

温度对岩石的弹性波速和声发射的影响

李纪汉 刘晓红 郝晋昇

(国家地震局地球物理研究所)

摘要

在实验室中研究了温度变化引起大理岩和辉长岩的波速变化和声发射活动。研究揭示了岩石热开裂的波速效应，并发现热开裂波速效应具有记忆性。实验同时表明岩石热开裂的波速效应，与过去被其他作者发现的热开裂声发射效应之间有着密切的关系。这些结果有助于阐明岩石热开裂的实质。

一、引言

在地震发生的地壳环境中，岩石所处的压力和温度状态都在不断地变化，弄清这些变化对岩石内部结构和性质的影响，对于地震成因及前兆机理的研究是很重要的。在地热开发和核废料处理的研究中，温度变化引起岩石的热开裂效应也是一个重要的问题。因此，岩石的热开裂效应的研究，近年来引起了人们的重视。黄庭芳等^[1]研究了岩石的热膨胀。陈颙等^[2]研究了温度增加引起的岩石声发射，观测到声发射的温度记忆性效应。然而这方面的研究还很不充分。特别是热开裂对波速影响的研究还未见有人做过。

我们对大理岩和辉长岩在高温下的波速和声发射的变化做了初步的实验研究。通过观测岩石的波速变化与声发射活动的变化，来探索在温度变化过程中岩石内部的微破裂发展过程，以期进一步阐明岩石的热开裂问题。

二、实验装置和实验方法

实验装置如图1所示。

1. 加热炉 炉子的特点是，炉芯使用了硅酸铝纤维做炉衬材料，绝热效果好，因而炉子的功耗小，在升温速率为1°C/min的条件下，在600°C时，炉子的功率只有78W。而且温度场均匀，由于硅酸铝纤维棉炉衬的热容量很小，因此炉子控温灵敏；电炉丝的绕法是抗干扰的绕法，它保证了在实验时，不会因电炉的50周工频或其他通过电网输入的干扰信号，而影响实验数据的取得，从而保证了实验的顺利进行。

2. 波速的量测 使用了湖南湘潭无线电厂制造的SYC-2型岩石声波参数测试仪。为了测量岩石在高温下的波速，我们使用了波导棒。在波导棒的冷端粘有压电陶瓷晶片。一

本文1984年11月15日收到，1985年3月7日收到修改稿。

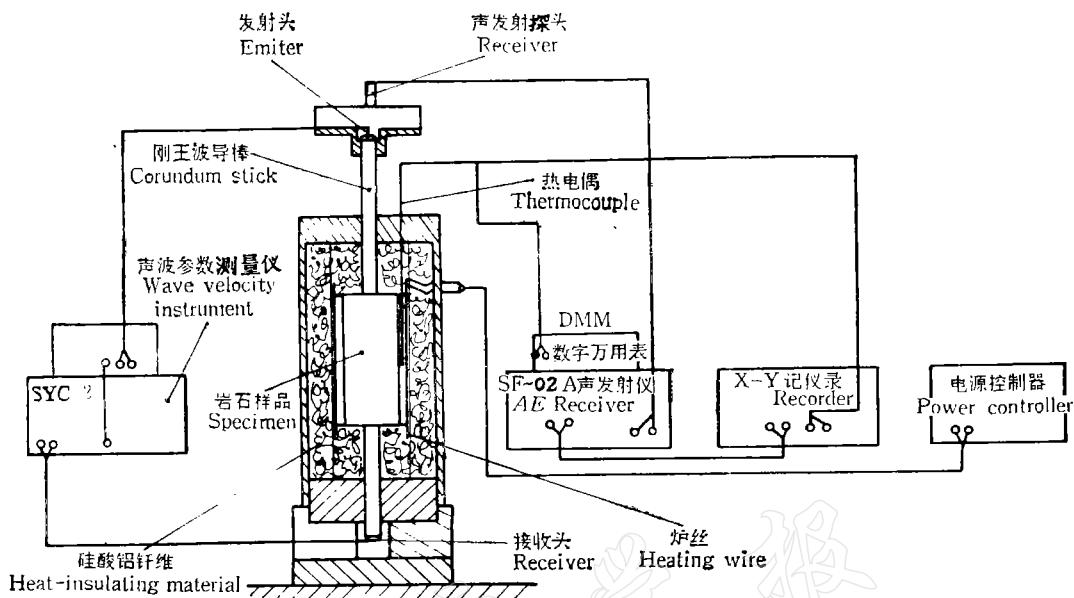


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental installation

端的压电陶瓷晶片做为发射端;而另一端的做为接收端。波从发射端经过岩石样品,到达接收端,波传播所需的时间可以从 SYC-2 中测得。实验开始时原准备对波导棒进行温度修正,即在不同温度下,测量波在波导棒中传播的时间,然而,对于刚玉波导棒来说,波速随温度的变化只有微小的变化,小于 SYC-2 的测量误差,看不出变化的数值,我们可视为波在刚玉波导棒中传播的速度不随温度的变化而变化。因此,波从发射端到接收端所用的时间,减去波在波导棒中传播的时间,这样便可算出波在岩石样品中的传播速度。用此方法得到的波速测量误差为 2%。

3. 声发射的测量 使用的是沈阳电子计算机厂生产的 SF-02A 双通道声发射综合参数测试仪。显然,声发射的测量和波速的测量不能同时进行,测量波速时要干扰声发射。因此,在测量波速时,一定要关掉声发射记录。

4. 温度的控制 整个实验中,岩石样品的温度控制是严格按要求进行的。为了完成严格的程序控制的要求,我们采取了事先在记录纸上绘出所需要的程序控制曲线,然后将热电偶的热电势沿着事先绘制的程序曲线进行记录。记录的曲线与程控曲线进行比较,若记录曲线高于程控曲线,就降低一点电炉的电压;若低于程控曲线,就提高一点电炉的电压,使之沿程序曲线进行。这样便相当好地完成了温度程序控制,温度控制精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

5. 样品的制备 实验所用的样品为房山大理岩和济南辉长岩。样品加工成 $\phi 25 \times 55\text{mm}$ 的圆柱体。两端面不平行度小于 0.01mm ,样品因热膨胀效应引起的波速误差小于 0.1%。

三、实验结果及分析

1. 升温速率对大理岩和辉长岩波速和声发射的影响

实验采用了三种不同的升温速率: $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$; $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$; $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。温度变化范围都是由室温升至 600°C 。图 2 给出了大理岩和辉长岩不同升温速率的波速曲线。由图 2 可见, 对于房山大理岩和济南辉长岩这两种岩石, 升温速率对热开裂的波速效应的影响并不明显, 三条不同升温速率的波速曲线很接近。从图 2(a)可以看出, 在 600°C 的范围内大理岩的波速下降可以分成四个阶段。I 阶段是从室温 $\rightarrow 120^{\circ}\text{C}$ 附近, 稳定下降。II 阶段是从 $120^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C}$ 左右, 急速下降。III 阶段是从 $200^{\circ}\text{C} \rightarrow 400^{\circ}\text{C}$ 左右, 稳速下降。IV 阶段是在 400°C 附近, 波速下降终止, 并随温度上升而略有回升, 对于大理岩波速变化的各阶段, 温度每升高 100°C 的波速下降率分别是: $K_{M_1}=0.989\text{ km}/(\text{s}\cdot\text{h}^{\circ}\text{C})$; $K_{M_2}=3.125\text{ km}/(\text{s}\cdot\text{h}^{\circ}\text{C})$; $K_{M_3}=0.419\text{ km}/(\text{s}\cdot\text{h}^{\circ}\text{C})$; $K_{M_4}=0$ 。由图 2(b)可以看出, 在 600°C 的范围内, 辉长岩的波速随温度的升高而均匀的下降。每升高 100°C , 波速的下降率 $K_G=0.48\text{ km}/(\text{s}\cdot\text{h}^{\circ}\text{C})$ 。

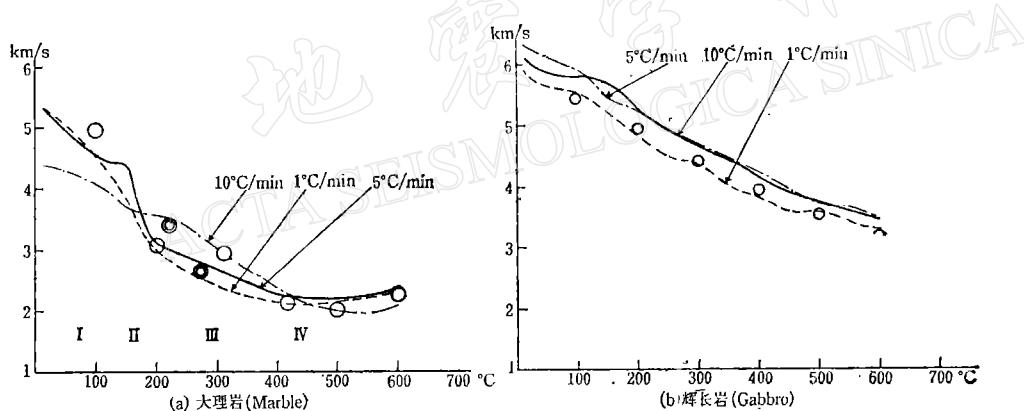


图 2 不同升温率下岩石的波速曲线

Fig. 2 Wave velocity curve of rock sample at different heating rates

图 3 给出了大理岩和辉长岩在不同的升温率下的声发射图谱, 由图 3 可见, 岩石热开裂的声发射率, 在不同升温率下是不同的。升温率低的声发射率低。大理岩在 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温率下, 它的最大声发射率不超过 15 次/ s 。然而, 在 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温率下, 它的最大声发射率超过 700 次/ s 。辉长岩的声发射率与不同升温率的关系和大理岩的相似。

根据上面的实验结果, 再看看岩石热开裂的波速效应和声发射效应之间的关系。图 2(a)表明, 大理岩的热开裂引起的波速变化分为四个阶段, 图 3(a)表明大理岩热开裂的声发射率因升温率的不同尽管有很大的不同, 但均表现出两个高潮。第一个活动高潮较小, 出现在 $120^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C}$ 之间, 第二个活动高潮较大, 出现在 400°C 左右。与热开裂波速效应的四个阶段对比, 第一个声发射高潮对应于波速急速下降的第 II 阶段; 第二个声发射高潮对应于波速停止下降的第 IV 阶段, 这说明岩石的热开裂声发射效应与波速效应之间有着本质的联系, 它们来源于统一的微观机制。大理岩的这种情况可解释为: 在第一

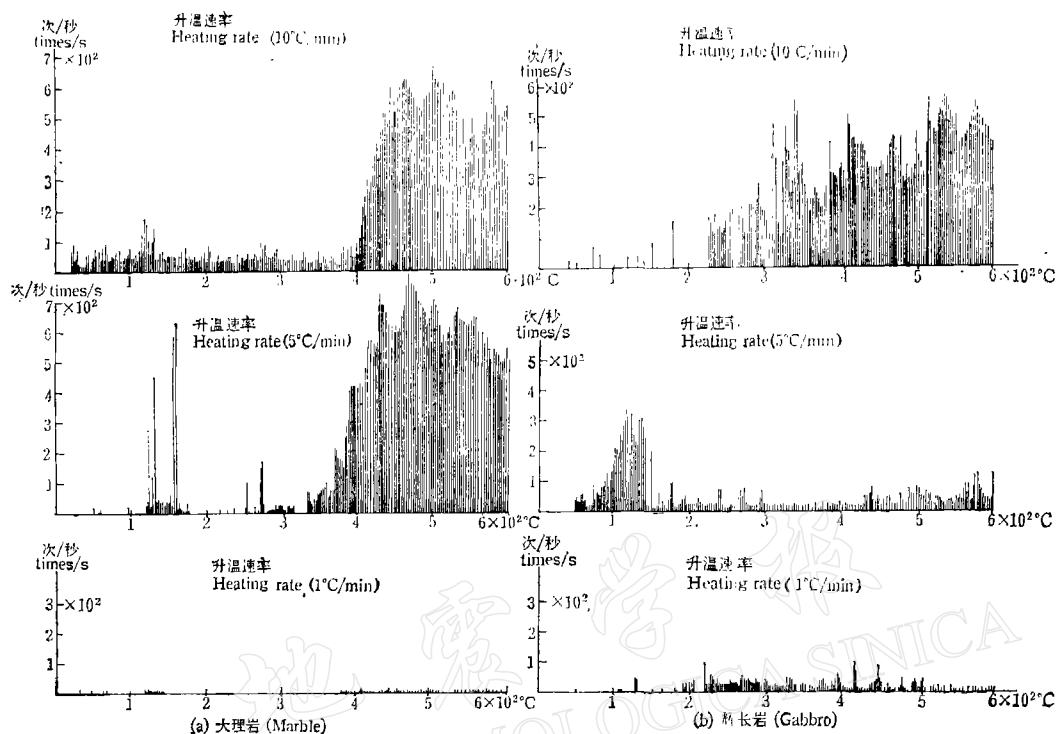


图 3 岩石在不同的升温速率下的声发射图谱

Fig. 3 Acoustic emission atlas of rock at different heating rates

一个声发射高潮出现时,岩石内部产生的微裂纹的尺度较大,并随温度的升高迅速地扩大和加宽。导致波速的大幅度下降。这是影响波速的主要因素。在第二个声发射高潮出现时,产生了许多新的更微小的裂纹,与此同时,原有较大的裂纹由于周围大量的微破裂引起的崩塌填充和压迫作用而部分的闭合,这些新产生的更微小的裂纹对声发射率的贡献很大,但对波速的影响不大。因此,波速下降停止而且略有回升。

对于辉长岩热开裂声发射效应,我们只看到一个高潮,而且对某些样品到 600°C 时,这个高潮还没有结束。与此相对应,热开裂波速效应也表现单调,这一点与大理岩不同。

2. 热开裂的波速效应和声发射效应的记忆

保持恒定的加温速率 10°C/min, 并按下列程序对岩石样品反复加热:

室温 → 100°C → 室温 → 200°C → 室温 → 300°C → 室温 → 400°C → 室温 → 500°C →
室温 → 600°C → 室温。

在加热的过程中, 分别测量波速和声发射率。图 4 给出了大理岩和辉长岩这种类型的实验, 每次加热的波速变化。从图 4a 可以看出, 大理岩第一次加热后, 波速由 5.55km/s 降至 4.96km/s, 待样品降至室温后, 在 100°C 时大理岩的波速被记忆下来。第二次加热, 在温度未超过 100°C 时, 波速变化不大。超过 100°C 时, 波速开始下降, 如前所述, 大理岩波速下降最快一段是在 120°C—200°C 之间, 图 4(a)曲线 2 又证实了这一点。特别值得注意的是, 当温度由 200°C 冷却至室温后, 这个大幅度的波速下降也被记忆下来了。曲线 3

和曲线 4 在加热之初近于水平，但后来出现了上升而又下降的情况，其峰值，曲线 3 在前，曲线 4 在后，初看颇为费解，如果我们把 6 条曲线末端的波速值点到图 2(a) 上(图中圆圈所示)发现这 6 个点恰恰与温度一次上升到 600℃ 的大理岩的波速曲线重合。这又揭示了大理岩热开裂波速效应的一个规律：即热开裂波速效应与加热途径关系不大。

我们再看曲线 3 和曲线 4 的峰值，把这两个峰值也点在图 2(a) 上，用双重圆圈表示。它们与大理岩一次加热至 600℃ 的波速曲线相重合。这说明已经降低了的波速，在加热并初次达到过去未曾达到的高温时，能恢复到一次加热曲线上应有的波速，进一步说明热开裂波速效应与加热途径关系不大。

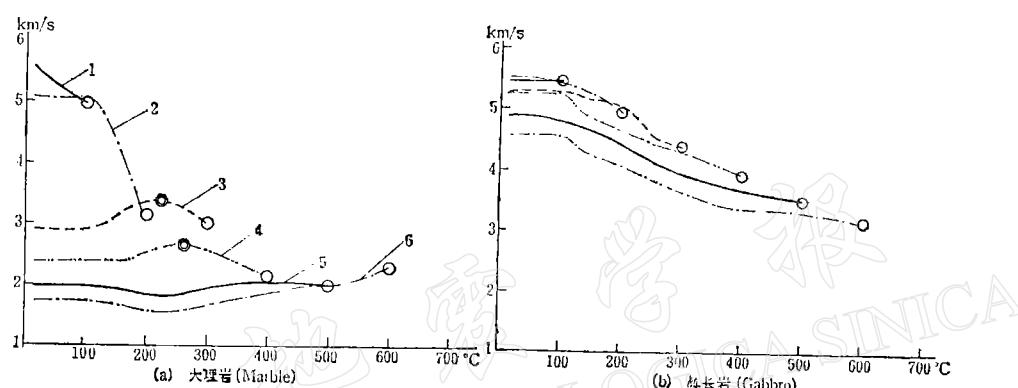


图 4 岩石的波速记忆曲线

Fig. 4 Wave velocity memory curve of rock

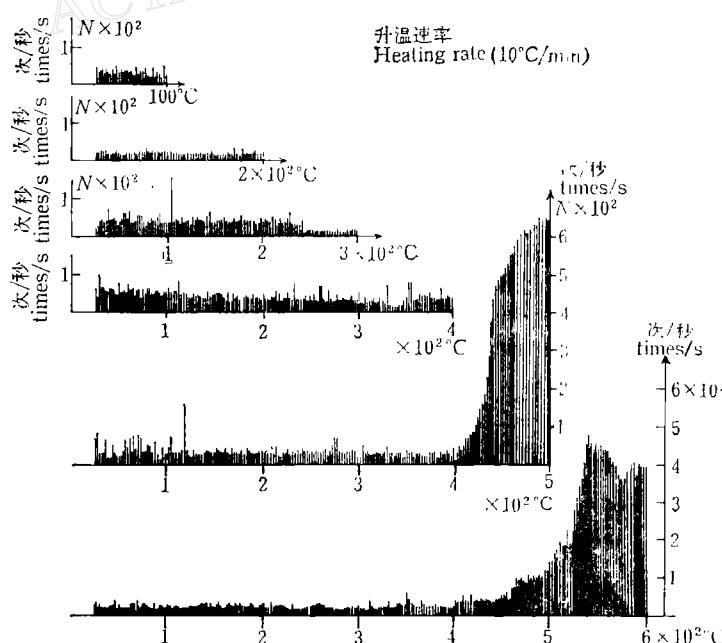


图 5 大理岩的声发射记忆图谱

Fig. 5 Acoustic emission memory atlas of marble

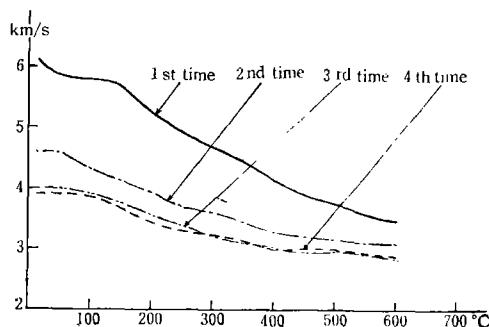


图 6 辉长岩重复加热的波速曲线

Fig. 6 Wave velocity curve of gabbro under repeated heating

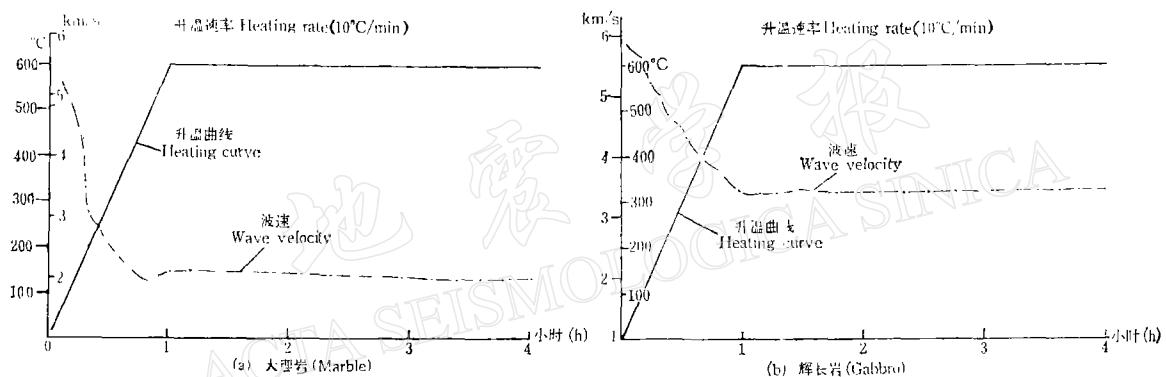


图 7 岩石在升温和恒温下的波速曲线

Fig. 7 Wave velocity curve of rock under heating and constant temperature

曲线 3, 4, 5, 6 表明, 大理岩冷却后可以记住它加热过程中所经历过的最高温度时的波速。

把表示辉长岩实验结果的图 4(b) 的 6 条曲线末端波速值点到图 2(b) 上, 也能得到和大理岩相同的结果。然而, 图 4(b) 的曲线表明, 辉长岩冷却后的波速有相当程度的回复, 这说明辉长岩对热开裂波速效应记忆的本领, 不及大理岩。辉长岩大约只能记住热开裂波速效应的 1/3 左右。

图 5 是大理岩样品重复加热时的声发射图谱。由图 5 可以看出, 这块大理岩有一个 400°C 左右的门坎温度, 低于这个门坎温度, 声发射率极低, 高于这个门坎温度, 声发射急剧增加, 样品加温超过这个门坎温度, 冷却后, 最高的温度被记忆下来成为新的门坎温度。一般地说, 同一岩体取下的样品, 其门坎温度基本一致。这些结果与其他的作者的结果一致。

3. 多次重复加热对辉长岩波速记忆的影响

实验时, 将辉长岩样品由室温加热到 600°C, 这样反复数次。图 6 给出了辉长岩的实验结果。图 6 表明: 第一次加热与第二次加热, 其波速曲线的差距较大, 第二次与第三次差距就小了很多, 第三次与第四次几乎完全重合。这说明, 反复多次加热, 能够增强辉长

岩的热开裂波速效应的记忆。然而对辉长岩来说，多次加热仍不能使其记住所经历的最低波速。只能记住 $2/3$ 左右。

4. 恒定高温对岩石的波速和声发射的影响

将岩石样品按一固定升温率($10^{\circ}\text{C}/\text{min}$)，加热到某一温度，保持恒温数小时以至数天，测量整个过程的波速和声发射。实验结果示于图7。图示表明，在恒温下波速保持稳定不变。

图8是大理岩的恒温实验的全过程声发射图谱，由图8可以看出，在门坎温度以上，一旦升温率由 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 降至0，声发射率也由很高的水平降至极低。

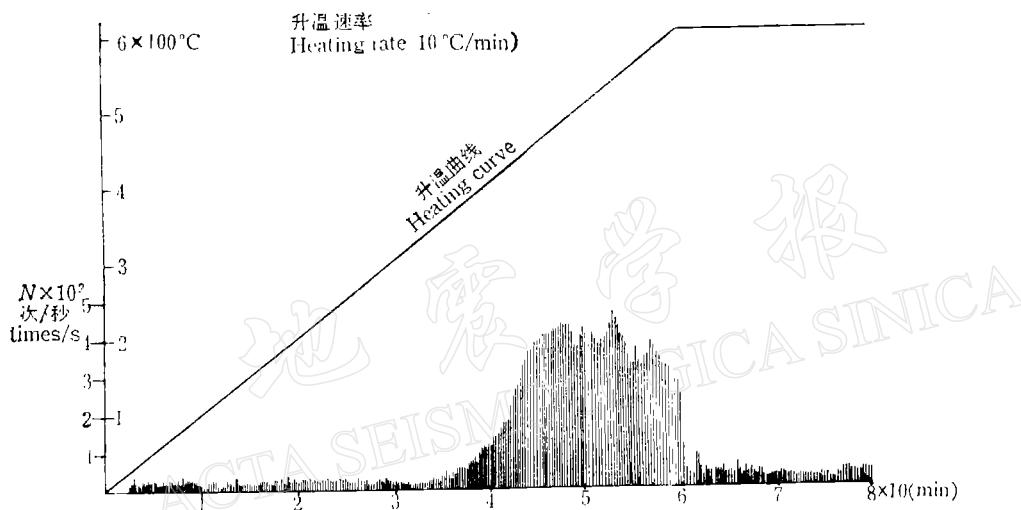


图8 大理岩在升温、恒温时的声发射图谱

Fig. 8 Acoustic emission atlas of marble under heating and constant temperature

四、结语

通过对岩石热开裂的波速和声发射的实验研究，发现热开裂引起岩石的波速下降的规律性，并揭示了岩石热开裂的波速效应和声发射效应二者之间有密切的关系。实验还发现，岩石的热开裂的波速效应对不同的岩石有不同程度的记忆性。这些现象对于阐明岩石热开裂效应的本质具有重要的意义。

到目前为止，岩石热开裂的研究还仅仅是开始，今后应加强实验室研究并结合现场的观测研究，以阐明地壳中温度变化对地震成因及前兆规律的影响。

本工作得到陈运泰、陈颙、耿乃光的支持与帮助，在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Wong, T.-F. and W. F. Brace, Thermal expansion of rocks: Some measurements at high pressure, *Tectonophysics*, 57, 95—117, 1979.
- [2] Chen Yong and C.-Y. Wang, Thermally induced acoustic emission in Westerly granite, *Geophys.*

Res. Lett., 7, 1089—1092, 1980.

TEMPERATURE EFFECTS ON THE ELASTIC WAVE VELOCITY AND ACOUSTIC EMISSION OF ROCKS SAMPLES

LI JIHAN, LIU XIAOHONG, AND HAO JINSNG

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau*)

Abstract

The change of elastic wave velocity and of activity of acoustic emission of marble and gabbro samples caused by change of temperature was studied in the laboratory. The effect of thermal cracking on wave velocity was revealed and it is discovered that this effect is memorable. The experiments also showed that the effect of thermal cracking on wave velocity is related closely with that on acoustic emission discovered by other authors. These results can help clear the nature of thermal cracking of rocks.