



推荐阅读：

[中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律](#)

[深部岩体力学与开采理论研究进展](#)

[冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法](#)

[浅埋煤层群开采的区段煤柱应力与地表裂缝耦合控制研究](#)

[切顶卸压无煤柱自成巷开采与常规开采应力场分布特征对比分析](#)

[应变率对岩石裂隙扩展规律的影响](#)

[基于 RSM-BBD 的废石-风砂胶结体配合比与强度试验研究](#)

[基于变分模态分解及能量熵的微震信号降噪方法](#)

[基于地应力反演的构造应力区沿空巷道窄煤柱宽度优化研究](#)

[花岗岩巷道岩爆声发射信号及破裂特征实验研究](#)

[基于“两介质-三界面”模型的散煤注浆固结宏细观规律](#)

[页岩超临界 CO₂ 压裂起裂压力与裂缝形态试验研究](#)

[真三轴加卸载应力路径对原煤力学特性及渗透率影响](#)

[含层理岩石单轴损伤破坏声发射参数及能量耗散规律](#)

[三向应力条件下煤体渗透率演化模型研究](#)

[三点弯曲作用下不同粒径组成的类岩石材料声发射特性试验研究](#)

[深部煤体非线性蠕变本构模型及实验研究](#)

[砂层渗透注浆加固效果模型试验研究](#)

[综采工作面过大落差断层深孔预裂爆破技术](#)



移动阅读

牟宏伟,何学秋,宋大钊,等.不同节理夹角煤单轴压缩力学和声发射响应及影响机制[J].煤炭学报,2020,45(5):1726-1732. doi:10.13225/j.cnki.jccs.DY20.0240
 MU Hongwei, HE Xueqiu, SONG Dazhao, et al. Response characteristics and influence mechanism of uniaxial compression mechanics and AE of coal with different joint angles [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (5) : 1726 - 1732. doi:10.13225/j.cnki.jccs.DY20.0240

不同节理夹角煤单轴压缩力学和声发射响应及影响机制

牟宏伟^{1,2},何学秋^{1,2},宋大钊^{1,2},李振雷^{1,2},邱黎明^{1,2},苏东方^{1,2},殷山^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室,北京 100083)

摘要:煤岩的力学特性和声发射响应规律对冲击地压监测预警至关重要,为研究加载方向与节理面夹角(α)对煤样力学特性、裂纹扩展方式及声发射响应的影响,对不同加载方向与节理面夹角的煤样进行单轴压缩试验,并分析了力学和声发射信号响应规律。结果表明:加载方向与节理面夹角对煤样力学特性和声发射响应规律有显著影响。随 α 增大,峰值载荷和破坏时间均呈先微降后增大的趋势,峰后破坏时间从 0° 到 30° 出现陡降趋势。 $\alpha \leq 45^\circ$ 煤样的应力-应变在峰值或峰值后出现震荡起伏现象,单轴抗压强度和应变量均小于 $\alpha > 45^\circ$ 的煤样。 $\alpha > 45^\circ$ 煤样的应力-应变曲线在峰值或峰值后无震荡起伏现象; $\alpha \leq 45^\circ$ 的煤样受力以平行节理面应力分量为主,更容易产生沿节理面的滑移破坏,振铃累计值陡增和大能量声发射信号主要集中在峰后阶段,声发射信号与应力降具有很高的相关性。 $\alpha > 45^\circ$ 的煤样受力以垂直节理面应力分量为主,更容易产生挤压摩擦破坏,在应力稳定上升阶段就伴随着大量的声发射信号,大能量声发射信号主要集中在峰前阶段;随 α 增大,煤样表现出的冲击倾向性越强,声发射信号以 45° 为界表现出不同的峰前峰后特征。因此,鉴定煤冲击倾向性和利用声发射进行冲击地压监测预警时,需充分考虑煤层节理面与现场受力情况。

关键词:节理;声发射;监测预警;煤体破坏

中图分类号:TD313 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2020)05-1726-07

Response characteristics and influence mechanism of uniaxial compression mechanics and AE of coal with different joint angles

MU Hongwei^{1,2}, HE Xueqiu^{1,2}, SONG Dazhao^{1,2}, LI Zhenlei^{1,2}, QIU Liming^{1,2}, SU Dongfang^{1,2}, YIN Shan^{1,2}

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of the Ministry of Education of China for High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The mechanical properties of coal and rock and the AE response law are very important for the monitoring and early warning of rock burst. In order to study the influence of the angle (α) between the loading direction and the joint surface on the mechanical properties, crack propagation mode and acoustic emission (AE) response of coal samples, some uniaxial compression tests were carried out on coal samples with different α , and the characteristic response laws of mechanical and AE signals were analyzed. The results show that the angle between the loading direction and the joint surface has a significant effect on the mechanical properties and AE signals. With the increase of α , the peak load and failure time both show a trend of decreasing first and then increasing, from 0° to 30° , the failure time after the peak tends to drop sharply. The stress-strain curve of coal samples with $\alpha \leq 45^\circ$ fluctuates after the peak value or at peak value, and the uniaxial compressive strength and strain are less than that of coal samples with $\alpha > 45^\circ$. The stress-

收稿日期:2020-02-22 修回日期:2020-05-08 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801408);国家自然科学基金资助项目(51774023);北京科技新星计划资助项目(xx2018073)

作者简介:牟宏伟(1990—),男,山东青岛人,博士研究生。E-mail:hong219@126.com

通讯作者:宋大钊(1985—),男,山东滨州人,副教授。E-mail:song_dz@163.com

strain curve of coal sample with $\alpha > 45^\circ$ does not fluctuate after the peak value or at peak value. The coal samples with $\alpha \leq 45^\circ$ is mainly the stress component of the parallel joint surface, and it is more likely to slip along the joint surface. The accumulated sharp increase of AE pulse and the high-energy AE signal are mainly concentrated in the post-peak stage, and the AE signal has a high correlation with the stress drop. For the samples with $\alpha > 45^\circ$, the stress component of the vertical joint surface is the main stress component, and the main failure mode is extrusion friction. The accumulated value of pulse increases steadily before the peak point, and the high-energy AE signals are mainly concentrated in the pre-peak phase. With α increasing, the stronger the impact tendency of coal samples is, and the size of AE early warning parameters is different. Therefore, when identifying the coal impact tendency and using AE to monitor and warn the impact, it is necessary to take full account of the coal seam joint surface and the field stress.

Key words: joints; acoustic emission; monitoring and warning; coal failure

煤岩材料声发射是煤岩在变形、破坏过程中释放弹性应变能的一种现象,目前,声发射技术在煤岩结构稳定性评价^[1-2]、动力灾害预警^[3-5]和地应力估算^[6,7]等方面得到广泛应用。而煤作为一种节理异常发育的岩体,其物理力学性质及破坏产生的声发射信号特征极易受到节理的影响,这些影响对鉴定煤层冲击倾向性和应用声发射监测预警至关重要,亟需进行深入研究。

国内外学者对含节理等缺陷煤岩在不同加载条件下的力学和声发射特性研究已取得了丰硕成果。在研究含缺陷煤岩对力学特性影响上,CAI 等^[8-10]研究表明,外载作用下含宏观裂纹的力学响应是围岩应力场时空演化规律多变的内因;刘凯德等^[11]分别从垂直和平行层理面方向进行劈裂及单轴压缩试验,得出抗拉、抗压强度均具有明显的离散性,并指出需对加载方向与层理面其他夹角力学特性进行研究;吴基文和闫立宏^[12]也发现不同层理方向上煤岩的抗拉强度具有明显各向异性;ZHAO Y X 等^[13]认为间接动态抗拉强度与层理倾角和粗糙度有关;MAJID 等^[14]数值模拟了含节理岩石强度和变形的各向异性,并指出在岩石工程设计和安全评价时,必须根据地应力方向正确处理裂隙岩体强度和变形的各向异性;YANG Z Y 等^[15]总结了含节理岩体的 3 种破坏形式,破坏形式主要取决于层理面和最大主应力夹角及围压大小。以上学者主要集中在煤岩原生裂隙对力学特性的研究上,还有部分研究者通过预制宏观裂纹来研究预制裂纹对煤岩体变形破坏和力学特性的影响^[16-17,21-22]。

在研究含缺陷煤岩对声发射信号影响上,HOLCOMB^[18]、王恩元等^[19-20]认为煤岩体产生的声发射反映了岩体内部的损伤程度;李德行等^[21-22]对预制不同角度宏观裂纹的型煤进行单轴压缩实验,认为宏观裂纹对声发射信号的变化规律有显著影响;刘运思等^[23]通过单轴和巴西劈裂实验研究得出砂岩层理面

拉伸和剪切破坏峰值与声发射能量呈正相关关系;张东明等^[24]对含层理及均质岩石试件进行对比实验,得到了含层理岩石和均质岩石试件失稳破坏与声发射信号的相关性。

现有研究表明,煤岩材料中存在的缺陷对力学和声发射信号特征均有明显影响。这些研究主要集中在预制裂纹、内生裂隙,以及不同加载条件下的力学和声发射信号特征上,但对加载方向与原生节理面不同夹角煤的力学和声发射信号特征研究却鲜见报道。

为了深入研究加载方向与节理面夹角对煤声发射响应、力学特性和裂纹扩展方式的影响规律,笔者对不同加载方向与节理面夹角的煤样进行单轴压缩试验,结合声发射、力学特性和裂纹扩展方式之间的相关性进行分析,同时讨论了不同加载方向与节理面夹角煤样表现出的力学特性和声发射信号特征差异对鉴定煤层冲击倾向性及应用声发射监测冲击地压的影响。

1 实验设计及方法

1.1 试样制备

原煤是取自具有冲击倾向性的煤层,原煤节理构造产状一致,按照国际岩石力学学会的标准,制成 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱体。对于每组煤样,钻孔取芯方向与煤层节理面夹角 α 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$, 试样加工及成型试样如图 1 所示。为控制实验影响因素,所有煤样均在同一整块煤中获取。

1.2 实验系统

实验系统如图 2 所示。加载控制系统采用 YAW-600 型微机控制电液伺服压力试验机,该试验机载荷分辨率 3 N,位移分辨率 0.3 μm 。声发射数据采集系统使用 DS5 系列。声发射信号分析仪最高采样频率 10 MHz,能够对所有通道波形数据连续记录;声发射传感器响应频率范围 50 ~ 400 kHz,前置放大器,放大倍数 20,40 和 60 dB 可调,带宽 20 ~ 1 500 kHz。

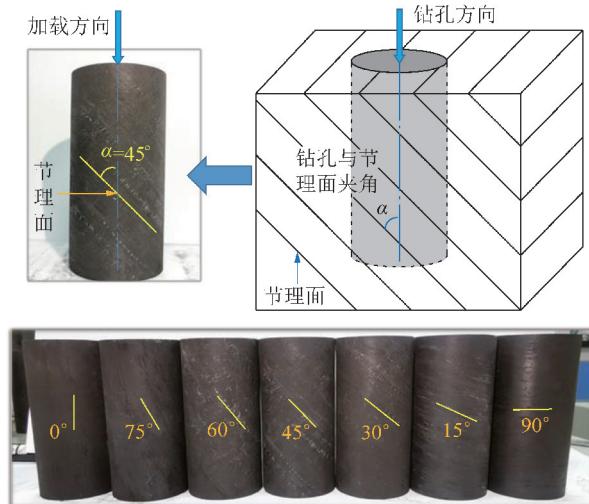


图1 试样加工方案及成型试样

Fig. 1 Sample processing plan and forming sample

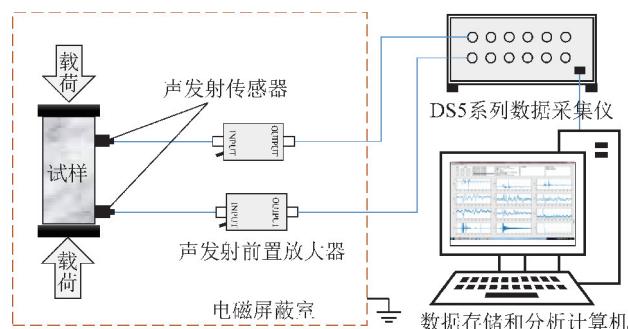


图2 实验系统示意

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

1.3 实验方案

按角度 α , 将试样分为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 共 7 组, 每组选择无明显裂纹和夹研的试样各 3 块。本次实验加载方式采用位移控制, 加载速率为 $5 \mu\text{m}/\text{s}$ 。实验时, 先对试样施加 500 N 的预载力使压盘与试样充分接触, 按预设的实验方案启动压力机和数据采集仪的数据保存功能。在加载全过程中, 对声发射信号进行全波形采集与存储。

2 实验结果及分析

2.1 不同节理夹角煤样裂纹扩展

每组煤样各选取一张破坏后的照片进行裂纹扩展形态对比, 如图 3 所示。李德行等^[22,25]对单轴压缩条件下煤岩预制裂纹扩展方式分为翼型裂纹、反翼型裂纹和次生裂纹。本文对翼型裂纹定义为, 产生在沿节理面裂纹尖端且与沿节理面裂纹夹角小于 90° 的裂纹, 反翼型裂纹为产生在沿节理面裂纹尖端且与沿节理面裂纹夹角大于 90° 的裂纹。本文研究发现, 不同夹角 α 煤样主要裂纹扩展形态除次生裂纹、翼型裂纹和反翼型裂纹外, 还存在大量的沿节理面扩展

裂纹和垂直节理面裂纹。

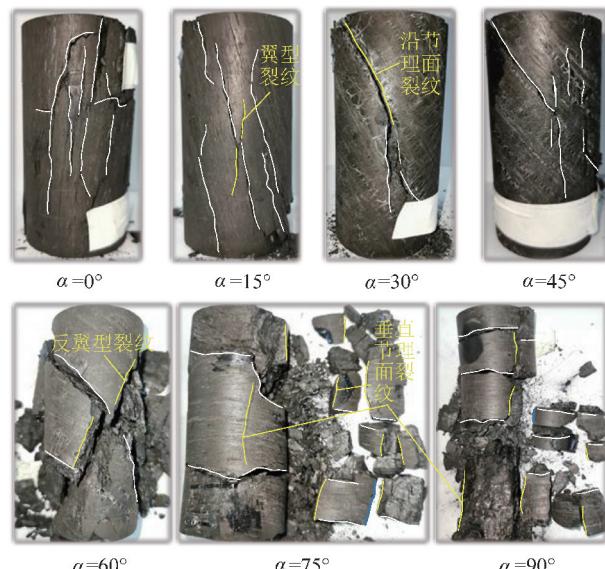


图3 煤样裂纹扩展形态

Fig. 3 Shape of crack propagation in coal sample

当 $\alpha \leqslant 45^\circ$, 裂纹扩展方式主要为沿节理面扩展裂纹和翼型裂纹, 其中, $\alpha = 0^\circ$ 以沿节理面扩展裂纹为主, $\alpha = 15^\circ$ 时开始出现翼型纹, $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ 煤样有明显的破坏角和完整的破坏面, $\alpha = 45^\circ$ 翼型和反翼型裂纹同时存在。当 $\alpha > 45^\circ$, 裂纹扩展方式以沿节理面扩展、反翼型和垂直节理面裂纹为主, 其中, $\alpha = 60^\circ$ 出现明显的沿节理面扩展裂纹和反翼型裂纹, 形成 X 型破断并伴随有大量的小破碎, $\alpha = 75^\circ, 90^\circ$ 以沿节理面裂纹和垂直节理面裂纹为主, 即存在较大的沿节理和垂直节理裂纹, 又存在大量沿节理和垂直节理方向的小破碎。

2.2 不同节理夹角煤样力学行为

本实验是位移控加载, 为区别于力控加载条件下的动态破坏时间, 此处用峰后破坏时间来表征能量集聚与耗散的动态特征。分别求得每组试样峰值载荷平均值、破坏时间平均值和峰后破坏时间平均值, 并绘制曲线如图 4 所示。由图 4 中可以看出, 随 α 增加, 峰值载荷和破坏时间均呈现出先微降后增大的趋势。峰值载荷和破坏时间最大值均位于 75° 夹角处, 峰值载荷为 73.13 kN , 破坏时间为 426.67 s 。 15° 夹角峰值载荷最小, 为 25.88 kN , 为 75° 夹角峰值载荷的 35% 。 30° 夹角破坏时间最短, 为 155 s , 为 75° 夹角破坏时间的 36% 。峰值载荷和破坏时间从 45° 到 60° 出现急剧增加; 峰后破坏时间从 0° 到 30° 出现陡降趋势, 30° 到 90° 均维持在较低水平。

将各组试样应力-应变曲线绘制到一张图进行比较, 如图 5 所示。比较 7 个角度的应力-应变曲线可以看出, $\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$ 煤样的应力-应变曲线形态较

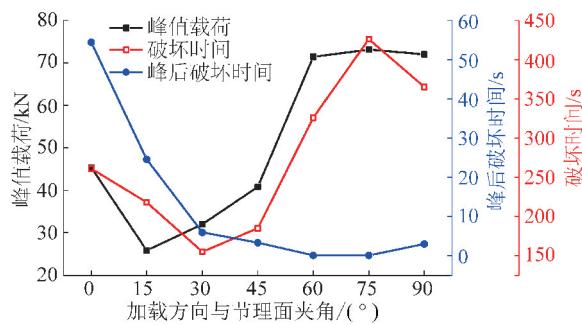


图4 不同夹角煤样力学特征

Fig. 4 Mechanical characteristics of samples with different α

一致,在峰值或峰值后出现震荡起伏现象,单轴抗压强度和应变量均小于 $\alpha=60^\circ \sim 90^\circ$ 煤样。 $\alpha=60^\circ \sim 90^\circ$ 煤样的应力-应变曲线形态较一致,在峰值或峰值后无震荡起伏现象。可见,以 $\alpha=45^\circ$ 为界,煤的单轴抗压强度和应变量表现出完全不同的特征。

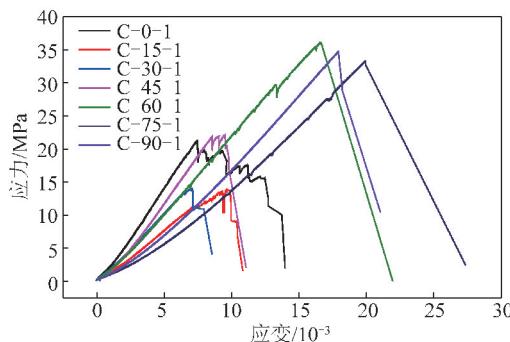


图5 不同角度煤样应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of coal samples with different α

2.3 不同节理夹角煤样声发射响应

不同节理夹角煤样单轴压缩破坏下的应力、声发射振铃累计、能量随加载时间的变化特征如图6所示。由图6可以看出,加载方向与节理面夹角对应力和声发射信号的变化规律有着显著影响。 $\alpha \leq 45^\circ$ 的煤样,声发射与应力降具有很高的相关性,应力曲线出现较大波动,存在多个明显应力降,并伴有较大能量的声发射信号。出现明显应力降前,声发射能量稳定在较小水平,振铃累计增长缓慢。出现明显应力降后,声发射能量和振铃累计开始大幅升高,振铃累计陡增和大能量声发射信号主要集中在峰后阶段;而 $\alpha > 45^\circ$ 的煤样,应力-时间曲线波动较小,一般只存在一个峰值点,声发射与应力降关系不明显,且在应力稳定上升阶段就伴随着大量声发射信号,振铃累计值在峰值点前呈稳定的加速增长,在峰值点出现陡增,大能量声发射主要集中在峰前阶段。

2.4 煤节理影响机制分析

通过上文研究总结得出节理角度的影响机制,如图7所示。将施加在煤样上的载荷 σ 分解为平行节

理面应力分量 σ_x 和垂直节理面应力分量 σ_y , α 增大,引起 σ_x, σ_y 变化,导致不同角度煤样加载破坏裂隙发展、裂纹形态及力学性质表现出不同特征。

原生裂隙和孔隙大致沿节理面方向延伸, $\alpha=0^\circ$, 轴向应力与节理面平行,原生裂隙和孔隙不易被压密,主要受沿节理面的张拉破坏产生横向离层,裂纹由裂隙尖端沿主应力方向扩展。当达到峰值载荷时,沿节理面裂纹并未完全贯通,应力在峰后出现震荡起伏,因此, 0° 煤样表现出更大的延性破坏,峰后应变量更大,峰后破坏时间也更长。

(1) 当 $0^\circ < \alpha \leq 45^\circ$, 随 α 增大, σ_x 逐渐减小 σ_y 逐渐增大, 煤样受沿节理面的张拉作用逐渐减小, 原始裂隙在垂直节理面应力分量作用下被压密, 但主要受平行节理面应力分量作用产生裂纹扩展, 因此 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 试样更易出现沿节理面的滑移破坏, 更易失去黏聚力而提前破坏。裂纹以沿节理面扩展裂纹为主, 翼型裂纹大致与加载方向平行。

(2) 当 $45^\circ < \alpha < 75^\circ$, 垂直节理面应力分量更大, 原生裂隙和孔隙更易被压密, 因此在 45° 之后, 煤样应力曲线在压密阶段和弹性阶段的长度大幅增加, 峰值载荷、破坏时间和应变量也急剧增加。裂隙会沿节理面和垂直节理面同时扩展, 最终形成沿节理面扩展和反翼型裂纹同时存在的 X型破断。

(3) 当 $\alpha \geq 75^\circ$, 垂直节理面应力分量变成主导, 原生裂隙和孔隙被压密程度更大, 并产生大量垂直节理的裂纹。平行节理面应力分量仅起到裂隙起裂作用, 不易产生沿节理面的滑移破坏。因此, $\alpha=75^\circ$ 和 90° 煤样以沿节理面和垂直节理面裂纹为主, 且不易提前发生滑移失稳破坏。在峰后, 沿节理面和垂直节理面小裂隙迅速贯通, 煤样瞬间产生破坏。

图6可以看出,声发射信号以 $\alpha=45^\circ$ 为界有明显差异。 $\alpha \leq 45^\circ$ 煤样在平行节理面应力分量作用下, 节理尖端产生应力集中, 破裂沿节理面产生。加载达到峰值载荷后, 节理面之间开始产生阶段性贯通, 在这一过程中引起应力降并伴随有较大能量声发射信号, 振铃累计也出现阶段性陡增。

$\alpha > 45^\circ$ 煤样受力以垂直节理面应力分量为主, 峰值载荷前裂隙被压密, 并产生大量垂直节理断裂, 这些垂直节理断裂会产生较为丰富的声发射信号。并且, 由于峰前大量垂直节理面小断裂的出现, 导致峰后断裂的分叉与汇合时间变短, 所以峰后声发射信号少。煤样破坏前不会产生较大的沿节理面滑移, 以挤压摩擦破坏为主, 因此振铃累计呈现相对稳定增长, 且增长速率随应力增加而加快。

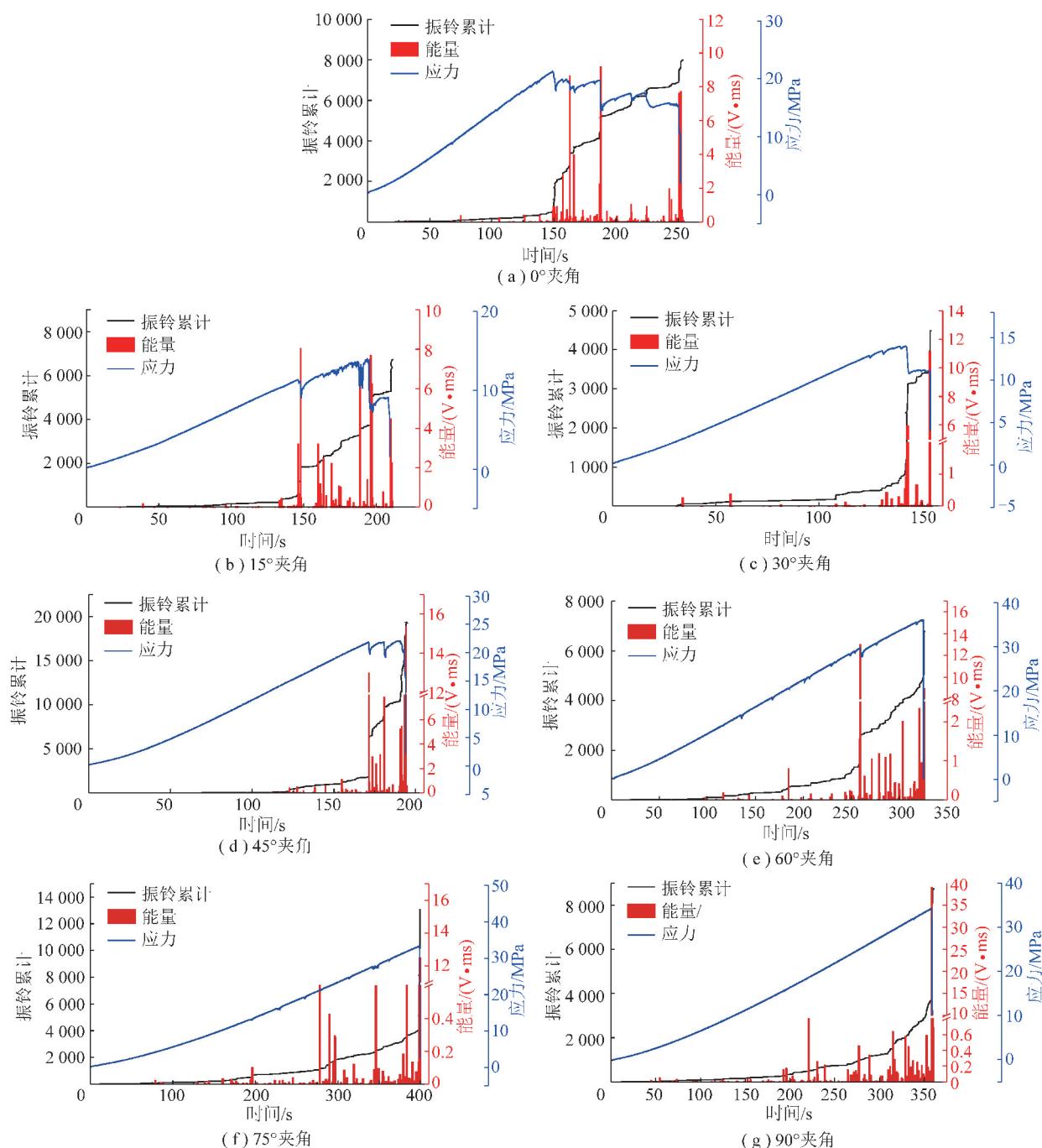


图6 不同节理夹角煤样应力及声发射信号特征

Fig. 6 Stress and AE characteristics of samples with different α

3 对监测预警的意义

实验结果可以得出声发射信号与煤样受载破坏过程具有较高一致性,这与前人的研究结果^[4,9,13]一致。但是不同节理夹角煤样表现出的力学和声发射特征具有显著差异。这些差异对鉴定煤层冲击倾向性及应用声发射预警冲击地压具有直接影响。

峰值载荷和单轴抗压强度直接影响煤的冲击破坏临界载荷,实验研究表明^[26],在一定范围内,煤的单轴抗压强度越大,煤体发生冲击破坏的临界载荷越

小。本实验表明,峰值载荷和单轴抗压强度随 α 增大呈现出先减小后增大的趋势,单轴抗压强度最大值为 $\alpha=75^\circ$ 煤样,是单轴抗压强度最小值 $\alpha=15^\circ$ 煤样的2.82倍。综合实验结果和前人对单轴抗压强度与冲击破坏临界载荷相关性的研究可以认为:相同煤层,当受主应力与节理面夹角不同,其冲击倾向性也是不同的,现场评价煤层冲击危险性时,需充分考虑煤层节理面与现场受力情况。其次,破坏时间和峰后破坏时间直接体现为煤受载到破坏过程中的能量集聚与耗散的动态特征,实验研究表明^[27],峰前积蓄的应

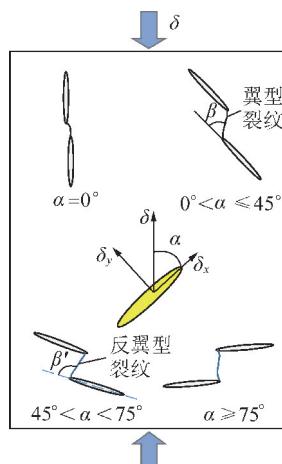


图7 煤节理影响机制示意

Fig. 7 Schematic diagram of coal joint influence mechanism

变能越多,且峰后破坏时间越短,冲击倾向性越大。本实验表明:随 α 增大,破坏时间呈先降低后增大的趋势,且45°后出现陡增,说明当 α 超过45°,煤样破坏前积蓄的应变能迅速增加。随 α 增大,峰后破坏时间整体呈下降趋势,且30°前出现陡降,说明随 α 增大,煤的脆性更明显。综合不同角度煤样破坏时间和峰后破坏时间规律可以认为, α 越大,煤的冲击倾向性越大。

煤岩破裂与声发射信号的相关关系是声发射预警冲击地压的理论基础。 $\alpha \leq 45^\circ$ 煤样在达到峰值载荷前声发射能量大小和振铃计数均稳定在较小水平,振铃累计增加也较平缓,当出现声发射能量、振铃计数和振铃累计突然上升则视为煤破坏的前兆信号。而 $\alpha > 45^\circ$ 后,煤样在加载达到峰值载荷前就有大量的声发射信号,一般在加载破坏的中期开始有较大能量声发射信号出现,且整个加载过程,振铃累计增长速率逐渐增大,可将这一前兆信息用于指导 $\alpha > 45^\circ$ 煤破坏的监测预警。

4 结 论

(1) 加载方向与节理面夹角对煤样的力学特性影响显著,随 α 增大,峰值载荷和破坏时间均呈现出先微降后增大的趋势,峰后破坏时间从0°到30°出现陡降趋势。 $\alpha \leq 45^\circ$ 煤样的应力-应变曲线在峰值或峰值后出现震荡起伏现象,单轴抗压强度和应变量均小于 $\alpha > 45^\circ$ 的煤样。 $\alpha > 45^\circ$ 煤样的应力-应变曲线在峰值或峰值后无震荡起伏现象。

(2) 节理角度会对煤破坏声发射信号响应特征产生影响, $\alpha \leq 45^\circ$ 的煤样,声发射信号与应力降具有很高的相关性,声发射能量和振铃累计随应力降的发生开始大幅升高。而 $\alpha > 45^\circ$ 煤样,声发射信号与应力

降关系不明显,在应力稳定上升阶段就伴随着大量的声发射信号,振铃累计值在峰值点前呈稳定的加速增长,在峰值点后出现陡增。

(3) $\alpha \leq 45^\circ$ 的煤样,受力以平行节理面应力分量为主,更易出现沿节理面的滑移破坏,伴随节理面阶段性的贯通更易失去黏聚力而提前破坏。而 $\alpha > 45^\circ$ 的煤样,受力以垂直节理面应力分量为主,其原生节理和孔隙在峰值载荷前更易被压密,以挤压摩擦破坏为主,除明显沿节理面破坏外还存在大量垂直节理面的贯通断裂。这是煤样力学特性、裂纹扩展方式及声发射响应受节理角度影响的主要原因。

(4) 随 α 增大,煤样表现出的冲击倾向性越强,声发射信号以45°为界表现出不同的峰前峰后特征。因此,鉴定煤冲击倾向性和利用声发射进行冲击地压监测预警时,需充分考虑煤层节理面与现场受力情况。

参 考 文 献(References) :

- [1] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, PUGNO N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74(1-2): 273.
- [2] 宋战平,程昀,杨腾添,等.渗透-应力耦合作用下灰岩压缩破坏及声发射特性分析[J].煤炭学报,2019,44(9):2751-2759.
- [3] 宋战平,程昀,杨腾添,等.渗透-应力耦合作用下灰岩压缩破坏及声发射特性分析[J].煤炭学报,2019,44(9):2751-2759.
- [4] 丁鑫,肖晓春,吕祥锋,等.媒体破裂分形特征与声发射规律研究[J].煤炭学报,2018,43(11):3080-3087.
- [5] DING Xin, XIAO Xiaochun, LÜ Xiangfeng, et al. Investigate on the fractal characteristics and acoustic emission of coal fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3080-3087.
- [6] 姜全,何学秋,宋大钊,等.基于全波形的煤样单轴压缩破坏声电时频特征[J].工程科学学报,2019,41(7):874-881.
- [7] LOU Quan, HE Xueqiu, SONG Dazhao, et al. Time-frequency characteristics of acoustic electricity of coal sample damaged by uniaxial compression based on full waveform[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(7): 874-881.
- [8] QIU Liming, SONG Dazhao, LI Zhonghui, et al. Research on AE and EMR response law of the driving face passing through the fault [J]. Safety Science, 2019, 17: 184-193.
- [9] SETO M, KIYAMA T, NARITA T, et al. Location and characterization of hydrofractures formed in coal measure rock by Acoustic Emission measurements[J]. Shigen-toSozai, 1990, 106(10): 581-586.
- [10] SETO M, UTAGAWA M, KATSUYAMA K, et al. Studies on the measurement of subsurface fractures and geostress using acoustic emission technique for deep coalbed development[J], 1993.
- [11] CAI Ming, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 833-847.

- [9] 林鹏,黄凯珠,王仁坤,等.不同角度单裂纹缺陷试样的裂纹扩展与破坏行为[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S2):5652-5657.
LIN Peng, WANG Kaizhu, WANG Renkun, et al. Crack growth mechanism and failure behavior of specimen containing single flaw with different angles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (S2) :5652-5657.
- [10] 李术才,朱维申.复杂应力状态下断续节理岩体断裂损伤机制研究及其应用[J].岩石力学与工程学报,1999,18(2):142-146.
LI Shucai, ZHU Weishen. Fracture damage mechanism of discontinuous jointed rockmass under the state of complex stress and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18 (2) :142-146.
- [11] 刘恺德,刘泉声,朱元广,等.考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):308-316.
LIU Kaide, LIU Quansheng, ZHU Yuanguang, et al. Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under Brazilian splitting and uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (2) :308-316.
- [12] 吴基文,闫立宏.煤岩抗拉强度两种室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.
- [13] ZHAO Yixin, ZHAO Gaofeng, JIANG Yaodong, et al. Effects of bedding on the dynamic indirect tensile strength of coal: Laboratory experiments and numerical simulation [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 132 :81-93.
- [14] MAJID Noorian, ZHAO Zhihong, JING Lanru. Numerical evaluation strength and deform ability of fractured rocks [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 6:156-164.
- [15] YANG Z Y, CHEN J M, HUANG T H. Effect of joint sets on the strength and deformation of rock mass models [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35 (1) :75-84.
- [16] 王瑞红,邓婕,刘杰,等.节理对砂岩变形及破坏特征影响研究.地下空间与工程学报,2017,13(1):93-100.
WANG Ruihong, DENG Jie, LIU Jie, et al. Study on the influence of joints on deformation and failure characteristics of sandstone [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13 (1) :93-100.
- [17] 杨圣奇,温森,李良权.不同围压下断续预制裂纹粗晶大理岩变形和强度特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(8):1572-1587.
YANG Shengqi, WEN Sen, LI Liangquan. Experimental study on deformation and strength properties of coarse marble with discontinuous pre-existing Cracks under different confining pressures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (8) :1572-1587.
- [18] HOLCOMB D J. General theory of the Kaiser effect [J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1993, 30:929-935.
- [19] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等.煤体破裂声发射的频谱特征研究 [J].煤炭学报,2004,29(3):289-292.
WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, et al. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29 (3) :289-292.
- [20] 王恩元.含瓦斯煤破裂的电磁辐射和声发射效应及其应用研究 [D].徐州:中国矿业大学,1997.
WANG Enyuan. The effect of EME & AE during the fracture of coal containing gas and its applications [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 1997.
- [21] LI Dexing, WANG Enyuan, KONG Xiangguo, et al. Mechanical behaviors and acoustic emission fractal characteristics of coal specimens with a pre-existing flaw of various inclinations under uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 116:38-51.
- [22] 李德行,王恩元,等.单轴压缩下宏观裂纹倾角对煤体特性影响研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(S1):3206-3213.
LI Dexing, WANG Enyuan, et al. Study on the influence of the angle of macro crack on the characteristics of coal under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (S1) :3206-3213.
- [23] 刘运思,王世鸣,颜世军,等.基于声发射实验层状砂岩力学特性及破坏机理[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(6):1419-1427.
LIU Yunsi, WANG Shiming, YANG Shijun, et al. Mechanical properties and failure mechanism of layered sandstone based on acoustic emission experiments [J]. Journal of Central South University, 2019, 50 (6) :1419-1427.
- [24] 张东明,白鑫,尹光志,等.含层理岩石单轴损伤破坏声发射参数及能量耗散规律[J].煤炭学报,2018,43(3):646-656.
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Acoustic emission parameters and energy dissipation law of uniaxial damage of layered rock [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43 (3) :646-656.
- [25] 郭彦双,黄凯珠,朱维申,等.辉长岩中张开型表面裂隙破裂模式研究[J].岩石力学与工程学报,2007(3):525-531.
GUO Yanshuang, HUANG Kaizhu, ZHU Weishen, et al. Study on fracture pattern of open surface-flaw in gabbro [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007 (3) :525-531.
- [26] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Superposition principle of static and static load of coal mine impact pressure and its prevention and cure [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40 (7) :1469-1476.
- [27] 卢志国,鞠文君,王浩,等.硬煤冲击倾向各向异性特征及破坏模式试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):757-768.
LU Zhiguo, JU Wenjun, WANG Hao, et al. Experimental study on anisotropy characteristics and failure mode of hard coal impact tendency [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (4) :757-768.