

红外热象仪在岩石力学遥感基础 实验中的应用*

支毅乔 崔承禹 张晋开

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

邓明德

(国家地震局综合观测队 北京 100039)

耿乃光

(国家地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘要 在岩石力学性质实验中,使用AGA红外热象仪观测到随岩石应力的增加,岩石表面红外辐射温度升高;由岩石破裂处观测到岩石内部增温一般在 $2-4^{\circ}\text{C}$ 。也观测到随应力变化,岩石红外辐射温度场的变化过程,即随岩石应力增加,在弹性形变期其表面红外辐射温度呈上升趋势,在塑性形变期呈下降趋势,之后岩石破裂。这是很有重要意义的一种物理现象。热象仪的观测结果为红外遥感观测地应力变化提供了理论依据。

关键词 红外热象, 岩石力学, 辐射, 遥感

1 前言

地震灾害给人类造成的人员伤亡和财产损失是巨大的,世界上七级以上地震每年大约有十来次。为减少地震灾害的损失,人们一直在探索预报地震的新方法。以往的地震预报主要是观测地应力的变化,近十多年来国内外一些学者在实验室对岩石标本进行加载实验中,观测到了岩石破裂时出现的低频至无线电波的电磁辐射^[1,2],郭自强等^[3,4]观测到岩石破裂时存在光发射和电子逸出。

近几年来,在已有地震预报手段的基础上,提出了将红外遥感用于地震预报。这一新思路的生命力依赖于它有坚实的理论基础和实践的可能。原苏联В. И. Горный等(1988)提出了“地球热红外辐射——地震活动性的标志”^[5],文中讨论了在活化断裂带上,记录到高的热红外辐射,有大面积的热红外正异常,可能是由于地壳释放出高浓度的气体所致。大气气体成分的改变会产生不同的效应,其中之一是引起温室效应。强祖基

* 系地震科学联合基金资助项目:“在不同压力下测定研究岩石光谱特性的动态变化”。课题号 91006。

收稿日期:1995年10月10日;收到修改稿日期:1996年1月26日

等人(1990)利用气象卫星的热红外通道所做的地震预报的尝试,认为震前地壳的热红外辐射异常与地壳放气所引起的温室效应有关^[6];崔承禹(1993)^[7]、邓明德(1993)^[8]、耿乃光(1993)^[9]等论述了在岩石加载的震源物理实验中,观测到岩石应力—应变的变化引起岩石红外辐射能量的变化以及岩石破裂前兆信息,这些物理现象的发现为红外遥感用于地震预报和监测提供了研究依据。

本文详细叙述红外热象仪在岩石加压直至破裂过程中,远距离观测岩石样品表面的红外辐射温度场及其动态变化过程,以及热象仪在红外遥感用于地震预报基础实验中的作用。

2 热象仪测量原理

红外热象仪探测景物放射出的红外线辐射,经对红外光敏感元件的光电转换,将热红外辐射能转换成电信号,经阴极射线管(CRT)显示器显示,同时记录在AGA热象仪输出的非标准电视制式的录象带上。本项实验使用的显示器有黑白图象监视器和彩色温度密度分割仪,这二者显示的都是红外辐射的热图象。按照AGA-782热象仪使用手册给出的测量公式及有关测量参数如下:

T_o = 目标温度(°C); ϵ_o = 目标辐射系数; T_r = 参考源温度(°C); ϵ_r = 参考源辐射系数; T_a = 环境温度(室温); Δi_{or} = 所观测的目标和参考源温度的热图象之间的图象等温差($i_o - i_r$); T_o = 从校准曲线读取的目标温度 T_o 的绝对等温电平。 i_o = 目标热象等温值 = 等温标记值 × 热范围; i_r = 参考源热象等温值 = 等温标记值 × 热范围; R = 热范围(温度范围); L = 温度级设置(0—1000等温单位); τ = 大气校正系数(系统光谱响应的大气衰减校正)。

(1) 带有温度参考源的测量公式:

$$T_o = \frac{\Delta i_{or}}{\tau \epsilon_o} + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_o} \cdot T_r + \left(1 - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_o}\right) \cdot T_a \quad (1)$$

$$\epsilon_o = \frac{\Delta i_{or} + \tau \epsilon_r (T_r - T_a)}{\tau (T_o - T_a)} \quad (2)$$

这组公式,假设 τ 对目标和参考源均相等,既它们对扫描仪距离相等。

(2) 没有温度参考源的测量公式:

$$T_o = \frac{L + i_o}{\tau \epsilon_o} + \left(1 + \frac{1}{\epsilon_o}\right) T_a \quad (3)$$

$$\epsilon_o = \frac{L + i_o - \tau T_a}{\tau (T_o - T_a)} \quad (4)$$

我们第一次实验使用(3)和(4)式,第二次实验使用(1)至(4)式。

3 实验方法

本项实验主要是岩石单轴加载的红外辐射特性与岩石力学性质的观测。实验选取 26 种岩石 34 块样品, 用红外辐射温度计、红外热象仪、红外光谱辐射计以及有关岩石力学性质测量设备, 来记录岩石在各种压力下的形变, 声发射和红外辐射特性的变化^[10], 这里主要叙及红外热象仪的实验。

3.1 红外测试仪、岩石压力机和力学测量仪器

本次实验使用 AGA-782 红外热象仪, 探测器为碲化铟(InSb), 波长范围 3.6—5.5 μm , 灵敏度 0.1 $^{\circ}\text{C}$, 扫描速率 25 帧/s, 温度范围和温度级可调, 在实地测量时选择, 有黑白监视器和彩色温度密度分割监视器做实时监测。目标热图象连续记录在非标准电视制式的录象带上, 用于回放和后处理。

另外使用 2 台红外辐射温度计, 工作波长范围为 8—14 μm , 温度灵敏度 0.1 $^{\circ}\text{C}$, 视场角 2 $^{\circ}$ 。使用 1 台红外光谱辐射计, 在 2—15 μm 分成 388 个波段。由于扫描时间和研究目标特性的需要, 此次使用 8.0—15.1 μm , 分成 86 个波段, 视场角 0.5 $^{\circ}$ 。

岩石压力机为长江 500 型, 轴向最大载荷为 500t。使用应变仪、位移计、声发射仪做岩石力学性质测量, 数据记录在函数记录仪上。

3.2 测试方法

岩石样品 采自北京地区的岩样共 25 种, 尺寸均为 14cm \times 14cm \times 28cm, 样品上下受力面用磨床磨平。样品侧面为粗糙面。另有一济南辉长岩直径 50mm; 高 110mm 的标准圆柱体。

岩样受力 岩石样品受力面积为 196cm², 轴向载荷力 100t, 相当于岩样轴压 σ_1 为 50 MPa。圆柱体受力面积为 20cm²。岩样柱体长轴在压机上竖直安放, 既长轴为加压方向(图象的上、下为加压方向), 上、下端面各垫一层塑料薄膜, 以减少端部效应。实验装置如图 1。

加载和测量 热象仪距岩石压力机下样品 2m 以外, 以防止岩石加压会产生爆裂, 碎石击中仪器。各台仪器在 0MPa 时开始测量。为便于同另外非连续测量仪器对比, 每间隔 25MPa 进行记录, 热象仪在测前调准后, 不再调节, 以保持同一测量标准。

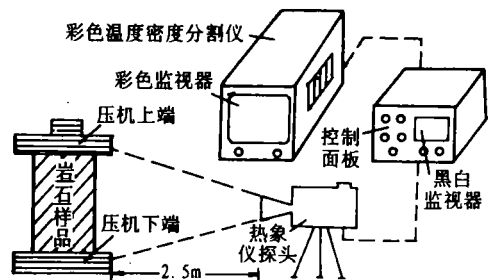


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Sketch map of experimental equipment

4 结果讨论与分析

4.1 岩石应力增加, 热象增温显示

岩石在压力机载荷作用下, 由于各种岩石的物理力学性质不同, 所能承受的最大载荷不等。加载过程中岩石样品在应力作用下, 产生弹性形变和塑性形变, 形变过程中积累的机械能必然要转换成其它形式的能量, 如引起岩石内部微破裂的声发射能和岩石内部微裂隙、颗粒之间的摩擦转换成热能。这种热能会引起岩石内部温度和表面温度增高, 这种转换热能量从岩石表面和微裂隙向外辐射。只要这种增温超过红外热象仪的温度灵敏度, 热象仪显示的图象变化, 就是岩石的增温显示。

岩石样品在加载过程中, 表面的红外辐射温度增高, 如岩样中粒花岗岩(No311)。岩样(图版 I 图 2 No311-A)上中部箭头所指处的白色斑块为岩石在加压中剥离掉的岩石薄片, 薄片厚度约 1—3mm, 说明温度升高; 继续加压, 又有灰白长条状为明显升温显示(图版 I 图 2 No311-B 中的 a 箭头所指处), 升温大于 2°C , 并出现裂纹, 这块岩样的右下角(b 箭头所指处)的灰白色调面积稍大的一片也为升温所致。这些实例说明了岩石在加压过程中, 由于岩样所受应力的增加, 致使岩石表面的红外热象呈增温显示, 也就是岩石表面红外辐射温度升高。

4.2 岩石应力增加, 内部升温较高

从岩石加压至岩石破裂, 热象仪观测到加压过程中岩样裂纹温升明显, 岩石剥离的小块或大块碎石, 或岩样剥离处亮的(白色)温升显示, 例如, 石英二长岩(No031)岩样的热图象(图版 I 图 2 No031-A)右侧中部箭头指处出现裂纹, 热象上呈现白色, 其温度升高大于 2°C 。前面谈到的 No311 岩样(No311-B)箭头 a 所指处的条带状灰白色调也是应力增加后出现的增温显示, 这种情况也表明岩石内部温度升高所致; 如不是温度升高, 单纯的裂纹在热象上应是冷色调的低温显示。正长斑岩(图版 I 图 2 No171)岩样的热象下部中间为岩石加压剥离后露出来的, 热图象上呈白色调, 其增温大于 2°C , 经过几秒钟以后热图象上的白色斑块逐渐消失, 说明这种白色调是由岩石内部温度比表面温度高得多所引起的, 当露出的新鲜面接触到空气时, 产生热交换后平衡, 使破裂岩石内部的高温在新的表面上冷却下来。实际上岩石内部温度比表面温度高。从岩石加压至破裂后或爆裂后, 掉下来的大块岩石碎块或岩石露出新鲜面的红外热象上明显看出。岩石内部温度较高, 一般高出 $2—4^{\circ}\text{C}$ 。如岩样 No131 细粒闪长岩(图版 I 图 2 No131-A)为岩石破裂或爆裂后的热图象, 断面上 a、b 温升大于 3°C , C 为掉下来的岩块温度(温度同上)。这些也都说明岩石内部温度较高, 爆后十几秒至几十秒钟这种白色调消失, 说明了在热交换情况下, 白色消失是增温现象。岩样 No331 为石英二长岩。岩样(图版 I 图 2 No331)在爆裂后的热图象, 上中部的白色 a 处(温度大于 3°C)为岩块剥离后的断面, b 为裂纹, 这说明岩石在应力达到 170MPa 之前或同时, 岩石内部温度已剧升(或谓跃升)。在 185MPa 时岩石炸裂。由以上这几张热图象不难看出, 岩样在应力作用下, 其内部温度比表面温度升高得很多(在 $2—4^{\circ}\text{C}$)。从裂纹向外有强的

红外辐射, 而且这种温度升高在岩石破裂或爆裂之前有剧升。这是震源物理实验时收集到的岩石破裂的重要前兆热信息。

这一实验结果与 1994 年 3 月进行的岩石内部温度测量结果是一致的^[10], 得到了验证。

4.3 岩样加载, 热象温度变化规律

从所做岩样热象观测的结果来看, 基本规律是随着岩石所受应力的增加, 热象呈增温趋势。但在 0—25MPa 之间, 有的岩石出现负增长, 既在加压后岩石出现低温, 例如碱性花岗岩 No251 岩样的热图象(图版 II 图 3), 其中, a 至 g 的 7 张热象仪彩色密度分割图象, 按色标由黑色, 蓝色, …… , 灰白到白色为低温至高温。图象中蓝色区域或蓝色斑点的减少, 是由于红外辐射温度增高, 其中 b 图象(应力为 25MPa 时)蓝色区域范围比 a 图象大, 说明在 b 图象的红外辐射温度比零压下的辐射温度有所降低, 它可能是由于岩石中气体溢出表面快速膨胀吸热所致。这一结果与用红外辐射温度计远距离测量结果和岩石内部温度测量结果是一致的, 待岩样应力在 50MPa 时, c 图象蓝色区域明显减少, 比零压下的 a 图象还要少, 说明辐射温度升高。在 75MPa(d 图象)和 100MPa(e 图象)时蓝色斑点逐渐减少, 在 125MPa 时(f 图象)蓝色斑点全无, 说明辐射温度升得最高(注: 无围压的小样品实验, 表面温升达 0.4℃)。在这之前, 岩石随应力增加, 其红外辐射温度呈上升趋势。继续加压至 149.3MPa 时, 岩石应力突然下降, 岩石由弹性形变进入塑性形变, 应力下降到 110MPa, 此时的 g 图象又有蓝色斑点出现, 说明在岩石塑性形变时红外辐射温度降低(0.2℃)。这一结果很好地反映了岩石随应力变化时的红外辐射能量变化规律。从图版 II 图 3 的曲线图上可看出碱性花岗岩(No251)随应力变化, 其红外热象(a, b, …… 对应的热图象)、红外辐射温度及其应变之间的变化关系。这类图象在文献[10]中的斑状花岗岩(No241)岩样的热图象也有同样的结果, 这里不一一例举。

从目前的一些热图象结果看, 初步归纳为: 岩石红外辐射温度随应力变化而改变, 在 0—50MPa 之间有的岩石出现负增长, 但总的趋势是在岩石弹性形变期间, 岩石的红外辐射温度随应力增加而升高, 在塑性形变期间, 红外辐射温度降低, 然后岩石破裂, 在破裂前出现低温显示。

4.4 岩石破裂前兆和破裂期间的红外热象

从讨论 No251 岩样(图版 II 图 3)的 7 张热象图中明显看出, 由 a 至 f 图象红外辐射温度呈升高趋势, f 图象(125MPa 时)岩石蓝色斑点全无, 岩石温升最高, 之后, 岩石应力下降至 110MPa 的 g 图象, 其蓝色斑点增加, 表示红外辐射温度降低, 随即岩石破裂。这种现象称为岩石破裂前兆。从图版 II 图 3 红外辐射温度、热图象与形变关系曲线可明显看出, 热图象由 a 至 f 正处于碱性花岗岩岩样应变曲线的弹性形变期间, 红外辐射温度呈上升趋势, 也是应变曲线的线性增长段; 而 g 图象出现蓝色斑点, 说明温度下降, 红外辐射温度计测得降低 0.2℃, 正处于应变曲线的塑性形变期, 之后岩石破裂。这是一种很明显的岩石破裂前红外辐射温度场变化的前兆物理现象。在文献[10]讨

论的斑状花岗岩(No241)的红外热象也有同样的现象。

从细粒花岗岩(No021)的4张(图版I图2A—D)热象箭头指处可以明显看出,A图象为小的白点,表示该处红外辐射温度升高。同一位置在B图象上白点扩大,在上部多了一处灰白色斑块,面积稍大。C图象上两处灰白色斑块进一步扩大,斑块右侧白点連結成白色亮线状,表示辐射温度进一步升高。岩石压力增加(应力加大),岩石出现裂痕,C图象上的两处斑块合二而一,出现D图象上的白色区(亮色调),岩石破裂,温度升高大于 3°C 。这是由于岩石加压,应力增加使岩石出现裂纹及裂纹扩大、破裂而出现红外辐射变化及岩石破裂后的红外辐射状况。

类似例子还有一些。这些都说明,岩石在应力作用下,弹性形变期温度呈上升趋势;在塑性形变期,温度降低,随之岩石破裂;在破裂期间和之后的短时间内有高的红外能量向外辐射。这就是这次实验取得的重要物理现象。

5 结 论

通过岩石的震源物理实验,使用AGA-782红外热象仪观测到了以上所述结果,并测定岩石随应力变化其力学性质改变,现归纳如下:

(1) 随岩石应力增加,岩石表面红外辐射温度升高,有的出现条带状或斑块状的局部红外辐射温度增高。

(2) 随岩石应力增加,岩石内部升温较高,岩样一般温升在 $2-4^{\circ}\text{C}$ 。岩石表面辐射温度偏低(零点几度)的主要原因是由岩石与空气的快速热交换所致。

(3) 在岩石加载实验中,红外热象仪可观测并记录岩样红外辐射温度场变化的动态过程,变化规律及岩石破裂前兆信息。

(4) 在岩石加载实验中,随岩石应力增加,在弹性形变期,岩石表面红外辐射温度呈升高趋势,在塑性形变期呈降低趋势,之后岩石破裂。这是一种物理现象。

(5) 这一物理现象的发现,为红外遥感用于地震预报提供了新的理论依据和新的研究方法。同时也为岩爆、矿爆、隧道、大型桥梁和水坝等由应力引起的灾害监测和预测研究提供了新的研究方法。

(6) 地震孕育过程中,地壳应力变化是大面积的,因而岩石受地应力影响的增温也是大面积的,这种高的能量(有时也可能有高温气体)沿断裂和微裂隙向空间释放,能引起地表或海面的大面积增温。本次岩样应力变化的红外热象监测结果为机载和星载红外遥感监测提供重要的科学依据。在这次岩石力学与红外遥感的基础实验观测中,红外热象观测时发现这一物理现象起了重要作用。

参 考 文 献

- [1] 孙正江等. 岩石标本破裂时的电磁辐射和光发射. 地球物理学报, 1986, 29(5): 491—495.
- [2] Ramada, I., Masuda, K., Mizutani, H., Phys. Earth Planet. Inter., 1989, 57: 157—168.
- [3] 郭自强等. 岩石破裂的光声效应. 地球物理学报, 1988, 31(1).
- [4] 郭自强等. 岩石破裂的电子逸出. 地球物理学报, 1988, 31(5).
- [5] В. И. Горный. АН СССР, 1988, Т., 301(1): 67—69.

- [6] 强祖基, 徐秀登, 贺常恭. 卫星热红外异常——临震前兆. 科学通报, 1990, 35(17): 1324—1327.
- [7] 崔承禹, 邓明德, 耿乃光. 在不同压力下岩石光谱辐射特性研究. 科学通报, 1993, 38(6): 538—541.
- [8] 邓明德, 崔承禹, 耿乃光. 遥感用于地震预报的理论及实验结果. 中国地震, 1993, (2).
- [9] 耿乃光, 崔承禹, 邓明德. 岩石破裂实验中的观测与遥感岩石力学的开端. 地震学报, 1992, (增刊).
- [10] 崔承禹, 支毅乔, 张晋开. 红外遥感用于地震预报的基础实验研究. 遥感科学新进展. 中国科学院遥感受应用研究所编, 北京: 科学出版社, 1995, 151—160.

作者简介

支毅乔, 男, 高级工程师, 1952年8月生, 1980年2月毕业于长春地质学院勘探仪器系, 从事红外遥感、红外辐射特性研究及红外仪器和设备等方面的工作, 已发表论文6篇。

Application of Infrared Thermal Imaging System to the Basic Remote Sensing Experiment on Rock Mechanics

Zhi Yiqiao Cui Chengyu Zhang Jinkai

(Institute of Remote Sensing Applications, Academy Sinica)

Deng Mingde

(Comprehensive Observation Team, State Seismological Bureau)

Geng Naiguang

(Research Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract This paper discusses the dynamic change of rock infrared radiation temperature field in the experiment on rock mechanical properties. With the aid of AGA782 Thermalvision it was observed that the rock surface infrared radiation temperature rised with the increase of the stress on the rock sample, and the temperature rising 2—4 degrees centigrade was measured from where the rock broke. Moreover, the whole process of the rock infrared radiation temperature field variation caused by the change of the stress was obtained. That is, with the augment of the stress exerted on the rock sample, the rock surface radiation temperature tended to rise during the elastic deformation stage and decrease during the ductile deformation stage. This is a very valuable physical phenomenon. The observation results derived from the thermal images provide the theoretical basis for the ground stress monitoring by infrared remote sensing technique.

Key words Remote sensing, Infrared radiation, Thermal imaging system, Rock mechanics