

# 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性 试验研究

邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 周 辉, 孙 峰

(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)

**摘要:** 为了更准确认识卸荷速率对岩石力学性质的影响规律, 进行不同卸荷速率的三轴卸围压试验, 试验采用新的试验路径和加载方式, 减少试验过程对试验结果的不利影响。针对锦屏二级水电站深埋大理岩, 通过新提出的描述变量(应变围压柔量)重点分析卸围压速率在 0.01~1.0 MPa/s 范围内围压卸荷对变形规律的影响, 研究扩容过程的演化规律和强度特征的差异。研究表明, 大理岩的轴向变形和扩容过程受卸围压速率的影响较为显著, 影响规律主要由初始围压水平控制。卸围压试验扩容过程与常规三轴压缩试验峰前阶段的扩容演化规律存在显著差异。不同卸围压速率破坏时获得的极限承载强度均高于加载速率为 0.5 MPa/s 时常规三轴压缩的峰值强度。随着卸围压速率的增大, 极限承载强度不断提高, 达到 1.0 MPa/s 速率时极限承载强度可提高 10%~15%。

**关键词:** 岩石力学; 卸围压试验; 卸荷速率; 深埋大理岩

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2010)09-1807-11

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON MECHANICAL PROPERTIES OF DEEP-BURIED MARBLE UNDER DIFFERENT UNLOADING RATES OF CONFINING PRESSURES

QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, ZHOU Hui, SUN Feng

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

**Abstract:** In order to understand exactly the influence of unloading rate on mechanical properties of rock, the unloading confining pressure tests under different unloading rates are carried out, which use new loading path and operation method. Thus the disadvantageous effect on test process of the results is reduced. And the deep-buried marble samples cored from Jinping II hydropower station are tested. Based on a new description variable presented as strain-pressure compliance, the influences of the unloading confining pressure path are analyzed on the axial and volume deformations and strengths. The results indicate that the unloading rates of the confining pressure have significant influence on the deformation of Jinping marble, and the initial confining pressure levels mainly control the corresponding influence rules. There are obvious differences in the dilatant processes between the unloading confining pressure tests and triaxial compression tests. In unloading confining pressure tests, the limited bearing loads under the range of unloading rates between 0.01 MPa/s and 1.0 MPa/s are higher than those in the conventional triaxial compression tests under the loading rate of 0.5 MPa/s. Limited bearing capacity increases along with the rise of unloading rates, and increases 10% - 15% at the rate of 1.0 MPa/s.

**Key words:** rock mechanics; unloading confining pressure experiment; unloading rate; deep-buried marble

**收稿日期:** 2010-05-14; **修回日期:** 2010-05-31

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB732006); 国家自然科学基金资助项目(50920105908, 50709037)

**作者简介:** 邱士利(1980-), 男, 2003年毕业于吉林大学环境与资源学院水文地质与工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事高应力硬岩卸荷破坏机制及预测方法等方面的研究工作。E-mail: qiu\_shi\_li@126.com

## 1 引言

卸荷速率对岩石卸荷力学特性有显著的影响,但至今其影响机制还不清楚,同时忽略卸荷速率的卸荷试验研究获得的规律认识存在较大差异,这给正确认识岩石卸荷破坏机制带来了极大障碍。卸荷岩体力学理论成果指出岩体在卸荷和加荷2种不同力学状态下力学特性存在明显差异,并建议根据工程结构所处力学状态采用加荷和卸荷理论进行工程分析和研究<sup>[1]</sup>。地下洞室和隧洞构建过程中岩体处于围压卸荷状态,研究岩体(石)卸荷力学特性对正确地认识岩体破坏机制、准确地分析围岩稳定性和合理地制定开挖和支护方案有重要意义。而影响岩体(石)卸荷力学特性的因素众多,卸荷岩体力学理论已在岩体各向异性、尺寸效应、拉剪切断裂和流变特性等方面对岩体卸荷力学特征的影响进行了深入研究<sup>[2]</sup>。除了上述影响因素外,卸荷速率对岩体(石)卸荷力学特性也有显著的影响,如高地应力条件下硬岩岩爆破坏与卸荷速率有密切关系,施工中常通过减慢开挖速度,减小开挖进尺来降低岩爆发生的风险,其本质是调整开挖引起围岩卸荷速率的大小来控制岩爆发生频率和烈度。但卸荷速率影响岩体(石)力学特性的机制还不清楚,且众多不考虑卸荷速率影响的卸围压试验研究获得强度和变形规律存在较大差异而无统一论,故卸荷速率对岩石力学性质影响仍是卸荷岩体力学研究中的重要课题之一。

实验室条件下,加载速率对岩石力学性质的影响已被国内外众多学者进行了研究,而卸荷速率对岩石力学性质的影响规律的研究还处于起步阶段,仅有少数国内学者开展了该方面的研究工作。黄润秋和黄达<sup>[3]</sup>对锦屏一级大理岩在不同卸荷速率下的力学特性进行了试验研究,指出卸荷速率对锦屏大理岩的变形特征、断裂特征和强度特征有较显著的影响。吴刚和孙钧<sup>[4]</sup>探讨了卸荷速率对裂隙岩体强度特征影响,指出卸荷速率的增加,岩石的强度是提高了。上述研究成果对于认识卸荷速率对岩石力学性质的影响规律具有重要的参考价值。同时研究表明,控制卸荷速率的试验技术本身是存在一定难度的。如果试验路径中轴压 $\sigma_1$ 是变化的,将导致试验结果受 $\sigma_1$ 变化速率的影响,结果不能真实地反映卸围压速率的影响程度。另外,如果围压采用手动控制方式,试验过程中真实卸围压速率是变化的,也将影响变形过程。

针对卸荷速率对岩石力学特性的影响规律这一

重要课题,张凯等<sup>[5]</sup>进行了锦屏二级水电站T<sub>2</sub>b大理岩卸围压速率试验,研究卸荷速率对强度的影响规律,并建立了卸荷速率与加载速率的对应关系。进一步地,本文在前人工作基础上进行了不同卸荷速率的三轴卸围压试验,试验采用新的试验路径和加载方式,即在岩样达到极限承载能力前保持轴压 $\sigma_1$ 不变,卸围压速率由试验机程序自动控制保持在设定水平。试验方法上降低了 $\sigma_1$ 的影响程度,并保证试验过程中卸荷速率保持恒定以避免手动控制带来的不利影响。通过该试验方法对不同卸围压速率条件下锦屏二级水电站引水隧洞深埋大理岩的变形破裂特征、体积扩容特征以及强度变化规律进行了较详细地研究。研究成果对正确认识不同开挖方式下围岩脆性破坏(如岩爆、片帮及剥落等)机制具有重要的理论意义,对现场制定支护参数和推进速率以应对该问题具有明确的现实意义。需要指出的是,本文重点研究超过弹性极限应力水平阶段卸荷速率对岩石力学性质影响规律,原因在于岩石力学特性在弹性极限以下受边界条件和加载系统的影响甚微<sup>[6,7]</sup>,卸荷速率明显影响的是弹性极限之后过程。另外,本文不探讨卸围压破坏后残余强度特征,卸围压破坏后出现明显的应力跌落和较大的环向变形,通过保持围压水平来获得岩石的残余强度较困难,且环向变形过大通常会超出试验机量程范围无法获取相应数据。

## 2 试验条件及试验方案

### 2.1 试验条件及试验方法

本研究岩石试样取自锦屏二级水电站4<sup>#</sup>引水隧洞引(4)12+600~615洞段盐塘组(T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>)灰白色中粗晶大理岩,取样洞段埋深为1 850 m。试样为圆柱形,直径约50 mm,高度约100 mm。试件加工精度按《水利水电岩石试验规程》(SL264-2001)执行,端面平整度允许偏差为 $\pm 0.05$  mm,端面应垂直于试件轴线,允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

试验在本单位的MTS815岩石试验机上完成,该试验系统可以测量试样的轴向和环向应变,如图1所示。轴向变形采用2种方法测量,即LVDT和应变规。LVDT同时测量垫片和岩样的变形,而应变规仅测量岩样中部的变形。岩样的环向变形采用由链条链接的伸长计进行测量,链条安置在试样的中部。本次试验中,三轴加载试验采用位移控制,轴压加载位移速率为 $1 \times 10^{-3}$  mm/s,三轴卸围压试验采用载荷控制(由试验辅助软件系统程序自动控制实现),卸围压前轴压加载速率为0.5 MPa/s。

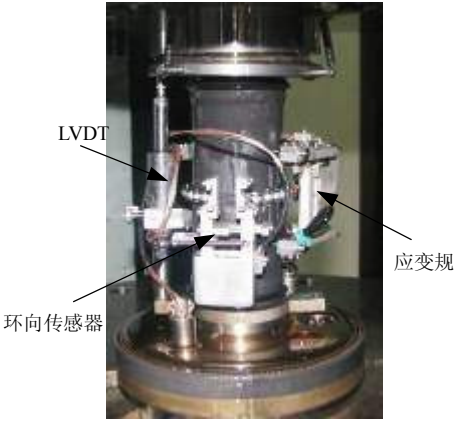


图 1 试验设备  
Fig.1 Assembled test equipment

2.2 试验方案

本次研究采用 2 种试验方案, 单轴、常规三轴压缩试验和不同卸围压速率试验。单轴、常规三轴压缩试验的目的是: (1) 获取锦屏二级 T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup> 大理岩强度、变形参数和加载路径下变形破坏特征。(2) 为不同卸围压速率试验提供应力水平, 并为结果对比提供基础数据。常规三轴压缩试验设定了 7 个围压水平: 0, 10, 20, 40, 60, 80 和 100 MPa。

卸围压路径具有多样性, 根据偏压变化规律可划分为 2 类: 偏压增大卸围压和偏压恒定卸围压。偏压增大卸围压又可细分为恒轴压卸围压(如图 2 中 OC 所示, 图中的虚线为假想非线性强度准则)、增压卸围压(如图 2 中 OB 所示)和不等量卸围压(轴压卸荷量小于围压卸荷量, 如图 2 中 OD 所示)。而偏压恒定卸围压实质是轴压围压等量减小(如图 2 中 OE 所示)。现有研究成果表明, 卸荷路径对岩石力学性质是有一定影响的, 故不同的卸荷试验应力路径将得出不同的试验规律, 这也是造成目前卸荷试验研究获得规律不统一的重要原因之一。因此, 在研究不同卸围压速率对岩石力学性质影响时, 应根据现场实际情况制定相应的应力路径。造成卸荷路径差异的主导因素是轴压的变化过程, 而本研究重点在于卸荷速率对卸围压过程岩石力学特性影响规律的研究, 如果轴压在试验过程中是变化的, 这将在一定程度上影响岩石变形规律和力学性质, 结果不能真实地反映卸围压速率的影响程度, 故本次研究中选择恒定轴压卸围压路径, 即图 2 中 OC 所示路径, 同时卸围压速率有试验机程序自动控制, 保证试验过程中卸围压速率是恒定的。本研究的试验步骤为:

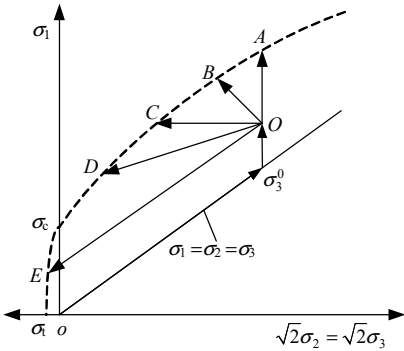


图 2 卸围压应力路径示意图  
Fig.2 Schematic diagram of stress path in confining pressure unloading tests

- (1) 首先按静水压力条件施加  $\sigma_1 = \sigma_3$  到初始围压预定值  $\sigma_3^0$ 。
  - (2) 加轴压  $\sigma_1$  至初始轴压设计值, 该值根据常规三轴压缩试验结果确定为峰值强度的 80%(体积应变回转时对应的应力水平), 保持  $\sigma_1$  恒定。
  - (3) 以不同速率卸除围压, 直至试样破坏。
- 本次试验研究中设计了 5 个卸围压速率( $v_u$ )等级, 分别为 0.01, 0.1, 0.3, 0.5 和 1 MPa/s。初始围压预定值  $\sigma_3^0$  分别为 10, 20, 40 和 60 MPa。试验卸围压速率及轴压初始应力水平如表 1 所示。

表 1 试验卸围压速率及轴压初始应力水平  
Table 1 Unloading rates of confining pressures and initial stress conditions of axial compression

卸围压速率 /(MPa · s <sup>-1</sup> )	初始围压 /MPa	初始轴压 /MPa	卸围压速率 /(MPa · s <sup>-1</sup> )	初始围压 /MPa	初始轴压 /MPa
0.01	10	150	0.5	10	150
	20	180		20	180
	40	220		40	220
	60	320		60	320
0.1	10	150	1	10	150
	20	180		20	180
	40	220		40	220
	60	320		60	320
0.3	10	150			
	20	180			
	40	220			
	60	320			

3 大理岩变形破坏特征

3.1 单轴、三轴压缩试验大理岩变形破坏特征

本研究的单轴压缩试验结果表明锦屏 T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup> 大理岩试样的单轴抗压强度平均值约为 130 MPa, 弹性模量为 33.9 GPa, 泊松比为 0.19。图 3 为 T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup> 大理

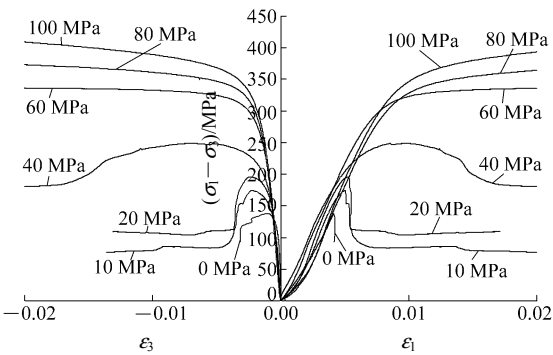


图 3  $T_2y^5$  大理岩不同围压下单轴、三轴压缩全过程曲线  
Fig.3 Complete curves of marble  $T_2y^5$  under uniaxial and triaxial compression tests

岩不同围压下单轴、三轴压缩全过程曲线(曲线上的数字为围压)。可见,  $T_2y^5$  大理岩在低~中等围压条件下表现出脆性破坏特征。当围压达到 40 MPa 后, 延性变形特征明显, 强度峰残差减小, 残余强度逐渐接近峰值强度, 甚至在围压达到 60 MPa 后超过了峰值强度, 出现应变强化现象。不同围压下岩样的宏观破坏形态如图 4 所示。单轴压缩破坏时岩样内形成 1~2 条轴向劈裂破坏面, 说明单轴试样破坏为压致拉裂, 试样内拉裂纹的扩展对岩样破坏有控制作用。在试样端部附近, 主破裂面两侧局部伴生有剪切破裂面, 这归因于试验机压头与岩样端部的摩擦效应, 当这类剪切面在垂直于轴向的投影覆盖岩样的端面, 试样最终破裂, 这与尤明庆<sup>[8]</sup>所得结论相同。围压在 10~40 MPa 范围内以宏观单剪切面破坏为主, 随围压的增大, 破坏角(剪切破裂面法向与轴压方向夹角的余角)逐渐增大; 围压大于

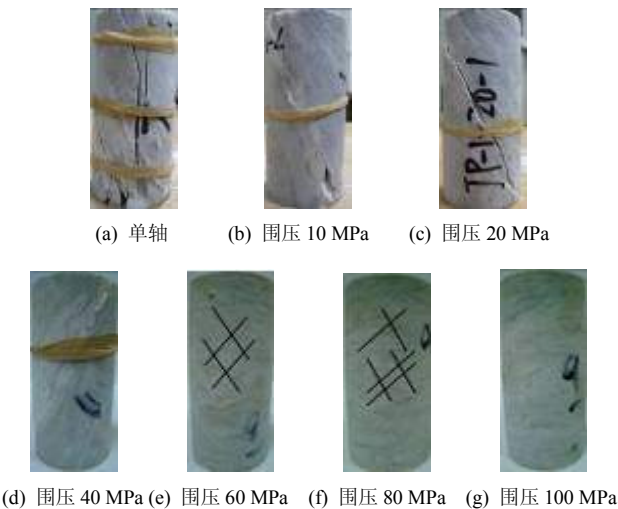


图 4  $T_2y^5$  大理岩岩样单轴、三轴压缩试验典型破坏照片  
Fig.4 Photos of samples after failure under uniaxial and triaxial compression tests with various confining pressures of marble  $T_2y^5$

60 MPa 后岩样无明显破坏面, 但表面可见一组共轭的剪切滑移线, 其方向如图 4(e), (f)和(g)中的黑线所示, 试样中部出现鼓胀现象, 围压再增加鼓胀现象不明显, 共轭剪切滑移线逐渐不清晰。

3.2 不同卸围压速率试验大理岩变形破坏特征

岩石材料本身具有非均质性, 具有大致相同矿物颗粒和结构的大理岩局部结构也会存在差异, 这将导致岩石宏观力学性质的差异, 即岩石的宏观力学性质存在离散性。如果试验结果离散性过大, 离散性造成的差异将给卸围压速率对岩石力学性质影响规律的研究带来极大困难。因此, 在试验结果的分析过程中需要考虑离散性的影响, 以避免给规律的归纳分析造成迷惑。

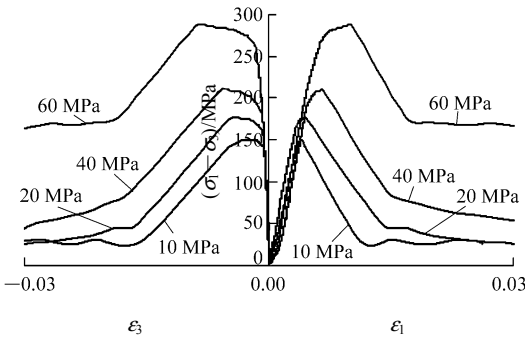
在本研究中, 为了降低离散性的影响, 在试验完成后对试验结果进行了筛选, 筛选的原则是评估体积回转应力水平是否与设计峰值强度的 80%应力水平相当。三轴压缩试验结果表明, 围压低于 60 MPa 时,  $T_2y^5$  大理岩体积回转应力水平在峰值强度的 79%±5%, 如表 2 所示。体积回转是一个状态动态变化过程, 从体积应变曲线上确定该应力水平时存在一定主观因素, 但总体偏差一般不会超过标准差 5%, 因此, 用峰值强度的 80%来反映该应力水平是可以接受的, 这也是表 1 中轴向初始应力水平设计的依据。筛选时体积回转应力水平在峰值强度 79%±5%范围内的试验结果, 本文给出卸围压速率对岩石力学性质影响规律的分析。

表 2 常规三轴压缩试验体积回转应力水平  
Table 2 Stress conditions of volumetric strain reversal under uniaxial and triaxial compression tests

岩样编号	围压/MPa	峰值强度/MPa	体积回转应力/MPa	应力比/%
jp1-0-1	0	134.721	119.100	88.41
jp1-0-2	0	137.684	112.390	81.63
jp1-0-3	0	144.694	103.290	71.39
jp1-10-1	10	187.428	153.516	81.91
jp1-10-2	10	184.367	142.539	77.31
jp1-10-3	10	187.854	158.358	84.30
jp1-20-1	20	229.884	169.864	73.89
jp1-20-2	20	215.450	168.382	78.15
jp1-20-3	20	229.624	165.553	72.10
jp1-40-1	40	288.850	227.820	78.87
jp1-40-2	40	298.477	226.050	75.73
jp1-40-3	40	273.393	205.360	75.12
jp1-60-1	60	403.916	340.640	84.33
jp1-60-2	60	396.279	328.360	82.86
平均值				79.00

保持轴压不变卸围压过程是偏应力(三轴情况

下为  $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 不断增大的过程, 属于单调有效加载路径<sup>[7]</sup>。不同初始围压和卸围压速率下的试验所得的典型应力 - 应变曲线如图 5 所示(图中各曲线相应数值为卸荷初始围压)。图 5 给出了卸载围压过程中轴向和侧向变形与偏压的关系。可见, 不同卸围压速率条件下, 大理岩卸荷变形过程基本一致, 卸围压开始后轴向变形相对缓慢, 而环向变形迅速增大。初始围压对变形过程影响显著, 初始围压越高, 岩样破坏前经历的变形越大。卸围压破坏过程表现出明显的脆性破坏特征, 所有初始围压下破坏后均出现明显应力跌落。与三轴压缩试验成果(见图 3)对

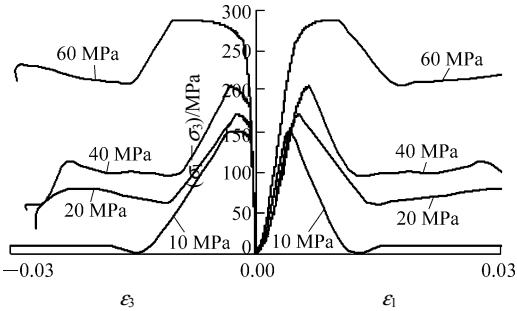


(e) 卸围压速率 1 MPa/s

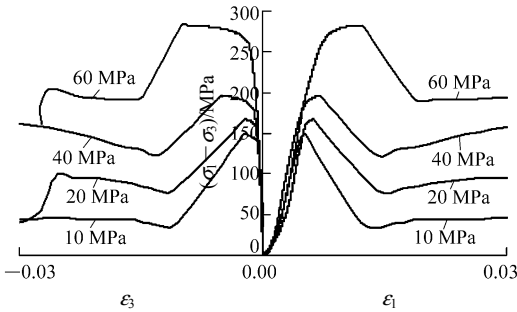
图 5  $T_2Y^5$  大理岩不同卸围压速率试验应力 - 应变曲线  
Fig.5 Complete stress-strain curves of marble  $T_2Y^5$  under different unloading-rate tests

比可知, 低初始围压卸荷时峰后曲线刚度要小于三轴压缩试验低围压曲线的刚度, 说明卸围压破坏后应力释放过程中伴随强烈变形。

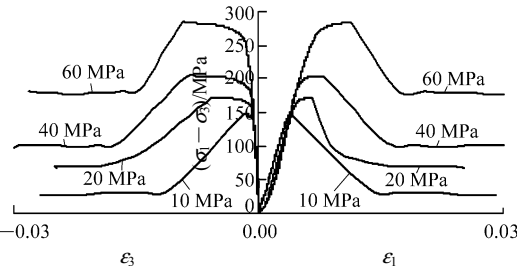
卸围压条件下,  $T_2Y^5$  大理岩不同卸围压速率试验典型破坏照片见图 6, 限于篇幅本文仅给出了初始围压分别为 10 和 60 MPa 下不同卸围压速率的结果, 以说明低、高围压条件下卸荷时宏观破坏形态的差异。在 0.01~1.0 MPa/s 卸围压速率范围内, 岩样最终破坏仍是以宏观剪切面的形成而结束, 但在低初始围压卸荷时, 轴向伴生有劈裂裂纹, 如图 6(a) 所示, 尤其是在 0.01 MPa/s 慢速卸荷时, 由密集的轴向劈裂相互贯通形成一定宽度剪切带, 由于剪切和挤压作用使得剪切带内劈裂岩片扭曲并破碎成粉和小颗粒, 诱发拉应力作用下在剪切带外侧形成许多二次劈裂纹。在高初始围压卸荷时, 一般形成相



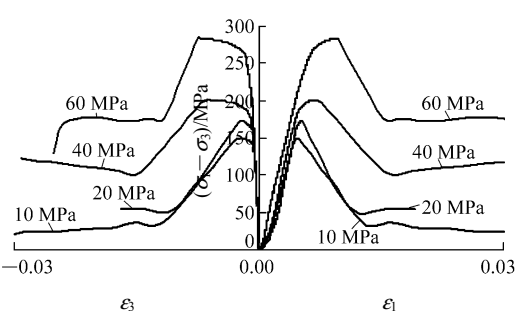
(a) 卸围压速率 0.01 MPa/s



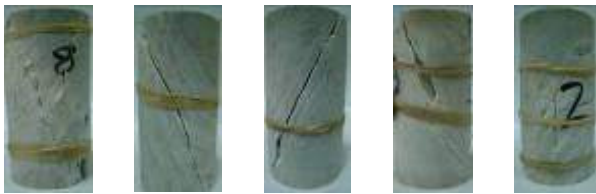
(b) 卸围压速率 0.1 MPa/s



(c) 卸围压速率 0.3 MPa/s



(d) 卸围压速率 0.5 MPa/s



0.01 MPa/s 0.1 MPa/s 0.3 MPa/s 0.5 MPa/s 1 MPa/s

(a) 围压 10 MPa



0.01 MPa/s 0.1 MPa/s 0.3 MPa/s 0.5 MPa/s 1 MPa/s

(b) 围压 60 MPa

图 6  $T_2Y^5$  大理岩不同卸围压速率试验典型破坏照片  
Fig.6 Photos of samples after failure under various unloading rates of confining pressures of marble  $T_2Y^5$



对光滑且宽度较小单一剪切面,个别可见孤立轴向劈裂,如图 6(b)所示。在 1.0 MPa/s 相对高速卸荷时,也可见因侧向鼓胀而生成的环向拉裂纹。高、低初始围压产生上述宏观破坏形态的差异的原因在于低初始围压有利于张性裂纹的生成,而高初始围压有利于裂纹闭合而产生裂纹滑移。

## 4 卸围压速率对大理岩变形特征影响分析

### 4.1 卸围压速率对大理岩变形特征的影响规律

为了分析卸荷过程中岩石的变形过程,本文提出了一个描述变量——应变围压柔量  $\Delta\dot{\epsilon}_i$ 。所谓应变围压柔量  $\Delta\dot{\epsilon}_i$  是指在卸围压起始点和应力跌落点之间由卸围压而引起的应变增量与围压降低量之比,可表示为如下形式:

$$\Delta\dot{\epsilon}_i = \frac{\Delta\epsilon_i}{\Delta\sigma_3} \quad (1)$$

式中:  $\Delta\dot{\epsilon}_i$  ( $i = 1, 3, v$ ), 分别表示轴向应变、环向应变和体积应变增量。

应变围压柔量  $\Delta\dot{\epsilon}_i$  是表示卸荷单位围压时各变形增量变化快慢的物理量,它更好地反映了卸荷过程中围压变化对变形的影响效应,也说明了岩石内部结构对应力状态的变化过程的响应速度。应变围压柔量  $\Delta\dot{\epsilon}_i$  越大,表明某方向变形对围压降低越敏感。

通过锦屏  $T_2y^5$  大理岩室内卸围压试验结果的分析,图 7 给出了轴向、环向和体积应变围压柔量  $\Delta\dot{\epsilon}_i$  与卸围压速率的关系。可知:

(1) 轴向、环向和体积应变明显受卸围压速率的影响,且影响规律受初始围压水平强烈地控制,如图 7 所示。

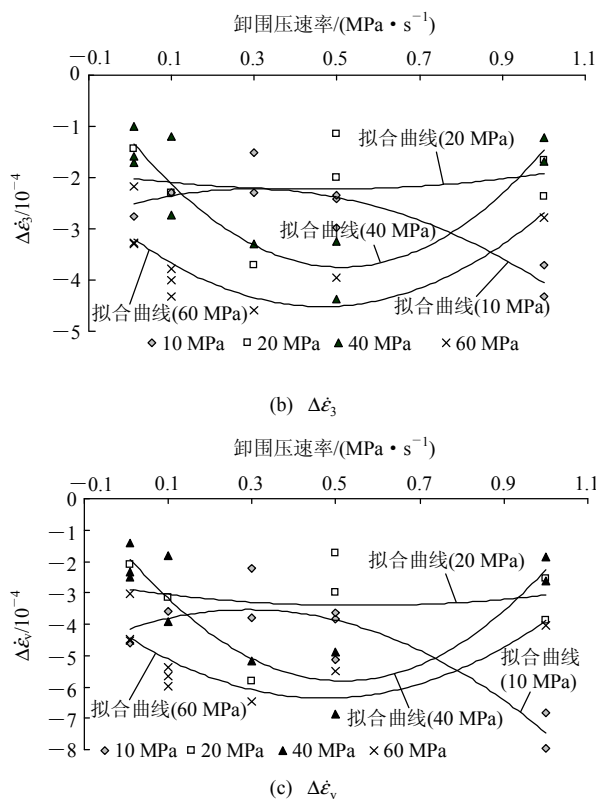
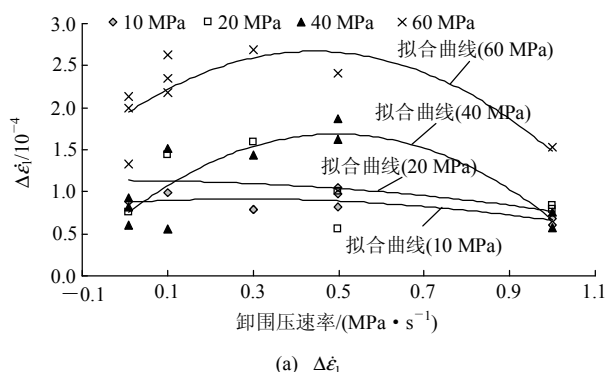


图 7  $T_2y^5$  大理岩应变围压柔量与卸围压速率关系

Fig.7 Relationships between the rate of strain variations and unloading rates of confining pressure of marble  $T_2y^5$

(2) 初始围压水平相对较低的 10, 20 MPa 卸荷时,不同卸荷速率下轴向应变围压柔量  $\Delta\dot{\epsilon}_1$  变化趋势较平缓,如图 7(a)所示,说明轴向应变围压柔量  $\Delta\dot{\epsilon}_1$  受卸荷速率的影响较小。初始围压水平提高到 40, 60 MPa 后,卸荷速率从 0.01 MPa/s 增至 1 MPa/s 过程中轴向应变围压柔量呈现先增大后减小的趋势,说明 0.5 MPa/s 左右范围的中等卸围压速率对轴向变形有促进作用,0.5 MPa/s 时轴向应变围压柔量是 0.01 和 1 MPa/s 时的 1.5~3.0 倍,这说明较慢卸围压速率与较高卸围压速率对轴向变形有抑制作用。

(3) 各初始围压水平下,相应的环向和体积应变围压柔量( $\Delta\dot{\epsilon}_3$  和  $\Delta\dot{\epsilon}_v$ )随卸围压速率变化规律一致。随着初始围压由高向低变化,卸围压速率对环向和体积变形的影响规律存在渐变和倒转的过程。初始围压为 40 和 60 MPa 时,卸围压速率从 0.01 增至 1 MPa/s 过程中,环向和体积应变围压柔量( $\Delta\dot{\epsilon}_3$  和  $\Delta\dot{\epsilon}_v$ )先增大后减小,说明该条件下中等卸围压速率范围对环向和体积变形有促进作用,其影响程度相对更大。当初始围压降至 20 MPa 时, $\Delta\dot{\epsilon}_3$  和  $\Delta\dot{\epsilon}_v$  变化趋势平缓,说明此时卸围压速率对环向和

体积变形的影响程度很小。但初始围压降至 10 MPa 后,  $\Delta\epsilon_3$  和  $\Delta\epsilon_v$  的变化规律与 40 和 60 MPa 时的变化规律正好相反, 出现规律上的倒转。0.01 MPa/s 的慢速卸荷和 1.0 MPa/s 高速卸荷均加快环向和体积变形的变化过程, 尤其是 1.0 MPa/s 的高卸荷速率下环向应变围压柔量  $\Delta\epsilon_3$  量值上提高了 1~2 倍, 而体积应变围压柔量  $\Delta\epsilon_v$  提高了近 3 倍, 见图 7(b) 和 (c)。

(4) 对比图 7(a), (b) 和 (c) 可知, 轴向应变围压柔量比环向和体积应变围压柔量均要偏小, 说明卸围压过程中, 不同卸围压速率对轴向变形的影响程度要小于对环向和体积变形的影响程度, 即环向和体积变形在卸荷过程中相对更敏感。

## 4.2 卸围压速率对大理岩扩容特性的影响规律

黄润秋等<sup>[3, 9~13]</sup>分别对大理岩、玄武岩和花岗岩进行卸围压试验研究, 均发现在卸围压过程中岩样出现明显的扩容现象。李天斌和王兰生<sup>[9]</sup>认为, 卸围压应力状态相当于在原有应力状态上叠加了一个侧向拉应力, 造成了明显的侧向扩容。试验研究显示, 岩石在加载路径下同样存在扩容过程, 在峰后变形过程中扩容尤为突出<sup>[14, 15]</sup>。扩容现象究竟是岩石的破坏原因还是结果目前学术界还存在争议, 本文更关心扩容现象变化过程与卸荷速率的关系。

在塑性理论中, 通常用剪胀角  $\psi$  来表征非弹性体积变化。根据 P. A. Vermeer 和 R. de Borst<sup>[16]</sup>建议将剪胀角  $\psi$  表示为

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\epsilon_v^p}{-2\epsilon_1^p + \epsilon_v^p}\right) \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_v^p$  和  $\epsilon_1^p$  分别为体积和轴向塑性应变增量。对于常规三轴试验, 围压作用在岩样整个圆周, 即  $\epsilon_2 = \epsilon_3$ 。于是式(2)可表示为

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\epsilon_1^p + 2\epsilon_3^p}{-\epsilon_1^p + 2\epsilon_3^p}\right) \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_3^p$  为环向塑性应变增量。

E. Detournay 等<sup>[17~20]</sup>指出剪胀角  $\psi$  为塑性参数和围压的函数。一般地, 塑性参数取塑性剪应变, 即  $\gamma^p = \epsilon_1^p - \epsilon_3^p$ 。因此, 本文采用相同方法分析不同卸围压速率下剪胀角  $\psi$  随塑性剪应变  $\gamma^p$  的变化规律。

通过卸荷前弹性变形阶段获取弹性常数: 杨氏模量  $E$  和泊松比  $\nu$ 。假定卸荷过程中弹性常数保持不变, 根据弹性理论计算弹性轴向应变  $\epsilon_1^e$  和弹性体积应变  $\epsilon_v^e$ 。相应的塑性应变用总应变减去弹性应变

而得到, 即

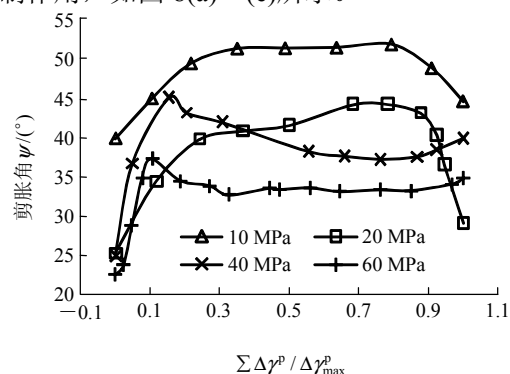
$$\epsilon_1^e = \frac{\sigma_1 - 2\nu\sigma_3}{E} \quad (4)$$

$$\epsilon_v^e = \frac{(1-2\nu)\sigma_1 - 2(1-\nu)\sigma_3}{E} \quad (5)$$

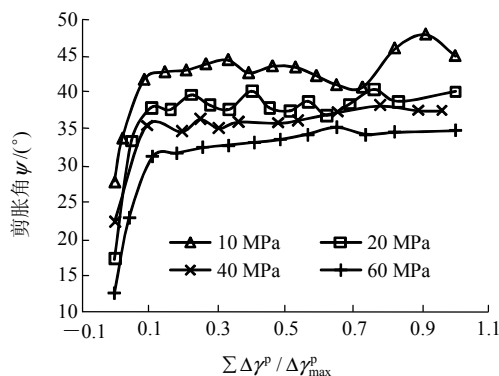
$$\epsilon_1^p = \epsilon_1 - \epsilon_1^e, \quad \epsilon_v^p = \epsilon_v - \epsilon_v^e \quad (6)$$

图 8 给出了不同卸荷速率条件下, 从卸荷开始至极限承载强度时剪胀角  $\psi$  随归一化塑性剪应变增量  $\Sigma\Delta\gamma^p / \Delta\gamma_{\max}^p$  的演化过程。为了与三轴试验进行对比, 图 9 给出了常规三轴压缩试验从体积回转应力至峰值强度过程的剪胀角演化过程。由图 8, 9 可知:

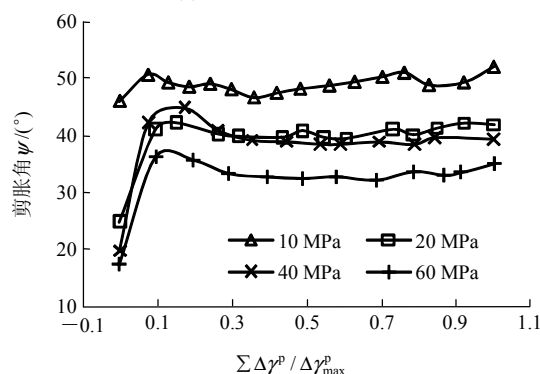
(1) 不同卸围压速率的卸荷过程中, 剪胀角  $\psi$  大小与初始围压水平有关。初始围压应力水平越高剪胀角  $\psi$  的量值越低, 说明初始围压对扩容过程有抑制作用, 如图 8(a)~(e) 所示。



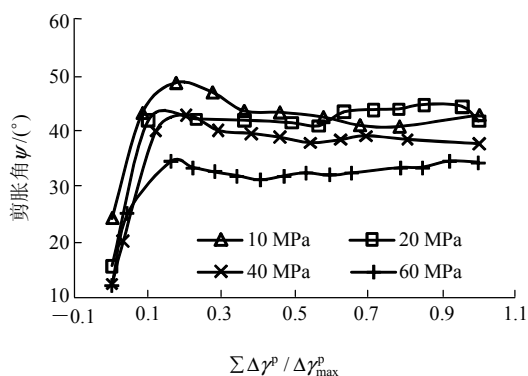
(a) 卸围压速率 0.01 MPa/s



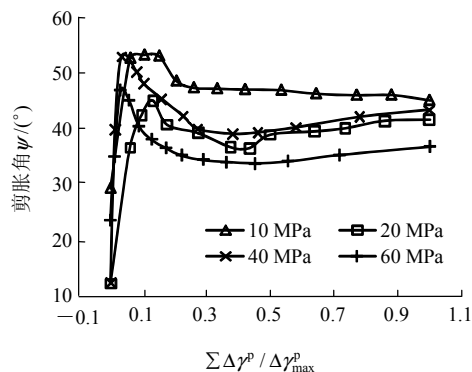
(b) 卸围压速率 0.1 MPa/s



(c) 卸围压速率 0.3 MPa/s



(d) 卸围压速率 0.5 MPa/s



(e) 卸围压速率 1 MPa/s

图 8  $T_{2y^5}$  大理岩卸围压试验卸荷全过程剪胀角演化过程  
Fig.8 Changing processes of dilatancy angle under confining pressure unloading tests of marble  $T_{2y^5}$

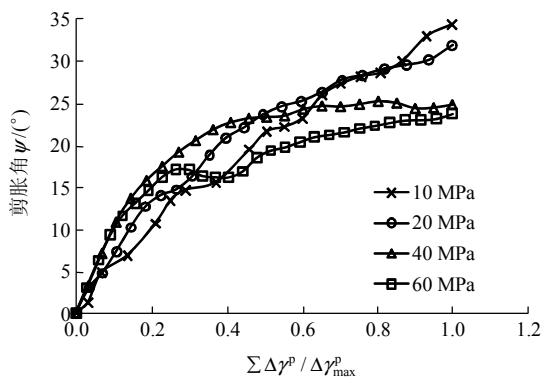


图 9  $T_{2y^5}$  大理岩三轴压缩试验峰前剪胀角演化过程  
Fig.9 Pre-peak changing processes of dilatancy angle under triaxial tests of marble  $T_{2y^5}$

(2) 当以低速率 0.01 MPa/s 卸围压时, 低初始围压水平 10 和 20 MPa 时剪胀角  $\psi$  先缓慢增加到一定水平, 在接近极限承载强度时剪胀角  $\psi$  迅速跌落。而在高初始围压水平 40 和 60 MPa 时, 卸荷开始剪胀角  $\psi$  急剧增加到峰值水平, 过峰值水平后略有下降, 而后近似保持在常剪胀角直至极限承载强度后岩样破坏, 如图 8(a)所示。

(3) 卸围压速率在 0.1~0.5 MPa/s 范围内, 剪胀角  $\psi$  的演化过程基本一致, 在卸荷初期迅速增大到

某一量值, 该量值是初始剪胀角的 1~2 倍, 不同初始围压达到该量值的塑性剪应变大致相同, 而后保持该量值不变直至岩样破坏, 见图 8(b), (d)。

(4) 当卸围压速率大于 1 MPa/s 时, 剪胀角  $\psi$  在卸荷初期迅速增大到某一量值, 该量值可达到初始剪胀角的 5 倍。图 8(e) 曲线峰前斜率则是大于图 8(a)~(d) 中曲线峰前斜率, 说明 1 MPa/s 卸围压初期时剪胀角变化速率非常快, 这是由于卸荷速率较快, 围压的大幅度卸除造成岩样环向限制瞬时被解除, 岩石应变能迅速释放造成内部迅速形成微裂纹萌生、扩展和聚集, 岩石损伤程度迅速增加, 塑性环向变形快速增大, 而此时轴向变形来不及响应卸荷过程, 因而塑性轴向变形变化较小, 造成了剪胀角  $\psi$  的快速增大的过程。随着裂纹的扩展、相互贯通和密度的增加消耗了释放的应变能, 损伤过程变得缓慢, 剪胀角开始缓慢下降, 而后缓慢降低至一定水平并保持不变直至岩样破坏, 如图 8(e) 所示。

(5) 对比三轴压缩试验结果(见图 9), 从体积回转变应力水平到峰值强度过程中剪胀角  $\psi$  为单调增大过程, 围压水平越低增大速率越快, 10 MPa 时剪胀角随塑性剪应变近直线增长, 且随着围压增大, 其增长速率变得缓慢, 表现为非线性缓慢升高。达到峰值强度时, 剪胀角随围压水平提高而降低。

可见, 三轴压缩试验和卸围压试验过程中剪胀角  $\psi$  的变化规律存在明显差异。卸围压过程中 90% 范围都处于高剪胀角状态, 而三轴压缩试验剪胀角  $\psi$  是逐步提高的, 高剪胀角过程在变形后期才表现出来。这也说明卸围压过程较小的塑性损伤就可引起高扩容过程, 而加载试验过程需要更大的塑性损伤来激发高扩容过程, 这是应力路径不同造成变形过程差异的重要原因之一。

## 5 卸围压速率对大理岩极限承载强度特征影响分析

尤明庆等<sup>[8, 21]</sup>认为, 轴向压缩破坏是使轴向应力增大到岩样的承载能力, 而卸围压破坏时使承载能力降低到岩样的轴向应力。由于存在达到岩石最终破坏的路径差异, 因而卸围压试验破坏时的峰值应力已不是传统加载试验中峰值强度的概念, 围压在岩石破坏过程中是不断降低的, 破坏应力更多反映岩石的围压丧失后的极限承载能力, 所以本文改用极限承载强度来表示卸围压破坏时的轴压应力水



平, 以区别于加载试验中峰值强度的概念, 分析卸围压速率对极限承载强度的影响规律。

图 10 给出了不同初始围压条件下卸荷破坏时的极限承载强度, 同时也给出了卸围压速率为 0.5 MPa/s 时三轴压缩试验峰值强度。卸围压过程中保持轴压不变, 因而图 10 中相同初始围压不同围压速率条件下的破坏点位于  $\sigma_1$  等于常数(设计轴压初始应力)的直线上。由图 10 可知, Mohr-Coulomb 强度准则能较好地反映不同卸围压速率下极限承载强度规律。Mohr-Coulomb 强度准则可表示为

$$\sigma_1 = K \sigma_3 + c_0 \tag{7}$$

式中:  $c_0$  为与黏聚力相关的材料强度参数。

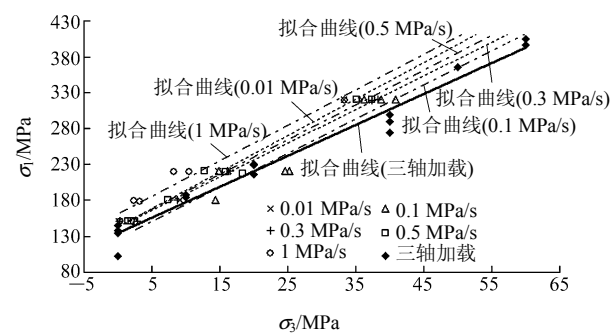


图 10 T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>大理岩不同卸围压速率下极限承载强度差异  
Fig.10 Limited bearing strengths under different unloading-Rates of marble T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>

参数  $c$ ,  $\varphi$  有如下关系:

$$\varphi = 2 \arctan \sqrt{K} - \frac{\pi}{2} \tag{8}$$

$$c = \frac{c_0 \cos \varphi}{2(1 + \sin \varphi)} \tag{9}$$

式中:  $c$  为黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角。

利用 Mohr-Coulomb 强度准则拟合试验数据, 拟合参数和系数见表 3。

表 3 T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>大理岩不同卸围压速率试验破坏时黏聚力与内摩擦角  
Table 3 Cohesions and friction angles under different unloading rates of confining pressures tests of marble T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>

试验类型	$K$	$c_0$	黏聚力 $c$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)	$R^2$
常规三轴	4.301	134.150	32.342	38.516	0.974
卸围压速率 0.01 MPa/s	5.069	143.040	31.767	42.102	0.990
卸围压速率 0.1 MPa/s	4.761	126.690	29.033	40.754	0.917
卸围压速率 0.3 MPa/s	4.677	142.610	32.970	40.370	0.997
卸围压速率 0.5 MPa/s	4.738	144.110	33.103	40.650	0.969
卸围压速率 1 MPa/s	4.932	161.380	36.334	41.516	0.964

由试验结果可得:

(1) 不同卸围压速率试验破坏时获得的极限承载强度均高于卸围压速率为 0.5 MPa/s 时的三轴压缩峰值强度, 不同卸围压速率破坏点强度包线均位于常规三轴压缩峰值强度包线的上方, 说明其在 0.01~1 MPa/s 卸围压速率范围内卸荷路径下岩石峰值承载能力未发生降低, 极限承载能力均有所增加, 如图 10 所示。相对三轴压缩峰值强度, 除 0.01 MPa/s 卸围压速率外, 随着卸围压速率  $v_u$  的增大, 极限承载强度不断提高, 达到 1 MPa/s 速率时极限承载强度提高了 10%~15%。特别地, 当以 0.01 MPa/s 较慢卸荷时, 破坏时的极限承载强度在 0.5 和 1 MPa/s 两速率的结果之间, 这可能是由慢速卸荷时黏聚力和摩擦强度不同演化机制造成的, 下文将给以详细分析。

(2) 笔者认为卸围压速率  $v_u$  对极限承载能力的影响的根源在于其对材料强度弱化和摩擦强度强化程度的改变。在 Coulomb 强度理论假设下, 岩石强度由材料强度  $c_0$  和摩擦强度  $K \sigma_3$  两部分组成, 对于特定尺度和材料的岩样在受力前可认为其材料强度  $c_0$  是确定的, 在不断增大的轴向应力作用下材料强度  $c_0$  随内部损伤的增加逐步劣化, 但不同卸围压速率对岩石材料强度的劣化程度不同。同理, 对摩擦强度的强化程度也不同。由表 3 和图 11 可知, 卸围压速率在 0.1~1 MPa/s 范围内, 黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  随卸围压速率的增大而增大, 但内摩擦角  $\varphi$  增大幅度相对平缓, 说明随卸荷速率的提高黏聚力强度劣化程度是减弱的和摩擦强度强化的程度是提高的。卸围压试验的黏聚力强度相比卸围压速率为 0.5 MPa/s 的三轴压缩试验黏聚力强度有高有低, 但各卸荷速率下摩擦强度卸围压试验均高于三轴压缩试验的结果, 内摩擦角提高了 4%~10%。这说明卸围

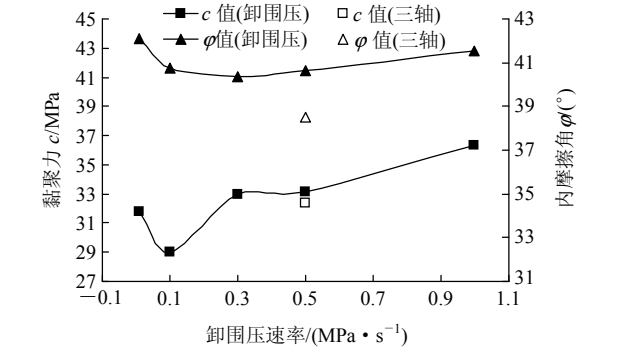


图 11 T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>大理岩不同卸围压速率下极限承载点的黏聚力和内摩擦角  
Fig.11 Cohesiones and friction angles under different unloading rates of confining pressures tests of marble T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>

压应力路径更易调动岩石内部的剪切滑移机制,卸荷过程能促进应变局部化而形成宏观剪切面,这是试验岩样均形成宏观剪切面而破坏的原因所在。此外,0.01和0.1 MPa/s时相对低速率卸荷时黏聚力强度略低于三轴压缩试验的结果,这可能与岩石内部应力调整相对均匀,萌生更多微裂纹,裂纹相互作用更充分,造成岩石内部整体损伤程度较高有关,图6中低卸围压速率条件下剪切带附近更多的轴向劈裂纹给予了印证。总之,在变形破坏的峰前阶段,卸围压路径摩擦强度的调动程度要高于加载路径,黏聚力弱化程度随卸荷速率提高而减弱,两者共同作用下提高了极限承载强度。

(3) 考虑卸围压速率 $v_u$ 对内摩擦角的影响程度可知,如图11所示,0.01~1 MPa/s范围内卸围压速率对内摩擦角的影响相对较小,但过高和过低卸围压速率均能提高内摩擦角量值。两者并不矛盾,原因可能在于两者调动摩擦机制不同。低卸围压速率时,摩擦机制的调动建立在充分微裂化而损伤的内部结构基础上,岩样内依照其材料强度的高低逐步屈服,是大量微裂纹或宏观劈裂纹间摩擦的宏观效应。而高卸荷速率时,造成应变局部化过程加快,摩擦效应集中在应变局部化区域,由剪切带内动摩擦阻力和凹凸面间的镶嵌作用所产生的摩擦阻力来控制。

## 6 结 论

本文在前人工作基础上提出了新的试验路径和加载方式的三轴卸围压试验,对锦屏二级深埋引水隧洞T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>大理岩进行了0.01~1 MPa/s范围内5级卸围压速率试验,研究了卸围压速率对深埋大理岩变形规律和强度特征的影响,主要得到如下结论:

(1) 在0.01~1 MPa/s卸围压速率范围内,锦屏二级深埋大理岩卸荷变形过程基本一致,卸围压开始后轴向变形相对缓慢,而环向变形迅速增大。各初始围压下卸荷达到极限承载强度后均出现明显应力跌落,具有脆性破坏特征,但低初始围压时峰后曲线刚度要小于0.5 MPa/s加载速率下三轴压缩试验低围压曲线的刚度,即卸围压破坏后应力释放过程中伴随强烈变形。在0.01~1 MPa/s卸围压速率范围内,岩样最终破坏仍是以宏观剪切面的形成而结束,但低初始围压卸荷时,轴向伴有劈裂裂纹。

(2) 提出了一个新的评价卸围压速率对变形规律影响的描述变量(应变围压柔量),用其分析轴向、

环向和体积应变围压柔量与卸围压速率的关系可知:① 变形过程明显受卸围压速率的影响,影响规律由初始围压水平强烈控制。② 卸围压速率在0.01~1 MPa/s范围内,随着初始围压由高向低变化,卸围压速率对轴向、环向和体积应变的影响规律存在渐变和倒转的过程。③ 对比高初始围压结果,低初始围压时1 MPa/s的高卸荷速率下环向应变围压柔量 $\Delta\epsilon_\theta$ 提高了1~2倍,而体积应变围压柔量 $\Delta\epsilon_v$ 提高了近3倍。④ 卸围压过程中,不同卸围压速率对轴向变形的影响程度要小于对环向和体积变形的影响程度,即环向和体积变形在卸荷过程中相对更敏感。

(3) 分析不同卸围压速率对深埋大理岩的扩容演化过程的影响规律可知:① 剪胀角 $\psi$ 大小与初始围压水平有关,初始围压应力水平越高剪胀角 $\psi$ 的量值越低,即初始围压对扩容过程有抑制作用。② 卸围压速率0.01 MPa/s且低初始围压10和20 MPa时剪胀角 $\psi$ 先缓慢增加到一定水平,在接近极限承载强度时剪胀角 $\psi$ 迅速跌落。而在高初始围压40和60 MPa时,卸荷开始剪胀角 $\psi$ 急剧增加至某一峰值水平,过该峰值后略有下降,而后近似保持在常剪胀角直至极限承载强度。卸围压速率0.1~0.5 MPa/s范围内,剪胀角 $\psi$ 的演化过程基本一致,在卸荷初期迅速增大到某一量值,该量值是初始剪胀角的1~2倍左右。高速率1 MPa/s卸围压时,剪胀角 $\psi$ 在卸荷初期迅速增大到某一量值,该量值可达到初始剪胀角的5倍。③ 三轴压缩试验峰前阶段剪胀角变化规律与卸围岩试验的结果存在明显差异。

(4) 分析不同卸围压速率对深埋大理岩的极限承载强度的影响规律可知:① 不同卸围压速率破坏时获得的极限承载强度均高于加载速率为0.5 MPa/s时三轴压缩的峰值强度。随着卸围压速率 $v_u$ 的增大,极限承载强度不断提高,达到1 MPa/s速率时极限承载强度提高了10%~15%。② 卸围压速率 $v_u$ 对极限承载能力的影响的根源在于其对材料强度弱化和摩擦强度强化程度的改变。在变形破坏的峰前阶段,卸围压路径摩擦强度的调动程度要高于加载路径,黏聚力弱化程度随卸荷速率提高而减弱,两者共同作用下提高了极限承载强度。③ 0.01~1 MPa/s的卸围压速率对摩擦角影响相对较小,但过高和过低卸围压速率均能提高内摩擦角量值。

以上结论仅出于锦屏二级水电站深埋T<sub>2</sub>Y<sup>5</sup>大理

岩, 其他类型岩石是否也存在上述规律有待进一步研究。

## 参考文献(References):

- [1] 哈秋龄, 李建林, 张永兴, 等. 节理岩体卸荷非线性岩体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.(HA Qiuling, LI Jianlin, ZHANG Yongxing, et al. Nonlinear mechanics of jointed rock during unloading[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.(in Chinese))
- [2] 李建林. 卸荷岩体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(LI Jianlin. Unloading rock mass mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))
- [3] 黄润秋, 黄 达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21 - 33.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on affection laws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 21 - 33.(in Chinese))
- [4] 吴 刚, 孙 钧. 卸荷应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 615 - 621.(WU Gang, SUN Jun. Deformation and strength characters of jointed rock mass under unloading stress states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 615 - 621.(in Chinese))
- [5] 张 凯, 周 辉, 潘鹏志, 等. 不同卸荷速率下岩石强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010(待刊).(ZHANG Kai, ZHOU Hui, PAN Pengzhi, et al. Characteristics of strength of rocks under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(to be published). (in Chinese))
- [6] HUDSON J A, BROWN E T, FAIRHURST C. Shape of the complete stress-strain curve for rock[C]// Proceedings of the 13th U.S. Symposium on Rock Mechanics. Urbana: [s.n.], 1972: 773 - 795.
- [7] MARTIN C D. The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground opening[Ph. D. Thesis][D]. Winnipeg, Canada: University of Manitoba, 1993.
- [8] 尤明庆. 岩石的力学性质[M]. 北京: 地质出版社, 2007.(YOU Mingqing. Mechanical properties of rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.(in Chinese))
- [9] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321 - 327.(LI Tianbin, WANG Lansheng. An experimental study on deformation and failure features of a basalt under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(4): 321 - 327.(in Chinese))
- [10] 高春玉, 徐 进, 何 鹏, 等. 大理岩加卸载力学特性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 456 - 460.(GAO Chunyu, XU Jin, HE Peng, et al. Study of mechanical properties of marble under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 456 - 460.(in Chinese))
- [11] 李宏哲, 夏才初, 闫子舰, 等. 锦屏水电站大理岩在高应力条件下的卸荷力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2 104 - 2 109.(LI Hongzhe, XIA Caichu, YAN Zijian, et al. Study of marble unloading mechanical properties of Jinping Hydropower Station under high geostress conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 104 - 2 109.(in Chinese))
- [12] 汪 斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 138 - 2 145.(WANG Bin, ZHU Jiebing, WU Aiqing, et al. Experimental study of mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 138 - 2 145.(in Chinese))
- [13] 黄润秋, 黄 达. 卸荷条件下花岗岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 205 - 2 213.(HUANG Runqiu, HUANG Da. Experimental research on mechanical properties of granites under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 205 - 2 213.(in Chinese))
- [14] JAEGER J C, COOK N G W. Fundamentals of rock mechanics[M]. Norwich: Science Paperbacks, 1976.
- [15] BRACE W F, PAULDING B W, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rock[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(16): 3 939 - 3 953.
- [16] VERMEER P A, DE BORST R. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock[M]. Heron: Delft University of Technology, 1984.
- [17] DETOURNAY E. Elastoplastic model of a deep tunnel for a rock with variable dilatancy[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1986, 19(2): 99 - 108.
- [18] ALEJANO L R, ALONSO E. Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(5): 481 - 507.
- [19] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(4): 679 - 686.
- [20] ZHAO X G, CAI M. A mobilized dilation angle model for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 368 - 384.
- [21] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24 - 29.(YOU Mingqing, HUA Anzeng. Triaxial confining pressure unloading of test rock sample[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(1): 24 - 29.(in Chinese))