



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

姜永鑫,李忠辉,曹 康,等.不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征研究[J].煤炭科学技术,2021,49(7):79-84. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.011

JIANG Yongxin, LI Zhonghui, CAO Kang, *et al.* Study on coal and rock acoustic emission and infrared radiation characteristics under different loading rates [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7): 79-84. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.07.011

## 不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征研究

姜永鑫<sup>1,2</sup>, 李忠辉<sup>1,2,3</sup>, 曹 康<sup>1,2</sup>, 田 贺<sup>1,2</sup>, 何 顺<sup>1,2</sup>, 王枫植<sup>1,2</sup>

(1.中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;  
3.中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

**摘 要:**为了研究煤岩受载破坏过程中不同加载速率下的声发射和红外辐射特征以及破坏前兆信息,进行煤岩在不同加载速率下的单轴压缩试验。试验结果表明:在煤岩试样变形破坏的 4 个典型阶段,每个阶段的煤岩具有不同的声发射和红外辐射特征,不同加载速率下的声发射和红外辐射规律各基本一致。线弹性阶段红外辐射温度的下降趋势较初始压密阶段略有减缓,在塑性阶段煤岩试样持续升温,温度最低点在线弹性阶段。随着加载速率的增加,平均 AE 计数和平均 AE 能量均增大,峰值点附近的声发射活动更为剧烈,峰值处释放的能量的最大值呈递增趋势;红外辐射温度呈现典型的降转升型,温度由降转升点提前;煤岩发生破坏时,温度发生突变,最高红外辐射温度的最大值随加载速率的增大而增大。红外辐射温度与声发射计数呈较高的正相关关系,相关系数达 0.79~0.99。不同加载速率下声发射测试结果反映出的试样损伤临界前兆点的波动率为 71.3%~95.6%,红外临界前兆点的标准差为 0.75~0.92。

**关键词:**声发射;红外辐射;不同加载速率;煤岩

**中图分类号:**TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2021)07-0079-06

## Study on coal and rock acoustic emission and infrared radiation characteristics under different loading rates

JIANG Yongxin<sup>1,2</sup>, LI Zhonghui<sup>1,2,3</sup>, CAO Kang<sup>1,2</sup>, TIAN He<sup>1,2</sup>, HE Shun<sup>1,2</sup>, WANG Fengzhi<sup>1,2</sup>

(1.School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2.Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines of Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;  
3.State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of acoustic emission and infrared radiation under different loading rates during the failure process of coal and rock as well as failure precursor information, the uniaxial compression experiments of coal rock at different loading rates were carried out. The results showed that in the four typical stages of deformation and failure of coal and rock samples, the coal and rock in each stage have different characteristics of acoustic emission and infrared radiation and the acoustic emission and infrared radiation under different loading rates are basically the same. The downward trend of infrared radiation temperature in the linear elastic stage is slightly slower than that in the initial compaction stage. In the plastic stage, the coal and rock samples continue to heat up, and the lowest temperature is in the linear elastic stage. With the increase of loading rate, the average AE count and average AE energy increase, the acoustic emission activity near the peak point becomes more intense, and the maximum value of energy released at the peak increases. The infrared radiation temperature presents a typical drop-up type, and the temperature will be advanced from the falling point. When coal and rock are destroyed, the temperature changes suddenly, and the maximum value of the highest infrared radiation temperature increases with the increase of loading rate. The infrared radiation temperature has a high positive correlation with the acoustic emission count, and the correlation coefficient is 0.79~0.99. The volatility rate of the critical precursor point of sample damage reflected by the acoustic emission test results under different loading rates is 71.3%~95.6%, and the standard deviation of the infrared critical precursor points is 0.75~0.92.

**Key words:** acoustic emission; infrared radiation; different loading rates; coal and rock

收稿日期:2021-02-25;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674254);煤炭资源与安全开采国家重点实验室资助项目(SKLCRSM15X03)

作者简介:姜永鑫(1993—),男,安徽萧县人,硕士。E-mail:JYXcumt@163.com

## 0 引言

我国是世界上最大的采煤国,同时也是发生煤矿灾害事故最严重的国家。随着开采深度的增加,煤与瓦斯突出、冲击地压等动力灾害的危险性也逐渐增加,部分原来无危险的煤矿开始出现动力现象,对煤矿安全高效生产造成极大威胁<sup>[1-2]</sup>。煤岩动力灾害是煤岩体在应力作用下失稳破坏的一种灾害现象,是威胁煤矿安全开采的一个重要因素,因此对煤岩体在受力过程中产生的地球物理信号的研究具有重要的科学意义和工程实际意义<sup>[3-4]</sup>。

在煤岩动力灾害发展过程中,煤岩内储存的能量会以电磁能、声能、热能等能量形式释放出来,由此产生了多种煤岩体受力破坏监测的地球物理学方法,如声发射法、电磁辐射法和红外法等,各种监测方法的研究和应用都取得了很大进展<sup>[5-6]</sup>。陈春谏等<sup>[7]</sup>研究了不同含水率煤岩声发射特性,发现水软化了型煤试件,且随着含水率的增加,峰值应力和弹性模量减小,变形特征向岩性转化的趋势;邹银辉<sup>[8]</sup>研究了煤岩声发射特征的产生机理,并推导了理论模型;刘杰等<sup>[9]</sup>研究了岩石强度对于组合试样力学行为及声发射特性的影响,发现组合试样应力-应变曲线位于煤体和岩石之间,更加靠近煤体;李国爱<sup>[10]</sup>研究了裂隙砂岩失稳演化过程红外热效应及其破坏前兆规律,发现试样受载破坏过程中红外辐射温度对破裂具有良好的响应,最高红外辐射温度异常信号表现为瞬间的突增、突降;马立强等<sup>[11]</sup>研究了煤岩破裂过程中应力对红外辐射的控制效应,发现煤样表面红外辐射方差突变系数平均达到煤样应力调整系数的2个数量级,可运用此特征对承载煤岩体裂隙发育及破裂状况进行红外实时监测。曹安业等<sup>[12]</sup>研究了不同加载速率下岩样损伤演化的声发射特征,随着加载速率增大,AE能量释放形式由孤震型向震群型转变,且高加载速率下AE撞击能量有大幅升高,但AE累计振铃计数明显减少。上述研究成果分别在声发射、红外辐射和不同加载速率方面对煤岩破坏过程进行了研究,但不同加载速率下的煤岩声发射和红外辐射特征研究较少。笔者通过单轴加载试验,利用声发射仪和红外热像仪同步测试了煤岩的声发射和红外辐射信息。研究了不同加载速率下煤岩破裂过程中声发射和红外辐射的变化规律及对应关系,为煤岩体受力突变等矿山灾害的监测、预警提供技术手段。

## 1 试验设计及试验方法

### 1.1 试验系统

试验系统如图1所示。试验在电磁屏蔽室内进行,屏蔽效果在85 dB以上,减少了外界较强电磁场、空气流动和噪声对试验信号的干扰,创造了相对稳定的试验环境。试验系统主要由加载控制系统、声发射采集系统和红外监测系统。加载控制系统采用YAW型微机控制试验机,该试验机具有力闭环控制、恒应力控制和载荷保持功能,能够实现等负荷加载,控制精度高。声发射采集系统采用24通道美国物理声学公司Micro-II型AE监测主机,通过配套软件Rock Test for Express-8可实时采集声发射时域参数和原始波形数据,能进行声电数据采集及实时或事后数据分析和频谱分析,采用的探头型号为NANO-30,其峰值频率为300 kHz。红外监测系统采用Optris PI450高分辨率红外热像仪,其光学分辨率为382×288,温度范围为-20~+100℃,0~250℃,150~900℃(分段调温),帧频为80 Hz,红外频带为7.5~13.0 μm,视场角为23°~30°,热灵敏度为0.04。

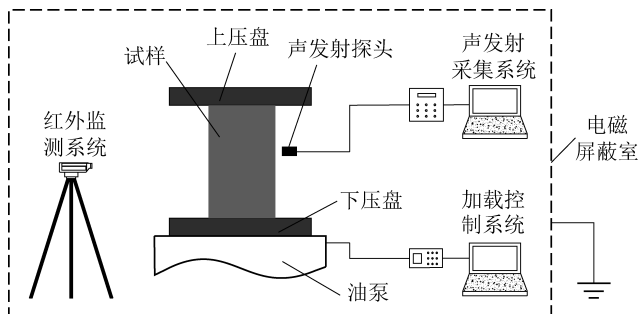


图1 试验系统

Fig.1 Experimental system

### 1.2 试验样品制备及加载方式

试验所需煤样来自河南神火集团有限公司梁北煤矿,将大块煤样加工成50 mm×50 mm×100 mm(长×宽×高)的标准长方体煤样,如图2所示,煤样端面平整度误差小于0.03 mm。煤样提前24 h放入屏蔽室,保证试验时试样温度和环境温度一致。单轴加载试验采用力控加载方式,为避免接触时产生接触噪声影响声发射监测结果,先预加载至200 N,保证煤样与加载面完全接触。选取9个煤样,分成3组,分别以50、100、200 N/s的速率加载至破坏。采用声发射系统和红外热像仪,同步实时测试煤样的破裂过程。为保证各试验系统采集数据时间的一致,试验开始时,对各试验采集系统进行同步计时。试验中为减少环境因素对红外成像仪测量结果的影响,在试验台周围围上白色的

湿布,正对红外热像仪的一面敞开,同时禁止人员走动。



图2 部分煤岩样

Fig.2 Prepared coal samples

## 2 试验结果分析

### 2.1 煤样变形破坏的4个典型阶段分析

为降低环境和仪器等因素对试验结果的影响,试验中所述红外辐射温度为试样的最高红外辐射温度,最高红外辐射温度指红外热像仪测量试样温度场内的温度最大值,其反映试样红外辐射的最大强度。煤岩的载荷-时间曲线是煤岩力学性质的重要反应。对9组试验结果进行分析,限于篇幅原因,分别从50、100、200 N/s三个加载速率小组中各挑选一组试验结果进行分析研究。由于加载速率是影响煤岩力学特性的主要因素之一,煤岩试样在3种不同加载速率下的声发射和红外辐射试验结果如图3所示,结合煤岩破坏过程的应力-应变曲线,从煤岩

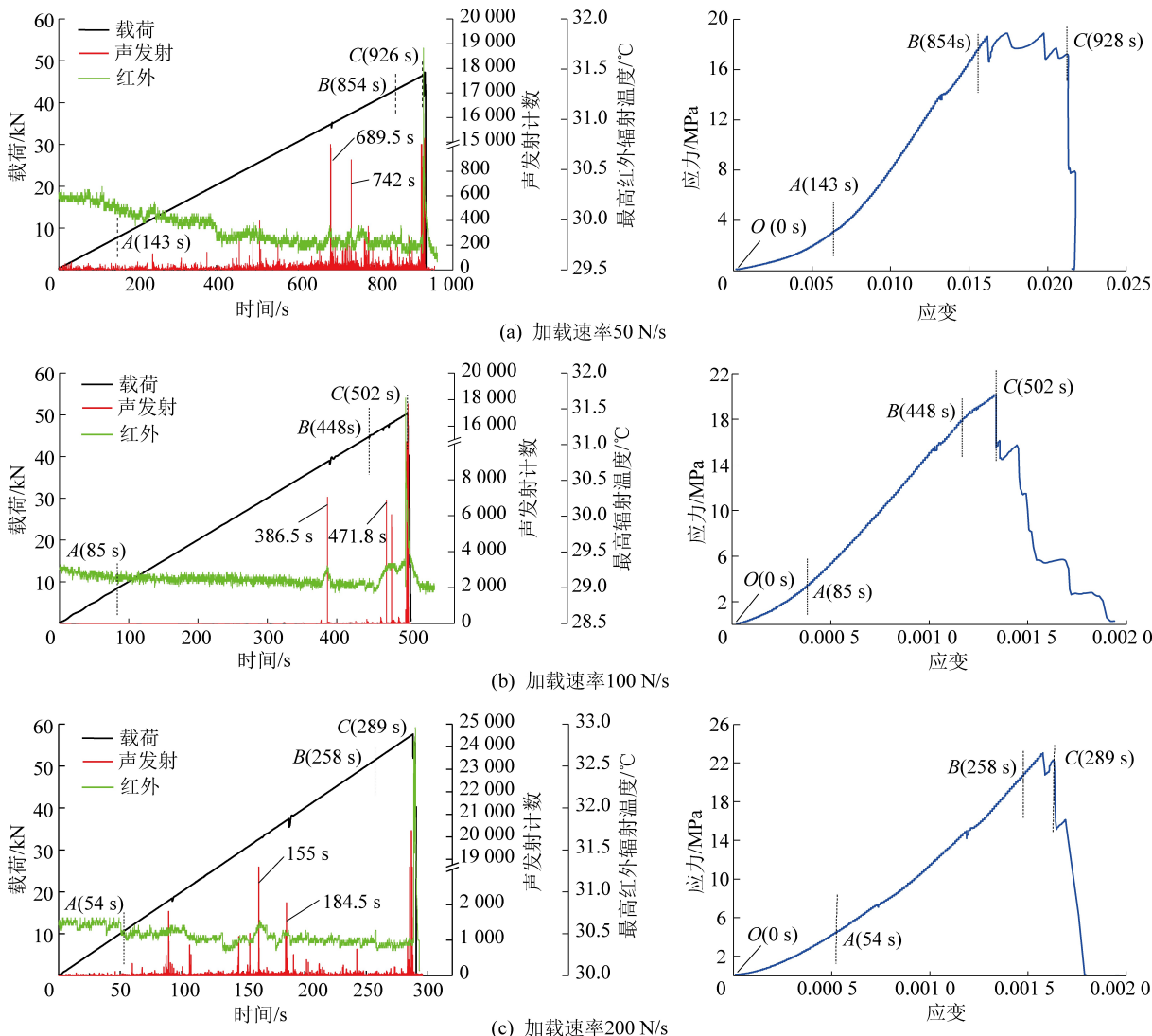


图3 不同加载速率下的声发射和红外辐射试验结果

Fig.3 Experimental results of acoustic emission and infrared radiation at different loading rates

变形破坏的4个典型阶段进行分析。由图3可知,每个阶段的煤岩具有不同的声发射和红外辐射特

征,不同加载速率下红外辐射规律基本一致,呈典型的降转升变化,不同加载速率下的声发射信号前期



较少,后期较多,载荷峰值附近达到最大值。

1)第 1 阶段,初始压密阶段(*OA*)。随着轴向载荷的增加,煤岩中的微裂隙和天然缺陷在载荷的作用下被逐渐压密实,试件体积逐渐变小。由于载荷较小,在此阶段,声发射信号反应不明显,能量低,计数少。红外辐射温度下降明显,总体呈下降趋势。

2)第 2 阶段,线弹性阶段(*AB*)。试样体积继续减小,体应变继续增大,随着载荷的不断加大,煤岩内部的微裂隙和节理等被压实,煤岩发生微小破裂,声发射信号对微小破裂的产生有很好的响应。随着载荷的增大,从煤样表面来看没有任何明显裂纹产生,但煤岩内部开始出现微裂隙,最高红外辐射温度呈升-降-升的变化。加载速率 50 N/s 时,664.5~691.1 s 最高红外辐射温度增加 0.2 ℃,689.5 s 发生了一次破裂,声发射计数突增到 989;728.1~740.6 s 最高红外辐射温度增加 0.12 ℃,742 s 声发射计数突增到 892,煤样表面变化不明显,但内部已产生微裂隙。加载速率为 100 N/s 时,375.5~387.6 s 最高红外辐射温度增加 0.21 ℃,386.5 s 产生了小破裂,声发射计数突增到 7 030。加载速率为 200 N/s 时,158.0~163.8 s,最高红外辐射温度增加 0.18 ℃,155 s 声发射计数增大到 3 789;178.5~186.2 s 最高红外辐射温度增加 0.12 ℃,184.5 s 产生小破裂,声发射计数突增到 2 055。煤岩产生小破裂时,声发射计数突增,红外辐射温度缓慢上升。

3)第 3 阶段,塑性阶段(*BC*)。随着载荷的不断加大,煤岩内部产生微裂隙,变形加速,载荷上升较缓慢,煤岩体积逐渐增大。在发生较大破裂时,声发射计数迅速达到高值。其值和煤样发生主破裂时的计数值相当。煤岩内部裂隙大量产生,在载荷作用下开始扩展、连接,逐渐向主破裂方向汇集。从图 3 可以看出,此阶段的声发射活动明显,最高红外辐射温度呈持续上升趋势。加载速率为 100 N/s 时,在 458.7~480 s 最高红外辐射温度增加 0.31 ℃,471.8 s 连续发生 2 次破裂,声发射计数连续出现 2 次突增。

4)第 4 阶段,破裂及其发展阶段(*C* 点以后)。该阶段煤岩内部出现大量裂纹和裂隙并迅速扩展,汇合贯通,载荷升高到试样的承载极限,最终导致煤岩失稳破裂。在试样发生主破裂时,声发射计数迅速达到峰值,由于煤岩试样破坏后破裂面之间存在剧烈的摩擦和滑移,声发射信号剧烈波动直到试验结束。由于前期能量的积累,在煤样失稳破坏时,载荷瞬间下降,破裂处发生剧烈摩擦和滑动,最高红外辐射温度出现极大值。

2.2 不同加载速率的煤样声发射、红外特征分析

3 种不同加载速率下声发射各参数的对比结果如图 4 所示。随着加载速率的增加,产生明显声发射数的时间明显缩减,加载速率的增大使产生明显声发射的应变值变小。由图 4 可知,平均 AE 计数和平均 AE 能量均随加载速率的增大而增大。这是由于加载速率的增大,使裂纹、裂隙的扩展速率也迅速增大,相应的声发射也越大,而此时监测的声发射计数和能量也越大,煤块崩落,煤体破坏明显,说明煤岩的损伤伴随着能量的释放过程。

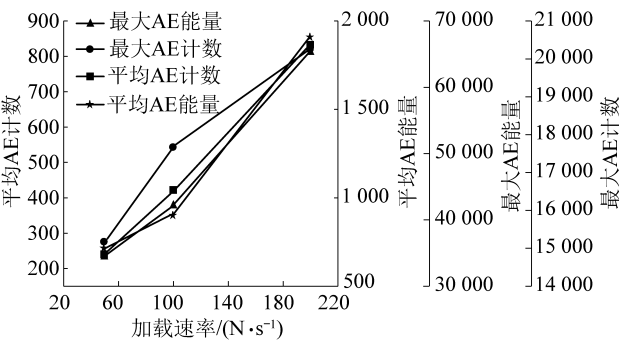


图 4 不同加载速率下声发射各参数对比  
Fig.4 Comparison of acoustic emission parameters at different loading rates

表 1 为试样温度下降最大值、最大温度及温度曲线各阶段(*OA*、*AB*、*BC*)拟合曲线的斜率。

表 1 不同加载速率下煤样红外各参数统计  
Table 1 Statistics of infrared parameters of coal samples at different loading rates

加载速率/ (N·s <sup>-1</sup> )	最大下降 温度/℃	最大温 度/℃	曲线斜率/10 <sup>-3</sup>		
			<i>OA</i> 段	<i>AB</i> 段	<i>BC</i> 段
50	0.57	31.24	-0.65	-0.52	0.13
100	0.34	31.65	-1.50	-0.24	7.20
200	0.36	32.80	-0.94	-0.49	0.93

由表 1 知:煤岩温度降低最大值在 0.30~0.57 ℃,加载速率为 50、100、200 N/s 时,煤样发生破裂时最高红外辐射温度最大值为 31.24、31.65、32.80 ℃;煤岩失稳破裂时的最高红外辐射温度的最大值随着加载速率的增加而增大,加载速率增加越大,最高红外辐射温度最大值越大。煤岩受载过程中最高红外辐射温度呈现典型的降转升型。由阶段拟合直线的斜率知,线弹性阶段(*AB*)最高红外辐射温度下降趋势较初始压密阶段(*OA*)有所减缓,在加速非弹性变形阶段(*BC*)阶段拟合曲线斜率显示此阶段煤岩持续升温。加载速率为 50 N/s 时,最高红外辐射温度在 607.6 s 时降低到最小值 29.67 ℃;加载速率为 100 N/s 时,最高红外辐射温度在 453.1 s 时降低

到最小值 28.92 ℃;加载速率为 200 N/s 时,最高红外辐射温度在 135.9 s 时降低到最小值 30.27 ℃,随着加载速率的增大,出现最高红外辐射温度最低点的时间发生提前。

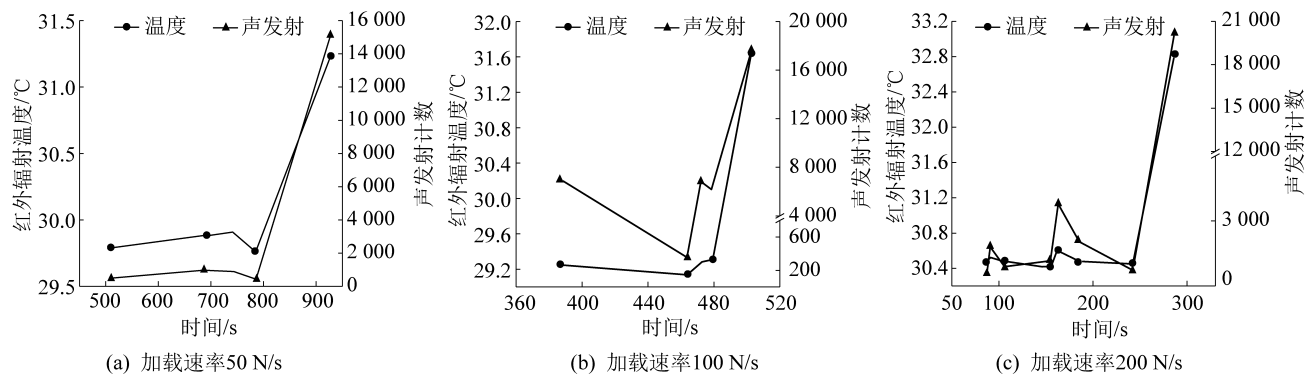


图 5 不同加载速率下红外辐射温度与声发射计数

Fig.5 Infrared radiation temperature and acoustic emission count at different loading rates

发射计数变化趋势具有较好的一致性。加载速率为 50、100、200 N/s 时,红外辐射温度与声发射计数的相关系数为 0.96、0.92、0.99,二者呈较高的正相关关系。

3 结果讨论

1)不同破坏阶段声发射、红外辐射主导原因讨论。试样在初始压密阶段,内部原生节理及各种裂隙被逐渐压实,不会产生较多的新生裂纹,声发射事件数量少,强度低;红外辐射温度变化较小,整体呈下降趋势,加载速率的增大没有影响此阶段声发射和红外辐射信号的变化。线弹性阶段,随着载荷的进一步增大,煤样受压裂隙闭合,声发射计数和能量较小;煤岩内部不同部位表现为张性区和压性区,由热弹定律可知,压性区升温,张性区降温,导致试样表面的红外温度出现变化,红外辐射温度出现了升降升的变化。塑性阶段,煤岩内部不断产生新生裂纹,且新老裂纹不断扩展、汇通,声发射计数和能量较大;由于压剪效应,最高红外辐射温度出现区域峰值且持续短暂,说明破裂面之间先发生剧烈的摩擦,然后产生分离,在压力的作用下再次闭合。不同加载速率下的煤样破坏模式如图 6 所示,在破裂及其发展阶段,声发射出现最大计数和最大瞬时能量,煤岩表现出脆性破坏;产生破裂和摩擦时引发了破裂面之间的摩擦热效应,热弹效应和摩擦热效应共同作用于这一阶段。从能量的释放过程来看,峰值破坏时释放出的能量最多,随着加载速率的提高,在峰值处释放的能量的最大值呈递增趋势。加载速率的增大使煤岩在加载过程中能量的释放速度变慢,在破裂时可以瞬间释放出更多的能量,表现为声发射计数、能

2.3 不同加载速率的煤样声发射、红外相关性分析

不同加载速率下红外辐射温度与声发射计数如图 5 所示(统计有明显声发射活动或破裂时的声发射与红外辐射温度)。可以看出红外辐射温度与声

量和最高红外辐射温度随加载速率的增大而增大。

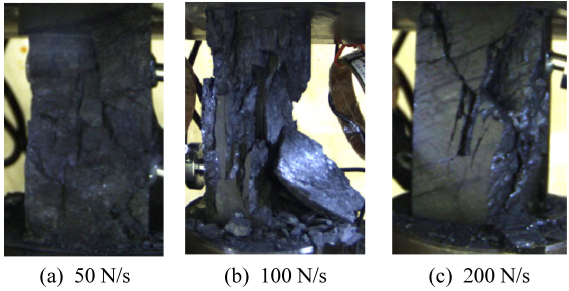


图 6 不同加载速率下的煤样破坏模式

Fig.6 Coal sample failure mode at different loading rates

2)煤岩破裂的声发射、红外辐射前兆信息。煤样在单轴加载过程中,声发射和红外辐射温度对试样内部裂纹的产生、扩展和贯通有不同的响应,将不同加载速率下在临近煤岩失稳破坏前的明显异常点作为煤岩试样的“临界前兆点”。对图 4 统计的结果分析后得到了不同加载速率下煤样破坏声发射和红外辐射信号的临界前兆点(表 2),声发射前兆点的波动率为试样失稳破坏的明显异常点的声发射计数值减去平均声发射计数再与明显异常点的平均声发射计数的比值。不同加载速率下试样损伤临界前兆点的波动率 71.3%~95.6%,红外临界前兆点的标准差 0.75~0.92。

表 2 不同加载速率下煤样临界损伤前兆点

Table 2 Precursor points of critical damage of coal samples at different loading rates

加载速度/ (N · s <sup>-1</sup> )	声发射临界前兆 点的波动率/%	红外临界前兆 点的标准差/%
50	95.6	0.75
100	71.3	0.96
200	91.8	0.92

## 4 结 论

1) 煤岩受力破坏时,声发射和红外辐射信号都有很好的响应。声发射的变化能够直观反映煤样在所受载荷下的损伤程度。随着加载速率的增加,声发射计数和能量增大,峰值点附近声发射活动更为剧烈,峰值处释放的能量的最大值呈递增趋势。

2) 煤岩受载过程中最高红外辐射温度呈现典型的降转升型,线弹性阶段(*AB*)红外辐射温度的下降趋势较初始压密阶段(*OA*)略有减缓,在塑性阶段(*BC*)阶段煤岩试样持续升温,温度最低点在线弹性阶段(*AB*)。随着加载速率的增加,温度的降转升点逐渐提前。最高红外辐射温度能够反映煤岩试样局部破裂点的温度变化,煤岩发生破坏时,温度发生突变,最高红外辐射温度随加载速率的增大而增大。

3) 每个阶段的煤岩具有不同的声发射和红外辐射特征,不同加载速率下的声发射和红外辐射规律基本一致。红外辐射温度与声发射计数呈正相关关系,随着加载速率的增加相关系数呈先减小后增大的趋势,红外辐射信号与声发射信号有良好的对应关系。不同加载速率下声发射测试结果反映出的试样损伤临界前兆点的波动率 71.3%~95.6%,红外临界前兆点的标准差 0.75~0.92。

### 参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,石平五.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2004.
- [2] 王恩元,何学秋,李忠辉,等.煤岩电磁辐射技术及其应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [3] 窦林名,何学秋.冲击矿压防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [4] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [5] 王恩元,何学秋.电磁辐射法预测煤与瓦斯突出原理[J].中国矿业大学学报,2000,29(3):225-229.
- [6] 张黎明,任明远,马绍琼,等.大理岩卸围压破坏全过程的声发射及分形特征[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):2862-2867.  
ZHANG Liming, REN Mingyuan, MA Shaoqiong, *et al.* Acoustic emission and fractal characteristics of marble during unloading failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2862-2867.
- [7] 陈春谏,赵耀江,郭胜亮,等.不同含水率煤岩声发射特性试验研究[J].煤矿安全,2018,49(5):40-42.  
CHEN Chunjian, ZHAO Yaojiang, GUO Shengliang, *et al.* Experimental Study on Acoustic Emission Characteristics of Coal with

- Different Moisture Content [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(5):40-42.
- [8] 邹银辉.煤岩声发射机理初探[J].矿业安全与环保,2004,31(2):31-32.
- [9] 刘杰,王恩元,宋大钊,等.岩石强度对于组合试样力学行为及声发射特性的影响[J].煤炭学报,2014,39(4):685-691.  
LIU Jie, WANG Enyuan, SONG Dazhao, *et al.* Effects of rock strength on mechanical behavior and acoustic emission characteristics of samples composed of coal and rock[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4):685-691.
- [10] 李国爱.裂隙砂岩失稳演化过程红外热效应及其破坏前兆规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [11] 马立强,张垚,孙海,等.煤岩破裂过程中应力对红外辐射的控制效应试验[J].煤炭学报,2017,42(1):140-147.  
MA Liqiang, ZHANG Yao, SUN Hai, *et al.* Experimental study on dependence of infrared radiation on stress for coal fracturing process [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 140-147.
- [12] 曹安业,井广成,窦林名,等.不同加载速率下岩样损伤演化的声发射特征研究[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):923-928.  
CAO Anye, JING Guangcheng, DOU Linming, *et al.* Damage evolution law based on acoustic emission of sandy mudstone under different uniaxial loading rate [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(6):923-928
- [13] 陈勉,张艳,金衍,等.加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,8(5):2599-2604.  
CHEN Mian, ZHANG Yan, JIN Yan, *et al.* Experimental study of influence of loading rate on Kaiser effect of different lithological rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 2599-2604.
- [14] 赵毅鑫,姜耀东,韩志茹.冲击倾向性煤体破坏过程声热效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):965-971.  
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, HAN Zhiru. Experimental study on acoustic and thermal infrared characteristics of bump-prone coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5):965-971.
- [15] 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.
- [16] 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.