

锚杆与围岩加载过程红外特征研究

籍远明

青岛科技大学数理学院, 山东 青岛 266042

摘要 应用红外热像技术, 对锚杆与围岩加载变化破坏过程中的红外辐射现象进行了实验研究, 结果表明: 应力峰值前, 随着荷载的增加, 红外辐射温度呈现整体、均匀性升温变化, 应力峰值后, 在锚杆周围形成一个由多条不同等温线组成的区域, 其形状是以锚杆为中心的近似圆形区域, 由内向外, 温度逐步降低; 锚固体破坏时, 存在红外辐射温度-时间曲线型和红外热像型 2 种形式的红外前兆特征, 分别反映红外前兆的时间信息和空间信息; 红外辐射温度-时间曲线的破裂前兆为降温型, 而红外热像特征包括高温条带和低温条带两种类型。

关键词 红外热像; 红外前兆; 锚杆; 围岩

中图分类号: T O434 3 文献标识码: A DOI: 10 3964/j issn 1000 0593(2010) 03 0659-04

引言

20 世纪 80 年代以来, 国内外许多学者将红外遥感用于岩石力学方面的研究, Luong 利用红外热成像技术观测岩石损伤过程和破坏机理, 判断内部损伤出现位置, 进行疲劳强度评价^[1-3]; 耿乃光^[4]、邓明德等^[5]进行了热红外震兆成因的模拟试验^[4, 5]和红外遥感用于地震预测; 吴立新等^[6, 7]利用红外热成像技术对多种加载方式下岩石的红外辐射效应进行了实验研究, 发现煤岩单轴压缩屈服过程中有 3 类辐射热像特征和 3 类辐射温度异常特征。

锚杆作为一种行之有效、经济优越的巷道支护技术, 被广泛应用于煤矿、冶金、水电、隧道等工程领域, 然而由于锚杆支护技术是一种隐蔽性工程, 锚杆的施工质量和锚杆的实际工作状态目前尚无有效的监测、检测方法和设备, 不能及时发现巷道冒顶隐患, 导致锚杆支护巷道事故经常发生,

造成人员财产重大损失。国内外将红外遥感技术应用到锚杆支护结构还甚少, 研究锚杆支护围岩变形破坏过程中的红外辐射变化规律, 对于揭示锚杆支护作用机理、矿山煤岩灾害监测、预警预报等具有重要意义。作者曾应用红外探测法研究过玻璃钢锚杆受拉和不同参数锚固体加载过程应力与温度关系^[8, 9], 本文应用红外热像技术和相似模拟实验相结合的方法, 获取相应红外图像和红外辐射温度-时间曲线, 以研究锚杆与围岩加载变形破坏演化过程中的红外辐射特征。

1 实验方法

根据相似理论, 本实验中围岩相似材料选择由沙子、水泥和石膏组成, 所使用的锚杆材料为中国矿业大学研制的新型玻璃钢锚杆, 其力学参数见表 1 和表 2。将上述相似材料按照确定的配比, 进行准确称量, 搅拌均匀, 加水混合, 装入模具内, 砸实, 8 h 后拆模, 试块放在空气中, 自然干燥。

Table 1 Similar material matching and mechanics parameters

Material	Match	Elastic modulus/ MPa	Compression strength/ MPa	Poisson ratio
Rock	Sand: Cement: Gypsum: Water 13: 8: 1: 1	301.7	12.1	0.2

Table 2 Bolt mechanics parameters

Material	Length/mm	Elastic modulus/ MPa	Failing load/ kN	Bolt stress/ MPa
Bolt	30	40 000	153	607

收稿日期: 2009-04-22, 修订日期: 2009-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(50374069), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2002CB412701)资助

作者简介: 籍远明, 1964 年生, 青岛科技大学数理学院副教授 e-mail: jym_cumt@163.com

制作的试块尺寸为: 70 mm × 70 mm × 70 mm, 30 d 后将试块打孔, 同时灌入 914 胶, 插入锚杆。

实验中加载设备为目前较为先进的日本岛津 EHGU500kN 全数字液压伺服机, 其最大静态载荷为 750 kN, 载荷精度在显示值的 0.5% 以内; 红外探测装置使用 TVS-8100M KII 型红外热像仪, 其温度灵敏度为 0.025 °C, 图象分辨率 320 × 240, 图象采集速度可达 60 帧 · s⁻¹, 测量波段为 3.6~4.6 μm。

将试块在实验前 24 h 放入实验室, 使试块、压力机等自身温度场与周围实验的环境温度一致, 试块放在压力机上, 同时在试块和加载装置之间放入青壳纸, 以减小试块端部与压力机接触位置的摩擦效应, 加载方向与锚杆轴向垂直。将红外热像仪放置在正对试块 1 m 左右的距离上, 观察记录在单轴加载过程中红外辐射温度和热像的变化情况, 加载方式为匀速加载, 加载速率为 0.01 mm · s⁻¹, 为了对红外热像和应力应变曲线进行对比, 两者的采样速率设计为相等, 都为 1 次 · s⁻¹, 且同时开始记录。为减小周围环境对试块红外辐射的影响, 把试块放置在一个封闭的纸箱内, 纸箱表面涂成黑色, 只在前方正对热像仪镜头处开一正方形孔, 除实验室

关上门窗, 拉上窗帘外, 还在试块箱四周挂上幕布。

2 实验结果与分析

如图 1 所示, 分别为试块 a2 在加载过程中的红外热像等温线图, 其中试块 a2 在中心位置布置了单根锚杆(长度 20 mm, 直径 3 mm)。从图中可以看出, 加载开始至 124 s(应力峰值时), 试块表面温度场随着荷载的增加呈现整体均匀性升温变化, 过了应力峰值以后, 这种整体均匀升温变化被打破, 锚固体表面出现红外热像局部异化现象, 接下去在锚杆周围形成一个由多条等温线组成的区域, 其形状特征是以锚杆为中心的近似圆形区域, 随着围岩变形的增加, 锚杆周围原有的圆形等温线半径增大, 同时又有新的较高温度的近似圆形等温线出现, 好似水中的“涟漪”不断涌现。这些等温线图的特点是: 以锚杆为中心呈现近似圆形分布, 离锚杆中心越近, 其温度越高, 离锚杆中心越远, 其温度越低, 由内部向四周边缘温度逐步降低。进一步的研究表明, 锚杆周围红外热像图反应了其周围应力场的变化。

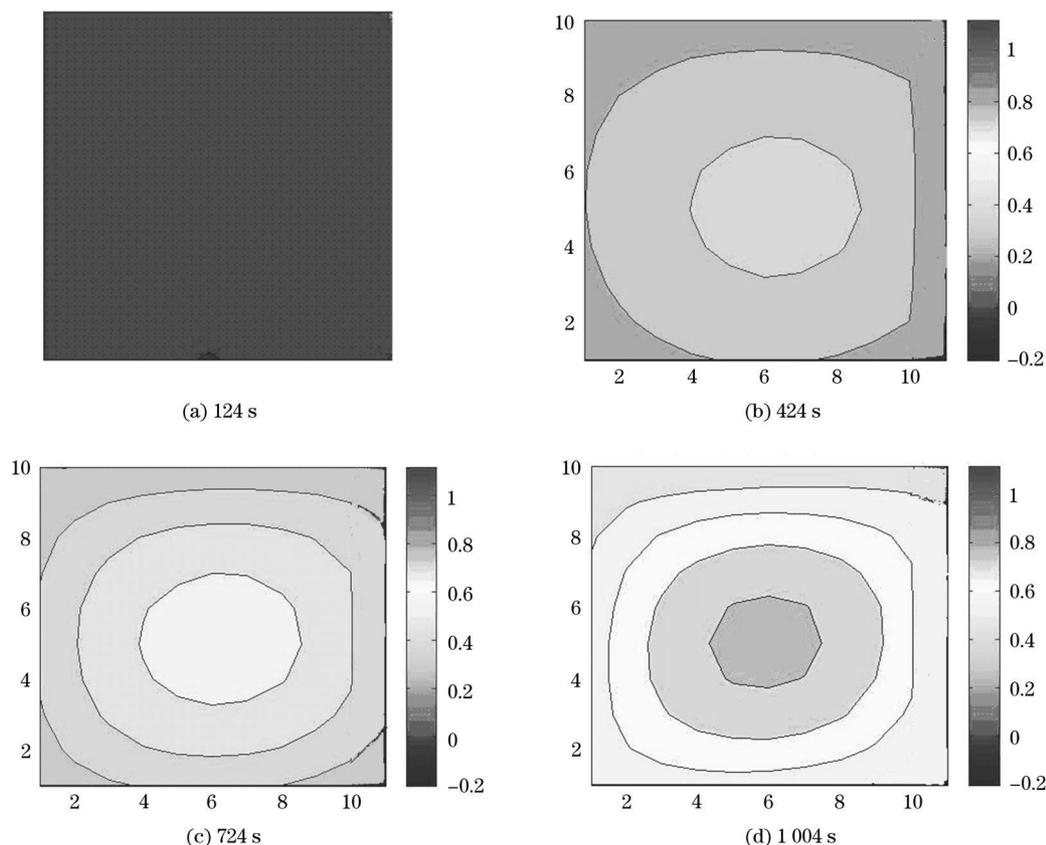


Fig 1 IR image isothermal lines of sample a2

利用红外探测技术研究锚杆与围岩相互作用的红外辐射规律, 其中一个重要内容就是如何能够有效地捕捉锚固体破裂前兆的红外特征, 这对于煤矿巷道灾害监测预警具有十分重要的意义。

从实验的结果来看, 锚固体破裂前兆有两种表现形式的红外特征, 一种表现在红外辐射温度-时间(IRT-time)变化曲线上; 另一种表现在红外热像辐射温度场的时空演变特征上。表现在 IRT-time 变化曲线上的锚固体破裂前兆红外特

征是，应力峰值前，红外辐射温度随着应力的增加缓慢均匀升高，在临近破裂时，曲线出现转折性变化，具体说来，红外特征表现为降温型前兆，即锚固体红外辐射温度由原来的升高转为降低，然后又上升，且上升的速度明显加快。如图 2 所示，锚固体 b5 的 IRT-time 曲线表现出降温型的破裂前兆，从图中可以看出，在加载后期，A 点由上升突然转为下降，至 B 点时达到谷底，然后又上升，且上升速度加快，直到锚固体破裂。

锚固体破裂前兆的红外热像特征是，在临近破裂时，红外热像的温度场发生变化，出现条带状的辐射温度异常，这些条带对应锚固体发生破裂的位置和形状，且不同温度场的条带对应不同性质的破裂，高温条带对应剪性破裂，低温条带对应张性破裂。如图 3 所示，锚固体左侧和右下侧分别出

现一条竖直向下和一条斜向下的高温条带，对应着锚固体发生破裂的位置。

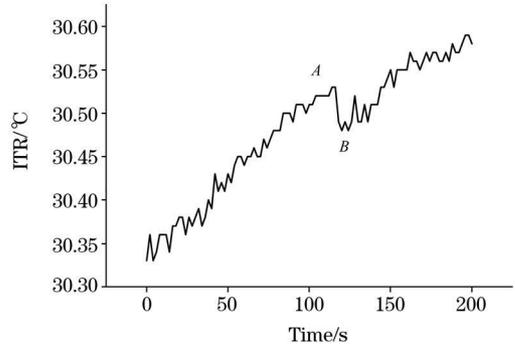


Fig 2 IRT time curve of bolted rock fracture precursor

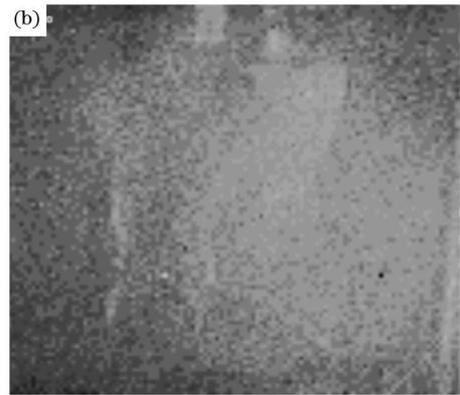
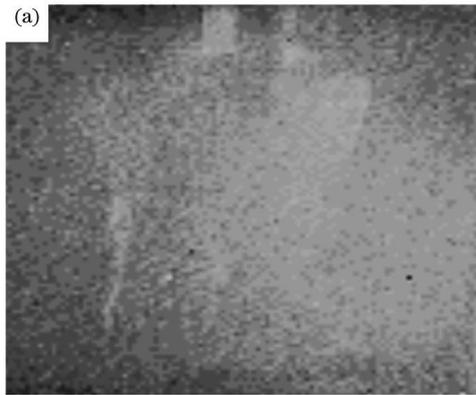


Fig 3 IR image of bolted rock fracture

如图 4 所示，锚固体左侧出现一条斜向下的低温条带，随着荷载的增加，条带加宽加长，最后破裂。分析表明，不同性质的条带实际上对应着锚固体不同性质的破裂，高温异

常条带预示剪性破裂，而低温异常条带预示张性破裂，这些在锚固体破坏时出现的红外热像异常现象，是锚固体破裂前兆的重要红外特征。

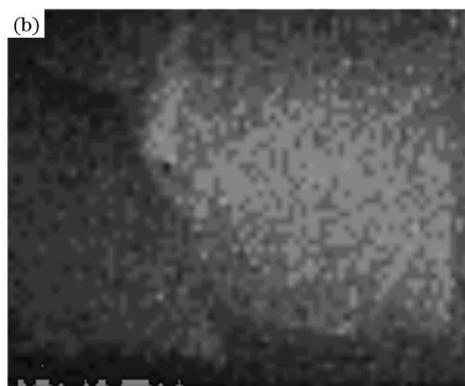


Fig 4 IR image of bolted rock fracture

综上所述，初步分析认为，锚固体加载过程中引起的热红外辐射异常变化是应力-应变致热的热红外辐射效应，在弹性阶段出现的整体均匀升温是热弹效应结果，在加载后期面临破裂前出现不同性质的条带状热红外异常则与热塑效应、摩擦热效应密切相关。当微破裂的性质为张性时，由于破裂面之间不发生摩擦，因而无摩擦热效应产生，此时由于破裂

体积发生膨胀而产生吸热效应，使得温度下降；当微破裂的性质为剪性时，由于破裂面发生错动和摩擦，因而有摩擦热效应产生，导致温度上升和红外高温辐射。实验中试块表面出现的高温或低温条带，实际上是剪性或张性微破裂的空间表现，而条带的迁移、发展则反应了微破裂迁移发展的时空过程。

3 结 论

应用红外热像技术对锚杆与围岩加载变化破坏过程的实验观测和研究, 可以认为: (1) 布置锚杆的试块在应力峰值前, 随着荷载的增加, 红外辐射温度呈现整体、均匀性升温变化, 荷载越大, 温度越高; 应力峰值后, 在锚杆周围形成一个由不同等温线组成的区域, 其形状是以锚杆为中心的近似圆形区域, 离锚杆中心越近, 其温度越高, 离锚杆中心越远, 其温度越低, 由内向外, 温度逐步降低。(2) 锚固体破坏时, 存在两种形式的红外前兆特征, 分别为红外辐射温度时

间曲线型和红外热像型, 前者反映红外前兆的时间信息, 后者则反映红外前兆的空间信息, 两者结合可以更为有效地确定锚固体破裂前兆的时空信息。(3) 表现在红外辐射温度-时间曲线的破裂前兆, 为降温型前兆, 即锚固体红外辐射温度由原来的升高转为降低, 然后又上升, 且上升的速度明显加快。锚固体破裂前兆的红外热像特征分为两种, 在加载后期, 红外热像的温度场发生变化, 出现条带状的辐射温度异常, 这些条带对应锚固体发生破裂的位置和形态, 不同温度场的条带对应不同性质的破裂, 高温条带对应剪性破裂, 低温条带对应张性破裂。

参 考 文 献

- [1] Luong M P. Infrared Thermography of Fracture of Concrete and Rock. Fracture of Concrete and Rock: SEM-RILEM International Conference, 1987.
- [2] Brady B T, Rowell G A. Nature, 1986, 321(29): 488.
- [3] Tronin A A. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(8): 1439.
- [4] GENG Na'guang, CUI Cheng yu, DENG Ming de(耿乃光, 崔承禹, 邓明德). Acta Seismologic Sinica(地震学报), 1992, 14(supp): 645.
- [5] DENG Ming-de, GENG Na'guang, CUI Cheng yu(邓明德, 耿乃光, 崔承禹). Earthquake Research in China(中国地震), 1997, 13(2): 179.
- [6] WU Li x in, WANG Jir zhuang(吴立新, 王金庄). Science in China, D(中国科学, D), 1998, 41(2): 158.
- [7] WU Li x in, CUI Cheng yu, GENG Na'guang. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(6): 879.
- [8] JI Yuan ming, AN Li qian(籍远明, 安里千). Mining and Metallurgical Engineering(矿冶工程), 2005, 25(3): 14.
- [9] JI Yuan ming, ZHU Yong-e(籍远明, 朱永娥). Laser and Infrared(激光与红外), 2007, 37(9): 860.

Study on Infrared Characteristics of Bolt and Rock in Condition of Loading

Ji Yuan ming

School of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China

Abstract The infrared radiation experiments on bolt and rock in the process of loading were carried out. It was found that the infrared radiation temperatures rose wholly and uniformly before stress peak with increase in loading. The bolted rock presented local dissimilation in the thermal image after stress peak. The multi-layer round infrared radiation isothermal lines were formed around bolt. The temperature was gradually reduced from inside to outside. There were two kinds of infrared omens for bolted rock fracturing, i. e., the infrared thermal image anomaly and curve of infrared radiation temperature and time anomaly, which reflected the spatial and temporal features of infrared omens respectively. The curve of infrared radiation temperature and time anomaly was temperature drop. The infrared thermal image omen was classified as high temperature strip and low-temperature strip.

Keywords Infrared thermal image; Infrared omen; Bolt; Rock

(Received Apr. 22, 2009; accepted Jul. 26, 2009)