

文章编号:1674-9669(2016)05-0081-05
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2016.05.015

单轴压缩下粉砂岩热图像特征粗糙度演化特性

熊伟, 邹雄刚, 徐金辉, 吴贤振, 高祥

(江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:为探寻粉砂岩破裂失稳过程中红外异常,引入分形理论,通过盒维数法计算出粉砂岩红外热图像特征粗糙度,结合方差及 AIRT 对单轴压缩下粉砂岩特征粗糙度演化特征进行分析.结果表明:热图像的特征粗糙度演化过程与方差相似,具体可分为 3 个阶段:在压密阶段,特征粗糙度和方差迅速增大且方差在这个阶段刻画较好;弹性阶段,特征粗糙度开始变小,两者刻画能力相当;塑性-峰后阶段,特征粗糙度值波动性增强,跳动幅度和频率都明显增加,且在应力峰值点转为变大,此现象即为岩石破裂红外前兆信息,阶段刻画能力较方差更理想.

关键词:粉砂岩;破裂失稳;分形;红外热图像;特征粗糙度;AIRT

中图分类号:TD315 **文献标志码:**A

Roughness evolution of siltstone's thermal image feature under uniaxial compression

XIONG Wei, ZOU Xionggang, XU Jinhui, WU Xianzhen, GAO Xiang

(School of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstracts: To explore the infrared anomaly in the process of fracture instability, the fractal theory is introduced to calculate the characteristic roughness of the infrared thermal image of siltstone by the box dimension method. The evolution characteristics of the sandstone under uniaxial compression are analyzed by combining variance and AIRT. The results show that the roughness evolution of the thermal image is similar to that the variance, and it can be divided into three stages. In the compaction stage. The characteristic roughness and the variance increase rapidly, and the variance is well characterized at this stage. In the elastic stage, the characteristic roughness starts to become smaller, and the ability to portray the same as the two. In the post peak stage, the characteristic roughness value is enhanced, and the amplitude and frequency are increased obviously. However, in the peak stress, characteristic roughness began to become big, which is infrared precursor information. In this stage, the ability to describe the characteristic is more ideal than variance.

Keywords: siltstone; instability damage; box dimension method; infrared thermal image; characteristic roughness; AIRT

自从美国数学家曼德勃罗 (Benoit Mandelbrot) 在法兰西学院讲课时,首次提出了分维和分形的设想之后,产生的“分形热”便开始经久不息,分形作为一

种新的概念和方法正在许多领域开展应用探索.国内首先由谢和平院士^[1-2]把分形理论引入到岩石力学,随后又将分形运用到岩石损伤过程,说明分形维数越

收稿日期:2016-01-02

基金项目:江西省教育厅科技计划项目(GJJ12336);江西省研究生创新专项资金项目(YC2014-S352)

通信作者:熊伟(1992-),男,硕士研究生,主要从事岩石力学、采矿理论与技术等方面的研究,E-mail:260201087@qq.com.

大,材料损伤越严重.之后彭瑞东等^[3]利用分形理论对工业 CT 扫描得到的岩石切片图像进行了分析,研究了岩石的孔隙率与分形维数之间的关系.邹飞等^[4]用单轴加压实验得到整个时间序列的数字图像,处理图像得到分形维数与应变之间有很好的线性关系.但热图像研究方面,以往学者^[5-10]大多通过加载过程中平均红外温度、最大红外温度和最小红外温度等红外特征参数变化以及热图、差值来间接反映岩石内部变化信息,由于岩石往往岩性、物理力学性质复杂程度不同,AIRT 只是表示红外辐射整体温度水平,并不能准确表达辐射场的演化特征,很难给出明确清晰的结论.为了能够对岩石变形破坏过程进一步研究,以分形理论为主导通过盒维数法计算热图像分形维数,分析分形维数的变化^[11-13].随后刘善军等^[14]引入分形,提出了用特征粗糙度为指标定量描述含孔岩石加载过程中红外辐射温度场的演化特征.

因此,文中根据分形理论用盒维数法计算出粉砂岩热图像特征粗糙度.通过特征粗糙度与应力-时间对比分析粉砂岩各个阶段的特性,其研究结果能对岩石失稳或破坏起到指导和预测作用.

1 单轴压缩下粉砂岩实验与分析

实验采用 4 块尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm 的粉砂岩试件,编号分别为 F₁、F₂、F₃ 和 F₄,实验开始前,把各台监测仪器设备同时打开,时间一一对应,进行同步监测.实验全部在 RLW-3000 型伺服试验系统上完成,加载速度匀速,保持 0.2 mm/min,直到试件破坏(图 1).采用美国 SC3000 红外实时成像系统(系统的空间分辨率为 320×240 像素,光谱范围在 8~12 μm,温度灵敏度达到 0.03 °C,成像速率调为 50 /s)进行观测,记录加载过程中各试件表面的红外热图像.

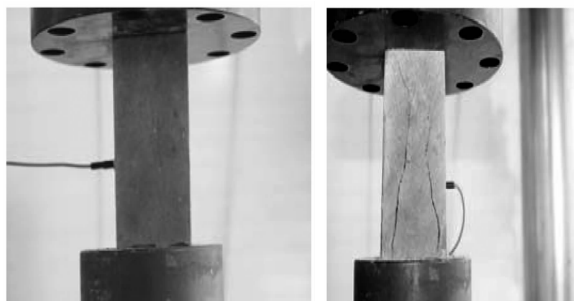


图 1 实验中岩石试样

Fig. 1 Experiment of rock specimen

1.1 红外热图像特征粗糙度

美国 SC3000 红外实时成像系统,成像速率调为 50 /s,从加压初期到最终破坏产生大量热图像,在这些图像中每隔 50 张图像提取一张图像,得到 500~600 张热图像.每张热图像代表着一个温度数值矩阵,根据周宏伟等^[15]的粗糙表面分形维数估算方法进行计算, $M \times N$ 的热图像不一定能被整数划分,首先对 $M \times N$ 的热图像进行分割,使其能够被分割成 $L \times L$ 的子块,在整个加载过程,粉砂岩表面温度变化为 2 °C 左右,可以令盒子高度 $h=L/M$.

若 L 取不同的尺寸,分割成的子块数和盒子高度随之变化,总的盒子数也相应变化.按分形理论,立方体总数 $N(L)$ 与 L 之间存在如下关系:

$$N(L)=kL^{-D}$$

其中, D 为分形维数, k 为比例系数.

不同的 L 值,得到对应不同的 $N(L)$,将 $N(L)$ 与 L 之间的关系绘制在双对数坐标中,通过直线拟合,直线斜率就代表热图像的分形维数.根据葛世荣等^[16]的研究,分形维数并不能唯一确定岩石表面的粗糙度,需要纵坐标上的截距 $\lg k$ 作为辅助参数,结合分形维数 D 和比例系数 k 提出了特征粗糙度.特征粗糙度的计算公式:

$$R_a=k^{1/D}$$

其中 R_a 表示特征粗糙度,表征热像粗糙度. R_a 越大,说明温度场分布越粗糙;反之 R_a 越小,说明温度场越光滑,越整齐.

根据 Matlab 编程计算特征粗糙度,作出特征粗糙度、应力随时间变化曲线,如图 2.

根据图 2,特征粗糙度整体变化呈现拱形状,期间不断的上下交替,整个加载到最后破坏的过程中最大变化量为 0.4 左右.加载初期,粉砂岩处在压实阶段,特征粗糙度迅速增加,很快达到最大值,增加 0.15 左右;A 点处,特征粗糙度开始转变为向下降,阶段特征表现明显;弹性变形阶段,特征粗糙度开始有缓慢下降趋势,温度开始均匀化.随后到达应力峰值点 C,期间特征粗糙度持续下降,特征粗糙度值开始有了明显的波动变化,随着继续加压,粉砂岩微裂隙大量增加,特征粗糙度上下波动的幅度和频率得到加强,且在峰值点 C 处试件 F₁、F₄ 特征粗糙度有开始变大趋势,F₂、F₃ 变大的趋势不明显,基本在整个 CD 段,试件 F₁、F₄ 特征粗糙度都处在上升阶段,此现象即为岩石失稳破裂的红外温变前兆.在 D 点附近,特征粗糙度异常突变说明岩石已经破坏.

1.2 粉砂岩温度场方差与应力随时间变化

方差表示的是各像元偏离平均值的程度,求出每一张热图像的方差随时间的变化,作出图 3.

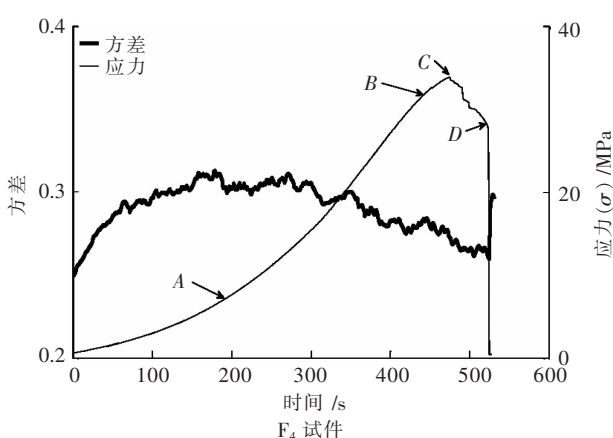
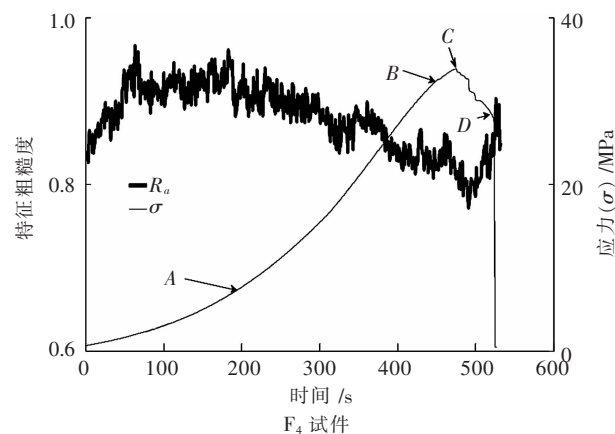
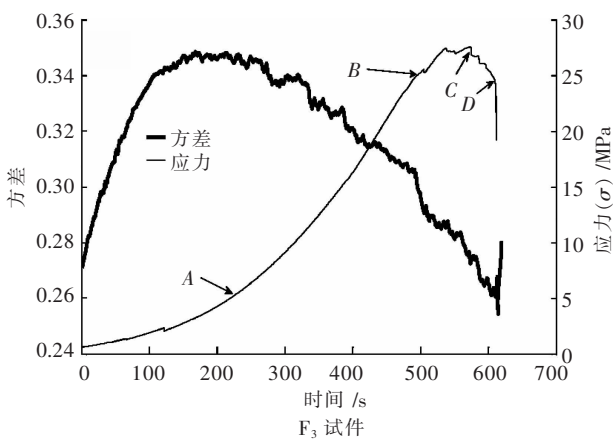
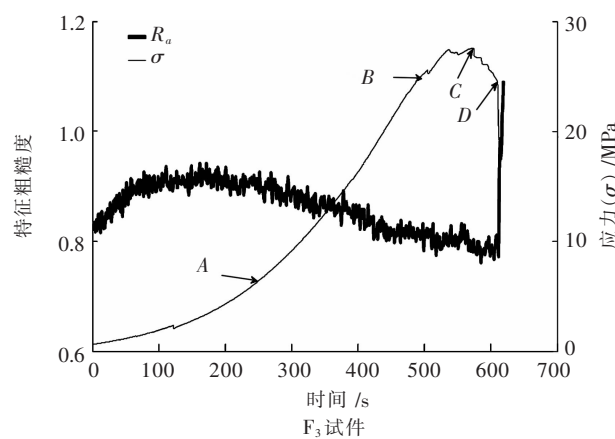
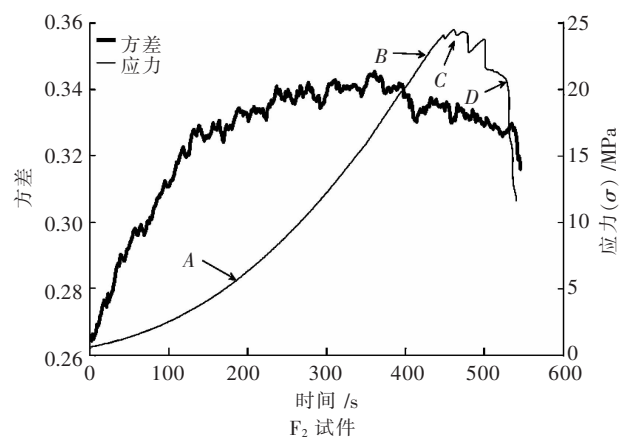
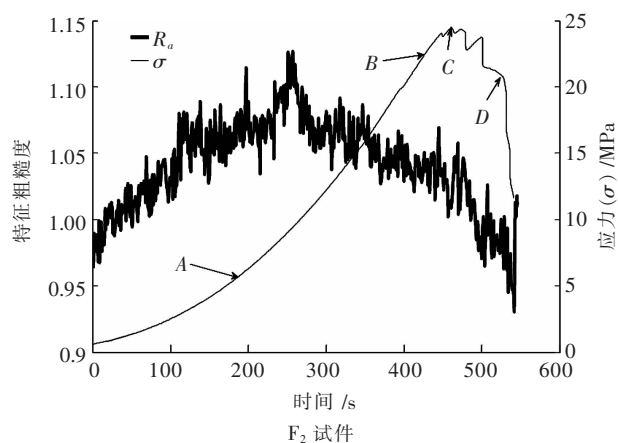
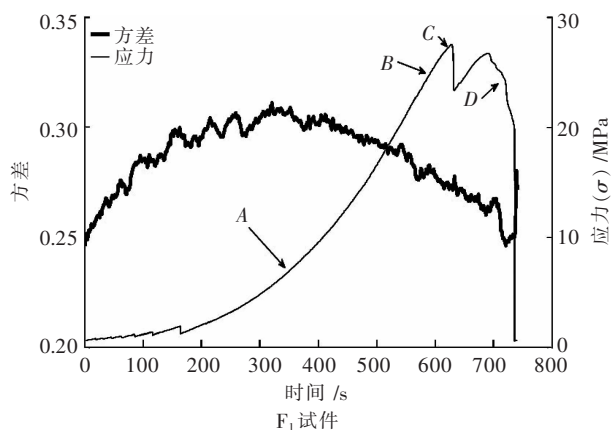
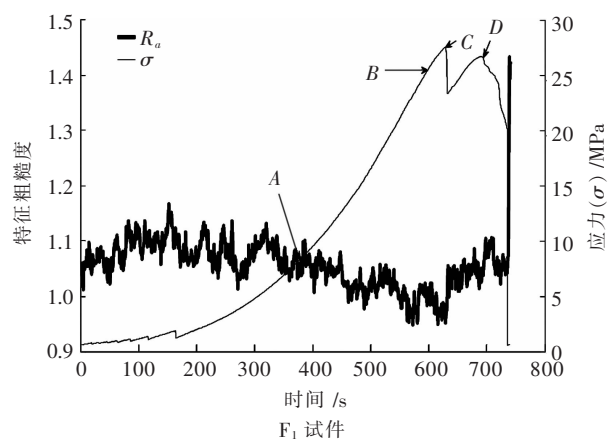


图2 粉砂岩特征粗糙度和应力随时间变化曲线
Fig. 2 Time variation curves of characteristic roughness and stress

图3 粉砂岩温度场方差与应力随时间变化
Fig. 3 Variation of variance of temperature field and stress with time in siltstone

根据图 3,加载初期,粉砂岩处于压密阶段,方差先是迅猛增加,很快达到最大值,说明辐射温度场各像元取值偏离平均值的程度较大.随后到A点,方差开始向下转变.之后塑性阶段(AB 阶段),方差继续变小,各像元取值偏离平均值的程度逐渐缩小.压力继续增加,进入塑性-峰后阶段(BD 阶段),此阶段粉砂岩内部微破裂逐渐发展产生裂纹,方差发生大幅度的向下的跳跃,且频率较之前也较多.D 点附近,方差与特征粗糙度同样的发生突跳,试件 F₁、F₃、F₄ 突然变大,F₂ 变小,说明岩石已破裂.

1.3 粉砂岩 AIRT 随时间变化

平均红外温度(AIRT)对红外热图像描述能了解粉砂岩表面整体温度水平,为此可以作出 AIRT 随时间变化曲线如图 4.

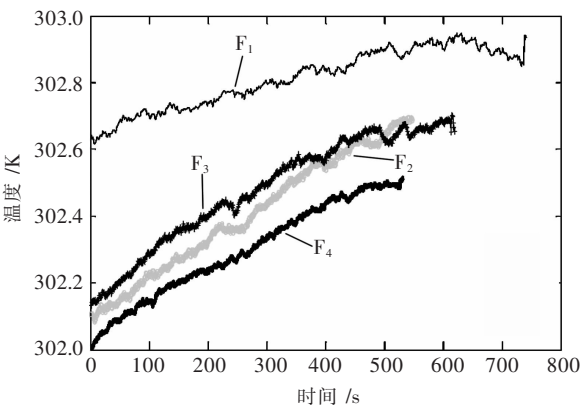


图 4 粉砂岩 AIRT-时间曲线
Fig. 4 AIRT- time curve of siltstone

图 4 中,整个加载期间 AIRT 值的变化一直是小幅度上升与下降交替,开始到最后基本保持一直增加的趋势,阶段特征不是特别明显.因每个试件结构复杂程度和周围温度不同,岩石起始温度有一定差异,且在加载过程中所有试件中最大的变化量为 0.6 K 左右.加载初期,AIRT 近乎直线式的增加;从 300 s 开始,AIRT 上下波动的幅度和频率也开始明显加强,AIRT 整体增加趋势变缓;岩石临近破裂,AIRT 有小幅度的下降或上升,但红外异常不是特别明显,对岩石失稳破坏的红外前兆效果不理想.说明 AIRT 不能有效表达岩石加载过程中红外辐射温度场的分异现象和岩石破裂前兆现象.

2 相关性分析

在粉砂岩加载的整个过程,因 AIRT 阶段特征不明显,且红外异常不理想,这里主要研究特征粗糙度

和方差与对应应力的相关关系密切程度.在压密阶段(OA 段),弹性阶段(AB 段),塑性-峰后阶段的相关系数分别见表 1,表 2 和表 3.

表 1 压密阶段(OA 段)相关系数
Table 1 Correlation coefficient of compaction stage

岩石试件编号	特征粗糙度	方差
F ₁	0.200 0	0.830 8
F ₂	0.882 2	0.955 4
F ₃	0.632 6	0.823 9
F ₄	0.587 0	0.884 0

表 2 弹性变形阶段(AB 段)相关系数
Table 2 Correlation coefficient of elastic deformation stage

岩石试件编号	特征粗糙度	方差
F ₁	-0.508 8	-0.665 7
F ₂	-0.590 8	0.734 4
F ₃	-0.910 5	-0.980 0
F ₄	-0.839 5	-0.865 3

表 3 塑性-峰后阶段(BD 段)相关系数
Table 3 Correlation coefficients of plastic peak and post peak phase

岩石试件编号	特征粗糙度	方差
F ₁	-0.678 8	0.282 5
F ₂	0.682 1	0.837 7
F ₃	-0.582 5	0.670 8
F ₄	-0.471 0	-0.432 5

根据以上 3 个表格,在压密阶段,方差介于显著相关和高度相关之间,而特征粗糙度其中的 F₂、F₃ 和 F₄ 属于显著相关而 F₁ 表现为基本不相关.弹性变形阶段,方差和特征粗糙度开始向下转变,试件应与应力呈现负性相关,其中特征粗糙度表现良好,全部呈现负性相关,且其中的 F₃、F₄ 呈现高度相关,F₁、F₂ 变成显著相关.对于方差,试件 F₂ 表现为正性的显著相关,试件 F₃ 和 F₄ 为负性的高度相关和 F₁ 是负性显著相关.最后在塑性-峰后阶段,特征粗糙度与应力相关程度比较理想,F₁、F₂、F₃ 表现为显著相关,只有 F₄ 表现为低度相关.而对于方差,试件 F₂、F₃ 的方差为显著相关,F₄ 为负性低度相关,F₁ 却为基本不相关.

3 讨 论

粉砂岩孔隙率比较大,在加压过程中会伴随有微裂隙产生,进而发生相互错动摩擦产生热量,同时因

岩石内部结构破坏,会发生张破裂吸热.摩擦热效应和张破裂吸热2种状态一直伴随着岩石加载的整个过程,只是在某个阶段某一种状态表现的更为突出.摩擦热效应占优,则表现为放热,否则即为吸热.

特征粗糙度是描述岩石表面红外温度场的光滑程度,方差是描述岩石表面红外温度偏离平均值的程度,而 *AIRT* 描述的是岩石表面整体的平均温度水平.对于 *AIRT*,在加载的整个过程中基本保持一直增加,表明岩石整体温度水平逐渐变大.在粉砂岩压密阶段(*OA*段),特征粗糙度和方差都迅速变大,说明虽然粉砂岩表面温度整体的温度开始变大,但变化的不均匀、参差不齐,部分点温度急剧增大,在这个阶段摩擦热效应占优,表现出放热,且在这个阶段中据表1可以看出方差在这个阶段与应力相关性更高.随着继续加压进入弹性变形阶段(*AB*段),特征粗糙度值和方差都开始转变为下降趋势,说明温度场开始变光滑,各温度偏离平均值程度在缩小,温度差异变小且温度分布开始变得均匀,异常变大点逐渐减少,粉砂岩整体温度上升且分布也开始变得均匀,表现为放热.由表2也可以看出在这个阶段特征粗糙度和方差与应力的相关程度相当,二者对这个阶段的刻画效果也是相当.最后在塑性-峰后阶段,*BC*阶段特征粗糙度波动开始变多且幅度明显变大.而图3中与之对应的阶段方差的波动数量和幅度也明显增加,该现象解释为粉砂岩微裂隙的快速增加以及张破裂的产生,在这个阶段中张破裂和摩擦热效应相互交替占优.随着继续加压,岩石内部张破裂加剧,期间整体表现为吸热,特征粗糙度和方差却有上升也有下降,说明在破坏阶段(*CD*段)粉砂岩局部温度变化复杂.在*D*点产生变异,特征粗糙度值发生异常大的跳动,图2中的试件 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 特征粗糙度突然变大,这也说明了可以通过特征粗糙度的突变来预测、监测粉砂岩破坏,对以后岩石破坏研究提供一定的指导意义.

4 结 论

基于特征粗糙度、方差与应力随时间变化曲线以及 *AIRT* 随时间变化情况对粉砂岩在加载各阶段中表面辐射温度进行研究,通过比较分析得出结论如下:

1)整体来看,特征粗糙度和方差能较好刻画粉砂岩各个阶段特有的性质,与所加荷载呈现同步性.其中特征粗糙度的跳动频率及幅度较方差和 *AIRT* 都

大,且特征粗糙度对岩石加载过程的红外温度场变化更为敏感.

2)压密阶段,特征粗糙度和方差是快速上升,方差与应力相关系数较特征粗糙度更高,说明此阶段用方差来刻画更好.弹性变形阶段,特征粗糙度和方差开始变小且它们与应力相关系数相当,说明用任一个来刻画都行.塑性-峰后阶段,特征粗糙度相关系数较方差更稳定,用特征粗糙度刻画较好.

3)塑性-峰后阶段,特征粗糙度开始有大幅度的跳动,且在应力峰值点特征粗糙度开始转向变大,此为红外温变前兆信息.

4)特征粗糙度表达岩石表面温度场光滑程度,而方差描述了各点温度偏离平均值的程度.研究中将2种方法结合起来效果可能更理想.

参考文献:

- [1] 谢和平,高峰.岩石类材料损伤演化的分形特征[J].岩石力学与工程学报,1991,14(1):74-82.
- [2] 谢和平.分形几何及其在岩土力学中的应用[J].岩土工程学报,1992,10(1):14-24.
- [3] 彭瑞东,杨彦从,鞠杨,等.基于灰度CT图像的岩石孔隙分形维数计算[J].科学通报,2011,56(26):2256-2266.
- [4] 邹飞,李海波,周青春,等.基于数字图像灰度相关性的类岩石材料损伤分形特征研究[J].岩土力学,2012,33(3):731-738.
- [5] 刘善军,吴立新,张艳博.岩石破裂前红外热像的时空演化特征[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(7):1034-1038.
- [6] 刘善军,吴立新,张艳博,等.潮湿岩石受力过程红外辐射的变化特征[J].东北大学学报(自然科学版),2010,31(2):265-268.
- [7] 梁鹏,张艳博,田宝柱,等.岩石破裂过程声发射和红外辐射特性及相关性实验研究[J].矿业研究与开发,2015,35(3):57-60.
- [8] 高祥,吴贤振,尹丽冰,等.基于灰色关联度的砂岩加载过程中 *AIRT* 演化特征研究[J].有色金属科学与工程,2015,6(2):67-71.
- [9] 刘善军,吴立新,吴焕萍,等.多暗色矿物类岩石单轴加载过程中红外辐射定量研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(11):1585-1589.
- [10] 刘善军,吴立新,王川婴,等.遥感-岩石力学(VIII)——论岩石破裂的热红外前兆[J].岩石力学与工程学报,2004,23(10):1621-1627.
- [11] 尹贤刚,李庶林,唐海燕,等.岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):3383-3390.
- [12] 梁正召,唐春安,唐世斌,等.岩石损伤破坏过程中分形与逾渗演化特征[J].岩土工程学报,2007,29(9):1386-1391.
- [13] 宫伟力,赵海燕,安里千,等.软岩巷道变形破坏红外温度场的分形特征[J].矿业研究与开发,2008,28(6):27-30.
- [14] 刘善军,魏嘉磊,黄建伟,等.岩石加载过程中红外辐射温度场演化的定量分析方法[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):2968-2976.
- [15] 周宏伟,谢和平,KWASNIEWSKIMA.粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J].摩擦学学报,2000,20(6):455-459.
- [16] 葛世荣.粗糙表面的分形特征与分形表达研究[J].摩擦学学报,1997,17(1):74-81.