

# 高温下大理岩的声发射特性试验研究

翟松韬<sup>1</sup>, 吴刚<sup>2,3\*</sup>, 孙红<sup>1</sup>, 潘建华<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 上海交通大学海洋水下工程科学研究院, 上海 200231;  
3. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 为探讨温度对岩石声发射特性的影响, 在 20℃~800℃实时高温下及 400℃~800℃高温作用冷却后两种情况下对徐州大理岩进行了单轴压缩和声发射试验。研究结果表明: 加温过程中, 大理岩产生了强烈的声发射信号, 且随着温度的升高而趋于活跃; 高温单轴压缩过程中, 大理岩的声发射振铃计数率逐渐趋于密集, 在临近破坏时声发射活动异常活跃, 并且声发射率在岩样破坏时达到最大值; 400℃、600℃、800℃高温下徐州大理岩在加载过程中的声发射活动比其对应高温后的更频繁; 800℃高温作用下, 大理岩岩样在达到峰值强度后出现明显的塑性变形, 此变形阶段岩石的声发射信号明显下降, 出现相对平静的现象。

**关键词:** 高温; 大理岩; 单轴压缩; 声发射

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0177-07

作者简介: 翟松韬(1990-), 男, 安徽人, 硕士, 主要从事高温岩石方面的研究工作。E-mail: zhaisongtao@sjtu.edu.cn。

## Acoustic emission characteristics of thermal cracking of marble under uniaxial compression

ZHAI Song-tao<sup>1</sup>, WU Gang<sup>2,3</sup>, SUN Hong<sup>1</sup>, PAN Jian-hua<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Chinese Underwater Technology Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. The State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** To investigate the influence of temperature on the characteristics of acoustic emission of rock, the uniaxial compression and acoustic emission tests are conducted on Xuzhou marble at real-time high temperatures (20℃~800℃) and after high temperatures (400℃~800℃). The results show that the marble specimens produce strong acoustic emission signals and become more active as temperature rises in the heating process. The acoustic emission ringing count rate of marble gradually tends to dense, and acoustic emission activity becomes very active near the destruction of samples which reaches the maximum when marble specimens are damaged in the loading process at high temperature. The acoustic emission activity of marble is more frequently at high temperature of 400℃, 600℃ and 800℃ than that after high temperature. The plastic deformation occurs after reaching the peak intensity of marble specimens in which the acoustic emission rate significantly reduces and relatively calm phenomenon appears.

**Key words:** high temperature; marble; uniaxial compression; acoustic emission

## 0 引言

岩石的破坏过程主要表现为其内部微裂纹的产生与扩展, 其中伴随有声发射现象的产生, 而高温又会导致声发射信号的增强。因此, 开展高温下岩石的声发射特征研究, 对进一步了解高温岩石的内部破坏机制具有一定的指导意义。

在高温或加载作用下岩石的声发射特性研究方面, 姜永东等<sup>[1]</sup>通过试验研究了岩石应力应变全过程的声发射特征, 得到岩石试件在初始压密和弹性阶段、应变硬化阶段和应变软化阶段的撞击数、能量及振幅

的变化规律; 张黎明等<sup>[2]</sup>对大理岩试样进行常规三轴和卸围压破坏过程的声发射参数测试, 研究了加荷和卸荷两种应力路径下大理岩破坏过程的声发射特性差异; 许江等<sup>[3]</sup>在周期性循环载荷作用下通过改变不同应力幅度和不同加载速率对细粒砂岩进行声发射试验研究, 探讨了声发射在周期性载荷作用下的声发射规

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872180); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDU EK1004)

收稿日期: 2013-06-07

\*通讯作者

律; 梁忠雨等<sup>[4]</sup>通过采集大理岩和红砂岩单轴压缩声发射信号, 引入关联分维函数, 计算了不同应力水平下的声发射过程时间序列的关联维数, 得到了关联分维数与应力水平的变化关系; 吴刚等<sup>[5]</sup>通过在单轴压缩下实施的声发射测试, 研究焦作砂岩受 20℃~1200℃ 温度作用后的声发射演变过程, 同时结合不同温度下砂岩的力学性质, 通过声发射参数分析研究砂岩在不同受力阶段的声发射特点; 尹贤刚等<sup>[6]</sup>通过岩石加载的室内试验方法, 测试不同岩石破裂全过程的力学特征及其声发射特性, 得到了岩石破坏全过程的全应力-应变曲线、声发射事件累积数、声发射事件率等相关曲线及参数, 并给出声发射事件数、事件率与应力水平、时间之间的关系; 蒋宇等<sup>[7]</sup>利用 RMT-150B 岩石力学试验系统和 Locan 320 声发射仪, 研究了循环荷载作用下岩石疲劳破坏过程中的变形规律和声发射特征, 揭示了两者之间的联系; 翟松韬等<sup>[8]</sup>对山东临沂花岗岩在 20℃~800℃ 单轴压缩下的声发射特征进行试验研究, 分别分析了升温过程中花岗岩振铃计数率随时间的变化规律以及加载过程中花岗岩的声发射特征参量与应力-应变之间的关系, 同时从能量角度对高温单轴压缩条件下岩石破坏的过程进行了分析; 赵兴东等<sup>[9]</sup>应用声发射及其定位技术, 对不同岩样破裂过程的声发射活动规律进行实验研究, 借以揭示岩石的破裂失稳机理; Kramadibrata 等<sup>[10]</sup>利用声发射技术中的 Kaiser 效应确定了岩体深部的应力状态, 从而确定了地下挖掘时地应力的大小; Ganne 等<sup>[11]</sup>利用声发射技术对岩石峰值前的脆性破坏进行了研究, 给出了整个过程中累积声发射能量的 4 个过程; Xu 等<sup>[12]</sup>对矽卡岩进行了一系列的双轴试验、真三轴试验和三轴卸荷试验, 对其在试验中的声发射活动和能量释放过程进行了研究; Nie 等<sup>[13]</sup>利用声发射检测系统对 3 种不同砂岩在单轴压缩下进行了声发射检测, 由此研究了结构面的影响以及岩石的失效模式。

本文基于以上研究成果, 在加温及单轴压缩过程中对徐州大理岩进行了声发射各参量的检测, 由此探讨声发射特征参量在温度影响下的变化规律及其与应力应变曲线之间的关系, 同时比较了高温下及高温后声发射参量的不同, 以期为高温岩石工程的相关应用奠定一定的理论基础。

## 1 大理岩高温声发射试验概况

### 1.1 试验岩样

本试验所用大理岩岩样取自徐州九里山某矿区, 试样属闪石大理岩, 常温下其平均体积密度为 2.83 g/cm<sup>3</sup>。大理岩岩样的加工严格按照规范进行, 其尺寸

为 Φ20 mm×45 mm 的圆柱体。图 1 为加工完成的部分大理岩岩样。



图 1 加工完成的部分大理岩岩样

Fig. 1 Part of manufactured marble samples

### 1.2 试验设备

本试验的设备主要有: MTS810 材料测试系统。该系统为液压伺服控制系统, 用于测试各种材料、元件、成品, 对岩石的各种静动态试验都能有效完成。该系统配有 MTS 653.04 高温环境炉, 其温度控制范围为 100℃~1400℃, 精度为±1℃ (见图 2)。

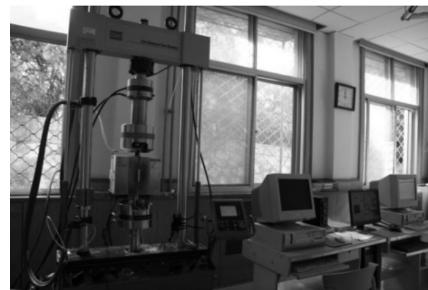


图 2 MTS810 材料测试系统

Fig. 2 MTS 810 material test system

AE21C 声发射检测仪, 此声发射仪在本次试验中设置的增益与门槛值都为 35 db, 采样速率为 100 ms, 撞击时间为 50 μm, 撞击间隔为 300 μm。试验中需保持声发射检测与加载过程的同步进行 (见图 3)。



图 3 AE21C 声发射检测系统

Fig. 3 AE21C acoustic emission detection system

### 1.3 试验方法

本次试验主要采取以下 4 个步骤进行:

(1) 首先对所有岩样编号并根据温度段 (200℃, 400℃, 500℃, 600℃, 800℃, 400℃后, 600℃后和 800℃后) 分为 8 组。

(2) 按各温度段岩样安装在 MTS810 材料测试

系统上, 加热至上述温度并保持恒温 15 min 以上; 随后对岩样进行单轴压缩直至破坏; 在整个试验过程中同步进行声发射检测并作检测记录。

(3) 对经历 400℃、600℃ 和 800℃ 高温作用的大理岩岩样冷却至室温后, 再进行单轴压缩破坏试验; 并同步实施声发射信号的检测及记录。

(4) 整理、分析测试过程中的实验数据。

其中, 所有高温单轴压缩试验均采用位移控制模式, 试验机的位移速率为 0.003 mm/s。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 加温过程中大理岩的声发射特征分析

图 4 为加温过程中典型大理岩岩样在 200℃~800℃ 高温下声发射振铃计数率随时间的变化关系。

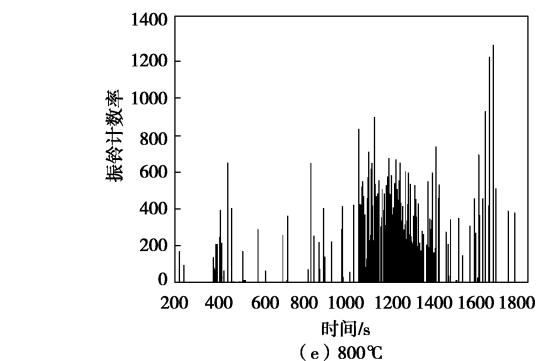
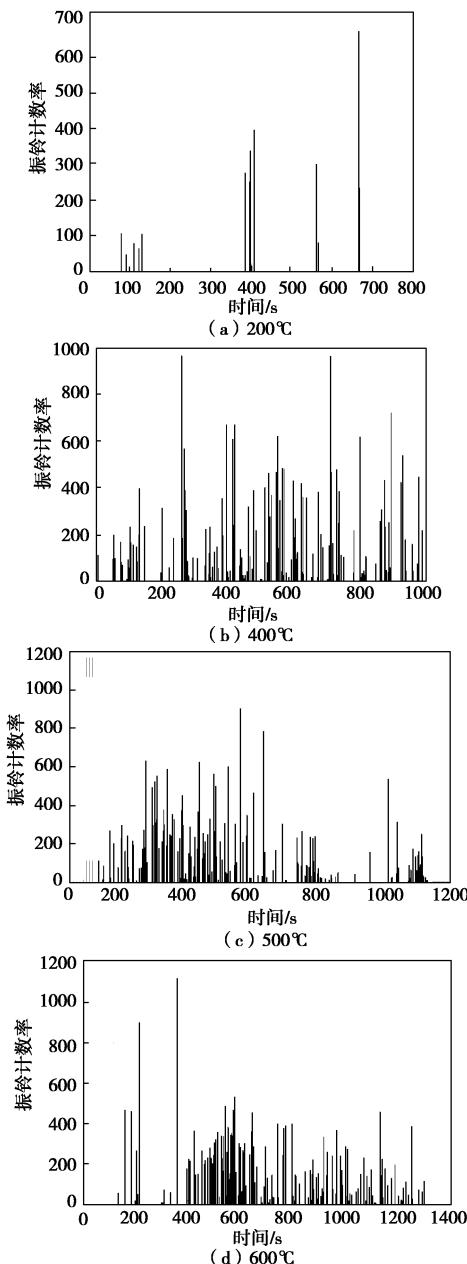


图 4 加温过程中大理岩在不同温度下的振铃计数率与时间关系曲线图

Fig. 4 Relationship between energy rate and time of marble at different temperatures in heating process

由上图可知, 200℃ 至 800℃ 任一温度段大理岩岩样的声发射率波动较为明显, 主要是由于本试验所用岩样内部结构的天然缺陷及不均匀性所致。但总的来说, 从 200℃ 至 800℃, 随着温度的升高, 声发射率不断增加, 声发射活动也变得更为频繁。其中, 当温度达到 200℃ 时, 声发射活动频率较低, 并在多段时间内无法检测到声发射信号, 表明此温度下大理岩内部结构还未产生新的微裂纹, 内部损伤不严重; 当温度高于 200℃ 时, 声发射活动频率逐渐增高, 其原因是温度的升高实际上加快了岩样的损伤进程和大理岩内部扩展、张开并形成较多大裂纹或宏观裂隙的速率, 由此导致了声发射振铃计数率的增加。图 4 表明加温过程中, 高温导致大理岩的内部结构发生了明显的变化(局部破裂), 从而产生了较为强烈的声发射现象。

### 2.2 高温压缩下大理岩的声发射与应力 - 应变关系

#### (1) 振铃计数率与应力 - 应变关系

图 5 所示为单轴压缩试验中不同高温下典型大理岩岩样的声发射振铃计数率与其应力 - 应变曲线的关系示意图。

对不同高温下及高温后大理岩的声发射振铃累计数与应力应变曲线关系图进行分析, 可以得到如下规律:

从岩样不同温度下的振铃计数率随应变的变化关系可以看出, 随着温度的升高, 大理岩的声发射振铃计数率逐渐趋于密集, 出现此现象的原因是由于声发射可以作为岩石内部裂纹演化发展的外在显现, 与损伤具有一致性<sup>[14]</sup>, 温度的升高导致岩样内部裂纹的产生及扩展, 从而导致释放出来的能量和声发射率增高。值得注意的是, 800℃ 实时高温作用下, 大理岩的应力应变曲线塑性变形阶段较为明显, 此阶段应变量

明显增加且持续时间较长, 此时岩样在塑性变形阶段的声发射活动出现相对平静现象, 这与文献[15]中所述的结论相一致。比较高温下及高温后大理岩的声发射振铃计数率, 可以发现高温下的声发射率密集程度明显比高温后密集, 由此可知经历高温后的岩样内部的损伤程度相较高温下较小, 且稳定性较高。关于大理岩内部结构损伤的具体描述详见文献[16]。

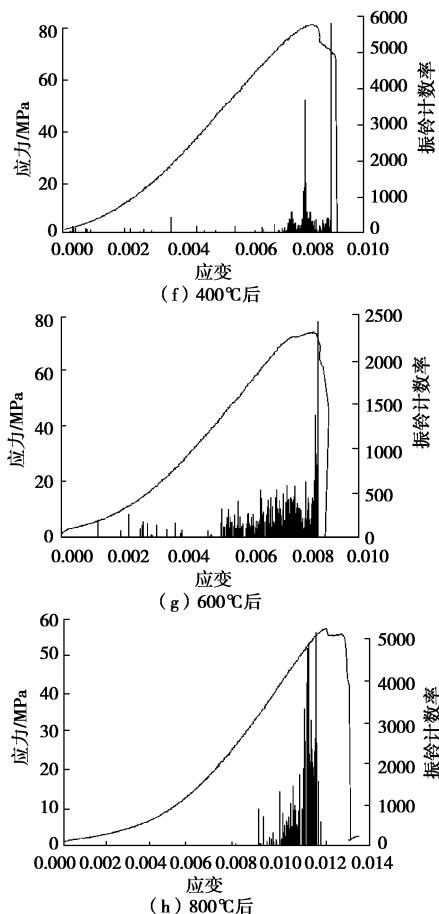
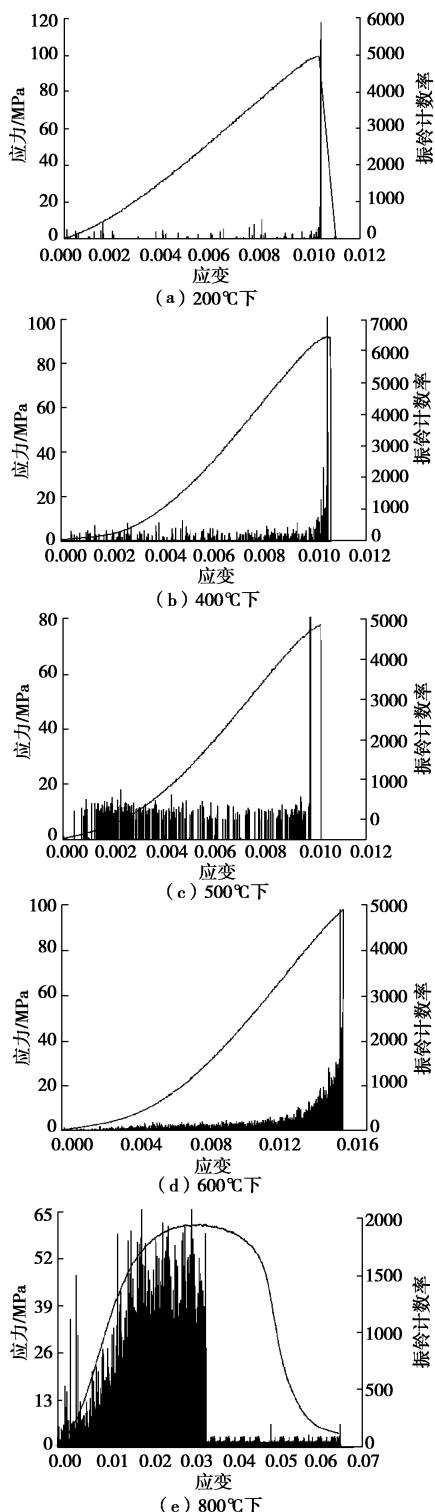


图 5 高温大理石应力 - 应变和振铃计数率的关系曲线

Fig. 5 Curves of stress-strain and ring-down count rate of marble under high temperatures

分析大理岩的声发射率与其应力应变曲线的对应关系, 可知加载初期各温度下都有不同程度的声发射计数率的产生, 但数值都很小, 此时对应着大理岩应力应变曲线的初始压密阶段。其主要原因是此阶段载荷作用导致岩样内部的初始缺陷和微裂纹开始闭合, 这个过程往往会造成粗糙面的破坏以致产生声发射信号, 但能量较低, 则振铃计数率数值较小; 随着载荷的逐渐增大, 应力应变曲线进入线弹性阶段, 在此阶段的前期和中期声发射活动仍较少, 声发射率与初始加载阶段变化不大, 可知此阶段大理岩试件所受的应力还不足以在其内部形成新裂纹; 继续加载, 在应力应变曲线弹性阶段的后期, 大理岩内部的新裂纹和缺陷孔洞等不断产生, 声发射率趋于活跃。当这些裂纹、孔洞发生扩展、聚合及贯通形成断裂面后, 振铃计数率则在临近岩石峰值强度时达到峰值。这与谢强等<sup>[17]</sup>所述的结论类似, 即多数岩石在临近破坏时(峰值应力的 95%), 声发射活动异常活跃, 且声发射率在试件破坏时达到最大值, 能率相对较高。这表明高温作用下大理岩的声发射活动也存在此规律。由此可见, 通过岩石声发射率来检测其破坏情况能够适用于岩石

力学相关工程实践。当岩样破坏后, 除 800°C 高温下应力逐渐降低外, 其他温度作用下应力都立即卸载至零点, 此过程中几乎检测不到任意微小的声发射信号。

### (2) 振铃累计数与应力 - 应变的关系

图 6 所示为 200°C ~ 800°C 不同高温下大理岩的声发射振铃累计数与对应的应力 - 应变曲线之间的关系。

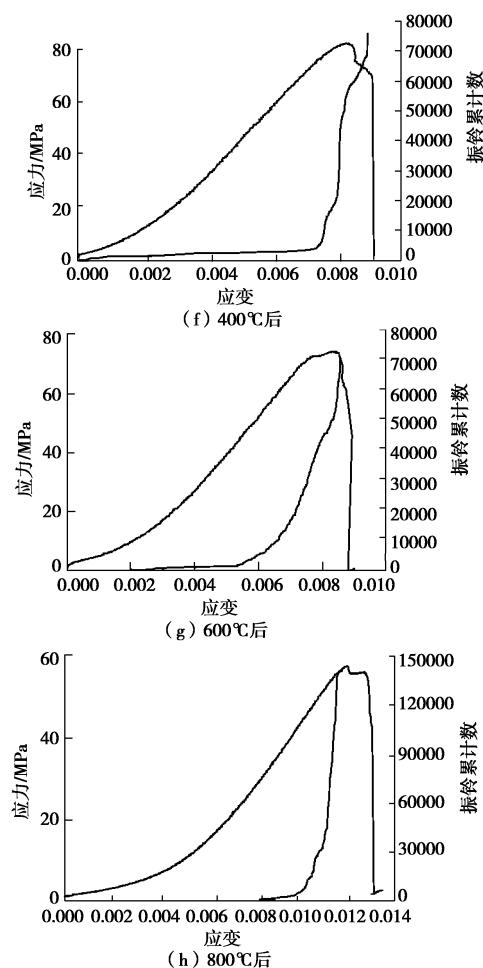
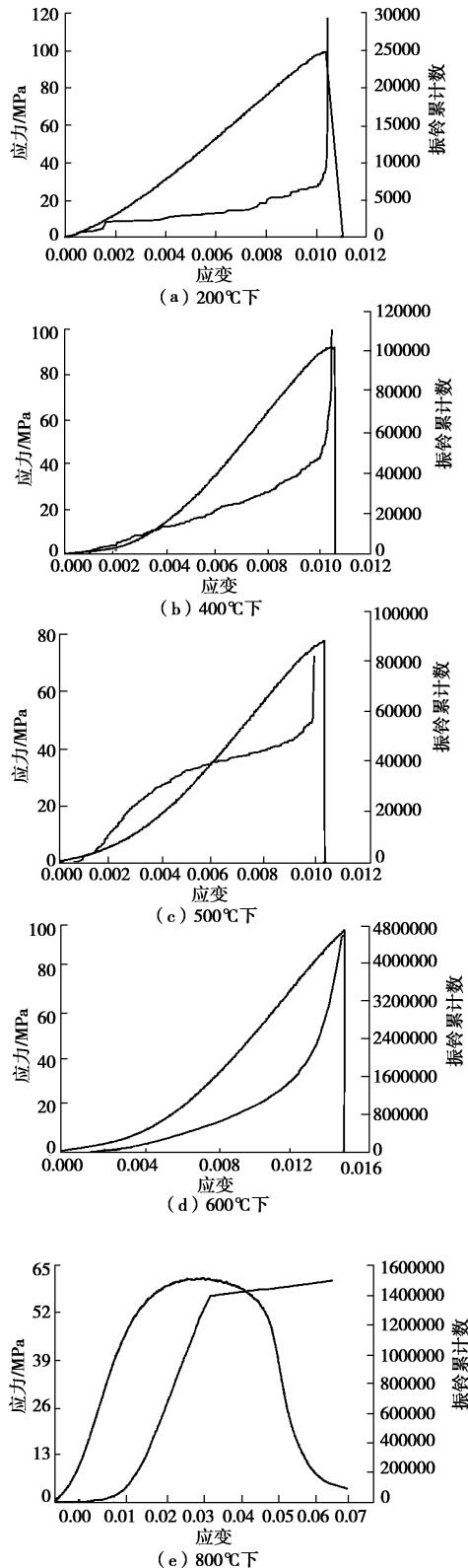


图 6 高温大理岩应力 - 应变和振铃累计数的关系曲线

Fig. 6 Curves of stress-strain and ringing cumulative number under high temperatures

由图 6 可知, 各个温度条件下的大理岩声发射振铃累计数随应变(时间)的变化规律有一定的相似。在岩石的初始受压阶段, 其振铃累计数保持在一个较小而恒定的数值, 基本上不发生变化; 随着载荷的增加, 岩石开始出现弹性变形, 应力应变曲线呈线性关系, 但塑性变形和裂纹扩展都未发生, 此阶段振铃累计数有所增加, 但幅度较小; 继续加载, 岩石内部的裂纹开始稳定扩展, 在大理岩应力应变曲线弹性阶段的后期而在峰值强度之前, 声发射振铃累计数显著增加, 并当单轴压缩的荷载达到岩样的最大承载力即岩样将发生破坏时, 累计数增至最大, 即其与应变的关系曲线斜率达到最大。

与振铃计数率和应力 - 应变关系曲线类似的是, 800°C 实时高温作用下, 本试验中所用大理岩岩样在达到峰值强度后存在一段明显的塑性变形, 此时岩样的声发射活动出现了相对平静的现象。这说明岩石的声发射平静期客观来说是存在的, 并较容易在塑性变形明显的岩石上观察到, 此阶段应力变化缓慢而相对应变增加较快。对 400°C, 600°C 以及 800°C 高温下及高

温后大理岩的声发射振铃累计数进行比较可知, 同等高温下的累计数明显要高于高温后, 表明高温下岩石受温度影响造成的内部结构损伤程度大于高温后。

### 3 结 论

(1) 加温过程中, 高温导致大理岩的内部结构发生明显的局部热破裂, 从而岩石产生了较为强烈的声音发射信号, 且随温度的升高而趋于活跃。

(2) 随着温度的升高, 单轴压缩下大理岩的声发射振铃计数率逐渐趋于密集, 在临近破坏时声发射活动异常活跃, 并且声发射率在岩样破坏时达到最大值。

(3) 400℃, 600℃, 800℃下大理岩在加载过程中的声发射活动比其对应高温后的更频繁。

(4) 800℃实时高温作用下, 大理岩岩样在达到峰值强度后出现明显的塑性变形, 此变形阶段岩石的声发射信号明显下降, 出现相对平静阶段。

### 参 考 文 献:

- [1] 姜永东, 鲜学福, 尹光志, 等. 岩石应力应变全过程的声发射及分形与混沌特征[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2413 - 2418. (JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, YIN Guang-zhi, et al. Acoustic emission, fractal and chaos characters in rock stress-strain procedure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2413 - 2418. (in Chinese))
- [2] 张黎明, 王在泉, 石磊, 等. 不同应力路径下大理岩破坏过程的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1230 - 1236. (ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SHI Lei, et al. Acoustic emission characteristics of marble during failure process under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1230 - 1236. (in Chinese))
- [3] 许江, 唐晓军, 李树春, 等. 周期性循环载荷作用下岩石声发射规律试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1241 - 1246. (XU Jiang, TANG Xiao-jun, LI Shu-chun, et al. Experimental research on acoustic emission rules of rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1241 - 1246. (in Chinese))
- [4] 梁忠雨, 高峰, 蔺金太, 等. 单轴下岩石声发射参数的分形特征[J]. 力学与实践, 2009, 31(1): 43 - 46. (LIANG Zhong-yu, GAO Feng, LIN Jin-tai, et al. Fractal analysis of the process parameter of rock's acoustic emission under uniaxial compression[J]. Mechanics in Engineering, 2009, 31(1): 43 - 46. (in Chinese))
- [5] 吴刚, 王德咏, 翟松韬. 单轴压缩下高温后砂岩的声发  
射特征[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3237 - 3242. (WU Gang, WANG De-yong, ZHAI Song-tao. Acoustic emission characteristics of sandstone after high temperature under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3237 - 3242. (in Chinese))
- [6] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3283 - 3290. (YIN Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3283 - 3290. (in Chinese))
- [7] 蒋宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1810 - 1814. (JIANG Yu, GE Xiu-run, REN Jian-xi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1810 - 1814. (in Chinese))
- [8] 翟松韬, 吴刚, 张渊, 等. 高温作用下花岗岩的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 126 - 134. (ZHAI Song-tao, WU Gang, ZHANG Yuan, et al. Research on acoustic emission characteristics of granite under high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 126 - 134. (in Chinese))
- [9] 赵兴东, 陈长华, 刘建坡, 等. 不同岩石声发射活动特性的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(11): 1633 - 1636. (ZHAO Xing-dong, CHEN Chang-hua, LIU Jian-po, et al. Experimental study on AE activity characteristics of different rock samples[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008, 29(11): 1633 - 1636. (in Chinese))
- [10] KRAMADIBRATA Suseno, SIMANGUNSONG Ganda Marihot, MATSUI Kikuo, et al. Role of acoustic emission for solving rock engineering problems in indonesian underground mining[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44(3): 281 - 289.
- [11] XU S C, FENG X T, CHEN B R. Acoustic emission characteristics and strength variation of skarn under true triaxial test[C]// 2nd ISRM International Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics: Achievements and Ambitions. Beijing, 2012: 215 - 220.
- [12] GANNE P, VERVOORT A, WEVESS M. Quantification of

- pre-peak brittle damage: Correlation between acoustic emission and observed micro-fracturing[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2007, **44**(5): 720 – 729.
- [13] NIE W, HE M C, ZHAO Z Y. Acoustic emission signature of different oriented sandstone specimens[C]// Rock Stress and Earthquakes-Proceedings of the 5th International Symposium on In-Situ Rock Stress. Beijing, 2010: 189 – 194.
- [14] TANG C A, XU X H. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect function[J]. Journal of Seismological Research, 1990, **13**(2): 203 – 213.
- [15] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(15): 2499 – 2503. (LI Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(15): 2499 – 2503. (in Chinese))
- [16] 吴 刚, 翟松韬, 李玉寿, 等. 高温下大理岩受压破坏的细观结构分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 2): 3579 – 3585. (WU Gang, ZHAI Song-tao, LI Yu-shou, et al. Mesostructural investigation on marbles under uniaxial compression at high temperatures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S2): 3579 – 3585. (in Chinese))
- [17] 谢 强, 张永兴, 余贤斌. 石灰岩在单轴压缩条件下的声发射特性[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, **24**(1): 19 – 24. (XIE Qiang, ZHANG Yong-xing, YU Xian-bin. Study on acoustic emission of limestone in uniaxial compression test[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2002, **24**(1): 19 – 24. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)