

考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及 单轴压缩试验研究

刘恺德, 刘泉声, 朱元广, 刘 滨

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对淮南矿区 B₁₀ 煤层以水平层理为主, 且层理性较强的特点, 通过巴西劈裂及单轴压缩试验, 研究煤岩在垂直和平行于层理面方向上的拉、压力学特性。研究表明: (1) 煤岩垂直和平行于层理面方向抗拉强度均具有明显的离散性, 但前者离散程度更大; 对比两者均值, 前者显然小于后者, 各向异性显著。(2) 宏观煤岩成分分布的随机性及其物理力学性质的差异是导致煤岩抗拉特性离散性的重要条件; 而宏观煤岩成分的条带状分布特点, 以及煤岩割理系统分布的方向性, 则是决定煤岩力学特性各向异性的内在原因。(3) 煤岩垂直与平行于层理面方向单轴压缩轴向应力-应变曲线相比, 前者峰前变形特征相似, 力学性态稳定, 峰后应力跌落迅速, 脆性特征明显; 后者则峰值前、后各曲线均变形各异, 力学性态不稳定。煤样的轴向峰值应变均小于 1%, 变形特征属脆性破坏。(4) 垂直和平行于层理面方向单轴压缩煤样的断口破坏形态分别以剪切和劈裂破坏为主, 且 2 个方向的单轴压缩强度及变形参数均具有明显差异, 各向异性特征显著。(5) 煤岩垂直和平行于层理面方向单轴压缩特性均具有一定的离散性, 但后者离散程度更大。(6) 煤岩单轴抗压强度远大于抗拉强度, 垂直和平行于层理面方向单轴抗压强度分别为抗拉强度的 40.1 和 14.7 倍。

关键词: 采矿工程; 煤岩; 层理; 抗拉强度; 单轴压缩试验; 垂直; 平行; 各向异性

中图分类号: TD 322

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2013)02-0308-09

EXPERIMENTAL STUDY OF COAL CONSIDERING DIRECTIVITY EFFECT OF BEDDING PLANE UNDER BRAZILIAN SPLITTING AND UNIAXIAL COMPRESSION

LIU Kaide, LIU Quansheng, ZHU Yuanguang, LIU Bin

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: In view of the characteristics of B₁₀ coal layers with significant horizontal bedding in Huainan mining area, tensile and compressive mechanical properties in the directions of vertical and parallel to the coal bedding plane are researched by the Brazilian splitting and uniaxial compression tests. The results show that: (1) Tensile strength in the directions of vertical and parallel to the coal bedding plane are discrete, but the former discrete level is much more. Comparing the mean values in both directions, the former is obviously less than the latter, tensile strength has obvious anisotropy. (2) The random distribution of macroscopic coal composition and its differences on physico-mechanical properties are the important conditions which lead to the discreteness of tensile strength. Moreover, banding distribution characteristics of macroscopic coal components and directivity of coal cleat system are the internal causes to decide the anisotropy of coal mechanical properties. (3) Comparing the axial stress-strain curves in the directions of vertical and parallel to the coal bedding plane under uniaxial compression,

收稿日期: 2012-08-20; **修回日期:** 2012-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41130742); 国家自然科学基金青年基金项目(41102198); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-152)

作者简介: 刘恺德(1970-), 男, 1995年毕业于昆明理工大学采矿工程专业, 现为博士研究生、工程师, 主要从事地下工程稳定性、含瓦斯煤岩体力学及渗透行为方面的研究工作。E-mail: liukaide2006@163.com

the former pre-peak deformation characteristics are similar ; the mechanical properties are stable ; the post-peak stress drops quickly and the brittle feature is apparent. However , the latter pre-peak and post-peak deformation characteristics of each curve are different ; and mechanical properties are unstable. Meanwhile , the axial peak strains of all coal samples are less than 1%. Thus ,the deformation features are in a brittle failure state. (4) Fracture failure patterns of coal samples in the directions of vertical and parallel to the bedding plane are respectively given priority to shear and fracturing failure under uniaxial compression ; and the uniaxial compression strength and deformation parameters in both directions are obviously different. In other words , the anisotropy is apparent. (5) The uniaxial compression characteristics in the direction of vertical and parallel to the coal bedding plane are discrete ; but the latter discreteness is much more obvious. (6) The uniaxial compressive strength is much greater than the tensile strength , uniaxial compression strength in the directions of vertical and parallel to bedding plane are respectively 40.1 and 14.7 times of tensile strength.

Key words : mining engineering ; coal ; bedding ; tensile strength ; uniaxial compression test ; vertical ; parallel ; anisotropy

1 引言

层理是煤层的主要构造标志，根据其形态可分为水平、波状和斜层理等，通常由于在沿着垂直层理方向上宏观煤岩成分或无机矿物夹层成分的差异，煤层表现出明显的不均匀性^[1-2]。那么这种不均衡性是否会影响煤岩在不同层理方向上的力学特性呢？T. P. Medhurst 和 E. T. Brown^[3]在进行大煤样单轴压缩试验时发现，暗淡型煤样峰值强度大于相同尺寸的光亮型煤样。吴基文和闫立宏^[4]对煤岩抗拉强度的测试研究表明，煤岩不同层理方向的抗拉强度具有明显的各向异性。可见，煤岩的力学特性具有层理方向性效应。而在采动条件下，煤岩常处于复杂的应力环境中，拉伸、压缩应力状态不一而足，张拉、剪切破坏失稳现象普遍存在。因此，随着煤矿开采难度的不断加大，全面理清不同层理方向上煤岩的拉、压基本力学特性，对煤岩的力学行为进行研究，对煤矿灾害防治及安全高效生产具有重要意义。

到目前为止，有关煤岩单轴压缩特性方面的研究，国内外学者已进行了很多。如 C. T. Holland 等^[5-6]通过测试不同尺寸和形状的无烟煤试块，得到了“尺寸效应”和“形状效应”两个结论；A. M. Hirt 和 A. Shakoor^[7]进行煤岩单轴压缩试验后发现，不同煤层和不同煤矿同煤层煤样的平均抗压强度差别较大，即使取自同一煤层，煤样抗压强度也具有较大离散性；而国内，刘宝琛等^[8]对煤岩抗压强度的尺寸效应进行了研究；赵扬锋等^[9]对煤样电荷感应规律进行了研究；尹光志等^[10-12]则对煤岩损伤演化及声发射规律等进行了研究，等。分析后不难发现，这些研究内容涵盖尺寸、形状、赋存层位等条件改

变对煤岩单轴力学特性的响应，也包含对单轴条件下所衍生的煤岩损伤、声发射、电荷感应等诸多特性的认识。但煤岩层理方向对其力学特性影响的研究还鲜见报道。在煤岩抗拉强度试验研究方面，尽管受试验条件等因素的影响，开展得相对较少，但吴基文等^[4, 13]在对方形煤样的劈裂试验中，已经考虑煤岩层理方向对抗拉强度的影响。不过，采用圆柱形标准试件进行考虑层理方向性的劈裂试验研究还未见报道，鉴于煤岩力学特性的形状效应，进一步进行考虑层理方向效应煤岩抗拉强度试验非常必要。

总之，进行考虑层理方向效应的煤岩力学特性研究是当前一个崭新的研究思路。本文针对淮南矿区望峰岗井 B₁₀ 煤层以水平层理为主，且层理性较强的特点^[14]，通过巴西劈裂及单轴压缩试验，研究煤岩在垂直和平行层理方向上的拉、压力学特性，为煤矿开采、防止煤与瓦斯突出设计等提供基础数据和理论依据。

2 试验条件

2.1 煤样采集与加工

试验用煤取自淮南矿区谢一矿望峰岗井 - 780 m 开采水平的 B₁₀ 煤层，煤种均为烟煤。由于研究中要考虑煤岩层理面的方向效应。因此，加工煤样时，在采用 ZS - 100 型岩石钻机取芯前，先沿原状块煤平行或垂直于层理面方向的一侧找平或取平，然后将块煤找平或取平一侧转于底部，并将其置于取芯钻下方垫板上，且尽可能放稳对正，并用夹具固定，以确保钻取的煤芯轴向与层理面方向垂直或平行。最后，根据煤和岩石物理力学性质测定方法^[15]，按轴向与层理面方向垂直或平行的规则对原状块煤

钻芯，再经切割、打磨等工序，精加工为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 原煤标准试件，以及 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的劈裂试验煤样(见图 1)，为避免混淆，宜将加工好的煤样及时标记。其中单轴压缩试验煤样选取 10 块，5 块轴向与层理面垂直，5 块与层理面平行；劈裂试验煤样同样选取 10 块，但要求煤样层理面均与轴向平行。且所有选取煤样尽可能克服肉眼可见的结构不均匀性及缺陷，使其离散性尽量降低。

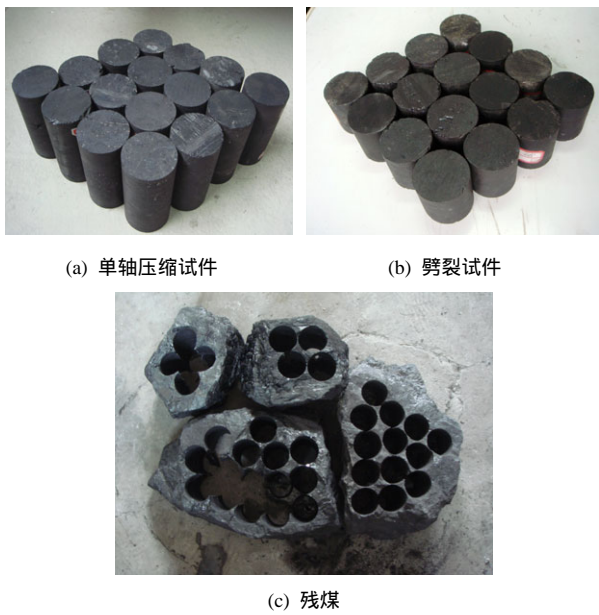


图 1 部分试验煤样及残煤

Fig.1 Part of the test coal samples and residual coal

2.2 试验仪器

对煤样的劈裂及单轴压缩试验，均利用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 岩石力学试验系统(见图 2)进行。

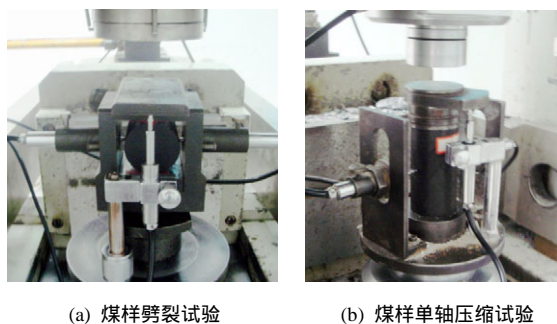


图 2 RMT-150C 岩石力学试验系统

Fig.2 RMT-150C rock mechanics testing system

3 煤岩层理不同方向劈裂试验

3.1 试验方法

煤岩不同层理方向抗拉强度的测试采用巴西劈裂法，试验前，先对选取的 10 块层理面均与轴向平行的劈裂试验煤样，用记号笔在其两端绘制与层理面平行的层理方向示意线，并按每组 5 块，随机分为 2 组。之后，再分别对每组煤样如图 3 所示进行层理方向的准确定位，其中一组定位时，须轻微旋转煤样使其端面的层理方向示意线尽可能处于水平，以确保层理面与加载方向垂直；而另一组煤样，则须使其两端的层理方向示意线尽可能处于铅直方向，以确保层理面与加载方向平行(图 3 中，表示垂直，表示平行)。然后，即可分别对 2 种不同层理方向的煤样加载，进行劈裂试验。

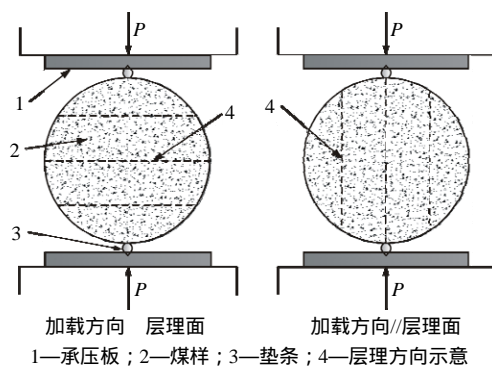


图 3 煤样不同层理面方向加载示意图

Fig.3 Sketch of coal samples on the different directions to the bedding plane under loadings

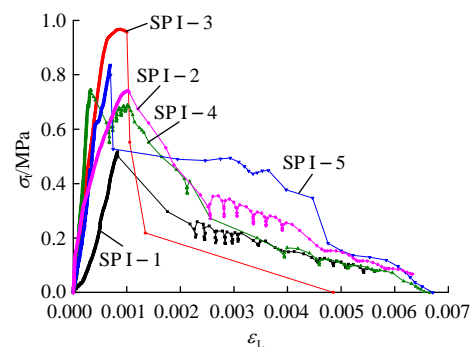
3.2 试验结果

巴西劈裂试验中，煤样抗拉强度是在测得煤样破坏时的极限载荷后，通过下式^[15]求得的：

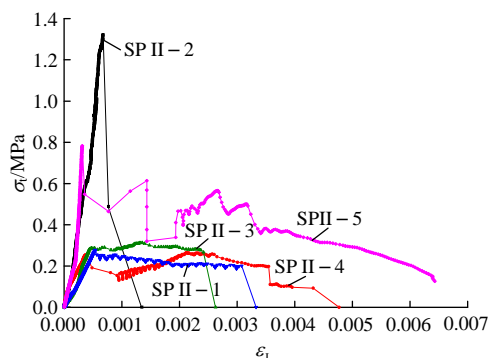
$$\sigma_t = 2P / (\pi DH) \tag{1}$$

式中： σ_t 为抗拉强度， P 为极限荷载， D 为煤样直径， H 为煤样高度。

试验结果如图 4 及表 1 所示，图 4 中字母数字记号为煤样编号， ϵ_L 为横向应变；表中，表示加载方向与煤样层理面平行，其强度为垂直于层理面方向抗拉强度，表示加载方向与层理面垂直，其



(a) 平行于层理面方向



(b) 垂直于层理面方向

图 4 煤样不同层理方向抗拉强度与横向应变关系曲线

Fig.4 Tensile strength and lateral strain curves of coal sample in different bedding directions

表 1 煤样基本参数及巴西劈裂试验结果

Table 1 Basic parameters of coal samples and the results of Brazilian splitting test

| 煤样编号 | 直径/mm | 高度/mm | 密度/(g·cm ⁻³) | 层理面与加载方向 | 极限荷载/kN | 抗拉强度/MPa | | 变异系数 |
|---------|-------|-------|--------------------------|----------|---------|----------|-------|-------|
| | | | | | | 实测值 | 均值 | |
| SP I-1 | 49.56 | 49.16 | 1.341 | | 1.979 | 0.517 | | |
| SP I-2 | 49.70 | 49.16 | 1.450 | | 2.848 | 0.742 | | |
| SP I-3 | 49.56 | 48.82 | 1.432 | | 3.675 | 0.967 | 0.761 | 0.330 |
| SP I-4 | 49.66 | 49.36 | 1.411 | | 2.872 | 0.746 | | |
| SP I-5 | 49.72 | 49.02 | 1.407 | | 3.197 | 0.835 | | |
| SP II-1 | 49.68 | 49.97 | 1.377 | | 1.076 | 0.276 | | |
| SP II-2 | 49.46 | 48.75 | 1.406 | | 5.011 | 1.323 | | |
| SP II-3 | 49.45 | 49.22 | 1.421 | | 1.197 | 0.313 | 0.592 | 1.492 |
| SP II-4 | 49.62 | 48.88 | 1.405 | | 1.010 | 0.265 | | |
| SP II-5 | 49.70 | 49.34 | 1.455 | | 3.016 | 0.783 | | |

强度为平行于层理面方向抗拉强度。从统计的角度分析，可以看出：

(1) 煤岩不同层理方向的抗拉强度均具有一定的离散性，但离散程度并不相同，平行于层理面方向抗拉强度的变异系数(标准差与均值的比值)为 0.330，而垂直于层理面方向则为 1.492，显然，后者的离散程度更大。

(2) 煤岩平行和垂直于层理面方向的抗拉强度均值分别为 0.761，0.592 MPa，前者明显较大，这充分反映了煤岩抗拉强度的各向异性。

3.3 试验结果分析

影响煤岩力学特性的因素很多，这里主要从两方面进行分析：(1) 通过分析典型劈裂煤样的断口，从其宏观煤岩成分的组成及含量进行说明；(2) 通过分析煤中裂隙分布特征及其与宏观煤岩成分或类

型的关系来说明。

3.3.1 试验煤样的断口特征分析

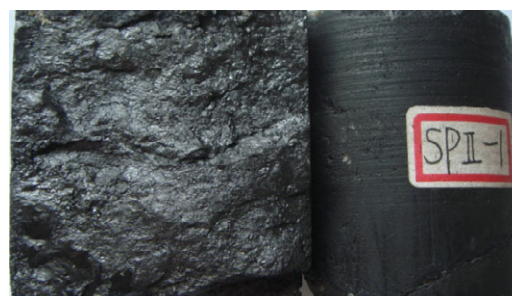
劈裂试验后，对垂直于层理面加载煤样断口观察发现，每块煤样破裂面上的宏观煤岩成分组成及结构类型差异明显。如煤样 SP I-3(见图 5(a)，肉眼可以较清晰分辨，普通相机受分辨率限制，清晰度较低)，其劈裂断面主要是由 6~8 条宽 1~2 mm 镜煤细条带，3~5 条宽 3~5 mm 亮煤中条带，及 2 条宽 6~8 mm 暗煤宽条带和少许嵌于其中的厚度小于 1 mm 的线理状结构丝炭，等多种成分相互交替构成的结构；而煤样 SP I-5(见图 5(b))的断口成分则主要以 1 条 3~5 mm 镜煤中条带，1 层厚 3~5 mm 粒状小孢子和木栓层，及 3 条 7~12 mm 亮煤宽条带，等间隔交替为主。显然，二者在宏观成分及其分布结构上有明显不同，而且这种分布往往是随机的，即使从同一块煤上加工出的煤样之间也不尽相同。加之不同宏观煤岩成分在物理力学性质方面的差异^[1]，如暗煤比亮煤和镜煤硬度大，镜煤和丝炭(未矿化的)最脆，而暗煤的韧性较大等，必然导致煤样之间抗拉强度的离散性。



(a) SP I-3(层理面 加载方向)



(b) SP I-5(层理面 加载方向)



(c) SP II-1(层理面 加载方向)



(d) SP II-4(层理面 加载方向)

图5 典型煤样劈裂破坏断口形态

Fig.5 Fracture patterns of typical coal samples with splitting failure

同时,对平行于层理面加载煤样断口观察后,却发现其断口宏观煤岩成分相对单一,如煤样 SP II-1(见图 5(c))断口上除零星分布少许亮煤外,主要以暗煤为主;而煤样 SP II-4(见图 5(d))断口上除中间夹有 2 条透镜状镜煤细条带之外,则主要以亮煤为主。可见,就单个煤样而言,断口成分的单一性是明显的,而两个煤样相比,这种单一性则往往表现为两者的对立性,差异显著。因此,这种差异性一方面体现了煤样抗拉强度离散性的原因;另一方面也反映出垂直比平行于层理面方向抗拉强度离散性更高的原因,在于宏观煤岩成分复杂断口的抗拉力学特性,体现的是多种成分力学特性的分配,具有均衡性,而宏观煤岩成分单一断口,体现的多是单一成分的单独特性,具有孤立性。而且不难理解,这种均衡性和孤立性在垂直和平行于层理面方向加载的 2 组煤样内部,反映的是各组自身抗拉强度的离散性大小,但在 2 组煤样之间所表现出的不同力学特性,则体现的是煤岩层理不同方向抗拉强度的各向异性特征。

3.3.2 从煤中裂隙的角度分析其力学特性的各向异性及离散性

寇绍全等^[16-17]的研究表明,裂隙对岩体力学性质有显著影响。煤中裂隙的存在同样是影响煤岩力学特性的关键,按成因煤中裂隙一般分为外生和内生裂隙 2 种。外生裂隙多与地质构造运动有关,其力学性质可以是压性、张性或剪性的;内生裂隙是煤中凝胶化物质在煤化作用过程中受了温度和压力的影响,内部结构变化,体积均匀收缩,产生内张力而形成的,力学特性是张性的^[18-19]。对于完整煤样而言,这里仅讨论内生裂隙,即割理的影响。割理作为煤中天然存在的裂隙,一般呈相互垂直的 2 组(面、端割理)出现,且与煤层层理面垂直或高角度相交。因此,由层理和割理共同构成的割理系统

分布的方向性,是导致煤岩力学特性各向异性的内因。

根据对煤中割理的研究^[20-21]发现,割理发育程度不但受煤化变质程度的影响,而且还受宏观煤岩类型的制约(其中,光亮型煤割理最发育,而向半亮、半暗、暗淡型煤过渡,则割理密度依次降低),而宏观煤岩类型取决于宏观煤岩成分,割理发育的载体主要是镜煤和亮煤,也即镜煤和亮煤(其显微煤岩基础在于镜质组)的含量多少制约着割理的发育程度,进而影响煤岩力学特性。因此,宏观煤岩成分分布的随机性、不确定性制约着煤岩力学特性的离散性;而割理系统分布的方向性,制约着煤岩力学特性的各向异性。

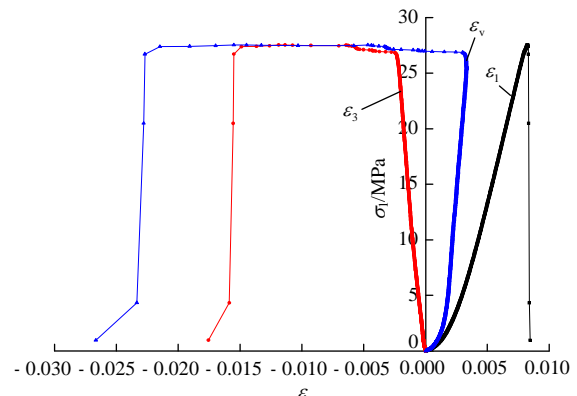
4 煤岩层理不同方向单轴压缩试验

4.1 试验方法

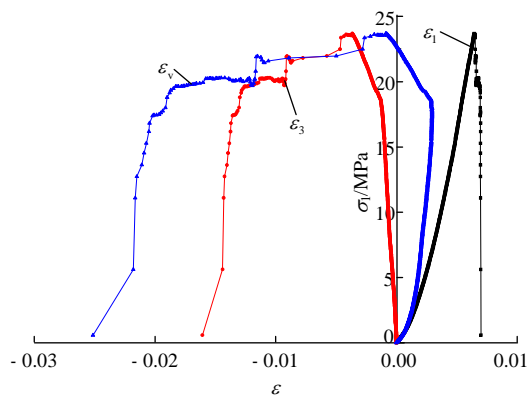
试验在 RMT-150C 岩石力学试验系统(见图 2(b))上进行,试验过程采用轴向位移控制方式,加载速率恒定在 0.01 mm/s。对已选取的 10 块标准单轴煤岩试样,分别按轴向与层理面垂直、平行分为 2 组,每组 5 块,依次进行垂直、平行于层理面单轴压缩试验。需要说明以下研究中的 2 个概念,即垂直于层理面单轴压缩试验,是指对轴向与层理面垂直的煤样进行的轴向加载试验;而平行于层理面单轴压缩试验,是指对轴向与层理面平行的煤样进行的轴向加载试验。

4.2 垂直于层理面单轴压缩试验结果

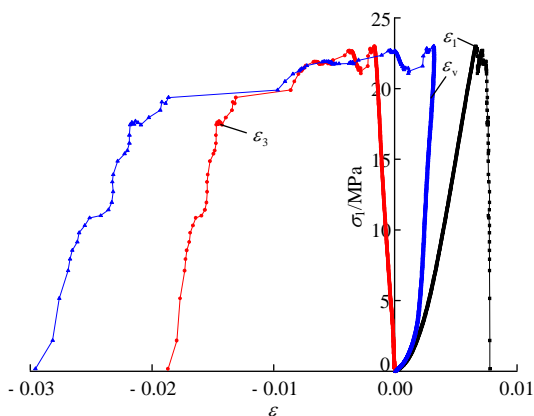
试验后,部分典型垂直于层理面单轴加载应力-应变曲线如图 6 所示,图中 $\epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_v$ 分别为轴向、侧向、体积应变;煤样的破坏状态照片如图 7 所示;试验结果及参数统计分析见表 2,表中, D 为煤样直径; H 为煤样高度; ρ 为煤样密度; σ_m 为峰值强度; E 为弹性模量; μ 为泊松比; ϵ_{1m} 为轴向峰值应变; ϵ_{3m} 为横向峰值应变; E_{50} 为变形模量。



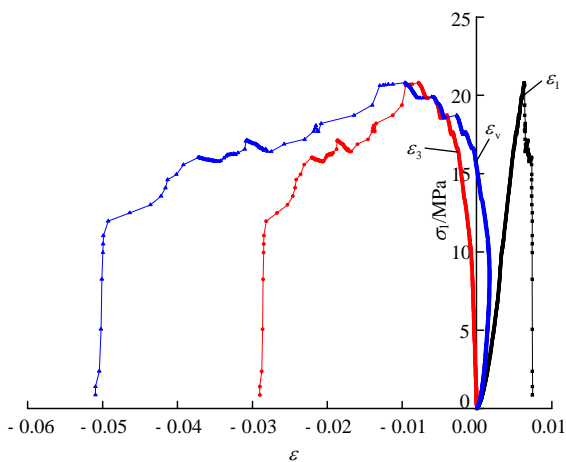
(a) UC-3



(b) UC-5



(c) SW-5



(d) SW-21

图 6 典型煤样垂直于层理面方向单轴压缩应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves for typical coal samples in the direction of vertical to the bedding plane under uniaxial compression



图 7 煤样垂直于层理面方向单轴压缩破坏形态

Fig.7 Failure patterns of coal samples in the direction of vertical to the bedding plane under uniaxial compression

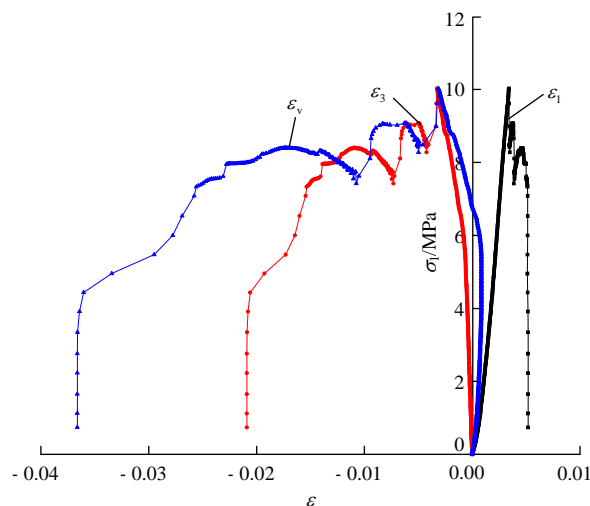
表 2 煤样垂直于层理面方向单轴压缩试验结果

Table 2 Test results of coal samples in the direction of vertical to the bedding plane under uniaxial compression

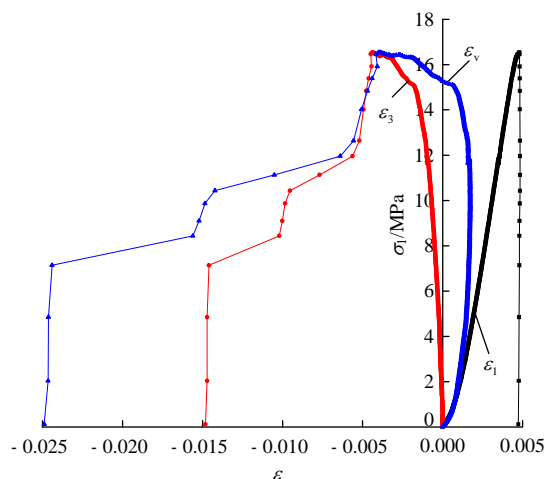
| 试件 编号 | D/ mm | H/ mm | ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | σ_m / MPa | E/ GPa | μ | ε_{1m} / 10^{-3} | ε_{3m} / 10^{-3} | E_{50} / GPa |
|----------|----------|----------|---|---------------------|-----------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| UC-3 | 49.760 | 94.680 | 1.415 | 27.536 | 4.418 | 0.338 | 8.258 | -11.369 | 2.695 |
| UC-4 | 49.660 | 96.960 | 1.427 | 23.827 | 4.034 | 0.425 | 7.860 | -5.640 | 2.863 |
| UC-5 | 49.610 | 99.300 | 1.483 | 23.678 | 3.860 | 0.310 | 7.331 | -4.168 | 2.532 |
| SW-5 | 49.760 | 98.980 | 1.414 | 22.992 | 4.671 | 0.330 | 6.598 | -1.715 | 2.697 |
| SW-21 | 49.720 | 92.450 | 1.429 | 20.797 | 4.723 | 0.388 | 6.312 | -7.813 | 3.021 |
| 均值 | 49.700 | 96.470 | 1.433 | 23.766 | 4.341 | 0.358 | 7.272 | -6.141 | 2.762 |
| 变异系数 | 0.001 | 0.030 | 0.020 | 0.102 | 0.088 | 0.132 | 0.113 | 0.598 | 0.067 |

4.3 平行于层理面单轴压缩试验结果

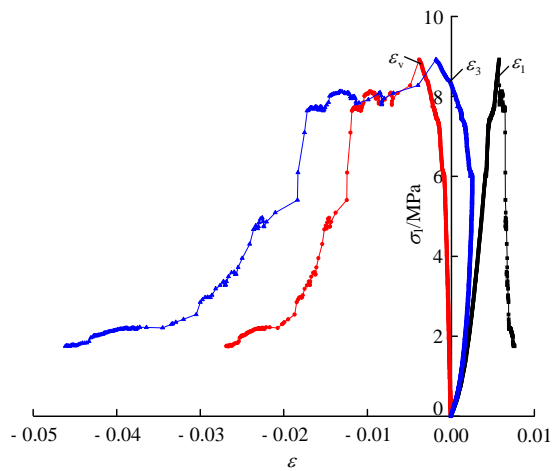
试验后，部分典型平行层理面单轴加载应力-应变曲线如图 8 所示；煤样的破坏状态照片如图 9 所示；试验结果及参数统计分析见表 3。



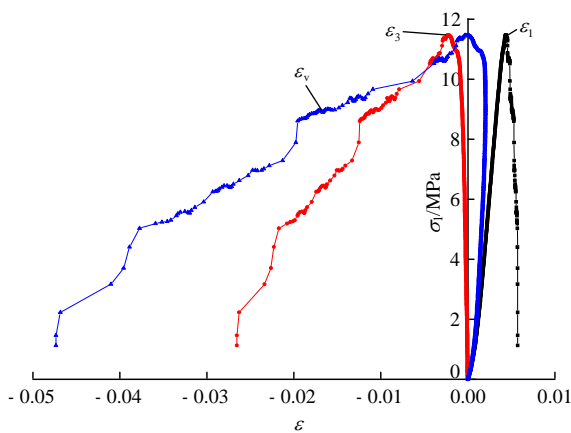
(a) UC-1



(b) UC-2



(c) UCT-1



(d) UCT-2

图8 典型煤样平行于层理面方向单轴压缩应力-应变曲线
Fig.8 Stress-strain curves of typical coal samples in the direction of parallel to the bedding plane under uniaxial compression



图9 煤样平行于层理面方向单轴压缩破坏状态

Fig.9 Failure patterns of coal samples in the direction of parallel to the bedding plane under uniaxial compression

4.4 单轴压缩试验结果分析

根据试验结果,对煤岩在垂直和平行于层理面方向的单轴压缩特性进行分析。

4.4.1 煤岩垂直、平行于层理面单轴压缩强度及破坏特征

(1) 由表 2, 3 可见, 5 个轴向与层理面垂直煤样的单轴抗压强度为 20.80 ~ 27.54 MPa, 平均为 23.77 MPa; 而另 5 个轴向与层理面平行煤样则为 8.89 ~ 16.54 MPa, 平均为 11.17 MPa。显然, 前者

表 3 煤样平行于层理面方向单轴压缩试验结果

Table 3 Test results of coal samples in the direction of parallel to the bedding plane under uniaxial compression

| 试件编号 | D/mm | H/mm | ρ/(g·cm ⁻³) | σ _m /MPa | E/GPa | μ | ε _{1m} /10 ⁻³ | ε _{3m} /10 ⁻³ | E ₅₀ /GPa |
|-------|--------|--------|-------------------------|---------------------|-------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| UC-1 | 49.690 | 93.570 | 1.477 | 10.028 | 3.240 | 0.431 | 3.407 | -3.273 | 2.468 |
| UC-2 | 49.650 | 96.040 | 1.409 | 16.537 | 4.105 | 0.348 | 4.792 | -4.349 | 3.039 |
| UC-6 | 49.730 | 98.000 | 1.432 | 8.892 | 2.710 | 0.415 | 5.124 | -11.228 | 2.039 |
| UCT-1 | 49.680 | 93.640 | 1.400 | 8.923 | 2.179 | 0.466 | 5.796 | -3.789 | 1.287 |
| UCT-2 | 49.720 | 93.400 | 1.442 | 11.463 | 3.224 | 0.279 | 4.359 | -2.151 | 2.408 |
| 平均值 | 49.690 | 94.930 | 1.432 | 11.168 | 3.092 | 0.388 | 4.696 | -4.958 | 2.248 |
| 变异系数 | 0.001 | 0.021 | 0.021 | 0.285 | 0.231 | 0.192 | 0.190 | 0.726 | 0.287 |

均值明显高于后者, 约为后者的 2.13 倍。

(2) 在破坏模式上, 垂直于层理面方向单轴压缩煤样的破坏形态主要以剪切破坏为主, 且易爆裂为碎块(见图 7); 而平行于层理面方向单轴压缩煤样的破坏形态则主要以劈裂破坏为主, 煤样中间多胀裂为片状, 个别煤样还存在剪切分叉破坏现象(见图 9)。

4.4.2 煤岩垂直、平行于层理面单轴压缩变形特征

(1) 图 10 为煤样不同层理面方向单轴压缩轴向应力-应变曲线。从图中不难看出, 煤样的压缩试验过程基本都经历了压密、弹性、屈服和破坏 4 个阶段。两者煤样曲线之间峰值前后变形特征有较大不同, 前者(, , , ,)峰值前变形特征非常相似, 呈现出较为稳定的力学性状; 峰值后应力跌落迅速, 分级跌落平台较短, 残余应力持续时间少, 跌落速度总体较快, 表现出明显的脆性特征。而后者(, , , ,)则峰前形态各异, 有些(, ,)变形特征同前, 较为稳定, 而有些(,)则屈服段明显较长, 和前者变形差别明显; 峰后同样多种形态并举, 有的()应力跌落迅速, 有的

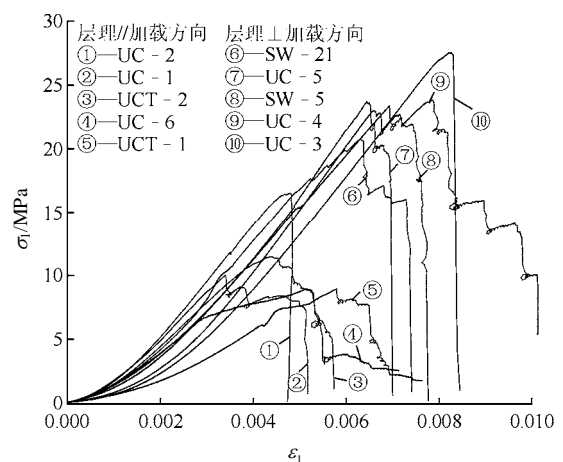


图 10 煤样不同层理面方向单轴压缩轴向应力-应变曲线
Fig.10 Axial stress-strain curves of coal samples in different directions to the bedding plane under uniaxial compression

(, ,)呈分级跌落状态,还有的()则表现出明显的应变软化现象,总体上力学性能离散性显著。

由于工程上对于单轴压缩试验的结果,一般用轴向峰值应变来划分岩石的脆延性,其中峰值应变小于 1%时为脆性破坏,1%~5%为脆延性破坏,大于 5%时为延性破坏^[22]。而本次试验中,2 组煤样轴向峰值应变均小于 1%(见表 2,3),可见,按工程指标煤样破坏均属于脆性破坏。

(2) 观察表 2,3 中煤样的变形参数后可知,轴向与层理面垂直煤样的弹性模量为 3.86~4.72 GPa,平均为 4.34 GPa;变形模量为 2.53~3.02 GPa,平均为 2.76 GPa;泊松比为 0.310~0.425,平均为 0.358。而轴向与层理面平行煤样的弹性模量则为 2.18~4.11 GPa,平均为 3.09 GPa;变形模量为 1.29~3.04 GPa,平均为 2.25 GPa;泊松比为 0.279~0.466,平均为 0.388。很显然,将 2 组煤样的变形参数对比可以发现 2 个明显特点: 每组煤样内部各自变形参数离散性明显; 由 2 组煤样之间变形参数差异所反映出的单轴压缩特性显著的各向异性,即从统计角度看,2 组煤样在弹性模量、变形模量及泊松比上均存在明显差异。

(3) 对比分析煤样的轴向和侧向峰值应变可以发现,垂直于层理面单轴压缩煤样的轴向和侧向峰值应变均值分别为 0.007 272,0.006 141,可知,煤样破坏时,轴向峰值应变大于侧向峰值应变;而平行于层理面单轴压缩煤样的轴向、侧向峰值应变均值分别为 0.004 696,0.004 958,可见煤样破坏时,侧向峰值应变大于轴向峰值应变。由此结合煤样的破坏模式可以推知,在轴向与层理面平行煤样的单轴试验中,劈裂鼓胀破坏模式是导致侧向峰值应变较大的原因;而轴向与层理面垂直煤样的侧向变形则与其层理孔隙的压缩以及剪切破坏模式相关。

4.4.3 煤岩垂直、平行于层理面方向单轴压缩特性的离散性

上述分析表明,煤岩在单轴压缩力学特性方面均具有一定程度的离散性,为了直观反映这一特点,将表 2,3 中煤样基本参数及试验结果的变异系数用柱状图表示(见图 11)。从图 11 中显见,尽管轴向与层理面垂直、平行 2 组煤样基本条件(D, H, ρ)的变异系数很小,且相差无几。但在试验结果中,峰值强度(σ_m)、变形参数(E, μ, E_{50})、峰值应变($\varepsilon_{1m}, \varepsilon_{3m}$)等的变异系数却均较大,煤样在垂直和平行于层理面方向单轴压缩力学特性均表现出明显的离散性,但后者离散程度更加突出。原因可以从 2 组煤样的宏观煤岩成分或类型,以及由层理与割理共同

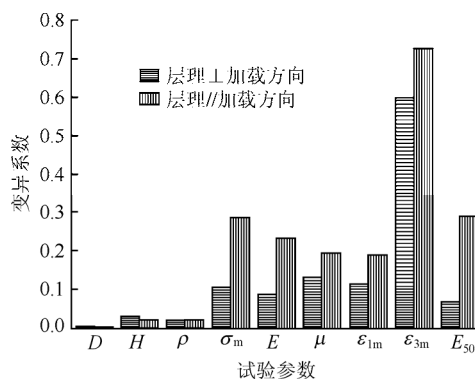


图 11 煤样基本参数及试验结果变异系数柱状图

Fig.11 Basic parameters of coal samples and histograms of variation coefficient from test results

构成的煤层割理系统的分布规律去剖析,这在煤岩抗拉强度的离散性分析中已作阐述,不再赘述。

5 单轴压缩强度与抗拉强度的对比分析

尽管煤样的抗拉强度及单轴压缩强度均具有一定的离散性,但其统计意义明显。根据试验结果(见表 1,2,3),在垂直于层理面方向上,煤岩单轴压缩强度与抗拉强度的比值为 40.1;而在平行于层理面方向上则为 14.7。可见,在垂直和平行于层理面的两个方向上,煤岩抗拉强度均远小于抗压强度,尤其在垂直于层理面方向上更为显著,这表明煤岩在受载不大时极易出现拉伸破坏。因此,在煤矿开采及防止煤矿灾害设计中,为准确评价煤岩力学特性,考虑不同层理方向上煤岩拉压强度比值的差异非常必要。

6 结 论

通过对轴向与层理面方向垂直和平行煤样进行劈裂及单轴压缩试验研究,得到了以下主要结论:

(1) 煤岩垂直和平行于层理面方向抗拉强度均具有比较明显的离散性,但前者的变异系数更大,离散程度更强;对比两者均值,前者显然小于后者,各向异性特征显著。

(2) 宏观煤岩成分的随机分布及其物理力学性质的差异是煤岩抗拉特性离散性的重要条件;宏观煤岩成分的条带状分布特点,以及煤岩割理系统分布的方向性,是决定煤岩力学特性各向异性的内在原因。

(3) 煤岩垂直和平行于层理面方向单轴压缩应力-应变曲线均可分为压密、弹性、屈服和破坏 4 个

阶段。两者相比,前者峰前变形特征相似,力学性态稳定,峰后应力跌落迅速,脆性特征明显;后者则峰值前、后各曲线均变形各异,力学性态不稳;煤样的轴向峰值应变均小于1%,变形特征属脆性破坏。

(4) 垂直和平行于层理面方向单轴压缩煤样的断口破坏形态分别以剪切和劈裂破坏为主,且2个方向在单轴压缩强度、弹性模量、泊松比及峰值应变等参数上均具有明显差异,各向异性特征显著。

(5) 煤岩垂直、平行于层理面方向的单轴压缩特性均具有一定的离散性,但后者各参数的变异系数更大,离散性更强。

(6) 煤岩单轴抗压强度远大于抗拉强度,垂直和平行于层理面方向单轴压缩强度分别为抗拉强度的40.1和14.7倍。

另外,文中仅对加载方向与层理面垂直、平行时煤岩的劈裂和单轴压缩力学特性及机制进行了研究,并未开展加载方向与层理面以其他角度相交的情形,要全面系统地认识煤岩层理对其力学行为的方向效应,尚需在今后的研究中进一步深入,希望本文能够起到抛砖引玉的作用。

参考文献(References):

- [1] 杨起,韩德馨. 中国煤田地质学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1979: 22-54.(YANG Qi, HAN Dexin. China coal geology[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1979: 22-54.(in Chinese))
- [2] 王锦昌,邓红琳,袁立鹤,等. 大牛地气田煤层失稳机制分析及对策[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(2): 4-8.(WANG Jinchang, DENG Honglin, YUAN Lihe, et al. Instability mechanism and countermeasures of coal bed in Daniudi gas field[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2012, 34(2): 4-8.(in Chinese))
- [3] MEDHURST T P, BROWN E T. A study of the mechanical behavior of coal for pillar design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(8): 1087-1104.
- [4] 吴基文,闫立宏. 煤岩抗拉强度两种室内间接测定方法比较与成果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1643-1647.(WU Jiwen, YAN Lihong. Comparison study on two kinds of indirect measurement methods of tensile strength of coal in lab[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1643-1647.(in Chinese))
- [5] HOLLAND C T, GADDY F L. Some aspects of permanent support of overburden on coal beds[C]// Proceedings of the West Virginia Coal Mining Institute. [S. l.]: [s. n.], 1956: 43-46.
- [6] GADDY F L. A study of the ultimate strength of coal as related to the absolute size of cubical specimens tested[J]. West Virginia Polytechnic Bulletin, 1956, 112(5): 1-27.
- [7] HIRT A M, SHAKOOR A. Determination of unconfined compressive strength of coal for pillar design[J]. Mining Engineering, 1992, 292(8): 1037-1041.
- [8] 刘宝琛,张家生,杜奇中,等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 611-614.(LIU Baochen, ZHANG Jiasheng, DU Qizhong, et al. A study of size effect for compression strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 611-614.(in Chinese))
- [9] 赵扬锋,潘一山,刘玉春,等. 单轴压缩条件下煤样电荷感应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 306-312.(ZHAO Yangfeng, PAN Yishan, LIU Yuchun, et al. Experimental study of charge induction of coal samples under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 306-312.(in Chinese))
- [10] 尹光志,代高飞,皮文丽,等. 单轴压缩荷载作用下煤岩损伤演化规律的CT实验[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2003, 26(6): 96-100.(YIN Guangzhi, DAI Gaofei, PI Wenli, et al. CT real-time analysis of damage evolution of coal under uniaxial compression[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 2003, 26(6): 96-100.(in Chinese))
- [11] 刘保县,黄敬林,王泽云,等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3234-3238.(LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 3234-3238.(in Chinese))
- [12] 来兴平,吴学明,高喜才,等. 基于MTS-AE单轴压缩下的煤岩损伤特征[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(2): 375-378.(LAI Xingping, WU Xueming, GAO Xicai, et al. Characteristics analysis of coal-rock damage based on MTS-AE uniaxial compression[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(2): 375-378.(in Chinese))
- [13] 闫立宏,吴基文. 淮北杨庄煤矿煤的抗拉强度试验研究与分析[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(5): 39-41.(YAN Lihong, WU Jiwen. Test and analysis of tensile strength of coal in Huaibei Yangzhuang coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(5): 39-41.(in Chinese))
- [14] 吴俊. 突出煤的显微结构及表面特征研究[J]. 煤炭学报, 1987, (2): 40-46.(WU Jun. Study on microstructure and surface features of coal prone to outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1987, (2): 40-46.(in Chinese))
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 煤和岩石物理力学性质测定方法[S]. 北京:中国煤炭工业协会, 2010.(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; Standardization Administration of the People's Republic of China. Methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock[S]. Beijing: China National Coal Association, 2010.(in Chinese))
- [16] 寇绍全. 裂隙对岩石力学性质的影响[J]. 力学进展, 1980, (增1): 89-98.(KOU Shaoquan. Fissure effect on rock mechanical properties[J]. Advances in Mechanics, 1980, (Supp.1): 89-98.(in Chinese))
- [17] 鄧文清. 裂隙对岩石力学性质影响的研究[J]. 水电站设计, 1991, 7(3): 28-35.(FENG Wenqing. Research of fissure effect on rock mechanical properties[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1991, 7(3): 28-35.(in Chinese))
- [18] 刘洪林,王红岩,张建博. 煤储层割理评价方法[J]. 天然气工业, 2000, 20(4): 27-29.(LIU Honglin, WANG Hongyan, ZHANG Jianbo. Evaluation method of cleats in coal reservoir bed[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(4): 27-29.(in Chinese))
- [19] 苏现波,冯艳丽,陈江峰. 煤中裂隙的分类[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(4): 21-24.(SU Xianbo, FENG Yanli, CHEN Jiangfeng. The classification of fractures in coal[J]. Coal Geology and Exploration, 2002, 30(4): 21-24.(in Chinese))
- [20] 邹艳荣,杨起. 煤中的孔隙与裂隙[J]. 中国煤田地质, 1998, 10(4): 39-40.(ZOU Yanrong, YANG Qi. Pores and fractures in coal[J]. Coal Geology of China, 1998, 10(4): 39-40.(in Chinese))
- [21] LAUBACH S E, MARRETT R A, OLSON J E, et al. Characteristics and origins of coal cleat: a review[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35(1/4): 175-207.
- [22] 朱杰兵. 高应力下岩石卸荷及其流变特性研究[博士学位论文][D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.(ZHU Jiebing. Study on unloading mechanics and its rheological properties of rock under high tress[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.(in Chinese))