

DOI: 10.11779/CJGE201711004

# 卸荷速率和孔隙水压力对砂岩卸荷特性影响研究

邓华锋, 王 哲, 李建林, 姜 桥, 张恒宾

(三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为了研究卸荷速率和孔隙水压力对砂岩卸荷力学特性的影响,设计进行了不同卸荷速率(0.005, 0.02, 0.05, 0.1 MPa/s)和不同孔隙水压力(0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 MPa)下的三轴卸荷试验。研究结果表明:①在加载阶段,随着孔隙水压力的增大,岩样的应力-应变曲线斜率逐渐降低;②在围压卸载阶段,卸荷速率越大,卸载阶段的应变围压柔量越小,岩样破坏时的围压越小,岩样强度相对较高,但破碎程度更严重,而且,在相同的卸荷速率情况下,孔隙水压力越大,岩样侧向扩容现象越明显,岩样越容易破坏;③在围压卸载阶段,岩样的变形模量出现了先缓后陡的劣化趋势,而且,卸荷速率越小、孔隙水压力越大,变形模量劣化幅度越大;④卸载过程中,卸荷速率越大,岩样脆性破坏特征越明显;孔隙水压力越大,岩样破坏时的近轴向的张性裂纹越多和追踪次生裂纹越多,孔隙水压力在岩样内部裂纹、裂隙尖端的应力集中是导致岩石变形破坏的主要原因。

**关键词:** 卸荷速率; 孔隙水压力; 变形模量; 力学特性; 破坏特征

中图分类号: TU456 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)11-1976-08

作者简介: 邓华锋(1979-),男,博士,教授,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn。

## Effect of unloading rate and pore water pressure on mechanical properties of sandstone

DENG Hua-feng, WANG Zhe, LI Jian-lin, JIANG Qiao, ZHANG Heng-bin

(Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education,

Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to study the effect of discharge load rate and pore water pressure on the mechanical properties of sandstone, the triaxial unloading tests with different unloading rates (0.005, 0.02, 0.05 and 0.1 MPa/s) and different osmotic pressures (0, 0.3, 0.6, 0.9 and 1.2 MPa) are designed and performed. The results show that: (1) At the loading stage, with the increase of the pore water pressure, the gradient of stress-strain curve of rock decreases gradually; (2) At the stage of unloading, with the increase of the unloading rate, the soft number of confining pressure is smaller, the confining pressure of rock failure is smaller, the rock strength is relatively high, but the degree of fragmentation is more serious. Moreover, under the same unloading rate, the higher the pore water pressure is, the more obvious the rock lateral expansion phenomenon is, and the rock is much easier to fail; (3) At the stage of unloading, the deformation modulus of rock shows a slow and steep trend, and the smaller the unloading rate is, the higher the pore water pressure is, the larger the deformation modulus deterioration amplitude is; (4) During the process of unloading, with the increase of the unloading rate, the features of rock brittle failure are more obvious. With the increase of pore water pressure, the number of axial tensile cracks and tracking secondary cracks near failure is larger. The stress concentration caused by the pore water pressure in specimen cracks or crack tips is the main reason that leads to the deformation failure. The related research results can provide good references for the analysis of the discharging mechanical properties of the hydrous rock mass.

**Key words:** unloading rate; pore water pressure; deformation modulus; mechanical property; failure characteristic

## 0 引言

20世纪90年代,针对工程岩体中出现的较多常规岩石力学理论无法较好解释的工程问题,如金川边坡、链子崖边坡的大变形等,哈秋玲等<sup>[1]</sup>以三峡永久船闸高边坡为研究对象,创新性地提出了卸荷岩体力

学的概念,在至今30余年的研究过程中,岩体卸荷力学特性越来越被人们所重视,并针对一些重要的工程

基金项目:国家自然科学基金项目(51679127);国家自然科学基金重点项目(51439003);水利部公益基金项目(201401029)

收稿日期:2016-08-19

岩体问题开展了较多的研究, 典型的如三峡工程船闸高边坡<sup>[2]</sup>及地下厂房<sup>[3-4]</sup>, 拉西瓦水电站<sup>[5]</sup>及锦屏水电站<sup>[6-10]</sup>等高地应力区高边坡和深埋地下厂房或引水隧洞等工程开挖卸荷稳定性问题。

岩体工程开挖变形具有很强的时空效应<sup>[11-12]</sup>, 岩体工程施工中发生的较多灾害往往与开挖施工进度(也即开挖卸荷速率)有关。例如高地应力条件下硬岩岩爆与开挖卸荷速率往往有密切关系。为此, 较多学者针对卸荷速率对岩石力学特性的影响开展了许多试验研究, 黄润秋等<sup>[12-13]</sup>通过室内三轴卸荷试验研究了高应力环境中不同卸荷速率下锦屏一级水电站大理岩的变形破裂及强度特征; 吴刚等<sup>[14]</sup>探讨了卸荷速率对裂隙岩体强度特征影响, 陈卫忠等<sup>[15]</sup>开展了脆性花岗岩不同卸载速率条件下峰前、峰后卸围压试验; 张凯等<sup>[16]</sup>、邱士利等<sup>[17]</sup>针对锦屏二级水电站大理岩进行了不同速率的卸围压试验; 王在泉等<sup>[18]</sup>对灰岩试样进行了加轴压、卸围压破坏试验; 柏俊磊等<sup>[19]</sup>基于卸荷岩体力学理论及方法, 采用数值模拟的方法分析了开挖卸荷速率对边坡变形稳定的影响。综合这些研究结果发现, 卸荷速率对各种岩石的变形破坏特征、断裂特征和强度特征具有显著的影响, 卸载速率越大, 岩样的脆性破坏特征越明显, 破坏强度越大, 对工程的危害性越大, 在岩体开挖施工过程中, 可以通过调整开挖施工速度来控制岩体的卸荷进程。

然而, 在岩体工程施工过程中, 除了开挖卸荷本身对应力场的影响外, 往往还要面对复杂的环境条件, 典型的如渗透水压力的影响, 在众多工程岩石力学问题研究过程中发现, 很多情况下都存在着应力与渗流耦合作用的问题。岩体的开挖卸荷变形、破坏与岩体内的地下水渗透压力密切相关。较多学者也逐渐在卸荷试验中考虑孔隙水压力的影响, 李志敬等<sup>[20]</sup>、张雪颖等<sup>[21]</sup>研究发现孔隙水压力加速了岩石的破裂, 降低了岩石的强度; 俞缙等<sup>[22]</sup>通过试验研究, 分析建立卸荷作用下岩石变形、渗透性与损伤演化之间的相关关系; 蒋海飞等<sup>[23]</sup>研究发现孔隙水压力对砂岩的卸荷蠕变特性影响明显。这些研究成果表明孔隙水压力的存在, 弱化了岩石的卸荷力学特性, 促进了岩石变形扩容的发展。

综合目前研究成果分析发现, 卸荷速率和孔隙水压力对岩石卸荷力学特性均存在的明显的影响, 但在相关的试验研究中, 一般都是单独考虑卸荷速率或者孔隙水压力的影响, 较少综合考虑卸荷速率和孔隙水压力对岩石卸荷力学特性的影响。而且, 目前关于孔隙水压力对岩石卸荷力学特性影响的研究中, 较多考虑的是高孔隙水压力(5~10 MPa及以上), 然而, 在水电工程相关库岸边坡开挖施工中, 主要影响区域

为边坡浅表层岩体, 相应影响范围内的孔隙水压力相对较小, 但是相关低孔隙水压力对岩石卸荷力学特性影响的研究很少。

基于此, 本文结合库岸边坡工程岩体的实际赋存环境, 考虑不同的孔隙水压力(0~1.2 MPa), 进行偏应力恒定情况下不同速率卸载围压的试验, 研究卸荷速率和低孔隙水压力对岩石卸荷力学特性的影响效应, 进而为涉水边坡岩体的开挖施工提供参考。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试样的制备

本次试验岩样取自三峡库区某库岸边坡, 为绢云母中粒石英砂岩, 微风化, 经取芯、切割以及打磨制作标准岩样(直径50 mm, 长度100 mm), 如图1, 对制备好的岩样进行几何尺寸、质量及波速测试, 根据波速和密度分布情况对岩样进行筛选<sup>[24]</sup>。



图 1 典型岩样照片

Fig. 1 Typical sandstone samples

### 1.2 饱水岩样的三轴抗压强度试验

对制备好的岩样选取一组进行饱水处理, 首先进行三轴(围压考虑5 MPa)抗压强度试验, 试验在RMT-150C岩石力学试验系统上进行, 得到饱水状态下砂岩三轴抗压强度(围压5 MPa)为90 MPa左右, 该强度值作为后面考虑孔隙水压力的三轴卸荷试验的轴向应力水平选取的依据。

### 1.3 考虑卸荷速率和孔隙水压力的卸荷试验方案

整个三轴卸荷试验过程分为4个阶段: ①首先施加静水压力至指定的围压值(5 MPa); ②再从试样下端单向施加孔隙水压至指定值( $p=0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 \text{ MPa}$ ), 整个试验过程中保持孔隙水压恒定; ③增加轴向荷载至某一应力状态, 取相应围压下峰值抗压强度的80%左右; ④保持偏应力恒定, 逐步减小围压直至岩样破坏, 参照以往卸荷试验经验<sup>[16-18]</sup>, 本文试验中主要考虑4种围压卸荷速率 $v$ , 分别为0.005, 0.02, 0.05, 0.1 MPa/s。

三轴卸荷试验在TOP INDUSTRIE多功能岩石三轴测试系统上进行, 如图2所示。该设备由法国TOP INDUSTRIE公司研发的一套多功能的精密试验仪器, 它主要由油源、控制系统、轴压系统、温度系统、渗

流系统六大部分以及相关各种传感器组成, 传感器方面包含荷载、温度、位移、压力等专业测量元件。可以完成力学、渗流、化学及温度多场耦合试验。



图 2 TOP INDUSTRIE 自适应全自动岩石三轴试验机

Fig. 2 TOP INDUSTRIE adaptive full automatic rock triaxial test machine

## 2 试验结果分析

限于篇幅, 这里列出部分典型应力 - 应变曲线, 如图 3 所示。

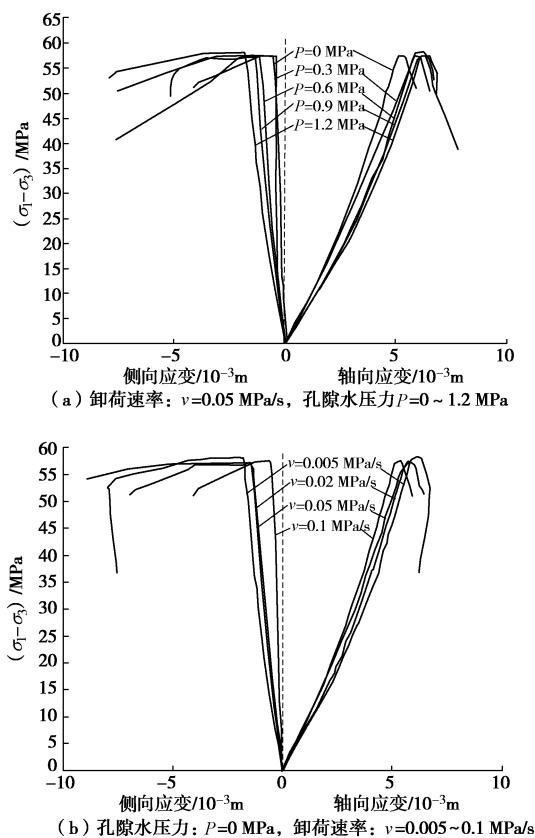


图 3 典型应力 - 应变曲线

Fig. 3 Typical stress-strain curves

从图 3 可以看出:

(1) 当卸荷速率一定时, 不同孔隙水压力条件下岩样的加卸载应力 - 应变曲线变化趋势总体一致。比较而言, 随着孔隙水压力的增大, 加载阶段应力 - 应变曲线的斜率逐渐降低, 弹性模量呈逐步减小趋势,

由于孔隙水压力总体较小, 相应弹性模量的变化幅值不大; 卸载阶段岩样侧向变形的增大幅度明显大于轴向变形, 而且, 孔隙水压力越大, 这种差别越明显, 说明孔隙水压力促进了岩样的侧向扩容。

(2) 当孔隙水压力一定时, 不同卸荷速率条件下岩样的加卸载应力 - 应变曲线变化趋势总体一致。比较而言, 在围压卸载阶段, 随着围压卸荷速率的增大, 应力 - 应变曲线跌落的更加突然, 岩样的脆性破坏特征更加明显。

为了具体分析孔隙水压力和围压卸荷速率对岩石变形、强度特性的影响, 特别对卸载阶段的应变围压柔量、变形模量和峰值强度等参数进行了统计分析。

### 2.1 卸载阶段岩样应变围压柔量变化规律分析

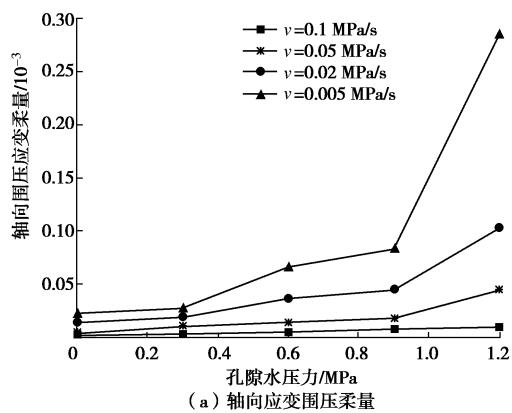
为了分析卸载阶段的围压卸荷量对应变增量的影响, 引入一个变量——应变围压柔量<sup>[17~25]</sup>, 应变围压柔量的定义为围压卸荷起始点和破坏点之间所产生的应变增量  $\Delta\varepsilon_i$  与围压卸载量  $\Delta\sigma_3$  之比:

$$\dot{\Delta\varepsilon}_i = \frac{\Delta\varepsilon_i}{\Delta\sigma_3} , \quad (1)$$

式中,  $\dot{\Delta\varepsilon}_i$  为应变围压柔量 ( $i=1, 3$  分别表示轴向应变和侧向应变)。应变围压柔量  $\dot{\Delta\varepsilon}_i$  为单位围压卸荷量引起的应变增量, 该变量能够较好地反映卸荷过程中围压的大小变化对岩石轴向和侧向变形的影响, 也可以较好地反映岩石的变形对应力状态变化的响应情况。应变围压柔量  $\dot{\Delta\varepsilon}_i$  值越大, 表明卸载对该方向的变形影响越明显。

取卸荷过程破坏点对应的轴向、侧向应变增量及围压卸载量, 按照公式(1)计算得到不同孔隙水压力、不同围压卸荷速率条件下岩样的轴向和侧向应变围压柔量变化图如图 4, 5 所示。

由图 4, 5 可以看出, 围压卸载速率、孔隙水压力对岩样卸载阶段的轴向、侧向应变影响显著。随着孔隙水压力的增大, 轴向、侧向应变围压柔量逐渐增大; 随着围压卸荷速率的增大, 轴向、侧向应变围压柔量逐渐减小; 而且, 侧向应变围压柔量明显大于轴向。



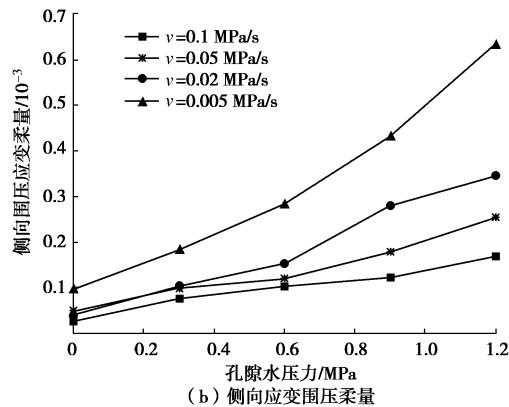


图 4 不同卸荷速率作用下岩样侧向、轴向应变围压柔量  
Fig. 4 Curves of lateral and axial strain confining pressures under different unloading rates

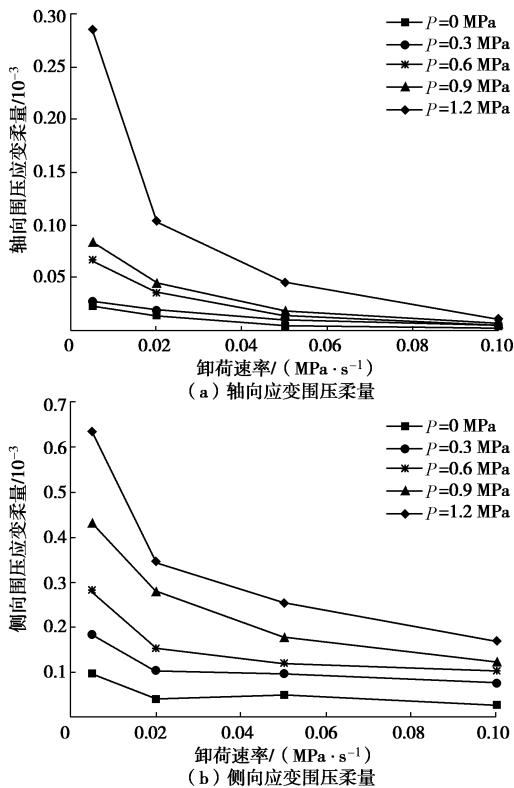


图 5 不同孔隙水压力作用下岩样轴向和侧向应变围压柔量  
Fig. 5 Curves of lateral and axial strain confining pressures under different pore water pressures

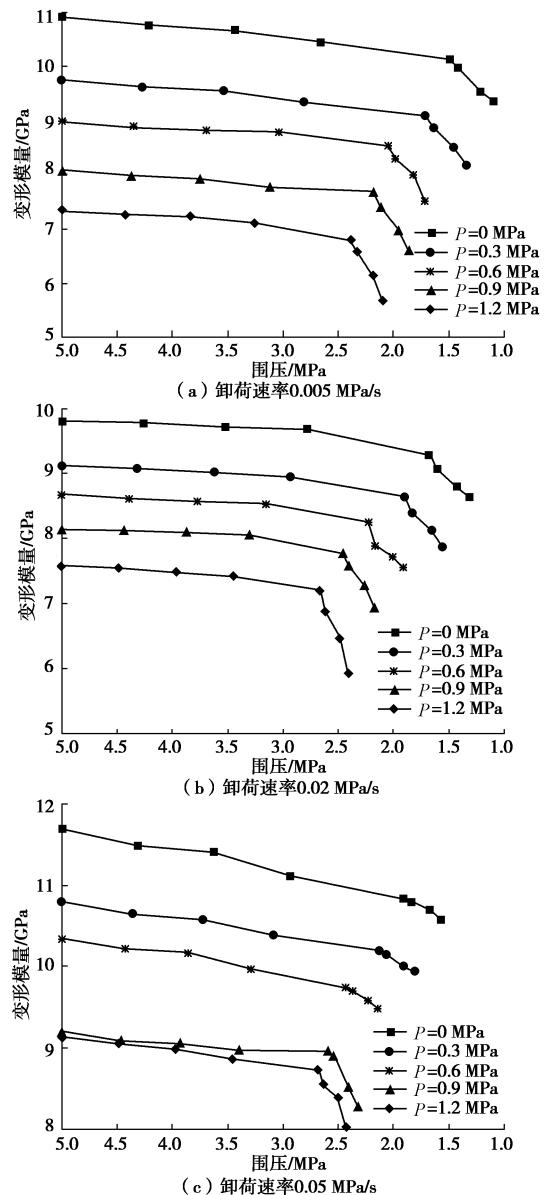
孔隙水压力从 0 MPa 增大到 1.2 MPa, 不同围压卸荷速率 (0.005~0.1 MPa/s) 条件下, 岩样的轴向应变围压柔量分别增大了 1129.07%, 875.32%, 626.66%, 378.96%, 侧向应变围压柔量分别增大了 725.91%, 543.61%, 502.39%, 405.44%, 比较而言, 围压卸荷速率越小, 应变围压柔量增长趋势越明显。

围压卸荷速率从 0.005 MPa/s 增大到 0.1 MPa/s, 不同孔隙水压力 (0~1.2 MPa) 条件下, 岩样的轴向应变围压柔量分别减小了 86.61%, 90.25%, 90.70%, 91.35%, 96.21%, 侧向应变围压柔量分别减小了 57.71%, 63.06%, 71.11%, 71.27%, 73.11%。比较而

言, 当围压卸荷速率较小时 (0.005, 0.02 MPa/s), 破坏点对应的轴向、侧向应变围压柔量均明显较大, 而且, 孔隙水压力越大, 应变围压柔量越大; 当围压卸荷速率较大时 (0.05 MPa/s 及以上), 破坏点对应的轴向、侧向应变围压柔量明显较小。分析原因是由于在卸载速率较小时, 岩样内部应力调整均匀、平缓<sup>[25]</sup>, 岩样的变形可以得到比较充分的发展, 而且, 孔隙水压力促进了变形的发展, 因此, 应变围压柔量值较大; 而当卸载速率较大时, 岩样的变形得不到充分发展, 对应的应变围压柔量值较小, 岩样破坏呈现脆性跌落形式, 这与前面岩样的应力 - 应变曲线特征也是一致的。

## 2.2 卸荷速率和孔隙水压力对砂岩卸载阶段变形模量的影响

对不同卸荷速率、不同孔隙水压力条件下, 围压卸载过程中的变形模量进行统计, 如图 6 所示。不同试验条件下岩样破坏时的轴向变形模量与卸荷速率、孔隙水压力关系曲线如图 7 所示。



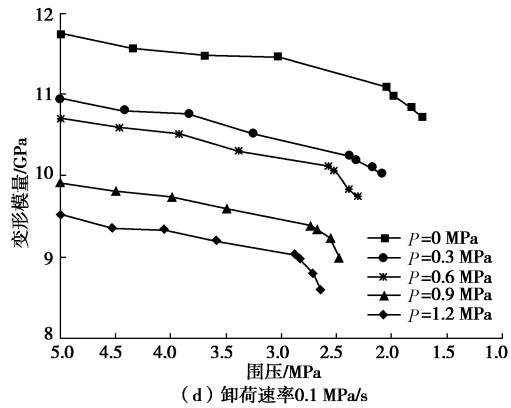


图 6 不同试验条件下砂岩变形模量劣化规律曲线

Fig. 6 Deteriorating curves of deformation modulus under different test conditions

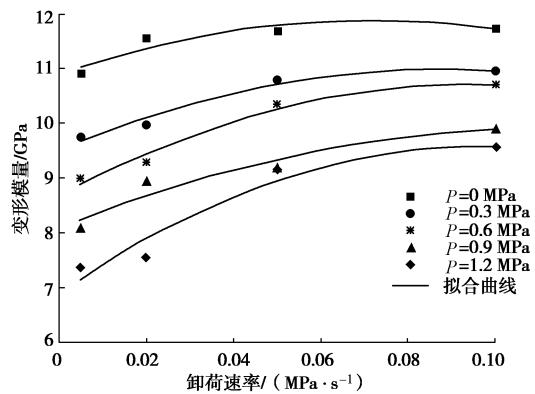


图 7 不同试验条件下岩样破坏时的变形模量

Fig. 7 Deformation moduli of rock samples damaged under different test conditions

从图 6, 7 可以看出, 不同孔隙水压力、不同卸荷速率条件下, 岩样围压卸载阶段的轴向变形模量变化趋势总体一致, 即随着围压的减小, 变形模量也随之不断降低。为了分析围压卸载过程中变形模量的变化特点, 定义围压卸荷量为

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_3^0 - \sigma_3^i}{\sigma_3^0 - \sigma_3^f} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

式中,  $\sigma_3^0$  为初始围压,  $\sigma_3^i$  为卸荷到第  $i$  步时的围压,  $\sigma_3^f$  为破坏点的围压值。

在围压卸荷量小于 90% 左右时, 变形模量呈现近似线性小幅度劣化, 当卸荷量在大于 90% 时, 变形模量大幅度陡降, 直至岩样破坏。

孔隙水压力从 0 MPa 增大到 1.2 MPa, 不同围压卸荷速率 (0.005, 0.02, 0.05, 0.1 MPa/s) 条件下, 岩样的变形模量降幅变化范围依次为 14.20%~22.74%, 11.95%~21.92%, 9.49%~12.12% 和 8.70%~9.80%, 其平均降幅依次为 17.60%, 15.12%, 9.60% 和 9.05%。比较而言, 相同孔隙水压力条件下, 随着围压卸荷速率的增加, 岩样破坏时变形模量的劣化幅度逐渐减小。

围压卸荷速率从 0.005 MPa/s 增大到 0.1 MPa/s, 不同孔隙水压力 (0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 MPa) 条件下, 岩样变形模量的降低百分比为 14.20%~8.70%, 16.15%~8.47%, 16.34%~8.91%, 18.46%~9.38%, 22.74%~9.80%, 其平均降幅依次为 11.45%, 12.31%, 12.63%, 13.92%, 16.27%。比较而言, 相同围压卸荷速率条件下, 孔隙水压力越大, 变形模量的劣化幅度越大, 而且, 在卸荷量大于 90% 时的陡降趋势更加明显, 说明孔隙水压力促进了卸荷阶段岩样变形模量的劣化衰减。文献[23]开展高孔隙水压力 (0~15 MPa)、高围压 (20~60 MPa) 三轴卸荷试验, 研究发现随着孔隙水压的增大, 卸载阶段岩样的变形模量逐渐减小, 本文的试验曲线规律与文献[23]是类似的, 由于本文设计孔隙水压力较小, 对应变形模量的变化幅度小于文献[23]的试验结果。

从图 7 可以看出, 不同孔隙水压条件下, 岩样破坏时的变形模量随卸荷速率的变化趋势是一致的, 即随着卸荷速率的增大, 变形模量出现了不同程度地增长趋势。在 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 MPa 孔隙水压力条件下, 不同围压卸荷速率 (0.005, 0.02, 0.05, 0.1 MPa/s) 变形模量的增长量依次为 6.04%~7.75%, 2.19%~12.32%, 3.44%~19.10%, 10.48%~22.59%, 2.71%~29.72%, 其平均增幅依次为 6.90%, 8.41%, 12.56%, 15.61% 以及 18.91%, 由此可以看出随着孔隙水压力的增大, 变形模量的变化量呈现出增大趋势。说明孔隙水压力越大, 变形模量对卸荷速率越敏感。

### 2.3 卸荷速率和孔隙水压力对砂岩卸荷破坏强度的影响

不同试验条件下, 对岩样从开始卸载到破坏时的围压卸荷量 ( $\Delta\sigma_3 = \sigma_3^0 - \sigma_3^f$ ) 进行统计, 如图 8 所示。

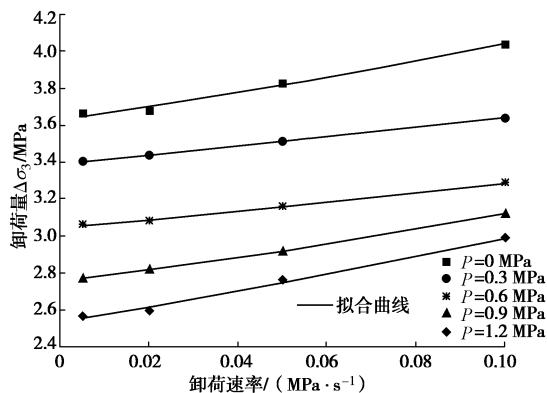


图 8 不同试验条件下岩样破坏时的围压卸荷量

Fig. 8 Variation of confining pressure of rock samples damaged under different test conditions

从图 8 可以看出, 不同孔隙水压条件下, 岩样破坏时的围压变化量随卸荷速率增大而逐渐增大, 总体

变化趋势一致。围压卸荷速率从 0.005 MPa/s 增大到 0.1 MPa/s, 不同孔隙水压力(0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 MPa)条件下, 岩样破坏时的围压变化量分别增大了 7.41%, 7.05%, 10.26%, 12.82%, 16.44%。比较而言, 相同卸荷速率条件下, 孔隙水压力越大, 岩样破坏时的围压变化量越小, 也即, 在相同的初始围压情况下, 孔隙水压力越大, 只需要卸载相对较少的围压, 岩样即会破坏, 说明孔隙水压力加速了岩样的破坏。相同孔隙水压力条件下, 卸荷速率越大, 岩样破坏时的围压变化量越大, 岩样破坏时的强度有一定程度的提高。

#### 2.4 卸荷速率和孔隙水压力对砂岩卸荷破坏特征的影响

不同卸荷速率、不同孔隙水压力条件下, 典型岩样的破坏照片如图 9 所示。图中岩样下端为孔隙水压力施加的进水端。

综合图 9 可以看出, 岩样总体呈现为张性破坏或张剪破坏。在相同孔隙水压力条件下, 围压卸荷速率越大, 岩样破坏时的裂纹数量相对越多, 岩样破碎程度越高, 脆性破坏特征更加明显。比较而言, 孔隙水压力越大, 岩样破坏时的近轴向的张性裂纹越多, 而且, 在主裂纹发展迹线上, 出现了较多的追踪次生张裂纹, 这种裂纹在岩样孔隙水压力施加端(岩样下端为进水端)显得更加明显。

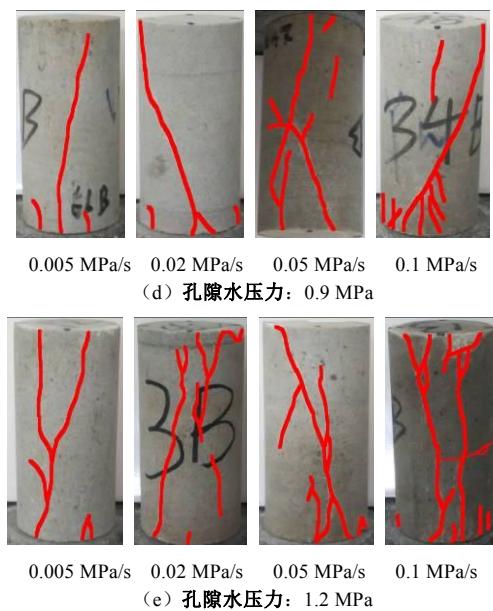
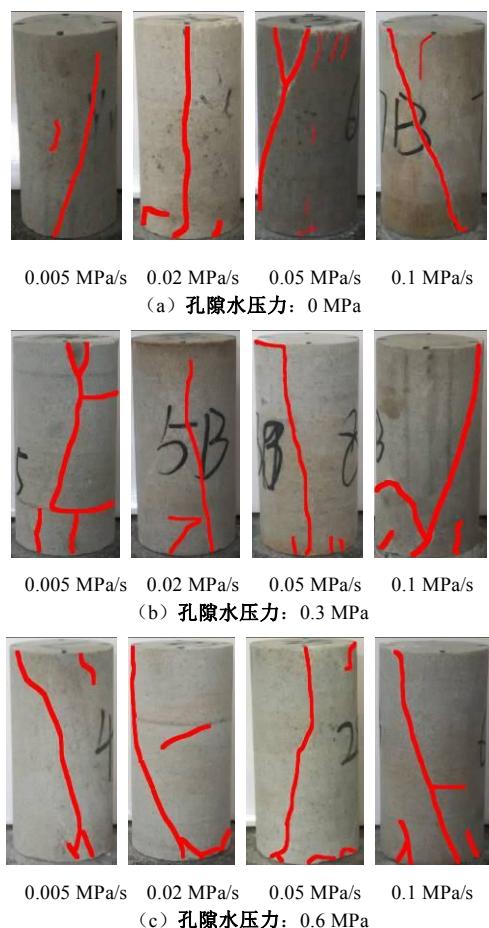


图 9 不同试验条件下典型岩样破坏照片

Fig. 9 Typical failure photos of rock samples under different test conditions

分析其原因主要是由于在围压卸载过程中, 岩样内部的微观裂纹、裂隙逐渐发育, 孔隙水压力在岩样内部裂纹、裂隙尖端的应力集中促进了这些微观裂纹、裂隙的扩展、汇集, 而且, 孔隙水压力越大, 这种损伤劣化效应越明显。宏观上就导致了岩样破坏过程中的裂纹明显增多, 侧向变形发展迅速, 强度逐渐下降, 这与前面应力 - 应变曲线上看到的岩样变形发展规律及强度参数统计规律也是一致的。

### 3 结 论

(1) 在加载阶段, 随着孔隙水压力的增大, 岩样加载阶段应力 - 应变曲线的斜率逐渐降低, 弹性模量呈逐步减小趋势, 但总体变化幅值不大。在卸载过程中, 岩样轴向变形和侧向变形迅速增大, 而且, 侧向变形的增大幅度明显大于轴向变形, 比较而言, 孔隙水压力越大, 岩样的变形破坏发展的越快, 破坏时应力 - 应变曲线跌落的趋势越明显。

(2) 在卸载过程中, 围压卸载速率、孔隙水压力对岩样的轴向、侧向应变影响显著, 而且, 侧向应变围压柔量明显大于轴向, 即侧向变形对卸载过程更加敏感。随着孔隙水压力的增大, 轴向、侧向应变围压柔量逐渐增大, 随着卸荷速率的增大, 轴向、侧向应变围压柔量逐渐减小。

(3) 在卸载过程中, 岩样的变形模量逐渐劣化, 相同孔隙水压力条件下, 随着卸荷速率的增加, 变形模量的劣化幅度逐渐减小; 孔隙水压力越大, 变形模量的劣化幅度越大, 而且, 在卸荷量大于 90% 时的陡降趋势更加明显, 说明孔隙水压力对岩石卸荷阶段变

形模量的劣化影响显著。

(4) 围压卸载速率、孔隙水压力对岩样的破坏特征影响明显, 围压卸荷速率越大, 岩样的脆性破坏特征越明显, 破碎程度越高; 孔隙水压力越大, 岩样破坏时的近轴向的张性裂纹越多和追踪次生裂纹越多, 这也说明孔隙水压力在岩样内部裂纹、裂隙尖端的应力集中是影响岩石变形破坏的主要原因。

(5) 同时考虑围压卸荷速率或者孔隙水压力这两个因素共同作用时, 岩样的卸荷变形破坏特征更加复杂, 耦合效应特征明显, 因此, 在工程岩体卸荷力学特性分析时, 应该尽量综合考虑岩体的实际赋存条件, 开展多因素耦合作用下的试验分析, 这样才能更好地掌握其力学特性。

### 参考文献:

- [1] 哈秋龄, 李建林, 张永兴, 等. 节理岩体卸载非线性岩体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (HA Qiu-ling, LI Jian-lin, ZHANG Yong-xing, et al. Jointed rock mass unloading nonlinear rock mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))
- [2] 陶履彬, 夏才初, 陆益鸣. 三峡工程花岗岩卸荷全过程特性的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1998, 26(3): 330 - 334. (TAO Lu-bin, XIA Cai-chu, LU Yi-ming. Three Gorges granite unloading process characteristics experimental study[J]. Journal of Tongji University (Natural science edition), 1998, 26(3): 330 - 334. (in Chinese))
- [3] 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): 2205 - 2213. (HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental study on mechanical properties of granite under loading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2205 - 2213. (in Chinese))
- [4] 黄达, 黄润秋. 卸荷条件下裂隙岩体变形破坏及裂纹扩展演化的物理模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 502 - 512. (HUANG Da, HUANG Run-qiu. Physical model test on deformation failure and crack propagation evolvement of fissured rocks under unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 502 - 512. (in Chinese))
- [5] 陈景涛, 冯夏庭. 高地应力下岩石的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1537 - 1543. (CHEN Jing-tao, FENG Xia-ting. High stress rock true triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering Journal, 2006, 25(8): 1537 - 1543. (in Chinese))
- [6] QI S W, WU F Q, YAN F Z, et al. Mechanism of deep cracks in the left band slope of Jinping first stage hydropower station[J]. Engineering Geology, 2004, 73(1/2): 129 - 144.
- [7] HUANG D, LI Y. Conversion of strain energy in triaxial unloading tests on marble[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 66(1): 160 - 168.
- [8] 黄达, 谭清, 黄润秋. 高围压卸荷条件下大理岩破碎块度分形特征及其与能量相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1379 - 1389. (HUANG Da, TAN Qing, HUANG Run-qiu. Fractal characteristics of fragmentation and relation with energy of marble under unloading with high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1379 - 1389. (in Chinese))
- [9] 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): 2104 - 2109. (LI Hong-zhe, XIA Cai-chu, YAN Zi-jian, et al. Jinping Hydropower Station marble at high strain under unloading bearing mechanical properties[J]. Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2104 - 2109. (in Chinese))
- [10] 闫子舰, 夏才初, 李宏哲, 等. 分级卸荷条件下锦屏大理岩流变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2153 - 2159. (YAN Zi-jian, XIA Cai-chu, LI Hong-zhe, et al. Grading discharge load under the condition of Jinping marble rheological rules[J]. Chinese of Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2153 - 2159. (in Chinese))
- [11] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. Principle of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese))
- [12] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525 - 1544. (HUANG Run-qiu. The dynamic process of high rock slope development and its stability control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525 - 1544. (in Chinese))
- [13] 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试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21 - 33. (HUANG Run-qiu, 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))
- [14] 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. Unloading stress of fractured rock mass deformation and strength characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering Journal, 1998, 17(6):615 - 621. (in Chinese))
- [15] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1530 - 1540. (CHEN Wei-zhong, LÜ Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Study on unloading confining pressure test and rock burst criterion based on energy principle[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1530 - 1540. (in Chinese))
- [16] 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, 31(7): 2072 - 2078. (ZHANG Kai, ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, et al. Experimental study on strength characteristics of rock under different unloading rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2072 - 2078. (in Chinese))
- [17] 邱士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807 - 1817. (QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Different unloading confining pressure rate of deep buried marble unloading mechanical properties test and research[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1807 - 1817. (in Chinese))
- [18] 王在泉, 张黎明, 孙辉, 等. 不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1045 - 1051. (WANG Zai-quan, ZHANG Li-ming, SUN Hui, et al. Experimental study on the mechanical properties of limestone under different unloading velocity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1051 - 1045. (in Chinese))
- [19] 柏俊磊, 王乐华, 汤开宇, 等. 开挖卸荷速率变化对岩质边坡应力应变影响作用研究[J]. 长江科学院学报, 2014, 31(6): 60 - 64. (BAI Jun-lei, WANG Le-hua, TANG Kai-yu, et al. Excavation unloading load rate of change of rock slope should be stress influence function[J]. Journal of Rock Yangtze River Research Institute, 2014, 31(6): 60 - 64. (in Chinese))
- [20] 李志敬, 朱珍德, 施毅, 等. 高围压高水压条件下岩石卸荷强度特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009(2): 162 - 165. (LI Zhi-jing, ZHU Zhen-de, SHI Yi, et al. Experimental study on unloading strength characteristics of rock under high confining pressure and high pressure condition[J]. Journal of Hohai University (Natural science edition), 2009(2): 162 - 165. (in Chinese))
- [21] 张雪颖, 阮怀宁. 高围压高水压条件下大理岩卸围压变形破坏与能量特征[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(5): 5 - 8. (ZHANG Xue-ying, RUAN Huai-ning. Unloading de-formation failure and energy properties of marble under high confining pressure and high water pressure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(5): 5 - 8. (in Chinese))
- [22] 俞缙, 李宏, 陈旭, 等. 砂岩卸围压变形过程中渗透特性与声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 69 - 79. (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Experimental study of permeability and acoustic emission characteristics of sandstone during processes of unloading confining pressure and deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 69 - 79. (in Chinese))
- [23] 蒋海飞. 高围压高孔隙水压作用下岩石卸荷蠕变特性研究及其工程应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (JIANG Hai-fei. Study on unloading creep characteristics of rock under high confining pressure and high pore water pressure and its engineering application[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese))
- [24] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中岩样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3399 - 3403. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, DENG Cheng-jin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(11): 3399 - 3403. (in Chinese))
- [25] 黄兴, 刘泉声, 卢兴利, 等. 深部软弱地层 TBM 开挖围岩力学行为试验研究 (II): 卸荷速率效应与变形机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 36(6): 1 - 12. (HUANG Xing, LIU Quan-sheng, LU Xing-li, et al. For deep soft ground TBM excavation surrounding rock mechanics behavior experimental study (II): unloading rate effect and deformation mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 36(6): 1 - 12. (in Chinese))