

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0520

拉剪作用下类岩石试样的力学特性与损伤破坏机制

周超彪¹, 刘 东², 姜清辉¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘 要: 利用自主设计的拉伸-剪切辅助装置, 开展不同法向应力 ($-0.28 \sim 3.0$ MPa) 条件下的拉剪试验和压剪试验, 同时利用声发射技术对比分析两者的力学特性与损伤破坏机制。研究结果表明, 拉伸-剪切辅助装置能够较好地开展拉剪试验。试样的峰值应力随法向应力呈曲线变化, 对法向拉应力更为敏感, Hoek-Brown 强度准则总体上能够较好地表征全应力区的强度特征。拉剪试样峰后应力大幅跌落并迅速分离成两部分, 与压剪试验峰后残余阶段相比, 具有更多的脆性破坏特征。试样破裂面的形貌特征与法向应力的方向以及大小密切相关, 压剪试样破裂面的破碎程度以及声发射参数表征的损伤程度均大于拉剪试验。相比于拉剪试样, 压剪试样的破裂面摩擦区、局部剥落现象更明显。随法向应力增大, 声发射平静期持续时间变长, 试样进入裂纹非稳定扩展阶段的时间越晚。拉剪试验损伤过程各阶段所需时间相较于压剪试验更短, 损伤破坏的速率更快。剪应力曲线临界点 σ_{cc} 、 σ_{ci} 和 σ_{cd} 与声发射参数可分别表征试样的宏观与微观破坏过程, σ_{cd} 临界点和声发射 b 值可作为岩石破坏的预兆。

关 键 词: 拉剪试验; 强度准则; 脆性破坏; 声发射; 损伤破坏机制; 预兆

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 12-3335-10

Mechanical properties and failure mechanisms of the rocklike specimens under tension shear effects

ZHOU Chao-biao¹, LIU Dong², JING Qing-hui¹

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: Using self-designed tension shear auxiliary device, we carried out a tension shear test and a compression shear test under different normal stresses between -0.28 MPa and 3.0 MPa. We applied acoustic emission to compare and analyze the mechanical properties and the damage failure mechanisms of the specimens for both tests. The main results are listed as below. The tension shear auxiliary device can help us carry out the tension-shear test well. The peak stress varies with the normal stress non-linearly and is more sensitive to the normal tensile stress. The Hoek-Brown strength criterion can generally characterize the strength of the full stress area. The post-peak stress of the specimen in tension shear test drops severely and separates into two parts rapidly, showing the failure characteristics with more brittleness than that of the compression shear test. The morphological characteristics of the fracture plane are closely related to the direction and magnitude of normal stress. For compression shear test, the damage degree represented by the acoustic emission parameters is greater, as well as the failure degree of the fracture plane, compared with those observed in tension shear test. The frictional area and the local spalling of the fracture plane are also more obvious for the specimens in compression shear test, compared with those in tension shear test. As the normal stress increases, the duration of the acoustic emission quiet period gets longer, and the start time of the unstable crack propagation gets later. Compared with the compression one, the tension shear test shows a shorter duration time for each stage of the failure process as well as a higher failure rate. The critical points σ_{cc} , σ_{ci} and σ_{cd} of the shear-stress plot and the acoustic emission parameters can represent, respectively, the macroscopic and microscopic failure process of the specimen. The critical point σ_{cd} and the acoustic emission b value can be used as omens of rock failure.

Keywords: tension shear test; strength criterion; brittle failure; acoustic emission; damage failure mechanism; omen

收稿日期: 2021-04-09

修回日期: 2021-07-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51769014)。

The work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51769014).

第一作者简介: 周超彪, 男, 1996 年生, 硕士研究生, 主要从事岩土力学数值方法的研究。E-mail: 2019202100017@whu.edu.cn

通讯作者: 姜清辉, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学数值方法的教学与研究。E-mail: jqh1972@yahoo.com.cn

1 引言

根据岩石的临界应力状态, 可将岩石的破坏模式分为张拉破坏、压剪破坏和拉剪破坏 3 种。越来越多的研究表明, 岩石中普遍存在着拉应力, 并且在许多情况下表现出受张拉或拉剪的应力状态, 例如在高陡岩质边坡或者深部地下洞室内, 由于开挖卸荷会导致扰动区内岩石产生拉应力等^[1-2]。因此, 深入研究岩体在拉剪应力状态下的损伤破坏机制意义重大。

早些年, 由于缺乏相关的试验设备, 国内外对于岩体在拉剪应力状态下的研究较少, 且这些研究多采用间接或直接拉伸的试验方法来研究岩石的受拉性能。李地元^[3]和余贤斌^[4-5]等对岩石在直接拉压作用下的弹性模量、泊松比等力学性能进行了研究。Ramsey 等^[6]选用中间薄两端厚的狗骨头形状大理石试件来评估岩石的拉剪强度, 试验结果表明该试样成功实现了试样的拉剪破坏以及由张拉断裂到剪切断裂的转换。然而, 受限于试样的形状与试验装置, 该方法并未得到广泛应用。此外, 周火明等^[7]在三峡船闸边坡进行现场拉剪试验, 发现了岩石拉剪强度与法向应力之间的非线性关系, 对拉剪强度准则有了新的认识。孔小昂等^[8-9]基于现有压剪土体强度理论, 对比分析得到饱和黏土的拉剪和压剪破坏的分界点, 建立饱和黏土张拉-剪切耦合强度模型, 不足之处是缺乏相应试验数据来验证两向及三向拉伸强度。

近些年来, Huang 等^[10-13]利用自行设计的拉剪辅助装置研究岩石在拉剪应力状态下的剪切行为, 对岩石变形、强度、破裂面等特征进行分析, 指出 Hoek-Brown 强度准则能够较好地表征岩石的拉剪强度特性。对于岩石的微观断裂机制, Chen 等^[14]开展了一系列单轴拉伸、拉剪、压剪试验, 并利用扫描电子显微镜 (SEM) 分析矿物晶体的断裂机制和裂纹演化过程, 讨论了岩石宏观破坏特征与微裂纹演化机制之间的关系。

然而, 现有研究主要针对拉剪试验的变形机制以及力学特性, 鲜有涉及试样在试验过程中的损伤破坏特性。声发射信号能够表征试验过程中岩石、混凝土等结构的劣化损伤情况。通过声发射可以实现对岩石内部孔隙、裂隙开展与外部裂缝贯通等情况的监测。Meng 等^[15-16]利用声发射技术对岩石在单轴循环加卸载压缩试验中的破坏过程进行了记录, 并揭示了声发射信号与岩石能量演化规律之间的联系。Li 等^[17]对白色大理岩在直接拉伸试验中的

声发射波形主频特征进行了统计, 分析主频特征与岩石微观破裂机制的关系。Cheon 等^[18]基于声发射参数的特征, 提出了如何评估岩石断裂类型和损伤程度的标准, 并将该方法用于监测和评估岩石边坡的剪切破坏和损伤程度。Meng 等^[19]利用声发射事件对花岗岩的剪切试验进行损伤分析, 揭示了粗糙损伤与节理剪切行为的内在联系, 同时利用声发射累积事件数对剪切过程进行损伤阶段划分。张艳博^[20]和刘希灵^[21]等对岩石单轴压缩下的损伤演化过程进行研究, 利用声发射特征参数划分损伤演化阶段, 并就岩石损伤变量建立损伤模型。

从上述分析可知, 以往对拉剪作用研究较少, 且未涉及到试验过程中的损伤破坏特性。基于以上问题, 本文利用自主设计的拉伸-剪切辅助装置开展室内拉剪试验, 研究试样在拉剪应力作用下的力学特性, 并将强度屈服准则由压剪区拓展至全应力区。同时, 利用声发射技术对试验过程中裂缝的萌生和扩展进行监测, 揭示试样损伤演化规律及其内在损伤破坏机制。

2 试验内容

2.1 试验设备

2.1.1 拉伸-剪切辅助装置设计

本试验装置为自行设计的岩石拉伸-剪切辅助装置, 如图 1 所示, 主要由两个门形架、两个 U 形件、两个 T 形剪切头、两种螺栓和滑槽组成。

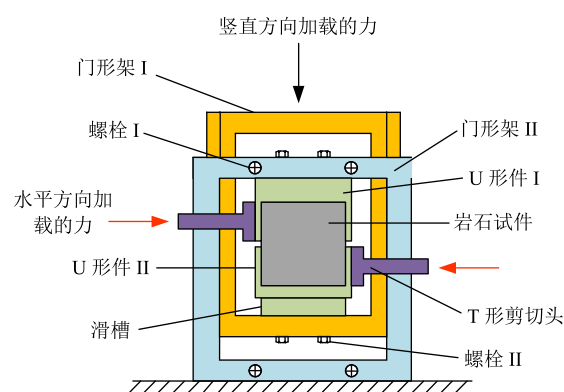


图 1 拉伸-剪切辅助装置图
Fig.1 Schematic illustration of the tension shear auxiliary device

两个门形架是该装置的主要部分, 门形架 I 左右两边有突出的滑条, 门形架 II 分为前后相同的两部分并设有滑槽, 两个门形架通过滑槽和滑条互相嵌合, 并使用螺栓 I 固定。通过螺栓的固定可使该装置在竖向荷载作用下仅发生竖向移动, 减小偏心

影响。同时,在滑槽与滑条连接处涂抹润滑剂以减小摩擦力的影响。

两个 U 形件使用高强环氧树脂胶胶结在岩石试件上下端面, U 形件 II 与下部滑槽相连,可保证岩石试件在水平方向内自由移动。U 形件 I 与滑槽通过螺栓 II 与门形架相连,可将加载在门形架 I 上的竖向压力转换为拉力并作用在岩石试件上。T 形剪切头通过直剪仪施加切向应力。

该装置各部分零件相对规则简单,加工组装方便,可将作用在岩石试样竖直方向上的压力转换为拉伸力,再通过剪切装置施加切向力,实现拉伸-剪切效果。

2.1.2 YZW50 型直剪仪试验机

剪切设备采用的是 YZW50 型直剪仪试验机,其法向额定压力 ≤ 500 kN,法向工作行程为 200 mm;直剪仪切向额定压力 ≤ 500 kN,切向工作行程为 200 mm,切向速度为 0.1~20 kN/s;除此之外,直剪仪位移计的最小分辨率为 0.001 mm。

2.1.3 AMSY-6 声发射测试系统

AMSY-6 声发射仪由德国 Vallen 公司推出,是全数字、全波形化声发射仪器,能够监测材料内部结构变化以及能量释放等行为,应用十分广泛。本次试验声发射采集门槛为 40 dB,前置放大为 40 dB,传感器型号为 VS45-H,其频率响应范围为 40~450 kHz,谐振频率为 280 kHz。

2.2 试样制备

参考 Chen 等^[22-23],以水、42.5 级硅酸盐水泥和粒径小于 1 mm 的细砂为原料,按照 1:2:4 比例依次称取相应重量的原料,先将水泥与细砂混合均匀,再倒入搅拌机中加水拌匀。配制好的水泥砂浆倒入尺寸为 60 mm×60 mm×60 mm 的定制钢模具中,经振捣密实均匀后静止 24 h,而后进行拆模。试样脱模后放置于室内进行水养护。为了充分发挥试样的力学和物理性能,所有试样在测试前进行 28 d 的养护,试样如图 2(a)所示。

考虑到水泥砂浆的非均质性与离散性较大,在试样养护完成后,进行纵波波速和密度的逐一测试,筛选出波速及密度相近的试样进行试验,尽可能减小试样本身带来的误差。

为了得到试样的力学性能参数,取相同条件下制作的圆柱形试样分别进行单轴压缩、直接拉伸试验,每类试验重复 3 次取平均值。由试验结果可知,试样的单轴抗压强度为 38.6 MPa,弹性模量为 18 GPa,单轴抗拉强度为 1.2 MPa,密度为 2.56 g/cm³。所得试样力学性能参数与岩石相似,可为相应的岩石

试验提供参考。



(a) 水泥砂浆试样



(b) 试样胶结



(c) 声发射探头布置图

图 2 试样养护与拉剪辅助装置布置

Fig.2 Specimen curing and the layout of the tension shear auxiliary device

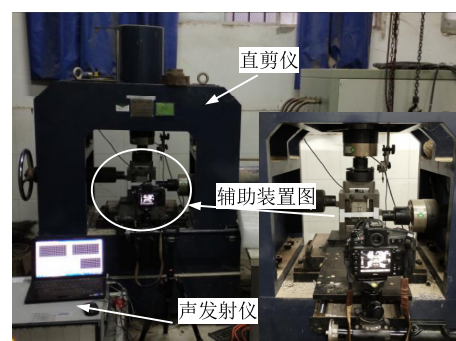


图 3 直剪仪中安装拉剪辅助装置及声发射

Fig.3 The direct shear device installed with the tension-shear auxiliary device plus the acoustic emission device

2.3 试样安装与试验步骤

本次试验主要是分析试样在拉剪应力状态下的力学性质及损伤破坏机制,包括试样在不同法向拉应力下的拉剪试验,以及拉剪试验与压剪试验结果的对比分析。

试样与拉剪辅助装置 U 形件黏结图如图 2(b)所示,黏结剂为高强环氧树脂胶,其抗拉强度可达 30 MPa,黏结 24 h 后即可达到最大强度;声发射探头布置在试样剪切面下 5 mm 处,如图 2(c)所示。

试验加载如图 3 所示,拉剪辅助装置依托于 YZW50 型直剪仪试验机进行试验,所能施加的竖

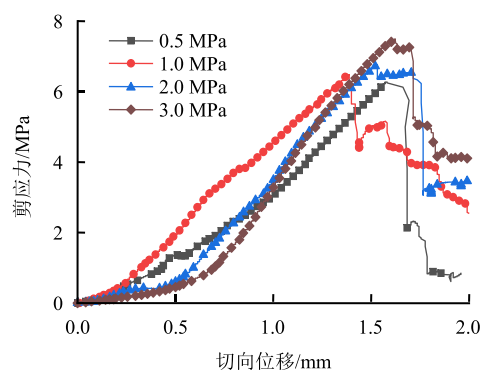
向和水平向最大荷载均为 500 kN。试验时,先固定好声发射探头并确定能够采集到信号,然后以 0.05 kN/s 的速率施加法向力,达到设计值后保持不变,点击下一步,以 0.3 mm/min 的剪切位移速率施加剪应力直至发生破坏。试验过程中,试样的变形与应力通过直剪仪记录。法向应力分别为-0.28、-0.42、-0.56、0.5、1.0、2.0、3.0 MPa,其中负号代表试样受到拉应力。

3 试验结果与分析

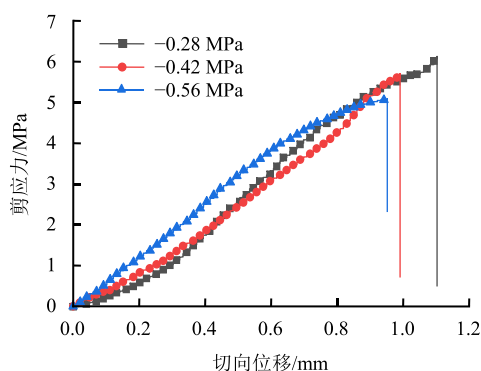
3.1 变形特征

图 4 给出了试样在不同法向应力下的拉剪和压剪应力-位移曲线。由图可知,拉剪和压剪试验曲线差别较大。相较于压剪曲线,拉剪应力-位移曲线峰后不存在残余阶段,主要是因为法向拉应力作用下,试样剪切断裂后迅速拉开,分成两半。并且,拉剪试验曲线峰值位移(峰值应力对应的位移)小于压剪试验曲线,随法向拉应力的增大而减小。

如图 4(b)所示,拉剪试验曲线初始裂纹闭合阶段与压剪试验曲线有所不同,除剪切压实引起的裂隙闭合外,还包括法向拉应力拉伸引起的裂隙张开,



(a) 压剪试验曲线



(b) 拉剪试验曲线

图 4 不同法向应力下拉剪和压剪试验剪应力-位移曲线
Fig.4 The shear stress-displacement plots in tension and compression shear tests under different normal stresses

这与 Huang 等^[10]所得出的结论具有一致性。所以拉剪试验与压剪试验相比,总体上曲线起伏程度并不大,略有上凹。峰后阶段拉剪试验曲线应力大幅跌落甚至接近 0,与压剪试验曲线峰后跌落到残余阶段相比,岩石拉剪破坏下的脆性特征更为显著。

3.2 破裂面特征

试样在拉剪应力状态下破坏过程如图 5 所示,所选图片为高速相机拍摄试样破坏前后的形貌,图片从左往右切向位移分别为 0.5、0.8、1.0 mm。试样破坏前后相隔时间较短,并伴随“砰”的一声。由图还可知,试样在剪切过程中无明显裂缝出现,说明在法向拉应力作用下,试样从出现剪切裂缝到裂缝扩展贯通发展迅速,与拉剪破坏曲线脆性破坏特征更显著相一致。

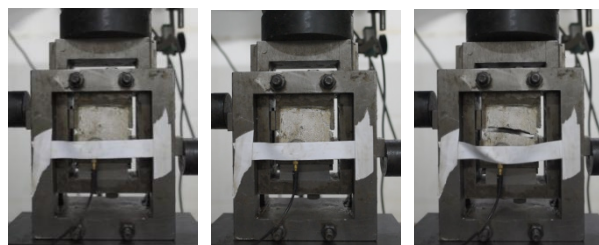


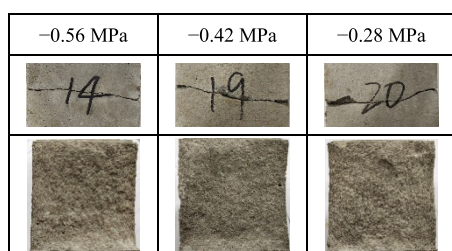
图 5 试样拉剪试验破坏过程
Fig.5 The failure process of the specimen in tension shear test

试样破裂面断裂路径如图 6 所示,试样均沿着预设剪切面及其附近延伸破坏,且压剪试验试样破裂面与水平面夹角略大于拉剪试验。还可观察到,拉剪试验与压剪试验试样破裂面均伴随局部剥落现象。压剪试验试样随着法向压应力的增大,局部剥落现象愈发明显,而拉剪试验试样随着法向拉应力的变化,局部剥落现象变化不大。

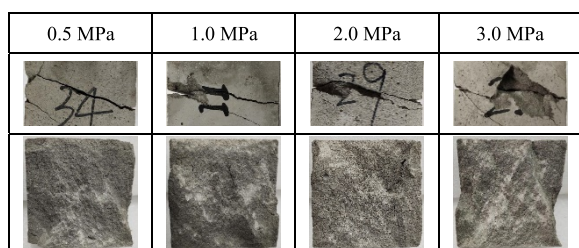
试样破裂面断口形貌如图 6 所示,该破裂面形貌图均选自试样下部岩体。图 6(a)所示为试样拉剪试验破裂面。由图可知,法向拉应力越大,试样破裂面粗糙度越小。同时,拉剪试验破裂面几乎无摩擦区,这主要是因为法向拉应力作用下,试样剪切断裂后迅速分离成两半,没有受到滑移摩擦的作用。压剪试验破裂面摩擦区,即图 6(b)中白色区域,相对光滑一些,由试样破裂后上下表面摩擦造成,并且随法向压应力的增大,试样摩擦区的面积有所增大。可采用试样摩擦区的面积来表征试样的损伤程度,摩擦区面积越大,损伤破坏程度越大。

以上现象说明,岩石的损伤破坏与法向应力的方向以及大小密切相关。一般来说,法向受压比受拉试样损伤破坏现象更明显,这表明法向应力的方

向对岩石破裂面的形貌特征有着极其重要的影响。同时，法向压应力越大，试样的损伤破坏现象越明显，即法向应力的影响大小会影响岩石的损伤破坏程度。



(a) 法向受拉



(b) 法向受压

图 6 试样破裂面断裂路径及断口形貌
Fig.6 Fracture paths and the morphology of the fracture plane

3.3 强度特征

峰值抗剪强度随法向应力的变化规律如图 7 所示。由图可知，随法向应力由拉向压过渡，试样峰值抗剪强度增大。通过对比拉应力区与压应力区曲线的斜率可知，试样峰值抗剪强度对法向拉应力更加敏感。说明研究岩体受拉或者受拉剪应力作用对实际工程具有重要意义。

现有试验研究表明，强度准则多建立在压剪试验上，而后根据压剪试验拟合曲线外推到拉剪应力区域得到全应力区域的强度包络线。李平恩等^[24]考虑到 Drucker-Prager 准则为压剪区强度屈服准则，故在拉剪区采用球形屈服面代替锥面和双曲旋转面代替 D-P 圆锥面两种方案对 D-P 准则进行修正，得到全应力区域的光滑正则函数，但公式较为复杂且未得到验证。周辉等^[25]通过自主设计拉剪装置得到拉剪试验数据，并采用二次抛物线型强度准则进行拟合，其准则对全应力区拟合效果较好，但拉剪段和低法向压应力段拟合精度较差。

一般来说，通过压剪段曲线外推到拉剪区域的强度准则并不具有普遍适用性，如 Mohr-Coulomb 强度准则外推到拉应力区会过高估计实际拉剪强度^[9, 14, 26-27]。因此，通过获得的拉剪和压剪段试验数据来进行全应力区分析是较为准确的方法。

根据上述分析，本文对不同法向应力下的试验数据采用 Mohr-Coulomb、Hoek-Brown 强度准则进行拟合，确定拟合参数。

(1) Mohr-Coulomb 强度准则：

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (1)$$

(2) Hoek-Brown 强度准则：

$$\tau_f = A(\sigma_n + \sigma_t)^B \quad (2)$$

图 8(a)为 Mohr-Coulomb 强度准则拟合曲线，拟合精度 $R^2 = 0.869$ ，均方根误差(RMSE)为 0.256，在拉应力区过高估计拉剪强度，对拉应力区缺乏拟

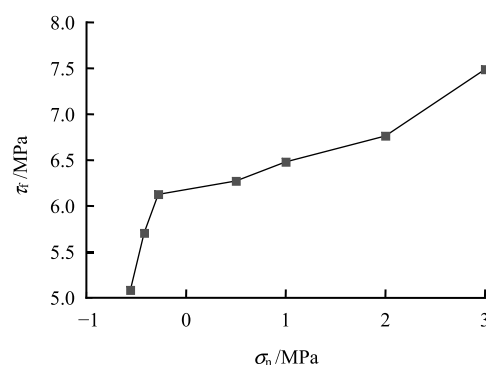
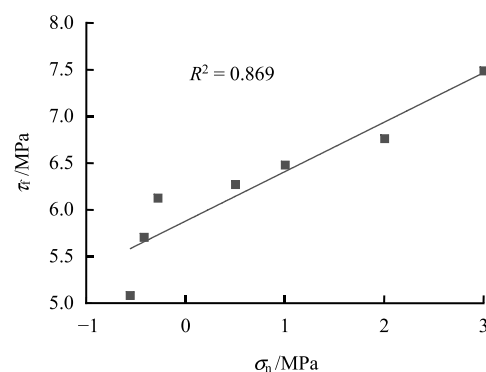
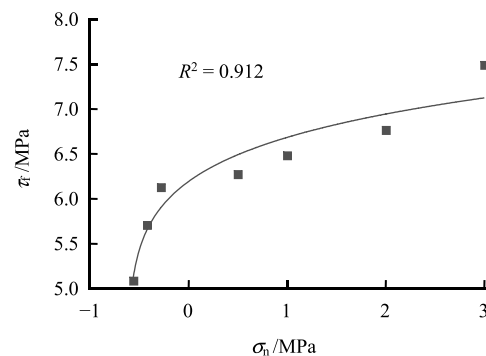


图 7 峰值剪应力随法向应力的改变

Fig.7 Plot of the peak shear stress versus the normal stress



(a) Mohr-Coulomb 强度准则



(b) Hoek-Brown 强度准则

图 8 强度破坏准则对试验数据的拟合结果

Fig.8 Fit of the strength failure criteria to the test data

合能力,整体拟合效果较差。图 8(b)为 Hoek-Brown 强度准则,拟合精度 $R^2 = 0.912$, RMSE 为 0.210, 拉应力区拟合效果较好,总体上能够较好地表征全应力区的强度特征。

3.4 声发射参数特征

采用声发射监测试样内部裂缝的萌生、扩展和贯通过程,通过对声发射撞击(hit)、能量(energy)和振幅(amplitude)参数的分析,获得试样损伤破坏的程度以及演化过程。如图 9 所示,选取法向拉应力 0.42 MPa 和压应力 3 MPa 作用下的试样剪应力和声发射参数(撞击率、能率、归一化累积撞击数)的关系曲线图进行分析。

图 9(a)和图 9(b)为法向压应力作用下的曲线图。由图可知,在峰值应力之前,声发射撞击率随剪应力呈增加趋势,但量值较小,在峰值应力附近大幅增加并达到峰值撞击率。在峰后残余阶段,声发射撞击率大幅跌落并稳定在较低水平,这与峰后应力曲线具有一致性。声发射能率随剪应力的变化与撞击率的变化趋势具有相似性,即峰前均出现能量和撞击数陡增的现象。这一现象的产生可能与试样在压剪过程中的局部破裂、剥落有关,与 Meng 等^[19,28]所得结果是相似的。归一化累积撞击数为各时刻累积撞击数与总撞击数之比,可将试样在不同法向应力作用下的曲线整合统一,能够反映试样在试验过程中各时刻的损伤破坏程度。

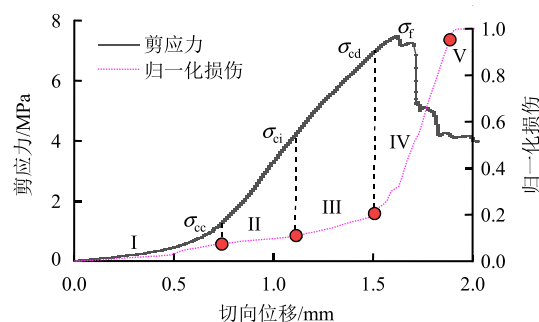
图 9(c)和图 9(d)为法向拉应力作用下的曲线图。由图可知,试样在法向拉应力作用下的声发射撞击率、能率曲线与法向压应力作用下的曲线具有相似的变化规律,但缺少峰后阶段。由声发射撞击率曲线可知,试样在试验过程中,撞击率随剪应力持续增大,直至破坏前,撞击率仍保持较高水平。试样剪切断裂后,应力大幅跌落。上述分析说明法向拉应力作用下的试样具有脆性破坏的特征。

对比图 9 拉压曲线可知,压剪试验曲线中的声发射撞击率、能率均大于拉剪试验。这说明试样在法向压应力作用下的损伤破坏现象比在法向拉应力作用下更明显,与前文压剪试验破裂面局部剥落、断口损伤现象更明显是一致的。

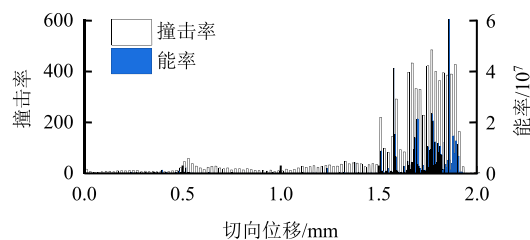
4 损伤破坏机制分析

4.1 损伤演化规律

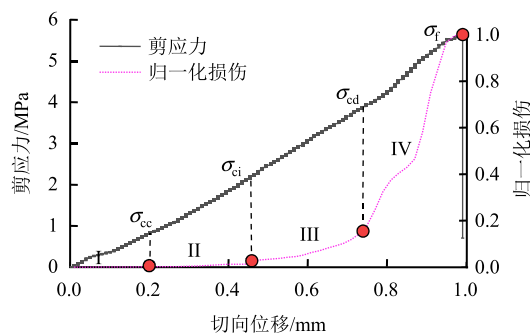
参考文献 Martin^[29]和 Huang^[10]等,基于声发射归一化累积撞击数和剪应力-位移曲线的特征,对拉剪和压剪试验曲线划分不同的损伤破坏过程,图 9 给出了试样归一化损伤破坏演化规律曲线图。



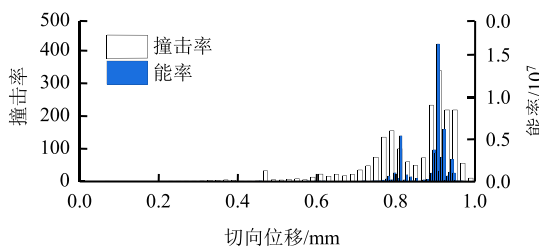
(a) 法向受压损伤演化阶段



(b) 法向受压 AE 演化规律



(c) 法向受拉损伤演化阶段



(d) 法向受拉 AE 演化规律

图 9 试样损伤破坏演化规律曲线图
Fig.9 Plots of the development of the failure process

图 9(a)为法向压应力 3 MPa 下的损伤破坏演化规律曲线图,可划分为 5 个阶段。各阶段剪应力临界点 σ_{cc} (裂纹闭合应力)、 σ_{ci} (起裂应力)、 σ_{cd} (损伤应力)、 σ_f (峰值应力)可表征试样宏观破裂过程。

裂纹密实阶段 (I): 该阶段剪应力曲线主要为密实阶段,试样内部初始裂隙经剪切压实闭合。声发射信号活动微弱,有少量弹性波释放。临界点对应的剪应力为 σ_{cc} ,该点累积撞击数约为总撞击数的

5%, 说明试样损伤程度很轻微。

弹性阶段 (II): 该阶段声发射撞击率接近于 0, 几乎无新裂缝产生, 试样主要为弹性变形, 产生的损伤非常有限。临界点对应的剪应力为 σ_{ci} , 表明下一时刻试样内部裂纹将逐渐发展。该阶段与裂纹密实阶段为声发射信号活动的平静期。

裂纹稳定扩展阶段 (III): 该阶段试样内部裂纹稳定扩展, 连续剪切加剧了试样的损伤。声发射撞击率随剪应力平稳增加, 直至 σ_{cd} 临界点, 撞击率急剧增大, 试样损伤程度加剧, 原因可能是试样内部裂纹扩展贯通。该阶段为声发射信号活动的过渡期, σ_{cd} 临界点可作为岩石破坏的预兆。

裂纹非稳定扩展阶段 (IV): 试样沿预设剪切面破裂形成宏观断口, 表面出现多处裂缝, 并伴随局部剥落现象。同时, 声发射信号十分活跃, 撞击率急剧增加, 并达到峰值撞击率。该阶段有超过 70% 的撞击数产生, 为声发射信号活动的活跃期。

残余稳定阶段 (V): 该阶段剪应力趋于稳定, 主要依靠破裂面的摩擦提供残余应力。因此, 声发射信号由试样破坏、应力跌落的活跃期转变为平稳摩擦的衰减期。在这一阶段内, 撞击数约为总撞击数的 5%, 说明试样损伤已经逐渐达到极限。

由图 9 分析可知, 拉剪与压剪试验曲线 I、II 阶段声发射信号活动微弱, 有少量弹性波释放。撞击率和能率均较小, 试样几乎无裂纹产生, 损伤程度很轻微, 属于声发射信号的平静期。其中拉剪试样的声发射撞击率甚至接近于 0, 说明拉剪试样几乎无损伤, 压剪试验损伤程度大于拉剪试验。III 阶段拉剪和压剪试验曲线的撞击率均随剪应力平稳增加, 试样内部裂纹稳定扩展。压剪试验试样内部裂纹已扩展连接, 试样外部即将出现剪切裂缝; 而拉剪试验试样内部裂纹并未连接贯通, 观察可知, 临界点 σ_{cd} 对应位置 AE 撞击急剧增加, 随后, 撞击率虽较 σ_{cd} 对应位置有所减小, 但与前三阶段相比明显增加。此时, 试样内部微裂缝亦在快速扩展, 不过微裂缝之间尚未贯通, 该段撞击率“平静段”是为后续微裂缝的贯通破坏作准备。IV 阶段拉剪和压剪试验曲线的撞击率均急剧增大, 试样损伤程度加剧, 属于声发射信号的活跃期。该阶段压剪试验试样已经破裂并伴有局部剥落现象, 试样外部有多处裂缝出现, 该阶段有超过 70% 的撞击数产生。而拉剪试验试样尚未破裂, 表面也无明显裂缝产生, 但 σ_f 对应位置试样内部裂纹已扩展连接完全, 随剪切作用随时可能发生破坏, 超过 80% 的声发射撞击数发生在该阶段。这些现象的产生主要是因为拉剪试验试

样损伤以峰前裂纹非稳定扩展阶段为主, 试样破坏后迅速分离, 曲线无峰后残余阶段。相比于压剪试验, 可认为拉剪试验试样破坏后试验即停止, 该阶段可作为拉剪试验脆性破坏的典型特征。

拉剪和压剪试样损伤演化直至破坏的过程, 对应于剪应力-位移曲线的各个阶段以及声发射累积撞击数表征的平静期、过渡期、活跃期以及衰减期。各阶段剪应力临界点 σ_{cc} 、 σ_{ci} 与 σ_{cd} 和声发射参数表征的岩石损伤过程相一致, 其中变形曲线 σ_{cd} 临界点和声发射 b 值可作为岩石破坏的预兆。

图 10 为法向应力作用下的声发射撞击率曲线图。可以发现, 随法向应力由拉向压过渡且不断增大, 声发射撞击率曲线的平静期 (I、II 阶段) 持续时间变长。随着法向应力增大, 峰值应力呈增加趋势, 表明由于峰值抗剪强度的增加, 试样内部裂纹扩展时间相应延后, 撞击数剧变时间延后, 需要更多的时间或位移来启动声发射信号和岩石的损伤破坏。同时, 还可观察到, 压剪试验撞击率曲线裂纹稳定扩展、裂纹非稳定扩展阶段所需时间均大于拉剪试验曲线, 这表明拉剪应力作用下, 岩内部裂纹扩展贯通所需的时间或位移更少, 损伤破坏的速率更快, 危害性更大。

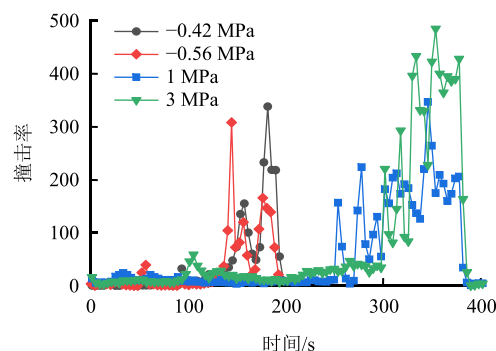


图 10 法向应力作用下的声发射撞击率曲线
Fig.10 Variation of the AE hit rate under different normal stresses

4.2 破坏前兆预测

以往的研究表明, 声发射 b 值与岩石、混凝土的内部裂缝开展和外部宏观破坏密切相关。尤其对于硬脆性岩石或灾害性较大的工程, 声发射 b 值可以预测岩石突然断裂、岩爆等动力灾害行为。本节对试验过程中的声发射信号进行分析, 检验声发射 b 值是否可以作为试样破坏的有效指标。

考虑到天然地震与岩石、混凝土破裂的相似性, 类比 Gutenberg 等^[30]提出的地震频率-震级 (F-M) 定律可以得到岩石、混凝土领域常用的公

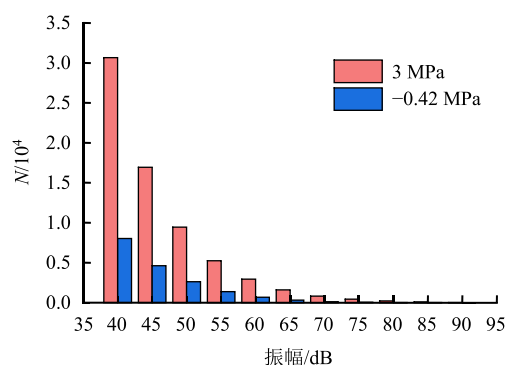
式:

$$\lg N = a - b \frac{A_{dB}}{20} \quad (3)$$

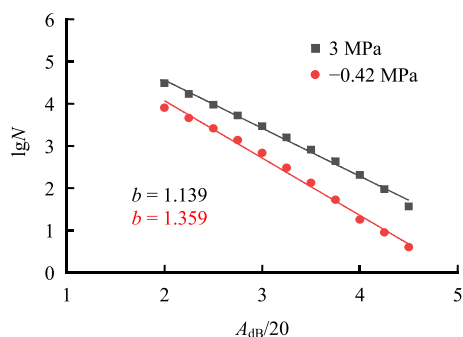
式中: A_{dB} 为声发射撞击的峰值振幅 (dB); N 为峰值振幅大于 $A_{dB}/20$ 的累积频率; a 值反映了声发射撞击的总数; b 为小振幅撞击与大振幅撞击的比例, b 值越大, 大振幅的撞击数越少。

在试验过程中, 声发射采集门槛为 40 dB, 能够采集到峰值振幅大于 40 dB 的信号。如图 11 所示, 选用法向压应力 3 MPa 和法向拉应力 0.42 MPa 的声发射峰值振幅与频率曲线进行分析。

图 11(a)中每一列表示为峰值振幅大于该振幅的声发射撞击数, 如 3 MPa 第 1 列表示为峰值振幅大于 40 dB 的撞击数为 30 655。可以发现, 随着峰值振幅增大, 声发射撞击数逐渐减少, 而且法向压应力作用下的撞击数远大于拉应力。图 11(b)将声发射信号作为整体分析, 并线性拟合得到 b 值。由图可知, 声发射 b 值与撞击总数 N 、高振幅撞击密切相关。



(a) 累积振幅分布



(b) AE 幅频关系拟合结果

图 11 声发射峰值振幅与频率的关系

Fig.11 Variation between the AE peak amplitude and frequency

由图 12 可知, 拉应力区的声发射 b 值显著大

于压应力区。这主要是因为相比于拉剪破坏, 试样受压剪应力作用时, 内外裂缝开展完全且破裂后局部剥落现象显著, 声发射大振幅撞击数大幅增加, 大振幅撞击与小振幅撞击比例增大, b 值显著减小, 这与上文两者破裂面的形貌特征相呼应。采用指数函数拟合声发射 b 值与法向应力的关系: $b = 1.134 + 0.312 \times 0.304^{\sigma_n}$, $R^2 = 0.724$ 。由拟合曲线可知, 声发射 b 值随法向应力增大而减小, 说明法向应力越大破坏越明显。

通过上述分析可知, 声发射 b 值在破坏时持续减小, 随法向应力增大, b 值亦随之减小。考虑到较小的 b 值与较大的岩爆相关, 说明法向应力越大, 破坏时的岩爆现象越明显。因此, 可以把声发射 b 值作为预测岩石破坏程度的指标。

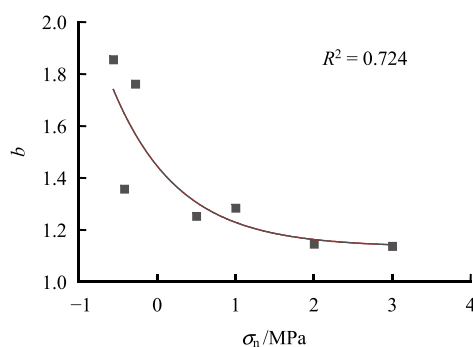


图 12 声发射 b 值随法向应力的变化

Fig.12 Variation of the AE b value with the normal stress

5 结 论

本文设计了一种用于拉伸-剪切试验的辅助装置。通过该装置, 揭示了试样在不同法向应力条件下的变形机制与力学特性。同时, 采用声发射记录试样剪切过程的撞击、振幅、能量等信号, 并以此为基础对试样的损伤破坏机制及前兆预测进行了探究。主要结论如下:

(1) 拉伸-剪切试样峰后阶段应力大幅跌落并迅速分离成两部分, 与压缩剪切试样峰后跌落到残余阶段相比, 拉剪破坏表现出更多的脆性破坏特征。

(2) 试样破裂面的形貌特征与法向应力的方向以及大小密切相关。一般来说, 法向压应力越大, 试样摩擦区的面积越大, 局部剥落现象越明显; 与压剪试验相比, 试样在拉剪应力作用下的破裂面摩擦区以及剥落现象并不明显。

(3) 峰值应力对法向拉应力更敏感, 也更复杂。Mohr-Coulomb 强度准则对拉应力区缺乏拟合能力。Hoek-Brown 强度准则总体上能够较好地表征全应

力区的强度特征。

(4) 压缩剪切试验的撞击率、能率曲线与拉伸剪切试验具有相似的变化规律, 均随剪应力变化先增加后减小, 峰前量值较小或不明显, 在峰值应力处及其附近急剧增加。拉剪试验曲线缺少峰后阶段, 试样破坏前, 撞击率仍保持较高水平。压剪试验曲线的撞击率、能率均大于拉剪试验, 损伤破坏现象更明显。

(5) 声发射归一化累积撞击数可表征试样的损伤程度及其损伤演化规律。拉剪和压剪试验曲线的裂纹闭合阶段与弹性阶段损伤轻微, 属于声发射信号的平静期, 其持续时间随法向应力增大而变长。拉剪试验损伤以峰前为主, 压剪试验损伤以峰后为主, 且拉剪试验曲线各阶段损伤破坏的速率更快, 试样破坏后试验即停止, 这与其脆性破坏行为有关。

(6) 各阶段剪应力临界点 σ_{cc} 、 σ_{ci} 与 σ_{cd} 可表征试样宏观破裂过程, 与声发射参数表征的试样微细观破裂过程相一致。声发射 b 值在试样破坏时持续减小, 且随法向应力增大而减小, 与 σ_{cd} 临界点可共同作为岩石破坏的预兆。

参 考 文 献

- [1] HUANG R Q, HUANG D. Evolution of rock cracks under unloading condition[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(2): 453-466.
- [2] HUANG R Q, WANG X N, CHAN L S. Triaxial unloading test of rocks and its implication for rock burst[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2001, 60(1): 37-41.
- [3] 李地元, 李夕兵, CHARLIE Lic. 2种岩石直接拉压作用下的力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 624-632.
LI Di-yuan, LI Xi-bing, CHARLIE Li-c. Experimental studies of mechanical properties of two rocks under direct compression and tension[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 624-632.
- [4] 余贤斌, 王青蓉, 李心一, 等. 岩石直接拉伸与压缩变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 18-22.
YU Xian-bin, WANG Qing-rong, LI Xin-yi, et al. Experimental research on deformation of rocks in direct tension and compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 18-22.
- [5] 余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 岩石直接拉伸与压缩变形的循环加载实验与双模量本构模型[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 988-993.
YU Xian-bin, XIE Qiang, LI Xin-yi, et al. Cycle loading tests of rock samples under direct tension and compression and bi-modular constitutive model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(9): 988-993.
- [6] RAMSEY J M, CHESTER F M. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture[J]. **Nature**, 2004, 428: 63-66.
- [7] 周火明, 熊诗湖, 刘小红, 等. 三峡船闸边坡岩体拉剪试验及强度准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4418-4421.
ZHOU Huo-ming, XIONG Shi-hu, LIU Xiao-hong, et al. In-situ tension-shear tests and strength criterion studies on tgp shiplock slope rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4418-4421.
- [8] 孔小昂, 蔡国庆, 刘真真, 等. 非饱和黏土的张拉-剪切耦合强度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊2): 9-17.
KONG Xiao-ang, CAI Guo-qing, LIU Zhen-zhen, et al. Research on tensile-shear coupling strength of unsaturated clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Suppl.2): 9-17.
- [9] 孔小昂, 蔡国庆, 赵成刚. 黏土的张拉-剪切耦合强度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2285-2292.
KONG Xiao-ang, CAI Guo-qing, ZHAO Cheng-gang. Study on tensile-shear coupling strength of clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2285-2292.
- [10] HUANG D, CEN D F, SONG Y X. Comparative investigation on the compression-shear and tension-shear behaviour of sandstone at different shearing rates[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(1). DOI: 10.1007/S00603-020-02094-3.
- [11] 岑夺丰, 刘超, 黄达. 砂岩拉剪强度和破裂特征试验研究及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1333-1342.
CEN Duo-feng, LIU Chao, HUANG Da. Experimental and numerical study on tensile-shear strength and rupture characteristics of sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(7): 1333-1342.
- [12] 黄达, 张永发, 朱谭谭, 等. 砂岩拉-剪力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 272-276.
HUANG Da, ZHANG Yong-fa, ZHU Tan-tan, et al. Experimental study on tension-shear mechanical behavior of sandstone[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(2): 272-276.

- [13] CEN D F, HUANG D. Direct shear tests of sandstone under constant normal tensile stress condition using a simple auxiliary device[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50(6): 1425-1438.
- [14] CHEN J, ZHOU H, ZENG Z Q, et al. Macro- and microstructural characteristics of the tension-shear and compression-shear fracture of granite[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(1): 201-209.
- [15] MENG Q B, ZHANG M W, HAN L J, et al. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(4). DOI: 10.1007/S00603-017-1389-6.
- [16] MENG Q B, ZHANG M W, HAN L J, et al. Effects of acoustic emission and energy evolution of rock specimens under the uniaxial cyclic loading and unloading compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(10): 3873-3886.
- [17] 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). DOI: 10.1007/S00603-016-1162-2.
- [18] CHEON D S, JUNG Y B, PARK E S, et al. Evaluation of damage level for rock slopes using acoustic emission technique with waveguides[J]. **Engineering Geology**, 2011, 121(1-2): 75-88.
- [19] MENG F Z, WONG L N Y, ZHOU H, et al. Asperity degradation characteristics of soft rock-like fractures under shearing based on acoustic emission monitoring[J]. **Engineering Geology**, 2020, 266. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019-105392.
- [20] 张艳博, 吴文瑞, 姚旭龙, 等. 单轴压缩下花岗岩声发射、红外特征及损伤演化试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊1): 139-146.
- ZHANG Yan-bo, WU Wen-rui, YAO Xu-long, et al. Acoustic emission, infrared characteristics and damage evolution of granite under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl.1): 139-146.
- [21] 刘希灵, 刘周, 李夕兵, 等. 单轴压缩与劈裂荷载下灰岩声发射 b 值特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 267-274.
- LIU Xi-ling, LIU Zhou, LI Xi-bing, et al. Acoustic emission b -values of limestone under uniaxial compression and Brazilian splitting loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(Suppl.1): 267-274.
- [22] CHEN N, ZHANG X B, JIANG Q H, et al. Shear behavior of rough rock joints reinforced by bolts[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2017, 18(1). DOI: 10.1061/CAS(E)GM.1943-5622.0001048.
- [23] ZHANG X B, JIANG Q H, CHEN N, et al. Laboratory investigation on shear behavior of rock joints and a new peak shear strength criterion[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(9). DOI: 10.1007/S00603-016-1012-2.
- [24] 李平恩, 殷有泉. Drucker-Prager 准则在拉剪区的修正[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 3029-3033.
- LI Ping-en, YIN You-quan. Modification of drucker-prager criterion in tensile shear region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl.1): 3029-3033.
- [25] 周辉, 卢景景, 徐荣超, 等. 硬脆性大理岩拉剪破坏特征与屈服准则研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 305-314.
- ZHOU Hui, LU Jing-jing, XU Rong-chao, et al. Research on tension-shear failure characteristics and yield criterion of hard brittle marble[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 305-314.
- [26] 李守定, 李晓, 郭静芸, 等. 岩石拉伸剪切破裂试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 655-666.
- LI Shou-ding, LI Xiao, GUO Jing-yun, et al. Research of rock failure testing under combined shear and tension[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2014, 22(4): 655-666.
- [27] 柳赋铮. 拉伸和拉剪状态下岩石力学性质的研究[J]. 长江科学院院报, 1996(3): 38-42.
- LIU Fu-zheng. Study on mechanical property of rock in tension and tension-shear state[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1996(3): 38-42.
- [28] MENG F Z, ZHOU H, WANG Z Q, et al. Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2016, 86: 210-223.
- [29] 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.
- [30] GUTENBERG B, RICHTER C F. Frequency of earthquakes in California[J]. **Nature**, 1945, 156(3960): 371.