

# 岩石变形破裂红外与微波辐射变化特征对比研究

徐忠印, 刘善军, 吴立新

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 利用实验的方法对岩石单轴压缩过程中红外辐射、微波辐射、应变进行了联合测试. 实验结果表明, 红外与微波辐射的变化特征随应力的阶段性发展, 二者呈现不同的阶段性变化规律与破裂前兆特征. 红外辐射呈现初始阶段变化很小、弹性阶段缓慢增加、塑性阶段快速增加以及临破裂前回落的变化特征; 而微波辐射呈现初始阶段微降、弹性阶段上升、塑性阶段下降以及临破裂前上升的变化特征. 红外与微波在岩石破裂前均出现早期和晚期前兆, 但前兆规律不同, 异常变化形式正好相反. 两种手段结合可以更好地监测岩石的应力与灾变现象.

**关 键 词:** 遥感-岩石力学; 微波辐射; 红外辐射; 应力; 灾变

中图分类号: P 315.8

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)12-1738-05

## Comparative Study on the Variation Features of Infrared and Microwave Radiation in Deformation and Fracture Process of Rock

XU Zhong-yin, LIU Shan-jun, WU Li-xin

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Zhong-yin, E-mail: xuzhongyin@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Multivariate information including infrared radiation, microwave radiation and strain were measured in uniaxial compressive experiments of rock. The result showed that infrared radiation and microwave radiation existed different staged variation features at various loading stages. The infrared radiation showed fluctuation in the initial loading stage, steady increase in elastic stage, rapid increase in the plastic stage and decrease in the fracture stage. The microwave radiation showed small decrease in the initial loading stage, steady increase in the elastic stage, decrease in the plastic stage and increase in the fracture stage. Two kinds of radiation information appeared different abnormal precursors of rock fracture, and the variation forms of precursors were just opposite. The combination of two detection technologies is favorable for detection of stress and disaster of rock.

**Key words:** remote sensing rock mechanics; microwave radiation; infrared radiation; stress; disaster

20 世纪中后期以来,为探索地震中的发光现象,学者们进行了岩石变形和破裂过程电磁辐射现象的研究<sup>[1-4]</sup>,发现了 20 Hz ~ 7 MHz 的电磁辐射以及光辐射,并提出了压电效应、逃逸电子轰击效应等多种机理假说. 20 世纪 90 年代初,一些学者为揭示地震前的热红外异常现象,开展了岩石

加载过程红外辐射变化规律的实验研究,发现岩石在不同的应力阶段对应不同的红外辐射变化特征,破裂前存在红外辐射异常前兆现象<sup>[5]</sup>. 又提出了建立“遥感-岩石力学”的构想,即利用遥感手段来研究和解决岩石力学领域问题:在大范围,可通过卫星、飞机搭载的遥感仪器对地面进行遥

收稿日期: 2014-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41440032, 41074127).

作者简介: 徐忠印(1967-),男,黑龙江双城人,东北大学讲师,博士;刘善军(1965-),男,河北涿鹿人,东北大学教授,博士生导师;吴立新(1966-),男,江西宜春人,东北大学教授,博士生导师.

感观测,以探测地壳应力场活动和预报地震;在小范围,可在地面或地下对矿山岩体进行遥感观测来测定岩体的应力状态,评估岩体的稳定性和预测岩爆的发生<sup>[5-6]</sup>。

2000 年以来,吴立新等研究发现,岩石在破裂前存在平均红外辐射温度(AIRT)与热像类型的异常前兆<sup>[7-8]</sup>。对岩石在变形及破裂过程中的热力耦合效应提出了热弹效应和摩擦热效应两种机理,分别用于解释岩石在弹性阶段和塑性阶段的热力耦合效应<sup>[9]</sup>。Freund 等对花岗岩及斜长岩的加压红外观测实验中发现,远离加载端的无压区表面红外辐射强度也发生了变化,认为岩石变形或微破裂时产生孔穴正电荷(简称“P-Hole”),这些孔穴正电荷随着应力的作用传递到岩石表面,重新结合释放能量,产生电磁辐射<sup>[10]</sup>。上述研究为岩石应力与灾变的热红外遥感监测奠定了实验与理论基础。然而,由于热红外遥感易受天气的影响,当天空有云雾时地面热辐射不能穿过云而被卫星探测器观测到。而微波能够穿透云雾,同时还能透过一定深度的土壤和岩石,可以进行全天候观测,在遥感监测上有独特的优势。为此,一些学者开展了岩石加载过程微波辐射变化实验研究,发现岩石的微波辐射能量随岩石应力状态变化而显著变化,大多岩石在破裂前出现微波辐射急剧增加或急剧下降的异常前兆<sup>[11]</sup>。2006 年,Maki 等<sup>[12]</sup>研究发现岩石(石英岩、辉长岩、花岗岩和玄武岩)单轴压缩破裂时产生了 300 MHz,2 GHz,22 GHz 的微波信号脉冲。并应用 Aqua 卫星 AMSR-E 传感器的地震探测系统对汶川地震和智利地震的微波遥感信息进行分析,发现汶川地震后 1 天和智利地震前后在震中附近出现微波辐射异常现象<sup>[13-14]</sup>。

以往的遥感-岩石力学研究多是对岩石加载过程中红外辐射或微波辐射变化特征进行单方面研究,缺乏红外与微波联合观测实验研究,对于岩石在加载过程中的红外与微波辐射的变化特征缺乏对比性分析。由于岩石变形破裂过程引发多种物理量(应力、温度、形变、声发射(AE)、电磁辐射、红外辐射)的变化,这些物理量并非孤立,而是相互关联的。通过多种信息的关联与融合,能够解决单一信息源无法识别或难以准确识别岩石灾变前兆的问题。基于此,本文利用微波辐射计、红外热像仪并辅助应变测试仪等对岩石加载过程红外与微波辐射进行了联合观测实验研究,试图揭示岩石变形破裂过程红外与微波辐射之间的对应关系,为基于红外与微波遥感手段进行岩石应力

与灾变监测分析提供实验基础。

## 1 实验设计

### 1.1 实验设备

①红外热像仪:德国 ImageIR3350 红外热像仪,其探测波段为 3.7 ~ 5  $\mu\text{m}$ ,热灵敏度优于 0.025  $^{\circ}\text{C}$ ,碲化铟(InSb)焦平面制冷型探测器,图像分辨率 320 × 240 像素,成像速率最高可达 170 Hz/s,测温范围 -40 ~ 700  $^{\circ}\text{C}$ 。

②微波辐射计:频率为 37.5 GHz 的微波辐射计。其温度分辨率为 0.01  $^{\circ}\text{C}$ ,定标精度 0.5 ~ 1.5  $^{\circ}\text{C}$ 。

③应变仪:用于测定岩石表面的纵向与横向应变,采样率为 1 次/3 s。

④岩石加载试验机:YGA-3000 液压伺服单轴加载试验机,最大载荷为 3 MN。

### 1.2 实验样品

使用花岗岩作为岩石试样,其矿物成分主要由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成,粒径在 1 ~ 3 mm。将其加工成直径为 5 cm,高为 10 cm 的圆柱型标准试样,两端打磨,不平行度小于 0.05 mm。

### 1.3 实验方法

实验时将红外热像仪放置在岩样的正前方 2 m 的位置,用于探测岩石加载过程热红外辐射的变化特征;将微波辐射计放置在岩样右侧距其 3 cm 的位置,用于接收岩石表面的微波信号;在岩石试样的中部粘贴 T 字型电阻应变片,用于测定岩石表面的纵向与横向应变,采样率为 1 次/3 s。实验采用等位移速率加载方式,其加载速率为 0.3 mm/min。实验前将各种设备的时钟调整为一,并同时开始和结束实验数据采集。实验的试样及部分测试探头安置如图 1 所示。

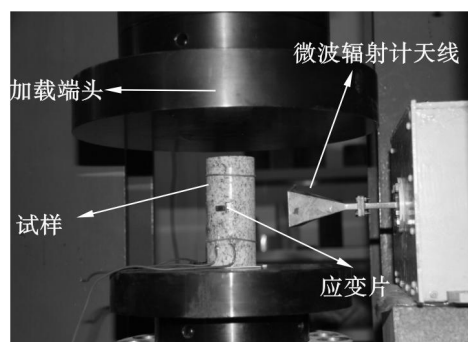


图 1 岩石加载过程微波实验布置  
Fig. 1 Microwave experiment site for rock loaded process

实验中为减少环境辐射的干扰,要关闭门窗,拉上窗帘,并在压头与试样间夹衬聚四氟乙烯垫片,用于减少压头对试样的传热.加载前先进行一段时间的观测,待各种设备稳定工作后开始实验.

## 2 实验结果

### 2.1 岩石的应力、应变及微波辐射变化特征分析

图 2 显示了试样加载过程中载荷、纵向应变、横向应变、纵向应变率、横向应变率的监测结果.其中纵向应变率和横向应变率是指岩石的纵向应变和横向应变的变化速率.纵向应变以纵向压缩

为正,而横向应变以横向两侧扩张为正.岩石加载过程可以划分为 4 个特征阶段:

1) 初始加载阶段(阶段 I, 0 ~ 50 s). 载荷增加较慢,纵向应变和纵向应变率相对横向应变和横向应变率增加较快,无声发射信号产生,表明试样在压力的作用下内部孔隙被压密,长度缩短、体积收缩.这一阶段也称为孔隙压密阶段.

2) 弹性变形阶段(阶段 II, 50 ~ 177 s). 载荷与两个方向的应变成比例增加,两个方向的应变率也匀速增加,有少量的声发射信号产生,表明岩石在这一阶段处于弹性变形,内部有少量微破裂产生.

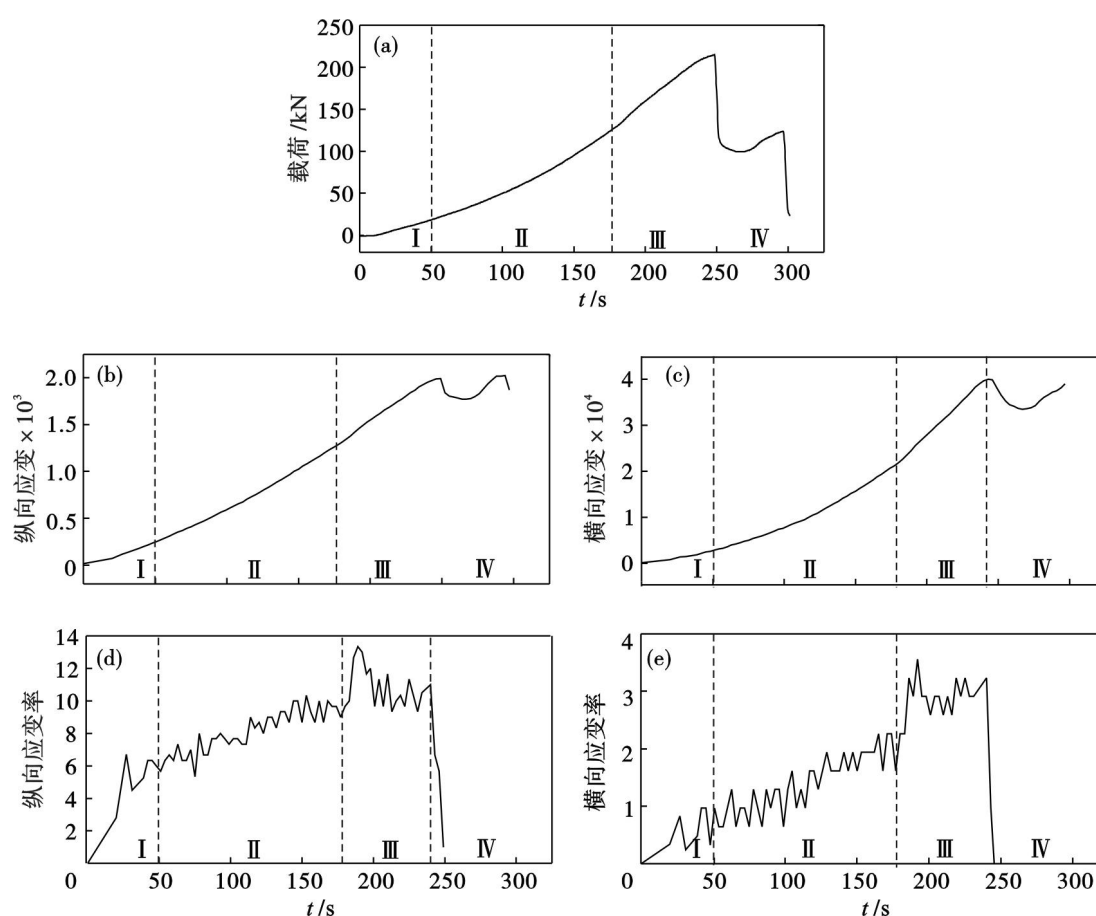


图 2 岩石加载过程中载荷、应变变化特征

Fig. 2 Detection result of several instruments in the loading process of the rock sample

(a)—载荷; (b)—纵向应变; (c)—横向应变; (d)—纵向应变率; (e)—横向应变率.

3) 塑性变形阶段(阶段 III, 177 ~ 240 s). 177 s 时两个方向的应变率突然上升,随即出现较强烈的声发射信号,表明岩石内部产生了较大微破裂,导致横向扩容膨胀.

4) 破裂与失稳阶段(阶段 IV, 240 s ~ 破坏). 横向应变在 240 s 时增加减缓(见图 3), 243 ~ 246 s 停止增加开始减小,但变化很小. 246 s 后横向应变急剧下降,表明 246 s 时试样由横向扩张

快速转变为收缩,与此同时,纵向应变在 246 s 时由上升转变为静止不动,维持 3 s. 表明试样在此阶段停止纵向缩短. 249 s 时载荷达到最大,随即出现大幅度应力降,纵向应变迅速下降,表明试样在 249 s 时发生破裂.

图 3 是岩石加载过程中微波辐射计获得的亮度温度-时间曲线. 该曲线存在以下特征:

1) 在加载阶段 I, 亮度温度无趋势变化,只出



现幅度很小的下降性变化。

2) 在加载阶段 II, 亮度温度随载荷的增加首先呈现稳定性增加, 增加的幅度达到 0.6 K 左右。大约在 123 s 时, 停止增加维持恒定, 直到该阶段结束。

3) 在加载阶段 III, 亮度温度开始下降, 大约在 220 s 达到初始加载的辐射水平, 保持稳定, 直到这一阶段结束。亮度温度下降幅度约为 0.6 K。

4) 在加载阶段 IV, 亮度温度由稳定又转为上升, 中间随载荷变化发生 1 次波动, 但总体趋势是上升。

对照图 2 和图 3, 可以发现:

1) 岩石在弹性阶段 II, 微波亮度温度随载荷的增加而增加, 二者间呈正相关关系。

2) 当岩石进入阶段 III 时, 横向应变加快, 使得岩石体积增大, 表明岩石内部出现微破裂, 此时微波亮度温度开始下降。转折点 EP (见图 3) 是岩石破裂重要的早期前兆点。

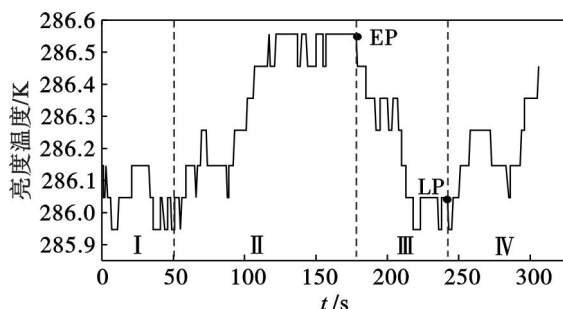


图 3 微波辐射的亮度温度随时间的变化曲线

Fig. 3 Brightness temperature-time curve of microwave emission

3) 当岩石变形由阶段 III 进入阶段 IV 时, 载荷上升明显变缓, 同时应变增加也减缓, 表明试样进入力学平静期。随着载荷的进一步增大, 内部微破裂大量出现, 平静期被打破, 岩石趋于失稳。此时微波辐射停止减少, 转而又开始增加。转折拐点 LP 为岩石破裂晚期重要的前兆点。

## 2.2 红外与微波变化特征对比

以往的研究表明, 岩石表面的平均红外辐射温度 (AIRT) 是表征岩石加载过程中热红外辐射总能量变化的有效指标<sup>[8]</sup>。图 4 显示了实验中热成像仪 ImageIR3350 对岩石表面平均红外辐射温度探测结果, 纵坐标表示加载过程某时刻相对于初始加载时刻 AIRT 的变化情况。图中可见, 在加载阶段 I, AIRT 变化不大, 只有小的波动。阶段 II, AIRT 缓慢增加。阶段 III, AIRT 快速增加。C 点是 AIRT 变化的转折点, 成为岩石破裂早期的 AIRT 异常前兆点。当岩石加载进入阶段 IV, AIRT 停

止增加而转为下降, D 点是这一变化的转折点。当岩石达到峰值载荷时, 随即发生破裂, AIRT 随之发生陡降。之后随着载荷的起伏 AIRT 发生一致性变化。转折点 D 成为岩石破坏 AIRT 晚期的异常前兆点。这意味着当 AIRT 由快速增加达到峰值而转为下降时, 岩石即将发生破裂。此时, D 点对于岩石破坏的预警起重要的作用。

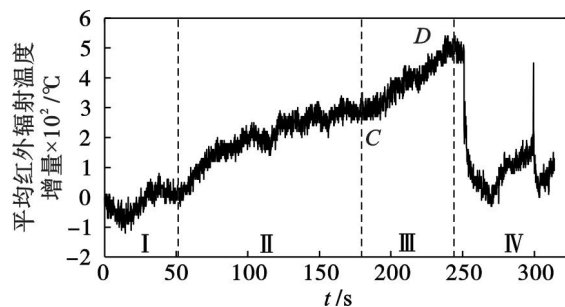


图 4 AIRT 增量随时间的变化曲线

Fig. 4 AIRT increment-time curve

将试样的红外与微波探测结果 (图 3, 4) 对比可以发现, 岩石在加载过程的热红外辐射与微波辐射的变化特征不同:

1) 红外辐射与应力关系密切。加载过程中红外辐射 (AIRT) 与载荷的变化步调几乎一致, 表明二者的线性相关密切。这表明岩石加载过程中的红外辐射实际上反映了应力的变化, 二者之间呈现了很好的对应关系, 利用热红外手段可以监测岩石的应力变化。

2) 微波辐射的亮度温度与应变关系密切。图 2d, 2e 和图 3 对比显示, 在 II 阶段后期当应变率出现突升前, 微波亮温即停止上升。而进入第 III 阶段, 当应变率出现突升时微波由恒定转为下降, 岩石发生横向扩容。当进入第 IV 阶段宏观破裂即将产生时, 应变率急剧下降, 此时微波亮度温度由下降转为上升。因此, 微波辐射的亮度温度变化与应变关系密切。

3) 红外与微波辐射的变化特征不同。对比红外与微波的探测结果可以发现, 两种辐射信息都随着应力的阶段性变化而变化, 但二者的变化规律不同。在弹性阶段, 二者的变化趋势基本一致, 即随应力的增加而增加; 在塑性阶段, 微波辐射开始下降, 而红外辐射表现为快速增加; 在破裂阶段, 微波辐射由下降转为上升, 而红外辐射由上升转为下降。

4) 红外与微波辐射的破裂前兆特征不同。红外与微波辐射都在岩石破裂前出现了早期和晚期前兆, 但前兆特征不同。红外辐射的早期前兆特征是“加速上升”, 而微波辐射的早期前兆是“升转

降”;红外辐射的晚期前兆特征是“升转降”,而微波辐射的晚期前兆特征是“降转升”.由此看出,红外与微波辐射的早、晚期前兆特征正好相反,存在“剪刀差”效应.

### 3 结 论

1)随着岩石应力、应变的阶段性发展,微波、红外辐射出现相应的阶段性变化特征,但二者的变化规律不同.红外辐射呈现初始阶段变化很小、弹性阶段缓慢增加、塑性阶段快速增加以及临破裂前回落的变化特征;而微波辐射呈现初始阶段微降、弹性阶段上升、塑性阶段下降以及临破裂前上升的变化特征.二者在岩石破裂前均出现了异常变化的早期和晚期前兆,但前兆特征相反.

2)实验结果显示,红外辐射与载荷关系密切,而微波辐射与应变关系密切.利用热红外手段可以监测岩石的应力变化,而利用微波辐射可以探测岩石内部的微破裂的产生和发展过程.两种手段结合可以更好地捕捉岩石破裂异常前兆.

**致谢** 本文在实验设计、实验结果的理论分析方面得到了中国科学院东北地理与农业生态研究所赵凯研究员的帮助,在此表示感谢.

#### 参考文献:

- [1] Nitsan U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rock [J]. *Geophysical Research Letters*, 1977, 4(8): 333 – 336.
- [2] Yamada I, Masuda K, Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture [J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 1989, 57(1/2): 157 – 168.
- [3] Brady B T, Rowell G A. Laboratory investigate for the electrodynamics of rock fracture [J]. *Nature*, 1986, 321(29): 488 – 492.
- [4] Cress G O, Brady B T, Rowell G A. Source of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory [J]. *Geophysical Research Letters*, 1987, 14(4): 331 – 334.
- [5] 耿乃光,崔承禹,邓明德. 岩石破裂实验中的遥感观测与遥感岩石力学的开端[J]. *地震学报*, 1992, 14(sup): 645 –

652.

- (Geng Nai-guang, Cui Cheng-yu, Deng Ming-de. Remote sensing detection in rock fracture experiment and the beginning of remote sensing rock mechanics [J]. *Acta Seismology Sinica*, 1992, 14(sup): 645 – 652.)
- [6] Wu L X, Cui C Y, Geng N G, et al. Remote sensing rock mechanics (RSRM) and associated experimental studies [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2000, 37(6): 879 – 888.
- [7] Wu L X, Liu S J, Wu Y H, et al. Precursors for rock fracturing and failure—Part I: IRR image abnormalities [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2006, 43(3): 473 – 482.
- [8] Wu L X, Liu S J, Wu Y H, et al. Precursors for rock fracturing and failure—Part II: IRR T-curve abnormalities [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2006, 43(3): 483 – 493.
- [9] 刘善军,吴立新,吴育华,等. 受载岩石红外辐射的影响因素及机理研究[J]. *矿山测量*, 2003(3): 67 – 68.  
(Liu Shan-jun, Wu Li-xin, Wu Yu-hua, et al. Analysis of affecting factors and mechanics of infrared radiation coming from loaded rocks[J]. *Mine Surveying*, 2003(3): 67 – 68.)
- [10] Freund F T. Rocks that crackle and sparkle and glow—strange pre-earthquake phenomena [J]. *Journal of Scientific Exploration*, 2003, 17: 37 – 71.
- [11] 邓明德,樊正芳,崔承禹,等. 无源微波遥感用于地震预报的实验研究[J]. *红外与毫米波学报*, 1995, 14(6): 401 – 406.  
(Deng Ming-de, Fan Zheng-fang, Cui Cheng-yu, et al. The experimental study for earthquake prediction by passive microwave remote sensing [J]. *Journal of Infrared Millim Waves*, 1995, 14(6): 401 – 406.)
- [12] Maki K, Takano T, Souma E. An experimental study of microwave emissions from compression failure of rocks [J]. *Journal of the Seismological Society of Japan, Second Series*, 2006, 58(4): 375 – 384.
- [13] Maeda T, Takano T. Detection of microwave signals associated with rock failures in an earthquake from satellite-borne microwave radiometer data [C]// 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGASS). Cape Town, 2009: III – 61 – III – 64.
- [14] Maeda T, Takano T. Relation between rock failure microwave signals detected by AMSR-E and a distribution of ruptures generated by seismic activity [C]// 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGASS). Vancouver, 2011: 4288 – 4291.