

薛东杰,周宏伟,胡本等.热力耦合作用花岗岩细观破坏强度及声发射规律[J].煤炭学报,2015,40(9):2065-2074. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1497
Xue Dongjie, Zhou Hongwei, Hu Ben et al. Thermal and mechanical coupling-induced meso-scale mechanism on failure strength and AE law of granite[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2065-2074. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.1497

热力耦合作用花岗岩细观破坏强度及声发射规律

薛东杰,周宏伟,胡本,任伟光

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:利用 SEM 全数字液压高温疲劳实验系统开展花岗岩细观力学实验,采用多阈值分割法区分材料组成并构建细观数值模型,开展单轴拉伸条件下花岗岩热力耦合作用下的强度破坏特征与声发射规律研究。设计 3 种升温加载路径:路径 I:先升温到预定温度点后位移加载至破坏;路径 II:先加载到预定载荷点后升温至破坏;路径 III:以固定的载荷增量温度增量交替升温加载直至试件破坏。详细探讨了 3 种不同路径下声发射规律,在不同的温度强度区间,可分为 3 种类型。3 种不同路径均表现为花岗岩的强度随温度的升高呈指数型衰减趋势,强度是温度的单值函数。细观模型中不同温度-载荷路径下的声发射特性主要取决于破坏时的温度和强度。

关键词:细观力学;细观数值模型;单轴拉伸;热力耦合

中图分类号:TD315 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2015)09-2065-10

Thermal and mechanical coupling-induced meso-scale mechanism on failure strength and AE law of granite

XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, HU Ben, REN Wei-guang

(School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on SEM, a series of experiments on granite meso-scale mechanics were carried out. As a comparison, an accurate numerical model was established using multi-threshold segmentation method to distinguish different materials in the granite samples. A further study had been made to focus on thermal and mechanical coupling-induced meso-scale behavior including failure strength and acoustic emission (i. e. AE) under uni-axial tension. Three coupling paths were designed for heating and loading axial tension. The first path is to heat the samples at a predetermined temperature, then increase the loading until the destruction of samples. By contrary, the second path is to load the samples to a predetermined value, then heat the samples until their failure. Considering the coupled effect, the third path is to pressure and heat the samples alternately. The results show that the different laws of acoustic emission can be summarized into three types corresponding to the different range of temperature and strength. There is an exponentially decreasing trend between the strength and temperature in different paths. The failure strength is a single-valued function of temperature. In the simulation model, the acoustic emission characteristics under different load paths depend mainly on the coupled value of temperature and stress.

Key words: meso-scale mechanics; meso-scale simulation model; uni-axial tension; thermal and mechanical coupling

收稿日期:2014-11-06 责任编辑:许书阁

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2014M550102);国家自然科学基金青年基金资助项目(51504257);中央高校基本科研业务经费资助项目(2010YL07)

作者简介:薛东杰(1986—),男,山东微山人,博士后。E-mail: xuedongjie@163.com

深部开采和核废料处置问题越来越受到关注,研究温度和应力作用下岩石的变形、强度和破坏机制也成为热点。北山花岗岩是我国高放废物深地质处置库预选区的理想围岩,将来待核废料处置其中,随着核素迁移、衰减释放热能,围岩必然承受热耦合作用,而单轴拉伸是围岩最容易破裂的模式,因此研究单轴拉伸条件下热力耦合破裂规律对于围岩的稳定性防护至关重要。目前关于热力耦合条件下岩石材料研究主要集中在物理力学性质、热破裂特征描述及细-微观破裂机理、热损伤理论及本构方程 3 个方面。热物理力学性质可以通过不同尺度的试样开展实验研究,如热膨胀系数^[1]、导热系数^[2]、渗透率^[3]、单轴抗拉强^[4]、弹性模量^[5]及断裂韧性^[6]。以上研究多基于实验及理论研究,为非均匀性在宏观统计特征上一种表征,但难以揭示破坏过程及机理。事实上,非均匀性问题是解决破裂损伤机理及本构方程构建的前提,更是微细观尺度研究的基础,不仅影响材料的力学性质,而且对裂纹扩展模式有较大影响。而精确描述材料非均匀性难题已成为解决宏观材料力学性质与微细观尺度联系的鸿沟。而非均匀定量表征又是数值建模的基础,为重构材料力学特性的前提^[7-9]。声发射技术可以揭示材料的时空破坏规律,利于揭示破坏过程及机理^[7-9],目前有关力-热耦合作用下岩石细观尺度下声发射特征研究成为热点^[10-15],但尚未解决高温环境下声发射系统的适应性^[10,13-15]、试样尺度较小带来空间定位精度^[13,15]与除噪及采样精度^[15],因此通过重构细观特征反映材料的不均匀性并基于此开展数值研究成为解决此类问题的辅助手段^[16-25]。以上研究多集中于数值方法研究声发射规律,虽有不足,但此技术仍是将岩石微破裂、变形和损伤定量化联合研究的强有力工具,并在水力劈裂、高放废物处置及石油工程中应用广泛^[26]。

综上所述,关于热力耦合作用下的岩石细观强度破坏特征,尤其是不同载荷-温度路径下材料损伤规律或声发射规律研究较少。强度特征是材料的宏观表象,无法反映内在损伤演化,借助声发射研究有助于解决不同路径下材料损伤机制。

1 三维细观结构建模

岩石是非均质的岩土工程材料,对花岗岩而言,内部 3 种主要物质为长石、云母和石英,3 种材料有着不同的力学性质。为了准确区分 3 种矿物成分,利用 X-射线衍射分析主要矿物成分,并利用岛津 SEM 全数字液压高温疲劳实验系统循环扫描拍照(图 1)。

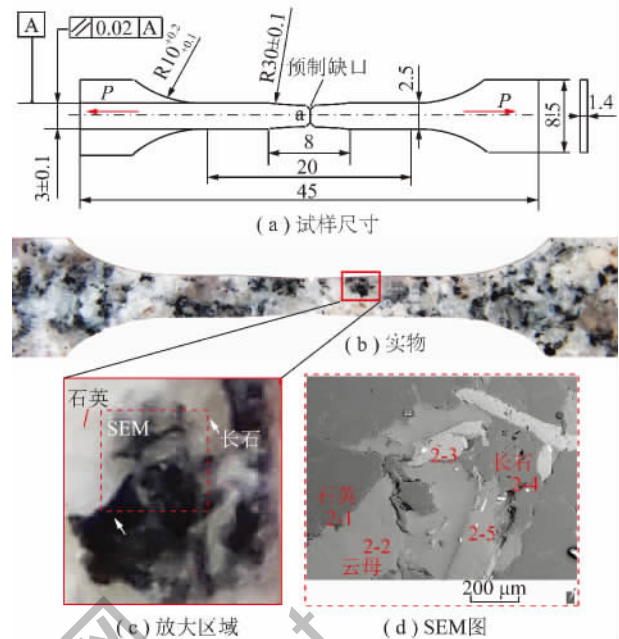


图 1 数码相机扫描电子显微镜能谱实验结果

Fig. 1. Digital photos from camera and SEM

图片处理上,用数码相机获得北山花岗岩 SEM 试件的高清实物图片,调整背景颜色和图片分辨率,并将其变成灰度图,进而得到灰度柱状分布图。对于彩色图像,采用 RGB(红绿蓝)区分是最常见的,但也可根据不同的要求将 RGB 空间转换为其他的颜色空间,如 YIQ, YUV 或 HSI 空间等^[20-21]。由于所考虑的花岗岩是由 3 种材料组成,为了图像处理简单方便,采用多阈值分割方法来分辨 3 种材料。

通过仔细分析数据,灰度值在 73.855 2 处有一个低峰值,在 92.818 0 和 159.187 9 处各有一个峰值,故选取这 3 个数作为整个灰度图的阈值。当阈值等于 73.855 2 时,灰度值在区间 [0, 73.855 2] 的像素点都可看成是黑云母,从而自动地将所有的黑云母分割出来,如图 2(a) 中的黑色部分;当阈值等于 92.818 0 时,灰度值在区间 [73.855 2, 92.818 0] 的像素点为非岩石区域,即可区分岩石区域和非岩石区域,如图 2(b) 中的黑色部分为黑云母,而白色部分为长石和石英,像素点灰度值大于 92.818 0;当阈值等于 159.187 9 时,灰度值在区间 [159.187 9, 255.0] 的像素点为长石,如图 2(c) 中的白色部分,那么剩下在区间 [92.818 0, 159.187 9] 的像素点便是石英。最终花岗岩中的 3 种材料与所选阈值的关系如图 2 所示,要确定选取的阈值确实有最佳的分割效果,必须要经过反复的选择来决定这个值。通过纪录每一像素点的具体位置及其独特的颜色,就可以建立起岩石的真实细观图像结构。

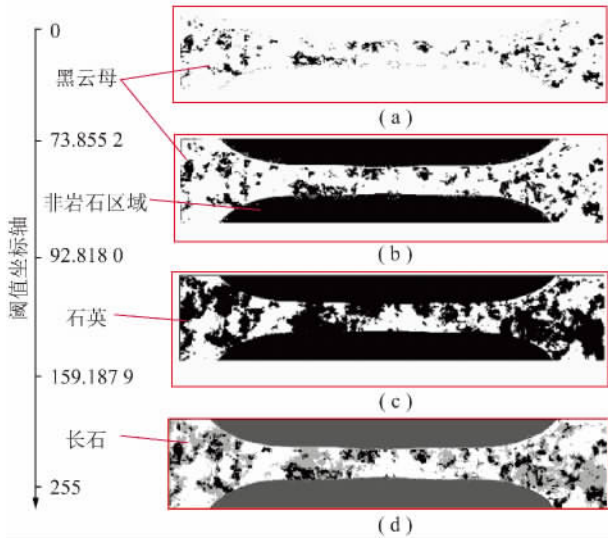


图 2 阈值分割结果

Fig. 2 Distinguished results by multi-threshold segmentation method

在 ANSYS 软件中编程, 通过定点区域真实赋值, 生成有限元网格, 即可生成细观有限元模型(图 3)。因为模型受力状态为单向拉伸, 易在弯折处产生应力集中现象(图 3(a)), 这是模型建模缺陷导致的误差; 另一方面模型两端圆弧处是施加约束的地方, 在拉伸应力作用下并不承受实际载荷。因此为简化计算, 模型进行调整: ① 处理图像时去掉两端的加载端, 直接对只包含模型中部的图像进行多阈值分割和矢量数据转换, 避免了处理圆弧的困难, 同时减少网格数量; ② 手工对试件中部建模并划分有限元网格, 然后将转换后的矢量数据通过某种关系映射到手工划分的网格中, 优点是既体现了真实的材料分布, 又没有忽略真实模型重要的细节部分, 如预制缺口。

两种模型需要进行信息匹配, 最优的办法就是在考虑一定误差条件下材料属性坐标的一一对应, 即 2 个模型中存在如下关系: 若 $|x'_j - x_i| \leq \delta, |y'_j - y_i| \leq \delta$; 则 $MAT'(j) = MAT(i)$, 其中, δ 为公差(一个很小的正数)。则得到平面有限元模型(图 3(b))。由于试件厚度只有 $B = 1.5 \text{ mm}$, 相对于高度和长度方向的尺寸很小, 故材料在厚度方向看作均匀, 直接从平面网格拖拉成为三维网格(图 3(c))。这种方法生成的模型在 XY 方向体现了真实材料的非均匀性, 但 Z 方向即厚度方向是均匀的, 而且施加的载荷约束等都关于 $Z = B/2$ 的平面对称。所以为了减小计算规模降低计算代价, 在 Z 方向只取模型的一半即模型厚度为 $B/2$ 。最终的三维细观结构有限元模型如图 3(c) 所示, 77 184 个单元, 89 090 个节点, 其中 13 500 个云母单元, 21 375 个石英单元, 42 309 个长石单元。

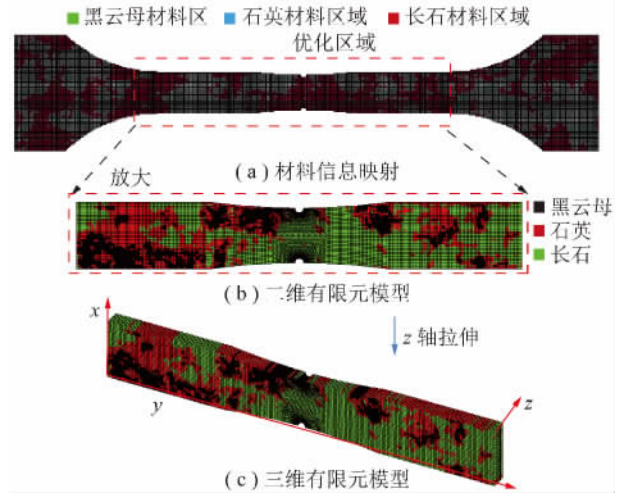


图 3 细观模型结构生成过程

Fig. 3 Generation of meso-structure of sample

2 模拟实验方案

考虑 3 种不同的升温加载路径, 如图 4 所示。路径 I: 先升温到预定温度点后位移加载至破坏; 路径 II: 先加载到预定载荷点后升温至破坏; 路径 III: 以固定的载荷增量温度增量交替升温加载直至试件破坏。依据路径 I 中室温下计算得到的最大载荷值确定路径 II 中的多级载荷。路径 III 尽可能选取小的载荷增量 - 温度增量, 以使试件破坏前经历次数足够多温度和载荷的交替作用。依据以上原则, 最终在每种路径下各计算 11 种不同的情况, 路径 I 预制 11 个不同的温度 (T), 路径 II 预制 11 个不同的载荷 (P), 路径 III 预制 11 个不同载荷增量 - 温度增量的组合 ($\Delta P - \Delta T$), 具体计算方案见表 1。为了在数值计算过程中更好地收敛, 不管哪一种路径升温 and 加载都是分多个子步进行, 逐渐到达目标温度点或载荷点, 其中每一子步的温度增量 $dT = 4.75 \text{ }^\circ\text{C}$, 或载荷增量 $dP = 0.132 \text{ N}$, 或位移增量 $ds = 0.02 \text{ }\mu\text{m}$ (表 1)。

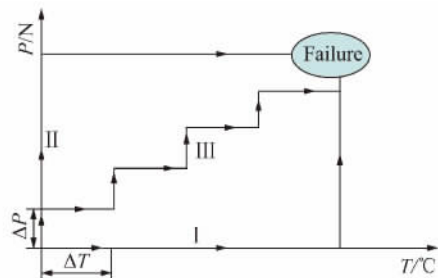


图 4 数值模拟中需要计算的 3 种升温加载路径

Fig. 4 Three coupled temperature and pressure loading paths
计算采用 LS - DYNA^{3D} 求解器进行温度场对结构

表 1 数值模拟 3 种路径升温加载详细方案

Table 1 Details about three loading paths

路径 I	$T/^\circ\text{C}$	25	63	82	101	120	158	177	196	234	272	300
路径 II	P/N	0	0.99	1.65	2.64	3.30	4.95	5.94	6.60	8.25	9.90	10.56
路径 III	$\Delta P/N$	0.99	0.99	1.32	1.65	1.65	1.65	2.64	3.30	3.30	4.95	4.95
	$\Delta T/^\circ\text{C}$	57	19	57	19	38	57	38	38	57	19	38

场的单向耦合求解,采用各向同性的热材料模型计算瞬态热传导温度场,采用 Mohr - Coulomb 材料(剪切破坏和抗拉破坏准则)模型计算结构场。当单元应力状态超过破坏准则时,单元所承载的应力应变即刻消失,成为破坏单元。随着载荷增加破坏单元数目随之增多,形成微裂纹,进而形成贯通宏观裂纹。取黑

云母、长石和石英的热物理力学参数见表 2,设定温度从 25 $^\circ\text{C}$ 升到 500 $^\circ\text{C}$,并假定比热增幅 5%,热导率降幅 50%,密度不随温度的变化而改变。而 3 种矿物的力学参数中除了热膨胀系数增幅 30% 以外,其他的诸如弹性模量、泊松比、抗压抗拉强度等都与温度无关(表 3)。

表 2 花岗岩 3 种矿物热物理计算参数

Table 2 Thermal parameters of three kinds of material in granite

矿物种类	温度/ $^\circ\text{C}$	比热/ $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	热导率/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
黑云母	25	879.3	2.02	2 981
	500	923.265	1.01	
石英	25	700.0	7.69	2 674
	500	735.0	3.85	
长石	25	710.0	1.63	2 650
	500	745.5	0.82	

表 3 花岗岩 3 种矿物力学计算参数^[20-21]Table 3 Physical parameters of three kinds of material in granite^[20-21]

矿物种类	温度/ $^\circ\text{C}$	线膨胀系数/ $^\circ\text{C}^{-1}$	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	摩擦角/ $^\circ$	抗拉强度/MPa
黑云母	25	9.00	69.60	0.25	11.9	59.4	7.04
	500	11.70					
石英	25	7.50	96.40	0.08	35.6	68.5	14.02
	500	9.75					
长石	25	10.00	78.50	0.29	21.1	62.4	11.03
	500	13.00					

3 路径 I 条件结果对比分析: 实验与数值计算

开展路径 I 条件下的花岗岩热力耦合实验,25 $^\circ\text{C}$ 下拉伸最后破坏如图 5 所示,结果显示最终破坏位置即主裂纹并不在预制缺口处,而是在缺口附近的一个截面,而且在试件中部和内部均产生了垂直于拉伸方向的小裂纹,不起主导作用。载荷过峰值点后突然发生破坏,之前几乎没有预兆,属脆性破坏形式。

取峰值应力作为强度,定量分析 25 $^\circ\text{C}$ 的强度值差距较大,120 $^\circ\text{C}$ 时已有 1 个点完全吻合,200 $^\circ\text{C}$ 时 3 个点几乎完全吻合。随着温度升高,数值模拟强度值

越来越接近实验值,在低温区误差较大,在高温区精度较高。因为真实的岩石中有大量初始缺陷(如结构面、裂隙等),尺寸效应放大了细观模型中缺陷的影响,在力学上表现为温度 - 强度数据很大程度上依赖于试件的初始损伤和尺寸,而细观上表现为裂纹的萌生扩展演化都受到原生微裂纹极大的影响。其次,在高温下岩石中的一些矿物可能会发生热熔效应,以至于部分热裂纹闭合,则温度产生的损伤相对会降低一些,从而导致高温下实验得到的强度值可能会再次增大。而细观数值模型在单元结构上是连续的,并未考虑到这些初始缺陷。综上所述,通过对路径 I 数值模拟和实验结果对比分析,数值模型在低温(25 ~

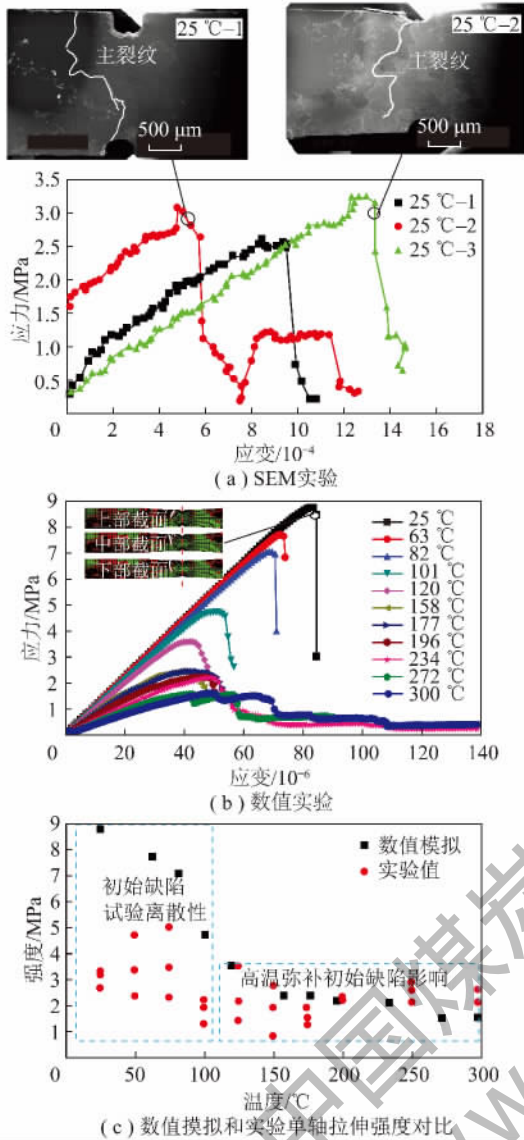


图 5 实验结果对比

Fig. 5 Comparison between simulations and experiments

101 °C) 下趋于理想化, 在中高温(101 ~ 234 °C) 下趋于精确, 可以较好地反映真实的岩石结构, 计算得到的强度值在高温区与实验值比较吻合。

对应力应变曲线中的线性段进行拟合, 可以得到温度 - 弹性模量关系(图 6)。弹性模量表征花岗岩整体抵抗弹性变形的能力。82 °C 之前很少有单元发生热破坏, 25 ~ 82 °C 的弹性模量基本不变, 随着温度升高, 破裂单元越来越多, 弹性模量呈线性递减, 衰减率为 -341.35 MPa/°C, 负号表示呈衰减趋势。

4 不同温度 - 载荷路径下花岗岩声发射特征

通过对 AE 信号的监测分析, 可以反演岩石内部微裂纹演化的时间序列和空间分布。即岩石的声发射与岩石的损伤参量、本构关系等之间存在着内在联系。基于文献 [25] 提出声发射累积量 N 与损伤 D 具

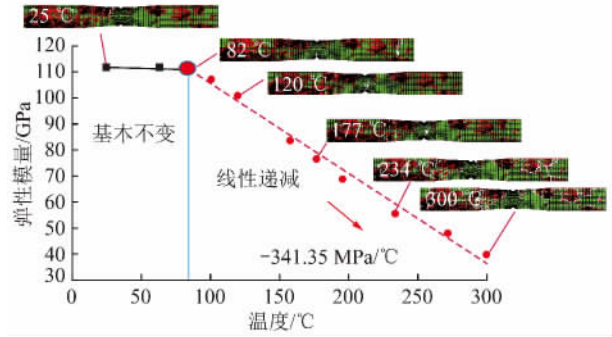


图 6 不同温度下试件的弹性模量

Fig. 6 Elastic modulus at different temperatures

有一致性的假设: $N \propto D$ 。据此, 声发射率与单元破坏的数量成正比, 将计算过程中的累积破坏单元数与时间相关量建立关系, 即可得到变形破坏过程中花岗岩的声发射规律。声发射率是单位时间的声发射数, 也就是单位子步下的声发射数, 所以在数值计算中每一个子步产生的破坏单元数即为试件在这一时刻的声发射率。根据 3 种路径下的数值计算结果, 分别绘出路径 I, II, III 的位移 - 载荷曲线(图 7)、温度 - 位移曲线(图 8)、时间 - 位移曲线(图 9) 以及声发射的时间分布(图 7 ~ 9)。

通过计算 3 种温度 - 载荷路径下试件的变形和声发射率, 将 3 种不同温度 - 载荷路径下得到的声发射时间序列对比分析, 得出以下规律:

(1) 路径 I 中 25 ~ 120 °C 试件破坏之前载荷位移呈现良好线性关系, 破坏几乎是瞬间的, 同时产生大量的声发射, 岩石表现很强的脆性。而路径 II 和路径 III 中虽然没有路径 I 中的载荷位移曲线, 但很多试件在声发射上已经表现出相同的规律。如路径 II 中的 5.94 ~ 10.56 N 试件, 路径 III 中的 (d) $\Delta P = 1.65$ N, $\Delta T = 19$ °C; (h) $\Delta P = 3.30$ N, $\Delta T = 38$ °C; (i) $\Delta P = 3.30$ N, $\Delta T = 57$ °C; (j) $\Delta P = 4.95$ N, $\Delta T = 19$ °C; (k) $\Delta P = 4.95$ N, $\Delta T = 38$ °C 试件, 在主破裂之前只有零星几个声发射出现, 没有前震或前震不明显, 此阶段的变形几乎完全线性。主破裂之后也几乎没有声发射点出现, 即没有余震, 而主破裂时声发射数量显著, 释放了大量能量, 破坏性极强, 岩石表现出很强的脆性, 属于主震型。

(2) 路径 I 中 158 ~ 196 °C 试件在破坏之前的载荷位移线性程度比主震型差, 路径 II 中 4.95 N 试件与之类似, 破坏前有一定程度的非线性变形。路径 III 中 (b) $\Delta P = 0.99$ N, $\Delta T = 19$ °C, (c) $\Delta P = 1.32$ N, $\Delta T = 57$ °C, (e) $\Delta P = 1.65$ N, $\Delta T = 38$ °C, (f) $\Delta P = 1.65$ N, $\Delta T = 57$ °C, (g) $\Delta P = 2.64$ N, $\Delta T = 38$ °C, 这些试件在破坏前的变形也有非线性部分。在声发射

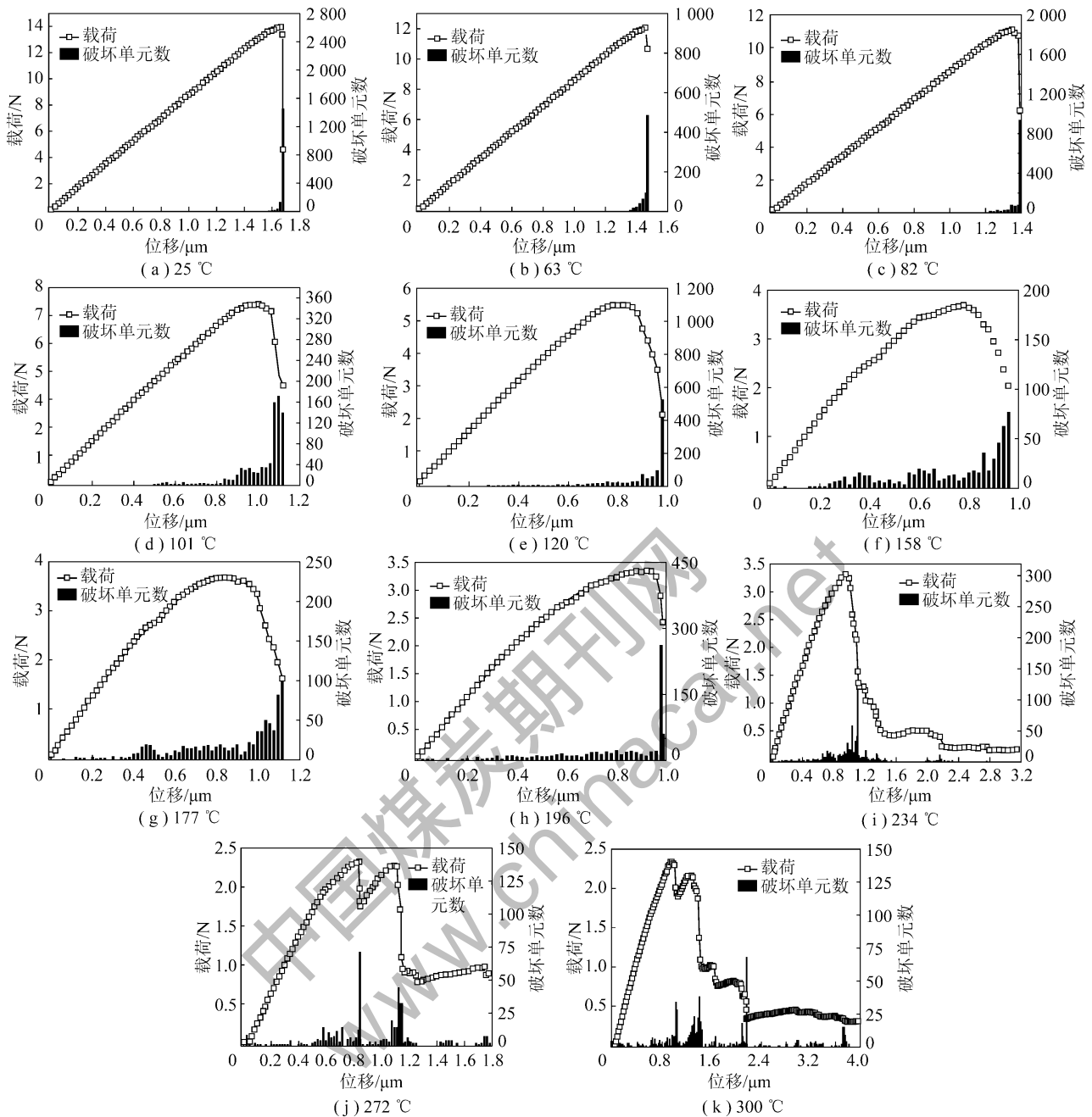


图7 路径 I 不同温度下试件载荷 - 位移曲线和声发射时间序列

Fig. 7 AE series with time and displacement with pressure in the first path

方面这些试件与主震型不同的是前震明显,大震后还有余震。一开始加载或升温时声发射较少,随着加载的进行声发射逐渐增多的趋势较明显,主破裂之后声发射很快就减小,应力降明显,而且其速度比声发射增加时快得多。与主震型类似,主破坏时的声发射点也最多,释放了相当多的能量,表现出较强的脆性,但都比主震型要小,属于前震—主震—余震型。

(3) 路径 I 中 234 ~ 300 °C 试件在加载初期就已经表现出非常明显的非线性特点,峰后岩石的性质呈逐渐劣化特征,即软化变形阶段明显,发生了多次应

力降。路径 II 中 0 ~ 3.30 N 试件,以及路径 III 中 (a) $\Delta P = 0.99 \text{ N}$, $\Delta T = 57 \text{ }^\circ\text{C}$ 试件,其变形与温度之间也表现非常显著的非线性特点。不仅如此,试件在刚刚开始加载或升温不久就有少量的声发射出现,在时间上呈现出无规则的现象,前震、主震和余震很难分辨开,没有声发射率明显变化的阶段。尽管在接近主破裂时也有几次声发射高峰,但释放的能量和声发射率相对其他两个震型要小很多,属于群震型。

(4) 先升温后加载情形下 25 ~ 120 °C 载荷的作用大于温度,试件极限变形随温度的升高而减小,破

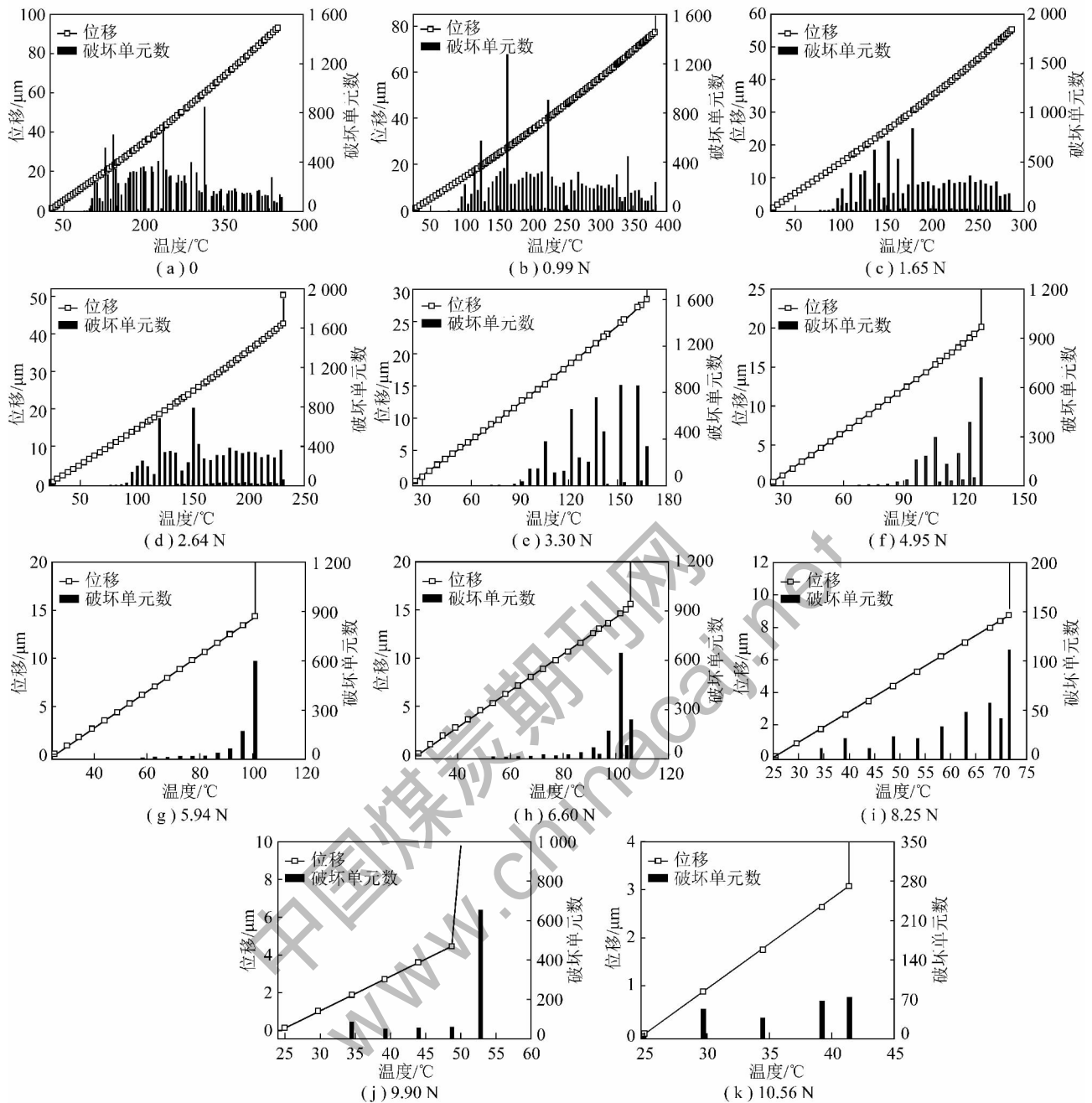


图 8 路径 II 不同载荷下试件温度 - 位移曲线和声发射时间序列

Fig. 8 AE series with time and displacement with temperature in the second path

坏呈强烈脆性特点, 拉伸对于模型是加载; 158 ~ 196 °C 载荷的作用几乎等同于温度, 此温度范围内试件处于脆性向延性过渡阶段, 变形能力几乎没有发生变化; 234 ~ 300 °C 载荷的作用小于温度, 试件的极限变形比其他温度点都要大, 破坏呈延性破坏特点。试件在先升温后加载时表现出低温下脆性破坏, 高温下延性破坏趋势的现象, 即“脆 - 延转换”, 根本原因是拉伸阶段能量释放导致的模型局部卸载。拉伸使先前试件升温积累的应变能得到释放, 这种能量的释放不是源于单元的破碎, 而是单元应力应变的减小, 即高温下拉伸从能量意义上来说是一种“卸载”。

根据以上分析, 将 3 种路径下 33 个试件最终破坏时的温度 - 强度数据按照以上所得的 3 种声发射基本类型进行分组, 最终得到温度 - 强度组合与声发射的关系(图 10)。主震型的温度 - 强度范围: 25 ~ 120 °C, 3.5 ~ 8.8 MPa; 前震 - 主震 - 余震型的温度 - 强度范围: 101 ~ 196 °C, 2.1 ~ 3.8 MPa; 群震型的温度 - 强度范围: 168.5 ~ 452.9 °C, 0 ~ 2.1 MPa。显而易见, 在温度较低强度较高条件下, 试件的声发射呈现主震型特点; 在温度较高强度较低条件下, 试件的声发射呈现群震型特点; 而温度和强度都居中的情况下, 试件的声发射呈现前震 - 主震 - 余震型特点。

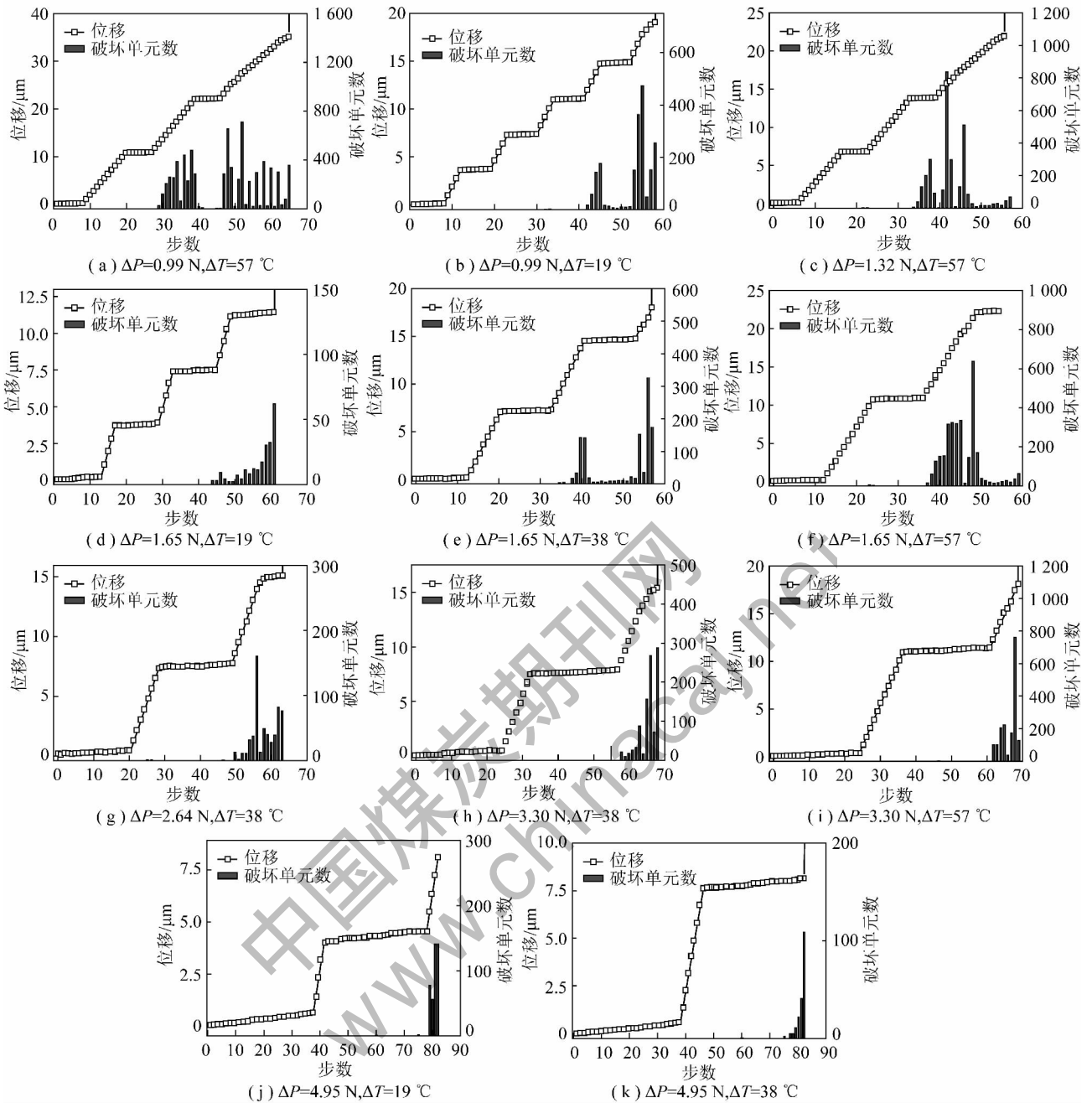


图 9 路径Ⅲ不同温度载荷增量下时间位移曲线和声发射时间序列

Fig. 9 AE series and displacement with time in the third path

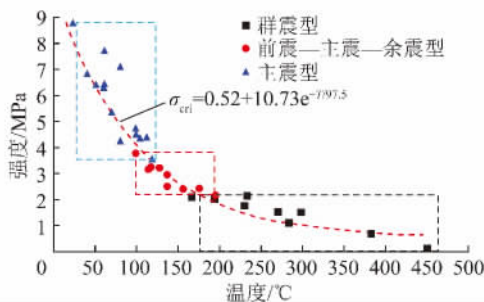


图 10 强度与温度关系中声发射规律

Fig. 10 AE law in the failure strength with temperature

针对 3 种不同路径,同样可以得到温度 - 强度关系(图 11) 3 种路径均表现为花岗岩的强度随温度的升高而降低的趋势,即针对细观模型,强度是温度的单值函数。通过 3 种温度 - 载荷路径下的 33 个数据点进行拟合,得到

$$\sigma_{cri} = 0.52 + 10.73e^{-T/97.5} \quad (1)$$

式(1)拟合精度较高,形式简单,对于花岗岩单轴拉伸条件峰值破坏强度随温度呈指数衰减趋势,当温度趋于较大值时,强度值趋于常数 0.52 MPa。

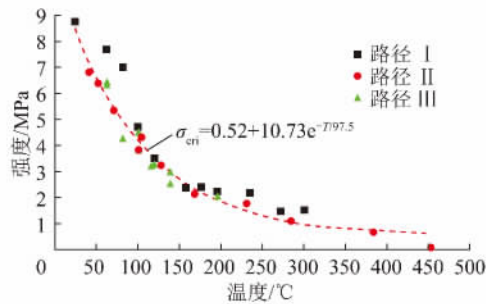


图 11 不同温度 - 载荷路径下北山花岗岩强度特征

Fig. 11 Meso-failure strength of granite under different loading paths

5 结论与讨论

(1) 利用花岗岩材料组成的灰度差异, 采用多阈值分割方法可以有效的区分材料组成, 为细观模型构建的基础; 通过材料属性映射可以较好地完成模型优化。

(2) 与实验相比, 细观模型无法考虑初始缺陷损伤问题, 导致结果在低温下趋于理想化, 中高温下趋于精确。其主要原因因为细观尺度下初始缺陷在低温作业下主导岩石的强度, 高温作用下热熔效应弥补了原生裂纹或热裂纹影响, 因此细观数值模型可以很好地反映真实的岩石结构, 但在低温区有待进一步修正初始缺陷影响。

(3) 82 °C 之前没有单元发生热破坏, 25 ~ 82 °C 的弹性模量基本不变, 随着温度的升高, 破裂单元越来越多, 弹性模量呈线性递减, 衰减率为 -341.35 MPa/°C, 负号表示呈衰减趋势。

(4) 细观模型中不同温度 - 载荷路径下的声发射特性完全取决于破坏时的温度和强度。在温度较低强度较高(25 ~ 120 °C, 3.5 ~ 8.8 MPa) 条件下, 声发射呈现主震型; 在温度较高强度较低(168.5 ~ 452.9 °C, 0 ~ 2.1 MPa) 条件下, 呈现群震型; 而温度和强度都居中(101 ~ 196 °C, 2.1 ~ 3.8 MPa) 的情况下, 呈现前震 - 主震 - 余震型特点。

(5) 基于细观模型单轴拉伸条件下, 3 种不同路径均表现为花岗岩的强度随温度的升高而降低的趋势, 呈指数衰减趋势: $\sigma_{cri} = 0.52 + 10.73e^{-T/97.5}$, 强度是温度的单值函数。

需要特别指出的是: 由于试验设备条件限制, 试样尺寸模型长度约 45 mm, 而高温系统处于封闭环境, 尚无法开展声发射监测研究, 因此通过重构细观特征反映材料的不均匀性并开展数值声发射研究有助于辅助解析此类问题。

参考文献:

- [1] Van der Molen I. The shift of the $\alpha - \beta$ transition temperature of quartz associated with the thermal expansion of granite at high pressure [J]. *Tectonophysics*, 1981, 73(4): 323 - 342.
- [2] Wai R S C, Lo K Y, Rowe R K. Thermal stress analysis in rocks with nonlinear properties [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1982, 19(5): 211 - 220.
- [3] Shmonov V M, Vitovtova V M, Zharikov A V. Experimental study of seismic oscillation effect on rock permeability under high temperature and pressure [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(3): 405 - 412.
- [4] Oda M. Modern developments in rock structure characterization [J]. *Comprehensive Rock Engineering*, 1993, 1: 185 - 200.
- [5] Lau J S O, Gorski B, Jackson R. The effects of temperature and water-saturation on mechanical properties of Lac du Bonnet pink granite [A]. 8th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics [C]. 1995.
- [6] Al-Shayea N A, Khan K, Abduljawad S N. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode (I - II) fracture toughness of a limestone rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(4): 629 - 643.
- [7] Nasseri M H B, Rezanezhad F, Young R P. Analysis of fracture damage zone in anisotropic granitic rock using 3D X-ray CT scanning techniques [J]. *Int. J. Fracture*, 2011, 168: 1 - 13.
- [8] Yun T S, Jeong Y J, Kim K Y, et al. Evaluation of rock anisotropy using 3D X-ray computed tomography [J]. *Eng. Geol.*, 2013, 163: 11 - 19.
- [9] 鞠杨, 谢和平, 郝泽民, 等. 基于 3D 打印技术的岩体复杂结构与应力场的可视化方法 [J]. *科学通报*, 2014, 59(32): 3109 - 3119.
- [10] Ju Yang, Xie Heping, Zheng Zemin, et al. Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2014, 59(32): 3109 - 3119.
- [10] 张渊, 曲方, 赵阳升. 岩石热破裂的声发射现象 [J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(1): 73 - 75.
- [10] Zhang Yuan, Qu Fang, Zhao Yangsheng. Acoustic emission phenomena of thermal cracking of sandstone [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(1): 73 - 75.
- [11] 张志镇, 高峰, 徐小丽. 花岗岩单轴压缩的声发射特征及热力耦合模型 [J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(1): 70 - 74.
- [11] Zhang Zhizhen, Gao Feng, Xu Xiaoli. Acoustic emission characteristics and thermodynamic coupling model of granite under uniaxial compression [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(1): 70 - 74.
- [12] 王德咏, 吴刚, 葛修润. 高温作用后石灰岩受压破裂过程的声发射试验研究 [J]. *上海交通大学学报*, 2011, 45(5): 743 - 748.
- [12] Wang Deyong, Wu Gang, Ge Xiurun. Acoustic emission characteristics of limestone during compression and fracture after high temperature [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 45(5): 743 - 748.
- [13] 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 Deyong, Zhai Songtao. Acoustic emission characteristics of sandstone after high temperature under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3237 - 3242.
- [14] 武晋文, 赵阳升, 万志军, 等. 高温均匀压力花岗岩热破裂声发射特性实验研究 [J]. 煤炭学报 2012, 37(7): 1111 - 1117.
Wu Jinwen, Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, et al. Experimental study of acoustic emission of granite due to thermal cracking under high temperature and isostatic stress [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1111 - 1117.
- [15] 武晋文, 赵阳升, 万志军, 等. 热力耦合作用鲁灰花岗岩蠕变声发射规律 [J]. 岩石力学与工程学报 2012, 31(S1): 3061 - 3067.
Wu Jinwen, Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, et al. Creep acoustic emission rule of gray granite from Shandong province with thermo-mechanical coupling effects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012, 31(S1): 3061 - 3067.
- [16] Hazzard J F, Young R P. Simulating acoustic emissions in bonded-particle models of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2000, 37(5): 867 - 872.
- [17] Hazzard J F, Young R P. Dynamic modelling of induced seismicity [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2004, 41(8): 1365 - 1376.
- [18] Wanne T S, Young R P. Bonded-particle modeling of thermally fractured granite [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2008, 45(5): 789 - 799.
- [19] Cai M, Kaiser P K, Morioka H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2007, 44(4): 550 - 564.
- [20] 岳中琦, 陈沙, 郑宏, 等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析 [J]. 岩石力学与工程学报 2004, 23(6): 889 - 897.
Yue Zhongqi, Chen Sha, Zheng Hong, et al. Digital image proceeding based on finite element method for geomaterials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004, 23(6): 889 - 897.
- [21] Yue Z Q, Chen S, Tham L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing [J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30: 375 - 397.
- [22] 唐世斌, 唐春安, 朱万成, 等. 热应力作用下的岩石破裂过程分析 [J]. 岩石力学与工程学报 2006, 25(10): 2071 - 2078.
Tang Shibin, Tang Chun'an, Zhu Wancheng, et al. Numerical investigation on rock failure process induced by thermal stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2071 - 2078.
- [23] 康健, 赵明鹏, 赵阳升. 随机非均质热弹性力学模型与岩石热破裂门槛值的数值试验研究 [J]. 岩石与力学工程学报 2004, 23(14): 2331 - 2335.
Kang Jian, Zhao Mingpeng, Zhao Yangsheng. Random non-homogeneous thermal elastic mechanics model and numerical tests on thermal cracking threshold of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2004, 23(14): 2331 - 2335.
- [24] 梁正召, 唐春安, 黄明利, 等. 岩石破裂过程中声发射模式的数值模拟 [J]. 东北大学学报(自然科学版) 2002, 23(10): 1008 - 1011.
Liang Zhengzhao, Tang Chun'an, Huang Mingli, et al. Numerical simulation of patterns of acoustic emission in rock failure process [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science) 2002, 23(10): 1008 - 1011.
- [25] 唐春安. 岩石声发射规律数值模拟初探 [J]. 岩石力学与工程学报 1997, 16(4): 368 - 374.
Tang Chun'an. Numerical simulation of AE in rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(4): 368 - 374.
- [26] 李核归, 张茹, 高明忠, 等. 岩石声发射技术研究进展 [J]. 地下空间与工程学报 2013, 1(S1): 1794 - 1804.
Li Hegui, Zhang Ru, Gao Mingzhong, et al. Advances in technology of acoustic emission of rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering 2013, 1(S1): 1794 - 1804.