



移动阅读

张宁博,单仁亮,赵善坤,等.不同煤岩介质弯载作用下的断裂特征[J].煤炭学报,2020,45(S2):671-681.

ZHANG Ningbo, SHAN Renliang, ZHAO Shankun, et al. Investigation on cracking features of different rock under the bending load[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 671-681.

不同煤岩介质弯载作用下的断裂特征

张宁博^{1,2,3,4}, 单仁亮¹, 赵善坤^{2,3,4}, 孙中学^{2,3,4}, 董怡静^{2,3,4}, 王寅^{2,3,4}

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 3. 煤炭科学研究总院煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 4. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘 要:煤矿覆岩破坏主要为弯载作用下发生的断裂,而煤岩介质的断裂特征对于冲击地压、煤与瓦斯突出等煤矿灾害密切相关。采用煤、泥岩、砂岩等不同介质的三点弯曲实验,研究了弯载作用下煤岩介质的强度特征、裂纹扩展规律、宏观断口形貌特征及声发射变化特性,基于弹性断裂力学与均匀化方法对煤岩断裂机制进行了分析。研究表明:煤、泥岩样品的断裂峰值载荷、断裂能、断裂长度等断裂参数分布较离散,而砂岩样各参数分布则相对集中,该特征与煤岩介质内部结构密切相关,主要是由于煤及泥岩样品内部发育的微裂隙、微孔洞使得其均质度比砂岩样品高;宏观断口形貌方面,煤的宏观断口清晰可见原生裂隙,泥岩的宏观断口以微裂纹、微孔洞及层理为主,砂岩的宏观断口则仅包含少量杂质;细观断口形貌方面,煤的细观形貌表现为拉、剪断面和微裂隙,泥岩细观断口表面上分布有较多晶间断裂、微孔洞、黏土矿物及解理断裂,砂岩细观断口则仅为晶间断裂和少量微孔洞;煤样断裂声发射波形远比岩石要复杂,主波峰不明显,小断裂激发的声发射事件持续发生,而泥岩和砂岩的主断裂事件较显著,且在主断裂事件发生前通常有明显的起裂事件;弯载作用下煤岩介质尖端断裂扩展的临界应变能释放率主要受其弹性模量 E 控制,而介质的弹性模量与细观结构有关,且结构方向性对煤岩介质断裂特征具有重要影响。介质断裂的力学属性与宏观断口特征之间具有密切的关系,对不同煤岩介质的断裂特征进行了初步的研究,认识到不同煤岩介质的细观结构对于其宏观断裂的重要影响,对于更科学严谨的结论,仍需要大量的实验数据支撑才能得以验证;煤岩介质的非均质性、各向异性使得其断裂机理十分复杂,探讨宏观断裂的跨尺度问题、建立细观结构特性与宏观力学属性之间的内在联系,对于解决工程遇到的实际问题意义重大。

关键词:三点弯曲;煤岩断裂;声发射;扫描电镜;均匀化方法**中图分类号:**TD313**文献标志码:**A**文章编号:**0253-9993(2020)S2-0671-11

Investigation on cracking features of different rock under the bending load

ZHANG Ningbo^{1,2,3,4}, SHAN Renliang¹, ZHAO Shankun^{2,3,4}, SUN Zhongxue^{2,3,4}, DONG Yijing^{2,3,4}, WANG Yin^{2,3,4}

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. Beijing Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: The fracture features of overlying rock, which usually cracks under bending load, have important effects on

收稿日期:2020-04-10 修回日期:2020-06-02 责任编辑:黄小雨 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0580

基金项目:煤炭科学技术研究院科技发展基金资助项目(2019-CX-II-12);国家自然科学基金资助项目(51874176);天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2019-TD-QN017)

作者简介:张宁博(1989—),男,河北衡水人,助理研究员,博士研究生。Tel:010-84262512, E-mail:znb444@sina.com

dynamic accidents such as rock burst. The three point bending experiments of different materials including coal, mudstone, sandstone were carried out to study the strength characteristics, crack propagation rules, macro and micro fracture morphology and acoustic emission variation of coal and rock under the bending load. Then the fracture mechanism of coal and rock was discussed based on elastic fracture mechanics and homogenization method. The results are shown as follows: ① the distribution of coal and mudstone samples' fracture parameters such as peak fracture load, fracture energy and fracture length are discrete, while the parameters of the sandstone samples are relatively close, which is closely related to the internal structure of coal and rock media. It is mainly the micro-cracks and micro-holes within coal and mudstone samples that make the homogeneity of them higher than that of sandstone samples. ② As for the macroscopic of fracture surface, there are apparently primary fractures in coal, the micro-cracks, micro-holes and bedding in mudstone, and a small amount of impurities in sandstone. ③ In terms of microscopic morphology, coal is characterized by tensile and shear sections and micro-fractures, and there are many inter-granular fractures, micro-pores, clay minerals and cleavage fractures on the surface of mudstone, while the inter-granular fractures are the main pattern in sandstone. ④ The acoustic emission waveform of coal, whose main wave peak is not obvious, is far more complex than that of rock, with lots of AE events occurring persistently when rock cracks. In contrast, the main fracture events of mudstone and sandstone are very significant, usually along with obvious initiation events before the main fracture event. ⑤ The critical strain energy release rate of the fracture extension at the tip of the coal and rock under flexural loading is mainly controlled by its elastic modulus E , which is related to the meso-structure and the structural orientation. This preliminarily study on the fracture features of different coal and rock media demonstrates that the fracture mechanics properties of different media have a close relationship with macro-mesoscopic fracture characteristics and the mesoscopic structure of different coal and rock medium have important influence on its macroscopic fracture. In addition, due to the heterogeneity and anisotropy of coal and rock media, the fracture mechanism of coal and rock is very complicated. It is of significance to solve the practical problems by the cross-scale argument about macro and micro fractures and the internal relationship between micro structure characteristics and macro mechanical properties.

Key words: three-point bending; coal and rock fracture; acoustic emission; scanning electron microscope; homogenization method

断裂力学中,根据裂纹和所承受荷载形式,可将裂纹类型分为:张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)。矿山开采中顶板煤岩层受弯曲荷载发生的断裂属于I型裂纹,该I型裂纹的扩展规律及机理对于顶板岩层的稳定性具有至关重要的影响,而顶板垮断情况与冲击地压等灾害密切相关。因此研究煤岩在弯载作用下的断裂特征及机理,对煤矿动力灾害预测、预警具有重要的意义。

近年来,学者们针对煤岩弯载作用下的断裂问题十分关注,并取得了一定成果,例如李柯萱、李铁等^[1-2]研究了加载速率对砂岩破坏声发射特征和断口细观形态的影响,发现加载速率越快,前兆声发射数越少,峰值释放能量越大,细观穿晶断裂比例越高;李志成等^[3]开展了不同杂质含量岩盐弯载破坏实验,发现杂质含量对其变形、破坏具有重要影响;邓朝福等^[4]研究了不同粒度北山花岗岩的弯曲断裂力学行为及声发射特征,发现粒径越大,峰值载荷越低,断裂韧度越小,声发射事件越多,分布越广;同时,邓朝福等^[5]研究了含水状态对花岗岩弯曲破坏影响,发

现水使得岩石刚度变小,脆性减弱,强度变低。赵毅鑫等^[6]对煤在冲击载荷下的动态断裂进行了实验,认为煤体的非均质性和不连续性对动态裂纹扩展模式和裂纹扩展速度有较大影响;左建平^[7]开展了预制裂纹花岗岩弯载破坏实验,发现岩石断裂能和峰值载荷随偏心距增大而增加,认为这是由弯矩影响减小造成的;杨健锋等^[8]对不同水损伤下泥岩弯载断裂开展实验,发现随着损伤程度加深,泥岩由脆性破坏逐渐转变为延性破坏。

对于煤矿,顶板岩层中赋存较广是砂岩、泥岩和煤这3种介质,而目前的文献很少对上述3种煤岩介质的弯曲破坏规律进行系统研究。笔者通过煤岩介质三点弯曲破坏实验,研究了弯载条件下砂岩、泥岩和煤3种介质的断裂特征,分析3者之间的联系和差异,并探讨造成断裂差异性的内在机制。

1 实验方案

1.1 试样制备

三点弯曲实验所采用的试样取自山西汾西矿区

某煤矿 9+10+11 号煤层 31109 工作面及其顶板,岩性分别为煤、泥岩、砂岩。试样为长方体,尺寸为 $150\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,试样无预制裂缝,如图 1 所示。试样按照岩性分 3 组,每组样品为 3 个,其中砂岩样编号为 S1~S3,泥岩样编号为 M1~M3,煤样编号为 C1~C3。根据基础力学参数实验测试结果,砂岩密度为 $2\,587.15\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 20.74 GPa ;泥岩密度为 $2\,314.58\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 12.47 GPa ;煤的密度为 $1\,452.27\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 8.01 GPa 。试样所在煤岩地层为石炭系上统太原组地层,为海陆交互相沉积煤岩层。煤为焦煤,有机组分中以凝胶化组及半丝炭化组分为主,凝胶化组分含量 $62.2\%\sim 65.0\%$,半丝炭化组分 $17.5\%\sim 22.9\%$,稳定组分极微,含少量孢子、角质层等,无机组分均以黏土矿物为主,但含量较少。

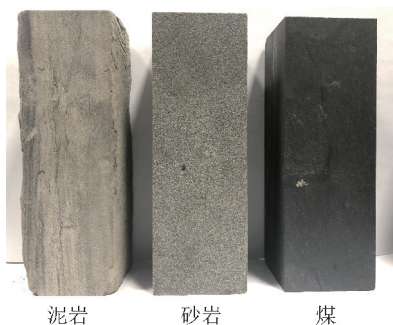


图 1 准备试样

Fig. 1 Coal and rock samples

1.2 加卸载方案

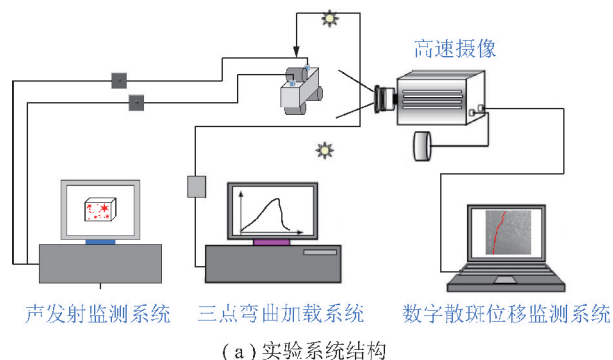
实验采用的加载系统为中国地震局地质研究所的地震动力学国家重点实验室的 WAW-D1000 微机控制电液伺服万能试验机,采样频率为 10 kHz ,上下压头均为圆柱形,与试样为线接触,下支点跨距为 90 mm 。正式加载前,先对试样进行预加载,保证压头与试样良好接触,且上压头接触线在试样中央,左右对称。实验过程中,采用负荷控制进行加载,加载速度为 10 N/s ,匀速加载直至试样破坏,记录各试样的峰值载荷。

1.3 监测方案

实验所采用的监测系统主要包括数字散斑位移监测系统和声发射监测系统,各系统监测设备及方法如图 2 所示。

数字散斑位移监测主要采用 FastcamSA2-C3 型高速摄像对实验的试样表面进行图像采集,采样频率设置为 100 Hz ,分辨率 $1\,024\text{ pixel}\times 320\text{ pixel}$,采样间隔为 10 ms ,观测时窗约为 14 s 。同时利用 C-600 高亮度白光 LED 光源对试样进行补光。

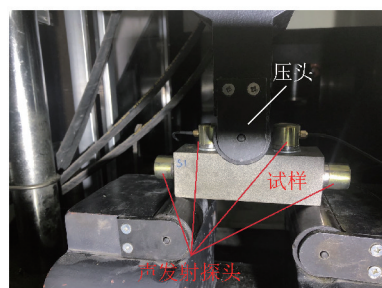
实验前,需要对试样的观测面进行预处理,以布



(a) 实验系统结构



(b) 实验系统实物



(c) 声发射探头位置

图 2 实验加载及监测系统

Fig. 2 Test loading and monitoring systems

置散斑,散斑颗粒尺寸为 4 pixel 。实际观测范围为试样正面 $160\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的长方形区域,标定后试样表面分辨率为 $156.25\text{ }\mu\text{m/pixel}$,如图 2 所示。对存储的散斑图像采用 Photron Fastcam Analysis 软件进行数字图像处理,以获得试样断裂过程的裂纹扩展及位移场变化。

声发射监测系统:采用 DS5-8A/B 系列全信息声发射信号分析仪监测实验过程中试样的断裂信息。为便于捕捉声发射信号,在试样上表面靠近压头两侧,分别布置 2 个声发射探头(图 2),固定探头的铁制磁环用 502 胶黏于试样表面,探头外侧距试样端面为 10 mm 。探头与试样之间涂抹蜂蜜,以保证信号采集质量。声发射系统采样精度为 16 bit ,系统设置的采样速率为 10 MHz ,采样时间间隔为 $0.1\text{ }\mu\text{s}$,通道门限值为 100 mV ,同步输出外参波形数据,外参采样率为 25 kHz 。

1.4 加载路径

采用相同的加载速率对煤岩样上端中部施加纵向压力,得到煤岩试样承受弯曲载荷随时间的变化情况如图 3 所示,其中 S1~S3 为砂岩试样,M1~M3 为泥岩试样,C1~C3 为煤试样。随着上端头逐渐向下加压,煤岩介质承受的弯载逐渐增大,弯曲变化速率呈先增大后降低的变化趋势,当载荷增加至峰值载荷时,在弯矩作用下试样中部拉应力达到极限值并发生断裂,导致弯曲载荷突降。煤岩介质断裂过程的差异在于,砂岩和泥岩脆性较高,断裂表现为瞬态失稳,而煤由于原生裂隙发育,脆性相对较低,断裂过程为分级失稳,最终载荷降至 0 附近。

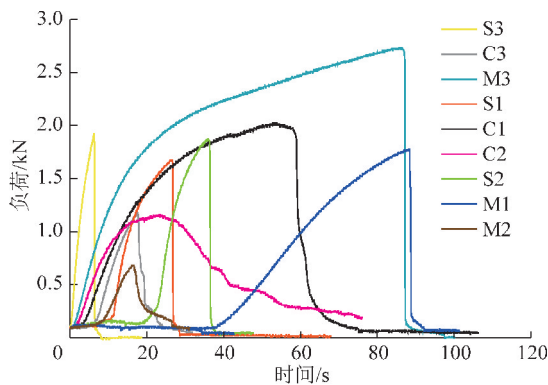


图 3 煤岩介质弯曲载荷-时间变化曲线

Fig. 3 Load-time curves of coal and rock samples

2 实验结果

2.1 弯载作用下煤岩介质的强度特征

按照煤岩成因分类,煤矿中的砂岩、泥岩为沉积岩,煤属于变质岩,各介质在矿物组成、胶结程度上具有显著地差异,因此使得在相同弯载作用下介质的强度特征也有所不同。试样断裂瞬间峰值载荷与其极限应力呈正相关关系,可代表介质的断裂强度(即抗弯强度),纵波波速间接反映试样内部原生裂隙的发育情况,断裂能则直接体现介质抵抗破坏的能力。其中断裂能可根据载荷-变形曲线求得,断裂能计算公式^[7]为

$$W = \int P d\delta \quad (1)$$

式中, W 为试样断裂能; P 为作用在试件上的载荷, N ; δ 为试件的变形, mm 。

根据实验结果,得到不同煤岩介质峰值载荷、纵波波速及断裂能等参数数据见表 1,各参数变化情况如图 4 所示。结合图 4 和表 1 可知,该实验中砂岩样品峰值载荷分布在 1.68~1.92 kN,平均为 1.82 kN;泥岩样品峰值载荷差异较大,分布在 0.69~2.72 kN,平均为 1.72 kN;煤样品峰值载荷分布在 1.16~

2.20 kN,平均为 1.45 kN。3 种介质峰值载荷的差异,可能与煤岩介质胶结程度或变质程度、原生裂隙发育、内部孔洞结构、层理方向等多种因素有关。由实验结果可知,不同煤岩介质的峰值载荷离散性具有较大差异,其中泥岩和煤的离散性要大于砂岩,这是由于砂岩介质内部裂隙、孔洞较少,其均质度较高,使得各样品之间的内部构造相差不大,因此峰值载荷较为接近;而泥岩均质度较低,且富含微裂纹、微孔洞、层理及黏土颗粒等,煤内部发育有大量纵横交错的原生裂隙发育,造成不同泥岩及煤样品之间的峰值载荷差异性较大。

表 1 煤岩的峰值载荷、纵波波速及断裂能

Table 1 Cracking load, Compressional wave velocity and fracture energy of coal and rock samples

岩性	编号	峰值载荷 P/kN	纵波波速 $v/(m \cdot s^{-1})$	断裂能/ $(N \cdot mm)$
煤	C1	2.02	2 910	228.32
	C2	1.16	2 220	448.62
	C3	1.18	—	178.36
泥岩	M1	1.78	2 350	273.89
	M2	0.69	2 420	127.11
	M3	2.72	2 320	343.23
砂岩	S1	1.68	2 640	137.26
	S2	1.87	3 270	120.67
	S3	1.92	2 530	119.88

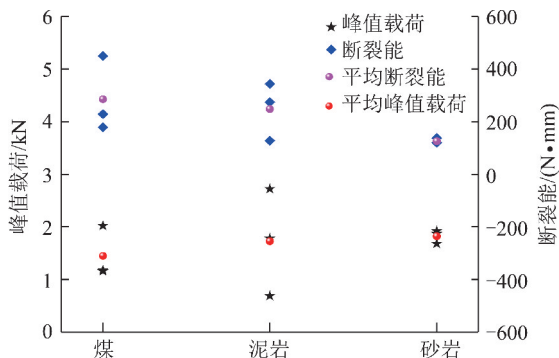


图 4 不同煤岩介质的峰值载荷、断裂能变化情况

Fig. 4 Cracking load and fracture energy of coal and rock samples

煤岩内部裂隙发育程度可用纵波波速表征,一般地介质完整度越好、内部纵向裂隙越少、弹性模量越大,纵波在介质内传播的速度越大。由表 1 可知,对于平均纵波波速,砂岩(2 813.33 m/s) > 泥岩(2 363.33 m/s),表明砂岩内部纵向裂隙较少,其致密性要优于泥岩。但纵波波速虽然在一定程度上可以反映煤岩介质的内部裂隙发育程度,但其与断裂强度关系不大,例如纵波波速最高的试样(S2),其峰值

载荷并非最大。由此可见,煤岩断裂十分复杂,它与介质属性、内部构造等多种因素相关。

断裂能指煤岩介质从开始破坏到破坏结束整个断裂过程产生的变形能,该变形能越大说明介质脆性越弱、塑性越强。由表 1 和图 4 可知,砂岩样的断裂能为 $119.88 \sim 137.26 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 平均值为 $125.94 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 分布较集中; 泥岩样的断裂能为 $127.11 \sim 343.23 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 平均值为 $248.08 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 样品之间的离散性较大; 煤样的断裂能为 $178.36 \sim 448.62 \text{ N} \cdot \text{mm}$, 平均值为 $285.10 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。煤岩介质的断裂能与其脆性、胶结/变质程度、原生裂隙发育及内部细观构造等有关。砂岩脆性好、弹性模量较大、内部均匀度较高,吸收的断裂能很快达到其破坏阈值,并且主断裂时释放能量也快(图 3 中 S1 曲线); 而泥岩由于泥质胶结的影响,脆性降低、塑性增强、内部孔洞发育,故破坏所需要的总变形能增大,断裂瞬间释放能量速度有所减缓(图 3 中 M1 曲线); 对于煤,与其他 2 种介质相比,影响其断裂的主要因素为内部原生裂隙,纵横交错的宏观原生裂隙使得煤在加载过程中变形较大,同时载荷达到峰值后,试样仍具有一定的残余强度,其峰后阶段仍能吸收一定的变形能(图 3 中 C3 曲线),因此断裂能一般较大。另外泥岩和煤的断裂能离散性较大,该特点与峰值载荷分布规律相同,原因是影响断裂的主要因素是内部细观结构,不同的试样内部细观结构是千差万别的,尤其是内部裂隙方向,将对其断裂性能起至关重要的作用,因此造成不同泥岩和煤介质试样具有差异较大的断裂释放能。

2.2 弯载条件下煤岩断裂过程的裂纹扩展特征

为研究弯曲载荷作用下煤岩介质的裂纹扩展规律,笔者采用高速摄像图像采集系统对煤岩正面的纵向裂纹动态扩展过程进行实时记录,以图片左下角为坐标原点 O , 横向为 x 轴,纵向为 y 轴建立相对坐标系如图 5 所示,像素代表的实际距离已通过标尺设置功能进行标定。为定量评价煤岩介质裂纹的开裂情况,在图像上设置两个裂纹观测点,测点高度均为 10 mm , 左右测点间距为 10 mm , 左右 2 测点连线的中点为裂纹断裂线,单个试样的测点位置保持不变,不同试样左右测点在 x 方向的位置根据裂纹扩展情况进行调整。该左右测点在断裂过程中的距离变化,即可代表裂纹断裂张开度。

根据断裂过程采集的图像,可分析煤岩介质动态断裂过程、最终裂纹形态并计算裂纹长度、持续时间等。图 6 为不同煤岩介质在弯载作用下最终形成的断裂形貌,从图 6 中可看出,砂岩的裂纹最为简单,断

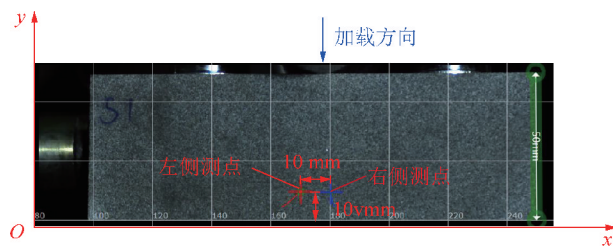


图 5 裂纹观测点布置

Fig. 5 Layout of observation points for crack propagation

裂线相对较直,弯折点较少;泥岩裂纹复杂度居中,断裂线基本与层理垂直,遇到层理变化处会出现局部拐弯;煤的裂纹最为复杂,其起裂位置并未在试样中点,而是出现左右偏差,扩展过程中遇到原生裂隙将发生偏转。

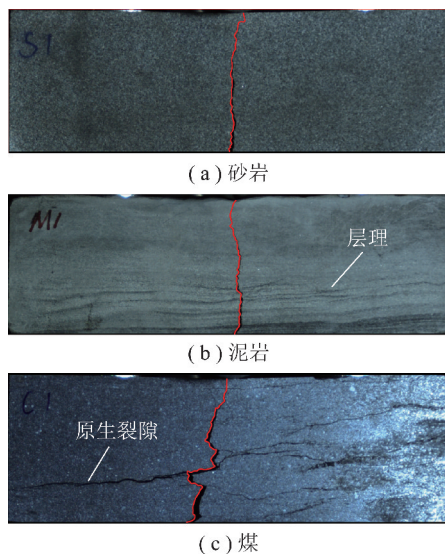


图 6 煤岩弯载破坏的裂纹形态

Fig. 6 Crack Shape of coal or rock when fracturing

同时,砂岩起裂时间较晚,一旦起裂扩展速度将很快,并迅速延伸至顶端,完成整个断裂过程;泥岩起裂时间相对砂岩早一些,裂纹扩展速度同样很快,但较砂岩慢,裂纹扩展过程比较完整,由下至上逐步延伸、贯通;煤的起裂时间最早,并且由于原生裂隙的存在,一般在起裂前,与断裂方向平行的裂纹预先变形、扩展,当主裂纹接近扩展原生裂隙时,二者迅速相连,即断裂并不像砂岩从下至上逐步延伸、贯通,而是主裂纹扩展并与原生裂隙贯通的过程。

根据实验过程中采集及观测数据分析,得到煤岩介质的断裂持续时间、断裂张开度及断裂长度等参数见表 2,各参数变化情况如图 7 所示。结合表 2 和图 7 可知,总体上煤、泥岩的断裂持续时间显著大于砂岩,煤、泥岩试样的离散性也较大,这与断裂能的变化特征是一致的。煤岩介质断裂持续时间长,断裂将持续释放变形能,则其断裂能较高。而在同样地荷载速

率下,断裂持续时间的长短与介质硬度有关,即弹性模量大的介质,断裂持续时间短,例如砂岩相对较硬,其裂纹一旦起裂,则扩展速度较大,断裂很快贯通整个试样,断裂所持续的时间明显较小。

表 2 煤岩的断裂参数

Table 2 Fracture parameters of coal and rock samples

岩性	编号	断裂持续时间 t/s	断裂张开度 d/mm	断裂长度 l/mm
砂岩	S1	1.77	7.615 0	52.133 8
	S2	2.55	9.898 1	51.135 8
	S3	0.20	9.451 9	50.647 5
泥岩	M1	3.67	8.871 7	50.714 1
	M2	17.52	7.250 8	59.932 7
	M3	2.97	0.496 4	52.242 7
煤	C1	16.33	5.926 9	70.220 2
	C2	69.01	2.231 7	68.181 4
	C3	7.59	0.604 3	53.310 4

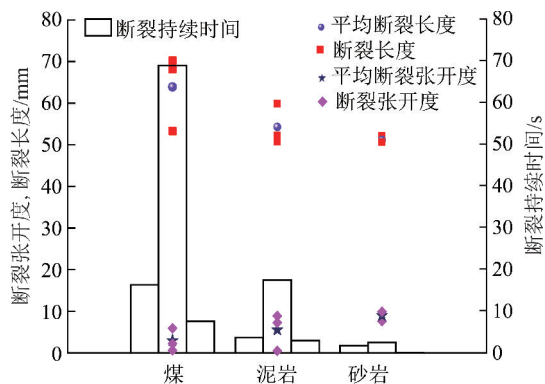


图 7 煤岩的断裂参数变化

Fig. 7 Fracture parameters variation of coal and rock

而对于断裂张开度参数 d , 砂岩的断裂张开度分布集中, 平均值为 9.55 mm; 煤、泥岩相对较离散, 平均断裂张开度分别为 3.49, 7.05 mm。总体上, 砂岩的断裂张开度大于煤。这是由于砂岩的脆性较高, 裂纹一旦贯通试样立即断为 2 部分, 裂纹宽度迅速增大; 而煤的塑性较高, 主裂纹贯通后左右断裂部分可能存在局部连接的情况, 两侧仍处于咬合状态, 使得裂纹宽度并不会进一步急剧增大, 因此断裂张开度较小。而泥岩由于每个试样含泥量不同, 造成断裂张开度离散性较强, 规律性不明显。

对不同煤岩介质的断裂裂纹长度 l 进行统计可知, 煤样的断裂长度分布较离散, 砂岩样则较集中, 但总体上煤的断裂长度大于砂岩。这与煤内部较发育的原生裂隙有很大关系, 在介质受弯载裂纹扩展时, 其主裂纹在遇到原生裂隙、节理, 会导致裂纹方向发生偏转, 从而使得裂纹延伸路径更加复杂、曲折, 裂纹

总长度增加。而对于泥岩, 影响其断裂扩展的结构主要为内部层理、微孔洞, 但其影响效果较原生裂隙弱。

2.3 弯载破坏煤岩的断口宏观形貌特征

煤岩介质破坏后的断口形貌包含丰富的信息, 它是断裂裂纹贯通后的直接结果, 同时也是介质在应力路径下断裂过程的间接反映。弯载作用下煤岩介质断口形貌如图 8 所示, 其中图 8(a) 为 C2 号煤试样断口, 可以看出该类煤样断裂面较粗糙, 断口凹凸不平、深浅错落、成台阶状样式, 中部为板状层理并沿层理面发育若干明显裂隙, 裂隙内有碎粒煤填充, 裂隙两侧煤块断面粗糙度较大、相对完整并局部微裂纹发育。由于煤样以半丝炭组、凝胶化组为主, 质地较脆, 使得断裂产生的碎屑多为块状, 断面成阶梯啃蚀状。煤内部原生裂隙较发育, 裂隙存在将整个煤样切割成若干个半联结、半割裂的单元, 在承受弯载作用时, 各单元组成的结构发生变形、断裂, 试样中部各裂纹延伸、贯通, 造成其断口以咬合状为主。

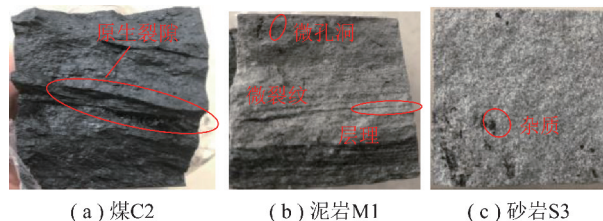


图 8 煤岩弯载破坏的断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of coal or rock when fracturing

图 8(b) 为 M1 号泥岩试样断口, 该类泥岩薄片状层理较发育, 以黏土等矿物包裹砂粒胶结为主, 中间夹杂黑色炭线。断口整体平整度比煤小, 断口高度在平行于层理走向上变化较小, 在垂直于层理方向上变化较大, 呈高低起伏台阶状。断面上分布有大量肉眼可见的微裂纹、微孔洞和黑色杂质, 微裂纹长度、方向各异, 且大都不连通, 同时泥岩在断裂后产生许多碎岩屑, 大小在毫米级别。

图 8(c) 为 S3 砂岩试样断口形貌, 该类砂岩岩相结构以碎屑颗粒、杂基、胶结物和孔隙构成为主, 弯载形成断面平整度较小, 以坑洞为主, 较少存在尖锐棱角, 断口表面分布有大量小的白色砂粒凸起及微孔洞。同时砂岩部分区域夹杂有黑色杂质, 该杂质与周边碎屑胶结性差, 主断裂裂纹遇到夹杂时将加速延伸、发生偏转, 类似于煤的原生裂隙和泥岩微裂纹, 杂质对断口形成具有重要影响。

煤岩介质断口的微观形貌对于断裂机制研究同样极为重要^[9-17]。为观测煤岩介质的微观断裂形貌, 采用煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室的 VEGA 3 XMU 型扫描电镜, 对经过镀金处理的断

口切片进行细观尺度的观测,得到煤、泥岩和砂岩 3 种介质的断口细观形貌(放大 400 倍)如图 9 所示,

图中 IG 为晶间断裂, TG 为穿晶断裂, CF 为解理断裂。

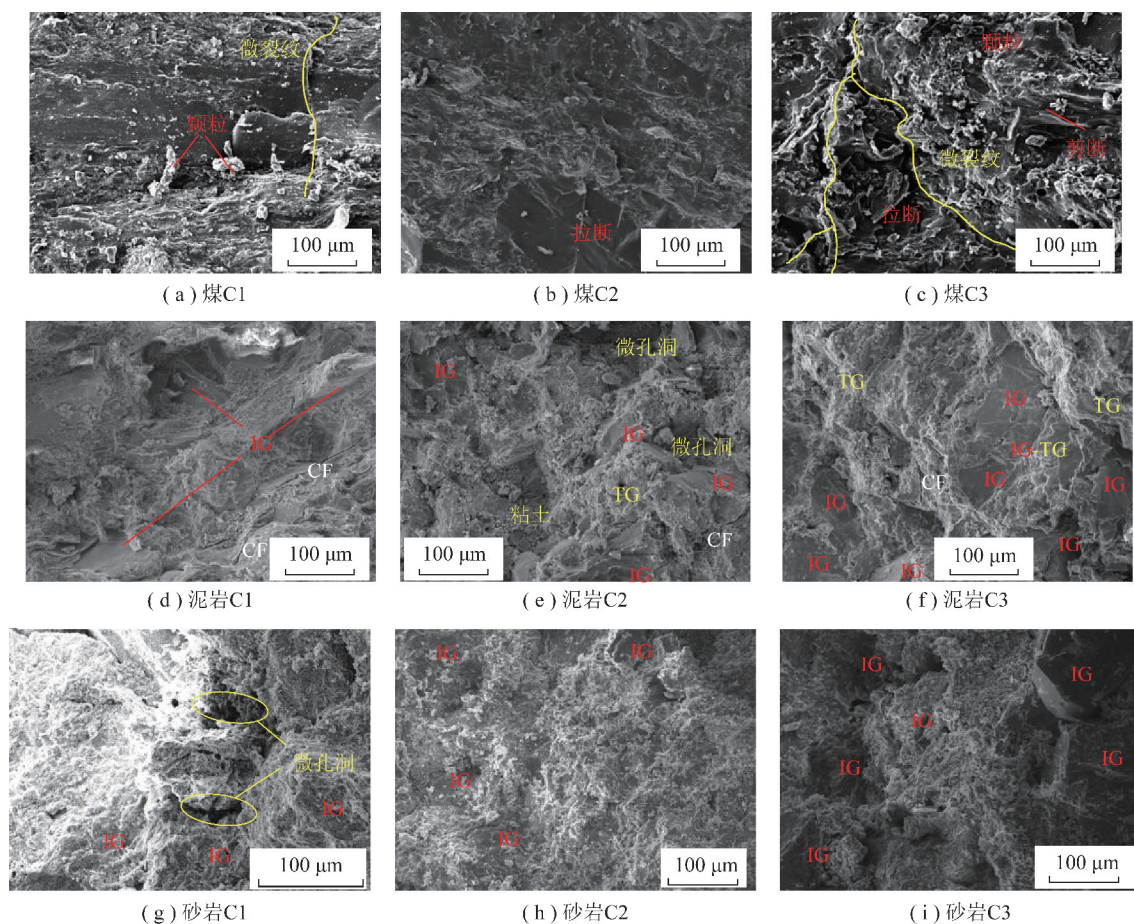


图 9 煤岩弯载破坏断面的细观形态

Fig.9 Failure micromorphology of coal and rock under bending load

由图 9 可知,弯载作用下煤样的断裂面相对较粗糙,分布有大量断裂后遗留的成簇状或团状颗粒,该颗粒多为尖锐棱角,如 9(a), (c) 中白色区域,断面留有许多拉应力造成的鳞片状浅坑、拉剪应力造成的丘陵台阶状花样,同时还存在若干河流状微裂纹,而微裂纹在泥岩、砂岩中较少见到;泥岩断面明显凹凸不平,表面上分布有大量面积较大的晶间断裂、微孔洞,局部区域还可见到颗粒状黏土矿物及解理断裂,整体上晶间断裂要远大于穿晶断裂、复合型断裂;砂岩细观断口形貌平整度要小于泥岩,放大后可观测到大量的晶间断裂,其晶粒尺寸要小于泥岩,晶间断裂面要微小的多,在放大倍数较小的图像上显示为蜂窝状(图 9(g)~(i)),断面上解理断裂、黏土矿物颗粒几乎没有,局部区域会有少量微孔洞,穿晶断裂及复合型断裂则较少见到。

综上分析可知,煤岩介质断面上主要以拉断面、晶间断裂面为主,这与弯载作用下煤岩断面受拉应力产生的破坏密切相关,煤介质内部的原生微裂纹、泥岩内部分布的解理断裂、黏土矿物及砂岩内部的微孔

洞对于断裂形成具有重要的影响,同时煤岩介质自身的岩相分析特征(如组分、构造等)也是控制断裂的关键因素之一。

2.4 煤岩弯载断裂过程中的声信号特征

煤岩介质积聚的一部分变形能在断裂过程中,以弹性波的形式释放出来,通过设备监测到的信号即为声发射,煤岩产生的声信号中包含有丰富的与断裂有关的信息,与人类说话的声音类似,它是煤岩表达自身损伤变化的一种语言,解析声信号中包含的信息对深入研究煤岩断裂具有重要的作用。

根据声发射监测系统数据,得到煤、泥岩和砂岩在弯载作用下断裂过程中的声发射全波形如图 10~12 所示。对比 3 种煤岩介质的声发射信号波形可知,煤样断裂产生的波形远比岩石要复杂,并且煤的起裂时间早、持续时间长(这与 2.2 节裂纹扩展特征结果相一致)。煤的声发射不仅由裂纹扩展、延伸产生,而且还可能是原生或新生裂纹相互咬合、错动产生,同时由于煤中包含有机质、无机质和杂质,复杂的结构也是促使其声发射事件频发的一个重要原因。

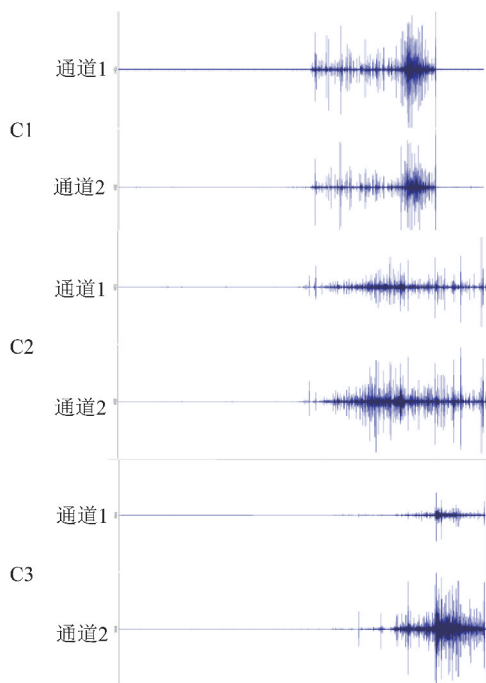


图 10 煤样弯载破坏过程中的声发射波形

Fig. 10 AE waveform monitored when coal samples are under bending load

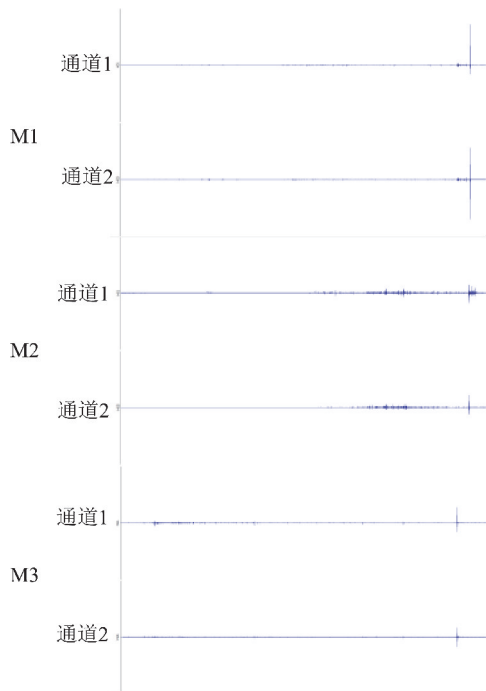


图 11 泥岩样弯载破坏过程中的声发射波形

Fig. 11 AE waveform monitored when mudstone samples are under bending load

泥岩和砂岩的声发射波形具有一定的相似性,2者在断裂发生前,波形幅值很小,波动起伏不明显,在主断裂信号前几秒发生 1 个短暂的声发射集中释放段,这应是由裂纹起裂产生的,在主断裂发生过程,声发射幅值突然增大,持续时间很短,几乎仅有 1 或 2 个振动周期,主断裂信号后声发射信号消失,代表断

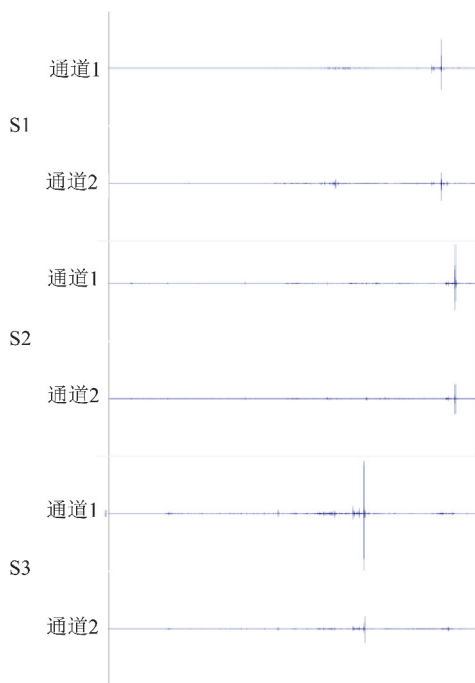


图 12 砂岩样弯载破坏过程中的声发射波形

Fig. 12 AE waveform monitored when sandstone samples are under bending load

裂结束。

泥岩与砂岩断裂声发射波形的区别在于,砂岩在主断裂前普遍存在 1 个起裂阶段,图 12 中 S1~S3 试样的主波峰前均存在一个次主波峰,且 2 个阶段之间还存在 2~4 s 的间隔期,该段应主要为裂纹延伸信号;而泥岩试样并不是所有的试样均存在次主波峰,这是因为泥岩的起裂所释放的信号并不强烈,同时黏土矿物的存在,对于破裂释放声信号是一种削弱作用。

与煤样不同的是,相对于其他微弱信号,泥岩和砂岩的主断裂信号很明显,整个断裂过程仅存在一个主波峰,但煤样基本不存在主波峰,煤的断裂是大量小的断裂持续产生并最终实现介质的贯通,其声发射信号变化过程为:平静——起裂事件——大量小断裂事件持续产生——主断裂贯通(结果),而岩石的断裂过程声发射特征为:平静——起裂事件——少量裂纹延伸事件——单个主断裂贯通事件。

声发射波形最大幅值在一定程度上反映了介质主断裂时释放的能量,将煤岩试样的声发射波形最大幅值进行统计,得到不同煤岩介质的声发射波形最大幅值及平均幅值见表 3,其变化情况如图 13 所示,从图 13 中可以看出,煤的断裂声发射最大幅值较集中,岩石的最大幅值却很离散,这可能与煤岩介质断裂方式不同有关。声发射幅值直接代表介质断裂瞬间断口释放的能量大小,煤岩断裂时声发射最大幅值的离

散特性,可能与煤岩岩相、晶粒大小、断裂面尺寸等有关。具体煤岩断裂声发射最大幅值的变化规律及原因,有待进一步实验研究。

表 3 煤岩声发射波形最大幅值

Table 3 AE waveform amplitude of coal and rock samples

岩性	编号	幅值/V	平均幅值/V
砂岩	S1	5.043 8	7.047 3
	S2	6.884 6	
	S3	9.213 6	
泥岩	M1	7.158 0	3.491 1
	M2	0.624 9	
	M3	2.690 3	
煤	C1	9.916 8	9.552 2
	C2	8.779 1	
	C3	9.960 7	

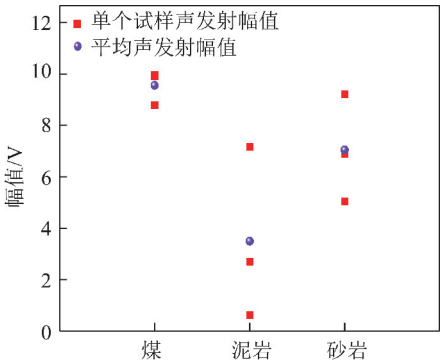


图 13 不同煤岩介质声发射波形幅值变化
Fig. 13 AE waveform amplitude changes of coal or rock

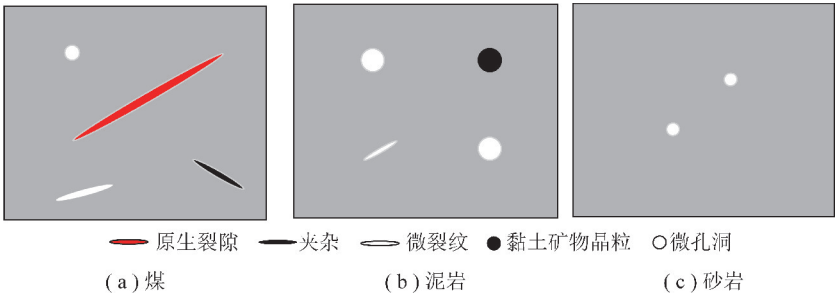


图 14 煤岩介质细观模型
Fig. 14 Micro-scale model of coal or rock

图 14(c)为砂岩的细观模型,由成岩环境及过程所决定,砂岩的内部细观结构较为单一,主要由砂岩晶粒和微孔洞组成,影响其断裂的主要结构是微孔洞,这些微孔洞造成砂岩力学性质呈一定程度的劣化,但砂岩的微孔洞分布较少,且彼此之间并不连通。砂岩的均一结构特征,使得不同样品之间的断裂强度、断裂能等参数离散性较小。

3.2 煤岩介质断裂机制分析

弯载作用下煤岩的断裂主要为 I 型断裂,其裂纹

3 不同煤岩介质的断裂机制探讨

煤岩介质的断裂机制与其宏观力学行为、表面裂纹扩展、细观断口形貌及释放声信息等密切相关,了解弯载作用下煤岩的断裂机制对于煤矿动力灾害监测、预警及治理具有重要的意义,笔者仅对不同煤岩介质的断裂机制进行初步探索。

3.1 煤岩介质断裂模型

基于煤岩断口的细观形貌分析,笔者建立煤、泥岩及砂岩的细观结构模型如图 14 所示。对于煤介质,其结构包括煤有机质的化学结构(大分子结构)和煤的物理空间结构,其中煤的化学结构反映了煤的大分子中各原子之间的相互联系,这些原子之间是通过化学键联系起来的;煤的物理结构主要为分子间的堆积结构和孔-裂隙结构。对于煤介质,由于其内部分布有大量的贯通或半贯通的原生裂隙、孔隙、夹杂等,使得煤的化学结构和大分子间键合对断裂影响较小,而原生孔-裂隙结构、夹杂对煤的断裂起主要的控制作用,其细观结构如图 14(a)所示。

泥岩的晶粒相对较大,晶粒之间胶结力较弱,同时晶粒间夹杂有大量的黏土矿物,如图 14(b)所示,使得泥岩黏聚力降低,并削弱断裂时释放的声发射信号。此外,泥岩内部存在较多的微裂纹、微孔洞,这些弱结构存在,将减小泥岩的断裂载荷和断裂能。并且不同泥岩样内部弱结构的差异性很大,这也是泥岩试样离散性强的原因之一。

扩展力学模型如图 15 所示,基于弹性断裂力学理论^[18],可知裂纹尖端扩展的临界应变能释放率 G_c 为

$$G_c = \frac{12F_{cr}^2 a_{cr}^2}{E(\delta/2)^2 h^3} \tag{2}$$

式中, F_{cr} 为临界拉力; a_{cr} 为临界裂纹长度; E 为介质弹性模量; δ 为裂纹厚度; h 为介质单元宽度的一半。

在 I 型裂纹尖端,当应变能释放率 G 对裂纹长度 a 的偏导数 $\frac{\partial G}{\partial a} < 0$ 时,裂纹扩展后 G 降低,裂纹将稳

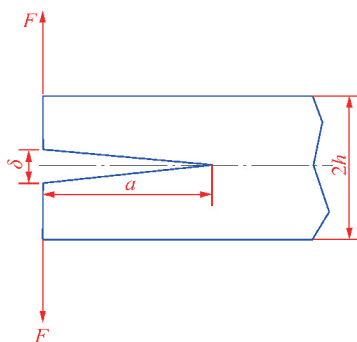


图 15 I 型裂纹力学模型

Fig. 15 Mechanical model of crack I

定扩展;当 $\frac{\partial G}{\partial a} > 0$ 时,裂纹扩展后 G 增大,裂纹将失稳扩展。根据式(2)可知,对于相同尺寸裂纹、在同等大小拉力 F 作用下,煤岩介质断裂主要受其弹性模量 E 控制。弹性模量是煤岩介质重要的性能参数,是衡量物体抵抗弹性变形能力大小的尺度,其宏观上影响因素主要包括组分、结构、夹杂、裂隙等;微观上主要为晶体大小、晶体结构、微裂纹、微孔洞等。

由式(2)介质的弹性模量 E 越小,断裂扩展所需的临界应变能释放率 G_c 越大,因此具有较小弹性模量的煤介质断裂时释放能量速率较高,而砂岩、泥岩较低(与声发射监测结果一致)。

根据均匀化理论,宏观某点 A 可认为是由微结构单元在空间中周期性重复堆积而成,故材料的细观结构具有周期性特征。基于均匀化方法,可推导出宏观空间位置 A 点的等效弹性模量 E_H ^[19],该等效弹性模量矩阵如公式(3)所示。

$$E_H = \frac{1}{|Y|} \int (E - EL\chi) dY \quad (3)$$

其中, E 为微结构单元弹性模量矩阵; L 为微分算子矩阵; χ 为特征参数矩阵; Y 为周期函数的周期。微分算子矩阵 L 为

$$L = \begin{bmatrix} \partial/\partial_{x_1} & 0 & \partial/\partial_{x_2} \\ 0 & \partial/\partial_{x_2} & \partial/\partial_{x_1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, ∂/∂_{x_1} , ∂/∂_{x_2} 分别为函数对 x_1 , x_2 的微分。对于介质的微结构单元来说,单元内孔洞尺寸越大、形状越复杂,等效弹性模量越小。根据煤岩介质的细观结构模型,煤的细观孔洞尺寸及其复杂程度要大于岩石,因此一般来说,煤的等效弹性模量小于泥岩和砂岩,其断裂较容易、释放断裂能较大并持续释放声发射断裂信号。

同时等效弹性模量具有各向异性,影响煤岩介质弯载作用下的断裂特性主要为纵向的等效弹性模量。煤、泥岩中存在大量原生孔-裂隙、微裂纹-孔洞,这

些弱结构具有很强的方向性,假设该弱结构与弯载作用方向一致,将显著影响其断裂特性,使得煤、泥岩样品离散性显著增大。而砂岩中仅有少量微孔洞,这些微孔洞不具有明显的方向性,故砂岩样品离散性相对较弱。

4 结 论

(1)煤岩介质的断裂特征表现为:煤、泥岩样品的断裂峰值载荷、断裂能、断裂长度等参数分布离散,而砂岩样各参数分布较集中。这主要是由于煤内部原生孔-裂隙发育,泥岩富含微裂纹-孔洞及黏土颗粒,而砂岩内部仅有少量微孔洞,砂岩均质度较煤、泥岩高。

(2)煤的细观断口形貌主要为拉、剪断面,并分布有微裂隙,泥岩细观断口表面晶间断裂多于穿晶断裂,同时可见少量微孔洞、黏土矿物及解理断裂,砂岩细观断口则以晶间断裂为主,仅存在少量微孔洞。

(3)煤样断裂声发射波形复杂程度大于泥岩和砂岩;煤的断裂持续时间长,小断裂事件较多,主断裂信号不明显;而泥岩和砂岩断裂前声发射事件较少,主断裂贯通信号显著。

(4)煤岩介质断裂主要受其弹性模量 E 控制,而弹性模量与介质细观结构如孔洞尺寸、形状复杂程度等有关,且细观结构的方向性对介质断裂特性具有重要影响。

参考文献 (References):

- [1] 李柯萱,李铁.不同加载速率下砂岩弯曲破坏的细观机理[J].爆炸与冲击,2019,39(4):108-115.
LI Kexuan, LI Tie. Micro-mechanism of bending failure of sandstone under different loading rates[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(4): 108-115.
- [2] 李铁,李柯萱,皮希宇,等.弯载下砂岩声发射特征值时间效应[J].煤炭学报,2018,43(11):3115-3121.
LI Tie, LI Kexuan, PI Xiyu, et al. Time-dependent behavior of acoustic emission feature parameters of sandstone under bending load[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3115-3121.
- [3] 李志成,刘建锋,邓朝福,等.含杂质盐岩三点弯曲变形破坏特征实验研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):101-106.
LI Zhicheng, LIU Jianfeng, DENG Chaofu, et al. Experimental study on deformation and failure characteristics of salt rock three-point-bending samples with impurities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 101-106.
- [4] 邓朝福,刘建锋,陈亮,等.不同粒径花岗岩断裂力学行为及声发射特征研究[J].岩土力学,2016,37(8):2313-2320.
DENG Chaofu, LIU Jianfeng, CHEN Liang, et al. Fracture mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of Beishan granites with different particle sizes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,

- 37(8):2313-2320.
- [5] 邓朝福,刘建锋,陈亮,等.不同含水状态花岗岩断裂力学行为及声发射特征[J].岩土工程学报,2017,39(8):1538-1544.
DENG Chaofu, LIU Jianfeng, CHEN Liang, et al. Mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of fracture of granite under different moisture conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(8): 1538-1544.
- [6] 赵毅鑫,姜耀东,王向阳,等.冲击倾向性煤体的三点弯曲动态断裂实验[J].煤炭学报,2007,32(12):1269-1272.
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, WANG Xiangyang, et al. Experimental on the cracking process of bump-prone coal by dynamic three points bending test [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1269-1272.
- [7] 左建平,柴能斌,周宏伟.不同深度玄武岩的三点弯曲细观破坏实验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):689-695.
ZUO Jianping, CHAI Nengbin, ZHOU Hongwei. Investigation on failure behavior of basalt from different depths based on three-point bending meso-experiments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 689-695.
- [8] 杨健锋,梁卫国,陈跃都,等.不同水损伤程度下泥岩断裂力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(10):2431-2440.
YANG Jianfeng, LIANG Weiguo, CHEN Yuedu, et al. Experiment research on the fracturing characteristics of mudstone with different degrees of water damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2431-2440.
- [9] 赵毅鑫,姜耀东,张雨.冲击倾向性与煤体细观结构特征的相关规律[J].煤炭学报,2007,148(1):64-68.
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, ZHANG Yu. The relationship between bump-prone property and microstructure characteristics of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 148(1): 64-68.
- [10] 刘云鹏,邓辉,黄润秋.板裂结构岩石力学试验及破裂断口细观形貌特征分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S2):3852-3861.
LIU Yunpeng, DENG Hui, HUANG Runqiu. Mechanical test of slab-rupture structure rock and mesoscopic morphology analysis of rupture surface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3852-3861.
- [11] 色麦尔江·麦提玉苏普,朱珍德.冻融循环作用下卸荷砂岩微观损伤特性试验研究[J].矿业研究与开发,2020,40(2):76-81.
SE Maierjiang · Mai Maitiyusupu, ZHU Zhende. Experimental study on micro-damage characteristics of unloaded sandstone under freeze-thaw cycles[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 76-81.
- [12] 邹俊鹏,陈卫忠,杨典森,等.基于SEM的珙春低阶煤微观结构特征研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(9):1805-1814.
ZOU Junpeng, CHEN Weizhong, YANG Diansen, et al. Microstructural characteristics of low-rank coal from Hunchun based on SEM [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1805-1814.
- [13] 胡松,单联莹,徐博洋,等.煤块受载破碎过程中的细观力学特性演变研究[J].煤炭学报,2018,43(3):855-861.
HU Song, SHAN Lianying, XU Boyang, et al. Meso-mechanical properties evolution during fracture of coal cubes under loading [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 855-861.
- [14] 张慧杰,张浪,汪东,等.构造煤的瓦斯放散特征及孔隙结构微观解释[J].煤炭学报,2018,43(12):3404-3410.
ZHANG Huijie, ZHANG Lang, WANG Dong, et al. Gas emission characteristics of tectonic coal and microscopic explanation of pore structure[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3404-3410.
- [15] 纪洪广,蒋华,宋朝阳,等.弱胶结砂岩遇水软化过程细观结构演化及断口形貌分析[J].煤炭学报,2018,43(4):993-999.
JI Hongguang, JIANG Hua, SONG Zhaoyang, et al. Analysis on the microstructure evolution and fracture morphology during the softening process of weakly cemented sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 993-999.
- [16] 顾超,许金余,孟博旭,等.高温作用后2种层理砂岩的动态力学试验及细观分析[J].煤炭学报,2019,44(9):2710-2720.
GU Chao, XU Jinyu, MENG Boxu, et al. Dynamic mechanical behavior and mesoscopic analysis of two layered sandstone after high temperature [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2710-2720.
- [17] 李学华,牛志军,姚强岭,等.孔洞式三叉裂隙砂岩裂纹扩展特征颗粒流分析[J].煤炭学报,2020,45(11):3735-3747.
LI Xuehua, NIU Zhijun, YAO Qiangling, et al. Particle flow analysis of crack propagation characteristics of hole-type trident cracks sandstone[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3735-3747.
- [18] 李世恩,和泰名,尹祥础,等.岩石断裂力学导论[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2010.
- [19] 谢先海,廖道训.均匀化方法中等效弹性模量的计算[J].华中科技大学学报,2001,29(4):44-46.
XIE Xianhai, LIAO Daoxun. Computation method of equivalent elastic tensor in homogenization method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(4): 44-46.