

文章编号: 0253-9993(2012)10-1677-05

# 组合方式对煤岩组合体力学特性和破坏特征影响的试验研究

张泽天<sup>1</sup> 刘建锋<sup>1</sup> 王璐<sup>1</sup> 杨昊天<sup>1</sup> 左建平<sup>2</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 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)

**摘 要:** 为探讨组合方式对煤岩组合体力学特性和破坏特征的影响, 利用 MTS815 岩石力学试验系统, 分别对岩-煤-岩(YMY)、岩-煤(YM)及煤-岩(MY)3种组合方式试件进行了单轴压缩和三轴压缩试验研究。试验结果表明, 组合体试件破坏主要集中在其煤体部分, 而与组合和加载接触方式无关; 煤体部分损伤发展和破坏程度的加剧, 在一定程度上会诱导岩体出现损伤和发生破坏。单轴加载条件下, 3种组合方式均表现为以煤体部分拉张破坏为主的破坏特征, YMY组合的平均抗压强度为40.03 MPa, 分别是YM和MY组合方式对应平均值的1.80和1.53倍; 三轴加载条件下, 均表现为以煤体部分剪切破坏为主的破坏特征; 随围压压力增加, 各组合方式三轴抗压强度平均值逐渐趋近。

**关键词:** 组合方式; 煤岩组合体; 力学特性; 破坏特征

中图分类号: TD315

文献标志码: A

## Effects of combination mode on mechanical properties and failure characteristics of the coal-rock combinations

ZHANG Ze-tian<sup>1</sup>, LIU Jian-feng<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>1</sup>, YANG Hao-tian<sup>1</sup>, ZUO Jian-ping<sup>2</sup>

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** To discuss the effects of coal-rock combination mode on its mechanical and damaging characteristics, the uniaxial and triaxial compressive tests for three combination modes, such as Rock-Coal-Rock (YMY), Rock-Coal (YM) and Coal-Rock (MY), were carried out on MTS815 Rock Mechanics Testing System. The results show that the failure mainly concentrates on the coal part of combination specimen, and do not be affected by the combining mode and the loading condition. The development of damage and increase of failure extent in coal part can result in the emergence of damage and failure in rock part to some extent. The failure states are mainly tensile failure and happens in coal part for uniaxial compressive test. The uniaxial compressive strength of YMY is 40.03 MPa, which is 1.80 and 1.53 times of YM and MY, respectively. Under triaxial compressive condition, the failure are all mainly shear failure in coal part, and the average triaxial strength for three combination modes gradually approaches with the confining pressure increasing.

**Key words:** combination mode; coal-rock combination; mechanical property; failure characteristic

经济的发展对能源的需求越来越大, 而煤炭作为中国经济发展的能源支柱, 对其需求的增加使得开采不断向纵深发展。煤炭资源采掘过程中, 常常发生煤岩体破坏诱发的灾害事故, 并随开采深度增加而增

多。多数煤层并非单独存在于地层之中, 而是以煤岩互层的形式存在。对多种工作面回采方式的研究<sup>[1]</sup>表明, 开采过程在引起煤体本身破坏的同时, 也会引起邻近顶底板岩体的损坏, 进而产生煤岩互层的整体

收稿日期: 2011-06-21 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973) 资助项目(2011CB201201 2010CB226802); 国家自然科学基金煤炭联合基金资助项目(51134018)

作者简介: 张泽天(1988—), 男, 河北张家口人, 硕士研究生。E-mail: znthe123@126.com。通讯作者: 刘建锋(1979—), 男, 副教授。E-mail: liujf@scu.edu.cn

失稳破坏,因此开采过程需考虑岩层与煤层之间的相互作用。

国内外学者对煤岩组合体模型本身及其力学性质进行了研究。20 世纪 70 年代, J. M. Petukhov 等<sup>[2]</sup>在研究岩石材料峰后变形和稳定性问题时,分析了两体系统和“坚硬顶底板—薄层”系统的稳定性问题,对煤柱的承载能力进行了评估。近年来,国内许多学者对二体模型进行了更为深入的理论研究、数值分析及试验研究<sup>[3-6]</sup>,建立了二体模型理论基础,分析了其与一体两介质模型之间的区别、失稳破坏全过程变化规律及破坏机理等,其研究显示当两体强度相差较大时,试样变形突跳现象也更为强烈,高强度体几何尺寸及两体之间相互作用对二体试件整体力学性质有显著影响。此外,研究人员还对组合体试件的冲击倾向性、冲击破坏电磁辐射、声电效应规律、力学特性和破坏特征、声发射特征以及变形破坏前兆信息等进行了研究<sup>[7-13]</sup>,对煤岩组合体各部分的相对高度变化以及接触面倾角对组合体单轴力学特性、破坏特征、冲击倾向性和电磁辐射信号的影响也进行了数值模拟和试验研究<sup>[14-17]</sup>。研究显示,组合体试件的各项性质均有别于单体试件,需要综合考虑各组成部分本身性质、组合方式及相互作用对组合体整体力学性质的影响。

总之,现有研究多以二体模型为起点,研究范围多集中于组合体模型本身及其整体力学性质方面,针对组合方式对组合体受力破坏特征及力学特性影响的研究还鲜有报道。本文把煤炭地下开采中煤层和岩层的不同互层方式进行简化,通过试验室加工得到相同直径煤和岩石试件,把加工得到的煤和岩石试件按简化模型进行不同组合后分别进行单轴压缩和三轴压缩试验;通过对简化后煤和岩石不同组合方式试件受力破坏特征及力学性质的差异进行探讨,以期为煤炭资源开采过程中的煤层和岩层不同互层的破坏特征和力学行为研究提供参考。

## 1 试验设备及测试方案

### 1.1 试验方案

将煤与岩石组合体分为“煤—岩”组合方式(即煤上岩下, MY)、 “岩—煤”组合方式(即岩上煤下, YM)和“岩—煤—岩”组合方式(即岩上煤中岩下, YMY) 3 种(图 1),并根据有关标准<sup>[18]</sup>制备组合体试件,组合体试件直径均制为 35 mm,高径比为 $(2 \pm 0.2)$ 。其中, YM 和 MY 组合煤体部分和岩体部分高度和直径之比均为 1:1, YMY 组合煤体部分和岩石部分高度均制为 23.3 mm。

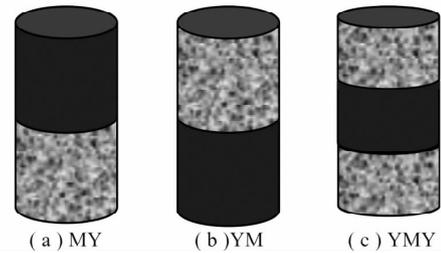


图 1 煤岩组合体试件示意

Fig. 1 Schematic diagram of coal-rock combinations

试验分别在围压为 0, 5, 10, 15, 20 MPa 条件下进行,各围压水平分别取 3 种组合方式试件 2~3 个进行测试。试验过程中,三轴围压加载速率为 3 MPa/min,单轴与三轴轴向加载过程均采用环向位移控制,初始加载速率为 0.06 mm/min,试件进入破坏阶段后,加载速率为 0.1 mm/min。

### 1.2 试验设备

试验均在四川大学 MTS815 岩石力学测试系统上进行。该测试系统轴向最大压缩荷载为 4 600 kN;单轴轴向引伸计量程 $-4 \sim +4$  mm;单轴环向引伸计量程 $-2.5 \sim +12.5$  mm;三轴轴向引伸计量程 $-2.5 \sim +5.0$  mm,环向引伸计量程 $-2.5 \sim +8.0$  mm;最高围压 140 MPa。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 强度特征

图 2 表明, YMY 组合的单轴强度平均值最高, MY 组合与 YM 组合的平均单轴抗压强度虽然略有差异,但较为接近,其差异主要是煤体内部的原生缺陷数量和分布不同所致; YMY 组合的单轴抗压强度平均值为 40.03 MPa,分别为 YM 与 MY 组合的 1.80 和 1.53 倍。分析认为 YMY 组合方式组合体试件强度较高,一方面是由于岩石部分承载能力高(本文组合体所用岩石的单轴抗压强度为 145.78 MPa,原煤的单轴抗压强度为 15.32 MPa),且在破坏过程中对煤体部分的变形具有显著的约束效应,导致其整体承载能力有所提升。另一方面, YMY 组合体试件中煤体部分高度低于 YM 和 MY 组合体试件中煤体部分的高度,约为后两种组合中煤体部分高度的 3/5,强度较低的煤岩部分高度的降低使得组合体的整体承载能力增加。一定应力条件下,考虑岩层对煤层的接触面影响及变形协调,岩层会在一定程度上限制煤层的变形运动,进而提高了煤体的承载能力,试验模拟中表现为组合体试件的承载能力明显强于多数煤单体试件<sup>[10]</sup>。

图 3 中各点为对应组合方式在预设围压压力条

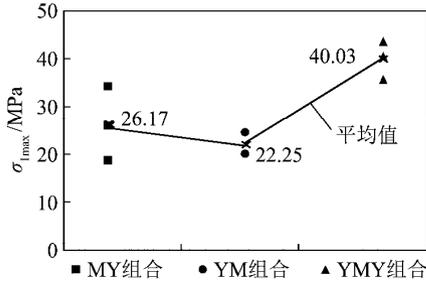


图 2 各组合试件单轴抗压强度散点

Fig. 2 Uniaxial compressive strength of specimens with different combination mode by uniaxial compression tests

件下该组试件三轴抗压强度的统计平均值。由该图可知,各组合方式试件的三轴抗压强度平均值均随围压的增大而升高,且在围压为 5 MPa 和 10 MPa 时, YMY 组合的三轴抗压强度平均值均大于 YM 与 MY 组合; 随围压增大,各组合方式强度平均值逐渐趋近。围压压力的作用,在一定程度上限制了煤体部分在破坏过程中变形和裂纹的发展,从而使组合体的抗压强度增加。图 3 中 YM 与 MY 组合及 YMY 组合抗压强度平均值下包线表明, YMY 组合试件的初始承载能力较强,而围压水平高低对于另外两组合试件承载能力的影响相对更大。

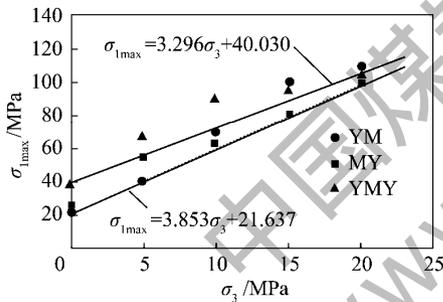


图 3 各组合试件围压与平均三轴抗压强度关系

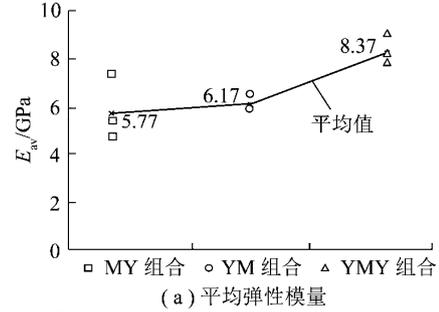
Fig. 3 Relationship between confining pressure and average triaxial compressive strength of specimens

图 2 和图 3 表明,低围压压力下, YMY 组合方式的强度主要受其中煤体部分高度较低的影响,其强度高于 YM 和 MY 组合方式,但在较高围压压力下,其高度的影响逐渐减小,各组合方式的强度值也趋于一致。因此,煤炭地下开采过程中,远离开挖部位的未开挖区域的煤体会具有较高的承载能力,相对较为稳定,而在开挖后的洞壁和边墙部位,煤体部分则易发生破坏,特别是临近开挖工作面的部位受开挖卸荷引起的应力调整的影响,更易发生破坏,在开采过程中需加以重视。

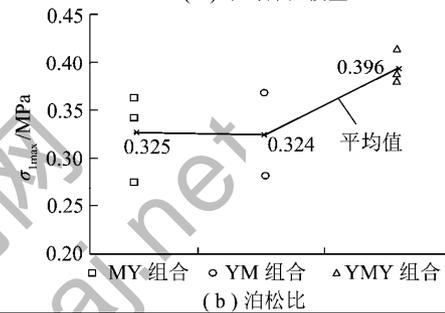
## 2.2 变形特征

由单轴加载条件下各组合体试件变形参数(图 4)可知, YMY 组合的平均弹性模量和泊松比高于

YM 与 MY 组合。试验过程中,各个组合试件均只测试了其煤体部分的环向变形和试件中间 50 mm 的轴向变形,因此试件变形参数计算的是试件量测部分的平均变形。试验加载的变形和破坏过程表明,组合体中的煤体部分的横向变形大于岩石部分的变形量。



(a) 平均弹性模量



(b) 泊松比

图 4 各组合试件单轴变形参数散点

Fig. 4 Deformation parameters of specimens with different combination mode by uniaxial compression tests

图 5 中 YMY 组合试件的应力应变曲线较为平滑; YM 与 MY 组合的应力应变曲线则有一定波动,说明“煤+岩”试件加载过程中经历了多次渐进破坏过程。“岩+煤+岩”试件由于煤体部分高度较低且受岩石部分端部效应的影响,其破坏过程相对平稳。组合体试件的应力应变曲线在经过峰值后迅速下降,试件发生显著脆性破坏,煤体部分环向变形迅速增大,裂纹快速扩展,并出现局部破坏和掉块现象。

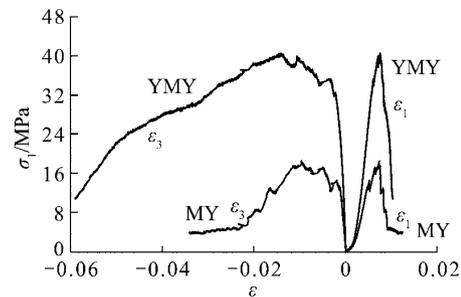


图 5 组合体试件单轴典型应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of typical combination samples by uniaxial compression tests

典型组合体试件三轴应力应变曲线表明(图 6),受轴向加载前围压加载过程中试件内部缺陷闭合的影响,三轴应力应变曲线中压密阶段不及单轴压缩显

著,且应力应变曲线较单轴压缩更为平滑,其主要原因是受围压压力限制的影响,组合体在破坏过程中煤岩体部分的破坏缓慢持续发展,而未出现单轴应力状态下的多次渐进破坏特征。三轴应力状态下,组合体试件的应力应变曲线在峰值应力阶段,较单轴压缩具有显著的塑性变形特征。

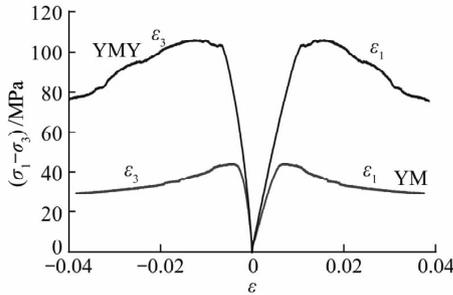


图 6 组合体试件三轴典型应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of typical combination samples by triaxial compression tests

### 2.3 破坏特征

试件单轴加载破坏情况如图 7 所示,煤岩组合体煤体部分发生拉张破坏,煤体破碎程度高,拉张裂纹分布均匀;岩石部分较为完整,仅产生少许拉张裂纹,且裂纹与煤体部分主要破坏裂纹贯通。拉张破坏是单轴荷载作用下,煤体中的微裂隙发育和扩展的结果;贯穿性裂纹的产生主要是由于组合体破坏过程中,煤体部分首先发生破坏,导致岩石部分出现局部应力集中,在煤体部分进一步破碎的同时,导致岩石部分产生了拉张裂纹。由单轴加载条件下组合体试件的破坏特征可知,顶底板岩石强度远高于煤体强度,煤体部分作为首先破裂体,控制着组合体试件的单轴抗压强度;单轴加载条件下岩石部分承载能力没有得到有效发挥和体现,但岩石部分也并非始终处于弹性状态,在变形过程中也发生了微破裂,即岩石部分会伴随煤体部分的破坏而积累损伤。

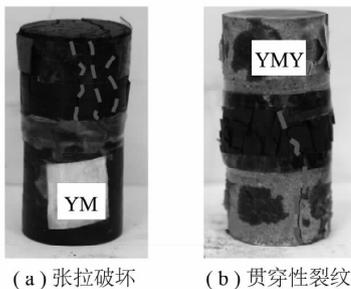


图 7 组合体试件单轴加载破坏

Fig. 7 Uniaxial failure of coal-rock combinations

三轴加载条件下,各组合体试件均表现为煤体部分以剪切破坏为主的破坏特征,而岩石部分则无显著破坏特征;煤体部分裂纹组合大致可以分为单一、平

行、交叉和复合 4 种类型(图 8),煤体部分破坏形式多样,但破碎程度不及单轴压缩。随着围压升高,煤体部分的破碎程度明显降低,主裂纹张开度下降。煤体部分显著的不均匀性以及围压水平的差异对组合体试件破坏特征有较大影响。三轴加载条件下,多数试件岩石部分没有明显破坏,只有个别低围压条件加载试样的岩石部分有压张裂纹,且裂纹与煤体部分主破坏裂纹贯通;相同围压条件下,MY 组合与 YM 组合的破碎程度和破坏方式接近,MY 组合试件的煤体部分破碎程度不及 YM 和 MY 组合。煤炭地下开采过程中,随着工作面推进,工作面前方煤岩体普遍经历了由原岩应力至围压降低、轴压升高的应力变化过程,而这会导致煤岩体破损及其主破裂带的形成、连通和扩展。

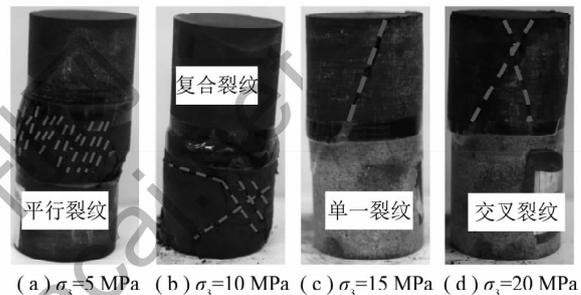


图 8 组合体试件三轴加载破坏

Fig. 8 Triaxial failure of coal-rock combinations

### 3 结 论

(1) 组合体煤体部分的尺寸效应以及组合体各部分之间的端部摩擦效应对组合体试件单轴抗压强度有较大影响。YMY 组合的单轴抗压强度平均值为 40.03 MPa,分别为 YM 与 MY 组合平均值的 1.80 和 1.53 倍。三轴加载条件下,各组合方式试件三轴抗压强度平均值均随围压的增大而明显升高;围压低于 10 MPa 时,YMY 组合三轴抗压强度平均值明显高于另外两组合;随围压升高,各组合方式三轴抗压强度逐渐趋近。

(2) 组合体试件主要破坏部位不受组合方式和加载条件的影响,并均以其煤体部分破坏为主。单轴加载条件下,煤体部分以拉张破坏为主,破碎程度高;三轴加载条件下,煤体部分以压剪破坏为主,煤体部分裂纹组合大致可以分为单一、平行、交叉和复合 4 种类型,煤体部分破碎程度随围压升高而降低。

(3) MY 与 YM 组合的力学特性和破坏特征相似,试验机加载运动油缸与组合体中的煤体或岩体部分接触,对“煤+岩”组合的力学特性和破坏特征无影响,MY 与 YM 组合在试验测试中可以视作一种组合

方式考虑。

### 参考文献:

- [1] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(7): 1067-1074.  
Xie Heping, Zhou Hongwei, Liu Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074.
- [2] Petukhov I M, Linkov A M. The theory of post-failure deformations and the problem of stability in rock mechanics [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(5): 57-76.
- [3] 陈忠辉, 傅宇方, 唐春安. 单轴压缩下双试样相互作用的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1997, 18(4): 382-385.  
Chen Zhonghui, Fu Yufang, Tang Chun'an. Experimental study of interaction of two rock specimen under uniaxial compression [J]. Journal of Northeastern University( Natural Science), 1997, 18(4): 382-385.
- [4] 林 鹏, 唐春安, 陈忠辉, 等. 二岩体系统破坏全过程的数值模拟和实验研究[J]. 地震, 1999, 14(4): 413-418.  
Lin Peng, Tang Chun'an, Chen Zhonghui, et al. Numerical and experimental study of deformation and failure behavior in a double rock specimen system [J]. Earthquake, 1999, 14(4): 413-418.
- [5] 谢和平, 陈忠辉, 周宏伟, 等. 基于工程体与地质体相互作用的两体力学模型初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1457-1464.  
Xie Heping, Chen Zhonghui, Zhou Hongwei, et al. Study on two-body mechanical model based on interaction between structural body and geo-body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1457-1464.
- [6] 王学滨. 煤岩两体模型变形破坏数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1066-1070.  
Wang Xuebin. Numerical simulation of deformation and failure for two bodies model composed of rock and coal [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(7): 1066-1070.
- [7] 窦林名, 田京城, 陆菜平, 等. 组合煤岩冲击破坏电磁辐射规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3541-3544.  
Dou Linming, Tian Jingcheng, Lu Caiping, et al. Research on electromagnetic radiation rules of composed coal-rock burst failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3541-3544.
- [8] 陆菜平, 窦林名, 吴兴荣. 组合煤岩冲击倾向性演化及声电效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2549-2555.  
Lu Caiping, Dou Linming, Wu Xingrong. Experimental research on rules of rockburst tendency evolution and acoustic-electromagnetic effects of compound coal-rock samples [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2549-2555.
- [9] 陆菜平. 组合煤岩的强度弱化减冲原理及其应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008: 24-32.  
Lu Caiping. Intensity weakening theory for rockburst of compound coal-rock and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008: 24-32.
- [10] 左建平, 谢和平, 吴爱民, 等. 深部煤岩单体及组合体的破坏机制及力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 84-92.  
Zuo Jianping, Xie Heping, Wu Aimin, et al. Investigation on failure mechanisms and mechanical behaviors of deep coal-rock single body and combined body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 84-92.
- [11] 左建平, 谢和平, 孟冰冰, 等. 煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1287-1296.  
Zuo Jianping, Xie Heping, Meng Bingbing, et al. Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1287-1296.
- [12] 左建平, 裴建良, 刘建锋, 等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1564-1570.  
Zuo Jianping, Pei Jianliang, Liu Jianfeng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1564-1570.
- [13] 赵毅鑫, 姜耀东, 祝 捷, 等. 煤岩组合体变形破坏前兆信息的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 339-346.  
Zhao Yixin, Jiang Yaodong, Zhu Jie, et al. Experimental study on precursory information of deformations of coal-rock composite samples before failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 339-346.
- [14] 刘建新, 唐春安, 朱万成, 等. 煤岩串联组合模型及冲击地压机理的研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 276-280.  
Liu Jianxin, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, et al. Rock-coal model for studying the rockburst [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 276-280.
- [15] 刘 波, 杨仁树, 郭东明, 等. 孙村煤矿-1 100 m 水平深部煤岩冲击倾向性组合试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2042-2048.  
Liu Bo, Yang Renshu, Guo Dongming, et al. Burst-prone experiments of coal-rock combination at -1 100 m level in Suncun Coal Mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2042-2048.
- [16] 郭东明. 湖西矿井深部煤岩组合体宏观破坏试验与理论研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010: 21-29.  
Guo Dongming. Experimental and theoretical study on macroscopic and microscopic damage of coal-rock combinations in Huxi Deep Coal Mine [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2010: 21-29.
- [17] 姚精明, 闫永业, 尹光志, 等. 坚硬顶板组合煤岩样破坏电磁辐射规律及其应用[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(5): 71-75.  
Yao Jingming, Yan Yongye, Yin Guangzhi, et al. The EME rules of composed coal and rock samples with hard roof failure and their application [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(5): 71-75.
- [18] GB/T23561.7-2009 煤和岩石物理力学性质测定方法——第 7 部分: 单轴抗压强度测定及软化系数计算方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.