

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S2.001

# 板裂化模型试样失稳破坏及其裂隙扩展特征的试验研究

周 辉<sup>1</sup>, 徐荣超<sup>1</sup>, 卢景景<sup>1</sup>, 章奇锋<sup>2</sup>, 张传庆<sup>1</sup>, 孟凡震<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 浙江华东建设工程有限公司, 浙江 杭州 310030)

**摘 要:** 锦屏二级水电站深埋隧洞大量岩爆案例表明板裂化围岩的失稳破坏与岩爆之间具有很强的相关性。采用高强石膏配制满足板裂化围岩结构特征的硬脆性模型试样, 通过一侧约束条件下的单轴压缩试验研究板裂化模型试样的失稳破坏过程、强度与变形特性及其裂纹扩展特征。研究表明, (1) 板裂化模型试样失稳破坏过程表现出应变型岩爆的特征, 其典型的破坏过程为预制裂隙尖端张拉裂纹的萌生与扩展-试样劈裂成板-岩板屈曲变形-岩板压折、岩片弹射; (2) 与完整试样相比, 含 1 条、2 条、3 条预制裂隙模型试样的峰值强度、弹性模量均呈现稳定下降的趋势, 而峰值轴向应变则是先减小后增大; (3) 试样预制裂隙尖端张拉裂纹的产生会造成: 相邻预制裂隙尖端横向应变值的突变、试样侧向变形量的突增以及侧向变形速率的显著增大; (4) 临空面附近的预制裂隙, 其尖端产生的张拉裂纹在很短的时间内便会失稳扩展, 并造成试样的失稳破坏。最后, 分析试样变形破坏过程中的声发射特性。研究结果对于揭示深埋硬岩隧洞板裂化围岩的失稳破坏规律、岩爆的发生机制具有重要意义。

**关键词:** 板裂化; 失稳破坏; 岩爆机制; 裂纹扩展; 模型试验

**中图分类号:** TU 452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2015) 增 2 - 0001 - 11

## Experimental study of instability destruction and crack propagation characteristics of slab failure model specimen

ZHOU Hui<sup>1</sup>, XU Rong-chao<sup>1</sup>, LU Jing-jing<sup>1</sup>, ZHANG Qi-feng<sup>2</sup>, ZHANG Chuan-qing<sup>1</sup>, MENG Fan-zhen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Zhejiang Huadong Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310030, China)

**Abstract:** A large number of rockburst cases happened in deep tunnels of Jinping hydropower station revealed that the slab failure of surrounding rock has a strong relationship with rockburst. Model specimens that meet the architectural feature of slab failure are made by using high-strength gypsum. Instability destruction process, strength and deformation characteristics, crack propagation signature of model specimens are researched under the condition of one lateral side restraint uniaxial loading mode. The results show that (1) the instability destruction process of the slab model specimens shows the characteristics of strain rockburst. A typical failure process can be described as follows: initiation and propagation of extension crack from the tip of pre-existing fissure, splitting into slabs, flexure deformation of slabs, buckling of slabs and ejection of slices. (2) The peak strength, elastic modulus of model specimens containing one, two and three pre-existing fissures show a steady decline law, but the peak axial strain decreases and then increases. (3) The emergence of extension crack will result in: a sudden change of the lateral strain near the tip of adjacent fissures and a significant increase in the amount and the rate of lateral deformation of the specimens. (4) Due to the affect of the free surface, extension crack will enter into unstable propagation stage in a short time after its initiation from the tip of pre-existing fissure that near the free surface of specimens and this will lead to the overall instability of the model specimen. At last, acoustic emission characteristics of specimen in the overall stage of compression deformation are analyzed. The research results are of important significance for the reveal of the instability destruction law of slabbing surrounding rock and the rockburst formation mechanism of deep tunnel in hard rock.

**Keywords:** slabbing failure; instability destruction; rockburst mechanism; crack propagation; model test

收稿日期: 2014-08-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No.2014CB046902); 中国科学院科技创新“交叉与合作团队”(人教字[2012]119号), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No.KZCX2-EW-QN115); 国家自然科学基金(No.41172288)。

第一作者简介: 周辉, 男, 1972年生, 博士, 研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值分析与工程安全性分析方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

## 1 引 言

深埋高地应力条件下岩体开挖卸荷后往往表现出与浅埋时不同的力学响应,规律性的板裂化破坏是深埋硬岩隧洞围岩典型的破坏现象。高地应力条件下硬脆性岩体板裂化破坏问题,给隧洞的安全施工建设提出了新的挑战。针对围岩板裂化破坏现象,国内外学者分别从以下不同的角度开展了研究。

理论研究方面,Dowding 等<sup>[1]</sup>通过总结分析 5 个典型的围岩板裂化破坏与岩爆案例,认为隧洞开挖引起的围岩最大切向应力  $\sigma_{\theta_{\max}}$  与岩室内单轴抗压强度  $q_u$  之比达到 0.35 时会导致围岩产生板裂化破坏现象,而当上述比值达到 0.50 时会形成弱至中等的岩爆,强烈岩爆通常在此比值大于 1 的情况下才发生。Stacey 等<sup>[2-3]</sup>提出了脆性岩石开裂的张应变准则,较好地解释了硬脆性岩体开挖卸荷后板裂化现象的产生,应用于围岩板裂化破坏深度的预测。侯哲生等<sup>[4]</sup>对锦屏二级水电站大理岩板裂化岩爆的发生机制进行了理论分析。

试验研究方面,吴世勇等<sup>[5]</sup>、Gong等<sup>[6]</sup>针对锦屏二级水电站TBM引水洞及排水洞深部大理岩发生的板裂化破坏,通过采集该工程区深部大理岩岩样,采用真三轴岩爆试验设备进行了室内试验,认为试样内板裂裂纹主要是竖向劈裂裂纹,夹杂些许剪切裂纹。谭以安<sup>[7]</sup>从岩石脆性断裂的微细观研究入手,应用SEM电镜扫描技术,对岩爆岩石断口进行观察,认为板状劈裂以张性断裂为主,局部存在剪切作用,并提出了围岩“劈裂成板-剪断成块-块、片弹射”的岩爆渐进破坏过程。Li等<sup>[8]</sup>利用挪威Iddefjord花岗岩,研究了单轴压缩条件下长方体试样板裂破坏的形成条件,当单轴压缩条件下试样高宽比小于0.5时,试样的宏观破坏型式由剪切破坏转变为板裂破坏,当轴向应力达到单轴抗压强度的60%左右时,试件内开始产生板裂裂纹。

数值分析方面,Cai<sup>[9]</sup>研究认为,板裂化破坏通常表现为洞壁围岩密集分布的洋葱皮状裂纹,裂纹切割围岩形成近似平行于开挖面的岩板,裂纹密度取决于岩体地应力条件、岩体强度以及岩石的非均质性。Zhang等<sup>[10]</sup>分析了中间主应力、应力路径、主应力方向偏转等因素对锦屏二级水电站试验洞围岩板裂化破坏的影响。

然而,以上研究多集中在围岩板裂化破坏的形成机制及其影响因素方面,通过室内试验研究板裂化围岩失稳破坏过程和规律的文献鲜见报道。Ortlepp 等<sup>[11-12]</sup>研究认为,板裂化破坏是硬岩应变型岩爆的一种表现形式。Diederichs<sup>[13]</sup>认为,围岩板

裂化破坏发生在应变型岩爆之前,板裂化破坏产生的近似平行的岩板,其产生不稳定的变形(屈曲失稳),为应变型岩爆能量的突然释放创造了条件。可见,围岩板裂化破坏与岩爆之间具有很强的相关性,板裂化围岩失稳破坏过程的研究对于认识应变型岩爆的发生机制,进而对岩爆灾害下合理支护系统的设计具有重要意义。

基于此,本文首先介绍锦屏二级水电站引水隧洞围岩板裂化破坏的结构特征,选用 $\alpha$ 型高强石膏制作了3种满足板裂化围岩结构特征的含不同预制裂隙数目的模型试样,对模型试样进行一侧约束条件下的单轴加载试验,研究了其变形破坏过程、裂纹扩展特征以及声发射特性。

## 2 板裂化围岩的结构特征

图1为锦屏二级水电站深埋隧洞施工过程中观察到的围岩典型的板裂化破坏现象。板裂化破坏现象引起了许多学者和工程师们的注意,很多学者对板裂化破坏现象进行了较为详细的描述<sup>[5, 14-18]</sup>。笔者在锦屏二级水电站深埋隧洞施工过程中对围岩板裂化破坏现象进行了大量的现场调研与统计工作,并对围岩板裂化类型进行了较为详细地分类,研究表明<sup>[14]</sup>,尽管板裂化破坏类型众多,形成机制也不尽相同,但总体来说,围岩板裂化破坏其一般的结构特征在于围岩内形成的多组近似平行于开挖面的裂纹将围岩切割形成板状或层状,并且在隧洞径向方向上(由洞壁向内),板裂面切割形成的岩板厚度逐步增大,如图2所示。



(a) 出露于洞壁

(b) 钻孔探视

图1 锦屏二级水电站隧洞围岩板裂化破坏现象

Fig.1 Slabbing failure phenomenon of surrounding rock in Jinping hydropower station

## 3 试验概况

### 3.1 模型试样制备

试样制备采用 $\alpha$ 型高强石膏浇注, $\alpha$ 型高强石膏加水硬化成型后具有孔隙率小、强度高特性,

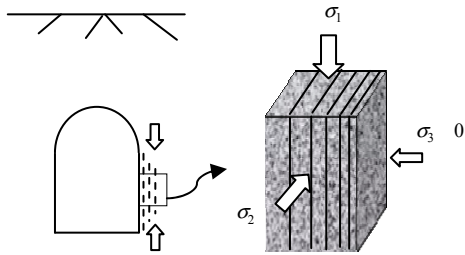


图 2 围岩板裂化破坏的结构特征

Fig.2 Structural feature of slabbing surrounding rock

适于模拟岩石类材料。本次试样浇注的水灰比为 1:3 (水与石膏的质量比), 制备尺寸(长×宽×高)为 60 mm×40 mm×120 mm 的长方体试样。所配制的模型试样分为含 1 条、2 条和 3 条预制裂隙试样, 即含有 1 组、2 组、3 组板裂面的试样, 并配制完整无裂隙试样作为对比。

为制备满足章节 2 中所述的板裂化结构特征的模型试样, 试样中预制裂隙具有如图 3 所示的几何特征, 即 3 条预制裂隙均与水平线成 90° 夹角、平行布置, 3 条预制裂隙的长度相同但彼此间距不同。为方便起见, 对不同位置的预制裂隙进行了标记。

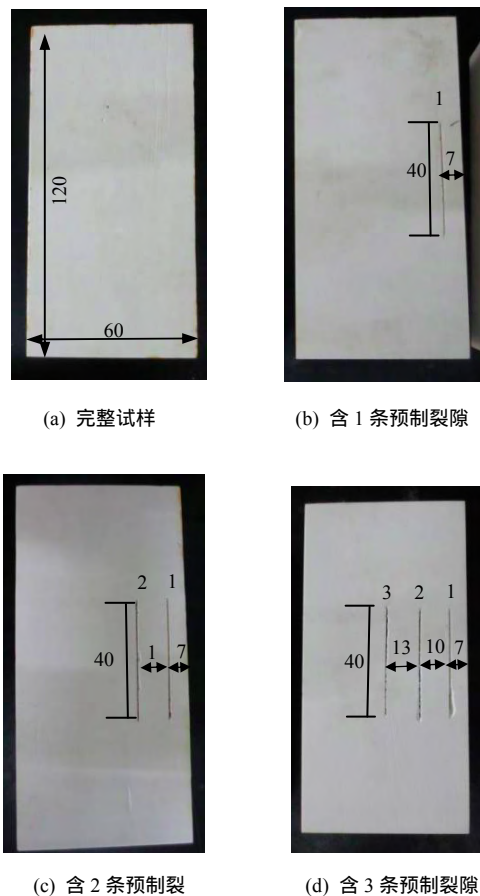


图 3 模型试样尺寸及预制裂隙位置图 (单位: mm)  
Fig.3 Pre-existing fissure locations and size of model specimens (unit: mm)

预制裂隙为贯穿裂隙, 预制裂隙的制作采用预埋钢片法, 将石膏与水混合并调凝至无气泡后倒入特制的模具中, 将厚 0.4 mm、长 40 mm 的钢片插入试样预定位置, 待试样完全凝固之前将钢片拔出。由于石膏本身的热膨胀性, 试样完全凝固后, 试样中预制裂隙的张开度为 0.3 mm 左右。本次试验共配制长方体模型试样 20 块, 4 种类型模型试样 (完整无裂隙试样、含 1~3 条预制裂隙) 各 5 块。

需要说明的是, 本文的研究并非是针对某一个具体的工程, 而是从锦屏二级水电站隧洞围岩板裂化破坏形成岩爆的现象出发, 探究板裂化围岩失稳破坏一般规律, 因而试验所配制的模型试样其几何、物理及力学参数并不具有模型试验所要求的严格的相似比, 但模型试样的配制考虑了板裂化围岩的结构特征以及硬脆性特征。

### 3.2 试验系统及加载方式

试验系统如图 4 所示。在中国科学院武汉岩土力学研究所自主研发的 RMT-150C 电液伺服刚性试验机上进行试验, 采用位移控制的方式进行加载, 加载速率为 0.002 mm/s。加载过程中同步进行声发射测试, 所用的声发射测试设备为美国 PAC 公司研制的 16 通道 DISP 声发射信号采集系统, 声发射传感器共振频率为 440 kHz, 前置放大器增益为 40 dB, 声发射阈值设置为 40 dB, 采样率为 1 MHz。试验过程中采用高清摄像机全程记录试样在加载过程中的裂纹萌生、扩展至试样整体失稳破坏过程。

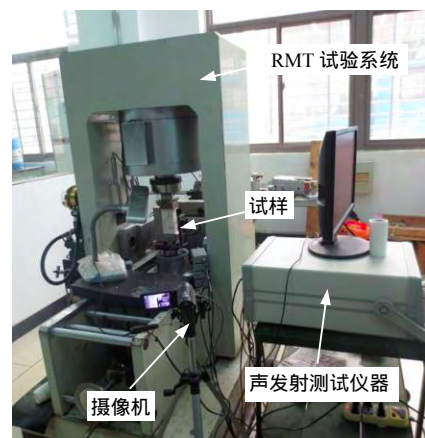


图 4 试验系统  
Fig.4 Testing system

考虑到板裂化围岩的受力特点 (见图 2), 本次试验采用厚钢板加工制作了“L 型”挡板, 以限制试样加载过程中一侧的位移, 从而使试样另一侧形成临空自由面 (见图 5), 并通过侧向位移传感器监

测临空面的位移变化情况。此外, 试验中完整无预制裂隙模型试样分别进行了单轴压缩和一侧约束条件的加载(图5中加载方式), 而3组合预制裂隙模型试样都按图5加载方式加载。

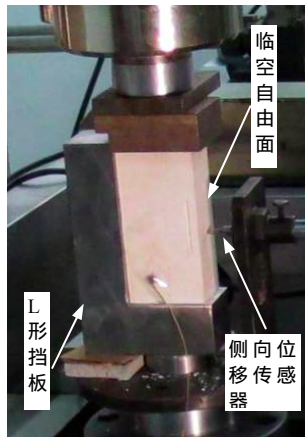


图5 模型试样加载方式

Fig.5 Load mode of model specimens

## 4 试验结果及分析

### 4.1 试样变形和强度特性

#### 4.1.1 模型试样基本力学参数

硬脆性是围岩形成板裂化破坏的必要条件, 模型试验所配制的试样必须具备脆性破坏特征才能满足试验要求。为此, 按照水灰比 1:3 配制了  $\phi 50$  mm $\times$ 100 mm 和  $\phi 50$  mm $\times$ 50 mm 的标准试样分别进行单轴压缩和巴西劈裂试验, 以获取所配制石膏试样的基本力学参数, 并分析其破坏模式。单轴压缩试验过程中同步进行声发射测试, 以获取试样整个压缩破坏过程中的声发射特性。

表1为本次试验配制的石膏试样基本物理力学参数。由表可见, 试样单轴抗压强度与抗拉强度之比达到 26.6, 表明试样为典型的脆性材料。图6为圆柱试样典型的单轴压缩应力-应变-声发射撞击率曲线。由图可知, 压缩荷载作用下标准圆柱试样轴向应变达到 0.0045 左右时试样达到峰值强度, 峰值强度附近声发射撞击率达到 30 次/秒, 峰值过后应力迅速跌落, 同时试样发生轴向张拉劈裂破坏, 如图7所示。综上所述, 本次试验所配制的石膏试样具有明显的脆性破坏特征, 能够满足试验对试样硬脆性的要求。

表1 模型试样物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of model specimens

水灰比	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	干密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	泊松比
1:3	40.61	11.81	1.52	1.7	0.28

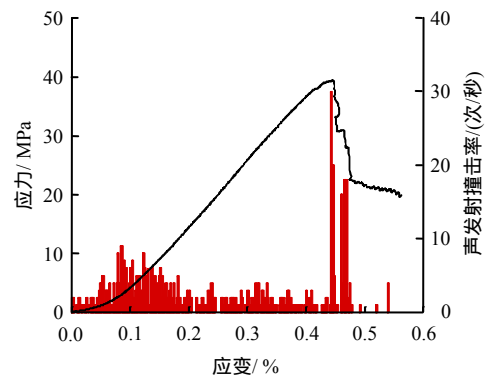


图6 圆柱试样应力-应变-声发射撞击率曲线

Fig.6 Curves of stress-strain-acoustic emission hit frequency of cylindrical specimens

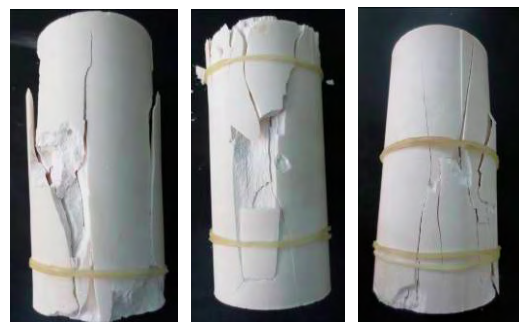


图7 圆柱试样典型破坏模式

Fig.7 Typical failure mode of cylindrical specimens

#### 4.1.2 完整模型试样变形和强度特性

图8为完整试样荷载-变形曲线, 其中0-1和0-2分别为完整试样在单轴压缩和一侧约束加载条件下(见图5加载方式)所获取的试验曲线。对比图8中0-1和0-2试验曲线可知, 相对于单轴压缩而言, 在一侧约束加载情况下试样峰值强度和弹性模量均有所降低, 而峰值轴向应变有所增大, 峰值强度后试样的侧向变形也显著增大, 这是由试样破坏模式所决定的, 即单轴压缩条件下试样发生沿着宽度方向上的劈裂破坏(见图9(a)), 张拉裂纹在峰值强度附近产生后迅速扩展, 并贯穿试样整个高度方向, 将试样沿着宽度方向劈裂成厚度不等的板状; 在一侧约束加载的条件下(见图5加载方式), 完整试样在临空自由面端部附近同时形成沿长度和宽度方向的劈裂破坏(见图9(b)), 并造成试样临空自由面端部产生岩板压折, 同时伴有岩片剥落现象, 这种破坏模式的发生主要是由于L型挡板的约束限制作用, 使得试样在加载过程中只能朝向侧向临空面和前后两个自由面膨胀, 造成试样同时发生了沿着长度和宽度两个方向的劈裂破坏, 导致试样峰后侧向变形显著增大。

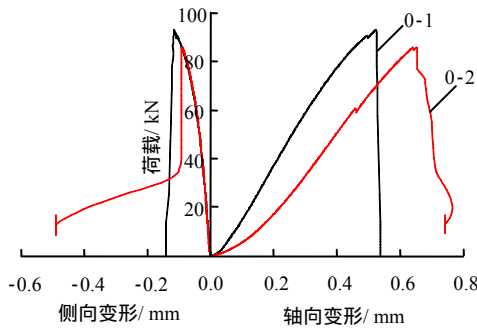


图 8 完整模型试样荷载-变形曲线

Fig.8 Load-deformation curves of intact model specimens



(a) 试样 0-1

(b) 试样 0-2

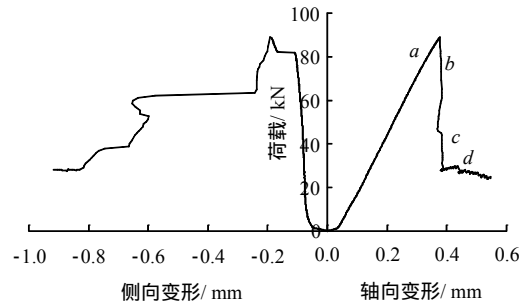
图 9 完整模型试样破坏模式

Fig.9 Failure modes of intact model specimens

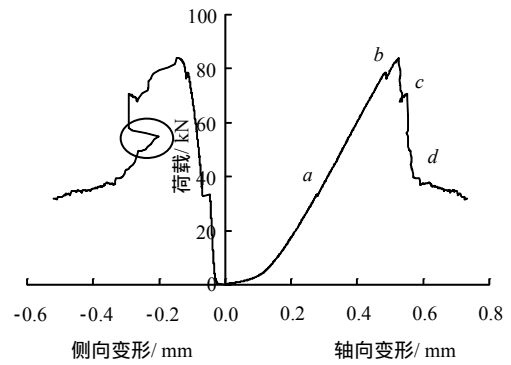
4.1.3 含预制裂隙模型试样变形和强度特性

图 10 分别为含 1 条（试样 1-1）2 条（试样 2-1）和 3 条（试样 3-1）预制裂隙模型试样的荷载-变形曲线。由于本次试验所选用的材料及其配比、预制裂隙的制作、试样养护条件及养护时间均严格控，因而每组试验 5 个试样所获取的试验结果、曲线具有较好一致性，文中仅给出了每组试样中最具代表性的试验曲线。总体而言，含不同数目预制裂隙模型试样在加载过程中都经历了压密阶段、线弹性阶段、屈服阶段、整体失稳阶段以及残余强度阶段，峰值强度之前，试样经历几次微小的“应力跌落”，峰值强度之后，伴随着压缩荷载值的迅速跌落，试样侧向变形急剧增大。需要说明的是，由图 10(b)和图 10(c)中试样侧向变形曲线可知，试样在峰后破坏过程中出现侧向变形减小的现象(图 10(b)和图 10(c)中黑色圆框所示)，是由于试样侧向位移传感器所在位置发生岩片弹射现象，侧向位移传感器的尖端陷入岩片弹射后所留下的坑中所致。对比图 10 不难看出，随着预制裂隙数目的增多，试样峰后荷载-变形曲线呈现出更多的“应力跌落”现象，表明随着预制裂隙数目的增多，试样内裂纹的萌生、

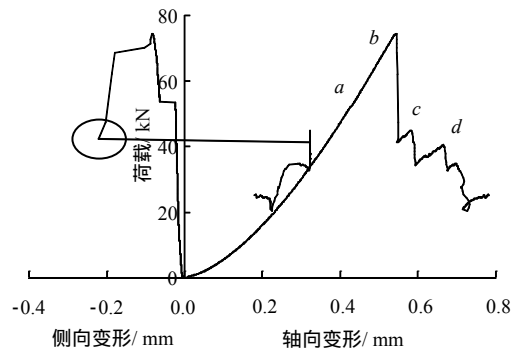
扩展变得更加复杂。



(a) 含 1 条预制裂隙模型试样



(b) 含 2 条预制裂隙模型试样



(c) 含 3 条预制裂隙模型试样

图 10 含 1~3 条预制裂隙模型荷载-变形曲线

Fig.10 Load-deformation curves of model containing one-three pre-existing fissures

图 11、12 为含不同预制裂隙模型试样主要力学参数平均值统计图。预制裂隙对试样峰值强度、峰值轴向应变、弹性模量等力学参数产生了不同程度影响：随着预制裂隙数目增多，试样峰值强度和弹性模量均呈稳定下降趋势，而峰值轴向应变却呈现先下降后上升的变化趋势。具体来看，完整无裂隙试样峰值强度为 39.41 MPa，而含 1 条、2 条、3 条预制裂隙模型试样分别为 32.81、29.91、28.04 MPa，峰值强度分别下降了 16.74%、24.12%、28.84%；完整无裂隙试样弹性模量为 11.81 GPa，而含 1 条、2 条、3 条预制裂隙模型试样分别为 10.29、9.12、8.81

GPa，弹性模量分别下降了 10.05%、20.28%、22.99%；完整无裂隙试样峰值轴向应变为 0.004 2，而含 1 条、2 条、3 条预制裂隙模型试样分别为 0.003 3、0.003 4、0.004 8。

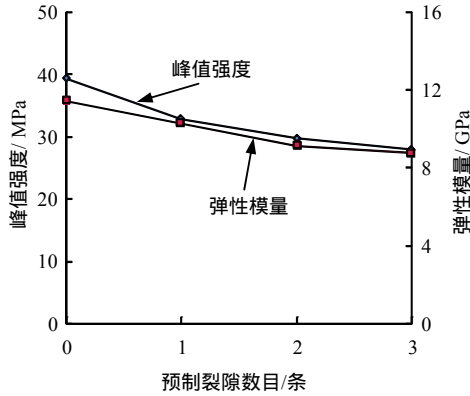


图 11 预制裂隙数目与峰值强度、弹性模量关系  
Fig.11 Relationships between peak strength, elastic modulus and number of pre-existing fissures

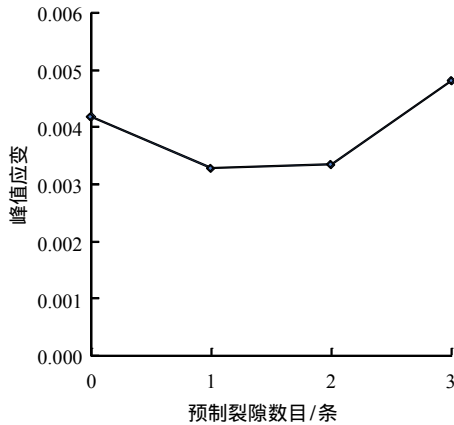


图 12 预制裂隙数目与峰值应变关系  
Fig.12 Relationship between peak strain and number of pre-existing fissures

## 4.2 试样破坏过程及裂纹扩展特征

### 4.2.1 含 1 条预制裂隙模型试样破坏过程及裂纹扩展特征

图 13 为含 1 条预制裂隙模型 (试样 1-1) 破坏过程典型照片,结合其荷载-变形曲线(见图 10(a)),试样破坏过程主要特征为:轴向压缩荷载作用下,当荷载值达到 80.25 kN 时,预制裂隙 1 上、下尖端产生张拉裂纹 1a 和 1b (1b 产生于试样背面),裂纹 1a 和 1b 的形成导致试样侧向变形产生突然的增长(见图 10(a)中 a 点),之后在压缩荷载作用下裂纹 1a 和 1b 分别朝向试样上、下端迅速扩展,并将试样沿着竖直方向劈裂开来,试样荷载值伴随着裂纹的扩展迅速跌落并发生岩板压折和岩块弹射现象

(见图 13(b)),之后在平行于预制裂隙方向上劈裂产生了新的岩板,岩板的压折(见图 13(c))导致了荷载值继续跌落,并伴有表面岩片剥落现象的发生。试样最终破坏形态见图 13(d)。

### 4.2.2 含 2 条预制裂隙模型试样破坏过程及裂纹扩展特征

图 14 为含 2 条预制裂隙模型 (试样 2-1) 破坏过程典型照片。结合其荷载-变形曲线(见图 10(b)),试样破坏过程主要特征为:当压缩荷载值达到 33.33 kN 时,首先在预制裂隙 2 上、下尖端几乎同时产生了张拉裂纹 2a 和 2b,此时荷载值出现微小的跌落,而侧向变形产生较大幅值的增长(图 10(b)中 a 点所示),裂纹 2a 和 2b 形成后沿着竖直方向稳定扩展,而试样侧向变形速率也显著增大;当压缩荷载值继续增大至 78.52 kN 时,在预制裂隙 1 上、下端产生张拉裂纹 1a 和 1b (1b 产生于试样背面,图 14(b)中未标出),并造成压缩荷载值跌落至 76.35 kN(图 10(b)中 b 点);当荷载值继续增大至峰值附近 83.8 kN 左右时,裂纹 1a 和 1b 的失稳扩展导致了荷载值迅速跌落至 67.68 kN (见图 10(b)中 c 点),之后当荷载产生小幅度上升时,张拉裂纹 1a 和 1b 扩展形成的岩板 A 发生压折并产生岩块弹射现象(见图 14(c)),同时伴有噼啪、折断的响声,从图 14(c)和图 14(d)所标注的红色圆框中可以明显看出,岩板压折形成的多条张拉裂纹,而图 10(b)中侧向变形的减小(红色线框所标注),是由于侧向变形传感器尖端陷入岩块弹射形成的坑中所至;随着轴向变形的进一步增加,在预制裂隙 2 上尖端形成了次生裂纹-压剪裂纹 2c(见图 14(d)),裂纹 2c 产生后沿着与竖直方向约 30° 夹角稳定扩展,并伴有岩片剥落现象,此时试样荷载值趋于稳定。

### 4.2.3 含 3 条预制裂隙模型试样破坏过程及裂纹扩展特征

图 15 为含 3 条预制裂隙模型 (试样 3-1) 破坏过程典型照片。结合其荷载-变形曲线(见图 10(c)),试样破坏过程主要特征为:当压缩荷载值达到 53.47 kN 时,预制裂隙 3 的上、下尖端几乎同时产生张拉裂纹 3a 和 3b (见图 15(a)),张拉裂纹 3a 和 3b 的产生导致试样侧向变形的突然增大(见图 12 中 a 点),而荷载值未发生明显跌落。随着压缩荷载的继续增大,在峰值强度之前约 72.8 kN 左右时(见图 12 中 b 点),预制裂隙 1 上尖端萌生拉伸裂纹 1a,并伴有微小岩片剥落现象(见图 15(b));当压缩荷载值继续上升至峰值附近时,裂隙 1 下端形成拉伸裂纹 1b,此时裂纹 1a 和 1b 迅速扩展,而由裂纹 1a

和 1b 劈裂形成的岩板发生压折 并形成岩片弹射现象 (见图 15(c)), 试样荷载值也迅速跌落至 41.41 kN, 试样侧向变形先由 -0.046 mm 变为 -0.18 mm, 之后又变为 0.36 mm。这是由于侧向位移传感器的端部陷入岩片弹射之后形成的坑中所至; 荷载值第一次跌落之后, 又缓缓增至 45.07 kN, 伴随这一过

程, 预制裂隙 2 尖端了产生张拉裂纹 2a 和 2b, 裂纹 2a 和 2b 的扩展, 导致荷载值由 45.07 kN 继续跌落; 之后, 在预制裂隙 3 上端产生次生压剪裂纹 3c (见图 15(d)), 压剪裂纹 3c 形成后朝向试样内部稳定扩展, 并伴有微小的岩片剥落现象, 而此时试样的荷载值也逐步趋于稳定。

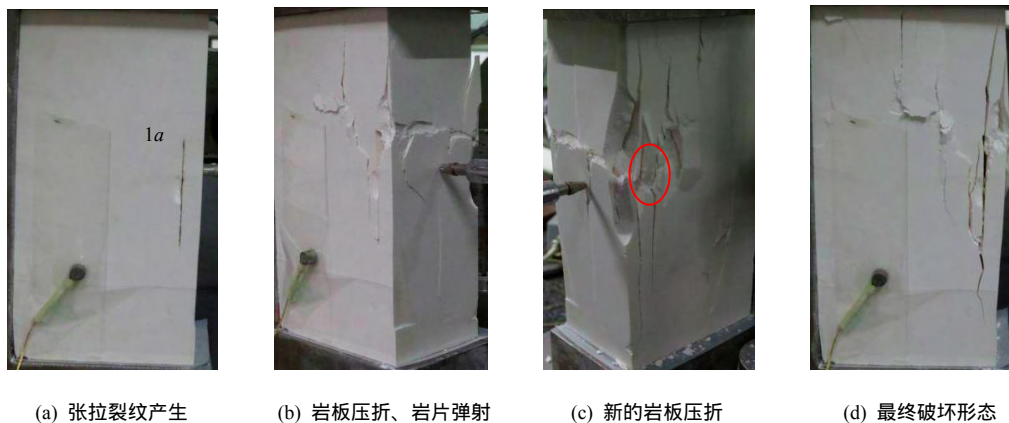


图 13 含 1 条预制裂隙模型试样 1-1 典型破坏过程  
Fig.13 Typical failure process of model specimen 1-1 containing one pre-existing fissure

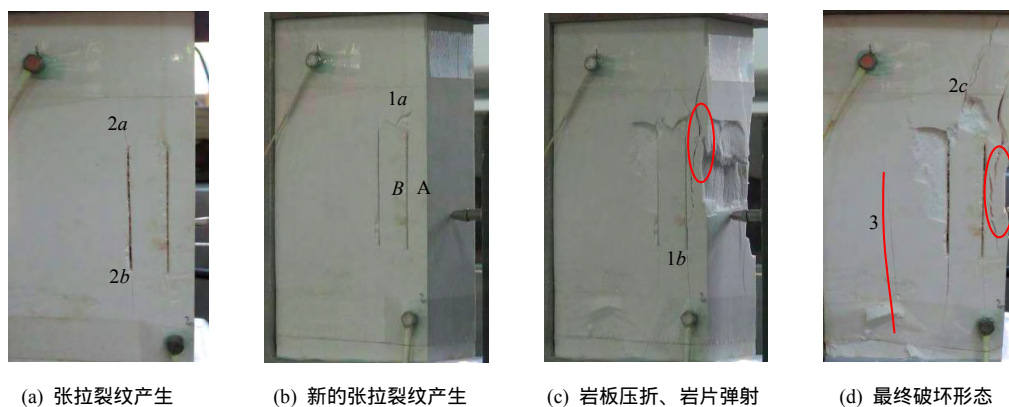


图 14 含 2 条预制裂隙模型试样 2-1 典型破坏过程  
Fig.14 Typical failure process of model specimen 2-1 containing two pre-existing fissures

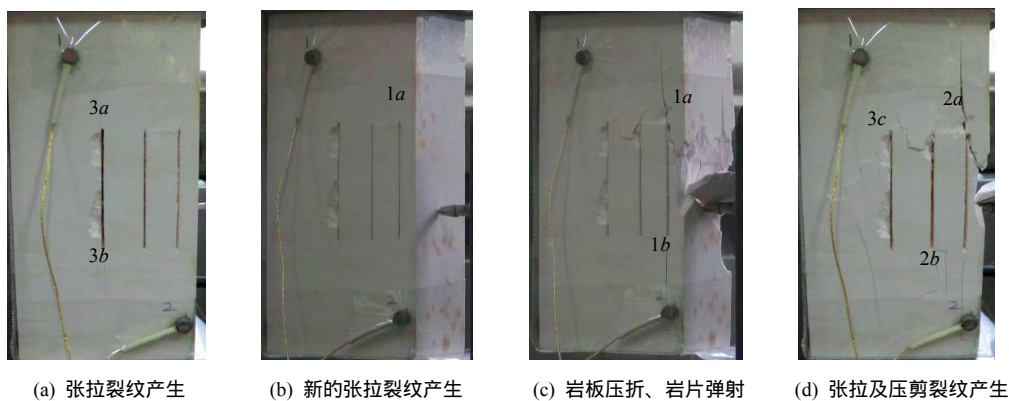


图 15 含 3 条预制裂隙模型试样 3-1 典型破坏过程  
Fig.15 Typical failure process of model specimen 3-1 containing three pre-existing fissures

此外,试验中发现预制裂隙 1、2 其尖端张拉裂纹失稳扩展而形成的岩板 A 和岩板 B (见图 14(b)和图 16),其压折断裂顺序具有随机性,试样 2-1 中岩板 A 发生压折,而岩板 B 并未被压折,试样 2-2 中却是岩板 B 先被压折断裂,之后岩板 A 才被压折并形成岩块弹射(见图 16),当岩板 B 先于 A 压折断裂时,试样破坏时的侧向变形往往更大,容易超出侧向变形传感器的量程。

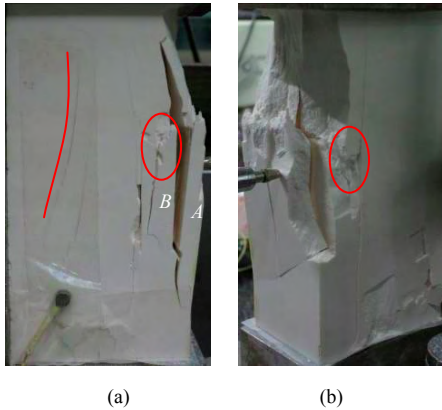


图 16 试样 2-2 破坏形态  
Fig.16 Failure mode of specimen 2-2

综合以上含不同预制裂隙数目的板裂模型试样失稳破坏过程的分析不难看出,板裂化模型试样失稳破坏过程表现出应变型岩爆特征,其典型的破坏过程可概括描述为预制裂隙尖端张拉裂纹的萌生与扩展-试样劈裂成板-岩板屈曲变形-岩板压折-岩片弹射。预制裂隙尖端产生的裂纹以张拉型为主,而含 2 条和 3 条预制裂隙的模型试样在残余强度阶段往往会有新的次生裂纹产生(主要为压剪裂纹);模型试样内部的预制裂隙其尖端张拉裂纹的产生并不会导致试样荷载值的显著跌落,会造成试样侧向变形的突增和侧向变形速率的显著增大;受临空自由面的影响,靠近临空面的预制裂隙其尖端产生的张拉裂纹,在很短的时间内便会失稳扩展,进而造成试样整体失稳破坏,这与前人研究结果有相同之处<sup>[15, 19-22]</sup>。试验中还发现,预制裂隙张拉裂纹扩展所形成的岩板多数情况下均是在岩板中部发生压折断裂,而含 1 条预制裂隙模型试样 1-2 和含 3 条预制裂隙模型试样 3-2 均是在岩板下部发生折断(见图 17),造成这种现象的原因可能是由于下端部的承压板对试样的约束作用所致。

4.3 裂隙尖端横向应变值变化规律

从本次试验试样裂纹扩展特征可知,随着压缩荷载值的增大,试样预制裂隙尖端首先产生典型的张拉裂纹,张拉裂纹的产生是由于压缩荷载的作用

导致试样内预制裂隙尖端产生拉应力集中现象,而岩石类材料具有典型的抗压不抗拉特性,因而会在预制裂隙尖端沿着最大拉应力方向上(垂直预制裂隙方向)产生裂纹,并近似沿着竖直方向扩展。伴随着预制裂隙尖端裂纹的萌生与扩展,其周围一定范围内的应变场也会不断的发生变化,通过测量预制裂隙尖端附近应变值的变化可从侧面反映裂纹萌生、扩展的过程。通过在裂纹的扩展路径上,即预制裂隙尖端横向方向上粘贴应变片的方法,可以很好地反映张拉裂纹萌生至失稳扩展的过程。试验所用应变片型号为 BE-120-2AA,其有效测量面积为 2.0 mm×1.7 mm,应变片垂直于预制裂隙尖端黏贴,每个试样上共计粘贴 6 个应变片,应变片中心距离预制裂隙尖端约 2.5 mm,应变片粘贴以及应变片编号见图 18。采用静态应变数据采集记录分析仪自动采集试样加载过程中裂隙尖端 6 个横向应变值的变化情况。

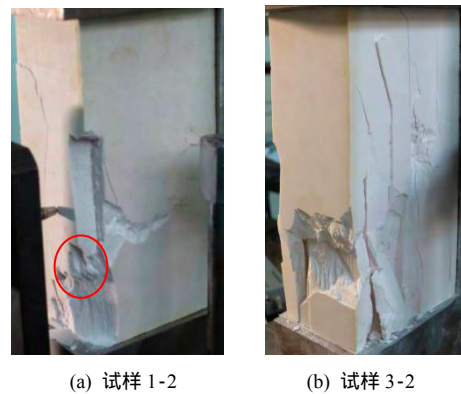


图 17 试样 1-2 和 3-2 岩板压折部位  
Fig.17 Slab crushing position of specimen 1-2 and 3-2

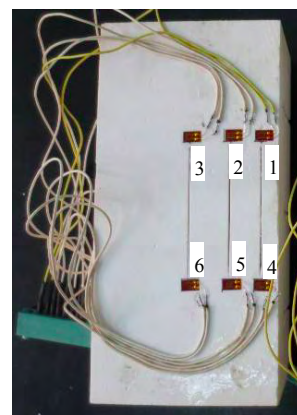


图 18 预制裂隙尖端应变片粘贴  
Fig.18 Strain gages pasted on the tip of pre-existing fissures

结合图 19(a)、19(b)可知,试样加载初期,预制裂隙尖端 6 个应变值均近似呈线性规律逐步增



大，而当加载时间增至 150 s 左右时，应变值 3 开始呈现非线性增大的趋势，且增长速率越来越大，这表明预制裂隙 3 上尖端出现微裂纹的萌生，之后，应变 3 出现反复的下降再上升的现象，这显示了微裂纹萌生与稳定扩展导致裂纹尖端应力场不稳定的变化现象；当加载时间增至 200 s 左右时，应变 3 由 1 782  $\mu\epsilon$  迅速增至 2 162  $\mu\epsilon$ ，伴随这一过程，应变 6 也由 655  $\mu\epsilon$  增至 857  $\mu\epsilon$ ，表明预制裂隙 3 上、下端萌生的裂纹开始不稳定扩展，由于裂纹扩展的作用，应变片 3、6 几乎同时被拉断；预制裂隙 3 两端张拉裂纹的扩展导致预制裂隙 1 上端的应变值 1 由 668  $\mu\epsilon$  迅速增至 2 325  $\mu\epsilon$ ，而下端应变 4 却出现小幅跌落，但随即应变片 1 和 4 也被张拉裂纹贯穿；预制裂隙 1 尖端裂纹的扩展，同样造成了预制裂隙 2 上端应变值 2 的增大和下端应变值 5 的跌落，随着加载继续进行，应变值 2 缓慢增大，而在加载时间增至 240 s 时，产生了新的张拉裂纹并导致应变片 2 拉断。由以上分析可知，预制裂隙尖端在产生较小拉应变的情况下便会有张拉裂纹的萌生与扩展，张拉裂纹的失稳扩展会导致相邻裂隙尖端横向应变值发生不同的变化趋势（增大或减小）。

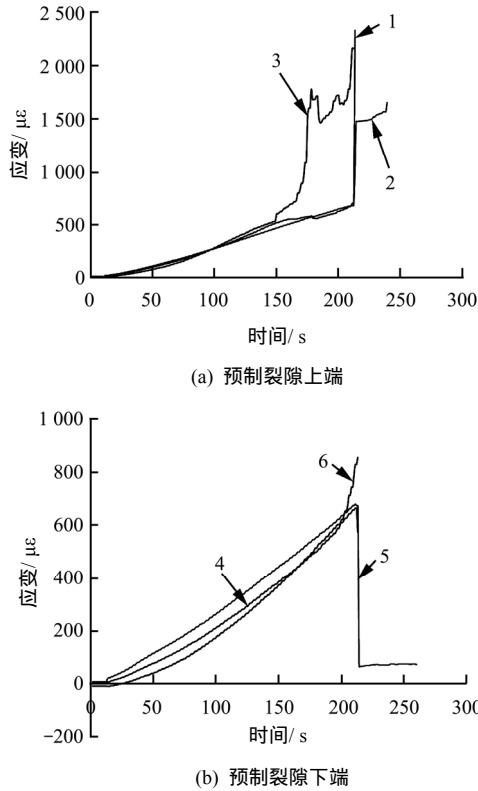


图 19 应变-时间关系曲线  
Fig.19 Relationships between strain and time

#### 4.4 声发射特性分析

压缩荷载作用下试样内微裂隙的萌生、扩展及

贯通，将造成试样内部的应力松弛，试样内储存的部分弹性能以应力波的形式释放出来，进而产生声发射现象<sup>[23]</sup>。结合含不同预制裂隙数目模型试样的荷载-声发射-时间曲线（见图 20）不难看出，模型试样在不同的变形破坏阶段（压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段、整体失稳阶段以及残余强度阶段）的声发射特性差异明显。具体来看，在压密阶段和弹性变形阶段，有少量的声发射撞击事件产生，这是由于试件非均质性，一些微裂隙被压密以及少量的微破裂产生，但这些声发射撞击所携带的能量值很低，声发射累计能量曲线保持在很低水平，并呈现整体缓慢上升趋势。需要说明的是，由于含 2 条

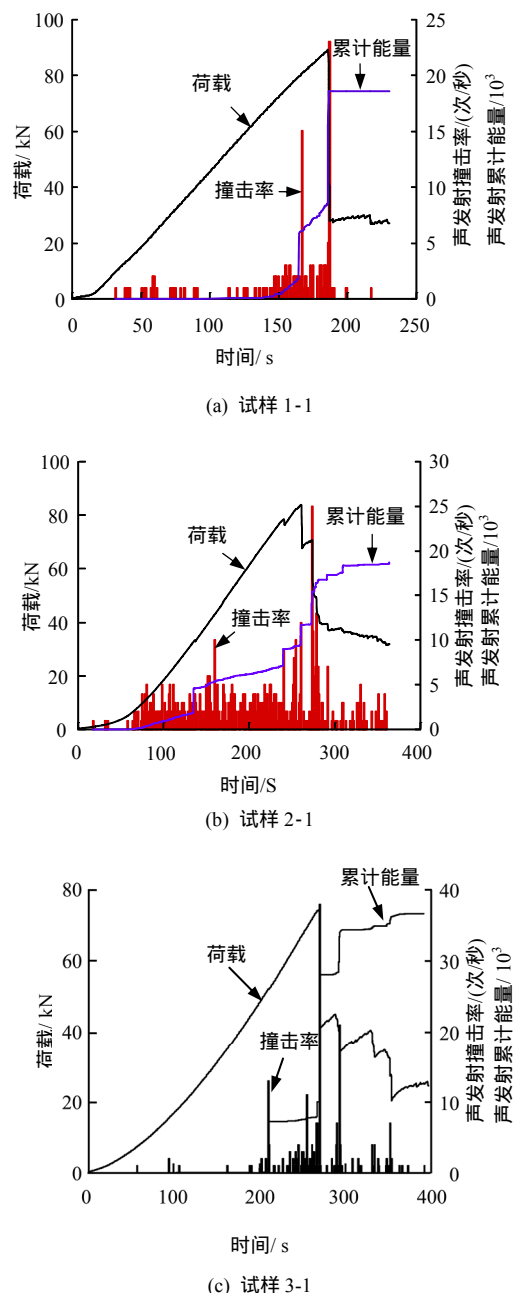


图 20 荷载-声发射-时间关系曲线  
Fig.20 Curves of load-acoustic emission-time

预制裂隙试样 2-1 在弹性变形阶段便在预制裂隙尖端形成了张拉裂纹,相比试样 1-1、3-1 其声发射信号要活跃得多;在屈服阶段,预制裂隙尖端微裂纹的萌生与扩展导致声发射事件撞击率开始显著增大,声发射累计能量曲线呈现非线性增加的趋势;在整体失稳阶段,试样内裂纹快速扩展,迅速贯穿试样,形成宏观的破裂面,此时声发射撞击率达到最大值,累计能量曲线几乎呈现竖直上升趋势,由前文分析可知,此阶段发生岩板的压折与岩片的弹射现象;残余强度阶段,含 1 条预制裂隙模型试样的声发射信号趋于稳定,含 2 条和 3 条预制裂隙模型试样仍有少量声发射撞击事件产生。

含不同预制裂隙模型试样其整个破坏过程中的声发射特性有所差异:(1)含 2、3 条预制裂隙模型试样在残余强度阶段声发射信号仍然比较活跃,结合前文所述的试样破坏过程分析可知,残余强度阶段预制裂隙尖端压剪裂纹的萌生与扩展,是导致此阶段声发射信号活跃的原因所在;(2)随着预制裂隙数目增多,声发射累计能量曲线也表现出更多的突增点,并且试样整个破坏过程中的声发射撞击率峰值以及累计能量峰值也相应增大,这是由于预制裂隙数目的增多导致试样破坏过程中裂纹萌生与扩展数量的增多,伴随着试样中每一次裂纹的快速扩展,声发射撞击率和累计能量都会出现不同程度的增大。

## 5 结 论

(1)板裂化模型试样失稳破坏过程表现出应变型岩爆的特征,其典型的破坏过程可概括为预制裂隙尖端张拉裂纹的萌生与扩展-试样劈裂成板-岩板屈曲变形-岩板压折、岩片弹射;板裂化模型试样的失稳破坏过程与深埋硬岩隧洞典型的应变型岩爆发生过程一致。

(2)与完整试样相比,含 1~3 条预制裂隙模型试样其峰值强度、弹性模量均呈现稳定下降的趋势:含 1~3 条预制裂隙模型试样其峰值强度分别下降了 16.74%、24.12%、28.84%,弹性模量分别下降了 10.05%、20.28%、22.99%,峰值轴向应变呈现先减小后增大的趋势。

(3)压缩荷载作用下预制裂隙尖端产生的裂纹以张拉型为主,张拉裂纹的产生会造成试样侧向变形的突增以及侧向变形速率的显著增大;不同位置的预制裂隙,其尖端裂纹的扩展特征有所不同:试样内部预制裂隙尖端产生的张拉裂纹会经历较长时间的稳定扩展阶段,受临空自由面的影响,靠近临

空面的预制裂隙,张拉裂纹产生后在很短的时间内便会失稳扩展,进而造成试样整体失稳破坏。

(4)预制裂隙尖端在产生较小的拉应变情况下便会有张拉裂纹的萌生与扩展,张拉裂纹的不稳定扩展会导致相邻裂隙尖端横向应变值发生不同的变化趋势(增大或减小)。

(5)分析试样整个变形破坏阶段(压密阶段、弹性变形阶段、屈服阶段、整体失稳阶段以及残余阶段)的声发射特性,残余强度阶段预制裂隙尖端压剪裂纹的萌生与扩展,导致此阶段声发射信号活跃,而预制裂隙数目的增多导致试样破坏过程中裂纹萌生与扩展数量的增多,进而造成试样声发射撞击率峰值、累计能量峰值的增大,声发射累计能量曲线则表现出更多的突增点。

与板裂化围岩实际受力状态相比(见图 2),本次试验并未考虑第二主应力  $\sigma_2$  的影响,其原因是:(1)根据相关室内试验<sup>[24]</sup>和数值模拟<sup>[9]</sup>的结论,双向压缩荷载作用下第二主应力的作用利于试样内产生的裂纹朝向两个主应力方向扩展,形成多组近似平行分布的板裂裂纹。本文试验模型试样中已经制作了平行预制裂隙用于模拟试样的板裂化破坏形态,因而试验中未考虑  $\sigma_2$  的作用。(2)第二主应力  $\sigma_2$  方向荷载的施加将不便于预制裂隙尖端裂纹扩展的观察、模型试样失稳破坏过程的认识,此外,第二主应力方向荷载的施加在试验操作中也有诸多不便之处。

## 参 考 文 献

- [1] DOWDING C H, ANDERSSON C A. Potential for rock bursting and slabbing in deep caverns[J]. *Engineering Geology*, 1986, 22: 265 - 279.
- [2] STACEY T R. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(6): 469 - 474.
- [3] STACEY T R, HARTE N D. Deep level raise boring - prediction of rock problems[C]//Proceedings International Symposium Rock at Great Depth. Rotterdam: BALKEMA AA, 1989: 583 - 588.
- [4] 侯哲生, 龚秋明, 孙卓恒. 锦屏二级水电站深埋完整大理岩基本破坏方式及其发生机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(4): 727 - 732.  
HOU Zhe-sheng, GONG Qiu-ming, SUN Zhuo-heng. Primary failure types and their failure mechanisms of deep buried and intact marble at Jinping II Hydropower Station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and*

- Engineering**, 2011, 30(4): 727 - 732.
- [5] 吴世勇, 龚秋明, 王鸽, 等. 锦屏 级水电站深部大理岩板裂化破坏试验研究及其对 TBM 开挖的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1089 - 1095.  
WU Shi-yong, GONG Qiu-ming, WANG Ge, et al. Experimental study of slabbing failure for deep-buried marble at Jinping II Hydropower Station and its influence on TBM excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(6): 1089 - 1095.
- [6] GONG Q M, YIN L J, WU S Y, et al. Rock burst and slabbing failure and its influence on TBM excavation at headrace tunnels in Jinping II Hydropower Station[J]. **Engineering Geology**, 2012, 124: 98 - 108.
- [7] 谭以安. 岩爆岩石断口扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程[J]. 电子显微学报, 1989, 8(2): 41 - 48.  
TAN Yi-an. Analysis of fractured face of rockburst with scanning electron microscope and its progressive failure process[J]. **Journal of Chinese Electron Microscopy Society**, 1989, 8(2): 41 - 48.
- [8] LI Di-yuan, CHARLIE C L, LI Xi-bing. Influence of sample height-to-width ratios on failure mode for rectangular prism samples of hard rock loaded in uniaxial compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2011, 44(3): 253 - 267.
- [9] CAI Ming. Influence of intermediate principal stress on rock fracturing and strength near excavation boundaries - Insight from numerical modeling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45: 763 - 772.
- [10] ZHANG Chuan-qing, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Layered fractures induced by the principle stress axes rotation in hard rock during tunneling[J]. **Materials Research Innovations**, 2011, 15: 527 - 530.
- [11] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 1994, 9(1): 59 - 65.
- [12] ORTLEPP W D. Rock fracture and rockbursts — an illustrative study[M]. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1997.
- [13] DIEDERICHS M S. The 2003 Canadian geotechnical colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2007, 44(9): 1082 - 1116.
- [14] 周辉. 深埋隧洞围岩破裂结构特征及其与岩爆的关系[C]//新观点新学说学术沙龙文集 51. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 106 - 114.
- [15] FAIRHURST C, COOK N G W. The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighborhood of a surface[C]// Proceedings of the First Congress of International Society on Rock Mechanics. Lisbon: [s.n.], 1966: 687 - 692.
- [16] 张传庆, 冯夏庭, 周辉, 等. 深部试验隧洞围岩脆性破坏及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2063 - 2068.  
ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Brittle failure of surrounding rock mass in deep test tunnels and its numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2063 - 2068.
- [17] ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-Ting, ZHOU Hui, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2012, 45: 275 - 288.
- [18] MARTIN C D, READ R S, MARTINO J B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(7): 1065 - 1073.
- [19] DYSKIN A V, GERMANOVICH L N. Model of rockburst caused by cracks growing near free surface[C]// Rockbursts and Seismicity in Mines, Rotterdam: Balkema, 1993: 169 - 174.
- [20] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41: 785 - 812.
- [21] 方恩权, 蔡永昌, 朱合华. 自由边界形状与近边界裂纹相互作用模型研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3318 - 3323.  
FANG En-quan, CAI Yong-chang, ZHU He-hua. Research on interaction model of free boundary shape on crack propagation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3318 - 3323.
- [22] 冯涛, 潘长良. 硐室岩爆机制的层裂屈曲模型[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 287 - 290.  
FENG Tao, PAN Changliang. Lamination spalling buckling model for formation mechanism of rockburst[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2000, 10(2): 287 - 290.
- [23] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(2): 151 - 171.
- [24] SAHOURYEH E, DYSKIN A V. Crack growth under biaxial compression[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 2002, 69: 2187 - 2198.