

DOI: 10.11779/CJGE2023S10020

玄武岩脆性相似材料的起裂和损伤强度特征试验研究

孔洋¹, 阮怀宁², 张桂荣¹, 何宁¹, 汪璋淳¹

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 岩石起裂强度和损伤强度是评价硬岩高应力破坏的重要指标。利用可表征玄武岩块体物理力学行为的脆性类岩石相似模型材料, 基于 Hoek 三轴压缩试验与声发射测试, 开展了模型材料的变形破坏特征、声发射特性、裂纹起裂与损伤应力阈值水平、岩石起裂与损伤强度特征等方面的研究工作。研究成果揭示了模型材料的硬脆性破裂演化特征, 给出了模型材料的裂纹起裂应力、损伤应力阈值, 定义了模型材料的起裂强度包络线与损伤强度包络线, 探究了玄武岩块体脆性相似材料的起裂强度和损伤强度特征。研究成果可为玄武岩地区地下洞室开挖片帮、岩爆或破裂等应力控制型破坏的预警预报提供一定的技术支撑。

关键词: 玄武岩; 声发射; 应力阈值; 起裂强度; 损伤强度; 强度包络线

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2023)S1-0153-05

作者简介: 孔洋 (1989—), 男, 山东泰安人, 博士, 工程师, 主要从事节理岩体力学特性与岩土工程安全监测等方面的科研工作。Email: ykong@nhri.cn。

Experimental study on initiation and damage strength characteristics of similar materials of basalt brittle

KONG Yang¹, RUAN Huaining², ZHANG Guirong¹, HE Ning¹, WANG Zhangchun¹

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Institute of Geotechnical Research, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The crack initiation and crack damage strengths of rock are the important indexes to evaluate the high stress failure of hard rock. Based on the Hoek triaxial compression tests and acoustic emission tests, a brittle rock-like model material that can characterize the physical and mechanical behaviors of basalt block is used to carry out researches on the deformation and failure characteristics, acoustic emission characteristics, crack initiation and damage stress threshold levels, rock initiation and damage strength characteristics of the model materials. The evolution characteristics of hard and brittle fractures of the model materials are revealed. The crack initiation and crack damage stress thresholds of the model materials are given. The crack initiation and crack damage strength envelopes of the model materials are defined. The initiation and damage strength characteristics of similar materials of basalt brittle are investigated. The research results may provide certain technical support for the early warning and prediction of stress-induced failures such as wall caving, rock-burst or rupture during the excavation of underground cavities in basalt areas.

Key words: basalt; acoustic emission; stress threshold; initiation strength; damage strength; strength envelope

0 引言

中国西南多个中型和巨型水电站施工建设均揭露了二叠系峨眉山玄武岩组, 如四川乐山境内的铜街子水电站和金沙江下游的金安桥、溪洛渡与白鹤滩水电站等^[1], 其中以白鹤滩水电站最为突出, 根据张春芳等^[2]实地考察结果可知白鹤滩水电站坝址区分布二叠系上统峨眉山玄武岩系, 玄武岩系总厚度达到 1356~1527 m, 坝址区玄武岩块体峰值强度离散性较大, 玄武岩硬脆性变形破坏特征显著^[3-5]。

岩石在加载过程中当应力超过某个阈值时裂纹

就开始萌生、凝聚与扩展等, 内部裂纹的发展也伴随着不同频率、能量的波释放, 这就是岩石声发射 (AE) 现象, 而岩石声发射与岩石力学参数、损伤情况等又有密不可分的关系^[6]。结合三轴压缩试验与声发射测试, 可以得到岩石应力状态、试样变形程度和破坏过程之间的相对关系, 同时可以识别研究脆性岩石材料

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目 (U2040221); 国家自然科学基金项目 (41831278); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (Y321003)

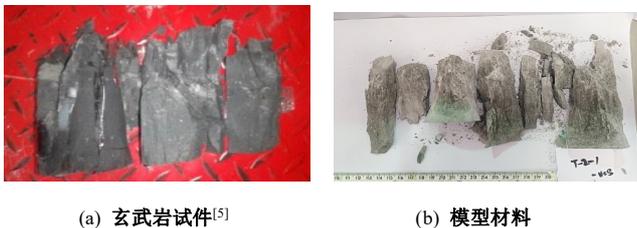
收稿日期: 2023-07-05

损伤演化过程的3个重要的应力水平：裂纹闭合应力 σ_{cc} ，裂纹起裂应力 σ_{ci} 与裂纹损伤应力 σ_{cd} 。

张春生等^[7]指出起裂、损伤强度是评价硬岩高应力破坏的两个主要指标，系统分析玄武岩裂纹闭合应力、起裂应力与损伤应力水平的研究相对较少^[5, 8]。本文将开展玄武岩块体脆性类岩石模型材料的Hoek三轴压缩试验，结合声发射测试技术，给出玄武岩块体脆性相似材料的裂纹起裂应力与裂纹损伤应力阈值，探究玄武岩块体及模型材料的起裂和损伤强度特征。

1 脆性类岩石相似模型材料

试样制备以水泥为胶结材料，砂为骨料，外加一定比例的水、减水剂拌合制成，质量比为水泥：河砂：水：减水剂=1：0.5：0.4：0.002，玄武岩脆性类岩石相似模型材料比选与力学特性测试研究详见文献^[9]，研究表明试验用模型材料符合相似比原则，其应力-应变曲线形式、试样破坏形式与物理力学参数等方面均可用于研究白鹤滩水电站坝址区玄武岩力学行为，单轴压缩试验玄武岩岩块试件与本文试验所用脆性类岩石相似模型材料破坏模式如图1所示。



(a) 玄武岩试件^[5] (b) 模型材料

图1 单轴压缩试验玄武岩试件与模型材料破坏模式

Fig. 1 Failure mode of basalt samples and model materials in uniaxial compression tests

选定的类岩石材料与白鹤滩水电站玄武岩岩块具有相近的硬脆性破裂演化特征，脆性类岩石相似模型材料压拉比为15.89，单轴压缩试验失效破坏在很短时间内发生并伴随剧烈人耳可辨的剧烈声响。

2 试验方案与参数设置

试样制备与试验方案参照中华人民共和国国家标准 GB/T 50266—2013 工程岩体试验方法标准，试样尺寸为直径53.5 mm×高107.0 mm，高径比为2。

采用Hoek三轴试验装置开展不同围压下脆性类岩石材料的三轴压缩破坏试验。Hoek三轴试验采用标准的三轴试验方法进行，GDS标准压力/体积控制器与MTS加载框架同时施加等向荷载压至设计值，达到围压设计值后，采用位移控制模式，以0.15 mm/min加载速率施加轴向荷载至试样破坏。

实测脆性类岩石模型材料单轴抗压强度UCS为70.4 MPa，考虑到坝址区地应力水平与应力相似比，以20%UCS为上限，设定试验围压值分别为0, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5, 10.5, 14.0 MPa。

声发射监测设备采用美国MISTRAS公司PCI-2声发射系统，PCI-2具有双通道、高速、低噪声、宽频带与低成本等优势。将前置放大器增益设为40 dB，频率范围为1 kHz~2 MHz，采样频率为1 MSPS，三轴压缩试验声发射阈值为35 dB。如图2所示，三轴试验中声发射探头置于Hoek三轴单元上部的加载帽上。

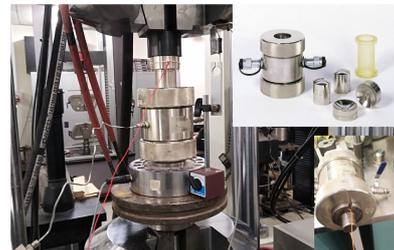


图2 Hoek三轴试验装置示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of Hoek triaxial test devices

3 试样起裂、损伤应力水平判定

3.1 Hoek三轴试验应力-应变关系曲线

基于Hoek三轴试验结果，给出脆性类岩石材料在不同围压下应力-应变曲线如图3所示。

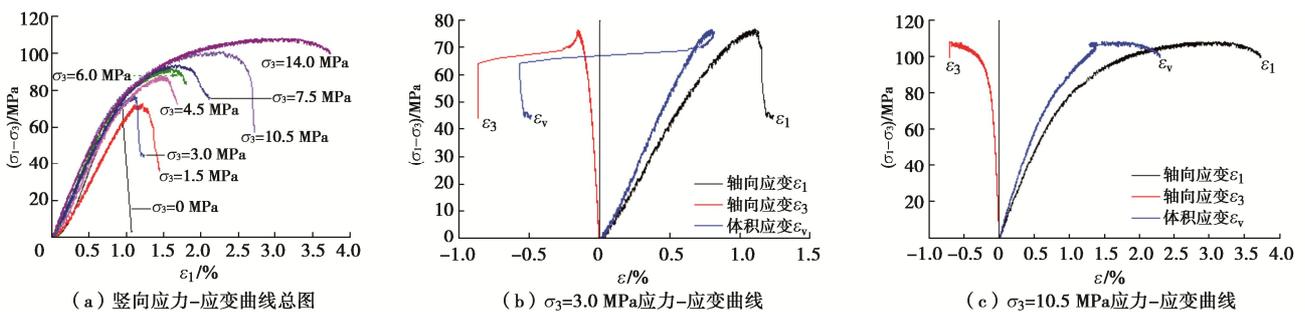


图3 Hoek三轴试验脆性类岩石模型材料试件应力-应变曲线

Fig. 3 Hoek triaxial test stress-strain curves of brittle rock-like model material samples

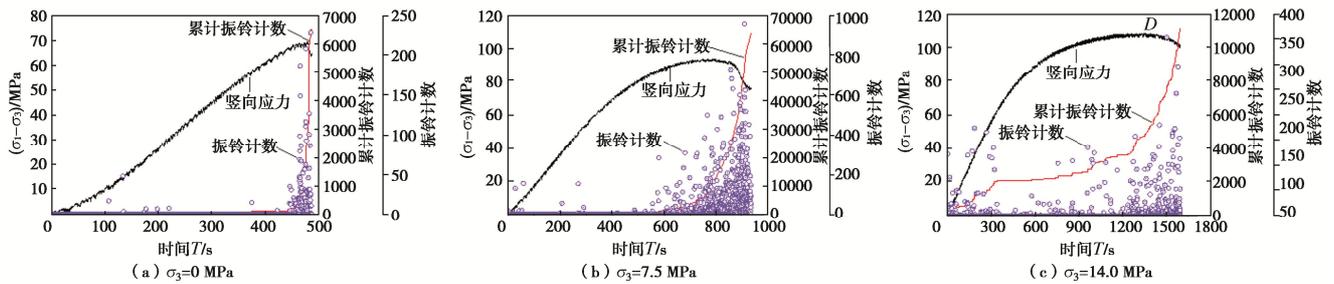


图 4 典型围压下脆性类岩石材料试样应力-振铃计数-累计振铃计数与时间关系

Fig. 4 Relationship curves of stress, ring-down count, cumulative ring-down count and time of testing brittle rock-like samples under typical confinement stresses

图 3 中 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为偏应力; σ_1 为轴向应力; σ_3 为侧向应力, 指围压; ε 为应变; ε_1 为轴向应变; ε_3 为环向应变; ε_v 为体积应变。本文选用的脆性类岩石模型材料在单轴压缩与三轴压缩工况下峰前阶段均无明显扩容现象, 试样以轴向变形为主, 峰后变形能力随围压的升高而增强, 体应变曲线拐点对应的轴向应力基本接近峰值强度点, 本文研究结果与张春生等^[7]对单轴、三轴压缩情况下白鹤滩坝址区隐晶质玄武岩的变形特征描述相近, 再次证明了本文所选定的脆性类岩石模型材料的合理性。

3.2 应力-振铃计数-累计振铃计数与时间关系曲线

基于 Hoek 三轴试验与声发射测试结果, 给出不同围压下脆性类岩石材料试样应力-振铃计数-累计振铃计数与加载时间的关系曲线如图 4 所示。

如图 4 所示, 根据不同围压下玄武岩脆性相似模型材料振铃计数变化特征, 可将其分为稳增期和陡增期两个阶段。稳增期试样压密并产生弹性变形, 在加载过程累积能量, 部分出现微裂纹, 但微裂纹产生速率较低, 振铃计数率较小, 累计振铃计数增加缓慢, 此段过程试样未发生明显的破裂; 陡增期内, 微裂纹凝聚扩展, 出现大量宏观可观测的微裂纹, 微裂纹不断产生并扩展凝聚贯通导致试样整体失效, 期间出现明显的振铃事件, 振铃计数和累计振铃计数陡增。

3.3 试样裂纹起裂应力与损伤应力值统计

在加载过程中, 荷载超过损伤起始界限时裂纹开始发生稳定增长, 但只有当裂纹密度足以使裂纹凝聚形成剪切带或拉伸剥落时, 才会达到临界岩体损伤状态, 该损伤起始界限被定义为“裂纹损伤应力 σ_{cd} ”^[10], Cai 等^[11]也将其称为“声发射损伤阈值”。

裂纹闭合应力 σ_{cc} 由应力-应变曲线直线段的起始点判定, 裂纹起裂应力 σ_{ci} 由试样裂纹体积应变拐点、应力-应变曲线直线段终点及振铃计数陡增点联合判定, 裂纹损伤应力 σ_{cd} 是根据 Cai 等^[11]、Hoek 等^[12]与张春生等^[7]采用的体积应变曲线拐点对应的轴向应

力值判定。笔者总结不同围压下脆性类岩石材料试样裂纹起裂应力 σ_{ci} 与裂纹损伤应力 σ_{cd} 及其相互关系的统计结果如表 1 所示。

表 1 脆性类岩石材料试样裂纹起裂与损伤应力值统计表

Table 1 Statistical table of crack initiation and crack damage stress levels of brittle rock-like samples

| 编号 | σ_3 / MPa | σ_c / MPa | σ_{ci} / MPa | σ_{ci}/σ_c | σ_{cd} / MPa | σ_{cd}/σ_c | σ_{ci}/σ_{cd} |
|-----|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1 | 0 | 70.55 | 39.77 | 0.56 | 69.41 | 0.98 | 0.57 |
| 2 | 1.5 | 74.26 | 42.08 | 0.57 | 73.52 | 0.99 | 0.57 |
| 3 | 3.0 | 79.87 | 46.18 | 0.58 | 79.12 | 0.99 | 0.58 |
| 4 | 4.5 | 92.58 | 51.19 | 0.55 | 91.65 | 0.99 | 0.56 |
| 5 | 6.0 | 98.41 | 55.78 | 0.57 | 95.70 | 0.97 | 0.58 |
| 6 | 7.5 | 101.62 | 56.71 | 0.56 | 99.59 | 0.98 | 0.57 |
| 7 | 10.5 | 107.39 | 61.44 | 0.57 | 106.16 | 0.99 | 0.58 |
| 8 | 14.0 | 122.58 | 68.22 | 0.56 | 122.58 | 1.00 | 0.56 |
| 平均值 | | | | 0.56 | — | 0.99 | 0.57 |

由表 1 可知脆性类岩石材料试样的起裂强度为 0.55~0.58 (均值 0.56) 倍峰值强度, 损伤强度与峰值强度基本相同。

玄武岩因内部普遍赋存各种隐微裂隙或填充体, 结构不均匀, 试验结果离散性较大, 张春生等^[7]指出白鹤滩水电站坝址区隐晶质柱状节理玄武岩试样的起裂强度为 0.43~0.72 (均值 0.53) 倍峰值强度, 损伤强度与峰值强度基本相同; 杏仁状柱状节理玄武岩试样的起裂强度为 0.34~0.92 (均值 0.60) 倍峰值强度, 损伤强度与峰值强度基本相同。

脆性类岩石材料试件由相同试样方法统一制备, 内部结构均匀, 表 1 中 σ_{ci}/σ_c 及 σ_{cd}/σ_c 随着围压增大, 几乎没有变化, 与常规玄武岩测试结果有区别。

4 试样起裂、损伤强度特征研究

由表 1、图 4 可以看出裂纹起裂应力、损伤应力随围压的增加而增大, 意味着裂纹起裂应力、损伤应力有一定程度的围压依赖性, 也与特定围压下的峰值强度密切相关, 因此, 笔者将裂纹起裂应力、损伤应

力水平与围压及峰值强度的关系描述为^[13]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ci} &= A_{ci}\sigma_3 + B_{ci}\sigma_c \\ \sigma_{cd} &= A_{cd}\sigma_3 + B_{cd}\sigma_c \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： A_{ci} ， B_{ci} 为与试样裂纹起裂应力水平有关的参数，可由表1中相关统计结果通过1stOpt软件等拟合得到；当 $A_{ci}=1$ 时，将退化为孟国涛等^[14]给出的 $\sigma_1 = \sigma_3 + 0.40UCS_{av}$ 形式，且此时 $B_{ci}=0.40$ 。 A_{cd} ， B_{cd} 为与试样裂纹损伤应力水平有关的参数，可由表1中相关统计结果通过1stOpt软件等拟合得到。

图5将基于式(1)给出脆性类岩石模型材料试样裂纹起裂、损伤应力阈值与试验结果对比分析结果。

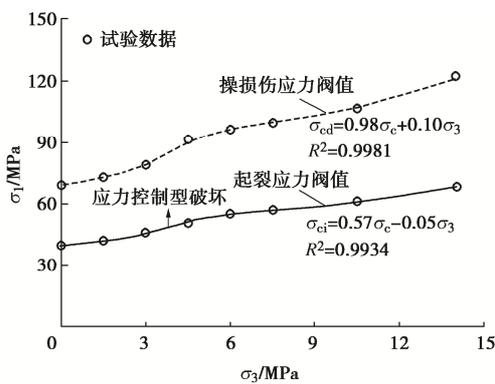


图5 脆性类岩石模型材料试样裂纹起裂、损伤应力阈值曲线

Fig. 5 Relationship curves of crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock-like model samples

如图5所示，试样裂纹起裂应力试验结果的最佳拟合公式为 $\sigma_{ci} = -0.05\sigma_3 + 0.57\sigma_c$ ，其相关系数 R^2 为0.9981；试样裂纹损伤应力试验结果的最佳拟合公式为 $\sigma_{cd} = 0.10\sigma_3 + 0.98\sigma_c$ ，其相关系数 R^2 为0.9934。

裂纹起裂应力试验结果的最佳拟合公式 $\sigma_{ci} = -0.05\sigma_3 + 0.57\sigma_c$ 中，0.57在表1裂纹起裂应力与试样峰值强度比值区间内，且接近均值，-0.05则表明裂纹起裂应力与围压一定程度负相关性，但该值较小；裂纹损伤应力试验结果的最佳拟合公式 $\sigma_{cd} = 0.10\sigma_3 + 0.98\sigma_c$ 中，0.10在表1裂纹损伤应力与试样峰值强度比值区间内，且接近均值，0.10则表明裂纹损伤应力与围压的正相关性（敏感性）高于裂纹起裂应力。

此处，将 $\sigma_1 > -0.05\sigma_3 + 0.57\sigma_c$ 定义为脆性类岩石模型材料试样起裂强度包络线，将 $\sigma_1 > 0.10\sigma_3 + 0.98\sigma_c$ 定义为损伤强度包络线。意味着当洞室周围集中应力达到 $\sigma_1 > -0.05\sigma_3 + 0.57\sigma_c$ 时，就有可能发生一定程度的围岩应力控制型破坏；当洞室周围集中应力达到 $\sigma_1 > 0.10\sigma_3 + 0.98\sigma_c$ 时，洞室围岩将整体失效，地下工程可能发生大型失稳破坏。

5 结 论

(1) 不同围压下玄武岩脆性相似模型材料振铃计数变化特征可分为稳增期和陡增期两个阶段。稳增期振铃计数率较小，累计振铃计数增加缓慢，此段过程试样未发生明显的破裂；陡增期内微裂纹不断产生并扩展凝聚贯通导致试样整体失效，振铃计数和累计振铃计数陡增。

(2) 脆性类岩石模型材料试样的起裂强度为0.55~0.58（均值0.56）倍峰值强度，损伤强度与峰值强度基本相同，该研究结果与张春生等^[7]关于白鹤滩水电站柱状节理玄武岩的起裂强度、损伤强度研究结论相近。

(3) 将 $\sigma_1 > -0.05\sigma_3 + 0.57\sigma_c$ 定义为脆性类岩石模型材料试样起裂强度包络线，将 $\sigma_1 > 0.10\sigma_3 + 0.98\sigma_c$ 定义为损伤强度包络线。当洞室周围集中应力超过起裂强度包络线时，有可能发生一定程度的片帮、岩爆或破裂等应力控制型破坏；当洞室周围集中应力超过损伤强度包络线时，洞室围岩将破裂失效，地下工程可能发生大型失稳破坏。

参考文献：

- [1] 徐卫亚, 郑文棠, 石安池. 水利工程中的柱状节理岩体分类及质量评价[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 262-270. (XU Weiya, ZHENG Wentang, SHI Anchi. Classification and quality assessment of irregular columnar jointed basaltic rock mass for hydraulic engineering[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3): 262-270. (in Chinese))
- [2] 张春芳, 王浆臻, 许模, 等. 白鹤滩峨眉山玄武岩系熔岩层界面的鉴别标志[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 217-219. (ZHANG Chunfang, WANG Jiangzhen, XU Mo, et al. The identification symbols of the E'mei mountain basalt lava lay-series in Baihetan hydropower plant[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(2): 217-219. (in Chinese))
- [3] 刘国锋, 冯夏庭, 江权, 等. 白鹤滩大型地下厂房开挖围岩片帮破坏特征、规律及机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 865-878. (LIU Guofeng, FENG Xiating, JIANG Quan, et al. Failure characteristics, laws and mechanisms of rock spalling in excavation of large-scale underground powerhouse Caverns in Baihetan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(5): 865-878. (in Chinese))
- [4] 胡伟, 邬爱清, 陈胜宏, 等. 含隐裂隙柱状节理玄武岩单

- 轴力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(8): 1880-1888. (HU Wei, WU Aiqing, CHEN Shenghong, et al. Mechanical properties of columnar jointed basalt rock with hidden fissures under uniaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(8): 1880-1888. (in Chinese))
- [5] LIU G, XIAO F K, CHENG Q L, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of dry and saturated basalt columnar joints under uniaxial compression and tensile damage[J]. Shock and Vibration, 2019, **2019**: 1-12.
- [6] 吴贤振, 刘建伟, 刘祥鑫, 等. 岩石声发射振铃累计计数与损伤本构模型的耦合关系探究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, **32**(1): 28-34, 41. (WU Xianzhen, LIU Jianwei, LIU Xiangxin, et al. Study on the coupled relationship between AE accumulative ring-down count and damage constitutive model of rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, **32**(1): 28-34, 41. (in Chinese))
- [7] 张春生, 朱永生, 褚卫江, 等. 白鹤滩水电站隐晶质玄武岩力学特性及 Hoek-Brown 本构模型描述[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(10): 1964-1978. (ZHANG Chunsheng, ZHU Yongsheng, CHU Weijiang, et al. Mechanical behaviors of basalt at Baihetan hydropower station and simulation with Hoek-Brown constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(10): 1964-1978. (in Chinese))
- [8] 刘 刚. 柱状节理玄武岩破坏全过程声发射监测研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江科技大学, 2014. (LIU Gang. Study on Acoustic Emission Monitoring of the Whole Failure Process of Columnar Jointed Basalt[D]. Harbin: Heilongjiang University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))
- [9] 孔 洋, 阮怀宁, 汪璋淳. 玄武岩脆性类岩石相似模型材料比选与力学特性测研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(11): 2308-2318. (KONG Yang, RUAN Huaining, WANG Zhangchun. Study on selection and mechanical properties testing of similar brittle rock-like model materials of basalts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(11): 2308-2318. (in Chinese))
- [10] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, **31**(6): 643-659.
- [11] CAI M, KAISER P K, TASAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(5): 833-847.
- [12] HOEK E, MARTIN C D. Fracture initiation and propagation in intact rock—a review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, **6**(4): 287-300.
- [13] ZHAO X G, CAI M, WANG J, et al. Damage stress and acoustic emission characteristics of the Beishan granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **64**: 258-269.
- [14] 孟国涛, 樊义林, 江亚丽, 等. 白鹤滩水电站巨型地下洞室群关键岩石力学问题与工程对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(12): 2549-2560. (MENG Guotao, FAN Yilin, JIANG Yali, et al. Key rock mechanical problems and measures for huge Caverns of Baihetan hydropower plant[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(12): 2549-2560. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)