

〈图像处理与仿真〉

岩样损伤红外热像的归一化直方图表征研究

宋晶晶^{1,3}, 李忠辉^{1,2,3}, 张昕^{1,3}, 田贺^{1,3}, 郑安琪^{1,3}, 臧泽升^{1,3}, 张全聪^{1,3}

(1. 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;

2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 红外热像法是一种评估煤岩损伤有广阔应用前景的手段。通过红外热像中的关键信息进行识别和提取, 从而对煤岩损伤状态进行判别。本文对岩样进行了单轴加载, 同步采集红外热像和岩样表面裂隙发育图, 采用归一化直方图的方式对红外热像进行了分析处理, 并利用不同灰度值区间的像素占比对红外热像的细节信息进行了定量表征。结果表明, 不同时刻红外热像的灰度值分布能良好反映试样受载破坏过程表面温度和应力值的变化, 在主破裂发生时, 灰度值区间[240,255] (岩样表面温度 29.01℃~33.19℃) 的像素点百分比较上一时刻增加 13.85 个百分点。另外, 灰度值区间 [224,255] 的像素占比随时间的变化趋势与岩样损伤变量呈高度相关性, 这表明基于归一化直方图的红外热像能够很好表征岩样损伤破坏过程。

关键词: 红外热像; 归一化直方图; 灰度值; 岩样损伤

中图分类号: TD313, TN743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)08-0777-07

Research on Normalized Histogram Characterization of Infrared Thermal Image of Rock Sample Damage

SONG Jingjing^{1,3}, LI Zhonghui^{1,2,3}, ZHANG Xin^{1,3}, TIAN He^{1,3}, ZHENG Anqi^{1,3}
ZANG Zesheng^{1,3}, ZHANG Quancong^{1,3}

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

Abstract: Infrared thermal imaging is a very promising method for evaluating coal and rock damage. To further process the infrared image and extract the key information, the damage status of coal and rock can be distinguished according to this quantitative information. With uniaxial loading, fracture development maps were developed, and synchronous acquisition of infrared images of the rock samples was carried out. The infrared images were analyzed and processed using a normalized histogram, and the details of the infrared images were quantitatively characterized. The results show that the gray value distribution of the infrared images at different times can reflect the surface temperature changes and stress values during the failure process of the sample. When the main fracture occurred, the percentage of pixels in the gray value interval [240,255] (the surface temperature of the rock sample was 29.01℃-33.19℃) increased by 13.85% compared with that in the previous moment. In addition, the change trend of the proportion of pixels in the gray value interval [224,255] over time is highly correlated with rock damage variables, which shows that the normalized histogram can characterize the damage and destruction process of the rock mass.

Key words: infrared thermal image, normalized histogram, gray value, rock sample damage

收稿日期: 2020-07-29; 修订日期: 2020-08-22.

作者简介: 宋晶晶 (1996-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为煤岩动力灾害地球物理信息及监测预警。E-mail: ts19120094p31@cumt.edu.cn.

通信作者: 李忠辉 (1978-), 男, 河北省高邑县人, 教授, 博士生导师, 研究方向为煤岩动力灾害过程监测及预警、煤与瓦斯突出防治与瓦斯抽采、安全监测预警大数据分析及智能预警等。E-mail: leezhonghui@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51674254, 51934007); 山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY020505); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)。

0 引言

煤岩的变形破坏是岩石力学关注的关键问题,特别是在隧道开挖及地下工程领域,岩石的损伤断裂会诱导灾害的发生,威胁人身及财产安全。因此很多学者通过本构方程,数值模拟等手段探寻岩石损伤特征^[1-3]。另外,一些学者着眼于研究岩石断裂过程中产生的声^[4]、电磁^[5]、热^[6]等信息,以期建立岩石损伤与这些信息之间的关系,探索这些信息的演化规律及前兆特征,从而能通过声发射、电磁辐射、红外辐射等手段监测煤岩损伤破坏过程^[7-8]。

值得关注的是,许多文献报道了煤岩损伤破坏过程中的红外辐射现象。马立强等^[9]用红外测温仪测量煤岩体孔内温度,发现煤和泥岩破裂具有不同的红外前兆特征,另外发现应力对加载岩样的红外辐射普遍具有控制效应^[10]。来兴平等^[11]研究揭示了热红外辐射温度场与声发射耗散能量间的关系,研究表明裂隙煤岩的红外辐射异常区域集中于预制结构面附近,红外辐射场的演化与声发射能量突变具有一致性。姜永鑫等^[12]研究了不同加载速率下煤岩声发射与红外辐射特征。程富起等^[13]研究结果表明基于红外辐射温度累积量的煤岩损伤演化模型能够很好地对应煤岩裂隙产生、发展和破坏的演化过程,计算应力和实测应力呈现高度相关。李忠辉等^[14]对应力和气体耦合作用下的煤岩破裂过程进行了红外辐射试验,研究了煤在应力和气体耦合作用下的红外辐射变化规律。田贺等^[15]运用临界慢化理论对煤样最高红外辐射温度进行处理,研究了煤样受载破坏过程中有效前兆信息。Mineo 和 Pappalardo^[16]创新性地研究了利用红外热成像法评估完整岩石的孔隙度。Fiorucci 等^[17]提出了从红外热像测量推断节理岩体的热响应,现场实测表明红外成像是能够表征岩石表面温度场分布的有效手段。Sun 等^[18]研究了极陡厚煤层硬岩柱动态破裂过程的声发射和红外辐射热像,结果表明这两者都可以作为预测动力灾害的有效手段。Pappalardo^[19]将红外热成像法用于评估岩体的水力传导性。综上所述,红外辐射演化能够反映煤岩的损伤破坏过程并且与其他监测手段有良好的对应关系。因此,作为一种非接触式监测手段,红外辐射在结构稳定性监测、无损探伤、煤岩动力灾害监测预警等方面具有非常好的应用前景。

基于目前研究,红外热像同样存在像素分辨率低、对比度低,噪声大,图像边缘模糊、灰度范围窄等缺点。这些因素会影响红外热像有效信息的识

别及提取,从而影响依据红外热像所进行判别的准确性。因此,如何对红外热像进行有效后期处理,对红外热像的细节信息进行量化分析是非常关键的问题。张顺等^[20]通过采用 CLAHE 算法对重构后的图像进行增强处理,提高了图像的清晰度和辨识率,但运算量繁琐,不易实时实现。陈钱^[21]详细分析了非均匀性校正技术、图像细节增强技术对红外热像的处理。王笛等^[22]建立的基于大气灰度因子的灰度映射模型有效地消除了大气辐射造成的图像质量退化。张婷婷等^[23]基于全局和局部特征研究了自适应红外热像增强算法。曹海杰等^[24]探讨了红外热像的自适应逆直方图增强技术。葛朋等^[25]提出了一种基于引导滤波图像分层的细节增强算法,用以优化红外热像的细节效果。而目前,选择合适的方式对煤岩受载破坏红外热像进行量化分析并依据图像信息对煤岩损伤破坏状态进行判别鲜有研究。

本文建立了岩石破坏红外辐射采集系统,对岩石试样进行了单轴加载并实时记录了其红外热像信息。采取归一化直方图的方式对红外热像的细节信息进行了量化表征,计算了岩样破坏的损伤参量并进行了对比分析。本研究对于红外热像的处理、信息提取,以及基于红外热成像法岩石损伤破坏研究提供了一种新的思路和手段。

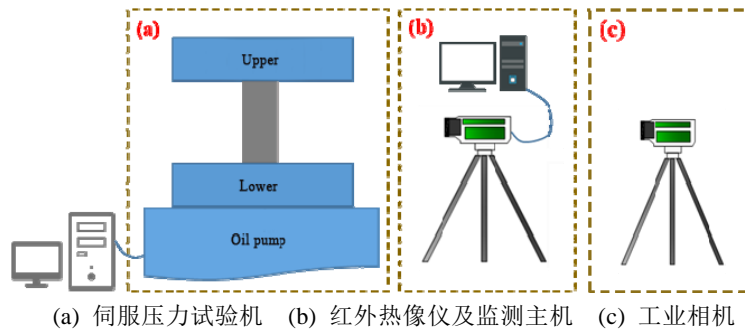
1 实验

1.1 实验系统

实验系统包括压力机、红外热像仪、工业相机及数据采集主机。实验在电磁屏蔽室内进行,能够有效地减少环境电磁波、噪声波对实验信号的干扰,为红外实验提供一个相对稳定可靠的实验环境。其中加载载荷由 YAW4306 微机控制电液伺服压力试验机记录,红外热像仪采用德国生产的 OptrisPI450 红外热像仪,其具有 382×288 像素的光学分辨率, $7.5 \sim 13 \mu\text{m}$ 的光谱测量范围, 80 Hz 的最大拍摄帧频,以及 0.04 K 的热灵敏度。实验系统可以实现同步采集并实时记录试样受载破裂过程的应力、应变、红外热像变化及动态破坏图像。实验系统图如图 1 所示。

1.2 试样制备

实验所采用的试样取自河南省永城市薛湖煤矿底板岩石。依据国际岩石力学标准将大块岩样加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准圆柱体试样(如图 2 所示),试样用细砂纸打磨使其表面平整度误差小于 0.04 mm ,并将试样提前 48 h 放入屏蔽室,使试样温度与实验室环境温度保持一致。



(a) 伺服压力试验机 (b) 红外热像仪及监测主机 (c) 工业相机
(a) Servo pressure testing machine (b) Infrared thermal imager and monitoring host (c) Industrial camera
图1 实验系统图

Fig.1 Experimental system diagram



图2 实验试样

Fig.2 The experimental sample

1.3 实验方案

实验系统搭建完毕后，将实验试样放置于上下压机头之间，并施加1kN的预载荷。其中，试样两端均放置Teflon绝缘垫片以避免试样加载过程中的端部效应。手动调节红外热像仪和工业相机的焦距，使其分辨率达到最佳。实验采用力控加载方式，加载速率为200N/s。加载过程中，保持电磁屏蔽门关闭，严禁人员走动以保证实验效果。实验结束后，借助MATLAB软件将采集的红外热像进行归一化直方图处理，并对不同区间的灰度值进行计算分析。

2 实验结果与分析

图3为试样1、2受载破坏过程中的红外辐射温度变化情况。试样最高红外温度在前期变化相对较小，而在受载破坏时刻都具有明显的突增。由于本文主要关注红外热像信息的提取，并且红外热像在试样受载后期具有更为明显的变化，因此以试样1为例，对试样受载的672s, 723.1s, 724.4s, 724.5s, 724.7s, 736s六个时刻的红外热像进行提取，所提取的红外热像如图4所示。由图4可见，不同受载时刻下的红外热像具有明显差异性，图像越亮处，代表该位置处温度越高。然而，如何对这些图像进行量化描述是亟待解决的问题。

3 红外热像处理

3.1 归一化直方图计算理论

对于灰度级范围为 $[0, L-1]$ 的红外图像，其灰度直方图可以表示为：

$$h(r_k) = n_k$$

式中： r_k 是第 k 级灰度值； n_k 是图像中灰度值为 r_k 的像素个数，即图像的灰度直方图表征的是该图像的灰度分布^[26]。假设灰度图像的维数是 $M \times N$ ， MN

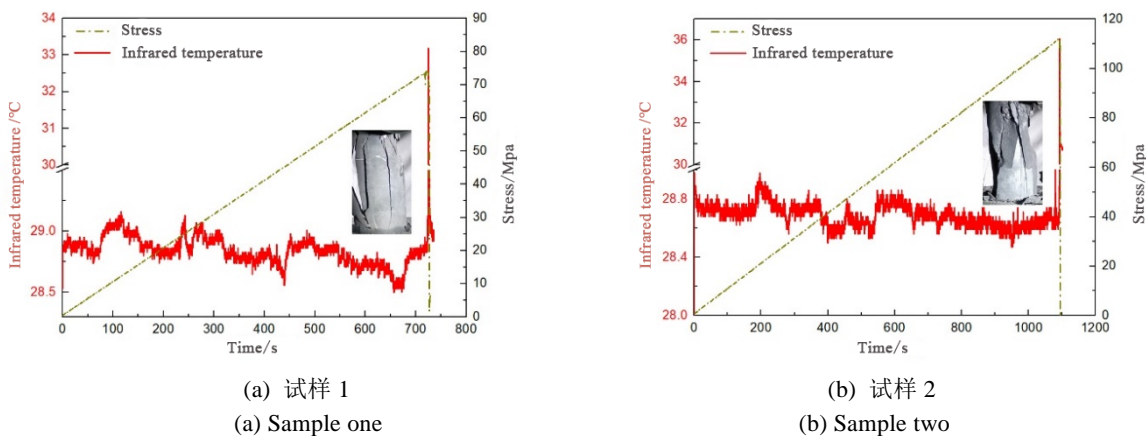


图3 岩石红外辐射温度实验结果

Fig.3 Experimental results of infrared radiation temperature of rock

表示图像的像素总数，用 $h(r_k)$ 的所有元素除以图像中的像素总数，就可以得到归一化直方图^[27]：

$$p(r_k) = n_k / MN, \quad k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

式中： $p(r_k)$ 表示灰度级 r_k 在图像中出现概率，归一化直方图所有分量之和等于1。

归一化直方图的过程如下：①将图像读入 MATLAB 环境；②获取图像的维数，计算图像的像素总数 $M \times N$ ；③利用 MATLAB 工具箱中的 imhist 函数，计算不同区间 r_k 的像素点 n_k ；④根据公式(1)计算归一化灰度直方图各区间的值；⑤最后利用 bar 函数绘制归一化直方图。

3.2 红外热像的归一化直方图

图4、图5、图6分别表示不同受载时刻红外热像、裂隙图以及红外热像经归一化处理，不同灰度值区间对应的像素点分布情况。岩样1的红外热像经归一化后，以16个灰度值为一区间将256个灰度值划分为16个区间，由于灰度值较高区间对应于红外热像的高温区域，为更好地反映岩石损伤过程，本文主要针对灰度值为[224,239]和[240,255]区间的像素点占比进行分析，其中[224,239]对应于岩样表面温度范围为 $28.73^\circ\text{C} \sim 29.00^\circ\text{C}$ ，[240,255]为 $29.01^\circ\text{C} \sim 33.19^\circ\text{C}$ 。对比分析图4、图5和图6可见，

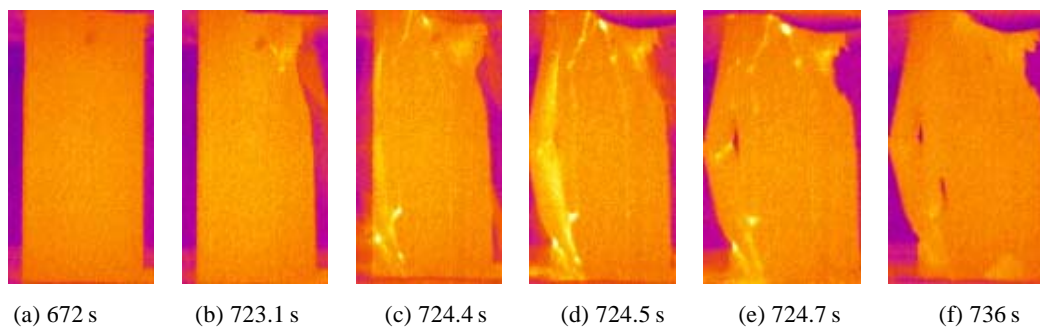


图4 试样1不同受载时刻下的红外热像

Fig.4 Infrared thermal images of sample 1 at different loading times

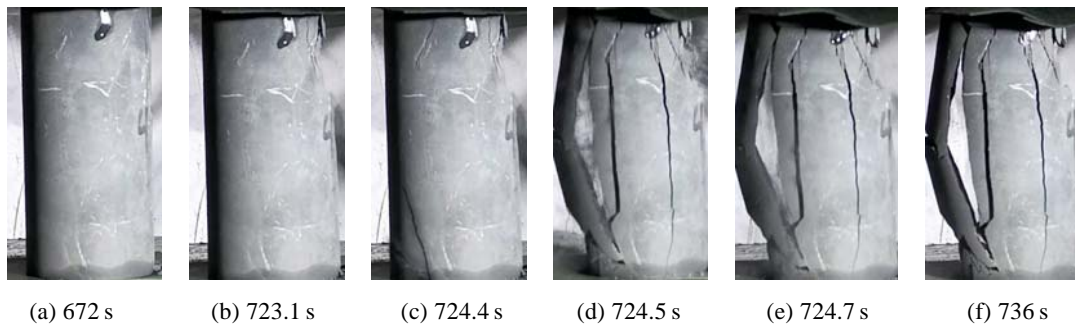


图5 试样1不同受载时刻下的裂隙图

Fig.5 Fracture diagram of sample 1 under different loading time

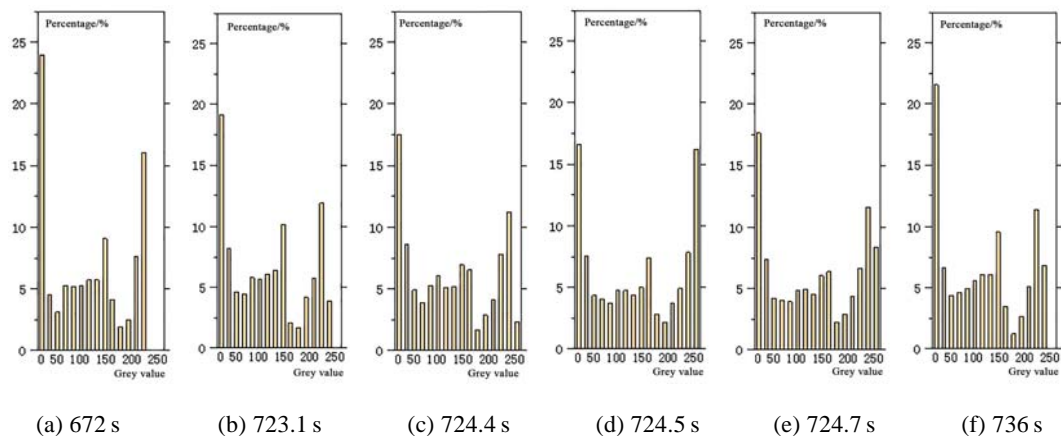


图6 红外热像归一化直方图

Fig.6 Normalized histogram of infrared thermal image

在 672 s 时刻 (图 4(a)和图 5(a)), 此时岩样的应力值为 68.91 MPa, 岩样表面没有明显裂纹, 红外热像颜色均匀, 无高温点。对应的, 在图 6(a)中, 归一化直方图只有 14 个灰度值区间存在像素点, 缺失灰度值为[224,239]和[240,255]区间的像素点, 且红外热像像素点大多集中在灰度值较低的区域, 如在 [0,15]区间像素点的百分比高达 23.96%, 这表明此时岩样应力强度较低, 红外热像亮度偏暗, 表面温度较低。图 5(b), 即 723.1 s 时刻, 岩体表面右上角出现宏观裂隙, 并在红外热像上出现高温点 (图 4(b)), 在这一时刻, 岩样的应力值较上一时刻显著提高, 达到 72.88 MPa。另外, 从图 6(b)看, [224,239]区间出现像素点达 3.88%, 但在区间[208,223]内, 723.1 s 时刻像素占比相较于 672 s 时刻低 4.11%, 表明小范围的破坏使试样局部温度较高, 而大部分区域红外温度依旧偏低。724.4s 时刻, 归一化直方图上在区间[240,255]出现像素值 (图 6(c)), 并且 [224,239]区间的像素值较上一时刻提升了 7.33%。下一时刻, 即 724.5 s 时, 岩样的应力达到峰值 73.895 MPa, 岩体发生剧烈变形破坏 (图 5(d)), 裂隙之间产生剧烈摩擦, 导致试样破裂面红外辐射温度发生突增并达到最大值 (如图 3(a)所示), 红外热像在裂隙处出现大量高温点。如图 6(d)所示, 灰度值较高的区间均出现像素点占比增大的趋势。其中, 灰度区间 [240,255]的像素点百分比比较上一时刻增加 13.85 个百分点。在主破裂后, 如图 4(e)及图 4(f), 岩样失稳破坏, 应力值迅速跌落, 红外温度逐渐下降, 红外热像上的高温点逐渐减少, 并保持一定的残余温度, 如图 6 所示的归一化直方图, [240,255]区间内的像素点先降低 7.82 个百分点后减少为 0。

3.3 基于归一化直方图的损伤表征

外部载荷的作用下, 煤岩体损伤破坏即为煤岩内部裂纹的产生、扩展、贯通过程^[28], 而裂纹间的剪切、错动、摩擦会产生热量并向外释放^[29]。依据 Y. N. Rabotnov^[30]提出的损伤变量 D , 其物理含义是材料内部承载截面由于出现了微孔隙、微裂纹或其他缺陷而失去承载能力的面积与材料初始面积之比, 即:

$$D = \frac{A^*}{A} \quad (2)$$

式中: A 为材料初始横截面积; A^* 为受损后材料损伤面积; D 为损伤变量。

令 $\sigma = F/A$ 为横截面上的名义应力, $\tilde{\sigma} = F/\tilde{A}$ 为有效截面积上的应力。则可得:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (3)$$

根据应变等价原理^[28], 可得:

$$\varepsilon = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E_0} \quad (4)$$

$$\sigma = \varepsilon(1-D)E_0 \quad (5)$$

式中: E 为材料损伤后的弹性模量; E_0 为材料的初始弹性模量; ε 为应变。

由于归一化直方图中灰度值较高的区间的像素点对应于红外热像的高温区域, 并能够更好地反映岩石受载过程中损伤演化过程。因此, 本文利用式 (5)以及灰度值为[224,255]区间不同时刻的像素点占比绘制如图 7 所示不同时刻损伤变量与[224,255]区间像素点占比对比图。

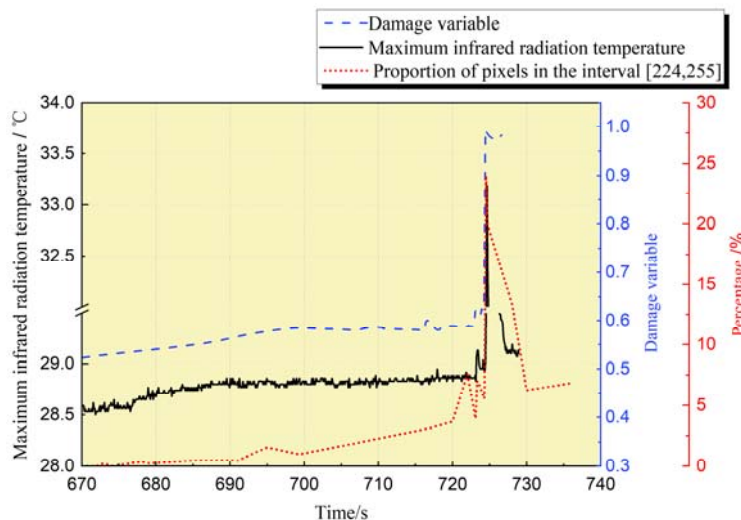


图 7 不同时刻损伤变量与[224,255]区间像素点占比对比图

Fig.7 Comparison of damage variables at different times and pixel percentage of interval [224,255]

由于实验试样的加剧变形破坏主要集中于加载后期,因此我们重点关注于50%峰值应变之后时刻,即670 s之后的区间[224, 255] (岩样表面温度28.73℃~33.19℃)中的像素点和损伤变量的变化。由图7所示,整体上区间[224, 255]中的像素点占比与试样的损伤变量变化具有一致性,均在726 s处达到最大值,且在主破坏之前发生微小波动。另外,为了进一步分析不同灰度值区间像素点的变化与岩石受载过程中损伤演化过程的相关性,在试样加载的后期(670 s至失稳破坏过程),对不同时刻下灰

度值区间[224, 239]、[240, 255]与[224, 255]中像素点占比变化与损伤变量进行相关性分析,如表1所示。灰度值区间[224, 255]中像素点占比变化与损伤变量的相关系数 r 达0.929,呈现高度相关性。其中,灰度值区间[240, 255]中像素点占比变化与损伤变量呈显著相关($r=0.697$)。因此,高值灰度区间内[224, 255] (岩样表面温度28.73℃~33.19℃)的像素点占比变化情况是能够反映试样损伤变化的有效信息。

表1 不同灰度值区间的像素点变化与损伤变量的相关性

Table 1 The correlation between the change of pixels in different gray values and damage variables

Gray value interval	[224,239] (28.73℃-29.00℃)	[240,255] (29.01℃-33.19℃)	[224,255] (28.73℃-33.19℃)
Related coefficient	0.944	0.697	0.929
Correlation	Height correlation	Significant correlation	Height correlation

4 结论

1)归一化直方图能够很好的反映岩样损伤破坏过程中红外热像的细节信息,通过该方法对红外图像中像素点的定量化识别与提取,不同灰度值区间中像素点占比的变化很好地反映了对岩样在单轴压缩下裂隙的产生、发育直至破坏的整个演化过程。

2)在加载过程中,应力值越大,试样的损伤破坏越严重,表面最高红外温度越大,位于高值灰度区间内的像素占比越高。不同加载时刻下不同灰度区间像素占比变化与试样表面红外温度的演化具有一致性,这一特征在试样加载后期更为明显,其中,主破裂发生时(724.5 s),灰度值区间[240,255] (岩样表面温度29.01℃~33.19℃)的像素点占比高达16.19%。

3)引入了试样变形破坏损伤参量 D ,位于灰度值区间[224,255] (岩样表面温度28.73℃~33.19℃)中像素点占比变化与损伤变量的相关系数 r 达0.929,呈现高度相关性。高值灰度区间内[224,255]的像素点占比变化情况是能够反映试样损伤变化的有效信息。

参考文献:

[1] 王云飞,黄正均,崔芳.煤岩破坏过程的细观力学损伤演化机制[J].煤炭学报,2014,39(12):2390-2396.
WANG Yunfei, HUANG Zhengjun, CUI Fang. Damage evolution mechanism in the failure process of coal rock based on mesomechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2390-2396.

[2] 王登科,尹光志,刘建,等.三轴压缩下含瓦斯煤岩弹塑性损伤耦合本构模型[J].岩土工程学报,2010,32(1):55-60.

WANG Dengke, YIN Zhiguang, LIU Jian, et al. Elastoplastic damage coupled model for gas-saturated coal under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 55-60.

[3] 李波波,张尧,任崇鸿,等.三轴应力下煤岩损伤-能量演化特征研究[J].中国安全科学学报,2019,29(10):98-104.
LI Bobo, ZHANG Yao, REN Chonghong, et al. Study on damage-energy evolution characteristics of coal under triaxial stress[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 98-104.

[4] Stergiopoulos C, Stavrakas I, Hloupis G, et al. Electrical and acoustic emissions in cement mortar beams subjected to mechanical loading up to fracture[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 35: 454-461.

[5] QIU L, SONG D, HE X, et al. Multifractal of electromagnetic wave formand spectrum about coal rock samples subjected touniaxial compression[J]. Fractals, 2020, 28(4): 2050061.

[6] MA L, ZHANG Y, CAO K, et al. An experimental study on infrared radiation characteristics of sandstone samples under uniaxial loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(9): 3493-3500.

[7] Kourkoulis S K, Dakanali I, Pasiou E D, et al. Acoustic emissions versus pressure stimulated currents during bending of restored marble epistyles: preliminary results[J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2017, 11(41): 536-551.

[8] NIU Y, WANG C, WANG E, et al. Experimental study on the damage evolutionof gas bearing coaland its electric potential response[J]. Rock Mechanic sand Rock Engineering, 2019, 52(11): 4589-4604.

[9] 马立强,李奇奇,曹新奇,等.煤岩受压过程中内部红外辐射温度变化特征研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(3):331-336.
MA Liqiang, LI Qiqi, CAO Xinqi, et al. Variation characteristics of internal infrared radiation temperature of coal-rock mass in compressio[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 331-336.

- [10] 马立强, 张焱, 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.
- [11] 来兴平, 刘小明, 单鹏飞, 等. 采动裂隙煤岩破裂过程热红外辐射异化特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, **36**(4): 777-85.
LAI Xingping, LIU Xiaoming, SHAN Pengfei, et al. Study on thermal infrared radiation variation of fractured coal-rock mass failure during mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, **36**(4): 777-785.
- [12] 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/OL]. [2021-07-30]. *煤炭科学技术*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200217.1336.016.html>
JIANG Yongxin, LI Zhonghui, CAO Kang, et al. Study on acoustic emission and infrared radiation characteristics and destruction precursor of coal[J/OL]. [2021-07-30]. *Coal Science and Technology*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20200217.1336.016.html>.
- [13] 程富起, 李忠辉, 魏洋, 等. 基于单轴压缩红外辐射的煤岩损伤演化特征[J]. *工矿自动化*, 2018, **44**(5): 64-70.
CHENG Fuqi, LI Zhonghui, WEI Yang, et al. Coal-rock damage evolution characteristics based on infrared radiation under uniaxial compression[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, **44**(5): 64-70.
- [14] LI Z H, YIN S, NIU Y, et al. Experimental study on the infrared thermal imaging of a coal fracture under the coupled effects of stress and gas[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, **55**: 444-451.
- [15] 田贺, 李忠辉, 殷山, 等. 煤样单轴压缩破坏红外温度临界慢化前兆研究[J]. *煤矿安全*, 2020, **51**(3): 38-43.
TIAN He, LI Zhonghui, YIN Shan, et al. Study on precursor of infrared temperature critical slowing in coal sample uniaxial compression failure[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, **51**(3): 38-43.
- [16] Mineo S, Pappalardo G. The use of infrared thermography for porosity assessment of intact rock[J]. *Rock mechanics and Rock Engineering*, 2016, **49**(8): 3027-3039.
- [17] Fiorucci M, Marmoni G M, Martino S, et al. Thermal response of jointed rock masses inferred from infrared thermographic surveying (Acuto test-site, Italy)[J]. *Sensors*, 2018, **18**(7): 2221.
- [18] SUN H, LIU X, ZHANG S, et al. Experimental investigation of acoustic emission and infrared radiation thermography of dynamic fracturing process of hard rock pillar in extremely steep and thick coal seams[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, **226**: 106845.
- [19] Pappalardo G. First results of infrared thermography applied to the evaluation of hydraulic conductivity in rock masses[J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, **26**(2): 417-428.
- [20] 张顺, 谭书林, 许里杰, 等. 基于 CLAHE 的钢管混凝土脱空检测热像图增强方法[J]. *西华大学学报: 自然科学版*, 2019, **38**(6): 107-112.
ZHANG Shun, TAN Shulin, XU Lijie, et al. Detection of void to CFST with infrared thermal enhancement based on contrast limited adaptive histogram equalization[J]. *Journal of Xihua University: Natural Science Edition*, 2019, **38**(6): 107-112.
- [21] 陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势[J]. *红外技术*, 2013, **35**(6): 311-318.
CHEN Qian. The status and development trend of infrared image processing technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(6): 311-318.
- [22] 王笛, 沈涛, 孙宾宾, 等. 基于大气灰度因子的红外图像增强算法[J]. *激光与红外*, 2019, **49**(9): 1135-1140.
WANG Di, SHEN Tao, SUN Binbin, et al. Infrared image enhancement algorithm based on atmospheric gray factor[J]. *Laser & Infrared*, 2019, **49**(9): 1135-1140.
- [23] 张婷婷, 祁伟, 曹峰, 等. 基于全局和局部特征的自适应红外图像增强算法研究[J]. *信息与电脑: 理论版*, 2020, **32**(3): 17-19, 23.
ZHANG Tingting, QI Wei, CAO Feng, et al. Infrared image enhancement based on global and local features[J]. *China Computer & Communication*, 2020, **32**(3): 17-19, 23.
- [24] 曹海杰, 刘宁, 许吉, 等. 红外图像自适应逆直方图增强技术[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(4): 256-262.
CAO Haijie, LIU Ning, XU Ji, et al. Infrared image adaptive inverse histogram enhancement technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(4): 256-262.
- [25] 葛朋, 杨波, 洪闻青, 等. 一种结合 PE 的高动态范围红外图像压缩及细节增强算法[J]. *红外技术*, 2020, **42**(3): 279-285.
GE Peng, YANG Bo, HONG Wenqing, et al. Dynamic range compression and detail enhancement algorithm combined with PE for high dynamic range infrared images[J]. *Infrared Technology*, 2020, **42**(3): 279-285.
- [26] 李玉倩, 刘林, 李金屏. 视频分析中灰度直方图的叠加原理研究[J]. *山东大学学报: 理学版*, 2009, **44**(11): 63-67.
LI Yuqian, LIU Lin, LI Jinping. Superposition principle of gray histograms in video analysis[J]. *Journal of Shandong University: Natural Science*, 2009, **44**(11): 63-67.
- [27] 陈永亮. 灰度图像的直方图均衡化处理研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.
CHEN Yongliang. Gray Image Histogram Equalization Processing Research[D]. Hefei: Anhui university, 2014.
- [28] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
TANG Chunan. *Catastrophe During Rock Fracture*[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.
- [29] 张艳博, 刘善军. 含孔岩石加载过程的热辐射温度场变化特征[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(4): 1013-1017, 1024.
ZHANG Yanbo, LIU Shanjun. Thermal radiation temperature field variation of hole rock in loading process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(4): 1013-1017, 1024.
- [30] Rabotnov Y N. Paper 68: On the equation of state of creep[C]//*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1963, **178**(1): 2-117-2-122.