

文章编号: 1000-7598(2009)09-2588-07

脆性岩石卸围压强度特性试验研究

刘豆豆^{1, 2}, 陈卫忠^{2, 3}, 杨建平³, 谭贤君³, 周喜德⁴

(1. 山东财政学院 工商管理学院, 济南 250014; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061;
3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 4. 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610021)

摘要: 岩样的承载能力由材料强度和围压共同确定, 轴向压缩和卸围压二者都能导致岩样破坏, 但由于应力路径不同, 两种条件导致岩样的破坏过程并不相同。对取自位于雅砻江上的锦屏二级水电站辅助洞内的白山组大理岩进行了常规三轴试验和峰前、峰后卸围压试验, 通过对试验曲线和岩样破坏特征的分析表明: 无论是峰前还是峰后卸围压, 岩样都表现出脆性破坏的特征, 而岩样破坏表现出的脆性峰前卸围压比峰后卸围压更为强烈; 岩样在加、卸载条件下的变形均随主应力差的增大而增大, 但在相同的主应力差下, 卸载产生的扩容量比加载的扩容量更大; 峰前卸围压试验当围压卸到初始围压值的 60 % 左右时, 岩样发生破坏; 峰后卸围压试验当围压卸到初始围压值的 80 % 左右时, 岩样发生破坏。结论对相关工程稳定性分析、设计和施工具有一定的指导意义和参考价值。

关键词: 峰前卸围压; 峰后卸围压; 卸载
中图分类号: TU 457 **文献标识码:** A

Experimental research on strength characteristic of brittle rock unloading confining pressure

LIU Dou-dou^{1, 2}, CHEN Wei-zhong^{2, 3}, YANG Jian-ping³, TAN Xian-jun³, ZHOU Xi-de⁴

(1. Institute of Business Administration, Shandong University of Finance, Ji'nan 250014, China; 2. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
4. Ertan Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610021, China)

Abstract: The bearing capacity of rock sample is determined by material strength and confining pressure together. Both axial compression and unloading confining pressure can induce the failure of rock sample, but because of different stress paths, the failure processes under two conditions are different. The tests of conventional triaxial, pre-peak unloading confining pressure and post-peak unloading confining pressure are done to the Baishan marble which comes from access tunnel in Jinping Hydropower Station lying on Yalong River. The test curve and the rock sample failure characteristics indicate that rock samples are all showing brittle failure in pre-peak and post-peak unloading confining pressure tests; and the brittle characteristics in pre-peak test is more stronger than that in post-peak test. The deformations of rock sample in loading and unloading are increasing with the increase of principal stress difference; but dilatancy in unloading is bigger than that in loading under the same principal stress difference. Rock sample fails as confining pressure unloaded to about 60 % of initial confining pressure in pre-peak unloading confining pressure test; and as confining pressure unloaded to about 80 % of initial confining pressure in post-peak unloading confining pressure test, it fails. The conclusion can be for reference in internal correlative engineering stability analysis, design and construction.

Key words: pre-peak unloading confining pressure; post-peak unloading confining pressure; unloading

1 前言

目前国内外对岩体加载力学状态的研究较多, 并且对岩体高陡边坡、地下洞室开挖等卸载力学状

态的研究也大多采用常规的加载方法。然而, 岩体卸载和加载条件是两种完全不同的应力路径, 岩体表现出的力学特性亦有着本质区别。随着岩石力学研究的深入, 人们越来越重视研究岩体在实际状态

收稿日期: 2008-04-24

基金项目: 国家自然科学基金与雅砻江联合基金(5057987)和国家自然科学基金重大研究计划(90510019)项目资助。

第一作者简介: 刘豆豆, 女, 1977年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的研究与教学工作。E-mail: lddq@sina.com

下的变形与破坏,岩石卸载条件下变形破坏的试验研究已取得较大进展。文献[1]分析了煤岩轴向应力恒定条件下卸围压破坏时的力学参数,运用卸载破坏围压差的概念,反应不同初始卸载围压煤岩破坏的难易程度;文献[2-3]对粉砂岩试样进行了常规三轴加载后保持轴向变形不变的峰前、峰后卸围压试验,得到了峰前、峰后卸围压全过程曲线,并对岩样破坏特征、强度和变形特性进行了分析;文献[4]采用CT实时试验的手段对连续加载试验条件下和卸围压应力作用下砂岩破坏细观机制进行了对比研究;文献[5]在岩石试件卸荷试验的基础上,结合大型开挖工程,研究了岩体在卸荷状态下的变形破裂特征;文献[6]通过大理岩、花岗岩、砂岩等常规三轴加载与固定轴向位移的三轴卸围压试验,对常规三轴与三轴卸围压条件下的变形模量及强度参数进行了对比分析;文献[7-9]利用CT专用岩石三轴试验加载设备,完成了考虑孔洞损伤的砂岩试样及单一裂隙花岗岩在卸围压应力作用下的损伤扩展规律CT分析试验,得到非常清晰的卸围压破坏全过程中裂纹发展、贯通到破坏等各个阶段的CT图象;文献[10]对大理岩进行了三轴卸围压试验,分析了岩石强度与试样弱化破坏间的关系,以塑性变形量和本征强度统一研究了三轴压缩和卸围压两种力学过程。

本文以锦屏二级水电站引水隧洞长期稳定性为研究背景,对水电站辅助洞内的大理岩进行了不同围压下的峰前和峰后卸围压试验,研究了大理岩卸围压破坏的强度特性。研究成果可以作为工程设计、施工单位参考。

2 试验描述

2.1 试验仪器和试样制备

试验在中国科学院武汉岩土力学研究所的MTS电液伺服控制刚性试验机上进行。

试验所用试样取自位于雅砻江上的锦屏二级水电站辅助洞内的白山组大理岩(T_{2b}),白山组大理岩主要分布于工程区中部,形成锦屏山系的主体山脉,该层岩相稳定,结构致密、质纯,全层厚750~2270 m。按照国际岩石力学学会对岩样的要求,为了减少试验结果的离散性,尽量采用从一个大的岩块上采取密集套钻的方法来获取岩样,并加工成直径约50 mm,高度约100 mm的圆柱体试件。

2.2 试验方案

实际工程中,通常基于三轴试验分析岩石的变

形及强度,为了得到试样的峰值强度,为卸围压试验的方案设计提供依据,分别进行了不同围压下(10、20、40 MPa)的常规三轴试验,应力路径如图1(a)A型。

(1)峰前卸围压试验:先以0.05 MPa/s的速率手动加围压至预定值(10、20、30、40 MPa),再以0.05 kN/s的速率(载荷控制)加轴压至峰值强度前某值(接近峰值强度),保持轴压不变,然后慢慢卸掉围压(手动控制,速率也在0.05 MPa/s左右)直至试件破坏。

(2)峰后卸围压试验:先以0.05 MPa/s的速率手动施加围压至预定值(10、20、30、40 MPa),再以0.05 kN/s的速率(载荷控制)加轴压至峰值强度后(接近峰值强度),保持轴压不变,然后慢慢卸掉围压(手动控制,速率也在0.05 MPa/s左右)直至试件破坏。

峰后卸围压试验的应力路径为图1(b)B型。

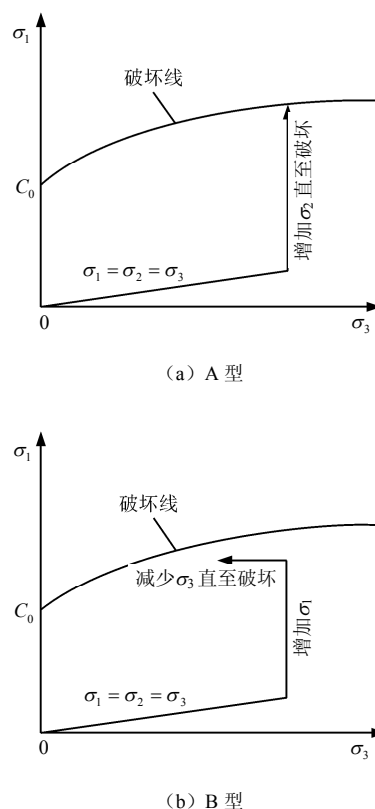


图1 两种应力路径的试验条件
Fig.1 Test conditions of two stress paths

3 试验结果与分析

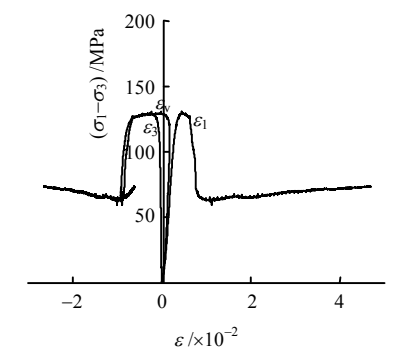
3.1 应力-应变关系

图2为岩样在10、20、40 MPa围压下常规三

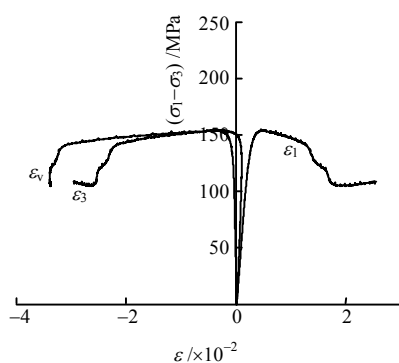
轴试验典型应力-应变关系曲线, 由图可以看出: 随着围压的增加, 试样的屈服应力、峰值强度和残余强度均明显增大, 说明试样的峰值强度和残余强度对围压很敏感; 随着围压的增加, 峰值应力所对应的应变值也随之增大, 其变形特性表现出低围压下的脆性向高围压下的塑性转换, 即峰后变形特征从应变软化逐渐转化为理想塑性。当轴向应力达到峰值强度的 80 % 左右时, 体积应变开始由逐渐增大的趋势转变为逐渐减小的趋势, 即岩样达到压缩的极

限; 当轴向应力达到峰值强度的 96 % 左右时, 体积应变开始由正值转变为负值, 即岩样由压缩转变为膨胀, 也就是岩样出现了扩容现象。

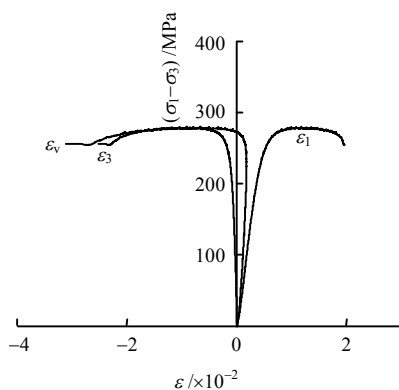
图 3 为岩样在 10、20、30 和 40 MPa 围压下峰



(a) 围压 10 MPa

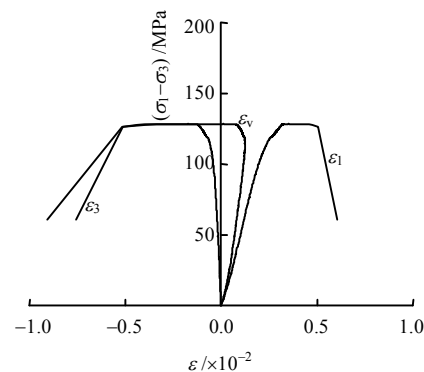


(b) 围压 20 MPa

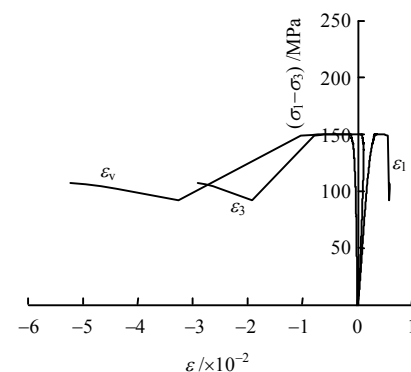


(c) 围压 40 MPa

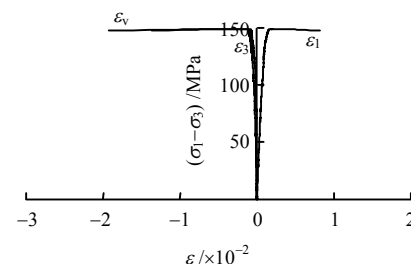
图 2 常规三轴试验应力-应变关系曲线
Fig.2 Stress-strain curves of conventional triaxial compression test



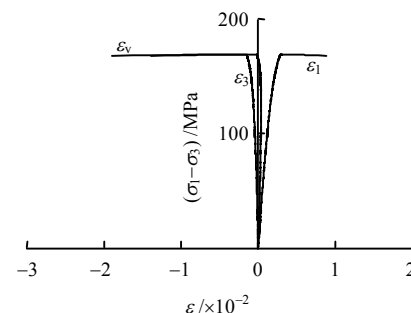
(a) 围压 10 MPa



(b) 围压 20 MPa



(c) 围压 30 MPa



(d) 围压 40 MPa

图 3 峰前卸围压试样应力-应变关系曲线
Fig.3 Stress-strain curves of pre-peak unloading confining pressure

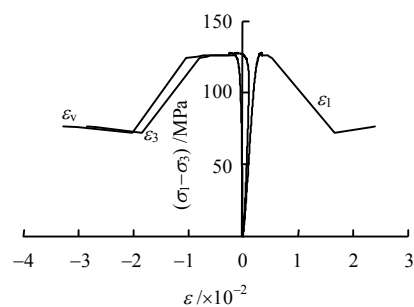
前和峰后卸围压试验典型应力-应变关系曲线,由图可以看出:试样峰前从卸围压一开始侧向应变就急剧增大,其增长速率约为轴向应变增长速率的2倍,明显大于轴向应变增长速率,即表现为明显的侧向扩容;体积应变很快由正转变为负,说明岩样由压缩转为扩容;卸围压开始阶段,轴向应变增长速度较慢,当围压卸到一定值时,轴向应变迅速增大,主应力差也随之急剧降低,说明岩石进入破坏阶段。

由轴向应力-应变关系曲线可以看出:由于峰前卸围压试验是在轴向压力达到峰值强度之前就卸掉围压,所以其轴向变形并没有进入塑性变形阶段,应力-应变关系可以非常近似为理想弹塑性模型,30 MPa和40 MPa围压下的试验曲线表现得尤为明显。

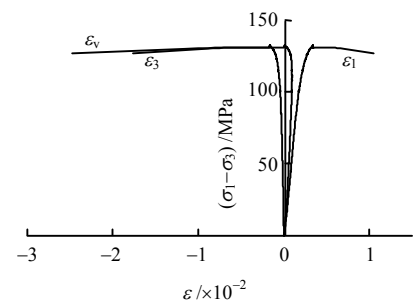
图4为岩样在10、20、30、40 MPa围压下由峰后卸围压试验典型应力-应变关系曲线,可以看出:围压越大,在保持 $\sigma_1 - \sigma_3$ 不变的情况下,卸围压后轴向应变曲线越接近于水平,说明围压越大,岩石卸围压后脆性越不明显。卸围压之前,试样就已出现侧向扩容,卸围压使得岩样侧向膨胀加速,产生显著的体积膨胀效应。说明试样内部已出现较明显的破裂面,使内部能量得以初步释放。这也是围压越大,岩石峰后卸围压脆性越不明显的原因。10 MPa和20 MPa围压下的轴向应力-应变曲线在卸围压的时应力有一段明显的降低,随后进入塑性流动阶段;30 MPa和40 MPa围压下的轴向应力-应变曲线没有明显的应力降,直接进入塑性流动阶段。但由于峰后卸围压试验是在轴向应力达到峰值强度后才卸掉围压,所以在卸围压之前,轴向变形已发生塑性变形,其应力-应变曲线亦不如峰前卸围压试验那样非常近似于理想弹塑性模型,随着围压的增大,这种现象愈加明显。

3.2 试件破坏时最大主应力与最小主应力关系

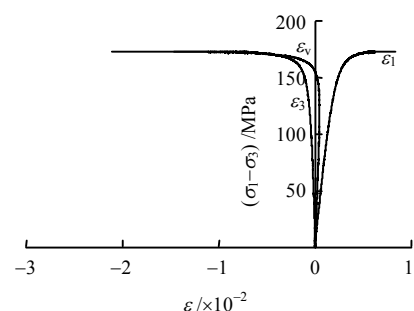
由表1峰前卸围压试验岩样破坏时最大主应力与最小主应力值可以看出:当围压卸到约为起始围压的51.12%~72.45%之间(平均值为62.74%)时,轴向应力急剧下降,说明岩样突然失去承载能力,且破坏几乎是瞬时发生的;岩样破坏时还产生清脆的破裂响声。这些特征说明岩样峰前卸围压破坏是较为强烈的脆性破坏。



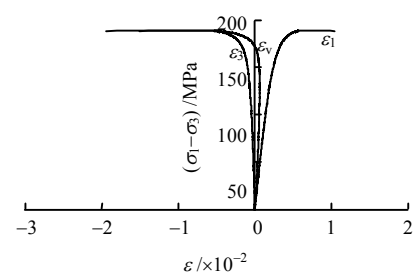
(a) 围压 10 MPa



(b) 围压 20 MPa



(c) 围压 30 MPa



(d) 围压 40 MPa

图4 峰后卸围压应力-应变关系曲线

Fig.4 Stress-strain curves of post-peak unloading confining pressure

由表2峰后卸围压试验岩样破坏时最大主应力与最小主应力值可以看出:当围压卸到约为起始围压的73.55%~89.71%之间(平均值为82.91%)时,轴向应力开始下降,但与峰前卸围压相比,轴向应力开始时缓慢下降,经过一段时间的调整,然后出现大幅下降趋势,说明岩石脆性破坏与峰前卸围压

相比不明显,从此现象也可以看出卸围压之前试样内部已出现较明显的破裂面,使内部能量得以初步释放。

表 1 峰前卸围压试验岩样破坏时最大和最小主应力值
Table 1 The maximum principal stress and the minimum principal stress of pre-peak unloading confining pressure test when sample fails

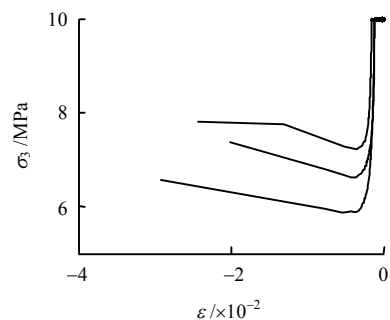
围压 σ_0 /MPa	峰前卸围压试验		
	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	$(\sigma_3/\sigma_0)/(\%)$
10	7.245	137.103	72.45
	6.672	136.223	66.72
	5.878	135.331	58.78
20	13.105	163.103	65.53
	10.224	150.163	51.12
	18.568	167.474	61.89
30	16.358	164.491	54.53
	15.895	160.000	52.98
	26.949	196.087	67.37
40	27.040	196.620	67.37
	26.601	195.688	66.50

3.3 围压与环向应变关系

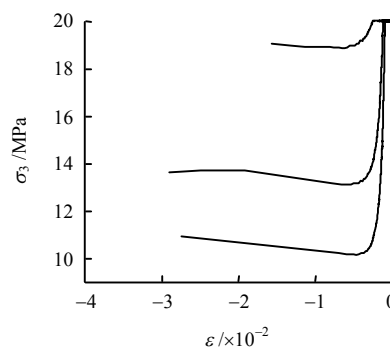
由图 5 峰前卸围压试验的围压-环向应变全过程曲线可以看出:在卸围压的初始阶段,岩样的环向变形增加缓慢,且环向变形和围压基本上呈线性关系,表明此时岩样的环向变形是弹性变形,还未出现不可恢复的塑性变形。随着围压的继续降低,环向变形急剧增加,且和围压不再呈线性关系,岩样出现不可恢复的环向塑性变形,试件内部的裂纹开始扩展、连通,最终形成一个贯通的裂纹而破坏。

表 2 峰后卸围压试验岩样破坏时最大与最小主应力值
Table 2 The maximum principal stress and the minimum principal stress of post-peak unloading confining pressure test when sample fails

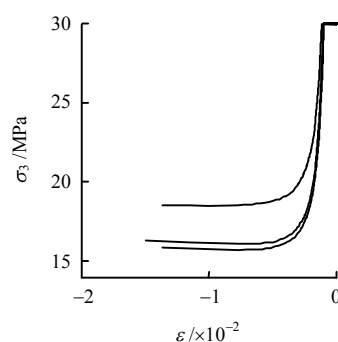
围压 σ_0 /MPa	峰后卸围压试验		
	σ_3 /MPa	σ_1 /MPa	$(\sigma_3/\sigma_0)/(\%)$
10	8.234	139.150	82.34
	8.503	136.209	85.03
	8.497	137.245	84.97
20	15.693	148.043	78.47
	16.169	154.125	80.85
	14.710	160.138	73.55
30	25.642	196.278	85.47
	27.205	204.218	90.68
	26.985	200.001	89.95
	26.595	197.897	88.65
	33.59	228.703	83.98
40	34.45	221.208	86.13
	34.78	223.334	86.95



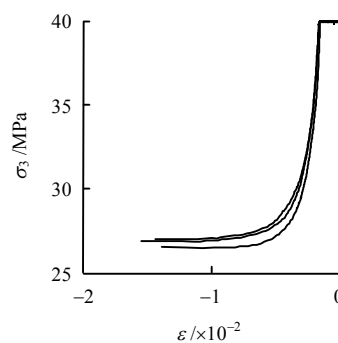
(a) 围压 10 MPa



(b) 围压 20 MPa



(c) 围压 30 MPa



(d) 围压 40 MPa

图 5 峰前卸围压试验围压与环向应变关系曲线
Fig.5 Confining pressure-circumferential strain curves of pre-peak unloading confining pressure

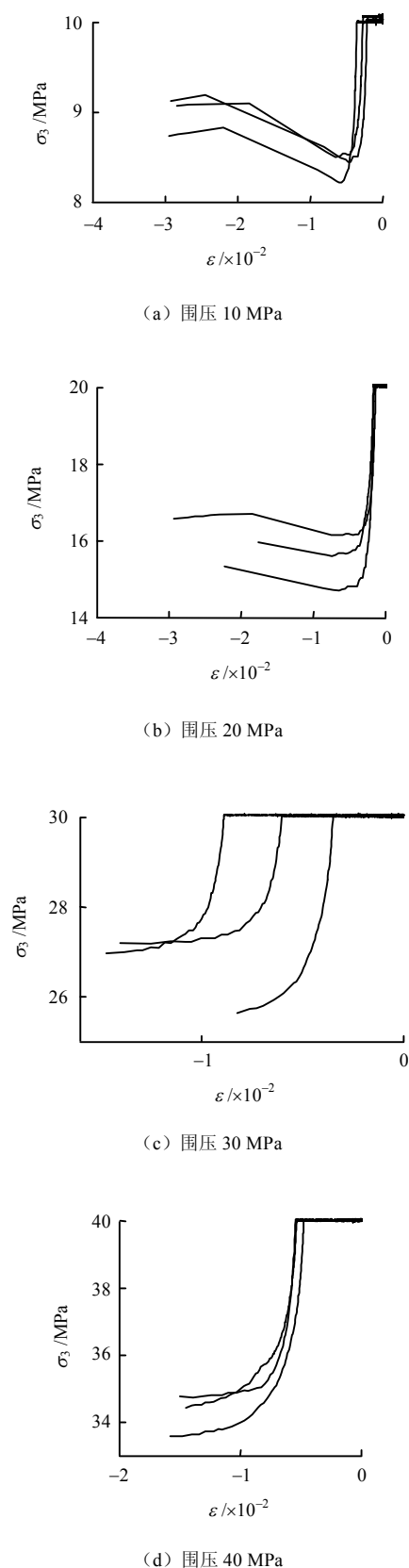


图6 峰后卸围压试验围压与环向应变关系曲线

Fig.6 Confining pressure-circumferential strain curves of post-peak unloading confining pressure

由峰后卸围压试验的围压-环向应变全过程曲

线可以看出:在卸围压的初始阶段,岩样的环向变形和围压就已经不是线性关系,这说明此时岩样的环向变形已经出现不可恢复的塑性变形。

3.4 加、卸载破坏的对比分析

轴向压缩破坏是增加轴向应力达到岩样的承载能力,卸围压破坏是卸除围压使岩样的承载能力降低到岩样的轴向应力。二者都能导致岩样破坏,但由于应力路径不同,加载和卸载两种条件导致岩样的破坏过程并不相同。

(1) 无论是加载还是卸载,围压对岩样的轴向承载力都有较大影响,即岩样的强度对围压很敏感,但围压对轴向承载力的影响峰前卸围压比峰后卸围压更为敏感。

(2) 加载时,随着围压的增加,岩样的屈服应力也随之提高,塑性变形逐渐增大,其变形特性表现出低围压下的脆性向高围压下的塑性转换,而卸载时,无论是峰前还是峰后卸围压,岩样都表现出脆性破坏的特征。

(3) 岩石在加、卸载条件下的变形均随主应力差的增大而增大,但在相同的主应力差下,卸载产生的扩容量比加载的扩容量更大。

(4) 与常规三轴试验相比,卸围压更容易导致岩石发生破裂,其破坏程度也更为强烈,岩样破坏表现出的脆性峰前卸围压比峰后卸围压更为强烈。

(5) 岩样加载破坏是吸收试验机的能量,而卸围压破坏无论是峰前还是峰后卸围压,试件都是通过自身释放能量实现的,并且卸载破坏岩样释放的能力小于加载破坏岩样储存的能量。

(6) 无论是峰前还是峰后卸围压,破坏时试样的侧向应变约为轴向应变的2倍,而常规三轴试验试样破坏时侧向应变与轴向应变大致相等。

(7) 峰前卸围压试验当围压卸到初始围压值的60%左右时,岩样发生破坏;峰后卸围压试验当围压卸到初始围压值的80%左右时,岩样就发生破坏。岩样破坏时的最大主应力峰后卸围压试验比常规三轴试验略低,而峰前卸围压试验由于本来轴向压力就未加到峰值强度,其最大主应力就比常规三轴试验低得较多。

4 结 论

(1) 无论是峰前还是峰后卸围压,岩样都表现出脆性破坏的特征,而岩样破坏表现出的脆性峰前

卸围压比峰后卸围压又更为强烈。

(2) 岩样在加、卸载条件下的变形均随主应力差的增大而增大,但在相同的主应力差下,卸载产生的扩容量比加载的扩容量更大;峰前卸围压试验当围压卸到初始围压值的 60 % 左右时,岩样发生破坏。

(3) 峰后卸围压试验当围压卸到初始围压值的 80 % 左右时,岩样发生破坏。

参 考 文 献

- [1] 李永明,郝临山,魏胜利,等. 煤岩加卸载不同应力途径变形破坏力学参数的研究[J]. 煤炭技术, 2006, 25(12): 129—131.
- [2] 张黎明,王在泉,宋全锋,等. 粉砂岩卸荷破坏全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (增), A01: 5043—5047.
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, SONG Quan-feng, et al. Experimental study on the total failure course of siltsand under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, (Supp.), A01: 5043—5047.
- [3] 张黎明,王在泉,贺俊征,等. 卸荷条件下岩爆机理的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (增), A01: 4769—4773.
ZHANG Li-ming, WANG Zai-quan, HE Jun-zheng, et al. Study on the experiment of rock burst under unloading condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, (Supp.), A01: 4769—4773.
- [4] 代革联,李新虎. 岩石加卸荷破坏细观机理 CT 实时分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 104—108.
DAI Ge-lian, LI Xin-hu. CT real time testing of meso-failure mechanisms of rock under loading and unloading conditons[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2004, 12(1): 104—108.
- [5] 沈军辉,王兰生,王青海,等. 卸荷岩体的变形破裂特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2028—2031.
SHEN Jun-hui, WANG Lang-sheng, WANG Qing-hai, et al. Deformation and fracture features of unloading rock mass [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(12): 2028—2031.
- [6] 王在泉,华安增,王谦源. 加、卸荷条件下岩石变形及三轴强度研究[J]. 河海大学学报, 2001, 29(12): 10—12.
WANG Zai-quan, HUA An-zeng, WANG Qian-yuan. Rock deformation and triaxial strength under loading and unloading conditions[J]. **Journal of Hohai University**, 2001, 29(12): 10—12.
- [7] 任建喜,葛修润,蒲毅彬,等. 岩石卸荷损伤演化机理 CT 实时分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 697—701.
REN Jian-xi, GE Xiu-run, PU Yi-bin, et al. Primary study of real-time CT testing of unloading damage evolution law of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(6): 697—701.
- [8] 任建喜,罗英,刘文刚,等. CT 检测技术在岩石加卸载破坏机理研究中的应用[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 672—675.
REN Jian-xi, LUO Ying, LIU Wen-gang, et al. Application of computerized topography testing technology on studying rock failure mechanism under loading and unloading[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2002, 24(5): 672—675.
- [9] 任建喜,杨更社,葛修润. 裂隙花岗岩卸围压作用下损伤破坏机理 CT 检测[J]. 长安大学学报, 2002, 22(6): 46—49.
REN Jian-xi, YANG Geng-she, GE Xiu-run. Real-time CT test of meso-damage evolution law of jointed granite on unloading confining pressure[J]. **Journal of Chang'an University**, 2002, 22(6): 46—49.
- [10] 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 Ming-qing, HUA An-zeng. Triaxial confining depressure test rock sample[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(1): 24—29.