

岩石红外辐射温度随岩石应力变化的规律和特征以及与声发射率的关系^{*}

邓明德 耿乃光^① 崔承禹^② 支毅乔^②

(国家地震局综合观测中心, 北京 100039)

摘要 在实验室对不同岩性不同结构的岩石试件进行单轴加载至试件破裂试验, 得出了如下主要结果: (1) 岩石试件的红外辐射温度随应力增加而变化, 温度变化的范围在 0.2°C — 0.8°C 。(2) 岩石试件临破裂前出现明显的岩石破裂温度前兆。(3) 有一部分岩石试件临破裂前出现高温条带、高温区或低温条带、低温区。不久, 试件沿高温条带、区或低温条带、区发生主破裂。(4) 有一部分岩石试件在临破裂前出现温度脉冲, 正脉冲达到 2.8°C , 负脉冲达到 -1.0°C 。(5) 当应力增加时, 岩石试件的辐射温度增加与声发射率增加呈互补关系。

主题词: 岩石破裂 声发射 应力 辐射温度 破裂温度前兆

1 前言

红外遥感对物质的温度十分敏感, 在军事和国民经济的诸多部门, 得到了广泛的应用, 取得了巨大的效果。红外遥感目前探测的物理量主要是物质的红外辐射温度。当物质受到力的作用时, 物质的红外辐射温度是否发生变化还是一个没有进行过研究的重要课题, 在国家科委和地震科学联合基金的资助下, 在实验室对不同岩性不同结构的多种岩石试件进行了单轴加载至试件破裂实验, 同时还进行了不同加载的实验, 除对干燥岩石试件进行实验外, 还对含水岩石试件进行了实验, 得到了很好的结果。红外辐射温度的变化量能被目前的红外遥感探测器探测到。本文详细地报导岩石的红外辐射温度随岩石试件应力状态变化而变化的规律、特征以及与试件声发射率的关系。

2 实验

在野外现场采集新鲜的岩石标本, 由人工制作成 $14 \times 14 \times 28 \text{ cm}^3$ 的岩石试件, 试件两受力面磨成平面, 偏离平行误差为 0.05 mm , 除加工成型外, 未作其它处理, 以保持岩石原来的性质。在 500 t 岩石压力机下单轴加载至试件破裂。加载应变率为 $10^{-5}/\text{s}$ 。用地面遥感仪进行测量, 测量的波长范围为 $3.5\text{--}14.0 \mu\text{m}$ 。

用两台红外辐射温度计同时测量试件的辐射温度, 辐射温度计的波长范围 $8.0\text{--}14.0$

^{*} 国家科委、地震科学联合基金资助项目。

^① 国家地震局地球物理研究所, 北京 100081

^② 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101

μm , 温度灵敏度 0.1°C 。用热象仪记录试件的热图象, 波长范围 $3.5\text{—}5.5\mu\text{m}$ 。用声发射综合参数仪测量试件加载过程中的声发射率。所有测量仪器均为自动连续记录。

3 结果及讨论

3.1 岩石红外辐射温度随岩石应力变化的规律和特征

岩石的红外辐射温度(以下简称温度)随岩石的应力状态变化而变化, 不同岩石具有不同的变化规律和特征, 我们对几十块岩石标本的实验结果进行了分析和研究, 尽管变化各异, 但就总的变化规律和特征而言, 主要有六类:

(1) 试件温度随应力增加而增加。这类变化的特征是温度随应力增加呈波动式的上升, 直到试件破裂, 破裂发生在温度的最高值。属于这类变化的以粗粒正长岩和角闪片麻岩为例, 如图 1(a)和(b)所示, 粗粒正长岩的最大温度增量为 0.4°C , 破裂应力为 69.5 mPa 。角闪片麻岩的最大温度增量为 0.7°C 。破裂应力为 146.8 mPa 。

(2) 在低应力和中等应力状态下, 温度保持在一个恒定值内波动变化, 试件临破裂前温度急速升高。属于这类变化的以白云岩和粗粒石英二长岩为例, 见图 1(c)和(d)。白云岩应力增至破裂应力 91% , 粗粒石英二长岩应力增至破裂应力 92% 高应力状态时, 两种岩石试件的温度急速升高了 0.4°C , 而两种试件的破裂发生在不同温度, 白云岩由最高增温 0.4°C 急剧下降到 0.2°C , 试件立即破裂, 粗粒石英二长岩破裂发生在最高增温的平稳区间。两种岩石试件的破裂应力分别是 73.3 mPa 和 168.6 mPa 。

(3) 在低应力状态下温度迅速升高, 中等应力状态下温度保持恒定, 在临破裂前温度急速上升、急速下降、又急速上升, 呈现类似正弦变化, 岩石试件破裂。属于这类变化的以碱性花岗岩为例, 见图 1(e)。在应力初始状态下, 温度变化不大, 当应力增至破裂应力 $25\text{—}55\%$ 这段应力区间, 温度增量由 0.1°C 迅速升高到 0.5°C , 然后下降到 0.4°C , 保持恒定。当应力增至破裂应力 80% 高应力状态时, 温度增量由 0.4°C 很快上升到 0.6°C , 并且急速下降到 0.4°C , 又急速升高到 0.6°C , 急剧下降到 0.4°C , 岩石试件破裂。破裂应力为 149.3 mPa 。

(4) 温度随应力增加保持在一个恒定值内波动变化, 没有明显的岩石破裂温度前兆信息。属于这类变化的以细粒正长岩为例, 见图 1(f)。从图中看到温度增量一直保持在 0.3°C 内波动变化, 直到岩石试件破裂。

(5) 在低应力和中等应力状态下温度变化不明显, 当应力增至破裂应力 60% 以后, 温度急速变化。这类变化的特征是, 在试件破裂前的一段应力内, 温度随应力增加急速增加, 急速下降, 又急速增加, 急速下降, 也呈现出类似正弦变化, 出现两个温度峰值后, 岩石试件破裂。属于这类变化的以细粒石英二长岩为例, 如图 1(g)所示。应力在 113 mPa 以前, 温度增量在 $0.1\text{—}0.2^\circ\text{C}$ 间波动变化, 当应力超过 113 mPa 以后, 温度增量随应力迅速增加到 0.4°C , 应力增至 139 mPa 时, 温度由 0.4°C 下降至 0.1°C , 应力增至试件破裂应力 89% 高应力状态时, 温度由 0.1°C 急速升高到 0.6°C , 临破裂前由最高增温 0.6°C 急速下降到 0.2°C , 再回升到 0.3°C , 试件破裂。破裂应力为 185.3 mPa 。

(6) 岩石温度随应力增加为负增值, 试件临破裂前温度急剧变化。以辉长岩为例, 如图 2 所示。由图 2 看到, 温度随应力增加一直为负增值, 直到岩石试件破裂。在 $0\text{—}144\text{ mPa}$ 应力区间, 温度变化量保持在 -0.2°C , 当应力超过 144 mPa 之后, 温度随应力增加迅速负增值,

应力增至破裂应力93%极高应力状态时,温度变化量由-0.4℃急剧升高到0℃,又急剧下降到-0.3℃,岩石试件破裂。破裂应力为207 mPa。在试验的试件中,温度出现负增值的占17.6%。

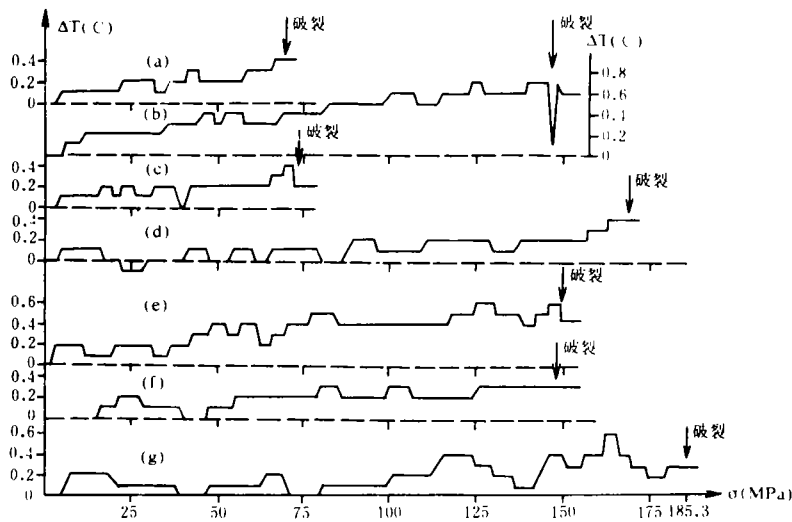


图1 岩石辐射温度随应力的变化

(a)粗粒正长岩 (b)角闪片麻岩 (c)白云岩 (d)粗粒石英二长岩
(e)碱性花网岩 (f)细粒正长岩 (g)细粒石英二长岩

Fig. 1 The change of radiation temperature with stress of rocks.

3.2 岩石试件临破裂时的温度脉冲

岩石试件在临破裂时出现显著的温度脉冲,脉冲有正有负,如图3所示。图中给出的是试件破裂前后一段温度变化量。图3(a)是中粒花岗岩,临破裂时温度增量由破裂前的0℃升高到0.4℃,破裂后降到0.2℃。图3(d)为角闪片麻岩,破裂前温度增量为0.7℃,临破裂时由0.7℃下降到0.2℃,破裂后回升到0.6℃。图3(e)为正长斑岩,破裂前温度增量为0.1℃,

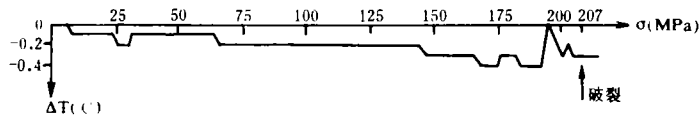


图2 辉长岩辐射温度随应力的变化

Fig. 2 The change of radiation temperature along with stress for gabbro.

临破裂时由0.1℃下降到-1.0℃,破裂后升高到0.7℃。图3(f)为细粒闪长岩,破裂前温度增量为0.4℃,临破裂时由0.4℃升高到2.8℃,破裂后降到0.2℃。临破裂时出现温度脉冲的试件占试件总数的35.3%。

3.3 不同加载方式的实验结果

3.3.1 重复加载

图 4 是对石英斑岩试件重复加载的实验结果。图中(a)为第一次加载,从 0 加载至 50 mPa,减到 0 mPa,温度基本无变化。图中(b)为第二次加载,从 0 加载至 100 mPa,减至 0

mPa。从加载至 50 mPa 起,温度增量一直在 0.1—0.2℃之间起伏变化,当载荷减到 0 mPa 时温度增量也降到 0℃。图中(c)为第三次加载,由 0 mPa 加载至试件破裂。在 50 mPa 以前,温度增量保持在 0.1—0.2℃之间起伏变化,在 60—100 mPa 间,温度增量保持在 0.2—0.3℃,在 118—144

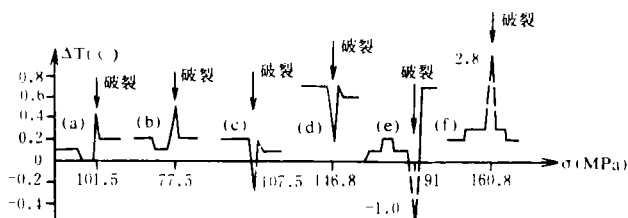


图 3 岩石试件破裂时的温度脉冲

(a)中粒花岗岩 (b)粗粒闪长岩 (c)中粒闪长岩

(d)角闪片麻岩 (e)正长斑岩 (f)细粒闪长岩

Fig. 3 The temperature pulse during rupture of rock samples.

mPa 应力区间,温度增量保持 0.2℃,不随应力变化,临破裂时,温度增量增高到 0.3℃,试件破裂。破裂应力为 150.3 mPa。从图中看到,试件的温度随试件重复加载的次数增加而增高。

3.3.2 快速加载至试件破裂

对长石石英砂岩快速加载至试件破裂,加载时间为 31.3 秒,试件的温度无任何变化,破裂应力为 48.8 mPa,对第二块长石石英砂岩以应变率 $10^{-5}/s$ 加载至破裂,加载时间为 7 分 50 秒,温度升高了 0.3℃,破裂应力 48.3 mPa。上述结果表明,应力急剧变化时,岩石试件表面宏观温度不发生变化。

3.4 含水岩石与干燥岩

石试件温度随应力变化的比较

为使含水岩石试件与干燥岩石试件具有相同的化学成分和相同的结构,在野外现场采集新鲜完整的大块岩石,由人工分裂成几块相同尺寸的试件。干燥岩石试件的干燥方法是,将制作成型的试件放置在有暖气设备的房间里,自然干燥 3 个月,即成干燥岩石试件。将试件浸泡在水池中 18 天,基本达到自然水饱和状态,即成含水岩石试件,实验前将试件取出,擦干表面水,将试件放置在实验室内 4 个小时,让试件温度自然升高到与实验室的环境温度达到平衡,然后开始实验。实验结果以斑状花岗岩和细粒闪长岩为例,如图 5 所示。

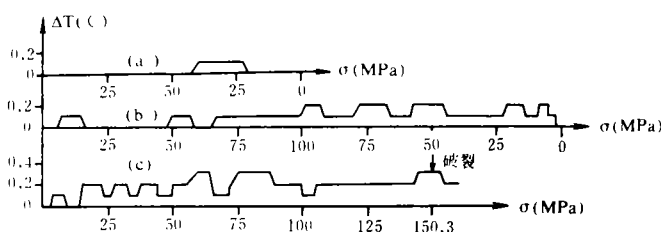


图 4 岩石试件重复加载时试件温度随应力的变化

(a)第一次加载 0 mPa→50 mPa→0 mPa (b)第二次加载

0 mPa→100 mPa→0 mPa (c)第三次加载 0 mPa→试件破裂

Fig. 4 The change of temperature along with stress for rock samples during repeated loading.

图 5(a)为斑状花岗岩。干燥斑状花岗岩在 50 MPa 以前,温度随应力变化为负增值,负增值的最大值为 -0.2°C 。50 MPa 以后,温度升高到 0.1°C ,应力增至 65 MPa 以后,温度变化为零。含水斑状花岗岩,应力增至 27 MPa 以后,温度随应力增加而增加,破裂前温度升高了 0.4°C 。含水斑状花岗岩试件的温度增量比干燥试件的温度增量高 0.3°C 。

图 5(b)为细粒闪长岩。干燥细粒闪长岩试件温度随应力的变化,从加载开始到试件破裂,一直在 0.3°C 以内波动变化,最大温度增量为 0.3°C 。含水试件温度明显随应力增加而增加,破裂前温度增高了 0.8°C 。含水岩石试件的温度增量比干燥岩石试件的温度增量高出 0.5°C 。

含水岩石的温度随应力的增加量高于干燥岩石,在试验的岩石试件中,无一例外。

实验结果表明,在用岩石温度预报岩石破裂时,要考虑岩石含水这一重要的环境因素。两者的温度随应力的变化不仅表现在变化的幅度不同,而且变化的规律也不同,图 5 和热图像结果都表明了这一点。

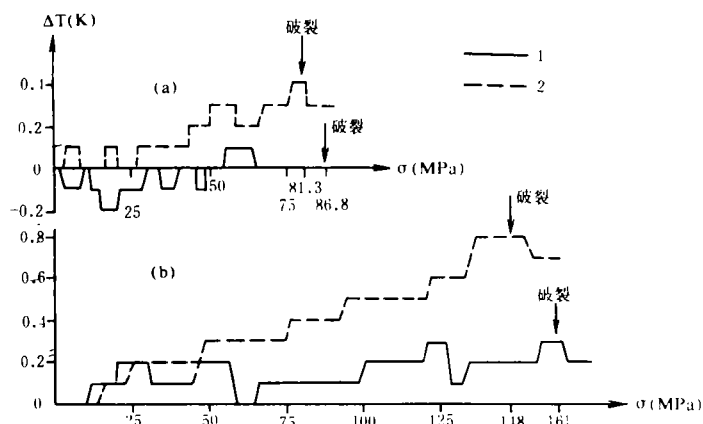


图 5 含水岩石辐射温度随应力的变化

(a)斑状花岗岩 (b)细粒闪长岩; 1 干燥试件 2 含水试件

Fig. 5 The change of radiation temperature along with stress for water-bearing rocks.

3.5 热图像结果

热图像是采用热成像技术,由热像仪自动连续记录温度的分布及变化过程,以不同颜色和不同灰度的两种图像显示温度。热像仪记录到岩石试件临破裂前出现高温条带、高温区或低温条带、低温区。图 6(a)~(e)是热图像照片的描绘图,(a)为中粒花岗岩,(b)和(c)为细粒花岗岩临破裂前出现的高温条带,(d)为正长斑岩临破裂前出现的高温区和低温区分布,(e)为斑状花岗岩临破裂前出现的低温条带。随着条带、区的出现,不久,岩石试件的主破裂沿这些高温条带、高温区或低温条带、低温区发生。这是极其有意义的岩石临破裂前的前兆信息,它预先指示出了主破裂发生的位置。在地震预报中,这些高温条带、区,低温条带、区出现的位置,就是即将发生地震的震中位置。

4 岩石试件温度随应力变化与试件声发射的关系

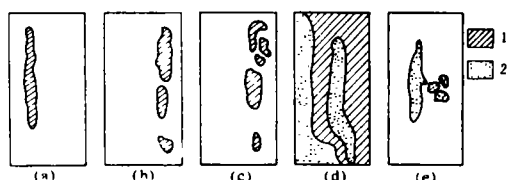


图 6 岩石试件临破裂前出现的高温条带、高温区,低温条带、低温区分布

(a)中粒花岗岩 (b),(c)细粒花岗岩 (d)正长斑岩 (e)斑状花岗岩 1 高温区 2 低温区

Fig. 6 The high-temperature belt and region, or the low temperature belt and region appeared before rupture of rock samples.

(b)在 124 mPa 以前,声发射率极低,而图 1(b)的温度在 124 mPa 时已升高了 0.6℃,图 7

(b)在 125 mPa 至试件破

裂这段应力区间,声发射

极强,但图 1(b)在该应力

区间,温度增量由 0.7℃

下降到 0.6℃,直到破裂

前升高到 0.7℃,破裂时

温度由 0.7℃降到 0.2℃。

图 7(e)在 118 mPa 以前声

发射极低,而图 1(e)应力

增至 118 mPa 时,温度增

量已增到 0.5℃,图 7(e)

在 118 mPa 至试件破裂

这段应力区间内的声发射

极强,而图 1(e)在这段应

力区间的温度增量却在

0.4℃—0.6℃之间起伏变

化。试件在临破裂时的声

发射率达到了 563/s 极强

的声发射,而试件的温度

增量则由 0.6℃下降到

0.4℃,试件破裂。图 7(f)

在应力为 60、84 和 134

mPa 时分别出现很强的

声发射,而试件的温度增

量一直在 0.2—0.3℃间起伏变化,不因出现强声发射而改变。图 7

(g)在 123 mPa 以前,声发射很弱,而图 1(g)在 123 mPa 时,温度增量已升高到 0.4℃,在 124

图 7(a)—(g)分别为图 1(a)—(g)的岩石试件,图 7(h)为图 2 的岩石试件,图 7(i)和(j)分别为图 5(a)和(b)的岩石试件给出了加载过程中的声发射率。在测量试件温度的同时测量试件的声发射率。下面讨论温度随应力的变化与试件声发射率的关系。

图 7 和图 1 中的(a)、(c)和(d)分别为粗粒正长岩、白云岩和粗粒石英二长岩的声发射率和温度随应力的变化。图 7(a)、(c)和(d)试件的声发射率极低,而图 1(a)、(c)和(d)试件的温度随应力的增加而变化,都分别升高了 0.4℃。图 7

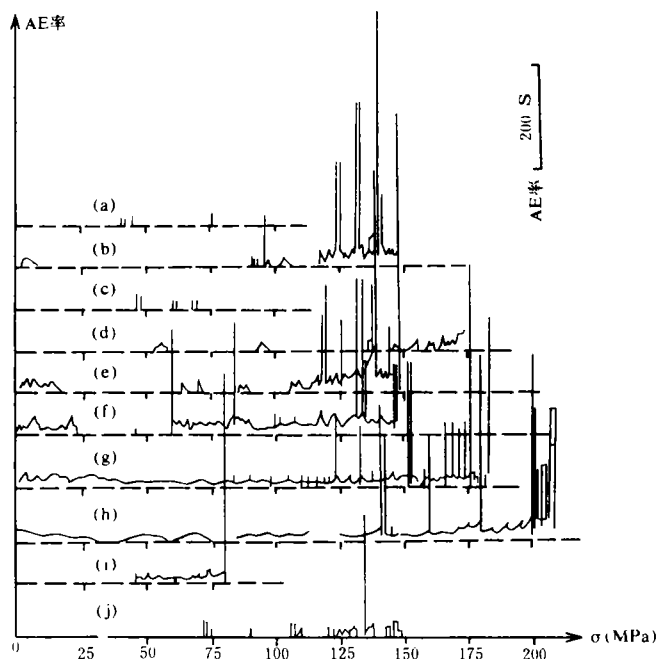


图 7 岩石试件声发射率

(a)粗粒正长岩 (b)角闪片麻岩 (c)白云岩 (d)粗粒石英二长岩
(e)碱性花岗岩 (f)细粒正长岩 (g)细粒石英二长岩 (h)辉长岩
(i)含水斑状花岗岩 (j)含水细粒闪长岩

Fig. 7 The AE rate of rock samples.

mPa 至试件破裂这段应力区间, 声发射很强, 而温度在 0.4 、 0.1 、 0.6 、 0.2°C 间呈现类似正弦变化。临破裂时出现极强的声发射, 而温度增量则由 0.6°C 下降到 0.2°C 。图 7(h) 为辉长岩, 在 140 mPa 以前, 声发射很弱, 由图 2 看到, 辉长岩的温度为负增值, 在应力为 142 、 160 和 180 mPa 时, 均出现强声发射, 图 2 中的温度在应力为 142 — 180 mPa 的这段应力区间内, 由 -0.2°C 下降到 -0.4°C 。图 7(h) 在 200 mPa 至试件破裂, 出现连续很强的声发射, 而图 2 在 200 mPa 至试件破裂这段应力区间, 温度一直下降。图 7(i) 和 (j) 与图 5(a) 和 (b) 为含水斑状花岗岩和含水细粒闪长岩, 由图 7(i) 和 (j) 看到, 它们的声发射一直极弱, 而图 5(a) 含水斑状花岗岩的温度升高了 0.4°C , 图 5(b) 含水细粒闪长岩的温度升高了 0.8°C 。

上述实验结果证明了岩石试件温度随应力的变化与岩石试件的声发射之间的明显相关关系。当温度升高时, 声发射减弱或停止; 当声发射增强或极强时, 温度下降或迅速下降。

5 结语

通过对实验结果的分析, 得出如下初步结论:

(1) 在试验的不同岩性不同结构的 34 块岩石试件中, 试件的辐射温度均随应力增加而变化, 只是变化幅度有所不同。变化显著的 ($\Delta T \geq 0.4^{\circ}\text{C}$) 占 33.3% , 变化明显的 ($0.2 \leq \Delta T < 0.4^{\circ}\text{C}$) 占 54.5% , 变化不明显的 ($0.1 \leq \Delta T < 0.2^{\circ}\text{C}$) 占 12.2% 。

(2) 有一部分岩石试件在破裂前出现明显的温度前兆, 其特征是: 温度随应力增加而增加, 破裂发生在最高温度的平稳区间 (见图 1(a)、(b)); 试件临破裂前温度急速上升到最高温度, 随即急剧下降, 试件破裂 (见图 1(c)); 试件临破裂前温度急速上升, 破裂发生在最高温度的平稳区间 (见图 1(d)); 临破裂前温度迅速上升, 随即迅速下降, 再迅速上升, 又迅速下降, 呈现出类似正弦变化, 出现两个温度峰值后, 试件破裂 (见图 1(e) 和 (g)); 温度随应力增加为负增值, 破裂前温度迅速负增值, 临破裂时温度急剧上升又急剧下降, 试件破裂 (见图 2)。

试件破裂前有明显温度前兆的占试件 39.4% 。

(3) 试件临破裂前出现高温条带、高温区或低温条带、低温区 (见图 6), 随即试件主破裂沿此高温条带、区或低温条带、区发生。试件临破裂前出现的温度前兆使预报岩石破裂时间和地点成为可能。即使只是少部分岩石试件出现这样明显的破裂温度前兆, 也是极其有意义的, 重要的。

(4) 试件温度随应力变化的最大增量与试件破裂应力的大小的关系并不密切。例如细粒正长岩和片麻岩的破裂应力分别为 148.5 mPa 和 146.8 mPa , 而温度增量的最大值分别是 0.3°C 和 0.7°C 。砂岩和细粒花岗岩的破裂应力分别是 37.5 mPa 和 142.7 mPa , 而温度增量的最大值均是 0.2°C 。

(5) 岩石试件辐射温度随应力的变化与试件声发射率变化的关系是: 声发射率低的岩石试件, 加载过程中试件的温度明显升高; 声发射率较高的试件, 加载过程中试件温度保持平稳或起伏变化; 声发射率极高的一些试件, 在加载过程中试件温度明显下降; 还有一部分声发射率高的试件, 在加载的前阶段温度起伏变化, 试件临破裂前, 声发射率极高时, 试件温度显著下降。

实验结果表明, 岩石试件的辐射温度前兆与微破裂引起的声发射前兆是互为补充的两

种前兆。当辐射温度前兆不显著时,声发射前兆显著,反之,声发射前兆不显著时,辐射温度前兆显著。

(本文 1995 年 1 月 10 日收到)

参考文献

- 1 褚圣麟. 原子物理学. 高等教育出版社, 1979.
- 2 徐亦庄. 分子光谱理论. 清华大学出版社, 1988.
- 3 白长城, 等. 红外物理. 电子工业出版社, 1989.
- 4 吕斯骅. 遥感物理基础. 商务印书馆, 1984.
- 5 郭自强, 等. 岩石破裂中的电子发射. 地球物理学报, 31 (5).
- 6 强祖基, 等. 卫星热红外异常——临震前兆. 科学通报, 17 (90).

THE RULE AND CHARACTERISTICS OF CHANGE OF INFRARED RADIATION TEMPERATURE ALONG WITH STRESS OF ROCKS AND THEIR RELATION TO AE RATE

Deng Mingde, Geng Naiguang^①, Cui Chengyu^② and Zhi Yiqiao^②

(*Comprehensive Observation Brigade, SSB, Beijing 100039, China*)

Abstract

The rupture experiments for rock samples of different properties and structures during uniaxial loading were made in laboratory. The following major results were obtained: (1) The radiation temperature of rock samples changed along with increasing of stress, the range of temperature change was $0.2^{\circ}\text{C} - 0.8^{\circ}\text{C}$. (2) The obvious temperature precursor appeared before rock rupture. (3) High-temperature belts and regions or low-temperature belts and regions appeared before rupture for some rock samples, then the major faults happened along the belts and regions. (4) The temperature pulses appeared before rupture for some rock samples, the plus pulses were about 2.8°C and the minus pulses were about -1.0°C . (5) When the stress increases, the increasing of temperature and the increasing of AE rate of samples appear complementary relation.

Key words: Rock rupture, Acoustic emission, Stress, Radiation temperature,
Temperature rupture precursor

① Institute of Geophysics, SSB, Beijing 100081, China.

② Institute of Remote Sensing Applications, Academia Sinica, Beijing 100101, China.