

DOI: 10.11779/CJGE202112011

# 干燥与饱和岩石裂隙受压变形与声发射特性研究

李博<sup>1,2</sup>, 叶鹏进<sup>1</sup>, 黄林<sup>2</sup>, 王丁<sup>\*1</sup>, 赵程<sup>2</sup>, 邹良超<sup>3</sup>

(1. 绍兴文理学院岩石力学与地质灾害浙江省重点实验室, 浙江 绍兴 312000; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;  
3. 瑞典皇家理工学院可持续发展与环境工程系, 斯德哥尔摩 SE-100 44, 瑞典)

**摘要:**天然岩体处于各类复杂的地质环境中, 定量描述岩石裂隙在各种条件下的变形破坏行为是开展各类与岩石裂隙力学特性相关研究的基础。通过单轴压缩试验和弹塑性接触数值计算研究了两种具有不同岩性的岩石裂隙在干燥与饱和状态下的受压变形破坏行为, 并对试验过程中的声发射信号进行了采集分析。结果表明: 试验与数值计算得到的法向应力-位移曲线和塑性破坏区域皆基本吻合, 验证了弹塑性接触计算方法的可靠性; 塑性变形均值增量  $u_p$  随法向应力  $\sigma_n$  的增长呈现变化速率降低的非线性减小关系, 利用力学及几何参数建立的拟合公式可较好地预测该关系; 声发射源位置与试验及数值模拟得到的损伤破坏区域基本匹配, 干燥状态下两种岩石声发射振铃计数、累计计数均高于饱和状态; 声发射振铃计数与塑性变形均值增量的变化趋势基本一致。研究结果定量地揭示了岩石基本力学参数和裂隙表面特征对其受压变形破坏行为的控制作用。

**关键词:** 岩石裂隙; 变形; 弹塑性接触; 声发射; 法向应力

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)12-2249-09

作者简介: 李博(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩体水力耦合特性方面的研究工作。E-mail: libo@usx.edu.cn。

## Deformation and acoustic emission characteristics of dry and saturated rock fractures

LI Bo<sup>1</sup>, YE Peng-jin<sup>1</sup>, HUANG Lin<sup>2</sup>, WANG Ding<sup>1</sup>, ZHAO Cheng<sup>2</sup>, ZOU Liang-chao<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Rock Mechanics and Geohazards of Zhejiang Province, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Royal Institute of Technology, Department of Sustainable Development and Environmental Engineering, Stockholm SE-100 44, Sweden)

**Abstract:** The natural rock masses are situated in various complex geological conditions. Quantitative description of the deformation and failure behaviors of rock fractures under these conditions is of fundamental importance for the studies related to their mechanical behaviors. In this study, the unconfined compression tests and the elastic-plastic contact numerical simulations are implemented to study the compressive deformation and failure behavior of two kinds of rock fractures under dry and saturated conditions, together with acoustic emission detection and analysis. The results show that the normal stress-displacement curves and the plastic failure areas obtained from the experiment and the numerical simulation agree well with each other, which verifies the reliability of the contact method. The mean increment of plastic deformation decreases nonlinearly with the increasing normal stress with a decreasing rate, and a fitting formula is established using mechanical and geometric parameters. The position of acoustic emission (AE) sources matches with the damage area obtained from the experiment and the numerical simulation. Both the AE ringing count and the cumulative count are higher in dry rocks than those in saturated rocks. The AE ringing count and the mean increment of plastic deformation follow an identical changing trend. These results reveal the controlling role played by the fundamental mechanical parameters and geometric properties in the deformation and failure behaviors of rock fractures.

**Key words:** rock fracture; deformation; elastic-plastic contact; acoustic emission; normal stress

## 0 引言

岩石裂隙是地下岩体中普遍存在的薄弱部位, 深刻影响着岩体的力学与渗流特性, 分析含裂隙岩石在外力作用下的受压变形与损伤破坏规律是进行各类与

岩石裂隙力学行为相关研究的基础。自然界的岩石处

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LR19E090001); 国家自然科学基金项目(42077252, 41804127)

收稿日期: 2021-03-26

\*通信作者(E-mail: wdgeophysics@hotmail.com)

于干燥、部分或完全饱和状态,在流体的物理化学作用下,裂隙的微观结构及黏结特性将发生变化,从而改变岩石裂隙的宏观力学性质。因此,研究不同干湿状态下的岩石裂隙受压变形破坏特征具有重要意义。

岩石裂隙的变形破坏特征首先取决于岩石基质的力学特性。在以往的研究中,学者们通过大量的试验定量分析了水对各种岩石力学特性的影响。例如, Erguler 等<sup>[1]</sup>测试了含黏土岩石在不同含水量下的力学特性,结果表明相比于干燥的含黏土岩石,饱和岩石的单轴抗压强度(UCS)、弹性模量和抗拉强度分别降低了 90%, 93%和 90%; Rajabzadeh 等<sup>[2]</sup>以碳酸盐岩为试验对象进行了单轴抗压试验,发现在饱和状态下这 3 项力学参数相较于干燥状态下降了约 70%; 花岗岩等结晶岩则因其良好的抗水降解特性,力学性质受水的影响较小,在饱和状态下的抗压强度降低率一般小于 10%<sup>[3]</sup>。由此可见,由于各类岩石之间矿物组分和胶结状态的不同,其力学特性受水的影响程度也存在显著的差异。

在岩石裂隙受压变形行为方面,以往研究通过大量的力学试验,发现并定量描述了在法向应力作用下裂隙的非线性变形行为,建立了经验模型描述该行为<sup>[4]</sup>。然而,通常的物理试验只能获取裂隙宏观的应力-变形关系,缺乏对裂隙内部细观接触变形破坏过程的精确描述。相比于物理试验,数值方法能宏细观结合地分析岩石裂隙的受压变形过程。目前针对该问题,直接有限元法<sup>[5-6]</sup>和基于半空间法的边界元法<sup>[7-9]</sup>是两种较为常用的数值模拟方法,且半空间法具有计算效率更高的优势。Hopkins<sup>[8]</sup>提出了一种基于力平衡的数值模拟计算方法,该方法使用不同高度的圆柱体模拟粗糙的裂隙表面,同时考虑了裂隙上下表面以及圆柱形微凸体的弹性变形。相较于早期的 Greenwood-Williamson(GW)模型<sup>[10]</sup>,该方法考虑了粗糙裂隙中相邻接触体之间的相互影响,从而具有更高的计算精度。另一种基于 Boussinesq 解的半空间方法将裂隙表面视作连续面,可以更为真实地反映裂隙面的几何特征,并且能够实现对裂隙受压过程中局部塑性变形的模拟<sup>[7]</sup>。到目前为止,大量的数值模拟研究只考虑了接触体的弹性变形,且一般采用数值生成的裂隙面。为精确描述真实岩石裂隙的受压变形破坏行为, Kling 等<sup>[11]</sup>基于花岗岩闪长岩岩芯裂隙面在 0~10 MPa 的法向应力范围内的压缩试验数据,进行了弹塑性接触模型的校准和验证; Zou 等<sup>[12]</sup>选取汨罗麻岩为对象,将裂隙压缩试验结果与使用半空间弹塑性接触模型计算所得的数值模拟结果进行了对比分析,从法向应力-位移曲线与裂隙粗糙面损伤区等角度分析并验证了数值模型的准确性。

大量试验研究已经证明岩石的破坏产生声发射,通过检测和统计声发射事件可以定量描述岩石内部的断裂破坏过程。对岩石声发射的研究主要集中在 3 个方面:①对岩石损伤过程中声发射事件率、能量率和振铃计数等声发射基本参数的研究。Rudajev 等<sup>[13]</sup>通过花岗岩单轴压缩试验,研究了岩石破坏损伤过程的声发射规律与参数;陈国庆等<sup>[14]</sup>利用声发射事件率和能量率分析了开放型岩桥裂纹贯通机理及脆性破坏特征;Liu 等<sup>[15]</sup>研究不同温度下煤岩的力学特性、声发射能量和振铃计数,分析了岩石的损伤破坏行为。②利用地震震级理论、信息熵理论、分形理论和频谱分析等数学方法研究岩石损伤过程中的声发射特征参数。龚图等<sup>[16]</sup>利用地震震级理论研究了红砂岩蠕变破坏过程中的声发射 b 值特征;王春来等<sup>[17]</sup>利用信息熵理论获得了花岗岩破坏过程中声发射事件空间熵值和时间熵值;Li 等<sup>[18]</sup>通过大理岩拉伸试验获得了声发射信号的双主频分布特征,讨论了声发射信号频率与岩石微破裂之间的关系。③利用岩石声发射事件进行岩石损伤定位。赵兴东等<sup>[19]</sup>采用 Geiger 定位算法研究了含预制裂纹花岗岩损伤过程中微裂纹的三维空间演化规律;刘建坡等<sup>[20]</sup>采用单纯形定位算法研究了预制孔岩石破裂过程中裂纹的时空演化规律;Dong 等<sup>[21]</sup>提出一种无测速三维声发射定位方法,并通过试验验证了算法的可靠性和精度。目前岩石声发射研究多集中于完整试样的声发射基本参数、特征参数和定位算法等方面,对岩石裂隙面受压破坏声发射响应规律的研究尚不深入。

综上所述,对岩石裂隙受压变形破坏特征的研究缺乏宏观应力-位移关系与细观接触变形破坏相结合的深入探讨,较少考虑岩石干湿状态造成的影响。针对这些问题,本文基于自主开发的裂隙面接触弹塑性分析方法<sup>[12]</sup>,开展干燥与饱和状态下含裂隙花岗岩和细砂岩的单轴压缩试验与弹塑性接触数值计算,结合不同状态下两种岩石的声发射响应特征和数值计算结果,分析裂隙受压变形过程中塑性变形的增长趋势和声发射响应规律,揭示塑性变形均值增量与应力之间的定量关系。

## 1 研究方法

### 1.1 试验方法与流程

准备 4 个尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的圆柱形花岗岩与红砂岩标准试样。在试样半高位置切一道宽 2 mm,深 1 mm 的环形凹槽,使用万能材料试验机沿环形凹槽将岩样横向劈裂形成新鲜的裂隙。将岩样沿中轴线旋转一定角度后直立放置,形成具有一定开度的

单裂隙岩石试样, 如图 1 所示。由于劈裂产生的裂隙面咬合较好, 法向加载时裂隙充分闭合, 其力学行为与完整试样差别较小。因此, 这里采用旋转试样的方式让裂隙面形成一定程度的错位, 从而更充分地研究接触体的变形破坏行为。分别制备干燥与饱和状态下的花岗岩和红砂岩试样。干燥试样采用烘干法制备; 制备饱和试样时, 将试样浸置于纯净水中, 利用真空泵连续施加 24 h 的负压, 以达到完全饱和状态, 随后立即开展压缩试验。另准备同批次的花岗岩和红砂岩标准试样各 6 个, 按干燥和饱和状态分为 2 组, 分别进行 P 波波速测试和单轴压缩试验, 获得干湿状态下两种岩石的平均单轴抗压强度 UCS、弹性模量  $E$ 、泊松比  $\nu$ 、P 波波速等基本参数, 如表 1 所示。

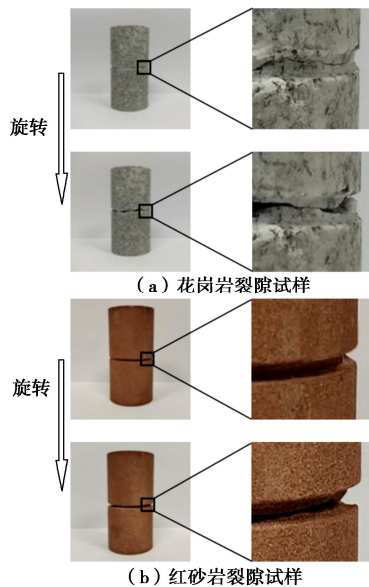


图 1 岩石试样和裂隙错位情况

Fig. 1 Rock samples and dislocated fractures

表 1 岩样的基本性质

Table 1 Fundamental properties of rock samples

试样编号	UCS /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	P 波波速 /(m/s)	旋转角度 /(°)
G-D	148.94	47.33	0.24	3179	6.11
G-S	133.20	44.99	0.23	4292	6.80
R-D	71.45	15.10	0.40	2689	3.49
R-S	39.98	11.20	0.35	3022	14.77

注: G 为花岗岩, R 为红砂岩, D 为干燥, S 为饱和。

试验系统主要包括轮廓测量系统、加载系统和声发射信号采集系统。采用分辨率为  $1 \mu\text{m}$  的 Keyence VR3000 高精度三维轮廓仪测量仪对压缩试验前后的试样裂隙表面进行扫描, 获得表面几何形貌数据。采用 MTS815 电液伺服试验机在恒定应力速率控制模式下对裂隙试样进行分级加载, 具体加卸载方案如表 2 所示。由于饱和红砂岩的单轴抗压强度较低, 为保证试验后岩样的完整性, 将其最大应力值降低为 5 MPa,

同步的加载速率也相应降低。声发射系统包括美国物理声学公司 (PAC) 生产的 Express8 采集卡 (最大采样率 10 MHz), 前置放大器 (增益 40 dB) 和 R6a 声发射传感器, 设置系统触发阈值为 50 dB, 采样率 3 MHz, 采样长度 1024 个点。6 个声发射探头位置坐标如图 2 (b) 与表 3 所示。安装完成后的试样如图 2 (a) 所示, 在加卸载过程中, 采用柔性密封装置保证饱和试样中的裂隙内充满水, 并实时同步采集试样的荷载、位移和声发射数据。

表 2 试样加卸载方案

Table 2 Loading and unloading plans

试样编号	加载速率 /(MPa·s <sup>-1</sup> )	目标应力/MPa	卸载速率 /(MPa·s <sup>-1</sup> )	保载时间/s
G-D	0.1	10	0.1	45
G-W	0.1	10	0.1	45
R-D	0.1	10	0.1	45
R-W	0.05	5	0.05	45

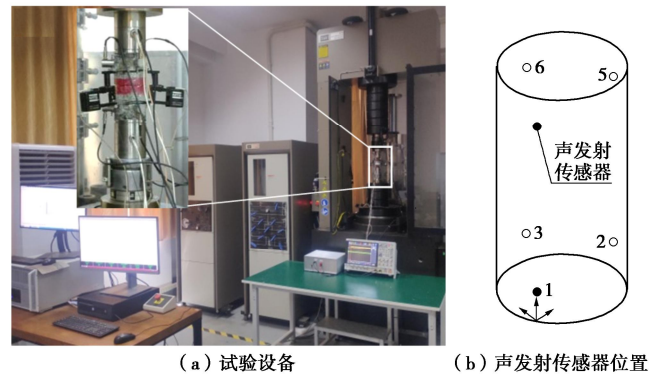


图 2 试验设备及传感器设置

Fig. 2 Diagram of experimental equipment and settings of sensors

### 1.2 声发射定位算法

Geiger 算法是目前用于计算岩石声发射源位置的有效方法之一<sup>[19, 22-23]</sup>。该算法利用给定的初始点, 通过多次迭代得到最终结果, 每次迭代中, 利用最小二乘法计算一个修正向量, 再将修正向量加到上次迭代的计算结果中, 从而获得一个修正后的新试验点, 并判断这个试验点是否满足设定要求。若满足, 认为该点即为声发射源坐标, 若不满足则继续进行迭代。每次迭代的结果由下式获得:

$$\left[ (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \right]^{1/2} = v_p(t_i - t), \quad (1)$$

式中,  $x, y, z$  为试验点坐标,  $t$  为事件发生时间,  $(x_i, y_i, z_i)$  为第  $i$  个传感器的位置,  $t_i$  为纵波到达第  $i$  个传感器的时间,  $v_p$  为纵波波速。纵波到达各传感器的时间  $t_{oi}$ , 可用试验点坐标计算出的到达时间的一阶泰勒展开式表示:

$$t_{oi} = t_{ci} + \frac{\partial t_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t_i}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial t_i}{\partial t} \Delta t, \quad (2)$$

式中,  $t_{oi}$  为第  $i$  个传感器获得的纵波到达时间,  $t_{ci}$  试

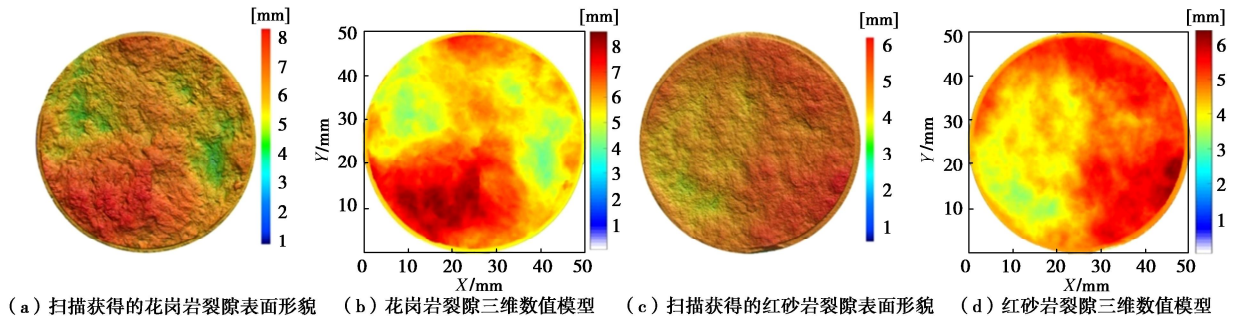


图3 裂隙面几何形貌

Fig. 3 Morphological characteristics of fracture samples

验点坐标计算出的纵波到达第  $i$  个传感器的时间。

$$\text{式 (2) 中, } \frac{\partial t_i}{\partial x} = \frac{(x_i - x)}{vR}, \frac{\partial t_i}{\partial y} = \frac{(y_i - y)}{vR}, \frac{\partial t_i}{\partial z} = \frac{(z_i - z)}{vR},$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial t} = 1, \quad R = \left[ (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

对于  $N$  个传感器, 可以得到  $N$  个方程, 用矩阵形式可表示为

$$A\Delta\theta = B \quad (3)$$

$$\text{式中, } A = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_1}{\partial x} & \frac{\partial t_1}{\partial y} & \frac{\partial t_1}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial x} & \frac{\partial t_2}{\partial y} & \frac{\partial t_2}{\partial z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial t_n}{\partial x} & \frac{\partial t_n}{\partial y} & \frac{\partial t_n}{\partial z} & 1 \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} t_{o1} - t_{c1} \\ t_{o2} - t_{c2} \\ \vdots \\ t_{on} - t_{cn} \end{bmatrix}.$$

利用最小二乘法求解式 (3) 可得

$$\left. \begin{aligned} A^T A \Delta\theta &= A^T B, \\ \Delta\theta &= (A^T A)^{-1} A^T B. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

通过方程 (4) 求出修正向量, 以  $(\theta + \Delta\theta)$  作为新的试验点, 继续迭代, 直至满足误差要求。

### 1.3 数值模拟方法

基于接触力学中的变分原理, 以接触系统最小势能的概念为基础, 提出了裂隙表面接触的弹塑性计算模型<sup>[12]</sup>。该模型通过 Boussinesq 解<sup>[24]</sup>将裂隙表面接触应力与位移相关联, 可实现裂隙表面接触体的弹塑性变形计算。对于两个粗糙裂隙表面接触的弹塑性变形问题, 系统的总互补势能  $V^*$ <sup>[7]</sup>的表达式为

$$V^* = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \sigma_n \bar{u}_z(x, y) dx dy - \iint_{\Omega} \sigma_n \left[ \bar{u}_z(x, y) - \frac{1}{2} \Delta u_z^p(x, y) \right] dx dy, \quad (5)$$

式中,  $\Omega$  为接触域,  $\sigma_n$  为法向应力,  $\bar{u}_z(x, y)$  为接触区域内的复合表面法向位移,  $\bar{u}_z^*(x, y)$  为接触区域内两个接触微凸体基于几何干涉的总位移,  $\Delta u_z^p$  为接触应力达到岩石基质硬度时, 塑性变形区域的复合增量表面

位移, 即  $\sigma_n > H$ ,  $H$  的取值根据文献中基于 UCS 的预测公式得到<sup>[25]</sup>。利用数值方法求解方程 (5) 时, 需将接触面离散成矩形单元结构网格, 该网格与轮廓扫描获得的裂隙面形貌数据一致。为解决线性互补问题, 使用约束共轭梯度算法<sup>[26]</sup>迭代求解接触压力值, 设置收敛条件  $\sigma_n > 0$  且  $\Sigma \sigma_n = F$ 。

将轮廓测量仪获得的裂隙表面三维几何模型进行等间距 (0.1 mm) 点云划分, 构建三维数值裂隙模型。如图 3 所示, 所建立的高精度三维数值裂隙模型较好地反映了实际裂隙的表面特征。在数值计算中根据表 1 设置不同状态下岩石的力学参数, 固定下表面, 按照  $\Delta \sigma_n = 0.1 \text{ MPa}$  逐步将应力加载到上表面, 记录加载过程中裂隙面法向位移、法向应力、塑性破坏区域与面积等数据。

## 2 法向应力作用下裂隙变形破坏行为

### 2.1 裂隙变形曲线和破坏区域分析

图 4 为单轴压缩试验和数值计算得到的花岗岩与红砂岩试样的法向应力 - 法向位移关系曲线。

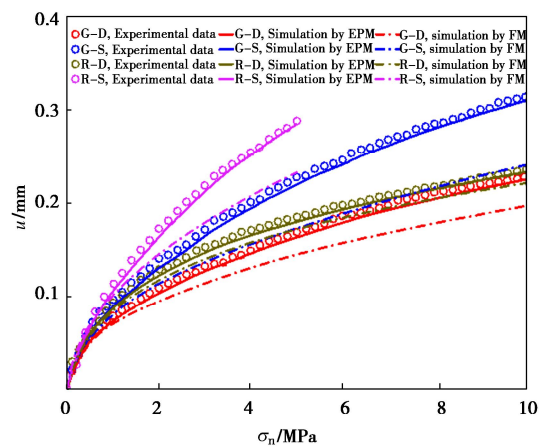


图4 试验与数值计算得到的法向应力 - 法向位移曲线对比  
Fig. 4 Comparison of experimentally and numerically obtained

normal stress-normal displacement curves

结果表明, 裂隙受压闭合过程中, 法向位移  $u$  与

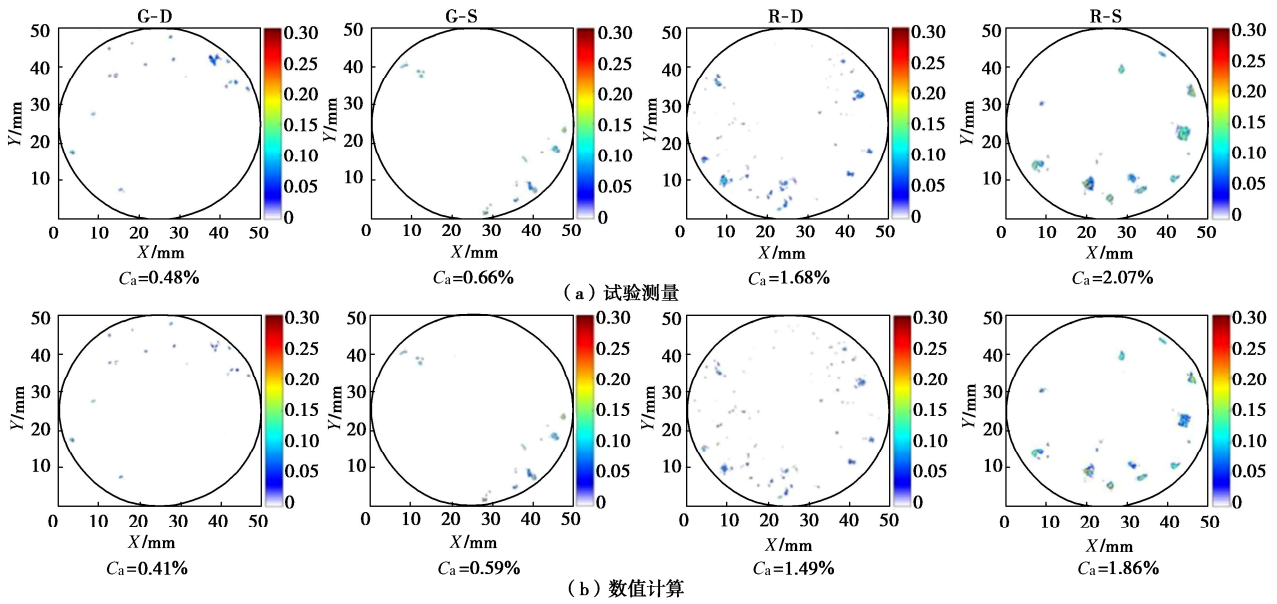


图 5 试验测量与数值计算得到的表面破坏区域对比

Fig. 5 Comparison of experimentally measured and numerically calculated asperity damage areas

法向应力呈非线性增长关系, 曲线斜率随法向应力的增大逐渐减小, 与以往研究得到的基本规律一致<sup>[4, 27]</sup>。以往的研究中常将岩石定义为纯弹性体, 只考虑岩石裂隙受压过程中的弹性变形, 忽略接触体的塑性变形, 导致纯弹性计算 (EM) 得到的法向位移相较于试验结果偏小。本研究采用的弹塑性数值方法 (EPM) 考虑了接触体塑性变形, 较弹性接触模型得到了更为准确的结果。

如表 1 所示, 干燥状态下两种岩石的单轴抗压强度、弹性模量和泊松比均大于饱和状态。饱和花岗岩的单轴抗压强度、弹性模量和泊松比分别是干燥试样对应参数的 89.4%, 95.1%和 96.3%, 饱和红砂岩的这 3 项基本参数是干燥状态的 56.0%, 74.2%和 87.8%。经检测, 所研究的花岗岩为致密块状构造, 孔隙率低 (0.9%), 岩石颗粒亲水性弱, 所以岩石受水化作用的影响较小; 而红砂岩属于颗粒支撑类型, 孔隙-接触式胶结, 孔隙率较大 (9.8%), 且含有一定的碳酸钙矿物 (约为 10%), 因而水的软化作用较为明显。如图 4 所示, 在相同应力条件下, 细砂岩的位移量大于花岗岩, 饱和状态下的位移量大于干燥状态时的位移量。使用基于标准试样测得的力学参数 (表 1) 进行数值计算, 得到的应力-位移曲线与试验曲线吻合良好, 说明精确测试和获取岩石在不同干湿状态下的力学性质以及裂隙表面形貌是准确评价裂隙变形破坏特征的关键。

将扫描获得的单轴试验前后裂隙表面形貌点云数据相减, 可得到表面的破坏区域, 如图 5 所示; 导出数值结果中的裂隙表面塑性变形量, 将其绘制成高程

图像, 即为数值计算得到的破坏区域, 如图 5 所示。试验测量和数值计算得到的裂隙表面破坏区域吻合较好, 进一步验证了该数值方法对裂隙受压变形破坏行为模拟的有效性。图 5 中分别列出了各岩样在目标应力作用下裂隙面的接触面积比  $C_a$ , 即裂隙上下接触面积与其总表面积之比, 该参数反映了接触破坏区域面积的大小。强度偏低的砂岩接触面积比更大, 而水的软化作用可进一步降低岩石的各项基本力学参数, 使岩石的脆性减弱, 塑性增强, 所以饱和岩样的接触面积比更大。脆性材料破坏容易引起周边颗粒的开裂、松动或脱落, 试验后需将这些部分完全去掉再进行表面测量; 相比之下, 数值计算仅考虑接触面上的塑性破坏, 因此得到的破坏区域相对试验测量略小。

### 2.2 裂隙变形曲线和破坏区域分析

将加载过程中每一应力增量对应的接触体塑性破坏单元体积除以裂隙的接触面积, 得到塑性破坏变形量均值增量  $u_p$ , 其与法向应力的关系如图 6 所示。塑性变形均值增量与应力整体呈负相关, 且随着应力的不断增大, 其下降梯度减小。加载初期的塑性变形均值增量普遍较大, 这主要由于加载初期裂隙面的接触面积较小, 接触体尖端上产生应力集中容易产生破坏所致。度过加载初期后裂隙面接触面积不断增大, 且接触体尖端已被压平, 因而塑性变形量的增长随之放缓。

对塑性变形均值增量-法向应力图进行曲线拟合:

$$\frac{u_p}{e_0} = 3.5 \times 10^{-20} \times \frac{\sigma_n e_0}{E \cdot R \cdot (RSD \cdot C_a C_{ai})^{0.2}}^{-3.4} + 0.0026, \quad (6)$$

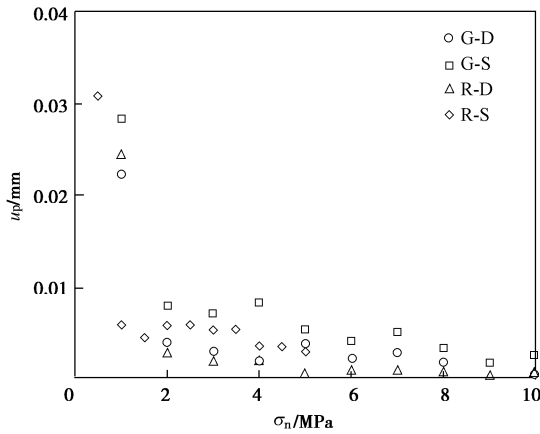


图6 塑性变形均值增量 - 法向应力关系图

Fig. 6 Relationship between mean plastic deformation increment and normal stress

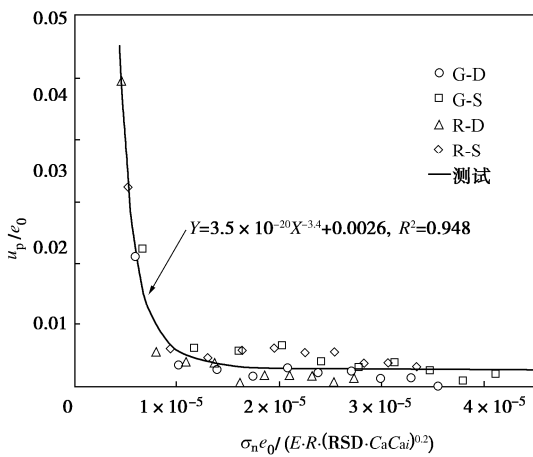


图7  $u_p/e_0$  与力学及几何参数之间的关系

Fig. 7 Relationship among  $u_p/e_0$ , mechanical and geometric parameters

式中,  $u_p$  为塑性变形均值增量,  $e_0$  为裂隙初始(即刚稳定接触时)平均开度,  $\sigma_n$  为法向应力,  $E$  为弹性模

量,  $R$  为试样半径,  $C_a$  为初始接触面积比,  $C_{ai}$  为根据数值模拟中每一个步长上的结果得到的在不同应力条件下的接触面积比,  $RSD$  为裂隙平均开度的相对标准差。  $u_p/e_0$  与力学及几何参数之间的关系如图7所示。该公式量纲统一, 反映了塑性变形增量随着应力增长而逐渐降低的趋势, 且充分考虑了裂隙力学和几何参数的控制作用, 可实现对裂隙受压过程中塑形破坏的定量评价。

### 3 基于声发射的裂隙受压变形破坏分析

#### 3.1 声发射定位分析

根据声发射 P 波到时数据、试样的 P 波波速和声发射探头位置坐标, 采用 Geiger 算法可获得声发射源位置。声发射 P 波到时采用噪声阈值法<sup>[28]</sup>获得, 根据背景噪声信号幅值的平均值确定声发射门限值, 利用声发射信号首次越过门限值的时间向前线性反推确定 P 纵波到时。

图8给出了试样的三维声发射源位置和试验破坏区域对比图。从三维声发射源位置的 X-Z、Y-Z 投影可以看出四个试样的定位点均集中在 Z 坐标为 50 mm 附近, 这与裂隙位置一致, 表明受压破坏主要发生在裂隙处。由声发射源位置在 X-Y 平面投影点与试验破坏区域对比可知, 投影点均散布于裂隙表面的破坏区域, 两者在空间位置上吻合较好。花岗岩裂隙面粗糙度大, 接触体数量少且脆性较高, 微凸体脆性破裂产生的声发射事件较多且能量较大, 因而定位效果更好。红砂岩则接触体脆性偏低, 受压破坏时产生声发射事件数较少, 定位效果相对较差。

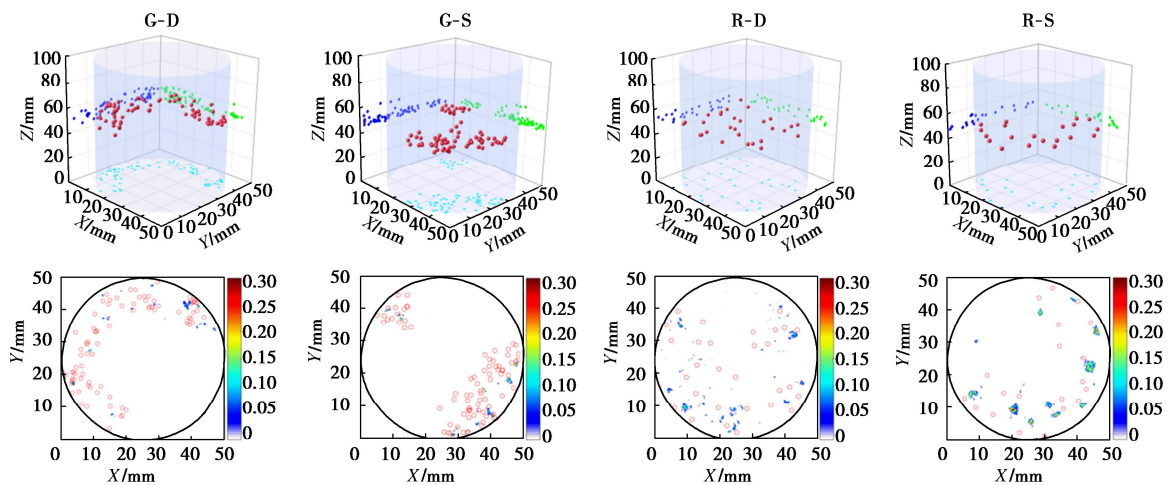


图8 声发射定位点与试验测量得到的表面破坏区域对比图

Fig. 8 Comparison between AE positioning points and experimentally measured asperity damage areas

注: 红色为三维定位点, 青色为三维定位点的 X-Y 投影, 蓝色为三维定位点的 X-Z 投影, 绿色为三维定位点的 Y-Z 投影。

### 3.2 岩石裂隙声发射响应规律

图 9 给出了加卸载过程中两种试样的声发射振铃计数、累计计数、信号幅值随时间的响应关系。应力加载阶段(时间约为 0~550 s), 两种岩石试样的声发射振铃计数明显高于卸载阶段(时间约为 550~1055 s)。当法向应力增加时, 花岗岩试样振铃计数明显增大, 当应力进入保载阶段, 振铃计数相较于加载阶段变小, 法向应力由 1 MPa 增至 2 MPa 过程中, 振铃计数最大, 声发射信号强度和频度较高, 裂隙面上微凸体的破坏较剧烈。声发射振铃计数主要集中在应力加载初期, 说明接触体损伤破坏主要发生在此阶段, 与图 6 所示计算规律相符。从能量的角度, 在施加应力初期, 应变能主要集中于接触体尖端, 随着应力增大, 接触体以塑性破坏的形式释放应变能, 并产生声发射事件。

试样累计计数随法向应力的增加逐步增大, 当法向应力减小时, 累计计数增长明显放缓, 逐渐趋于平稳。红砂岩振铃计数和累计计数均小于花岗岩试样, 这是由于红砂岩强度和脆性较弱, 受压破坏过程中释放的能量较少, 声发射事件较少所致。花岗岩声发射信号幅值主要集中于 50~100 dB, 红砂岩信号幅值集中于 50~80 dB, 由于花岗岩强度和脆性较大, 接触体受压破坏产生的应力波能量较大, 使得声发射信号幅值略高。

### 3.3 水对岩石裂隙面声发射响应特征的影响

岩石裂隙由劈裂产生, 且旋转了不同的角度, 因此干燥与饱和条件下同种岩石的裂隙面接触状态存在一定的差异, 使得两种条件下岩石的振铃计数峰值分别出现于不同应力阶段, 声发射响应规律表现出微小差异性。由图 9 可知, 干燥状态两种岩石的声发射振铃计数、累计计数都大于饱和状态。这是由于当试样处于饱和状态时, 裂隙面接触体受压破坏释放的应力波传播至固液界面时, 会发生反射、折射, 使得应力波能量被削弱, 从而使声发射信号幅值不能达到声发射采集系统设置的阈值, 导致部分声发射事件无法被记录, 使得振铃计数和累计计数降低<sup>[29]</sup>。另一方面, 水的软化作用使得饱和状态岩石刚度减小, 屈服强度和脆性降低, 岩石应变能释放和储能能力降低, 导致声发射响应减弱。

### 3.4 岩石变形破坏过程中的声发射特性

图 6 中应力与塑性变形均值增量的关系和图 9 中干燥花岗岩声发射振铃计数具有较好的对应关系, 说明在岩石裂隙受压过程中发生的变形破坏主要集中在加载初期, 这与图 4 中法向应力-法向位移曲线反映的单裂隙试样变形过程一致。干燥花岗岩声发射振铃计数的峰值相较于塑性变形均值增量的峰值出现得稍

晚, 这是由于试验在单轴压缩试验开始阶段存在压密过程, 此时位移量虽较大, 但裂隙面接触面积较小, 多是裂隙面接触体的尖端破坏, 其破坏体积较小, 对应的振铃计数较少。对于红砂岩试样, 则因自身性质的原因导致其未表现出和花岗岩试样一样明显的规律性, 但振铃计数的峰值也出现在加载初期且具有和花岗岩试样一样的变化趋势。

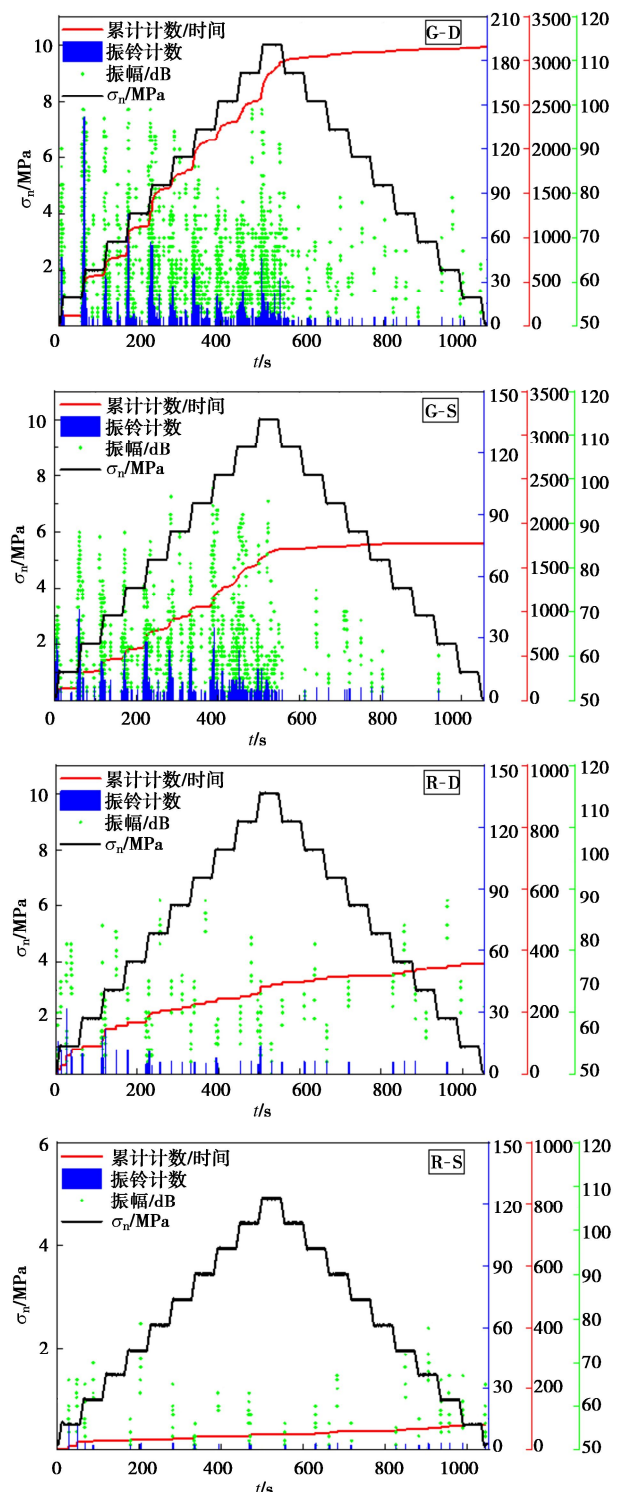


图 9 岩石裂隙声发射响应特征

Fig. 9 AE response characteristics of rock fractures

## 4 结 论

岩石裂隙受压后的塑性变形直接改变其几何形貌, 从而对岩体的力学与渗流特征产生显著的影响, 是造成工程中岩体渗透性降低, 地热及油气资源开采效率下降的重要诱因。本研究对干燥与饱和状态下含裂隙花岗岩和红砂岩开展了单轴压缩试验与弹塑性接触数值计算, 同步采集了受压变形过程中的声发射信号, 综合分析数据得到 3 点结论。

(1) 基于裂隙面接触的弹塑性数值计算与试验结果在法向应力-法向位移关系曲线上有较高匹配度; 同时, 试验测量得到的破坏区域位置、数值计算得到的破坏区域位置与声发射定位点三者之间基本一致, 表明研究采用的计算和测量手段具有较高的精度。

(2) 塑性变形均值增量与应力呈负相关, 且其减小的幅度随着应力的增大而变小, 表明破坏主要发生在加载初期较尖锐的接触体上, 随着接触面积的增大, 应力从集中变得分散, 破坏量逐步趋于稳定。通过拟合, 建立了两者之间的公式, 定量表征了裂隙力学和几何特征对塑形破坏的控制作用。

(3) 饱和状态下两类岩石的强度降低, 声发射特征产生明显差异。水的软化作用使饱和状态岩石裂隙的振铃计数、累计计数等低于干燥状态, 且花岗岩声发射响应强于红砂岩。振铃计数与计算得到的塑形变形量有较好的对应关系。

本文只对岩石裂隙受压过程中的塑性变形均值增量和声发射特性进行了研究分析, 且选取的应力范围较小, 所得到的经验公式虽符合试验及声发射响应规律, 但其适用性还需进一步验证。今后将针对更多种类的岩石裂隙受压过程中的力学及声学特性进行更加深入的研究。

### 参考文献:

- [1] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, **46**(2): 355 - 370.
- [2] RAJABZADEH M A, MOOSAVINASAB Z, RAKHSHANDEHROO G. Effects of rock classes and porosity on the relation between uniaxial compressive strength and some rock properties for carbonate rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, **45**(1): 113 - 122.
- [3] WONG L N Y, MARUVANCHERY V, LIU G. Water effects on rock strength and stiffness degradation[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, **11**(4): 713 - 737.
- [4] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, **20**(6): 249 - 268.
- [5] PEI L, HYUN S, MOLINARI J F, et al. Finite element modeling of elasto-plastic contact between rough surfaces[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 2005, **53**(11): 2385 - 2409.
- [6] LAVROV A. Fracture permeability under normal stress: a fully computational approach[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2017, **7**(1): 181 - 194.
- [7] TIAN X F, BHUSHAN B. A numerical three-dimensional model for the contact of rough surfaces by variational principle[J]. *Journal of Tribology*, 1996, **118**(1): 33 - 42.
- [8] HOPKINS D L. The Effect of Surface Roughness on Joint Stiffness, Aperture, and Acoustic Wave Propagation[D]. Berkeley: University of California, 1991.
- [9] LI B, ZHAO Z H, JIANG Y J, et al. Contact mechanism of a rock fracture subjected to normal loading and its impact on fast closure behavior during initial stage of fluid flow experiment[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, **39**(13): 1431 - 1449.
- [10] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P P. Contact of nominally flat surfaces[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1966, **295**(1442): 300 - 319.
- [11] KLING T, VOGLER D, PASTEWKA L, et al. Numerical simulations and validation of contact mechanics in a granodiorite fracture[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, **51**(9): 2805 - 2824.
- [12] ZOU L C, LI B, MO Y Y, et al. A high-resolution contact analysis of rough-walled crystalline rock fractures subject to normal stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, **53**(5): 2141 - 2155.
- [13] RUDAJEV V, VILHELM J, LOKAJÍČEK T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, **37**(4): 699 - 704.
- [14] 陈国庆, 陈毅, 孙祥, 等. 开放型岩桥裂纹贯通机理及脆性破坏特征研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(5): 908 - 915. (CHEN Guo-qing, CHEN Yi, SUN Xiang, et al. Crack coalescence and brittle failure characteristics of open rock bridges[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,



- 2020, **42**(5): 908 - 915. (in Chinese))
- [15] LIU S M, LI X L, WANG D K, et al. Mechanical and acoustic emission characteristics of coal at temperature impact[J]. *Natural Resources Research*, 2019, **29**(4): 1755 - 1772.
- [16] 龚 函, 李长洪, 赵 奎. 红砂岩短时蠕变声发射 b 值特征[J]. *煤炭学报*, 2015, **40**(增刊 1): 85 - 92. (GONG Cong, LI Chang-hong, ZHAO Kui. Study on b-value characteristics of acoustic emission of red sandstone during short-time creep process[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, **40**(S1): 85 - 92. (in Chinese))
- [17] 王春来, 廖泽锋, 李长峰, 等. 花岗岩岩爆声发射时空熵值动态特征实验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, **36**(3): 626 - 633. (WANG Chun-lai, LIAO Ze-feng, LI Chang-feng, et al. Experimental investigation of dynamic characteristics of AE spatio-temporal entropy for granitic rockburst[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, **36**(3): 626 - 633. (in Chinese))
- [18] LI L R, DENG J H, ZHENG L, et al. Dominant frequency characteristics of acoustic emissions in white marble during direct tensile tests[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, **50**(5): 1337 - 1346.
- [19] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(5): 944 - 950. (ZHAO Xing-dong, LI Yuan-hui, YUAN Rui-pu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(5): 944 - 950. (in Chinese))
- [20] 刘建坡, 徐世达, 李元辉, 等. 预制孔岩石破坏过程中的声发射时空演化特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(12): 2538 - 2547. (LIU Jian-po, XU Shi-da, LI Yuan-hui, et al. Studies of AE time-space evolution characteristics during failure process of rock specimens with prefabricated holes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(12): 2538 - 2547. (in Chinese))
- [21] DONG L J, HU Q C, TONG X J, et al. Velocity-free MS/AE source location method for three-dimensional hole-containing structures[J]. *Engineering*, 2020, **6**(7): 827 - 834.
- [22] GEIGER L. Probability method for determination of earthquake epicenters form arrival time only[J]. *Bulletin of Saint Louis University*, 1912, **8**: 60 - 71.
- [23] 赵兴东, 刘建坡, 李元辉, 等. 岩石声发射定位技术及其实验验证[J]. *岩土工程学报*, 2008, **30**(10): 1472 - 1476. (ZHAO Xing-dong, LIU Jian-po, LI Yuan-hui, et al. Experimental verification of rock locating technique with acoustic emission[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(10): 1472 - 1476. (in Chinese))
- [24] BOUSSINESQ J. Application des potentiels: à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques[J]. Gauthier-Villard, Paris, 1885.
- [25] MOMBER A W. Fracture toughness effects in geomaterial solid particle erosion[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, **48**(4): 1573 - 1588.
- [26] PRADHAN P S, KING R L, YOUNAN N H, et al. Estimation of the number of decomposition levels for a wavelet-based multiresolution multisensor image fusion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(12): 3674 - 3686.
- [27] BROWN S R, SCHOLZ C H. Closure of rock joints[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, **91**(B5): 4939 - 4948.
- [28] 王笑然, 李 楠, 王恩元, 等. 岩石裂纹扩展微观机制声发射定量反演[J]. *地球物理学报*, 2020, **63**(7): 2627 - 2643. (WANG Xiao-ran, LI Nan, WANG En-yuan, et al. Microcracking mechanisms of sandstone from acoustic emission source inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, **63**(7): 2627 - 2643. (in Chinese))
- [29] YAO Q L, CHEN T, JU M H, et al. Effects of water intrusion on mechanical properties of and crack propagation in coal[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, **49**(12): 4699 - 4709.