

大理岩真三轴卸载强度特征与破坏力学模式

沙 鹏¹, 伍法权¹, 常金源²

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院 岩石力学与地质灾害实验中心, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315012)

摘要: 深部高储能岩体开挖导致应变能释放, 并引起快速的卸载破坏, 形成岩爆等严重的工程灾害。根据锦屏水电站地下厂房工程环境以及开挖扰动特征, 采用真三轴卸载实验、声发射监测、SEM 电镜扫描等手段, 对高储能岩体在不同应力路径与荷载速率下的卸载强度和破裂演化特征进行研究。实验结果表明: 真三轴卸载条件下, 大理岩宏观破坏与常规压缩实验过程有显著差别, 高储能岩体受卸载路径及卸载速率控制, 表现出原位强度为 $0.45\sigma_c \sim 0.6\sigma_c$ 。结合 SEM 扫描电镜图像以及声发射参数特征揭示, 大理岩卸载破坏呈现张性萌生 - 剪切交汇 - 贯通破坏的渐进过程, 并受不同的应力路径、卸载速率影响显著。基于上述卸载渐进破坏力学模式, 采用劈裂界线、修正的 Griffith 强度曲线和非线性 Mohr-Coulomb 强度曲线的组合来解释原位岩体破坏的“S”型曲线规律。研究结果为认识不同条件下地下工程建设中岩爆等快速卸载破坏的形成机制提供理论依据。

关键词: 岩石力学; 高储能岩体; 真三轴卸载实验; 强度特征; 破裂演化; 声发射

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)09 - 2084 - 09

Unloading strength and failure pattern of marble under true triaxial test

SHA Peng¹, WU Faquan¹, CHANG Jinyuan²

(1. Centre of Rock Mechanics and Geological Disaster, College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 2. Zhejiang Engineering Investigation Institute, Ningbo, Zhejiang 315012, China)

Abstract: Brittle rocks have high strain energy under high in-situ stress. The quick release of strain energy during excavation often leads to fast unloading deformation and failure in the rock, which may induce the intense engineering hazards like rock burst. Based on the real conditions of Jinping Hydropower Station, a series of true tri-axial unloading tests were carried out under different stress paths together with acoustic emission monitoring and scanning electron microscopy(SEM) analysis. We investigate the strength characteristics of and the fracture evolution in the high strain energy rock induced by fast unloading process. The results indicate that the strength under true tri-axial condition is remarkable smaller than compressive rock strength, characterized by $0.45\sigma_c - 0.6\sigma_c$, due to the unloading rate effect and the complexity of stress path. Acoustic emission(AE) system is used to monitor the failure process of rock tests. The characteristics of AE parameters were used to figure out the typical micro-fracture development of Jinping marble during the tests. The damage of rock initiates during the unloading cycle, with a number of tensile cracks generated in the specimen. The shear cracks are generated by the interconnection of tensile cracks to form the fracture, a large amount of elastic strain energy releases at the same time. The mechanism of the tensile-shear process is remarkably influenced by different stress paths and loading

收稿日期: 2018 - 04 - 19; **修回日期:** 2018 - 06 - 05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41030749); 中央高校基础科研业务费专项资金资助项目(310821171125)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41030749) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(Grant No. 310821171125)

作者简介: 沙 鹏(1985 -), 男, 2015 年于中国科学院地质与地球物理研究所地质工程专业获博士学位, 现任讲师, 主要从事岩体力学与工程方面的研究工作。E-mail: aksp_123@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0372

rates. This fracture pattern can be interpreted through a combination of modified Griffith's strength theory, spalling limit and non-linear Mohr-Coulomb theory. All results can simulate well the different types of unloading failure process, such as rock burst in the large underground works.

Key words: rock mechanics; high strain energy rock; true triaxial rock test; strength characteristics; fracture evolution; acoustic emission

1 引言

深埋岩石工程将越来越多地建造在西部高山峡谷地区的坚硬岩体中,且埋深越来越大,工程埋深的增大,加之西部地区复杂的地壳动力学背景,高地应力成为深部地下工程的共同特点^[1-4],岩体中储存极高的应变能。高储能岩体大规模开挖将形成强烈的原岩应力扰动,引起围岩持续不断的大变形和突发性破坏^[5-9]。高地应力环境下的这些变形破坏现象形成机制及其对工程影响,已经成为工程地质和岩石力学界的一个热点科学难题^[10]。

针对高储能岩体开挖形成的典型破坏现象,国内外学者通过室内实验手段得到了许多用来描述岩石或岩体在不同应力条件下的强度特征与破坏规律。D. Martin 和 N. Chandler^[11]基于三轴压缩应力-应变关系,阐述了脆性岩石的渐进破坏过程。工程岩体原位强度可由裂隙损伤应力($\sigma_{cd} = 0.3\sigma_c \sim 0.5\sigma_c$)表征。P. Kaiser 等^[12]根据原位观测及数值分析,提出定性描述原位岩体强度的“S”型包络线,传统的恒定岩石力学参数已经不能反映深部洞室脆性岩体破坏现象。

岩石脆性破坏是一个微裂纹形成、发展和汇合的渐进过程。作为一种实时无损的实验手段,声发射(AE)可以通过监测岩石实验破坏过程表征岩石的破裂演化。根据声发射源的产生机制,可以分析岩石裂纹的形成时间与模式^[13]。室内实验结果表明,声发射特征受岩石种类、实验条件的影响显著^[14-17],这种差异反映了材料不同的本构特征^[18]。循环荷载条件下对岩石声发射过程的研究发现,声发射撞击数和绝对能量 2 个表征参数可描述岩石力学性质变化,AE 信号受应力路径和荷载速率控制,会产生幅值、频率以及能量释放特征的变化^[19-21]。

现阶段常规实验尚无法做到真实模拟实际岩体开挖过程,且无法考虑卸载路径的方向性^[22]。真三轴实验过程产生的声发射规律研究仅局限在累计撞击数、振铃计数与能量等常规参数变化特征^[23-25]。

利用声发射分析岩石真三轴卸载渐进破坏过程,目前还没有文献进行阐述。本文将通过真三轴卸载实验,结合声发射监测技术,研究卸载条件下高储能岩体渐进破坏过程的强度特征与破裂演化,对正确认识深部岩体开挖破坏力学模式,准确分析围岩稳定性有重要意义。

2 真三轴卸载实验

2.1 样品制备

实验样品为取自锦屏一级水电站引水隧洞的白色大理岩。X 射线荧光光谱分析岩石矿物组成为方解石 10.5%,白云石 88.4%,石英 1.1%。实验前将大理岩块体加工成尺寸为 150 mm×60 mm×30 mm 的长方体试件。此次实验样品共 12 个,平均密度为 2.82 g/cm³,平均纵波波速为 4 828.5 m/s,岩石表面无明显裂纹。

为选择合理的竖向主应力加载范围,减少卸载次数以便减少前期多次卸载损伤对最终破坏的影响,在进行真三轴卸载实验之前,首先对锦屏大理岩进行不同样品尺寸的单轴压缩实验。测试结果显示,大理岩单轴抗压强度为 160 MPa,弹性模量为 51.2 GPa,泊松比为 0.23。

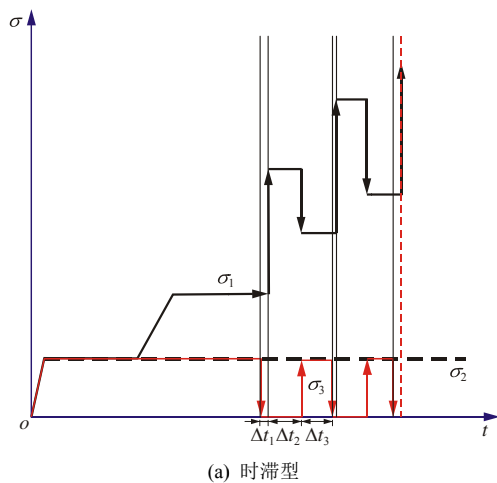
2.2 实验系统及实验方案

实验采用中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室深部岩爆过程模拟系统进行,由真三轴力学实验机(见图 1)及 PCI-II 声发射监测系统组成。力学实验机可通过单侧暴露岩样表面,完成三向不同加载单面卸载的应力路径,模拟深部岩体开挖的快速卸载过程。同时可实时记录三向应力,采样频率分别为加载 1 次/(10 s),卸载和岩爆 1×10⁴ 次/s。声发射监测系统可对声发射事件自动计数、储存,实现声发射的实时监测。考虑岩石声发射波形的频响范围^[26],此次实验采用 2 个 100 kHz~1 MHz 的声发射探头,分别布置在样品两侧,其采样频率为 5 MHz。根据以往实验经验与断铅测试结果,设置声发射门槛值为 40 dB。

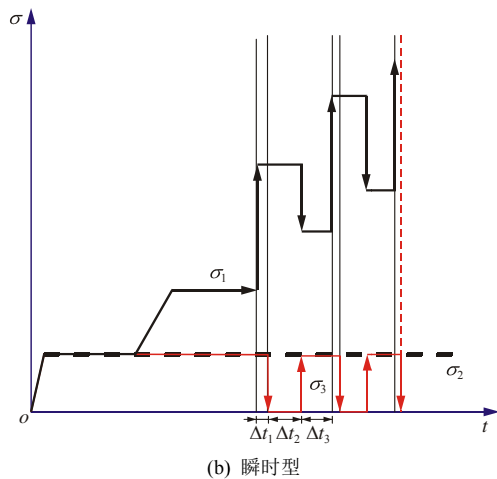


图1 真三轴卸载岩石实验系统
Fig.1 The true triaxial unloading test system

陈炳瑞等^[27-28]对岩爆的类型划分以及控制性因素的归纳,对本文的实验设计具有很好的指导作用。当岩石的应力状态处于中高应力区(小于但接近最小主应力为0时的强度值)时,快速卸载最小主应力不会马上导致岩石的破坏,但是在应力重分布导致最大主应力增大,或者受到爆破等外源扰动时,可能会发生时滞岩爆(见图2(a))。当岩石的应力状态处于高应力区(大于最小主应力为0时的强度值)时,



(a) 时滞型



(b) 瞬时型

图2 卸载实验应力路径

Fig.2 Stress paths of true triaxial unloading test

快速卸载最小主应力可以导致瞬时岩爆,如图2(b)所示。因此根据深部地下工程开挖以及高边坡坝基开挖的动态加、卸载条件,提出2种不同应力路径的实验方案,模拟临空面岩石的力学响应。基于锦屏一级水电站的应力测试结果,确定本次真三轴岩石实验的加载预应力值,按照弹性岩体开挖后洞室围岩应力分布的Kirsch方程($\sigma_{max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$),设计每一级加载的应力增量。此外,根据锦屏水电站引水隧洞数值模拟反演结果^[29]以及单轴抗压强度结果,确定单面卸载后垂向应力的加载极限值。

2.3 实验过程

实验过程采用分级应力控制加载,加载间隔5 min。3个方向应力匀速加载(加载速率0.1 MPa/s)至最小主应力 σ_3 。随后保持 σ_3 不变,均匀增加最大主应力 σ_1 及中间主应力 σ_2 至设定值。保持 σ_2 及 σ_3 不变,再增加 σ_1 至设计应力值。

按照实验应力路径将大理岩样品分为3组,每组4个岩样。其中一组实验迅速卸载一个水平方向的单面荷载,保持水平方向其他应力不变的同时增加竖向荷载,模拟时滞型卸载破坏过程。在试件未发生破坏的情况下,重复上述卸载-加载过程,直至破坏现象发生。另一组实验首先增加竖向荷载至设计值,随后通过单面快速卸载,模拟瞬时型卸载破坏过程,并以此类推,直至试件产生宏观破坏。最后一组在瞬时型卸载应力路径基础上,采用不同的卸载速率(分别为8, 9, 10, 11 MPa/s)完成卸载破坏。

3 锦屏大理岩卸载强度特征

3.1 时滞型卸载破坏

根据上述实验方法,对大理岩样品进行时滞型卸载破坏实验。以试件JP2[#]实验结果为例,整个实验过程可分为初始应力加载(I)、应力保持(II),初次卸载循环(III)、应力恢复(IV)和二次卸载循环(V)五个阶段,如图3所示。再次卸载循环前,三向应力值分别为37.8, 34.7和29.8 MPa。单面卸载瞬间,应力值变为36.4, 34.1和0.0 MPa。卸载后约6 min,在试件中部开始有微小碎屑掉落。经过10 s的平静期,试件上部开始出现薄片状的碎屑剥落,最大的碎屑直径约为4.5 cm。约32 s后,大量的薄片碎屑从试件上部快速弹射出来,试件完全破坏,此时轴向应力为90.9 MPa。

3.2 瞬时型卸载破坏

以试件JP6[#]为例描述瞬时型卸载破坏实验,整个实验过程可以分为4个阶段(见图4),即初始应力

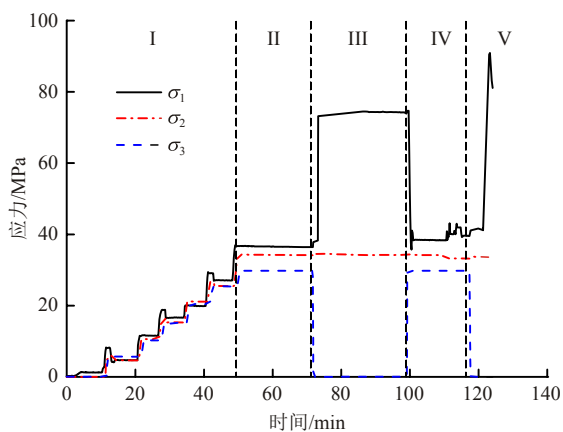


图 3 时滞型卸载破坏实验应力曲线

Fig.3 Stress curves of time delayed unloading failure

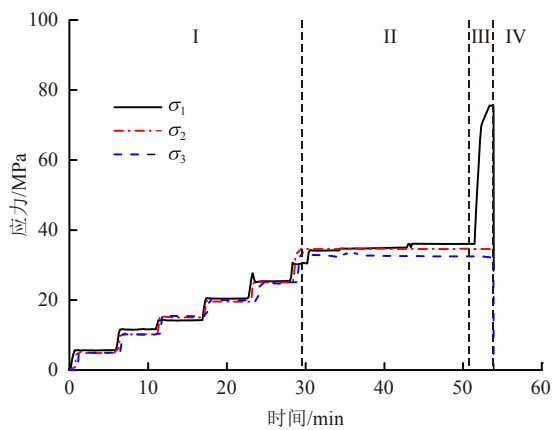


图 4 瞬时型卸载破坏实验应力曲线

Fig.4 Stress curves of instant unloading failure

加载(I)、应力保持(II)，轴向应力加载(III)以及卸载破坏(IV)。在 I, II 阶段，试件平稳受力没有任何宏观破坏现象发生，随着轴向荷载逐渐增大至 72 MPa 后，水平方向单面突然卸载。卸载后约 75.6 s，试件上方产生少量片状碎屑以较快速度弹射出来，并伴随有持续的声响。随后，距离试件上部约 4.5 cm 处出现一条倾角约 5° 的竖向断裂，沿断裂上部发生向外剥离，剥离碎块长约 6 cm、宽约 4.5 cm，试件随即破坏，此时轴向应力为 74.7 MPa。

3.3 实验数据对比

实验结果显示，大理岩的卸载强度受应力路径影响显著，具体表现为真三轴卸载条件下岩石的极限强度约为单轴抗压强度的 45%~60%，具体见表 1。C. D. Martin 和 N. Chandler^[11]认为对于绝大多数脆性岩石，裂隙启裂应力水平为 $0.4\sigma_c \pm 0.1\sigma_c$ 。对比前人研究成果(见图 5)，2 组实验结果显示出与高储能破坏过程与强度特征较好的一致性。相对于时滞型破坏，瞬时型卸载强度更低。脆性岩体的原位强度由于卸载作用以及应力路径的复杂性，表现出明显小于单轴抗压强度的特征。

表 1 大理岩真三轴卸载强度实验结果

Table 1 Experimental results of true triaxial unloading tests

| 试验类型 | 试件编号 | 卸载强度/MPa |
|---------|------------------|-------------------------|
| 时滞型卸载试验 | JP1 [#] | 86.2(0.538 σ_c) |
| | JP2 [#] | 90.9(0.568 σ_c) |
| | JP3 [#] | 90.2(0.564 σ_c) |
| | JP4 [#] | 85.4(0.534 σ_c) |
| | JP5 [#] | 74.4(0.465 σ_c) |
| 瞬时型卸载试验 | JP6 [#] | 75.6(0.473 σ_c) |
| | JP7 [#] | 75.4(0.471 σ_c) |
| | JP8 [#] | 82.6(0.516 σ_c) |

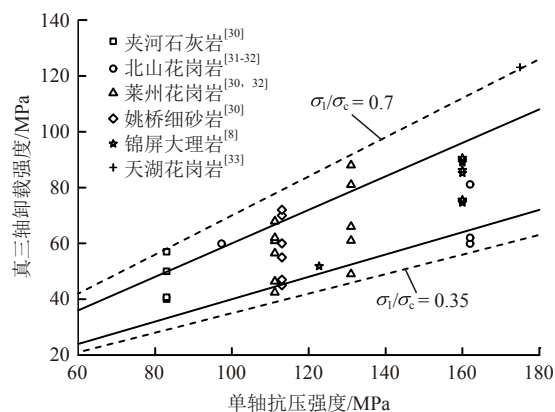


图 5 不同脆性岩真三轴卸载强度与单轴抗压强度对比

Fig.5 Comparison between true triaxial unloading strength and UCS of various brittle rocks

同时，对比瞬时型岩爆实验结果(见表 2)可以发现，岩石的临界破坏应力值随着卸载速率的提高而降低，最终破坏程度的强弱也受卸载速率的影响。随着卸载速率增大，试件破坏由主要以片状碎屑剥落为主，转化为大量片状碎屑出现弹射并产生碟状岩块弹出，直至出现岩爆现象，试件底部出现爆坑。卸载速率的大小直接决定了深部脆性岩体卸载破坏的临界值和剧烈程度。

表 2 不同卸载速率瞬时卸载实验测试结果

Table 2 Experimental results of instantaneous unloading with different unloading rates

| 试件编号 | 卸载速率/(MPa·s ⁻¹) | 临界应力/MPa | 试件宏观破坏现象 |
|-------------------|-----------------------------|----------|--|
| JP9 [#] | 8 | 90.2 | 试件破坏首先出现较小颗粒弹射，随后出现片状碎屑剥落为主及折断后掉落，伴随较大声响 |
| JP10 [#] | 9 | 85.4 | 卸载后立即发生破坏，试件顶部发生两次细小颗粒弹射，随后片状碎屑剥离弹出 |
| JP11 [#] | 10 | 82.6 | 试件破坏过程持续约 30 s，大量片状碎屑出现弹射并产生碟状岩块弹出，试件底部出现爆坑 |
| JP12 [#] | 11 | 75.4 | 试件顶部出现片状弹射，紧接着试件中部出现较猛烈的片状剥离，形成折断后以较高速率飞出，伴随较大响声，破坏过程持续约 1 min |

4 锦屏大理岩破裂演化特征

材料内部微破裂的声发射计算参数特征可以反映声发射源破裂性质，目前已应用于金属和建筑材料的力学实验中^[34-35]。其中，平均频率 AF (kHz)，定义为振铃计数与持续时间的比值)与 RA 值(ms/V ，定义为上升时间与幅值的比值)2 个参数，可以作为划分不同阶段岩石内部微破裂的形成模式的有效方法。如图 6^[35]所示，具有高 AF 、低 RA 值(绿色区)的声发射信号表现为张拉裂纹的产生或发育，而具有低 AF 、高 RA 值(红色区)的声发射信号通常代表剪切裂纹的产生或发育。

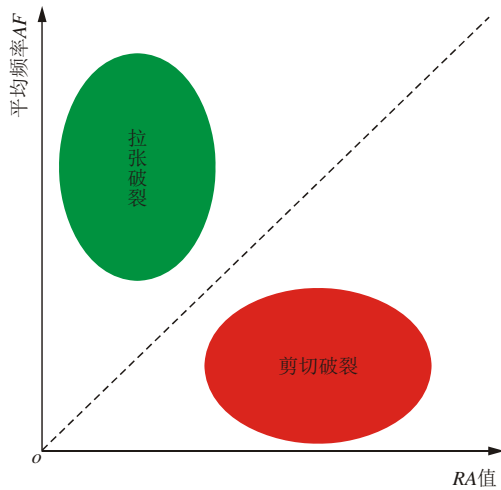


图 6 声发射计算参数及裂纹分类^[35]

Fig.6 Crack type classification with AF and RA value^[35]

4.1 声发射参数特征

根据上述声发射计算参数对微裂纹形成模式的指示作用，利用声发射撞击数对岩石破裂的敏感性，结合 AF 与 RA 值的变化，讨论真三轴卸载实验过程不同阶段的微破裂演化特征。通过定义计算实验中记录的声发射信号的 RA 与 AF 值，按照 1 : 6 的坐标比例绘制散点分布图。采用移动平均的方法，计算窗口为 500 个事件，滑动步长为 100 个事件，使散点形成随时间变化的曲线。

结合图 7 中声发射撞击数、能量及计算参数的时间演化曲线，可以看出，加载阶段初期产生大量声发射，但试件无能量释放，同时伴随高 AF 值与高 RA 值的参数特征。此时试件内部先存微裂纹发生闭合与相互摩擦，拉张与剪切模式并存。随后的加载过程声发射 RA 值降至 0， AF 曲线逐渐平稳，闭合、滑移现象消失。此后每级荷载对应着声发射率逐渐增加，声发射呈现 AF 值升高与 RA 值为 0 的参

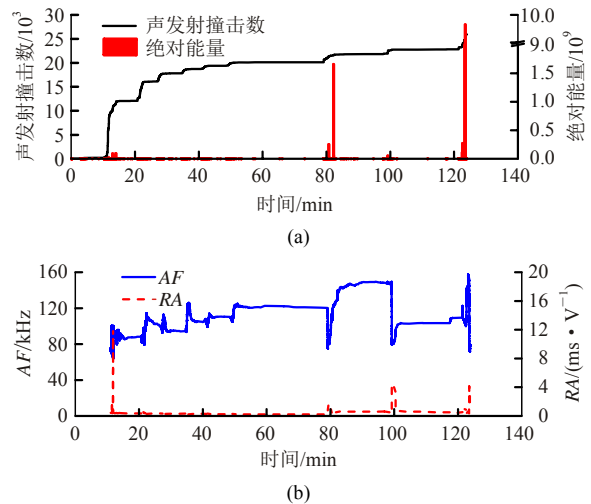


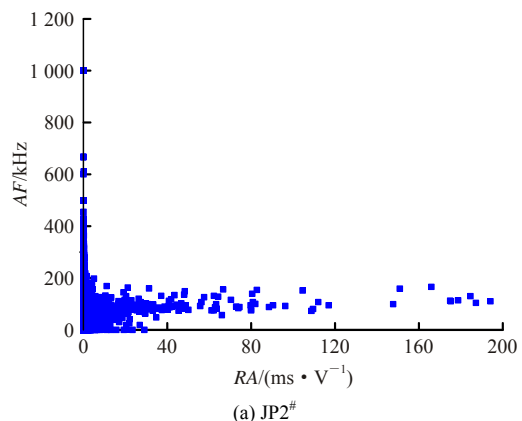
图 7 大理岩实验过程声发射参数变化趋势

Fig.7 Time curves of AE parameters

数特征，并仍无能量释放现象。试件每次内部应力调整产生一系列张裂纹，系统做功转变为应变能储存。当调整结束时，声发射便不再发生。

应力保持阶段以及单面突然卸载，声发射处于平静期，试件几乎无新裂纹产生。提高轴压后的第二次应力保持以及单面卸载产生声发射率的突然上升，伴随 AF 值曲线骤降， RA 值曲线与能量释放呈现突然上升，这一现象在最终的破坏阶段尤其显著。当应力达到试件不能自稳的阶段，应力调整基本稳定后声发射依然不会停止，试件连续变形和破坏。同时应力边界持续调整导致声发射现象将逐渐增多，岩石内部先存张裂纹产生汇合、连接，形成剪切裂纹，并伴随试件内部储存的应变能开始释放。

同时，对比 $JP2^\#$ 与 $JP6^\#$ 试件破坏阶段的声发射参数散点图(见图 8)可以发现，尽管试件宏观破坏与应变能释放的形成均由剪切裂纹控制，但应力路径的变化使得岩石破裂演化的模式有所差异，时滞型岩爆过程由于受卸载后轴向持续加载控制，其破坏阶段剪切裂纹控制显著；瞬时型岩爆实验的破裂演



(a) $JP2^\#$

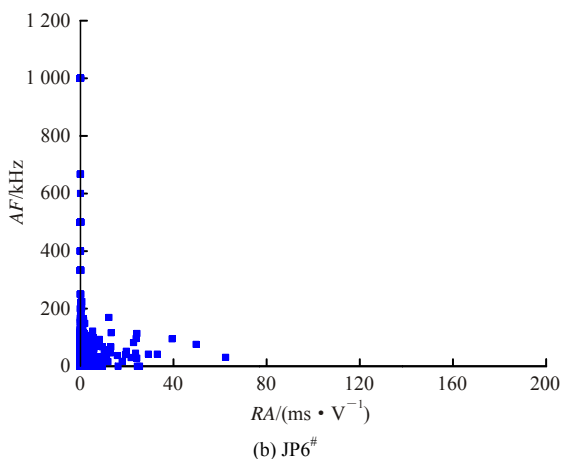


图 8 JP2#与 JP6#实验声发射参数变化对比

Fig.8 Contrast of calculated AE parameters between JP2# and JP6#

化则受卸载应力路径控制，裂纹由于来不及扩展而发育不完全，表现为剪切裂纹在破坏阶段的控制作用明显减弱，且应变能释放明显减小。

4.2 微破裂结构的 SEM 扫描

岩石的破裂过程以及声发射响应特征与岩石的结构和性质密切相关。岩石是由不同强度、不同尺寸的矿物颗粒组成的非均质系统。因此声发射不同的微破裂响应特征取决于样品内部的矿物类型、含量以及微结构特征。

提取 JP2#试件主断裂断口进行微观破裂结构 SEM 扫描。图像揭示主裂纹附近多出现方解石穿晶张裂纹(见图 9(a))。解理面两侧具有最弱的原子间作用力，单面卸载导致储存的弹性应变能释放，裂纹将沿着能耗最小的路径发展。因此临空面平行或者小角度相交的方解石解理，会首先张开并切穿矿物颗粒，产生定向排列的穿晶张裂纹。同时可看到矿物颗粒连接力较弱的界面上产生较多的沿晶张裂

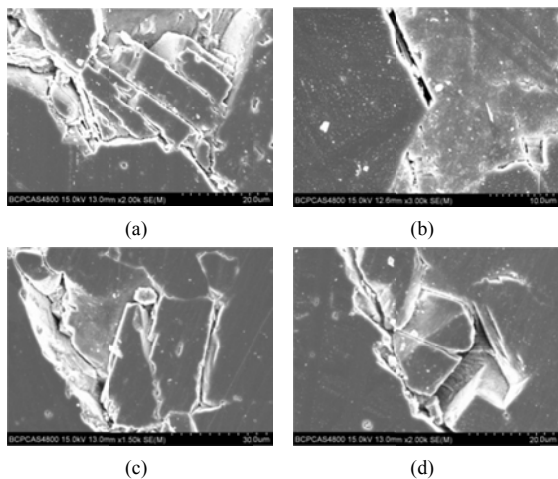


图 9 试件断裂断口的 SEM 扫描图像

Fig.9 SEM images of fragments after test

纹(见图 9(b))。白云石穿晶剪切裂纹(见图 9(c))以及石英穿晶剪切裂隙(见图 9(d))较少出现在主裂纹附近或更小的微观视域内。

声发射参数及裂纹微结构 SEM 扫描结果揭示，岩石的初期损伤始于卸载过程中岩石内部产生大量的微裂纹。在轴向压力作用下不断桥接、交汇，形成更大尺度的裂纹并最终形成主裂面，同时释放大量弹性应变能。微裂纹的成核、生长、扩展呈现张性机制，桥接、交汇与贯通过程呈现剪切机制。整个实验过程的微结构演化呈现张性萌生 - 剪切交汇 - 贯通破坏的张剪复合力学模式。

5 卸载破坏模式

上述实验结果表明：岩石真三轴卸载极限强度远小于室内单轴抗压强度和 Hoek-Brown 准则预测的强度；脆性岩体的卸载破坏主要为拉张、劈裂破坏，在加载控制条件下破坏趋向张剪、压剪力学模式。因此根据 P. K. Kaiser 等^[12]的研究成果(见图 10)，用修正 Griffith 强度曲线、非线性 Mohr-Coulomb 强度曲线以及劈裂界限之间的转换，来解释大理岩卸载破坏模式。

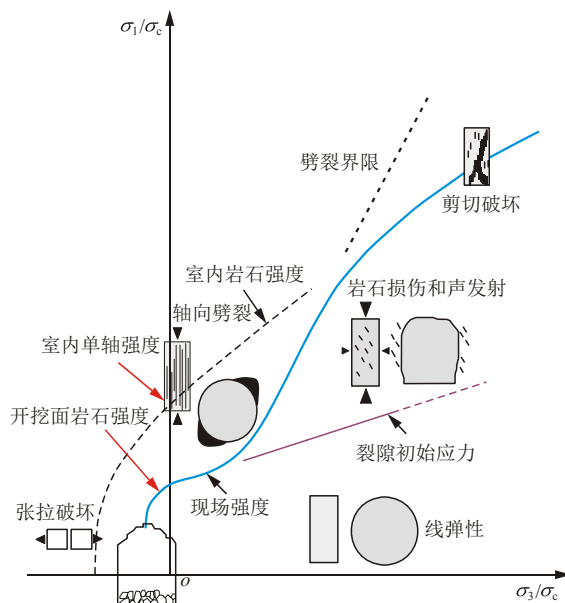


图 10 围岩脆性破坏的现场强度包络线^[12]

Fig.10 Sketch of composite strength envelope of brittle failure near the excavation boundaries^[12]

卸载应力路径下，拉张裂纹的形成与扩展控制整个破坏过程。根据 Griffith 强度理论以及大量岩石力学实验结果，多数坚硬岩石在满足 $\sigma_c > (8 \sim 20)\sigma_t$ 关系时，其中， σ_c 为岩石单轴抗压强度， σ_t 为岩石

抗拉强度，岩石具有发生拉张破坏的脆性质。基于脆性材料起裂过程的 Griffith 公式如下：

$$\sigma = \sigma_1, 3\sigma_3 + \sigma_1 \leq 0 \quad (1)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 8\sigma_1(\sigma_1 + \sigma_3), 3\sigma_3 + \sigma_1 > 0 \quad (2)$$

定义材料的压拉比为 8。但此后大量实验发现，岩石的压拉比明显大于 8^[36]，原因在于压缩条件下，岩石的起裂强度通常明显小于其峰值强度。因此，本文取 $\sigma_{ci} / \sigma_1 = 8$ ，其中， σ_{ci} 为岩石的起裂强度，且 $\sigma_{ci} = 0.5\sigma_c$ 。

围压升高使拉张裂纹形成被抑制，高围压下岩石主要的破坏形式为剪切破坏，这一过程可以用 Mohr-Coulomb 强度准则来解释。通过 M. Singh 等^[37]提出的完整岩石 Mohr-Coulomb 准则修正公式，可利用单轴抗压强度 σ_c ，内摩擦角 φ 得到完整岩石的非线性强度曲线：

$$\sigma_1 = \sigma_c + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 - \frac{\sin \varphi}{\sigma_c(1 - \sin \varphi)} \sigma_3^2 \quad (3)$$

在拉张与剪切破坏控制之间，P. Kaiser 等^[38]考虑岩石与岩体的各向异性等因素，提出可以用劈裂界限(Spalling limit)定义张剪过渡区，即 $\sigma_1 / \sigma_3 = 5 \sim 20$ 。

根据锦屏大理岩测试结果，取抗压强度 160 MPa，抗拉强度 10 MPa，内摩擦角 φ 为 50°，劈裂界限 $\sigma_1 / \sigma_3 = 5 \sim 10$ ，将 Griffith 曲线、Mohr-Coulomb 曲线和劈裂界限在同一坐标系下绘制锦屏大理岩强度包络线，如图 11 所示。图 11 中三者围成的红色实线与图 10 中 P. K. Kaiser 等^[12]提出的现场强度包络线基本吻合。

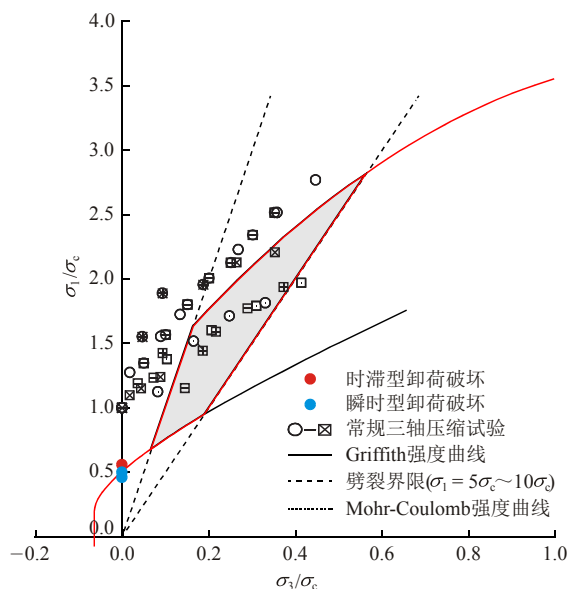


图 11 “S”型强度包络线的理论解释

Fig.11 Theoretical explanation of S shaped strength envelope

将此次真三轴卸载实验结果与蔡明等^[39-44]关于锦屏大理岩的常规三轴压缩实验结果投影到图 11 中。由图 11 可看出，真三轴卸载导致围压降低条件下岩石常常为张性破裂，遵从 Griffith 强度曲线，其强度约为 $0.5\sigma_{ci}$ 。在高围压条件下沿 Mohr-Coulomb 非线性强度曲线产生压剪性破坏。两者之间存在一段沿劈裂界限发生劈裂破坏阶段，室内三轴压缩实验结果明显高于现场强度预测曲线，压剪破坏过程并不能准确反映脆性岩石开挖卸载后的渐进破坏模式与强度特征。

6 讨论

本研究建立在室内真三轴卸载实验的基础上，样品尺寸的特殊性导致实验过程会有压杆效应产生。笔者在调研相应样品尺寸实验成果时发现，H. H. Bobet 等^[45]指出在该尺寸范围内得到的实验结果是可信的。同时，由于实验系统不能准确获取应变数据，故本文仅对卸载强度特征开展研究。下一步将通过自主研发设备，获取真三轴卸载应力 - 应变曲线，开展高储能岩体卸荷本构关系研究。

本文采用声发射计算参数，借助前人实验研究成果，给出 2 个参数的比例关系来界定真三轴卸载实验不同阶段的破裂模式。通常情况下认为脆性破坏分为拉张和剪切 2 种模式。S. M. Ramsey 和 F. M. Chester^[46]设计实验证实了岩石在压应力与拉应力的联合作用下还会产生一种耦合破坏模式，张破裂与剪破裂之间存在过渡形式。声发射计算参数可以对岩石破裂演化进行过程描述，但针对不同破裂模式的比例关系，尤其是张剪耦合破裂的声发射临界参数无法准确提取。此问题的解决需要借助如三点弯、直接剪切等实验，进行不同破裂类型的声发射计算参数临界值的研究。

本文借鉴前人经验，采用线性方程，并规定 $\sigma_1 / \sigma_3 = 5 \sim 10$ 作为劈裂破坏出现的围压界限。然而，目前并没有很好的方法来确定高、低围压之间的岩石破坏类型的过渡形式、范围，以及劈裂界限的表示方法。下一步将通过数值方法，针对不同岩石种类及岩体结构形式确定劈裂界限的合理形式与范围。

7 结论

高储能岩体由于工程开挖导致的快速卸载破坏，是一个复杂而系统的渐进过程，传统理论与常

规实验结果已无法解释。本文基于真三轴卸载实验, 结合声发射监测及微结构 SEM 扫描, 对锦屏大理岩在真实应力路径及应力值条件下的强度特征和破裂演化进行系统研究, 获得的主要结论如下:

(1) 利用深部真三轴卸载实验过程模拟系统, 分别模拟岩体在三向高应力状态下的时滞型与瞬时型卸载破坏过程。从不同方案的实验过程可以看出, 高应力条件下大理岩主要由卸载效应与卸载速率控制, 卸载强度与压缩条件下裂隙初始应力水平一致。与时滞型实验相比, 瞬时型卸载破坏的极限强度较低, 并随着卸载速率的加大, 岩石更容易发生破坏。

(2) 声发射参数特征与裂纹微结构扫描的结果显示, 岩石的初期损伤始于卸载条件下岩石内部产生的大量微裂纹, 微裂纹的成核、生长、扩展呈现张性机制, 在围压作用下微裂纹不断桥接形成更大尺度的裂纹, 并在轴向压力作用下加速交汇、贯通, 形成主裂面, 同时释放大量弹性应变能。裂纹的桥接、交汇和贯通至破坏过程呈现剪切机制。整个实验过程的微结构变化呈现张性萌生 - 剪切交汇 - 贯通破坏的演化模式。结合前人研究成果, 提出可采用 Griffith 强度曲线、Mohr-Coulomb 强度曲线以及劈裂界限之间的转换, 对原位岩体强度包络线进行理论解释。

(3) 目前岩爆的预测多采用强度应力比判据, 如 Hoek-Brown 经验判据等, 均采用压破裂模式, 即利用抗压强度与环境应力之比判别岩爆的发生。本文实验数据表明, 在实际工程条件下, 高储能岩体快速卸载后表现为强度明显低于抗压强度, 演化过程受卸载路径与速率的影响。破坏模式受张 - 剪联合控制的特征, 可以引导卸载张应力判据建立、破坏前兆预测以及防护方式的改进。

参考文献(References):

- [1] 丁立丰, 安其美, 王海忠, 等. 金沙江溪洛渡水电站水压致裂地应力测量分析研究[J]. 中国地震, 2004, 20(1): 95 - 100.(DING Lifeng, AN Qimei, WANG Haizhong, et al. Research on crustal stress measurement with hydrofracturing in the Xiluodu hydropower station on the Jinsha River[J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(1): 95 - 100.(in Chinese))
- [2] 李 宏, 马元春, 王福江. 亚磁套芯三维原地应力测量研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 253 - 257.(LI Hong, MA Yuanchun, WANG Fujiang. Study on 3D in-situ stress measurement by piezomagnetic overcoring method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 253 - 257.(in Chinese))
- [3] 谭成轩, 张 鹏, 郑汉淮, 等. 雅砻江锦屏一级水电站坝址区实测地应力与重大工程地质问题分析[J]. 工程地质学报, 2007, 16(2): 162 - 168.(TAN Chengxuan, ZHANG Peng, ZHENG Hanhuai, et al. An analysis on in-situ crustal stress measurements and major engineering geology issues at the dam site area of Jinping first stage hydropower station[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 16(2): 162 - 168.(in Chinese))
- [4] 王学潮, 郭啟良, 张 辉, 等. 青藏高原东北缘水压致裂地应力测量[J]. 地质力学学报, 2000, 6(2): 64 - 70.(WANG Xuechao, GUO Qiliang, ZHANG Hui, et al. Crustal stress measurement in northeastern Qingzang Plateau by hydro fracturing[J]. Journal of Geomechanics, 2000, 6(2): 64 - 70.(in Chinese))
- [5] WU F, LIU J, LIU T, et al. A method for assessment of excavation damaged zone(EDZ) of a rock mass and its application to a dam foundation case[J]. Engineering Geology, 2009, 104: 254 - 262.
- [6] WU F, LIU T, LIU J, et al. Excavation unloading destruction phenomena in rock dam foundations[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(2): 257 - 262.
- [7] LAN H, WU F, YAN F, et al. Mechanism of deep cracks in the left bank slope of Jinping first stage hydropower station[J]. Engineering Geology, 2004, 73(1): 129 - 144.
- [8] 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, 2004, 73(1/2): 129 - 144.
- [9] 刘 彤. 小湾电站坝基岩体卸载工程地质力学研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2006.(LIU Tong. Study on engineering-geomechanics due to unloading at the dam-base of Xiaowan Hydropower Station[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [10] 蔡 明, 赵星光, KAISER P K. 论完整岩体的现场强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 1 - 13.(CAI Ming, ZHAO Xingguang, KAISER P K. On field strength of massive rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 1 - 13.(in Chinese))
- [11] MARTIN C D, CHANDLER N. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geotechnics Abstracts, 1994, 31(6): 643 - 659.
- [12] KAISER PK, DIEDERICHS MS, MARTIN CD, et al. Underground works in hard rock tunnelling and mining[C]// Keynote lecture at Geo Eng. Melbourne, Australia, Technomic Publishing Co., 2000: 841 - 926.
- [13] 乔 兰, 王 旭, 李 远. 深部花岗岩闪长岩破坏过程声发射及特征应力特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 1): 2 773 - 2 778.(QIAO Lan, WANG Xu, LI Yuan. Study of acoustic emission and characteristic stress in deep Granodiorite failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.1): 2 773 - 2 778.(in Chinese))
- [14] 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.
- [15] 吴 刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特征[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82 - 85.(WU Gang, ZHAO Zhenyang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 82 - 85.(in Chinese))
- [16] 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): 2 499 - 2 503.(LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(in Chinese))
- [17] 陈 亮, 刘建峰, 王春萍, 等. 北山深部花岗岩不同应力状态下声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增 2): 3 614 - 3 618.(CHEN Liang, LIU Jianfeng, WANG Chunping, et al. Study of acoustic emission characteristics of Beishan deep granite under different stress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.2): 3 614 - 3 618.(in Chinese))
- [18] 程立朝, 许 江, 冯 丹, 等. 岩石剪切破坏裂纹演化特征量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 31 - 39.(CHENG Lichao, XU Jiang, FENG Dan, et al. Quantitative analysis on development of surface cracks of rocks upon shear failure[J]. Chinese Journal of Rock

- Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 31 - 39.(in Chinese))
- [19] 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): 1 230 - 1 236. (ZHANG Liming, WANG Zaiquan, 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): 1 230 - 1 236.(in Chinese))
- [20] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠, 等. 循环荷载下大试件岩石破坏声发射实验——岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(ZHANG Huihui, YAN Yuding, YU Huaizhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycling load-fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(in Chinese))
- [21] 纪洪广, 侯昭飞, 张磊, 等. 荷载岩石材料在加载-卸载扰动作用下声发射特性[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(1): 1 - 5.(JI Hongguang, HOU Shaofei, ZHANG Lei, et al. Acoustic emission character of loaded rock under load-unload disturbance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(1): 1 - 5.(in Chinese))
- [22] 王璐, 刘建锋, 杨昊天, 等. 深埋大理岩卸载力学特性的实验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2014, 46(2): 46 - 51.(WANG Lu, LIU Jianfeng, YANG Haotian, et al. Experimental research on mechanical properties of deeply buried marble under unloading conditions[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science, 2014, 46(2): 46 - 51.(in Chinese))
- [23] DU K, LI X B, LI D Y, et al. Failure properties of rocks in true triaxial unloading compressive test[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(2): 571 - 581.
- [24] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2): 286 - 298.
- [25] 向天兵, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 三向应力状态下单结构面岩石试样破坏机制与真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2 908 - 2 916.(XIANG Tianbing, FENG Xiating, CHEN Bingrui, et al. Rock failure mechanism and true triaxial experimental study of specimens with single structural plane under three-dimensional stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10), 2 908 - 2 916.(in Chinese))
- [26] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993: 8 - 10.(QIN Siqing, LI Zaoding, ZHANG Zhuoyuan, et al. An introduction to acoustic emission techniques in rocks[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1993: 8 - 10.(in Chinese))
- [27] 陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561 - 569.(CHEN Bingrui, FENG Xiating, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 561 - 569.(in Chinese))
- [28] 冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 433 - 444.(FENG Xiating, CHEN Bingrui, MING Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 433 - 444.(in Chinese))
- [29] 陈秀铜, 李璐. 锦屏二级水电站引水隧洞区域三维初始地应力场反演回归分析[J]. 水文地质工程地质, 2007, (6): 55 - 59.(CHEN Xiutong, LI Lu. Inverse analysis of initial field stress for Jinping-2 hydropower station tunnel area[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, (6): 55 - 59.(in Chinese))
- [30] 苗金丽. 岩爆的能量特征实验分析[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009. (MIAO Jinli. Experimental analysis of the energy characteristics of rockburst[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2009.(in Chinese))
- [31] ZHAO X G, WANG J, CAI M, et al. Influence of unloading rate on the strainburst characteristics of beishan granite under true-triaxial unloading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(2): 467 - 483.
- [32] 何满潮, 赵菲, 张昱, 等. 瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 1 - 8.(HE Manchao, ZHAO Fei, ZHANG Yu, et al. Feature evolution of dominant frequency components in acoustic emissions of instantaneous strain-type granitic rock and burst simulation tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 1 - 8.(in Chinese))
- [33] ZHAO X G, CAI M. Influence of specimen height-to-width ratio on the strain burst characteristics of Tianhu granite under true-triaxial unloading conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 52(7): 890 - 902.
- [34] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J]. Mechanics Research Communications, 2011, 38(3): 153 - 157.
- [35] OHNO K, OHTSU M. Crack classification in concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2 339 - 2 346.
- [36] SHEOREY P R. Empirical rock failure criteria[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997.
- [37] SINGH M, RAJ A, SINGH B. Modified mohr-coulomb criterion for non-linear triaxial and polyaxial strength of intact rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(4): 546 - 555.
- [38] KAISER P K, KIM B, BEWICK R P, et al. Rock mass strength at depth and implications for pillar design[J]. Mining Technology, 2011, 120(3): 170 - 179.
- [39] 蔡朋. 高应力条件下岩石力学实验及强度准则研究[硕士学位论文][D]. 武汉: 长江科学院, 2010.(CAI Peng. Study on mechanical tests and strength criterion of rock under the condition of high ground stress[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2010.(in Chinese))
- [40] 张春生, 陈祥荣, 侯靖, 等. 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1 999 - 2 009. (ZHANG Chunsheng, CHEN Xiangrong, HOU Jing, et al. Study of mechanical behavior of deep-buried marble at Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1 999 - 2 009.(in Chinese))
- [41] 汪斌. 深部大理岩的加卸载力学特性及多场耦合研究[硕士学位论文][D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.(WANG Bin. Study on load/unload mechanical properties of marble in deep stratum and its multi-field coupling models[M. S. Thesis][D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011.(in Chinese))
- [42] 郑建国. 锦屏二级水电站交通辅助洞岩爆机制及其地质力学模式研究[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2005.(ZHENG Jianguo. The Study on the mechanism of the rock outburst and the geomechanics' model of the subsidiary tunnel in the secondary Jinping hydroelectric power station[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology, 2005.(in Chinese))
- [43] 王建良. 深埋大理岩力学特性研究及其工程应用[博士学位论文][D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.(WANG Jianliang. Mechanical characteristics of deeply buried marble and its technical application[Ph. D. Thesis][D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.(in Chinese))
- [44] 刘豆豆. 高地应力下岩石卸载破坏机理及其应用研究[博士学位论文][D]. 济南: 山东大学, 2008.(LIU Doudou. Research on unloading failure mechanism of rock under high stress and its application[Ph. D. Thesis][D]. Jinan: Shandong University, 2008.(in Chinese))
- [45] BOBET H H. Einstein. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(5): 863 - 888.
- [46] RAMSEY J M, CHESTER F M. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture[J]. Nature, 2004, 428(6978): 63 - 66.