

深部煤岩单体及组合体的破坏机制与力学特性研究

左建平^{1, 2}, 谢和平^{2, 3}, 吴爱民¹, 刘建锋³

(1. 中国矿业大学 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 岩石力学与分形研究所, 北京 100083; 3. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 采用 MTS815 试验机对钱家营岩样、煤样和煤岩组合体进行单轴和三轴压缩试验, 获得不同应力条件下煤岩单体及组合体的破坏模式和力学行为, 并比较异同。单轴条件下钱家营砂岩的破坏以剪切、劈裂及混合破坏模式为主, 并且砂岩的峰值强度、弹性模量和波速近似成正比关系; 在一定条件下砂岩能产生 II 类曲线, 但需采用环向位移控制加载, 且砂岩需具有高强度和低非均质度, 但煤和煤岩组合体几乎不发生 II 类曲线破坏。单轴条件下煤样以劈裂破坏机制为主, 但煤样的峰值强度与弹性模量、波速的关系基本不明显。对于不同围压下煤岩组合体的破坏主要发生在煤体内部: 单轴条件下煤岩组合体的破坏以劈裂破坏为主, 而煤体内部发生的破坏由于裂纹的高速扩展有可能贯通到岩石中去, 从而导致岩石的破坏, 并且煤岩组合体破坏后几乎完全丧失承载能力; 而三轴试验中, 煤岩组合体的破坏以剪切破坏为主, 但破坏后还有残余强度。随着围压升高煤岩组合体弹性模量总体趋势是初始缓慢增加, 当围压超过 15 MPa 后弹性模量迅速增加; 组合体的峰值强度与围压基本成线性关系。

关键词: 岩石力学; 围压; 煤岩组合体; 破坏模式; II 类曲线; 残余强度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)01 - 0084 - 09

INVESTIGATION ON FAILURE MECHANISMS AND MECHANICAL BEHAVIORS OF DEEP COAL-ROCK SINGLE BODY AND COMBINED BODY

ZUO Jianping^{1, 2}, XIE Heping^{2, 3}, WU Aimin¹, LIU Jianfeng³

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: Testing system MTS 815 is used to carry out uniaxial and triaxial compression tests for Qianjiaying rock, coal and coal-rock combined body, and their mechanical behaviors and failure modes under different stresses conditions are obtained correspondingly. The similarities and differences between them are analyzed in detail. The shear failure, splitting failure and mixed failure are the main failure modes for Qianjiaying sandstone under uniaxial condition. In addition, the peak strength and modulus of sandstone are similar proportional relationship with wave velocity. Under a certain conditions, such as the circumferential displacement control loading, high strength and low non-homogeneity of rock, type II failure curve of rock can be obtained. However, type II failure can not take place in coal or coal-rock combined body. Under uniaxial compression condition, splitting failure is the main failure mechanism for coal sample. However, the relationship between the peak strength, elastic modulus and wave velocity is not obvious. Under different confining pressures, the failure of coal-rock combined body mainly occurs in coal body. Under uniaxial condition, the failure mechanism of coal-rock combined body is mainly splitting failure. In addition, the high velocity crack propagation in coal body can induce the damage of rock; and

收稿日期: 2010 - 07 - 19; **修回日期:** 2010 - 11 - 30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732002, 2011CB201201); 高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金联合资助项目(201030)

作者简介: 左建平(1978 -), 男, 博士, 1999 年毕业于中南大学机车车辆工程专业, 现任副教授, 主要从事岩石力学、损伤、断裂及数值计算等方面的教学与研究工作。E-mail: zjp@cumt.edu.cn

the cracks in coal can extend to the rock. All of these can lead to the failure and loss of bearing capacity of coal-rock combined body. However, under triaxial compression condition, the failure mechanism of combined body is mainly shear failure; and the combined body after failure have residual strength. With the increase in confining pressure, the elastic modulus of Qianjiaying combined body increases slowly at the beginning and then increases quickly when the confining pressure is larger than 15 MPa. The peak strength of combined body is approximately linear with the confining pressure.

Key words: rock mechanics; confining pressure; coal-rock combined body; failure mode; type II failure curve; residual strength

1 引言

煤炭是我国的主体能源。随着浅部资源的开采枯竭, 煤矿开采正逐渐向深部转移, 但伴随而来的是诸多矿山灾害问题^[1~5]。本文的深部范围不涉及深部地球物理学的领域, 是个相对概念, 只局限于煤炭资源开采范围。煤矿工程中, 当巷道和工作面围岩出现大变形、巷道变形剧烈、底鼓严重等现象时, 就可认为该深度的煤炭开采进入“深部开采”。一些煤矿甚至为了简便起见, 认为500~600 m以下的埋深就算深部。影响煤矿灾害的因素很多, 如煤田地质构造、煤层顶底板岩性的组合及空间变化、煤层厚度及其变化、矿井水文地质及瓦斯情况等^[6~7], 但大量事故仍然表明, 这些灾害大多是若干工程地质体组成的力学系统整体灾变失稳的结果^[8~9]。在浅部环境下, 煤岩体的破坏主要受其自身裂隙结构面的控制; 而在大深度条件下, 煤岩体的破坏不仅受自身裂隙结构面的影响, 更重要的是受到煤岩组合体整体结构的影响, 再加上深部高应力环境, 很多矿山灾害表现出煤岩整体破坏失稳现象。开滦钱家营矿目前主采煤层7[#]煤层埋深-850 m, 该工作面周边的一些巷道近期表现出围岩大变形、巷道底鼓严重、两帮煤体收缩量大等问题, 并表现出煤岩整体变形特征。因此, 研究煤岩组合体的宏观变形破坏机制及力学特性对于预防矿井灾害和保障煤矿安全开采具有十分重要的意义。

深部煤矿灾害实质上就是工程地质强烈扰动下“煤体-岩体”组合体系统发生整体破坏失稳的结果。国内外学者单纯就岩体或煤体的破坏进行了诸多研究, M. S. Paterson等^[10, 11]对国际上岩石的脆性破坏研究做了非常详细的综述, 并认为岩石的破坏存在I, II类破坏曲线; K. Mogi^[12]详细介绍了自主研发的三轴试验仪器及其试验结果, 并讨论了中间主

应力对岩石破坏模式的影响; 而陈颀等^[13]对岩石的物理力学性状及其在地球物理学中的应用做了细致的分析和讨论。

到目前为止有关煤岩组合体的宏观破坏研究还不完全成熟。林鹏等^[14]利用两体模型, 分析了两岩体相互作用系统的失稳过程, 并解释了变形局部化、弹性回弹等现象。谢和平等^[15, 16]基于工程体和地质体的相互作用提出了两体力学模型, 并就混凝土坝体和岩石坝基两体相互作用的破坏机制进行了初步探讨。窦林名等^[17]研究坚硬顶板-煤体-底板所构成的组合煤岩变形破裂电磁辐射规律, 并由此来对冲击矿压的危险性进行评价和预测预报。齐庆新^[18]通过组合煤岩试验研究指出组合煤岩试块与单一煤岩试块的应力-应变关系具有明显的差异, 如变形减小、破坏剧烈和弹性特征更显著等。李纪青等^[19]研究了单一煤模型及煤岩组合体模型的冲击倾向性, 得出了煤岩组合模型的冲击倾向性指标均高于单一煤模型, 并建议采用组合模型来评价煤岩冲击倾向性。刘波等^[20]通过单轴试验研究了不同高度比的煤岩组合体的力学性质与动态破坏特性。

总之, 国内外学者对煤体或岩体单体破坏做了很多研究, 对于煤岩体组合体的研究主要集中在单轴试验研究, 而对于考虑不同围压条件下煤岩组合体的变形破坏还鲜见报道。本文通过采用MTS815试验机进行大量的试验, 旨在研究不同应力条件下岩体、煤体及煤岩组合体的破坏机制与力学行为的差异, 从而更好地为预防深部矿山工程灾害和保障矿井安全开采提供理论和实践指导。

2 煤岩体采样与成分分析

本文煤岩体采自开滦钱家营矿 2071 工作面下顺槽, 埋深-850 m。采用空心包体法测试了该水平

西大巷的地应力, 其中最大主应力为 25.4 MPa, 中间主应力 17.2 MPa, 最小主应力 13.5 MPa^[21]。2071 工作面走向长度为 1 385~1 536 m, 倾斜长为 175 m。该工作面煤层为稳定的中厚煤层, 煤层厚度在 0.40~5.35 m, 平均 3.50 m, 局部煤层松软易片帮。煤层倾角 4°~16°, 平均 7°。煤层直接顶为深灰色粉砂岩, 厚度 0~6.85 m, 平均 3.80 m。分别在 7#煤层及其顶板取煤样和岩样。X 衍射分析得到钱家营顶板砂岩及煤的矿物成分为: 砂岩主要包含 68%~75% 的石英, 23%~26% 的黏土矿物, 其他为少量白云石和菱铁矿等(<10%); 煤样主要包含 77%~85% 的非晶质, 10%~20% 的黏土矿物, 其他为少量的白云石、菱铁矿和方解石等矿物。图 1 为钱家营典型砂岩、煤样 X 射线衍射成分分析图谱(d 为晶格间距(10^{-10} m)), 可以看出岩石和煤的 X 射线图谱有明显差异。

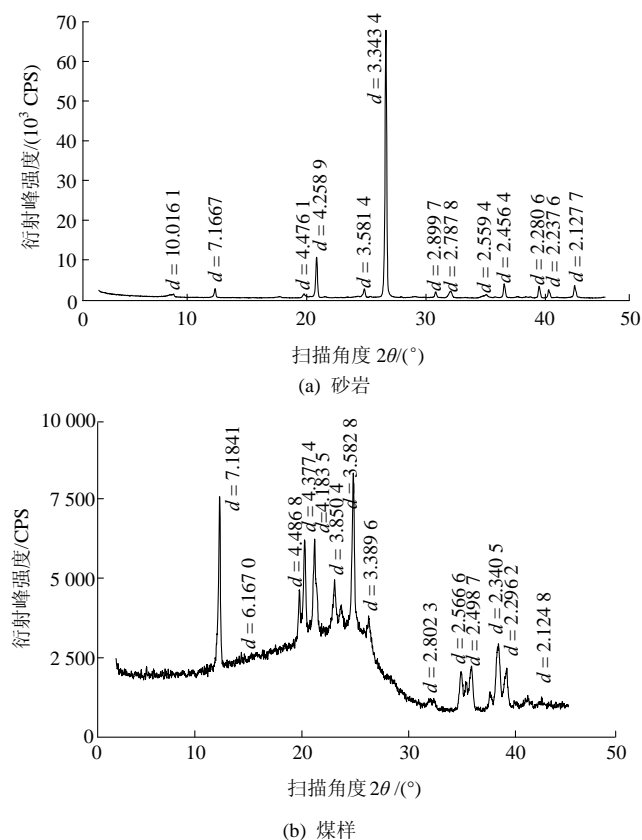


图 1 钱家营典型砂岩、煤样 X 射线衍射成分分析图谱
Fig.1 X-ray diffraction analysis spectrums of Qianjiaying typical sandstone and coal samples

3 煤岩单体及组合体试样加工制备

将煤样和岩样加工成标准圆柱试样。首先用钻孔取芯; 然后在磨平机上将煤或岩石试样两端磨平, 保证试样两侧的表面平行、光滑, 没有大的划

痕, 且两端面不平行度不得大于 0.01 mm, 上、下端直径的偏差不得大于 0.02 mm。单体测试采用了标准试样: 3 个岩石试样尺寸均为 $\phi 50$ mm \times 100 mm; 煤体由于较破碎, 加工较困难, 因此加工获得 1 个尺寸 $\phi 50$ mm \times 100 mm 的煤样和 2 个尺寸 $\phi 50$ mm \times 70 mm 的煤样。对于组合试样, 由于试验量大, 且考虑到煤层平均厚度与直接顶平均厚度大致相同, 因此参照岩石力学测试标准^[22], 将煤和岩石分别加工成 $\phi 35$ mm \times 35 mm 的试样, 然后组合为 $\phi 35$ mm \times 70 mm 的试样, 即长径比为 2(见图 2)。



图 2 煤岩组合体

Fig.2 Coal-rock combined body

4 试验设备与测试方法

试验在四川大学 MTS815 试验机上完成。该试验机轴向荷载最大 4 600 kN, 单轴引伸计横向量程 ± 4 mm, 纵向量程 -2.5~+12.5 mm; 三轴纵向引伸计量程 -2.5~+8 mm, 最高围压可达 140 MPa; 轴压、围压及渗透压力的振动频率可达 5 Hz 以上, 各测试传感器的测试精度均为当前等比标定量程点的 0.5%, 试验系统如图 3 所示。



图 3 MTS815 试验系统

Fig.3 MTS815 testing system

对于单轴岩样加载采取力加载模式, 加载速率

为 1 kN/s。而对于煤样及煤岩组合体采取位移加载模式, 加载速率为 10^{-3} mm/s。三轴压缩试验中围压加载速率为 3 MPa/min, 轴向加载方式采用位移加载控制, 破坏之前加载速率为 10^{-3} mm/s, 破坏之后加载速率为 0.1 mm/min。

5 钱家营岩样和煤样单轴压缩力学特性分析

5.1 钱家营岩样单轴力学特性

对 3 个标准岩样($\phi 50$ mm \times 100 mm)进行单轴试验来获得岩块的单轴抗压强度。随着荷载的增加, 当荷载约为 3 MPa 时, 试样就有声发射信号, 并且达到峰值强度后, 试样发生破坏。3 个试样的岩石单轴破坏模式素描图如图 4 所示。试样 R-0-1 呈双剪切破坏模式, 试样 R-0-2 呈现劈裂破坏模式, 试样 R-0-3 呈单剪切面破坏模式。从外部的破坏模式看, 试样 R-0-1 和 R-0-2 裂纹较多, 而试样 R-0-3 裂纹较少, 从 3 个试样的体积应变也得到了体现, 前 2 个试样都出现了体积扩容现象, 而 R-0-3 试样没有出现体积扩容, 因此单轴荷载下的扩容与微裂纹的发展数量密切相关。图 5 为钱家营砂岩单轴压缩试验的应力-应变曲线。由图 5 可见, 试样 R-0-3 的破坏强度最大, 而破坏后试样内的微裂纹数量最少。试样 R-0-1 和 R-0-2 的破坏是 I 类破坏曲线, 而试样 R-0-3 是 II 类曲线, 即应变非单调增加曲线。从试样破坏的模式看来, 要产生 II 类曲线, 除了采用环向位移控制加载外, 岩石必须要有一定的强度, 且岩石的非均质度低^[23], 这可从 3 个试样破坏后微裂纹的数量来判断。因为岩石非均质程度越高, 在外部荷载作用下其内部的非均匀变形越大, 从而局部区域产生的微裂纹越多, 而微裂纹的产生直接消耗能量, 使得岩块局部区域卸荷, 从而导致岩块整体强度相对较低; 反之, 岩

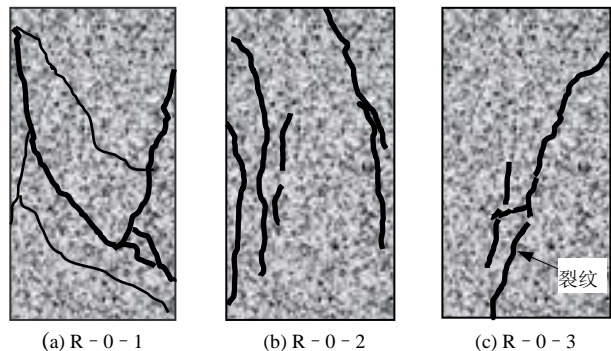


图 4 岩石单轴破坏模式素描图

Fig.4 Sketches of uniaxial failure modes of rock samples

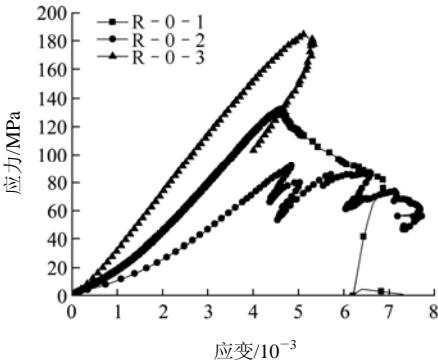


图 5 钱家营砂岩单轴压缩试验的应力-应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of Qianjiaying sandstone samples by uniaxial compression tests

块均质度越高, 试样抵抗变形的能力越强, 非均质变形越小, 局部产生的微裂纹越少, 从而导致试样整体强度相对越高, 此时 II 类曲线容易发生。
表 1 为单轴压缩试验下钱家营岩石基本物理力学参数。从峰值强度和波速的对应关系来看, 钱家营岩石波速越大, 则峰值强度越高(见图 6)。可见, 当岩石材料越致密, 胶结程度越好, 则岩石强度越高, 而这种结构更有利于波的传播。

表 1 钱家营岩石基本物理力学参数
Fig.1 Basic physico-mechanical parameters of Qianjiaying rock samples

试样 编号	峰值强度 /MPa	波速 $V/(m \cdot s^{-1})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
R-0-1	132.990 80	3 422.562 8	31.419 16	0.250 401
R-0-2	91.894 36	3 209.437 8	24.565 44	0.252 022
R-0-3	184.673 18	3 961.590 5	42.725 81	0.153 554

5.2 钱家营煤样单轴力学特性

通常煤的强度远低于岩石, 所以采取位移加载模式, 加载速率为 10^{-3} mm/s。加载过程中, 煤样的声发射数远比岩石多。在峰值荷载附近, 煤样上有碎块掉下, 并伴有清晰的噼啪响声。其中试样 M-0-2 由于安设轴向位移计的位置出现了开裂, 试样下部出现了大范围的煤块脱落, 如图 7 所示, 从而引起轴向引伸计位移反弹。因此该试样的轴向应变数据不准确, 但应力是准确的。总体而言, 单轴荷载作用下煤体的破坏以劈裂破坏为主; 对于同一直径、不同高度的煤样而言, 高度小的煤块相比高度大的煤块强度要高, 如图 7, 8 所示, 这可能是煤样的尺寸越大, 包含的原生裂隙可能越多, 因此导致

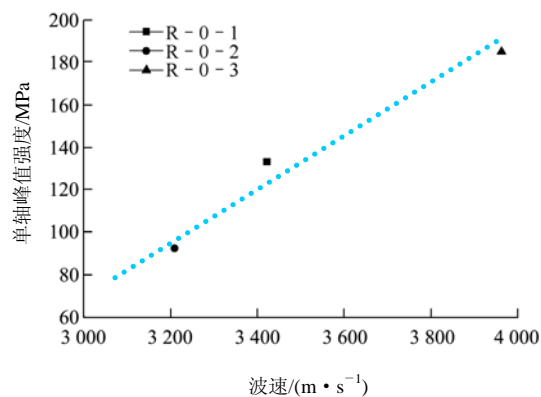


图 6 钱家营岩石的波速与单轴峰值强度的关系

Fig.6 Relationship between wave velocity and uniaxial peak strength of Qianjiaying rock samples

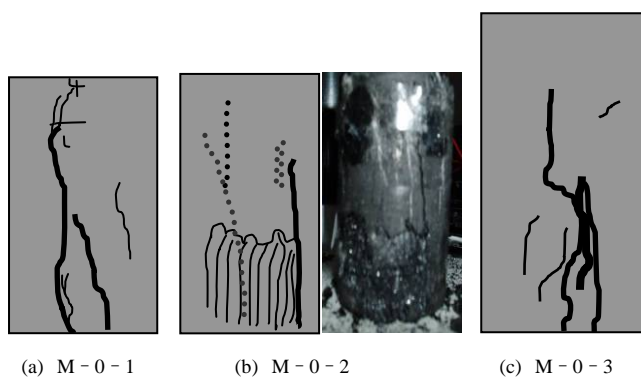


图 7 煤岩单轴压缩破坏模式

Fig.7 Uniaxial compression failure modes of coal-rock samples

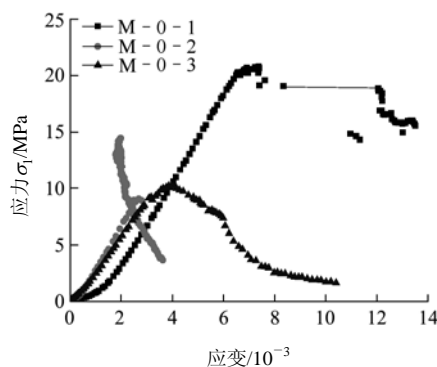


图 8 煤样单轴压缩试验的应力 - 应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of Qianjiaying coal samples by uniaxial compression tests

其破坏强度相对较低。煤体可能由于含有较多的微裂隙，其波速与强度的关系不明显。钱家营煤样基本物理力学参数见表 2。由于 2 个煤样不是标准的长径比为 2 的试样，因此，采用下式对试样 M-0-1 和 M-0-2 的抗压强度进行修正，得到修正后的折算强度列于表 2 中。

表 2 钱家营煤样基本物理力学参数

Fig.2 Basic physico-mechanical parameters of Qianjiaying coal samples

试样 编号	尺寸 /mm×mm	峰值强度 /MPa	折合强度 /MPa	波速 $V/(m \cdot s^{-1})$	弹性模量 E/GPa
M-0-1	$\phi 50 \times 70$	22.183 75	20.927 98	895.000 0	2.860 41
M-0-2	$\phi 50 \times 70$	15.534 13	14.656 44	1 815.965 9	-
M-0-3	$\phi 50 \times 100$	10.374 38	10.374 38	1 661.284 2	2.643 43

$$\sigma_c = \frac{8\sigma'_c}{7 + 2\frac{D}{H}} \quad (1)$$

式中： σ_c 为非标准试样折算成长径比为 2 试样的单轴抗压强度(MPa)， σ'_c 为非标准试样单轴抗压强度(MPa)， D 为试样直径(mm)， H 为试样高度(mm)。

6 不同围压时煤岩组合体的试验研究

多数矿井灾害不是岩体和煤体的单体破坏，更多是煤岩组合体的整体破坏。为了更能与实际结合，采用煤岩组合体试验来获得其整体破坏强度。将煤岩组合体编号为 RM-A-B，RM 表示煤岩组合体，A 表示围压，根据该矿的地应力特征，分别做了 5 组试验，围压分别为 0，5，10，15 和 20 MPa；B 表示第 $i(i = 1, 2, 3)$ 个试样。例如 RM-15-2 表示煤岩在 15 MPa 时的第 2 个试验。对于 RM 系列试验，采用位移加载模式，先采用 0.06 mm/min 的加载速率直至破坏，试样破坏后采用轴向位移控制模式，加载速率为 0.1 mm/min。本文试验在测量时采用了如下方法：应力是煤岩组合体的整体应力；轴向应变是一半岩石、一半煤体的轴向应变，而由于煤体的变形比岩石要大，因此环向应变仪安置在煤体上。

在单轴荷载条件下，煤岩组合体的破坏主要发生在煤体里面，煤体侧面和端面都有大量的裂隙生成，并且较均匀地分布在煤样各个区域，煤体以劈裂破坏机制为主。当荷载达到峰值荷载，试样整体破坏时，在煤体和岩体界面的裂纹有可能贯通到岩体里面。尽管岩块强度远远高于煤块强度(本文的岩块强度是煤块强度的 5~10 倍)，但当煤体内部裂纹快速扩展时，裂纹扩展释放出大量的能量，有可能导致上部局部岩石的破坏。

为了模拟不同深度下煤岩组合体的破坏，根据地应力情况通过改变围压来模拟地下工况。试验表

明, 不同围压下煤岩组合体的破坏同样主要发生在煤体内。总体而言, 随着围压的升高, 煤体内部产生的微裂纹数量在减少, 这主要是围压的升高抑制了微裂纹扩展; 并且围压越高, 这种抑制作用越明显。试验表明, 只要有围压的作用, 煤体的破坏机制不再以劈裂破坏机制为主, 而是以剪切破坏机制为主(见图 9)。大多破坏面倾角基本为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 但由于煤体的强非均质性, 破坏面倾角随着围压的变化关系并不明显。也正是这种煤体的强非均质性和低强度特性, 使得单轴和三轴荷载下煤岩组合体的破坏都是 I 类破坏, 不会发生 II 类破坏。

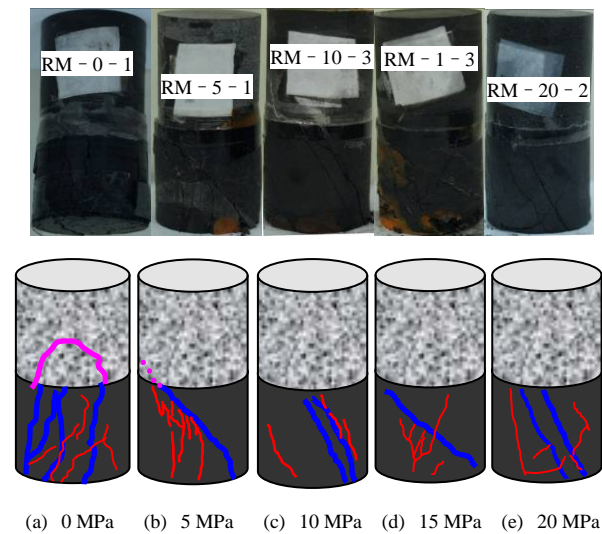


图 9 不同围压下煤岩组合体典型破坏模式及素描图
Fig.9 Typical failure modes and sketches of coal-rock combined body under different confining pressures

图 10 为煤岩组合体单轴和三轴典型全应力 - 应变曲线。从图 10 中可以明显地看出围压对煤岩组合体力学行为的影响。单轴荷载作用下, 煤岩组合体的破坏呈现明显的脆性破坏机制, 且峰后应力迅速跌到几乎为 0 的应力状态, 即几乎没有任何残余强度。在三轴试验中, 煤岩组合体的整体轴向变形较小, 而环向变形较大, 即便在低围压, 例如 5 MPa 围岩, 煤岩组合体的破坏就开始呈现延性机制, 围压越高, 延性机制越明显, 如图 10(b)所示。

峰值应力过后, 应力出现明显的“应力跌落”现象, 但随后即保持稳定, 煤岩组合体保持一定的残余强度, 且通常围压越高, 残余强度越高。图 11 为不同围压下煤岩组合体的全应力 - 轴向应变曲线, 可见, 围压逐渐增大导致煤岩组合体的峰值强度逐渐增大。随着围压的增大, 峰值应力出现在更

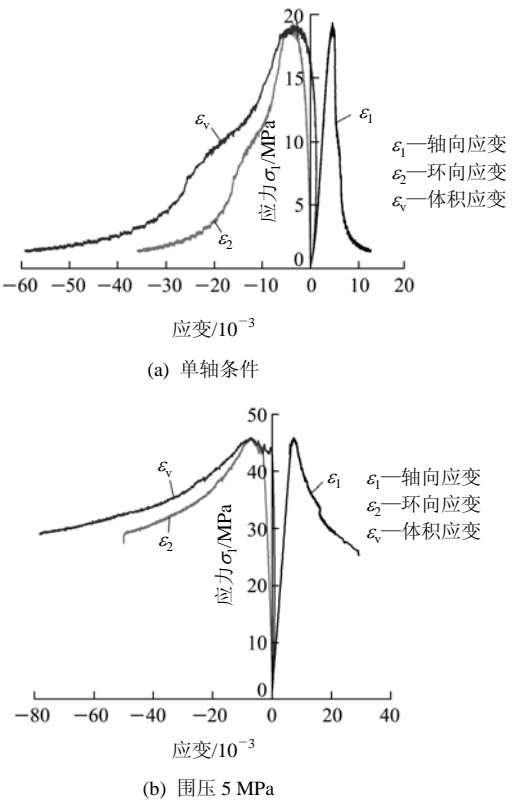


图 10 煤岩组合体单轴和三轴典型全应力 - 应变曲线
Fig.10 Typical complete stress-strain curves of coal-rock combined body under uniaxial and triaxial conditions

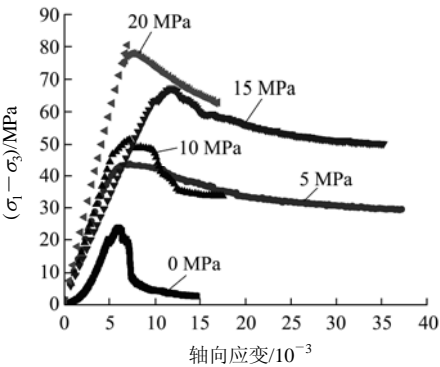


图 11 不同围压下煤岩组合体的全应力 - 轴向应变曲线
Fig.11 Complete stress-axial strain curves of coal-rock combined body under different confining pressures

大应变处, 且割线弹性模量也逐渐增加。由于煤岩组合体的尺寸为 $\phi 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$, 考虑尺寸效应, 如直径或长度的变化对试验强度值的影响(尺寸效应的本质是岩石的不均质性造成的), 根据 Hoek-Brown 经验公式^[24]对尺寸效应进行修正, 把尺寸为 $\phi 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 、长径比为 2 的岩样单轴抗压强度 σ_m 换算为标准试样 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的单轴抗压强度 σ_{c50} , 即

$$\sigma_m = \sigma_{c50} \left(\frac{50}{D} \right)^{0.18} \quad (2)$$

根据式(2)所得计算结果见表 3。从表 3 可以看出,煤岩组合体的单轴抗压强度介于单体煤及单体岩石的单轴抗压强度之间。因此在将来煤矿的支护设计理论中,需要更多考虑的是煤岩组合体的整体破坏强度,而不能单纯依赖单体岩石和单体煤的强度。

表 3 钱家营煤岩组合体基本物理力学参数
Table 3 Basic physico-mechanical parameters of Qianjiaying coal-rock combined body

试样编号	E/GPa	σ_m/MPa	σ_{c50}/MPa	$V/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
RM-0-1	11.410 950	42.061 91	39.446 60	3 173.819 2
RM-0-2	5.519 562	24.173 39	22.670 35	2 193.247 2
RM-0-3	8.350 026	19.344 40	18.141 61	1 611.177 1
RM-5-1	8.729 387	56.748 99	53.220 47	-
RM-5-2	8.630 329	43.841 37	41.115 42	-
RM-5-3	7.459 328	45.856 08	43.004 86	-
RM-10-1	9.621 109	56.889 84	53.352 56	1 957.427 5
RM-10-2	8.117 272	49.700 08	46.609 85	581.002 5
RM-10-3	9.007 099	51.809 31	48.587 93	2 898.177 0
RM-15-1	11.535 170	72.550 12	68.039 13	1 236.030 8
RM-15-2	7.253 118	67.437 30	63.244 21	799.807 8
RM-15-3	9.112 695	58.256 73	54.634 46	1 293.030 8
RM-20-1	12.156 280	75.652 26	70.948 38	1 996.081 6
RM-20-2	13.341 050	80.539 12	75.531 39	2 724.915 8

7 煤岩单体及组合体的破坏强度分析

单轴荷载下煤岩组合体的全应力-应变曲线具有较大的分散性,这是由于煤岩体内,特别是煤体内存在大量的随机微裂纹,导致了其强度的离散性。但随着围压的升高,这种离散性逐渐减少,即随着围压的升高,煤岩组合体的全应力-应变曲线在逐渐靠近,并表现出相似的破坏特性。在单轴压缩过程中,可以看出应力-应变曲线有一个压密阶段;而在有围压的试验中,没有这个压密阶段,这主要是由于初始围压的作用,而应力差要大于 0 才能起作用,这相当于轴向压力最小要达到 5 MPa 时,才开始加载,而这个阶段很可能是压密阶段,但试验系统却没有记录下来。压密阶段后,煤岩组合体要

经历一个弹性阶段。在 90%~100%的峰值荷载处,全应力-应变曲线开始出现非线性段,这时可能是煤岩组合体内部开始出现微裂纹,发生了不可逆变形,期间伴随着能量耗散。

从表 1, 2, 3 可以看出,单体岩石的强度最大,单体煤的强度最小,而煤岩组合体的强度介于两者之间。从图 12 中可以看出,随着围压的升高,煤岩组合体的整体弹性模量总体趋势是升高的,在单轴荷载下,3 个试样的弹性模量差异较大;而随着围压的升高,同一围压下弹性模量的变化差异在缩小,且随着围压的升高弹性模量逐渐升高,在 15 MPa 之前弹性模量增长较缓慢,但到 20 MPa 后,弹性模量明显升高。对于峰值强度,从图 13 中可以看出,随着围压的增加,破坏强度几乎呈线性增加,可用线性关系对应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{RM}}$ 和围压 σ_3 进行拟合,得到钱家营煤岩组合体的破坏强度的拟合关系为

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{RM}} = 2.328\,08\sigma_3 + 31.582\,94 \quad (3)$$

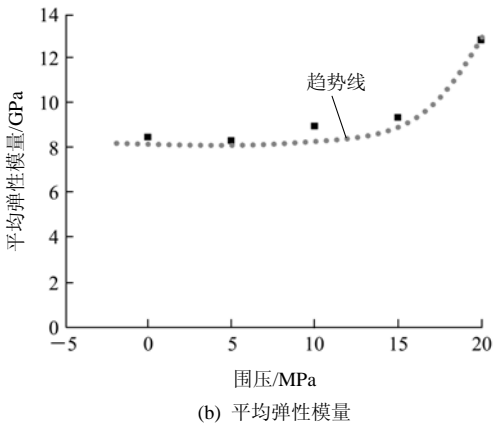
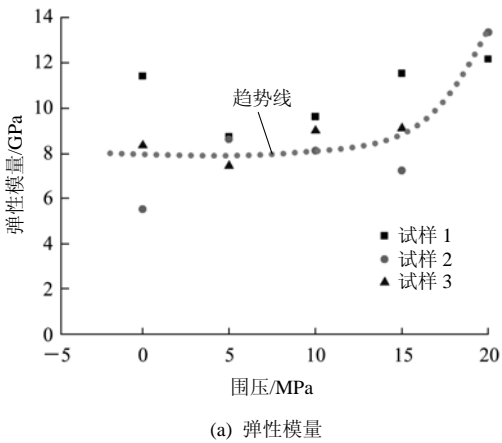
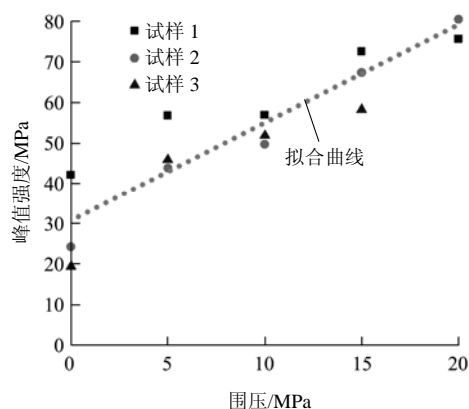
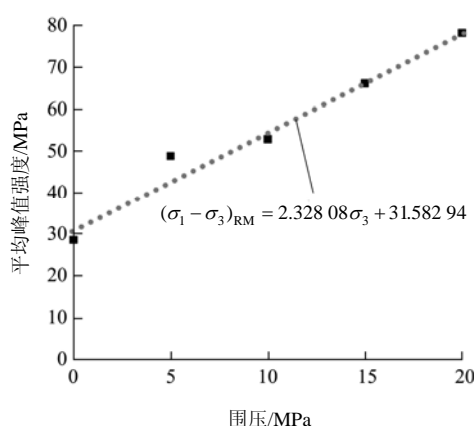


图 12 不同围压下煤岩组合体的弹性模量
Fig.12 Elastic moduli of coal-rock combined body under different confining pressures



(a) 峰值强度



(b) 平均峰值强度

图13 不同围压下煤岩组合体的峰值强度

Fig.13 Peak strengths of coal-rock combined body under different confining pressures

8 结 论

本文通过采用 MTS815 试验机对钱家营岩石、煤和煤岩组合体分别进行了单轴和三轴压缩试验, 并获得以下主要结论:

(1) 单轴试验表明, 钱家营砂岩峰值强度离散性大, 为 92~185 MPa; 砂岩的峰值强度、弹性模量和波速成正比关系, 即波速越大、峰值强度和弹性模量越大; 砂岩的破坏存在剪切破坏、劈裂破坏及两者混合破坏模式。钱家营煤样以劈裂破坏机制为主, 并且煤样的峰值强度与弹性模量、波速的关系不明显, 这主要是由于煤样内部裂隙较多, 影响了试验的测试精度。

(2) 单轴荷载下岩石的破坏曲线存在 I, II 类曲线, II 类曲线为应变非单调增加曲线。而煤及煤岩组合体中只存在 I 类曲线。从试样破坏的模式来看, 对于同种岩石要产生 II 类曲线, 除了采用环向位移控制加载时, 岩石必须要有一定的强度, 且岩石的非均质程度低。而煤、煤岩组合体中由于煤体的低

强度和强非均质性不产生 II 类曲线。

(3) 对于煤岩组合体的试验, 不论单轴还是三轴作用, 破坏主要发生在煤体内部。单轴荷载下, 煤岩组合体的破坏以劈裂破坏为主, 而煤体的破坏由于裂纹的高速扩展有可能贯通到岩石内部去; 而三轴试验中, 破坏以剪切破坏为主。在围压的作用下, 煤岩组合体的破坏由单轴时的脆性破坏机制为主转变为延性变形破坏机制, 单轴荷载作用下煤岩组合体破坏后就几乎全部丧失承载能力, 而三轴荷载下煤岩组合体破坏后试样并不完全丧失承载能力, 破坏后还留有一定的残余强度。并且三轴荷载下煤岩组合体只发生 I 类破坏, 没有产生 II 类破坏。可见围压对于煤岩组合体的破坏模式起了非常重要的影响作用。

(4) 随着围压的增加高煤岩组合体的弹性模量总体趋势是上升的, 但在初始阶段缓慢增加; 当围压超过 15 MPa 后, 弹性模量迅速增加; 随着围压的增加, 煤岩组合体的峰值强度几乎成线性增加。

本文的研究表明不同围压对于煤岩组合体的破坏模式、峰值强度、弹性模量产生了很大影响, 这也是深部采矿工程所面临的难题, 本文的研究只是初步的研究, 将来还需要对不同高径比、不同组合比、不同倾角组合的煤岩组合体展开进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 钱七虎. 非线性岩石力学的新进展——深部岩体力学的若干问题[C]// 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 10 - 17.(QIAN Qihu. The current development of nonlinear rock mechanics: the mechanics problems of deep rock mass[C]// Proceedings of the 8th Rock Mechanics and Engineering Conference. Beijing: Science Press, 2004: 10 - 17.(in Chinese))
- [2] 古德生. 金属矿床深部开采中的科学问题[C]// 香山第175次科学会议论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 192 - 201.(GU Desheng. The science problems in deep mining of metal deposit[C]// Proceedings of the 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 192 - 201.(in Chinese))
- [3] 谢和平. 深部高应力下的资源开采——现状、基础科学问题与展望[C]// 香山第175次科学会议论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 179 - 191.(XIE Heping. Resources development under high ground stress: present state, basic science problems and perspective[C]// Proceedings of the 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 179 - 191.(in Chinese))
- [4] 冯夏庭. 深部大型地下工程开采与利用中的几个关键岩石力学问

- 题[C]// 香山第175次科学会议论文集. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 202 - 211.(FENG Xiating. Several key rock mechanical problems in underground excavation and usage[C]// Proceedings of the 175th Xiangshan Science Congress. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 202 - 211.(in Chinese))
- [5] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 854 - 2 858.(HE Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 854 - 2 858.(in Chinese))
- [6] PENG S P, ZHANG J C. Engineering geology for underground rocks[M]. [S.l.]: Springer, 2007.
- [7] 黄润秋, 许强, 陶连金, 等. 地质灾害过程模拟和过程控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(HUANG Runqiu, XU Qiang, TAO Lianjin, et al. Simulation and control of geohazards process[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [8] 秦四清, 张倬元, 王士天, 等. 非线性工程地质学导引[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.(QIN Siqing, ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, et al. An introduction to nonlinear engineering geology[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993.(in Chinese))
- [9] 左宇军, 李夕兵, 张义平. 动静组合加载下的岩石破坏特性[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.(ZUO Yujun, LI Xibing, ZHANG Yiping. Study on failure characteristics of rock under static-dynamic coupling loading[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.(in Chinese))
- [10] PATERSON M S, WONG T F. Experimental rock deformation—the brittle field[M]. 2nd ed. New York: Spinger-Verlag, 2005.
- [11] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- [12] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. Florida, USA: CRC Press, 2007.
- [13] 陈颙, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.(CHEN Yong, HUANG Tingfang, LIU Enru. Rock physics[M]. University of Science and Technology of China Press, 2009.(in Chinese))
- [14] 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试验研究[J]. 地震, 1999, 19(4): 413 - 418.(LIN Peng, TANG Chun'an, CHEN Zhonghui, et al. Numerical and experimental study on deformation and failure behavior in a double-rock specimen system[J]. Earthquake, 1999, 19(4): 413 - 418.(in Chinese))
- [15] 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): 1 487 - 1 464.(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): 1 487 - 1 464.(in Chinese))
- [16] 谢和平, 冯夏庭. 灾害环境下重大工程安全性的基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.(XIE Heping, FENG Xiating. Basic research of the security of major projects under disasters environment[M]. Beijing: Science Press, 2009.(in Chinese))
- [17] 窦林名, 田京城, 陆莱平, 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): 3 541 - 3 544.(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): 3 541 - 3 544.(in Chinese))
- [18] 齐庆新. 层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究[博士学位论文][D]. 北京: 煤炭科学研究总院北京开采研究所, 1996.(QI Qingxin. Theory of rockburst caused by structure failure of bedded coal rock mass and its application[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Beijing Mining Research Institute, China Coal Research Institute, 1996.(in Chinese))
- [19] 李纪青, 齐庆新, 毛德兵, 等. 应用煤岩组合模型方法评价煤岩冲击倾向性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 805 - 4 810.(LI Jiqing, QI Qingxin, MAO Debing, et al. Discussion on evaluation method of bursting liability with composite model of coal and rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 4 805 - 4 810.(in Chinese))
- [20] 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): 2 402 - 2 408.(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): 2 402 - 2 408.(in Chinese))
- [21] 钱家营矿地测科. 钱家营地质报告[R]. 开滦: 钱家营矿地测科, 2008.(Department of Geology Survey in Qianjiaying Coal Mine. Geology report of Qianjiaying coal mine[R]. Kailuan: Department of Geology Survey in Qianjiaying Coal Mine, 2008.(in Chinese))
- [22] BROWN E T. Rock characterization, testing and monitoring: ISRM suggested methods[M]. Oxford: Pergamon Press, 1981.
- [23] 潘鹏志, 周辉, 冯夏庭. 岩石I类和II类曲线形成机制的弹塑性细胞自动机分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 3 823 - 3 829.(PAN Pengzhi, ZHOU Hui, FENG Xiating. Analysis of mechanism of rock behaviors of classes I and classes II using elastoplastic cellular automata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 823 - 3 829.(in Chinese))
- [24] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.