

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.02.001

硬脆性大理岩拉剪破坏特征与屈服准则研究

周 辉, 卢景景, 徐荣超, 张传庆, 陈 珺, 孟凡震

(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试验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 岩土工程中常用的屈服准则多以压缩剪切为其破坏机制, 然而硬脆性岩体的脆性破坏包括拉伸破坏、张拉剪切破坏和压缩剪切破坏 3 类, 且随着岩体工程向深部发展, 张拉剪切破坏成为了洞壁围岩的主要破坏机制。针对此问题, 开展了硬脆性大理岩的室内拉剪试验, 分析了大理岩拉剪破坏特征, 并结合压剪试验结果, 建立了考虑张拉剪切破坏机制和应力状态影响的 Mohr-Coulomb 准则。研究结果表明, 硬脆性大理岩破裂面在拉剪应力状态和低正应力压剪应力状态下均具有张拉剪切破坏特征, 高正应力压剪应力状态下则只具有压缩剪切滑移特征; 拉剪应力状态下, 大理岩破裂面张拉破坏特征明显, 无明显剪切痕迹, 剪切力固定时, 剪切位移随着轴向拉力增加而增加; 凝聚力和内摩擦角受应力状态影响, 凝聚力随正应力增大先减小后增大, 内摩擦角则随正应力的增大而减小; 凝聚力、内摩擦角随正应力的变化趋势可分为 4 段, 拉剪段、低压应力段、中压应力段和高压应力段, 每段的凝聚力、内摩擦角与正应力皆可认为是线性关系, 靠近抗拉强度处, 内摩擦角趋近 90° , 凝聚力趋于无穷大; 考虑张拉剪切破坏机制和应力状态影响的 Mohr-Coulomb 准则曲线分为两部分, 可采用二次抛物线进行拟合的拉剪段和考虑凝聚力、内摩擦角随正应力演化的压剪段, 由此建立的 Mohr-Coulomb 准则更全面、精度也更高。

关 键 词: 硬脆性; 脆性破坏; 拉剪试验; 压剪试验; 屈服准则

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)02-0305-11

Research on tension-shear failure characteristics and yield criterion of hard brittle marble

ZHOU Hui, LU Jing-jing, XU Rong-chao, ZHANG Chuan-qing, CHEN Jun, MENG Fan-zhen

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The yield criterion of materials in geotechnical engineering is generally presented on the basis of the compression-shear failure type. However, brittle hard rock has three types of failure, i.e., tensile failure, tension-shear failure and compression-shear failure. With increasing the depth of rock engineering, the tension-shear failure turns into the main failure mechanism of surrounding rock. Tension-shear tests are conducted on brittle hard marble to investigate the characteristics of tension-shear failure. By analyzing tension-shear and compression-shear testing results, a modified Mohr-Coulomb criterion is established, which can consider the effect of tension-shear failure and stress state. It is noted that the failure of brittle hard marble is in tension-shear at the tension-shear stress state and at the compression-shear stress state with a low normal axial stress, but it shows compression-shear slip characteristic at the compression-shear state with a high normal stress. The failure of marble is dominated by obvious tension cracks at tension-shear stress state, while no obvious shear crack appears. The shear displacement increases with the increase of axial tensile stress when the shear stress is fixed. The cohesion and friction angle are influenced by the stress state. The cohesion decreases initially and then increases with increasing the normal stress, while it is opposite in the friction angle. The variations of the cohesion and friction angle with the normal stress can be divided into four stages: tension-shear, low compression stress, medium compression stress and high compression stress. The relationships between cohesion, friction angle of each stage and normal stress are linear, and the friction angle reaches up to 90° degrees while the cohesion approaches infinitely to tensile strength. By considering the effect of tensile shear failure and stress state, the Mohr-Coulomb criterion curve can be divided into two stages, the tension-shear stage which is fitted with

收稿日期: 2014-06-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(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); 国家自然科学基金项目(No. 41172288)。

This work was supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB046902), the CAS Interdisciplinary Innovation Team([2012]119), the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences(KZCX2-EW-QN115) and the National Natural Science Foundation of China(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。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

a second-degree parabola and the compression-shear stage considering the development of cohesion and friction angle with the normal stress. It is demonstrated that the proposed Mohr-Coulomb criterion is comprehensive and precise.

Keywords: hard brittleness; brittle failure; tensile shear test; compression shear test; yield criterion

1 引言

深埋硬脆性岩体地下工程中, 围岩通常发生脆性破坏。Etheridge^[1]认为, 岩体的脆性破坏可分成 3 类: 拉伸破坏 (tensile failure)、张拉剪切破坏 (extensional shear failure) 和压缩剪切破坏 (compressional shear failure)。同样的, Ramsey^[2]则将脆性破坏分成张拉破坏、混合破坏和剪切破坏 3 类。虽然两者分类名称稍有差别, 但划分标准是一致的。拉伸破坏即张拉破坏, 其破坏面垂直于最大拉应力方向; 张拉剪切破坏即混合破坏, 破坏面上分布着拉应力和剪应力; 压缩剪切破坏即剪切破坏, 破坏面上分布着压应力和剪应力。

国内外学者对硬脆性岩体脆性破坏形式的室内试验开展了大量研究^[3-4], 其中, 拉伸破坏可通过巴西劈裂试验或直接拉伸试验实现, 压缩剪切破坏可由常规三轴压缩试验或者直接压剪试验实现, 研究成果较多; 对于张拉剪切破坏的室内试验则较少, 并且大部分都是通过预制裂隙以实现拉剪应力状态^[5-6], 周火明等^[7]对三峡船闸边坡新鲜闪云斜花岗岩进行了拉剪面尺寸为 50 cm×50 cm 的现场岩体拉剪试验, 获得了摩尔强度准则包络线。国外学者 Ferrill 等^[8]通过列举工程现象证明了混合断裂区 (即张拉剪切破坏区) 的存在, 并分析了其对断层断裂的影响; Ramsey 等^[2, 9]采用狗骨式试样实现了张拉断裂到剪切断裂的过渡部分, 即混合断裂 (hybrid fracture), 获得了比较完整的试验数据; Rodriguez^[10]基于 Ramsey 的试验结果详细分析了断裂断面的微观特征。可见, 室内拉剪试验研究结果较少, 其主要因为拉剪应力条件难以实现, Ramsey 虽成功获得了拉剪试验结果, 但受岩石性质所限, 其所采用的狗骨式岩样加工比较困难, 不具有推广性。

室内直接拉剪试验虽然难以实现, 但不限制学者们采用其他手段对岩石拉剪特性及其屈服准则进行研究。目前, 岩土工程常用的屈服准则多考虑压缩剪切破坏机制^[11], 如 Mohr-Coulomb 准则、Hoek-Brown 准则, 其在拉剪区的形式则是依据压剪段曲线趋势进行处理获得。Engelder^[12]总结了基于 Mohr-Coulomb 准则在拉剪区的几种修正方式, 有截断型、抛物线型和双曲线型等, 并指出这几种修正方式只是压剪区的不同延伸形式, 而拉剪混合断裂真正的难点在其试验的验证上; 贾善坡等^[13]提出了以应力

不变量表示的拉伸型 Mohr-Coulomb 屈服准则和剪切型 Mohr-Coulomb 屈服准则, 以此建立了复合型 Mohr-Coulomb 屈服准则, 其连接处采用双曲线进行拟合, 并实现了数值计算; 李平恩等^[14]则直接采用球形屈服面和双曲旋转面分别代替原来的锥顶附近的锥面和 Drucker-Prager 圆锥面, 建立了一个全区域处处光滑的正则函数。然而, Ramsey^[9]经过对其试验数据的分析表明, Griffith 准则和修正的 Griffith 准则均不符合试验结果曲线; 此外, 王东等^[15]的研究成果表明, 低围压常规三轴条件下的张拉变形对其剪切强度有影响, 峰值强度与围压的关系是一条有拐点的折线。因此, 上述无试验依据的拉剪区屈服准则的处理方式值得商榷。

传统的弹塑性破坏准则是基于常规三轴试验、真三轴试验等试样破坏的应力状态建立的, 且多基于压剪破坏条件。然而, 在单一应力状态下, 如单轴压缩、低围压常规三轴以及真三轴加载条件下, 单个试样内破裂面的破坏机制有多种^[16-18], 通常则是以主破裂面的破坏机制作为整个试样的破坏机制, 并以此建立相应的破坏准则, 这在一定条件下是适用的。但在深埋硬脆性岩体工程中, 开挖卸荷过程中, 洞壁完整围岩所受应力接近于低围压条件下的破坏强度, 强卸荷造成的围岩弹性变形恢复引起的拉应力也接近其抗拉强度^[19], 这种忽视了张拉剪切破坏机制的破坏准则将不再适用于洞壁表层围岩破坏的判断。

针对上述问题, 本文改进了笔者自行研制的岩石拉伸-剪切试验系统^[20], 开展了硬脆性大理岩的室内拉剪试验, 分析了大理岩的拉剪破坏特性, 并结合压剪试验结果建立了考虑张拉剪切破坏机制和应力状态影响的 Mohr-Coulomb 准则。研究成果可为深埋硬脆性岩体工程的设计和支护提供理论依据。

2 室内拉剪试验设备

2.1 试验设备调试

大理岩的拉剪试验是在自行研制的岩石拉伸-剪切试验系统^[20]上进行的, 该试验系统可进行岩石试样在不同法向拉力作用下的剪切试验。上剪切盒和下剪切盒组装式的设计可以方便地进行岩样的粘接和拆卸, 拉力板和上剪切盒的设计方式可以保证岩石在水平推力下水平方向的自由变形, 水平方向

设置的滚轴排可以保证在拉力作用下水平加载系统的稳定。试验设备如图1所示。

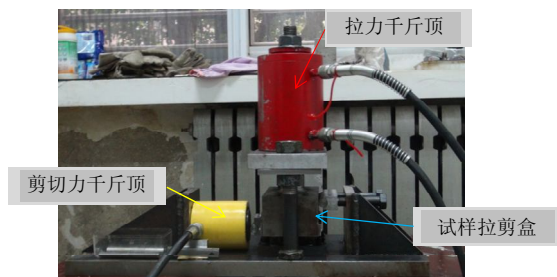


图1 岩石拉伸-剪切试验系统
Fig.1 Rock tension-shear testing system

在正式开始本文的试验之前,对该岩石拉伸-剪切试验系统进行了局部改进,主要修正和改进了以下两点:①剪切力的作用位置。初始设计时剪切力作用点为上剪切盒试样的中心位置,后来改为沿上、下剪切盒中间的缝隙,试验结果表明,后者更合理;②对中问题。轴向拉力要保证位于试样的中心位置,因此,拉力板要放置到位,为降低人为判断误差,在拉力板一端设置了标定位置,每次将拉力板推到卡住位置即可。另外,初始设计加工时拉力承载板用上下两个螺栓固定,试验中发现加载板会出现左右倾斜,后在下螺栓上部加了垫片。

2.2 试样安装和试验步骤

试验所用岩样为锦屏二级水电站工程现场的 T_{2b} 大理岩。拉剪试验所需试样尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 51\text{ mm}$ 的立方体,每个试件的加工精度(包括平行度、平直度和垂直度)均控制在《水利水电工程岩石试验规程》^[21]规定范围之内。

试样安装:首先在上盒底部铺满胶水,把试样 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 的端面放入,如图2所示,依靠试样自身的重力将底部胶水挤向四周,放置 0.5 h ,待胶水凝固不再流动后,再用同样的方法将试样和上盒倒置放入下盒,并对中上、下盒,这样在上盒和下盒之间会形成约 2 mm 的缝隙,为试样的预设破裂面位置。试样上、下盒用胶水粘好以后,根据胶水的性能要放置 $7\sim 12\text{ h}$,待胶水达到其最大强度时开始试验。

岩石拉伸-剪切试验系统预想的加载顺序是:固定轴向拉力,分级施加剪切力直至破坏,即可获得拉剪条件下的破坏面破裂强度。试验中发现,在这种加载条件下,试样的破坏面大多呈V型破坏,破坏面与水平面夹角较大,如图3所示。后改为先加剪切力至预设值,再加拉力直至试样破坏,此时破

坏面比较平整,如图4所示。

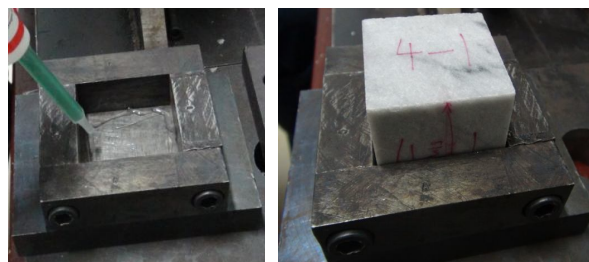


图2 试样安装
Fig.2 Installation of a sample



图3 先拉后剪条件下的破裂面
Fig.3 Fractured surface under the condition of tension before shear



图4 先剪后拉条件下的破裂面
Fig.4 Fractured surface under the condition of shear before tension

对比两破坏面可以推断,在先拉后剪的条件下,剪切力增加过程中,试样一端先破裂张开,致使试样内最大剪切力方向发生倾斜,同时造成破裂张开处端部的拉应力集中方向发生改变,如图5红色箭头所示,在红色箭头应力条件下,裂缝扩展方向发生改变,当扩展至V型底部时,裂缝张开大小受到限制,集中力达不到裂缝继续开裂的强度,同时V型的另一侧破坏面上的应力达到其剪切破坏强度。一般情况下,先开裂的一侧以拉破坏特征为主,后开裂的一侧剪切痕迹明显。而在先剪后拉的条件下,施加的剪力达不到试样的破裂强度,而拉力的方向相对不易改变,破坏面破坏时间较一致且快,故破坏面比较平直。

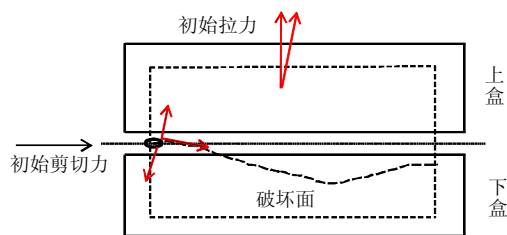


图5 先拉后剪破裂面破坏过程示意图

Fig.5 Schematic of failure process under the condition of tension before shearing

综上所述,本文中的拉剪试验采用的加载顺序为先剪后拉,即施加剪切力至预设值,后施加拉力直至试样破裂。

3 硬脆性大理岩拉剪破坏特征

3.1 强度和变形特征

规律性的总结是建立在大量的试验数据基础上的,但鉴于时间和试样数量的限制,本文仅就现有数据进行分析。表1所列大理岩试样破坏时破坏面上的破坏强度值。便于数据分析,以压为正、拉为负。图6则为表1所列数据的数据点。

由图6可看出,随着剪应力的增加,拉应力降低。试样是通过声波测试筛选的,波速比较集中,为5 200~5 600 m/s之间,但岩样内仍存在着微缺陷,微缺陷所处的位置不同造成的试验结果也有差别,因此,试验数据存在一定的离散性。

图7为试样法向应力、剪切应力与切向位移的曲线图,切向位移为上盒的水平移动位移。如图7(a)所示,水平轴零点表示未考虑施加的剪切力引起的位移即法向拉应力引起的切向变形,图中曲线表明,拉应力的增加引起了试样水平方向(或破裂面)的损伤,如弹性模量、凝聚力等降低,从而在剪切力不变的条件下切向位移增加。图7(b)所示的剪切应力与切向位移曲线则说明了剪应力较低时,剪切力与切向位移出现了一段平台阶段,随着剪切力的增加,平台阶段逐渐变小直至消失,说明了不同的剪切力造成了试样水平方向(或破裂面)不同程度的损伤,亦即弹性模量、凝聚力等降低,从而降低了抗拉强度。

3.2 破坏面特征

图8为部分试样的破裂面宏观形态。各个破裂面在微观形态上稍有差别,但都是以张拉破坏为主,即使是最大剪切力为9 MPa的试样5-3,其试样破裂面也是明显的张拉破坏。值得一提的是,随着剪切力的增加,试样由单一的破裂面逐渐转为分层的

表1 拉剪试样峰值强度
Table 1 Peak strengths of samples under tension-shear condition

试样编号	剪应力 / MPa	拉应力 / MPa
4-1	0.500	-2.32
6-2	0.530	-3.92
4-2	1.000	-2.51
4-3	1.500	-2.83
2-4	2.014	-3.61
4-4	3.000	-2.55
5-1	5.030	-2.73
5-2	7.000	-1.29
5-3	9.000	-0.93

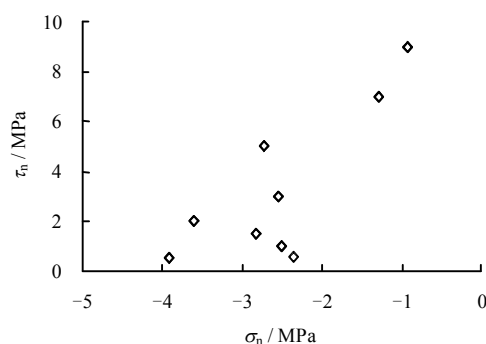
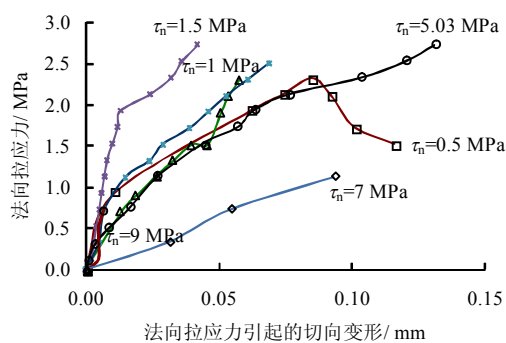
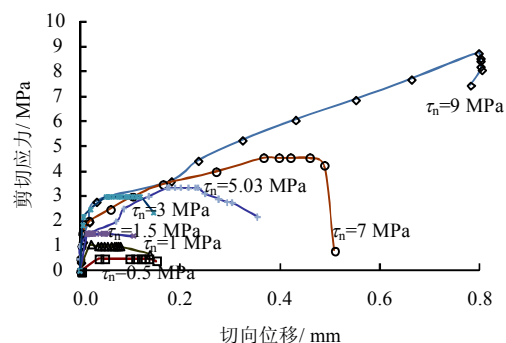


图6 峰值强度数据点

Fig.6 Data points of peak strengths



(a) 法向拉应力-法向拉应力引起的切线变形曲线



(b) 剪切应力-切向位移曲线

图7 法向应力、剪切应力与切向位移的曲线

Fig.7 Relationships between normal stress, shear stress and tangential displacement

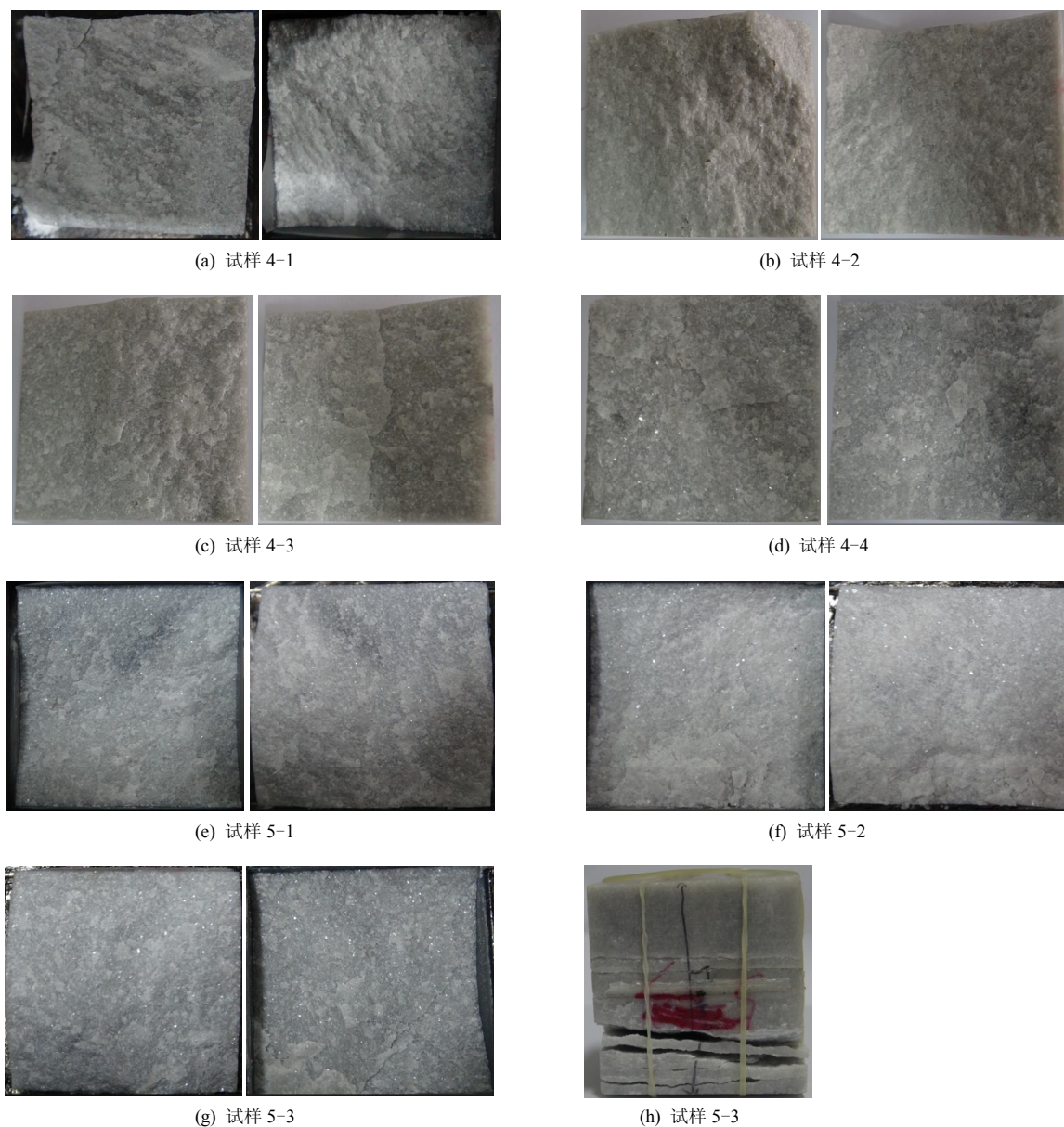


图8 各试样破裂面

Fig.8 Fractured surfaces of typical samples

多层近似平行的破裂面，如图 8(h)所示。分析原因可能是：在此剪切力条件下出现了多条泛白剪切滑移集中条带，但没形成主剪切破裂面，后在轴向拉力作用下同时破裂而成。

4 考虑拉剪破坏和应力状态影响的屈服准则研究

岩土工程中常用的屈服准则多是基于压剪破坏机制建立的。然而，随着地下岩体工程越来越往深部发展，高应力条件下开挖卸荷造成围岩壁的脆性破坏主要为拉伸、张拉剪切破坏，如锦屏二级水电站现场微震监测结果^[22]、不同施工条件下的岩石断裂面 SEM 扫描结果^[23]均证明了该结论。因此，有必要建立考虑拉剪破坏机制的岩体屈服准则。本节

则基于 Mohr-Coulomb 理论，考虑拉剪破坏机制和应力状态的影响，建立了硬脆性大理岩的屈服准则。

关于屈服和破坏，文献[11, 24]详细叙述了两者的区别，对于本文的研究对象，不考虑其峰值前的塑性变形，因此，取其峰值破坏点为屈服点。

4.1 基于 Mohr-Coulomb 理论的硬脆性大理岩强度曲线

常用的 Mohr-Coulomb 模型是基于 Coulomb 于 1773 年提出的模型和 Mohr 于 1900 年的经验观察得出的。Mohr-Coulomb 准则是岩石材料最大剪应力假设强度准则的典型代表，它是 Mohr 强度准则 $\tau = f(\sigma_n)$ 的简化直线型形式，表征岩石单元剪切面上的剪切强度由凝聚力和内摩擦强度两部分构成，其直线型表达式为

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

式中： τ_n 、 σ_n 为破坏面上的剪应力和正应力； c 、 φ 为凝聚力和内摩擦角。

因此，若要获得 Mohr-Coulomb 准则的试验结果，还要有压剪试验、直接拉伸试验和直接剪切试验。

4.1.1 硬脆性大理岩压剪试验结果

硬脆性大理岩压剪试验在中国科学院武汉岩土力学所自行研制的 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行，试样为 50 mm×100 mm 的圆柱体试样，试样先由夹具夹好再放入剪切盒中。试验系统和试样夹具如图 9 所示。

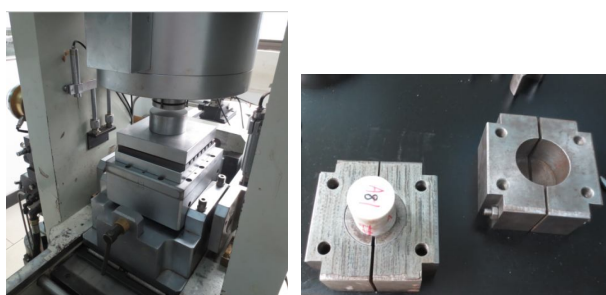


图 9 压剪试验系统和试样夹具
Fig.9 Compression-shear testing system and the sample clamp

试验步骤：压剪试验一般是先施加法向压力至预设值，再施加剪切力直至试样破坏，如果反过来加荷，试样就不会沿预设破裂面发生剪切破坏。因此，本文中的压剪试验加载顺序为先压后剪，法向压力分别为 1、2、6、10、20、40、60、80、120 kN，每一法向压力下的试样为 3 块，即重复 3 次。

图 10 为一组不同法向压力条件下的剪切应力-剪切位移曲线（图例中的法向应力为近似值，其精确值应为法向压力与试样破裂面面积的比值）。随着剪切力的增加，剪切变形经历了 4 个阶段：①初始非线性阶段，该过程包含了夹具和剪切盒的调整位移；②线性弹性变形阶段；③峰后变形阶段；④残余变形阶段。由于试样之间的非均匀性，弹性变形阶段的弹性模量稍有差别；残余变形阶段均近似成水平线，此时的位移已是破裂面上侧的试样在滑动。随着法向应力的增加，试样的破裂面逐渐由脆性破坏转为延性破坏；低法向应力条件下，弹性变形阶段出现了一次或两次波动，这是因为在低法向应力条件下，破裂面不是一次形成，且破裂面比较粗糙（见图 11(a)），形成破裂面后，上、下两试样

在相互错动中会有爬坡效应，所需的剪切力会先增大再减小，在剪应力-位移曲线上的表现就是一次波动。

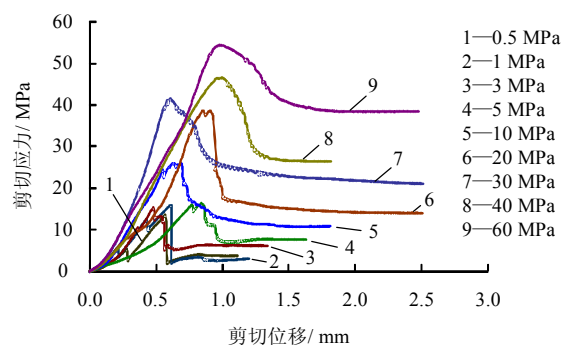
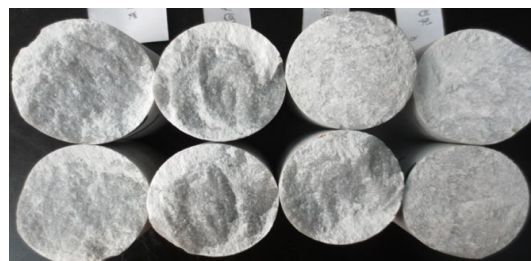


图 10 剪切应力-剪切位移曲线
Fig.10 Relationships between shear stress and shear displacement

如图 11 所示，虽是压剪应力条件下，但在法向压力不超过 10 kN 时，试样破裂面还是表现出了张拉破坏特征。随着法向压力的增加，张拉破坏特征逐渐消失，破裂面转为剪切滑移特征，破裂面较平且岩粉较多。



(a) 从左到右，法向压力依次为 1、2、6、10 kN



(b) 从左到右，法向压力依次为 20、40、60、80、120 kN

图 11 压剪条件下试样破裂面
Fig.11 Fractured surfaces after compression-shear tests

图 12 为试样峰值强度应力点的分布。可见，峰值剪切应力和法向应力呈现的规律性比较好，当 $\sigma_n \leq 20$ MPa 时两者近似呈线性关系，随着法向应力继续增大两者呈非线性，曲线斜率逐渐变小，曲线变平缓并有下降趋势。

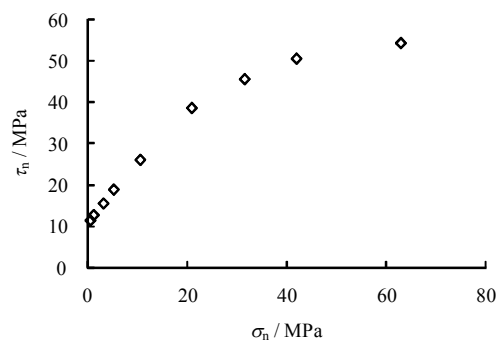


图 12 压剪试验峰值强度点

Fig.12 Peak strengths from compression-shear tests

图 13 所示表明,当法向压力足够大时,试样出现了沿竖向的损伤裂纹,即达到了其法向破坏强度,这正好解释了剪切力在该法向应力条件下增长缓慢并有下降趋势的现象。



图 13 法向压力为 120 kN 的试样

Fig.13 Fractured sample with a normal stress of 120 kN

4.1.2 硬脆性大理岩强度曲线

通过上述试验,获得了大理岩试样压剪段和拉剪段的强度曲线,但要获得全段曲线还缺少两个试验结果:直接剪切试验和直接拉伸试验。这两个试验在图 1 所示的岩石拉伸-剪切试验系统上是可以实现的,但试验结果表明,直接拉伸试验获得的试样抗拉强度与文献[25]中加载速率为 10 kN/s 的结果相近,为 6.3 MPa,考虑到加载速率和拉剪段曲线趋势,试样抗拉强度采用文献[26]加载速率为 0.1 kN/s 的结果,为 4.06 MPa;而直接剪切试验中,由于试样法向方向无约束,试样在剪切过程中容易翘起,导致直接剪切强度偏低,综合各试验结果,确定大理岩试样的直接剪切强度为 10.78 MPa。至此,可获得基于破裂面形成的破坏面上的剪应力-法向应力强度全段曲线,如图 14 所示。

由图 14 中峰值强度数据点的分布趋势来看,破裂面上的剪应力和法向应力关系规律性良好,与摩尔强度包络线特征一致。在法向应力较小的范围内,其曲线斜率较陡;而在较大的法向应力作用下,其

斜率平缓。

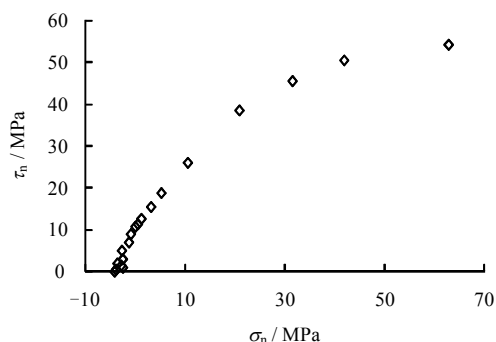


图 14 大理岩试验峰值强度数据点

Fig.14 Peak strengths of marble specimens

图 15、16 分别为直接拉伸和直接剪切试样的破裂面,图 16 所示的试样有初始裂隙,因此,破裂面一端不平整,出现了垂直于剪切面的破坏面。结合图 8、11 可将峰值强度全段分为 3 段:直接拉伸破坏段、拉剪混合破坏段和剪切滑移破坏段。由图中所示尺度的破坏面特征不能明确区分直接拉伸段和拉剪混合段的分界点,理论上来说,其分界点应位于拉剪区段,但具体剪切力达到何值时发生转换则需进行破裂面的微观分析;拉剪混合段和剪切滑移段的分界点是比较明显的,就试样中所施加的荷载等级来说,法向应力 ≤ 5 MPa 时为拉剪混合段,法向应力 ≥ 10 MPa 时为剪切滑移段,也就是说,拉剪混合段包含了拉剪应力段和一部分低法向压应力段。



图 15 直接拉伸试样破裂面

Fig.15 Fractured surfaces after direct tensile tests



图 16 直接剪切试样破裂面

Fig.16 Fractured surfaces after direct shear tests

需要说明的是,对试验数据的分析未考虑试样形状和尺寸、破裂面与剪切方向夹角(角度较小,在 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 之间)的影响,这两个影响因素对峰值强度的影响有多大还需进行后续试验分析,需要对现有试验仪器进行改造才能进行。

4.2 基于试验结果的经验型 Mohr-Coulomb 屈服准则

由图 7、10 可知,峰值点之前应力-应变曲线基本为线性,因此,可假设峰值前为弹性阶段,取曲线峰值点为屈服点,故其峰值应力点组成的曲线即为初始屈服曲线,如图 14 所示。

由前文所述,众多学者采用了不同的曲线形式来处理 Mohr-Coulomb 准则中的拉剪段部分,本节采用文献[7]中所验证的偏差最小的二次抛物线型进行拟合,二次抛物线型包络线一般形式为

$$\tau_n^2 = n(\sigma_n + R_t) \quad (2)$$

式中: n 为待定系数; R_t 为极限抗拉强度(MPa)。

通过对图 17 所示的试验结果拟合分析,确定了待定系数 $n=49.407$,建立二次抛物线型强度准则表达式为

$$\tau_n^2 = 49.407(\sigma_n + R_t) \quad (3)$$

拟合精度 $R^2=0.9713$,拟合曲线与原始数据点如图 17 所示。由图可看出,虽然拟合精度是比较高的,但拉剪段和低压法向应力段的差距较大,这样就丧失了表征硬脆性岩石拉剪破坏特性的功能。

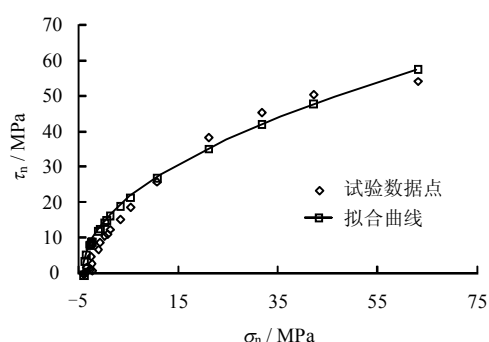
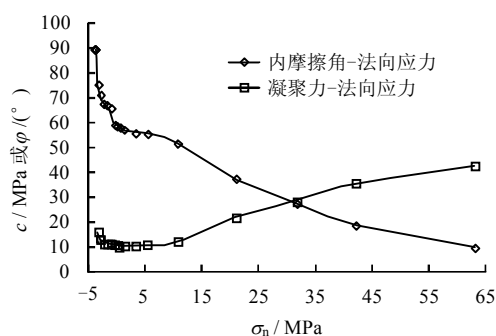


图 17 二次抛物线型 Mohr-Coulomb 准则拟合曲线
Fig.17 Fitting curve of a second-degree parabola Mohr-Coulomb criterion

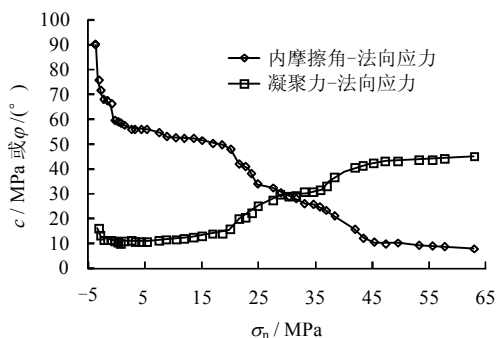
4.3 考虑张拉剪切破坏机制和应力状态影响的修正 Mohr-Coulomb 屈服准则

图 14 表明,大理岩试样的屈服曲线与法向应力有关,即 c 、 φ 值是随法向应力变化的,因此,有必要对 c 、 φ 值的变化规律进行研究。文献[27]提出,由摩尔包络线求解 c 、 φ 值存在一定的弊端,并且

提出了基于试验数据点的分段线性平均斜率方法进行求解。本文采用该方法,获得的结果如图 18(a)所示。曲线在趋近抗拉强度时, φ 值接近于 90° ,而 c 值趋于无穷大,考虑到图 18(a)的显示效果,凝聚力与法向应力的关系曲线并没包含该段。此外,由于压剪试验中法向应力大小分级跨度较大,数据点较少,采用分段线性平均斜率方法求解的 c 、 φ 值随法向应力的变化曲线产生了不合理的地方,如图 14 中,法向应力接近试验最大值时,曲线趋于平缓,此时 c 、 φ 值应趋于定值,而图 18(a)中并没有表现出该趋势。因此,笔者依据图 14 中的数据点连接而成的光滑曲线选取较多的数据点,再根据分段线性平均斜率法求取较多的 c 、 φ 值,获得结果如图 18(b)所示。结果表明,内摩擦角随法向应力的增大而减小,凝聚力随法向应力增大先减小后增大, c 、 φ 值随法向应力的变化趋势可分为 4 段:拉剪段、低压应力段、中压应力段和高压应力段,每段的 c 、 φ 值与法向应力皆可认为是线性关系,可建立线性表达式。理想的考虑应力状态影响对 Mohr-Coulomb 屈服准则的修正,可将 c 、 φ 值与法向应力的表达式代入式(1)中,形成分段式的屈服准则。考虑到接近抗拉强度处,内摩擦角接近 90° 、凝聚力则趋于无穷大无法表示,且拉剪段的内摩擦角和凝聚力的



(a) 基于试验数据点的变化曲线



(b) 基于试验数据点趋势的变化曲线

图 18 凝聚力、内摩擦角随正应力变化曲线
Fig.18 Relationships between cohesion, friction angle and normal stress

物理意义不明确, 因此, 笔者考虑拉剪段采用二次抛物线型拟合、压剪段采用 c 、 φ 值随正应力的演化曲线建立屈服准则。

依据式 (2), 只采用拉剪段的数据点进行拟合, 求得 $n = 25.994$, 因此,

$$\tau_n^2 = 25.994(\sigma_n + R_t) \quad (4)$$

式 (4) 当 $\sigma_n \leq 0$ MPa 时成立。

为便于工程计算, 压剪段 c 、 φ 值随法向应力的演化分为 3 段, 低压应力段和高压应力段分别采用常量, 中间一段为线性, 对于本文中大理岩的试验结果, 则有:

$$\left. \begin{aligned} c^0 &= 11.57 \text{ MPa} & 0 < \sigma_n \leq \sigma_L \\ c^1 &= 0.944 \sigma_n + 0.141 \text{ 2} & \sigma_L < \sigma_n < \sigma_B \\ c^2 &= 43.76 \text{ MPa} & \sigma_B \leq \sigma_n \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi^0 &= 55.34^\circ & 0 < \sigma_n \leq \sigma_L \\ \varphi^1 &= -1.294 \sigma_n + 69.394 & \sigma_L < \sigma_n < \sigma_B \\ \varphi^2 &= 9.68^\circ & \sigma_B \leq \sigma_n \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: σ_L 、 σ_B 为界限值, 对于本文的试验结果, 分别近似为 $\sigma_L = 15$ MPa 和 $\sigma_B = 45$ MPa。将式 (5)、(6) 代入式 (1), 则有:

$$\tau_n = \sigma_n \tan \varphi(\sigma_n) + c(\sigma_n) \quad (7)$$

式 (7) 当 $\sigma_n > 0$ MPa 时成立。由式 (4)、(7) 可获得修正的 Mohr-Coulomb 准则曲线, 如图 19 所示。

比较图 17、19, 可明显看出图 19 中的曲线精度较高, 即考虑拉剪破坏和应力状态影响所建立的屈服准则更准确。

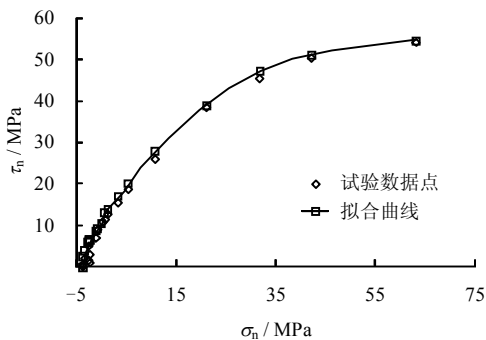


图 19 考虑应力状态影响的 Mohr-Coulomb 屈服准则曲线
Fig.19 Yield criterion curve of Mohr-Coulomb considering the influence of stress state

5 结 论

(1) 本文中的岩石拉伸-剪切试验系统适合先加

剪切力再加轴向拉力的加载顺序, 并且可以实现直接拉伸和直接剪切的加载条件。

(2) 拉剪应力条件下, 大理岩呈现脆性破坏, 破裂面张拉破坏特征明显, 无明显剪切痕迹; 随着剪切力增加, 轴向拉力降低; 剪切力固定, 剪切位移会随着轴向拉力增加而增加。

(3) 凝聚力和内摩擦角受应力状态影响, 凝聚力随正应力增大先减小后增大, 内摩擦角随法向应力的增大而减小, 凝聚力、内摩擦角随法向应力的变化趋势可分为 4 段: 拉剪段、低压应力段、中压应力段和高压应力段, 每段的凝聚力、内摩擦角与法向应力皆可认为是线性关系, 靠近抗拉强度处, 内摩擦角趋近 90° , 凝聚力趋于无穷大。

(4) 考虑张拉剪切破坏机制和应力状态影响的 Mohr-Coulomb 准则全段曲线可分两部分: 拉剪段和压剪段。拉剪段屈服准则形式可针对试验数据采用二次抛物线进行拟合, 压剪段考虑 c 、 φ 值随法向应力的变化建立分段式的 Mohr-Coulomb 准则表达式。由此建立的 Mohr-Coulomb 准则更全面、精度也更高。

参 考 文 献

- [1] ETHERIDGE M A. Differential stress magnitudes during regional deformation and metamorphism: Upper bound imposed by tensile fracturing[J]. *Geology*, 1983, 11(4): 231–234.
- [2] RAMSEY J M. Experimental study of the transition from brittle shear fractures to joints[D]. Texas, USA: Texas A & M University, 2003.
- [3] 支乐鹏, 许金余, 刘志群, 等. 高温后花岗岩巴西劈裂抗拉试验及超声特性研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(增刊 1): 61–66.
ZHI Le-peng, XU Jin-yu, LIU Zhi-qun, et al. Research on ultrasonic characteristics and Brazilian splitting-tensile test of granite under post-high temperature[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Supp.1): 61–66.
- [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] 朱子龙, 李建林, 王康平. 三峡工程岩石拉剪蠕变断裂试验研究[J]. *武汉水利电力大学(宜昌)学报*, 1998, 20(3): 16–19.
ZHU Zi-long, LI Jian-lin, WANG Kang-ping.

- Experimental research on rock tension-shear strength and creep rupture related to the Three Gorges project[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering/Yichang**, 1998, 20(3): 16—19.
- [6] 李建林. 三峡工程岩石拉剪断裂特性的试验研究[J]. 地下空间, 2002, 22(2): 149—152.
- LI Jian-lin. A study on tension-shear crack property of rock related to the Three Gorges Project[J]. **Underground Space**, 2002, 22(2): 149—152.
- [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 tap ship lock slope rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4418—4421.
- [8] FERRILL D A, MCGINNIS R N, MORRIS A P, et al. Hybrid failure: Field evidence and influence on fault refraction[J]. **Journal of Structural Geology**, 2012, 42: 140—150.
- [9] RAMSEY J M, CHESTER F M. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture[J]. **Nature**, 2004, 428(6978): 63—66.
- [10] RODRIGUEZ E. A micro structural study of the extension-to-shear fracture transition in Carrara marble[D]. Texas, USA: Texas A & M University, 2005.
- [11] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. Geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2002.
- [12] ENGELDER T. Transitional-tensile fracture propagation: A status report[J]. **Journal of Structural Geology**, 1999, 21(8—9): 1049—1055.
- [13] 贾善坡, 陈卫忠, 杨建平, 等. 基于修正 Mohr-Coulomb 准则的弹塑性本构模型及其数值实施[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2051—2058.
- JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, et al. An elastoplastic constitutive model based on modified Mohr-Coulomb criterion and its numerical implementation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2051—2058.
- [14] 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(Supp.1): 3029—3033.
- [15] 王东, 刘长武, 王丁, 等. 复杂应力条件下岩石的拉剪变形及破坏准则研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(2): 31—35.
- WANG Dong, LIU Chang-wu, WANG Ding, et al. Research on the tension-shear deformation and failure criterion of rock under complex stress[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2012, 44(2): 31—35.
- [16] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- YOU Ming-qing. Mechanical properties of rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [17] PATERSON M S, WONG T. Experimental rock deformation: The brittle field[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [18] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. London: CRC Press, 2007.
- [19] 黄达, 金华辉, 黄润秋. 拉剪应力状态下岩体裂隙扩展的断裂力学机制及物理模型试验[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 997—1002.
- HUANG Da, JIN Hua-hui, HUANG Run-qiu. Mechanism of fracture mechanics and physical model test of rocks crack expanding under tension-shear stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 997—1002.
- [20] 周辉, 孟凡震, 张传庆, 等. 岩石拉伸-剪切试验系统: 中国, ZL 201310040993.0[P]. 2013-06-26.
- ZHOU Hui, MENG Fan-zhen, ZHANG Chuan-qing, et al. Rock tensile and shearing test system: China, ZL 201310040993.0[P]. 2013-06-26.
- [21] 长江水利委员会长江科学院. SL264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission. SL264-2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.
- [22] 明华军. 基于微震信息的深埋隧洞岩爆孕育机制研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012.
- MING Hua-jun. Studies on rockburst nucleation mechanism in deep-buried tunnel based on micro-seismic informations[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012.