on the stick-slip process of coal-rock composite samples

JIANG Yao-dong^{1,2}, WANG Tao^{1,3}, SONG Yi-min⁴, WANG Xin², ZHANG Wei²

(1. State Key Lab of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Faculty of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 4. College of Architectural Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: On the basis of double-sided shear experimental model, sliding friction experiments under different axial loads to the combination of sandstone-coal samples were done by using digital cameras and acoustic emission recorder to build a sound and light monitoring system, and overcome the problem that the displacement was not easy to be observed in previous coal rock friction experiments. The experiment studied the unstable sliding production condition of the combination of coal and rock samples, the sliding type under certain conditions, displacement evolution law as well as the acoustic emission law accompanied by sliding process. The experiment shows that the sliding form of composite structures are relevant to the axial load, the greater the axial load is, the unstable sliding is more likely to appear; no obvious signs of displacement appear before unstable sliding and the sliding displacement grow rapidly after unstable sliding; the peak value of shear stress is positively correlated to axial load while sliding, and the displacement generated by unstable sliding has no correlation with axial stress. The maximum unstable sliding displacement of the test was 35.5 μm , and the minimum value was 5.6 μm ; there are intensive acoustic emission events before the specimen sliding, after sliding becoming stable, acoustic emission counts decreased. The experiment simulated the occurrence

收稿日期:2012-03-14 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2010CB226801);国家自然科学基金资助项目(51174213);新世纪优秀人才项目(NCET-10-775)

作者简介:姜耀东(1958—),男,江苏海安人,教授,博士生导师,博士。E-mail:jiangyd@cumt.edu.cn

process of structural instability of rock burst, and it is of great significance for understanding the fault activation, as well as the physical process that the coal overcomes the roof and floor clamping action and sudden sliding off.

Key words: coal; stick-slip; acoustic emission; rock burst; digital speckle

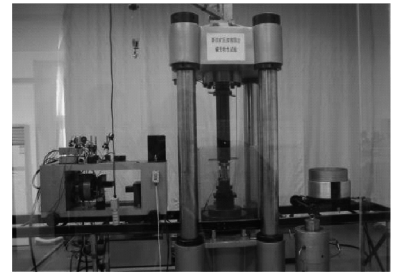
摩擦现象在地学领域受到广泛关注,一方面摩擦现象普遍存在于各种尺度的地质运动中,小到节理裂隙,大至板块运动,都存在着地质摩擦现象;另一方面在地震研究中,摩擦现象中的黏滑被认为是构造地震的一种发生机制;这两个方面的原因促使人们对岩石摩擦现象的研究成为构造物理学和震源物理学的关键问题^[1]。自岩石黏滑现象可作为浅源地震的一种机制^[2]这一观点被提出以来,地震学者们通过岩石摩擦实验对黏滑失稳过程进行了广泛深入的研究^[3-5],并逐渐引入了众多先进的实验手段和观测设备。

矿山开采中,开采引起断层两盘的相对运动,工作面煤体和顶底板间的相对运动,也都存在着摩擦滑动现象,因此,在冲击地压尤其是结构失稳型冲击地压发生机理的研究中,有学者引入了黏滑失稳理论^[6-7],认为此类冲击地压是由于扰动作用使得不连续面间的黏附摩擦转变为滑动摩擦而发生动力失稳的现象。对于引入黏滑理论的煤岩动力失稳机理的研究学者们表现出了浓厚的研究兴趣^[8-11]。实验研究方面,对于岩石材料的摩擦实验方法有直剪法、三轴实验法、双向摩擦法和双面剪切摩擦法。三轴实验法可以施加很高的正应力,但由于摩擦过程中接触面积不断变化,而且试件可能在实验过程中发生扭转,接触面应力状态难以确定,滑动位移不易直接测量。有学者用三轴加载装置对 3 种煤岩试样进行了摩擦滑动实验^[12],从加载过程的应力演化角度分析了煤岩失稳滑动规律,受实验条件的限制,所能施加的监测手段相对有限,对于失稳滑动前后试样变形特征和结构面错动位移规律并未涉及。位移场的研究是煤岩滑动失稳问题研究的一项重要内容,它能更直观地反映煤岩结构面的变形和运动模式,便于分析结构面失稳错动的机理。

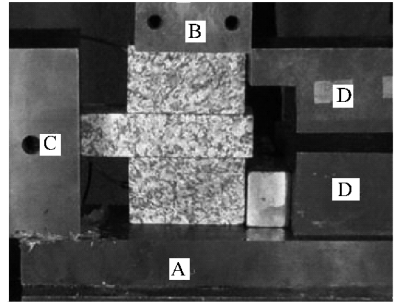
本文采用双轴加载系统对砂岩-煤组合试样进行双面剪切摩擦实验,双面剪切摩擦法在实验过程中具有接触面积不变的特点,滑动面上的应力状态容易确定,同时可以容许较大的滑动位移,位移量可以直接监测。实验利用数字散斑相关方法和声发射技术,对断层位移场的时空演化规律和失稳滑动过程伴随出现的声发射现象进行研究。煤层及相关岩石摩擦问题的深入研究对于分析结构失稳型冲击地压机理具有重要意义。

1 双面剪切摩擦实验

实验在岩石双轴加载试验机上进行,试验机在竖直方向和水平方向具有独立油缸和加载机构,能满足两个正交方向的独立加载,实验加载装置如图 1(a)所示。



(a) 双轴加载试验机



(b) 装载后的试验样本

图 1 实验加载装置及样本

Fig. 1 Biaxial testing machine and samples

A—轴向加载端;B—轴向反力端;C—水平加载端;D—水平反力端

装载后的样本如图 1(b)所示,中间为煤样、上下两端为砂岩试样。试件粗加工之后用 300 号金刚砂进行精细研磨,中间煤试件尺寸为 100 mm×25 mm×25 mm,两端砂岩试件的尺寸为 60 mm×35 mm×25 mm,滑动面的范围为 60 mm×25 mm。图中 A, C 端为加载端, B, D 端为固定位移的反力端,垫块之间、垫块与试样之间涂有凡士林,防止垫块产生不稳定滑动。

定义竖直加载方向为轴向,水平加载方向为剪切方向。试验时首先施加轴向应力,缓慢加载至设计值,对试验机采用负荷控制模式,使其保持轴向应力设计值不变;然后采用位移控制模式加载剪切应力,观察实验中出现的摩擦滑动特征;最后当样本组合结构产生破坏、试样出现多次失稳滑动、中间试件的剪切位移达到试验机加载行程极限等任一条件达到时即判断实验结束。

实验样本中砂岩密度 2.5 g/cm^3 , 弹性模量 23.8 GPa , 泊松比 0.19 , 单轴抗压强度 82.1 MPa 。煤密度 1.4 g/cm^3 , 弹性模量 3.4 GPa , 泊松比 0.16 , 单轴抗压强度 23.6 MPa 。共进行 5 组试样的实验, 各组实验的条件见表 1。

表 1 实验条件与结果

Table 1 Experimental conditions and results

实验编号	轴向应力/MPa	剪应力峰值/MPa	应力降/MPa	滑动量/ μm	稳定滑动速度/ $(\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	5	2.3			2.7
2	8	3.3	0.7	35.5	4.7
3	9	3.2	0.3	5.6	
4	10	4.1			4.9
5	12	3.3	0.25	23.4	5.0

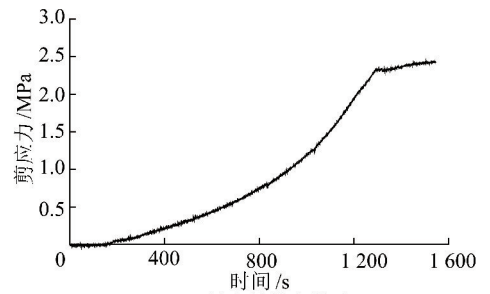
试样后表面布设 2 个声发射探头, 用于收集试样摩擦滑动过程的声发射特征参数; 采用数字照相技术采集实验过程中试件前表面的图像信息, 运用数字散斑相关方法分析滑动面附近相关区域的位移规律和试件的滑动特征。实验前对系统进行计时校准, 保证各监测系统数据采集时间的严格一致。

5 组实验中 2, 3, 5 号试样出现失稳滑动, 1, 4 号试样稳定滑动, 试件滑动过程中的一些特征参量见表 1。由于篇幅有限, 以具有代表性的两组实验: 发生稳定滑动的 1 号实验和发生失稳滑动的 5 号实验为例, 对实验中出现的应力规律、位移场演化以及声发射特征做进一步分析。两组实验的实验加载曲线如图 2 所示。

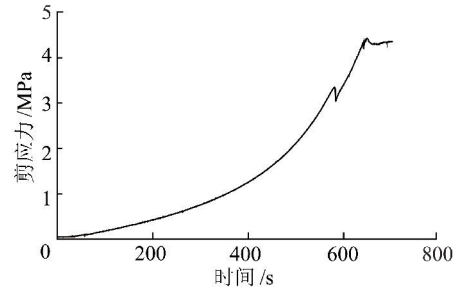
2 煤岩结构摩擦滑动特性

2.1 滑动位移观测方法

滑动位移测点设置位置如图 3 所示, 位移监测点相当于一个虚拟位移计^[13], 通过散斑图像的对比分析, 能够得到位移计两端的水平及竖直方向的位移量, 由此就能通过虚拟位移计反映测点处试件的滑动位移。虚拟位移计的设置方法如下: 在滑动接触面两侧选取两个对称点, 如图 3 中所示的 P1 和 P2 点, P1 和 P2 之间距离为 8 mm , 分别以 P1 和 P2 点为中心选取分析区域, 以此区域作为匹配目标在所有图像中进行匹配, 获得 P1, P2 点在每张图像中的坐标, 与其初始图像中的坐标的差值作为 P1 点和 P2 点的位移, P1, P2 两点在 x 方向的位移差则表示接触面两侧试件的错动量, 也即中间煤样的滑动位移。



(a) 1号实验稳定滑动



(b) 5号实验失稳滑动

图 2 实验加载曲线

Fig. 2 Loading curves

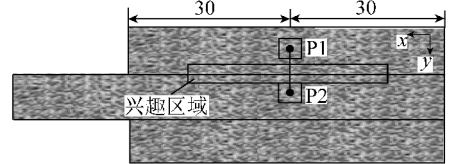


图 3 位移测点原理示意

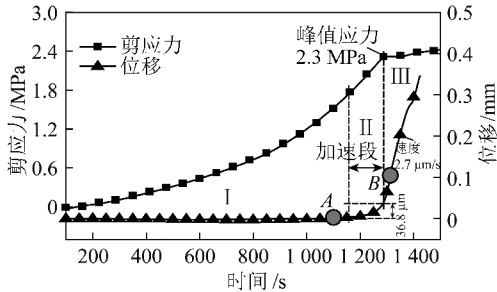
Fig. 3 Schematic diagram of virtual displacement meter

2.2 稳定滑动过程分析

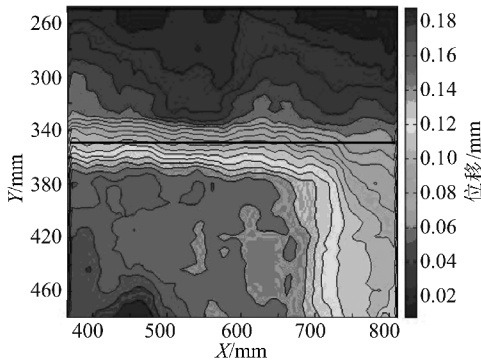
1 号试样, 轴向荷载 5 MPa , 实验过程未出现明显的失稳滑动。应力、滑动位移随时间的演化曲线如图 4(a) 所示。根据中间煤试件的运动形式可将加载过程分为 3 个阶段, I 为平静阶段, 自剪切应力加载至峰值应力前, 试件的剪切位移未出现明显变化, 剪切应力稳定增长; II 为加速运动阶段, 剪切应力达到 1.7 MPa 时, 试件由静止转为滑动, 滑动速度缓慢增加, 在加速运动阶段, 历时 108.5 s , 滑动位移 $36.8 \mu\text{m}$; III 为稳定滑动阶段, 当剪切应力达到 2.3 MPa 时, 试样完成加速过程, 并开始稳定滑动, 滑动速度 $2.7 \mu\text{m/s}$ 。

绘制曲线上 A, B 两点处试件结构的位移场云图如图 4(b) 和 (c) 所示, 分析区域为图 3 中标示的兴趣区域, 云图反映了试件结构产生滑动前后的变形和位移特征。从图 4(b) 看以看到中间煤样的变形在空间上分布的不均匀性, 接触面附近变形的不均匀性直接反映了接触面上变形能分布的不均匀性, 这种不均匀性会增加滑动过程的复杂性; 左端加载端的变形量明显大于右端, 与单一试件的压缩加载类似; 组合结构

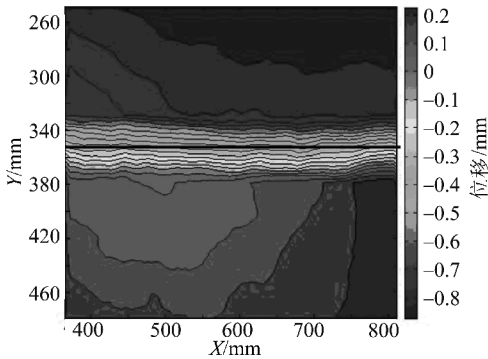
的变形场具有连续性,即接触面上、下砂岩与煤的变形保持连续,说明在产生滑动前,组合结构的变形协调;随着剪切荷载的继续增大,当试件出现滑动之后,接触面上积蓄的变性能得以释放,部分变形恢复,接触面附近的变形场变得均匀,位移等值线近似平行分布,如图 4(c) 所示。



(a) 剪应力位移演化曲线



(b) A点X方向位移场



(c) B点X方向位移场

图 4 1 号试样位移演化特征

Fig. 4 Displacement evolution characteristics of sample 1

图 5 为试件声发射能量值以及滑动位移随加载过程的变化规律,为表述方便,图中仍然标示了按照试件运动形式划分的 3 个阶段。在逐步增加剪切应力的过程中,接触面上强度较低的凹凸咬合部位首先出现破坏,释放的应力波被声发射仪记录,表现为 I 阶段前期的低能量值声发射事件;随着剪切应力的提高,个别强度稍高的咬合点失效,伴随出现了单发型高能量值的声发射事件,I 阶段末期,接触面上大范围接触部位失效,伴随能量不等的声发射事件密集出现;进入到 II 阶段时,如图 5 中矩形框中所标示,

声发射事件更加密集,并且声发射能量强度水平变得更高;而进入到 III 稳定滑动阶段时,接触面的性状和应力分布趋于均匀,声发射事件的能量逐步降低,试件呈现稳定运动状态。

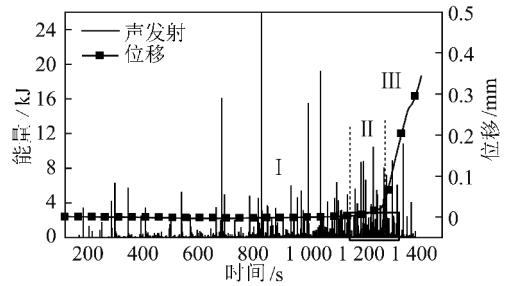


图 5 1 号试样剪应力声发射曲线

Fig. 5 Acoustic emission curves of sample 1

2.3 失稳滑动过程位移及声发射特征

5 号试样,轴向荷载 12 MPa,剪切应力达到 3.3 MPa 时发生一次失稳滑动,产生应力降 0.25 MPa,滑动位移 23.4 μm;在出现失稳滑动之前,剪切应力稳定增长,试件位移基本无变化,对应图 6 中 I 阶段;产生失稳滑动之后剪切应力继续增长,应力达到 4.4 MPa 时,进入稳定滑动状态,对应图中 III 阶段,滑动速率 5.0 μm/s;图中 II 为失稳滑动后,还未进入稳定滑动状态的过渡阶段,并存在两个速度变化区:① 为速度减弱区,由高速的失稳滑动减弱为低速滑动;② 为速度增长区,由低速滑动增长为快速稳定滑动,II 阶段的平均滑动速率为 1.4 μm/s,低于稳定滑动时的位移速度。

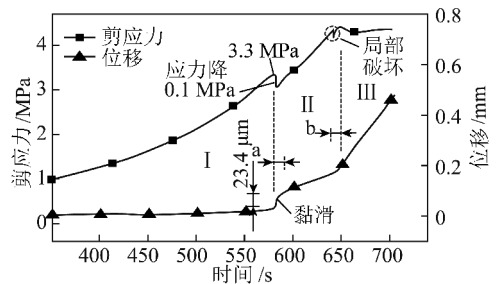


图 6 5 号实验剪应力位移演化曲线

Fig. 6 Shear stress and displacement curves of sample 5

在剪切应力达到 4.4 MPa 时,应力-时间曲线上出现了一次 0.15 MPa 的应力降,但位移-时间曲线上并未出现相应的变化,说明应力降并非由试件的失稳滑动引起,而应是试件的局部破坏引起。

5 号试样加载过程伴随的声发射规律如图 7 所示,失稳滑动前、后都出现了一段比较密集的声发射事件。在 I 阶段前期,即剪切加载初期,声发射事件少、能量低,I 阶段末期声发射事件数和能量值升高;失稳滑动前后,低能量值的声发射数降低,II 阶段中

期声发射进入相对平静期,声发射事件明显减少,II 阶段后期是试件由不稳定滑动向稳定滑动转变的加速运动阶段,对应图 6 中的 b 阶段,此阶段的声发射事件明显增多,高能量值的声发射事件变得频繁;进入 III 阶段后,稳定滑动状态下的声发射事件能量明显降低。

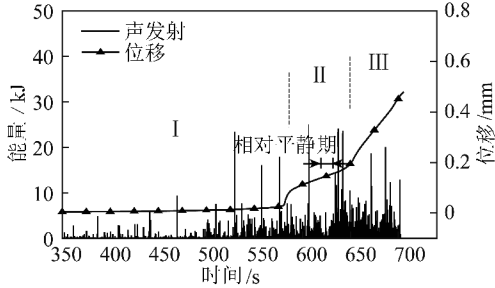


图 7 5 号实验剪应力声发射曲线

Fig. 7 Acoustic emission curve of sample 5

2.4 煤岩组合结构的滑动规律

取试样产生初始滑动时的剪切应力和轴向应力,绘制试样摩擦强度的特征曲线如图 8 所示。砂岩-煤试样组合结构的摩擦强度线性回归后可以表示为

$$\tau_s = 0.3049\sigma + 0.7873 \quad (1)$$

式中, τ_s 为失稳滑动时的剪应力, MPa; σ 为结构轴向应力, MPa。

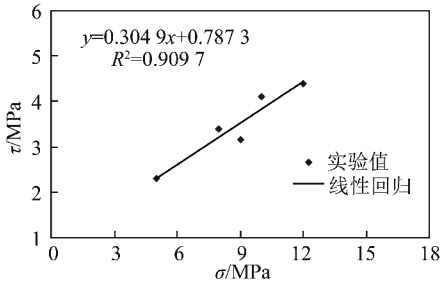


图 8 砂岩-煤摩擦强度特征

Fig. 8 Friction strength of the sandstone-coal combination

同样,对于出现失稳滑动的 3 组试样,分析其失稳滑动时的剪应力与轴向应力的关系,以 5 号试样为例,其与轴向应力的关系可用式(2)表示,公式适用于稳定滑动阶段,对应图 6 中第 III 阶段。

$$\tau_w = 0.2423\sigma + 1.3577 \quad (2)$$

式中, τ_w 为稳定滑动时的剪应力。

由以上结果可以看出,砂岩-煤组合试样的摩擦实验中,稳定滑动时的摩擦因数小于失稳滑动的摩擦强度系数,说明组合结构在摩擦滑动过程中,接触面性质发生了变化,导致摩擦因数改变,这从失稳滑动前后的滑动速度变化同样能得到验证,摩擦因数的改变导致不同的摩擦滑动形式。

3 结 论

(1) 采用双面剪切实验模型,配合运用数字散斑相关方法分析煤岩结构的滑动摩擦特性方便可行,测量精度高,能够方便地进行测点或全场位移的分析。

(2) 煤岩结构的滑动失稳过程可以分为 3 个阶段:平静期、加速期和稳定期;平静期积蓄应变能,试件并无明显滑动位移产生,平静阶段后期有较为密集的声发射出现;加速期是结构由静止向运动的过渡阶段,也最易出现失稳滑动,滑动位移呈加速趋势,声发射频度和能量值都较高;稳定期试件稳定滑动,剪切应力和滑动速度基本恒定,声发射趋于平静。

(3) 通过 5 组不同轴向压力作用下的砂岩-煤试样的双面剪切摩擦实验观测到了失稳滑动、稳定滑动等摩擦滑动现象。实验获得的砂岩-煤组合结构的摩擦强度系数为 0.3049,稳定滑动时的摩擦因数为 0.2423。

致谢:感谢山东科技大学岩石蠕变实验室赵同彬副教授、张泽博士、尹延春硕士、陈璐硕士等在实验实施过程提供的帮助。

参考文献:

[1] 耿乃光. 地学领域的摩擦实验研究[J]. 润滑与密封, 1987(6): 21-26.
Geng Naiguang. Experimental investigation of friction in Earth Science[J]. Lubrication and Seal, 1987(6): 21-26.

[2] Brace W F, Byerlee J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes [J]. Science, 1966, 153: 990-992.

[3] 马胜利, 刘力强, 马 瑾, 等. 均匀和非均匀断层滑动失稳成核过程的实验研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2003(S1): 45-52.
Ma Shengli, Liu Liqiang, Ma Jin, et al. Experimental research on nucleation process of uniform and non-uniform fault slip instability[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2003(S1): 45-52.

[4] 马 瑾, 刘力强, 刘培洵, 等. 断层失稳错动热场前兆模式: 雁列断层的实验研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1141-1149.
Ma Jin, Liu Liqiang, Liu Peixun, et al. Thermal precursory pattern of fault unstable sliding: an experimental study of en echelon faults [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(4): 1141-1149.

[5] 刘力强, 刘培洵, 黄凯珠, 等. 断层三维扩展过程的实验研究 [J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2008(7): 833-841.
Liu Liqiang, Liu Peixun, Huang Kaizhu, et al. Experimental study of three-dimensional fault propagation process [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008(7): 833-841.

[6] 梁 冰, 章梦涛. 矿震发生的粘滑失稳机理及其数值模拟[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1997(5): 521-524.
Liang Bing, Zhang Mengtao. Numerical simulation and instability slide mechanism of fault bursts[J]. Journal of Fuxin Mining Institute

- (Natural Science), 1997(5):521-524.
- [7] 章梦涛. 矿震的粘滑失稳理论[D]. 阜新: 阜新矿业学院, 1993.
Zhang Mengtao. Theory of instability slide mechanism of fault bursts [D]. Fuxin: Fuxin Mining Institute, 1993.
- [8] Ruina A L. Slip instability and state variable friction laws[J]. Journal Geophysics Research, 1983, 83(10):359-370.
- [9] 代高飞, 尹光志, 皮文丽, 等. 用滑块模型对冲击地压的研究(1) [J]. 岩土力学, 2004(8):1263-1266.
Dai Gao-fei, Yin Guang-zhi, Pi Wen-li, et al. Study on rockburst using stick slip model(1) [J]. Rock and Mechanics, 2004(8):1263-1266.
- [10] 郭德勇, 韩德馨. 煤与瓦斯突出粘滑机理研究[J]. 煤炭学报, 2003(6):598-602.
Guo Deyong, Han Dexin. The stick-slip mechanism of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 2003(6):598-602.
- [11] 闫永敢, 冯国瑞, 翟英达, 等. 煤体粘滑冲击的发生条件及动力学分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1):19-21.
Yan Yonggan, Feng Guorui, Zhai Yingda, et al. Stick-slip conditions and dynamics analysis of coal rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1):19-21.
- [12] 齐庆新, 史元伟, 刘天泉. 冲击地压粘滑失稳机理的实验研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(2):34-38.
Qi Qingxin, Shi Yuanwei, Liu Tianquan. Mechanism of instability caused by viscous sliding in rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(2):34-38.
- [13] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 断层黏滑动态变形过程的实验研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1):171-179.
Song Yimin, Ma Shaopeng, Yang Xiaobin, et al. Experimental study on the dynamic displacement evolution of fault in stick-slip process [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1):171-179.

民政部批准成立“中国煤炭学会煤炭装载技术专业委员会”

2013年1月18日, 中华人民共和国民政部正式下文, 批准成立“中国煤炭学会煤炭装载技术专业委员会”。

煤炭装载技术是近年来随着现代物流业的发展, 在煤炭工业兴起的新技术领域, 主要针对煤炭、矿石等散装物料装载技术的研究, 重点解决煤炭运输环节中自动快速装载火车、汽车、轮船等相关技术难题和相关产品的研发与推广。该技术领域属于多个专业融合的交叉学科, 涉及到机械、电气自动化、工艺结构、智能制造、计量以及公路铁路站场布置等。近年来依靠国家技术支撑项目以及消化引进国外先进技术, 煤炭装载计量装备技术水平有了极大的提高, 急需为该领域科技工作者创建一个促进技术创新和技术交流与推广的平台, 以适应新技术发展的需要。

中国煤炭学会常务理事洪伯潜院士、刘建功教授级高级工程师、王虹研究员等5位专家提出了成立中国煤炭学会煤炭装载技术专业委员会的建议, 经过煤炭学会常务理事会讨论通过, 向中国科学技术协会和中华人民共和国民政部提出了申请, 近日获得批准。煤炭装载技术专业委员会挂靠在中煤科工集团天地科技股份有限公司, 目前正在组建第一届委员会。

摘自中国煤炭学会网站