

DOI: 10.11779/CJGE201503016

# 水力作用下砂岩三轴卸荷试验及破裂特性研究

唐 浩, 李天斌\*, 陈国庆, 王延可

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 高应力、高水压卸荷条件下岩石的非连续性微缺陷演化过程研究对揭示隧道围岩裂纹的起裂孕育、碎胀裂化和峰值破坏, 分析围岩稳定性具有重要意义。利用 MTS815 型程控伺服刚性试验机开展了砂岩在固定围压、不同水压条件下的水力三轴卸荷试验。试验结果表明: 岩石变形在卸荷前以压缩为主, 变化微小; 卸荷后不久开始快速扩容, 直至损伤破裂。水力条件下应力 - 应变曲线上的各个特征应力值比无水压条件下的饱和试样有不同程度地提高, 增加了应变能储备, 从初始扩容到峰值强度的历时更短, 曲线斜率更陡。随着水压的不断增大, 各个特征应力值有所减小, 表现在起裂条件降低, 压缩极限减小, 扩容时间提前, 表明了砂岩在高水压条件下的脆性特性进一步增强, 抵抗变形破坏的能力逐渐降低。通过扩容特征值与扩容点后的体应变关系, 求得初始扩容点后的相对扩容应变与变形模量差, 建立了多项式回归关系。研究结论揭示了水力作用下砂岩扩容变形行为的强烈性和突发性, 可为水-力双场条件下的围岩变形预测及控制提供参考。

**关键词:** 三轴卸荷试验; 水力作用; 特征应力值; 扩容; 回归关系

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)03-0519-07

作者简介: 唐 浩(1989-), 男, 硕士, 主要从事岩土工程和隧道工程方面的研究工作。E-mail: tanghextra@gmail.com。

## Triaxial unloading tests on rupture characteristics of sandstone under hydro-mechanical coupling conditions

TANG Hao, LI Tian-bin, CHEN Guo-qing, WANG Yan-ke

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The strong and sudden properties of the bulking and deformation behaviors of the sandstones under the hydro-mechanical (H-M) function are studied. The evolution of micro-defects under high geo-stress and hydraulic coupling conditions are critically important to reveal different stages of the micro-cracks evolving from the initiation to the failure and to evaluate the stability of the surrounding rocks. The MTS815 rock mechanical system is used to test sandstone samples collected from Bamiao Tunnel in Sichuan of China, and the H-M coupling experiment is performed under the fixed confining pressure and varied hydraulic pressure. The findings reveal that the rock deformation is compressive before unloading, though the change is small. However, rapid dilatancy proceeds to the failure stages shortly after the unloading. The stress-strain curves under H-M coupling conditions are generally higher than those without hydraulic pressure, implying that the strain energy is enhanced. In addition, the experienced time lasts shorter from the initial dilatancy point to the peak, and the slope of the curves becomes steeper. Furthermore, with the increase of the hydraulic pressure, the key characteristic stress decreases, which is reflected under lower fracture initiation conditions, reduced compression limits and advanced bulking time. Accordingly, the brittle characteristics of the sandstones are further enhanced while the ability to resist deformation and failure gradually decreases. Finally, a polynomial regression relationship is established by calculating the relative expansion strains after the initial expansion points and their corresponding deformation modulus difference values. In conclusion, the findings of this study may provide advices for the forecast and control of the deformation of the surrounding rocks under multi-conditions.

**Key words:** triaxial unloading test; hydro-mechanical function; typical stress; dilatancy; regression relationship

细观力学行为研究表明, 硬岩岩石的破坏过程具有微

## 0 引言

高大深埋隧道硬质裂隙岩体常常会处于高地应力、高水压等复杂耦合环境应力场内, 发生突发性岩爆等隧道地质灾害是威胁地下工程的主要问题。岩石

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230635, 41172279, 41272330);  
国家青年科学基金项目(41002110)

收稿日期: 2014-07-16

\*通讯作者

裂纹孕育、起裂、分叉、聚合及扩容破裂等一系列微观特性,当裂纹融汇、贯通形成宏观破裂后,极易造成能量瞬间释放,从而诱发地质灾害。因此,岩石的力学行为变化过程将是发生突发性围岩破坏的根本性影响因素之一。由此,开展针对岩石在高围压及不同水力条件下的非线性应力-应变曲线特征、岩石变形破坏过程、扩容特性及参数弱化特征等岩石的损伤与破裂特性研究是岩土工程领域的重要课题之一<sup>[1-3]</sup>。

岩石的扩容效应是岩石类材料力学特性的显著特点之一<sup>[4]</sup>,它是岩石在外力作用下发生形态、结构等形变过程中的非线性应变特征和非弹性体积应变增加的现象。迄今为止,国内外众多学者已经通过多种方法针对高地应力,或高地应力-高水压条件下岩石的扩容破裂这一问题进行了研究。刘冬梅等利用实时全息干涉法观测得到单轴受压砂岩、花岗岩和压剪受荷砂岩试样的裂纹扩展与破坏变形过程的动态干涉条纹,通过解析条纹畸变过程有效判识了裂纹从孕育起裂到扩展变形的动态演化<sup>[3]</sup>。李海波等一方面根据能量平衡原理,探讨了裂纹扩展引起的非线性应变特征;另一方面,利用改变围压和应变速率的方式,得到了剪胀现象与应变速率关系不大,而剪胀起始应力及剪胀现象受围压影响明显的结论<sup>[5-6]</sup>。陈国庆等在对地下厂房围岩变形预警研究中指出,地下厂房在开挖后由于卸荷效应导致围岩中的天然裂隙在集中应力作用下产生了扩展、汇合与贯通,进而形成劣化损伤区域,这些影响因素在基于强度折减法思想的预警体系中均需要得到体现<sup>[7]</sup>。对于地应力释放及围岩卸荷导致岩石破裂的问题,Griffith 在 1921 年的脆性岩石张拉试验中发现,岩石的起裂直接意味着岩石的破裂。而其在 1924 年的无侧限单轴压缩试验又证实,岩石压缩破裂时的强度能达到张拉试验时的 8 倍<sup>[8-9]</sup>。因此,人们很早就认识到压缩过程中岩石将有一个比单纯张拉时更为复杂的演化过程,其起裂变形将不再意味着直接破坏。通过吴刚和孙钧裂隙岩体模型试验认为,岩体在加、卸荷作用下均会发生先体积压缩,后膨胀扩容的变化过程,特别是卸荷作用的存在必然导致岩体的扩容现象发生。试验证明,双向卸荷要比单向卸荷产生更大的破坏变形<sup>[10]</sup>。李天斌针对汶川特大地震中都江堰-汶川公路部分高地应力隧道研究再次表明,强烈的高地应力释放会产生相关破裂迹象,而地震波及其触发效应会产生叠加作用,促使隧道发生强烈震害<sup>[11]</sup>。由此,卸荷试验将是检验和认识应力释放过程中岩石破坏特性的最理想方式。

岩体(石)是具有晶粒间微裂纹、结构面微裂隙或节理裂隙等缺陷的地质体<sup>[12]</sup>,其本身就受到力学特性和渗流特性的双重影响。在高地应力环境下,水压

的介入将不可避免的影响岩石的力学特性和渗流规律,进而发生具有水力耦合效应的细观力学行为。在水压对岩石的应变特征及对微裂纹扩展过程的影响方面,Robert 在对岩石微裂纹研究的总结中认为,较大的静水压力对于闭合岩石裂隙具有积极作用,水压的出现将一定程度稳定裂隙并使其扩展变得更难<sup>[13]</sup>。黄书岭也在其博士论文中得到相似的观点,即在相同水压、不同围压条件下的岩石变形发生了瞬时弹性量逐级减少,蠕变变形量逐级增加的现象<sup>[14]</sup>。可见,高地应力条件下水压的长期有效存在,使得硬岩的蠕变能力得以增强,损伤扩容行为将更为复杂。

综上所述,岩体(石)一方面在高围压条件下弹性变形量减少、蠕变变形量增大,岩石的扩容现象受高地应力影响显著。另一方面,水对岩石的非线性应变特性也具有重要影响。目前,对于砂岩在高地应力、孔隙水压双场作用下的特征应力点定位、扩容变形时间及行为、破裂特性等方面的研究上还存在不足。因此本文开展了砂岩在固定围压、不同水压下的水力试验,通过定位损伤扩容及峰值破裂等特征点来判别水力作用下砂岩内部微裂纹的演化特性,并对比分析了无水压条件、低水压条件和高水压条件下岩石在卸荷中的力学特性。研究结果为深入了解砂岩在水力作用下的微裂纹扩容及损伤破裂等细观力学行为和破坏机理奠定了基础。

## 1 试验设计及结果

### 1.1 试验方案

本次试验所选取的岩样为四川省桃园至巴中高速公路八庙隧道洞身段一块完整的近水平向白垩系剑阁组砂岩的一部分,该岩层砂岩主要为浅湖相、三角洲-湖滨相沉积。将试样制作成标准圆柱体(如图 1),即直径 50 mm、样高 100 mm。在试验前,将所有试样自由浸泡入水中不少于 48 h,使试样饱和。

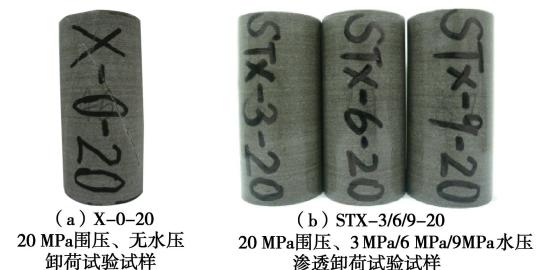


图 1 三轴卸荷试验岩样

Fig. 1 Rock samples of triaxial unloading tests

试验采用四川大学 MTS815 型程控伺服刚性试验机,试验时采用控制环向位移速率升轴压  $\sigma_1$  的同时以固定卸荷速率降围压  $\sigma_3$  的方式模拟岩爆产生的应力

路径, 并在试样底端增加不同的渗透水压, 从而达到模拟水力作用的试样状态。

本次试验主要包括两种试验方案:

(1) 方案一: 不同水力条件下三轴卸荷试验

卸荷三轴试验的具体控制过程较为复杂, 从试验初始阶段到试样破坏的整个试验步骤如下:

a) 根据三轴试验机要求安装试件并采取控油防护措施。

b) 控制荷载速率来施加各压力值, 即以 60 MPa/min 的荷载速率施加围压 (包括围压及轴压) 至预定值, 并且保持不变。

c) 围压稳定后, 在试样底端以 1 MPa/min 的速率加载水压至预定值 (3 MPa/6 MPa/9 MPa), 顶部与空气相通以保证试样两端压力差等于水压, 保持水压至少 2 h 使足够的水渗入岩体转化为孔隙水压, 之后再开始采集应力应变值。

d) 在围压和水压不变的前提下, 以 60 kN/min 的速率加载轴压。

e) 当轴压增至 0.8 倍三轴抗压强度时开始以 0.5 MPa/min 的速率卸载围压, 并控制试样以 0.02~0.05 mm/min 的环向位移变形速率来施加轴压直至试件破坏。每种水压条件下各制备了 1 个岩样, 共制备 3 个岩样。

(2) 方案二: 常规三轴卸荷试验

为了对比分析有无水压条件对砂岩破裂特性的影响, 在进行水力作用下砂岩三轴卸荷试验的同时进行了常规三轴卸荷试验。

通过应力路径分区, 可以看到砂岩在卸荷前后变形强烈程度的差异性; 对无水压、低水压和高水压条件下砂岩应力-应变曲线上特征点的对比分析, 能够了解不同水力条件对岩石变形及破坏发生时间的控制作用, 从而研究不同水力条件影响下砂岩的微裂纹起裂、扩容, 乃至整个损伤行为特性。

## 1.2 试验结果

本阶段试验是在固定围压条件下, 结合无水压及不同水压条件进行的三轴卸荷试验。通过分析不同水力条件下三轴卸荷试验结果, 可将微裂纹的破坏过程分为微裂纹初期压缩、压密闭合、裂纹起(开)裂、延展扩容和损伤破裂 5 个阶段性变化, 当宏观裂缝进一步扩展和贯通后将形成宏观破裂面。“固定围压、不同水压条件下”饱和砂岩的起裂-破坏过程及特征点分布如图 2 所示。

图 2 分为上、下两个部分。其中, 上幅部分是主应力差与应变之间的关系曲线, 实线代表水力条件下的应力-应变曲线, 虚线则代表无水力条件的情况; 下幅部分是体积应变与轴向应变之间的关系曲线, 其

中实线段表征不同水力条件下的变形情况, 虚线则表征无水力条件下的情况。上下两个部分的关系曲线及相关特征点具有对应性, 能够共同描述砂岩的相关破裂特性。

整个微观变化过程包含以下 4 个特征点<sup>[4]</sup>: 压缩闭合应力  $\sigma_{cc}$ 、起裂应力  $\sigma_{ci}$ 、延展扩容应力  $\sigma_{cd}$  和峰值应力  $\sigma_f$ , 分别对应  $A$ ,  $B$ ,  $Q$ ,  $C$  四点 (如图 2)。将卸荷前后的应力路径分为 a、b 两区: a 区为先施加围压至 20 MPa, 然后再施加水压, 使岩样从静水压力状态转化到预定水压, 当水压充分转化成孔隙水压力后再施加轴压使试样达到延展扩容应力点  $\sigma_{cd}$  前某一应力状态; b 区是在恒定水压、轴压条件下采取卸围压的方式测得的应力-应变曲线。对比可见, 岩石变形在卸荷前主要以压缩为主, 应力-应变曲线变化微小; 卸荷后很快达到扩容屈服, 并以较快速率发生微裂纹的延展扩容, 直至损伤破裂。

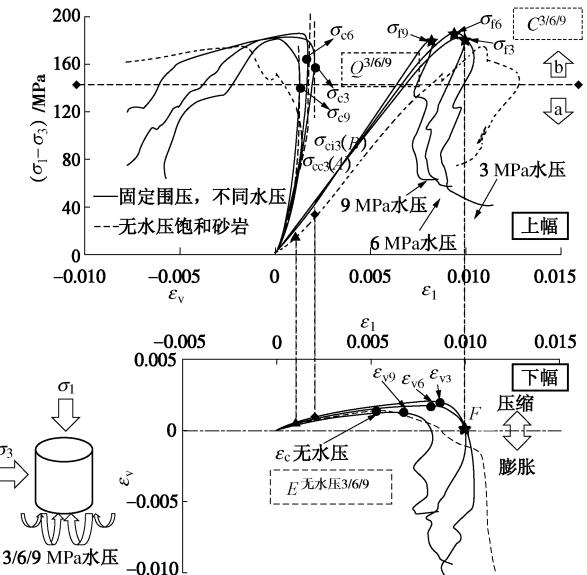


图 2 水-力作用下砂岩的起裂-破坏过程及特征点分布

Fig. 2 Distribution of key characteristic stress points of sandstone in failure process under hydro-mechanical coupling conditions

## 2 结果分析

### 2.1 破裂特性分析

从加载、卸荷条件下应力路径的变化情况看, 水力条件下饱和砂岩在整个变形过程具有以下特性:

(1) 在岩石达到压缩闭合应力点  $\sigma_{cc}$  (点  $A$ , 以 3 MPa 水压为例) 后, 岩石以压缩变形为主, 应力-应变曲线近似直线。到起裂应力点  $\sigma_{ci}$  (点  $B$ , 以 3 MPa 水压为例) 后, 微裂纹压缩速率明显放缓, 宏观表现为体积应变斜率开始增大, 并且有朝负方向偏转的趋势, 表明压缩趋势逐步得到控制。总体上, 闭合特征应力点和起裂特征应力点位于弹性变形阶段, 应变呈线性增加。

(2) 岩石的非线性变形主要发生在大量产生微裂纹之后, 此时体积应变开始大幅度偏离线性, 因此可认为在体积应变的最大拐点处为延展扩容特征点  $\sigma_{cd}$  (点  $Q$ )。该点对应于轴向应变-体积应变 ( $\varepsilon_l - \varepsilon_v$ ) 拐点  $E$ , 体积应变达到峰值表明此时岩石已经达到最大压缩点, 并开始扩容屈服。扩容特征应力点反映了岩石中的孔隙几乎全部闭合时的应力状态, 可以近似认为此时的岩石损伤(缺陷)极小。

(3) 在延展扩容特征应力点  $\sigma_{cd}$  (点  $Q$ ) 附近, 微裂纹在卸荷作用下的扩容现象十分明显。从快速偏转的体积应变曲线可以看出, 岩石中的微裂缝开始朝最不利方向(卸荷方向)强烈延展和扩容, 使该阶段膨胀变形超过压缩变形快速占据优势地位, 直至取代压缩变形而使岩石发生相对扩张, 并进一步演变为体积膨胀。

(4) 随后岩石进入不稳定变形阶段, 预示着岩石中的微裂纹已经转为裂隙或裂缝开始交汇、贯通。随着该阶段裂隙活动的加剧, 裂隙将不仅局限于扩容, 而是主要表现出错动和滑移增加的态势, 使岩石达到峰值破裂应力  $\sigma_f$  (点  $C$ , 即峰值强度), 对应于轴向应变-体积应变 ( $\varepsilon_l - \varepsilon_v$ ) 曲线中与坐标轴的交点  $F$  (以 3 MPa 水压为例)。当达到该特征应力点时, 即意味着岩石裂隙已经贯通, 并将在破裂应力后发生真正意义上的宏观破裂, 并形成宏观破裂面。

由此可见, 岩石在孔隙水压和围压条件下(a 区)的应力-应变关系保持了基本稳定, 属于弹性变形阶段到屈服阶段的过度段。但开始卸荷之后, 也就是 b 区范围内的变形发生了质的改变。在水压环境下, 从最大压缩应变点  $\varepsilon_c$  到坐标轴交点比常规三轴卸荷试验中的路径明显减小。显然, 水力条件下岩石从扩容到发生破裂的时间间隔更短, 曲线斜率也更陡峭。这一现象表明, 即使岩石试样达到饱和状态, 其非线性应变特征也与水力作用下裂纹扩展引起的相关变化不同, 后者受独立水压作用使裂隙劈裂并产生拉伸裂纹, 在扩容点后发生更为快速的破裂变形。另一方面, 水力作用下砂岩岩样的各特征应力值均有不同程度地提高, 增加了应变能的聚集及微裂纹的数量。当微裂纹发生大范围聚合和贯通时, 更易发生突发性地应力释放, 其破坏程度将强于非水力条件下的卸荷状态, 揭示了水力作用下砂岩变形的强烈性。

## 2.2 不同水压条件下卸荷试验结果分析

试验考虑了保持围压不变, 分别在 3 MPa 低水压、6 MPa 和 9 MPa 较高水压条件下进行三轴卸荷试验, 并取得砂岩的应力-应变关系曲线(如图 2)。砂岩样本取自同一块完整均匀岩体, 试验前试样均浸泡至饱

和状态。

3 种不同水压环境下的应力路径具有明显的规律特征:

(1) 水力作用下的常围压卸荷试验中, 随着水压的增大, 岩石的屈服应力随之减小, 峰值轴向应变有所减小, 而峰值应力在高水压段减小显著。

(2) 特征应力的发生时间均有不同程度提前。特别是延展扩容点的特征应力值  $\sigma_{cd}$  减小最为明显, 具体表现为  $\sigma_{c9} < \sigma_{c3} < \sigma_{c6}$ , 即水压在 9 MPa 时扩容最早, 3 MPa 和 6 MPa 时扩容较晚。扩容时间上的差异表明了随着水力环境的恶化, 砂岩更容易达到扩容屈服。对应的, 从轴向应变-体积应变 ( $\varepsilon_l - \varepsilon_v$ ) 关系曲线(图 2 下幅)也可以看出岩石的扩容屈服点与水压关系密切: 受水压增大的影响, 到达最大压缩点的体积应变减小, 即扩容屈服的时间逐步提前。同时, 扩容量也随着水压的增加而减小。因此, 较高的水压直接导致压缩极限减小、扩容提前, 从而加快了岩石的破裂进程。这一现象表明, 高水压条件下围岩的脆性特性进一步增强, 激发扩容所要求的外力条件相对减小。

(3) 峰值应力  $\sigma_f$  随水压增大而具有总体减小的变化趋势。从图 2 中轴向应变-体积应变 ( $\varepsilon_l - \varepsilon_v$ ) 关系曲线可以看出, 水压在 9 MPa 时应变路径与坐标轴交点的轴向应变值明显小于水压在 6 MPa 和 3 MPa 时的应变值。这表明高水压条件下砂岩的抗破坏能力降低, 对围岩稳定性起到负面作用。

随着水压增大, 原生裂纹闭合及微裂纹起裂发生的时间亦有提前。根据 Brace 较早时候研究岩石内部裂纹起裂与体积应变关系的方法, 岩样内的裂纹从闭合到起裂过程是一个近似线性阶段, 当体积应变偏离线性时即代表起裂<sup>[15]</sup>。参照该方法, 本试验结果从宏观上可以显著看到压密闭合特征应力点和起裂特征应力点的体积应变值均逐渐减小, 如图 3。

原生裂纹闭合到微裂纹起裂这一过程中的主应力差与体积应变曲线关系近似直线, 因此可用一条直线与曲线相切, 交点即为压缩闭合特征点与起裂特征点。对比不同水力条件下主应力差-体积应变关系曲线可以看到, 压缩闭合特征点和起裂特征应力点与其它两个特征点的关系类似, 均发生了不同程度的减小。其中, 起裂应变  $\varepsilon_{ci}$  具有  $\varepsilon_{ci9} < \varepsilon_{ci6} < \varepsilon_{ci3}$  (与应力变化等效) 的关系。表明了水压力越大, 起裂条件越低, 即越容易达到初始起裂点。砂岩在高水力作用下较早开裂, 将导致岩体(石)微裂纹提前发生延展、扩容, 并更快进入屈服变形阶段。这种变化增加了围岩破裂的突发性, 对围岩稳定性具有较大影响。

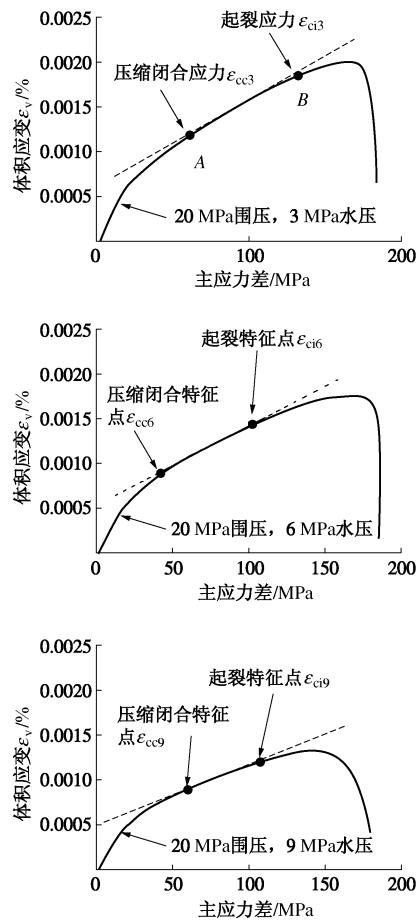


图3 不同水压条件下砂岩的主应力差-体积应变曲线

Fig. 3 Curves of deviator stress versus volumetric strain of sandstone under different hydraulic pressure conditions

### 2.3 扩容特性及参数分析

岩石的变形总体上是由母体的线弹性变形和微裂纹所引起的非弹性变形组成。通过对本次试验结果进行比较和分析可以看出:岩石的非线性变形集中发生在延展扩容特征应力点附近,此时岩石发生微裂纹或微结构间相互滑动,使岩石的体积应变开始偏离线性,即发生初始扩容。因此,对于岩石由微裂纹向宏观裂缝扩展的研究应主要集中在延展扩容特征应力点之后。文章对比了饱和砂岩在无水压及不同水力作用下砂岩的延展扩容及峰值强度特征应力值,对比见表1。

表1 水力作用下砂岩的特征应力值

Table 1 Characteristic values of sandstone samples under hydro-mechanical function

浸泡饱和与否	水力条件		特征应力点		
	围压/MPa	水压/MPa	$\sigma_{cd}$ /MPa	Max $\epsilon_v$	$\sigma_f$ /MPa
是	20	0	95.7637	0.001380	174.9347
是	20	3	166.8250	0.002016	183.7358
是	20	6	169.0481	0.001749	186.6436
是	20	9	142.2300	0.001321	180.4684

注: 砂岩岩样均取自同一块完整岩体。

水力作用下砂岩的特征应力值较无水压条件下常规三轴卸荷试验显著增大。其中,延展扩容应力值 $\sigma_{cd}$ 增幅最大,达到73.2844 MPa。说明损伤扩容行为在水力条件下普遍延时发生,增加了应变能的储备。而峰值破裂应力 $\sigma_f$ 则小幅度增大,增长了11.7089 MPa,说明砂岩在经过初始扩容点后沿卸荷方向强烈扩容。通过分析应力-应变曲线可知,当曲线经过最大压缩体应变之后即开始偏离线性,因此可以将该点所对应的延展扩容特征应力点 $\sigma_{cd0}$ 作为初始扩容点。对于扩容之后的非线性变形,本文利用相对扩容应变 $\epsilon_{cd}^{d'}$ 来表示不同水力条件下应力的变化情况<sup>[16]</sup>,其表达式为

$$\epsilon_{cd}^{d'} = \left| \frac{\epsilon_{cd0} - \epsilon_{cd}}{\epsilon_{cd0}} \right|, \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_{cd}$ 为扩容点后的体积应变量。

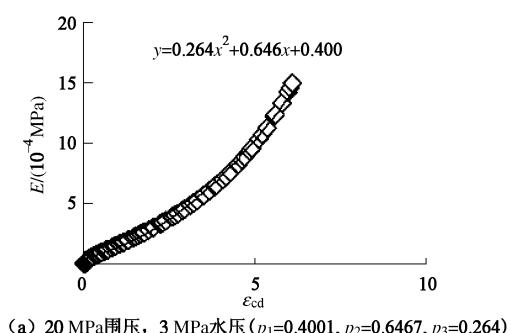
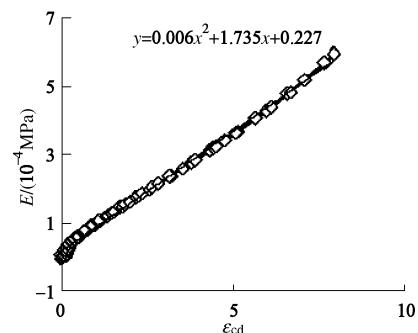
此时认为岩石中的孔隙几乎全部闭合,即损伤(缺陷)极小,将该状态下的变形模量 $E_{cd}$ 作为弹性阶段的弹性模量。用变形模量差 $E'$ 来表示其变化情况,其表达式为

$$E' = |E_{cd} - E|. \quad (2)$$

针对不同水力条件下的相对扩容应变 $\epsilon_v^{d'}$ 和变形模量差 $E'$ ,可以建立多项式回归关系,代表了扩容之后的非线性变形特性。通过拟合可得

$$E' = p_1 + p_2 \epsilon_v^{d'} + p_3 (\epsilon_v^{d'})^2. \quad (3)$$

拟合结果如图4。在不同水力作用下的三轴卸荷试验中,从初始扩容点到峰值强度曲线都较为符合多项式关系,其中 $R^2 \approx 1$ 。

(a) 20 MPa围压, 3 MPa水压 ( $p_1=0.4001, p_2=0.6467, p_3=0.264$ )(b) 20 MPa围压, 6 MPa水压 ( $p_1=0.2276, p_2=1.7357, p_3=0.0065$ )

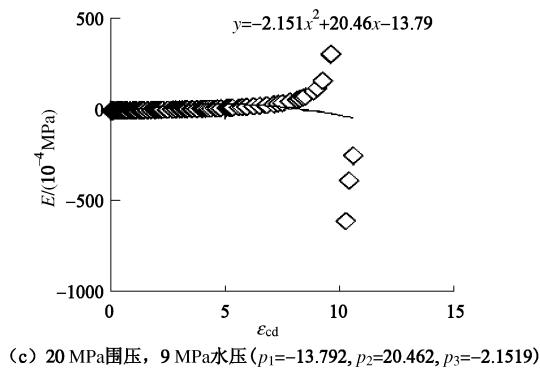


图 4 多项式回归关系

Fig. 4 Polynomial regression relationship

### 3 结论及讨论

通过设计不同的水压力强度条件, 对高围压卸荷条件下砂岩的变形特性、参数弱化特征及起裂-破坏应力-应变曲线中的 4 个特征应力点进行了研究, 主要得到了以下结论:

(1) 基于 20 MPa 围压、3 MPa 水压条件下的三轴卸荷试验, 找出了相应特征应力值对应位置, 结合水力条件下的加载-卸荷曲线在微观上分析了在水-力条件下发生微裂纹压缩闭合、裂纹起裂、裂纹延展扩容和损伤破坏直至产生宏观裂隙的全过程。分析认为, 岩石变形在卸荷前主要以压缩为主; 卸荷后很快达到扩容屈服, 并发生强烈扩容, 直至损伤破裂。

(2) 通过对不同水压条件下应力-应变曲线各特征应力值演化特征的研究, 发现施加水压力作用后的各特征应力值比无水压条件有不同程度地提高, 增加了应变能的储备。从初始扩容到发生破裂所经历的时间间隔变得更短, 曲线斜率也更陡峭, 说明变形破裂更为强烈。随着水压地增大, 特征应力值逐渐减小, 表现在水压越大, 起裂条件越低, 容易达到初始起裂点, 而在高水压条件下压缩极限减小, 扩容提前, 表明岩石的脆性特性进一步增强, 破坏所需的应力要小于低水压条件下的相应要求, 说明高水压条件更容易导致岩石破坏。在工程实践上, 已有案例显示在有水力条件下的隧道依然会发生岩爆, 比如二郎山隧道就发现过这种情况。因此, 本文研究结果能够一定程度解释上述现象, 并对工程上具有水力耦合作用的深埋硬岩隧道在施工过程中的围岩级别调整、支护措施施加, 乃至动态设计都具有重要的工程意义。

(3) 通过对相对扩容应变  $\varepsilon_{cd}^{d'}$  与变形模量差  $E'$  建立多项式回归关系, 推导出不同水压下三轴卸荷试验中从初始扩容到峰值强度曲线都满足关系式  $p_2 \varepsilon_v^{d'} + p_3 (\varepsilon_v^{d'})^2 + (\sigma_1 - \sigma_2) / \varepsilon_v$ , 并对不同水压条件下的  $E' - \varepsilon_{cd}^{d'}$  进行了拟合。

需要指出地是, 本文在分析水力条件下裂纹的特征应力点时主要用到了应变曲线观察法和裂纹应变模型计算。在确定岩样起裂起始点的时候主要采用了 Brace 提出地利用体积应变确定膨胀起始点的方法, 即应变曲线偏离线性时刻的位置。不过有学者认为, 如果在岩体内已经存在有较大密度微裂纹的前提下, 确定裂纹的起裂位置存在困难, 并且具有一定的主观性。但如文中所述, 在不具体确定起裂点位置的前提下, 该方法在宏观上比较不同水压条件下岩样内部微裂纹在起裂时间上的差异具有良好效果。

试验过程中还按照等差级数设置了不同围压、不同水压的复杂条件, 并在试验基础上开展了相关岩石破裂特性研究, 将在以后做进一步探讨。

### 参考文献:

- [1] 刘亚晨, 蔡永庆, 刘泉声, 等. 岩体裂隙结构面的温度-应力-水力耦合本构关系[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 196 - 200. (LIU Ya-chen, CAI Yong-qing, LIU Quan-sheng, et al. Thermal-hydraulic-mechanical coupling constitutive relation of rock mass fracture interconnectivity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 196 - 200. (in Chinese))
- [2] 李根, 唐春安, 李连崇. 水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 593 - 619. (LI Gen, TANG Chun-an, LI Lian-chong. Advances in rock deformation and failure process under water-rock coupling[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 593 - 619. (in Chinese))
- [3] 刘冬梅, 蔡美峰, 周玉斌, 等. 岩石裂纹扩展过程的动态监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 467 - 472. (LIU Dong-mei, CAI Mei-feng, ZHOU Yu-bin, et al. Dynamic monitoring on developing process of rock cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 467 - 472. (in Chinese))
- [4] 卢兴利, 刘泉声, 苏培芳. 考虑扩容碎胀特性的岩石本构模型研究与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1886 - 1893. (LU Xing-li, LIU Quan-sheng, SU Pei-fang. Constitutive model of rocks considering dilatancy-bulking behavior and its calibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1886 - 1893. (in Chinese))
- [5] 李海波, 赵坚, 李俊如, 等. 基于裂纹扩展能量平衡的花岗岩动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1683 - 1688. (LI Hai-bo, ZHAO Jian, LI Jun-ru, et al. Study on constitutive relation of rock under dynamic

- compression based on energy balance during crack growth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1683 - 1688. (in Chinese))
- [6] 李海波, 赵 坚, 李俊如, 等. 三轴情况下花岗岩动态力学特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 470 - 474. (LI Hai-bo, ZHAO Jian, LI Jun-ru, et al. Triaxial compression tests of a granite[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 470 - 474. (in Chinese))
- [7] 陈国庆, 冯夏庭, 江 权, 等. 考虑岩体劣化的大型地下厂房围岩变形动态监测预警方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 3012 - 3018. (CHEN Guo-qing, FENG Xia-ting, JIANG Quan, et al. Study of dynamic early warning method of surrounding rock deformation monitoring for large underground powerhouse considering rock degradation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 3012 - 3018. (in Chinese))
- [8] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philos Trans R Soc Lond, 1921, 221A: 163 - 198.
- [9] GRIFFITH A A. Theory of rupture[C]// Proceedings of the 1st International Congress on Applied Mechanics. Delft: Technology Boekhandelen Drukkerij, 1924: 55 - 63.
- [10] 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))
- [11] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 742 - 750. (LI Tian-bin. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnel at epicenter zones of great Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 742 - 750. (in Chinese))
- [12] 吉小明, 杨春和, 白世伟. 岩体结构与岩体水力耦合计算模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 763 - 768. (JI Xiao-ming, YANG Chun-he, BAI Shi-wei. Structure and hydro-mechanical coupled calculation model for rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 763 - 768. (in Chinese))
- [13] ROBERT L K. Microcracks in rocks:areview[J]. Tectonophysics, 1983, 100(3): 449 - 480.
- [14] 黄书岭. 高应力下脆性岩石的力学模型与工程应用研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008. (HUANG Shu-ling. Study on mechanical model of brittle rock under high stress condition and its engineering applications[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese))
- [15] BRACE W F, PAULDING B, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Geophys Res, 1966, 71: 3939 - 3953.
- [16] 黄 伟, 沈明荣, 张清照. 高围压下岩石卸荷的扩容性质及其本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3475 - 3481. (HUANG Wei, SHEN Ming-rong, ZHANG Qing-zhao. Study of unloading dilatancy property of rock and its constitutive model under high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3475 - 3481. (in Chinese))