

# 循环加、卸载孔隙水压力对砂岩变形特性 影响实验研究

许江, 杨红伟, 李树春, 姜永东

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 利用 MTS815 岩石力学实验系统对饱和砂岩进行三轴等围压情况下的循环加、卸载孔隙水压力实验。结果表明: 压密阶段的加、卸载曲线中出现了很多“Z”状的波动, 这些小波的出现没有规律性, 初始残余变形比较大, 还没有形成明显的滞回曲线。在弹性耦合阶段稳定滞回曲线加载时, 应变呈上凹“Z”状波动, 在到达上限值前出现拐点, 应变达最大值; 卸载时, 应变呈下凸“Z”状波动, 在到达下限值前出现拐点, 应变达最小值, 该阶段形成稳定的滞回曲线, 表现形式由疏变密, 稳定滞回曲线包含弹性变形向塑性变形演化。在孔隙水压力的不同上限值和不同幅值区间的耗散能构成不对称“X”形。在加载段, 随着孔隙水压力增大, 耗散能逐渐减小; 卸载段, 随着孔隙水压力减小, 耗散能逐渐减小。“X”形的交点出现的位置和夹角与不同上限值和不同幅值区间有关。在循环加、卸载孔隙水压力作用下, 残余应变与循环次数的关系符合乘幂负指数关系。

**关键词:** 岩石力学; 循环加、卸载; 孔隙水压力; 滞回曲线; 耗散能; 残余应变

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)05 - 0892 - 08

## EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECTS OF CYCLIC LOADING AND UNLOADING PORE WATER PRESSURES ON DEFORMATION CHARACTERISTIC OF SANDSTONE

XU Jiang, YANG Hongwei, LI Shuchun, JIANG Yongdong

(Key Laboratory for Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Triaxial compression experiments have been carried out to study the effects of the cyclic loading and unloading pore water pressures on the deformation characteristic of saturated sandstone when the axial stress and confining pressure are invariant using the MTS815 rock mechanics testing system. The experimental results have shown that there are anomalistic Z-shaped nonlinear wave in the stress-strain hysteresis curve at the stage of compaction under loading and unloading; and initial residual deformation is relatively large, therefore, the hysteresis loop is not so obvious. In addition, it has been observed that at the elastic coupled stage, the stress-strain curve which rises with concave Z-shaped wave appears inflection point before coming to a head; at this point, strain is the maximum at loading. While at unloading, it is inflexion at the stress-strain curve which drops with convex Z-shaped wave before touching bottom; at the same time, the strain fetches the minimum. Meanwhile the stress-strain hysteresis loop, showing the stage from sparse to dense, is stable which indicates evolution from elastic deformation to plastic deformation. The dissipation energy of different upper limits and different amplitude areas forms into asymmetrical X-shaped at the pore water pressure. The dissipation energy decreases gradually at

**收稿日期:** 2008 - 11 - 05; **修回日期:** 2009 - 02 - 08

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50534080, 50574108); 教育部博士点基金资助项目(20060611006)

**作者简介:** 许江(1960 -), 男, 博士, 1982年毕业于重庆大学矿山工程物理专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事有关岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

loading with the increase of pore water pressure. Otherwise, at unloading, it decreases gradually with reducing of pore water pressure. The position and angle of the X-shaped crossing are related to the different upper limits and amplitude areas. The relationship between the residual strain and cyclic numbers accords with the power of negative index under the cyclic loading and unloading pore water pressures.

**Key words:** rock mechanics; cyclic loading and unloading; pore water pressure; hysteresis loop; dissipation energy; residual strain

## 1 引言

目前三峡库区蓄排水对库区边坡及地基的稳定性影响是一个严峻而现实的问题。研究循环孔隙水压力作用下, 岩(石)体变形的预测方法有十分重要的意义。国内外在岩(石)体变形演化规律及孔隙水压力研究方面取得了一定的成果<sup>[1~19]</sup>。D. J. Holcomb<sup>[1]</sup>对玄武岩和花岗岩的实验结果表明, 岩石在单轴循环荷载作用下, 其应力-应变曲线具有非线性、滞后性、离散记忆和能量耗散等特征。岩石在其颗粒之间存在微裂隙、颗粒接触面、孔洞等机械缺陷, 这些细观结构在不同的局部应力作用下表现出不同的力学行为。A. N. Tutuncu 等<sup>[2, 3]</sup>对多孔隙颗粒状沉积岩在单轴循环应力作用下的情况进行了研究, 指出应力-应变滞后回线的特征与施加荷载的频率、应变振幅以及岩石的饱和流体特性等因素有关, 并影响岩石的衰减特性。M. S. Bruno 和 F. M. Nakagawa<sup>[4]</sup>通过现场实验发现孔隙水压力对裂纹扩展和贯通的作用效果是双向的。孔隙水压力的作用效果取决于孔隙水压力的大小和梯度, 裂纹尖端孔隙水压力的增加可促使裂纹的扩展, 而孔隙水压力的梯度变化则可能阻碍裂纹的扩展。周海林和王星华<sup>[5]</sup>认为, 砂土应力状态与孔隙水压力发展之间的关系密切, 剪胀与卸荷体缩是影响孔隙水压力发展的主要因素。唐春安和杨天鸿<sup>[6]</sup>通过对孔隙水压作用下岩石试件加载破坏过程的数值模拟, 对孔隙水压力大小和梯度对岩石试样中裂纹的萌生和扩展进行了数值模拟研究。

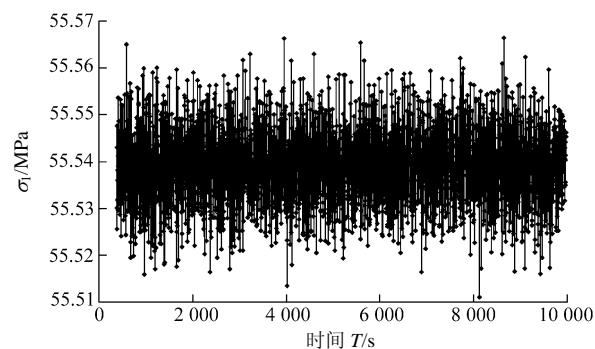
上述研究成果对研究岩石力学特征及变形特性和砂土应力状态与孔隙水压力发展具有重要的参考价值, 但上述研究成果均基于某个特定影响下所得到的结果。如果需要同时考虑岩石在三轴应力状态与循环孔隙水压力相互作用关系, 均存在一定的局限性。基于已有研究成果<sup>[14~16]</sup>, 在大量的实验基础上, 设计了一种在三轴应力状态下, 改变循环加、卸载孔隙水压力的上、下限进行测试砂岩的变形特

性及相关参数。

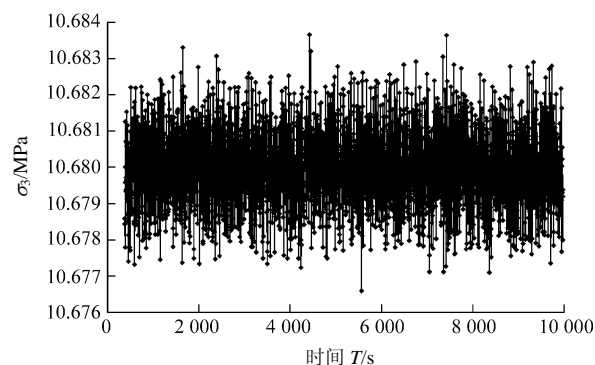
## 2 实验方法

岩样取自三峡库区某边坡风化带以下的砂岩, 将所采集到的砂岩样采用湿式加工法加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体。测定相关物理参数后, 将砂岩岩样在常温下浸泡水中 90 d, 充分饱和砂岩。实验采用 MTS815 岩石力学实验系统作为动力设备, 其中围压控制柜和孔隙水压力控制柜分为独立系统由计算机控制和采集数据。实验步骤如下:

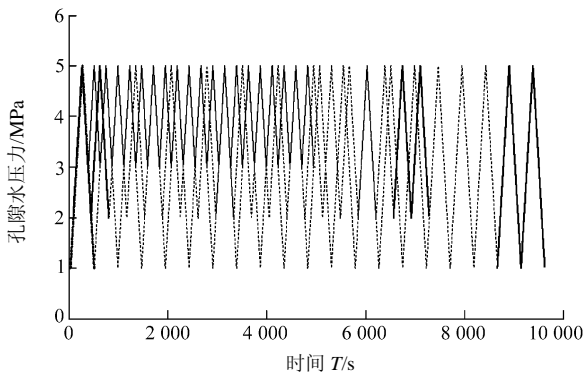
(1) 施加等围压三轴荷载。轴向应力以 10.87 MPa/min 的加载速率先加载到 10.18 MPa; 围压以 1 MPa/min 的加载速率加载到 10.680 MPa(以三轴平均抗压峰值的 10% 确定), 并保持恒定; 轴向应力按相同加载速率从 10.18 MPa 加载到 55.54 MPa(以三轴平均抗压峰值的 52% 确定), 并保持恒定(见图 1(a), (b))。



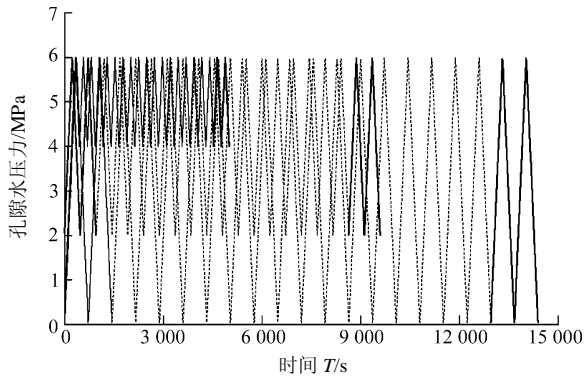
(a)  $\sigma_1$ - $T$  关系曲线



(b)  $\sigma_3$ - $T$  关系曲线



(c) 上限为 5.0 MPa 的孔隙水压力与时间关系曲线



(d) 上限为 6.0 MPa 的孔隙水压力与时间关系曲线

图 1 孔隙水压力与时间关系

Fig.1 Relationship of pore pressure and time

(2) 将孔隙水压力进行上、下限加载和卸载。以 1 MPa/min 的速率从下限值开始加载到上限值, 到达上限值后以相同速率卸载到下限值(根据要求设定上限值固定, 下限值改变的孔隙水压力实验, 加载路径见图 1(c), (d))。

(3) 不间断重复步骤(2), 直至完成实验设定的循环次数  $N$ 。

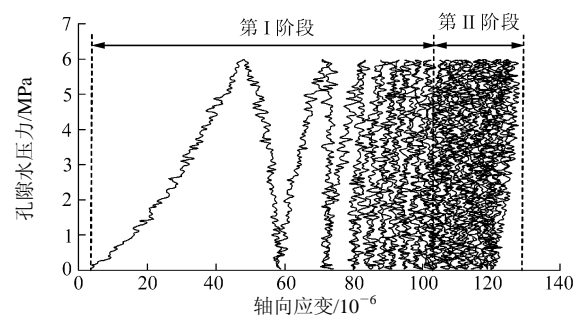
(4) 卸孔隙水压力进行三轴破坏实验。完成循环实验后, 将孔隙水压力卸到 0, 轴向应力以相同的速率卸载到 10.18 MPa, 围压保持恒定; 轴向应力以相同加载速率从 10.18 MPa 加载到峰值破坏。

(5) 更换试件, 进行下一个实验项目。

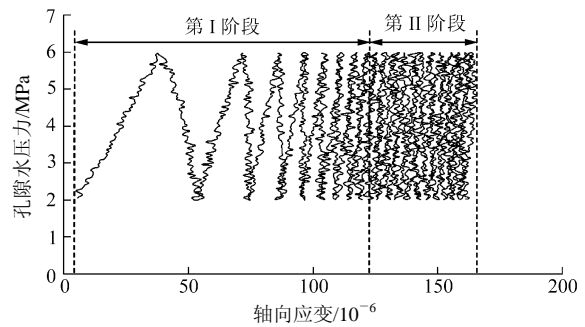
### 3 实验结果与分析

#### 3.1 循环孔隙水压力作用机制分析

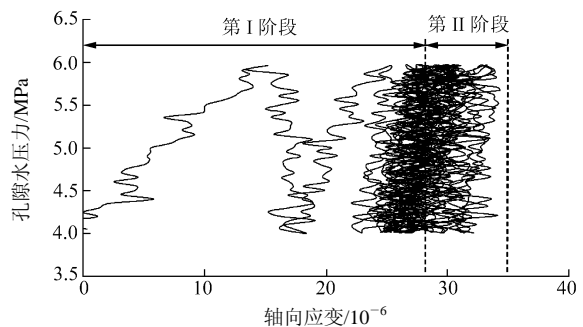
根据图 2, 分析孔隙充水微孔隙压密阶段和弹性耦合阶段的作用机制, 阐述循环孔隙水压力和轴向应变的关系曲线的每个阶段发展趋势(图 2 的分图名中 PP 表示孔隙水压力; AS 表示轴向应变; 0-6 表示孔隙水压力在 0-6 MPa 区间循环, 下同)。从实验设备安全考虑, 本次实验主要进行了以下 2 个阶段的实验:



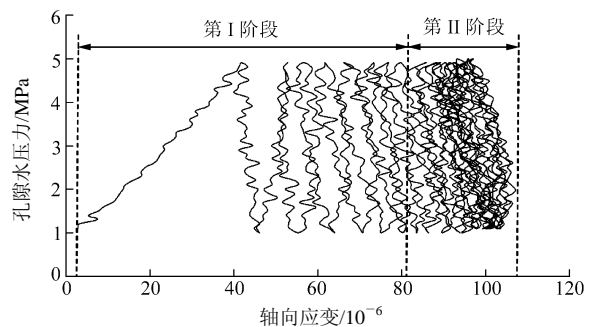
(a) PP-AS-0-6



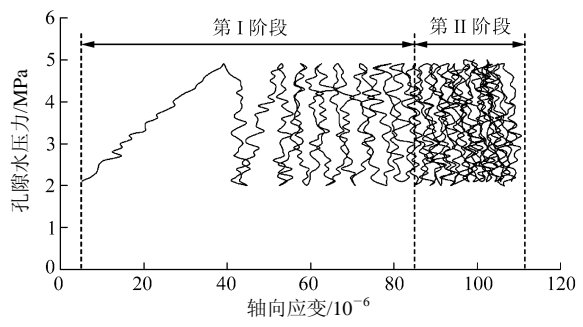
(b) PP-AS-2-6



(c) PP-AS-4-6



(d) PP-AS-1-5



(e) PP-AS-2-5

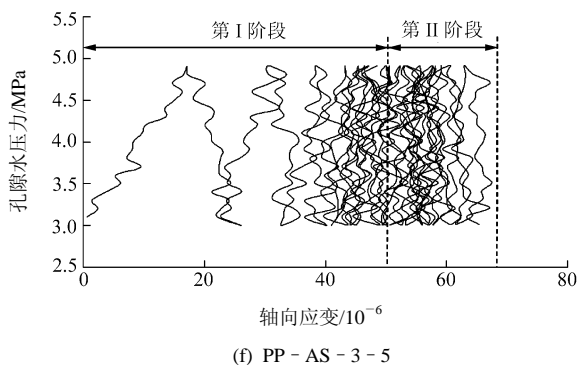


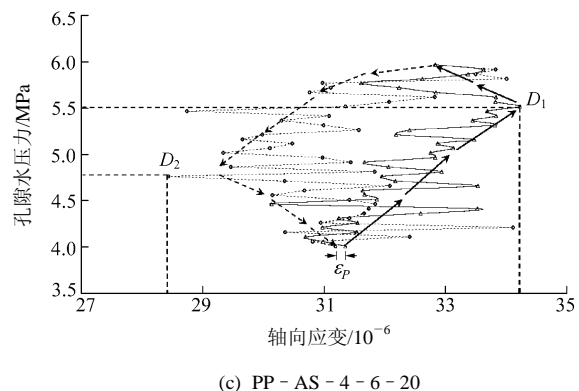
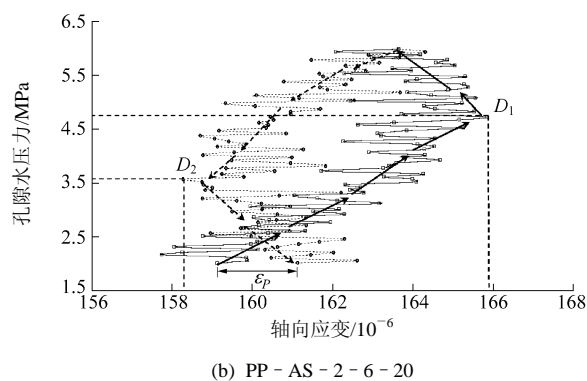
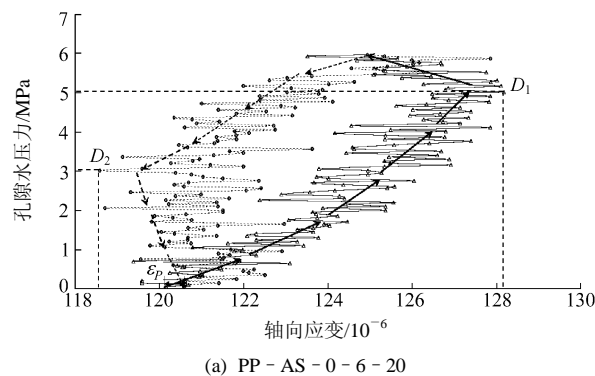
图 2 循环加、卸载孔隙水压力与轴向应变关系曲线  
Fig.2 Curves of cyclic loading and unloading pore pressure vs. axial strain

第 I 阶段：孔隙充水微孔隙压密阶段。砂岩中原生微裂隙大量存在于内部结构间，施加三轴等围压荷载时，原生微裂隙被压密；进行孔隙充水时，贯通原生微裂隙因充水被压密，因而在压密阶段砂岩初始轴向应变变化很大。在循环孔隙水压力作用下，轴向应变曲线加载时呈上凹形趋势线。在加载和卸载的趋势线中出现了很多“Z”状的波动，这些小波的出现没有规律性。但从整个孔隙水压力发展趋势来看，随着循环孔隙水压力加载，轴向应变呈“Z”状波动性的逐步上升；随着循环孔隙水压力卸载，轴向应变呈“Z”状波动性的逐步下降。这可以理解为，在循环阶段，砂岩在循环孔隙水压力作用下作调整，颗粒间出现小范围的相对滑动与摩擦，会产生弹性变形与塑性变形，在不同的时刻与不同的区域，表现为不规则的弹性变形与塑性变形交替演化。从该阶段来看，微裂隙、颗粒接触面、孔洞等还处于压密阶段，初始残余变形比较大，还没有形成明显的滞回曲线。

第 II 阶段：孔隙水压力弹性耦合阶段。由于砂岩应变包括弹性应变与塑性应变，两者对孔隙压应力的影响不一样。弹性应变随着外荷载的变化而变化，这种体应变必然导致一部分颗粒间将应力传递给孔隙水，使得孔隙水压力上升，从而引起有效应力的减少，导致以弹性变形形式储存在颗粒中的可恢复应变释放，由于体积相容条件，循环的结果是：孔隙体积的变化等于砂岩结构的净体积变化。同时，孔隙水压力变化导致横向上颗粒产生摩擦或相对滑动，对砂岩塑性变形产生影响。从该时段来看，孔隙水压力和砂岩孔隙处于耦合阶段，随着循环次数增加逐渐形成稳定的滞回曲线，表现形式由疏变密。本实验主要研究这个阶段的变形演化规律。

### 3.2 循环孔隙水压力与初始屈服条件

在分解基本稳定滞回曲线基础上，研究弹性耦合阶段的滞回曲线演化规律。将多个循环分解为单个循环曲线(见图 3，分图名中 20 表示第 20 个循环)，单个稳定滞回曲线中轴向应变在加载段呈上凹形，随着孔隙水压力增加，伴随有“Z”状波动上升，在到达孔隙水压力上限值前，应变出现拐点( $D_1$ )达到最大值；卸载段呈下凸形，随着孔隙水压力减小，伴随有“Z”状波动下降，在到达孔隙水压力下限值前，应变出现拐点( $D_2$ )达到最小值。因此，在上、下限应力值的轴向应变并非应变的最值。在变化过程中，弹性变形随循环次数的增加逐渐趋于稳定；而塑性变形随循环次数的增加而不断积累，残余应变随着循环次数的增加逐渐减小并趋于稳定。在孔隙水压力作用下，饱和砂岩受到荷载作用最初产生弹性变形，随着荷载逐渐增加到一定程度，有可能使砂岩内应力较大的部位出现塑性变形，这种由弹



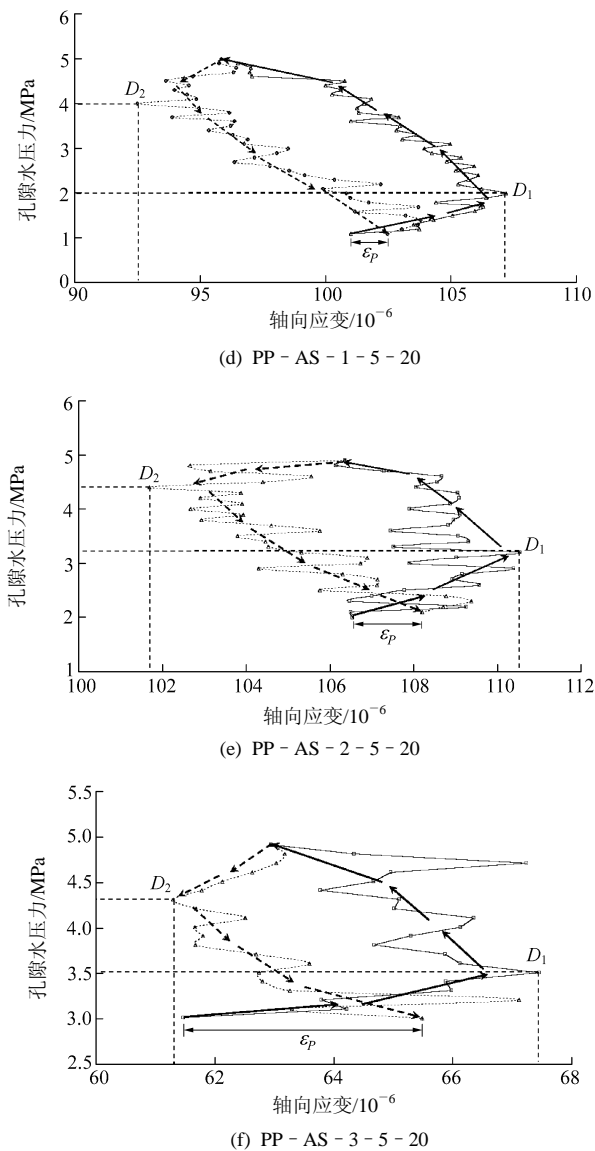


图3 循环加、卸载孔隙水压力与轴向应变分解曲线  
Fig.3 Disassembly curves of cyclic loading and unloading pore pressure vs. axial strain

性状态进入塑性状态属于初始屈服<sup>[12]</sup>。由于实际饱和砂岩在循环孔隙水压力作用下，所经历的变形过程的复杂性，难以建立一个方程来表达应力-应变关系。因此，从能量角度考虑，采用耗散能理论来判定弹性变形、初始屈服和塑性变形。在分解的单个稳定滞回曲线中，加载段出现了拐点  $D_1$ ，卸载段出现拐点  $D_2$ 。

设定点  $D_1(P_1, \varepsilon_1)$ ,  $D_2(P_2, \varepsilon_2)$ ,  $D_i(P_i, \varepsilon_i)$ ,  $D_j(P_j, \varepsilon_j)$ 。其中， $D_i$ 为曲线加载段内的点， $D_j$ 为曲线卸载段内的点。运用孔隙水压力耗散能判定初始屈服。

对比循环孔隙水压力上限固定，下限变化的稳定滞回曲线(见图3)，其中初始屈服不是固定不变的，它与孔隙水压力上限值、幅值区间等有关。由不同孔隙水压力上限值的稳定滞回曲线对比(见

图3(a), (d))可知：在  $P_{max} = 6 \text{ MPa}$  曲线中初始屈服点处， $D_{P_1} > D_{P_2}$ ，在  $P_{max} = 5 \text{ MPa}$  曲线中初始屈服点处， $D_{P_1} < D_{P_2}$ ，说明初始屈服与孔隙水压力上限值大小相关。对相同上限值不同幅值区间的稳定滞回曲线对比(见图3(a)~(f))可知，初始屈服  $D_1$ ,  $D_2$  具体位置不同，说明初始屈服与孔隙水压力幅值区间相关。孔隙水压力耗散能定义式如下：

(1) 加载段：

$$\Delta W_{p+} = (P_i - P_1)(\varepsilon_i - \varepsilon_1) \quad (1a)$$

(2) 卸载段：

$$\Delta W_{p-} = (P_j - P_2)(\varepsilon_j - \varepsilon_2) \quad (1b)$$

式中： $\Delta W_{p+}$  为加载段耗散能； $\Delta W_{p-}$  为卸载段耗散能； $P_i$ ,  $P_j$ ,  $P_1$  和  $P_2$  均为孔隙水压力； $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_j$ ,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  均为轴向应变。

根据式(1)判定：在加载段  $\Delta W_p > 0$  时，说明孔隙水压力与轴向应变方向相同对砂岩做功，砂岩在蓄积能量，处于弹性变形阶段( $P_i < P_1$ )； $\Delta W_p = 0$  时，正处于初始屈服点，耗散能处于瞬间平衡( $P_i = P_1$ )； $\Delta W_p < 0$  时，孔隙水压力与轴向应变方向相反对砂岩做负功，砂岩在耗散能量，处于塑性变形阶段( $P_i > P_1$ )。卸载段，同理可判定。

因此，简化式(1)可得耗散能判定式为

$$\Delta W_p = dP d\varepsilon \begin{cases} > 0 & (\text{弹性变形}) \\ = 0 & (\text{初始屈服}) \\ < 0 & (\text{塑性变形}) \end{cases} \quad (2)$$

在循环孔隙水压力作用下，稳定滞回曲线演化过程包含着弹性变形向塑性变形演化的过程，运用耗散能定义式从理论上判定弹性变形、初始屈服和塑性变形区域(见图4)。

在孔隙水压力的不同上限值和不同幅值区间的耗散能构成不对称“X”形。在加载段，随着孔隙水压力增大，耗散能逐渐减小，达到初始屈服后耗散能为负值；卸载段，随着孔隙水压力减小，耗散能逐渐减小，达到初始屈服后耗散能为负值，加卸载段各有不同的变化趋势，导致不对称的“X”形。对比不同上限值孔隙水压力的耗散能曲线，在  $P_{max} = 6 \text{ MPa}$  曲线中初始屈服点处， $P_1 > P_2$ ；在  $P_{max} = 5 \text{ MPa}$  曲线中初始屈服点  $P_1 < P_2$ ，“X”形的交点出现的位置不同。 $P_{max} = 6 \text{ MPa}$  曲线出现在弹性变形区， $P_{max} = 5 \text{ MPa}$  曲线出现在塑性变形区。对比不同幅值区间的耗散能曲线，加、卸载交叉角与幅值区间大小成正相关性，区间大则交叉角大，反之

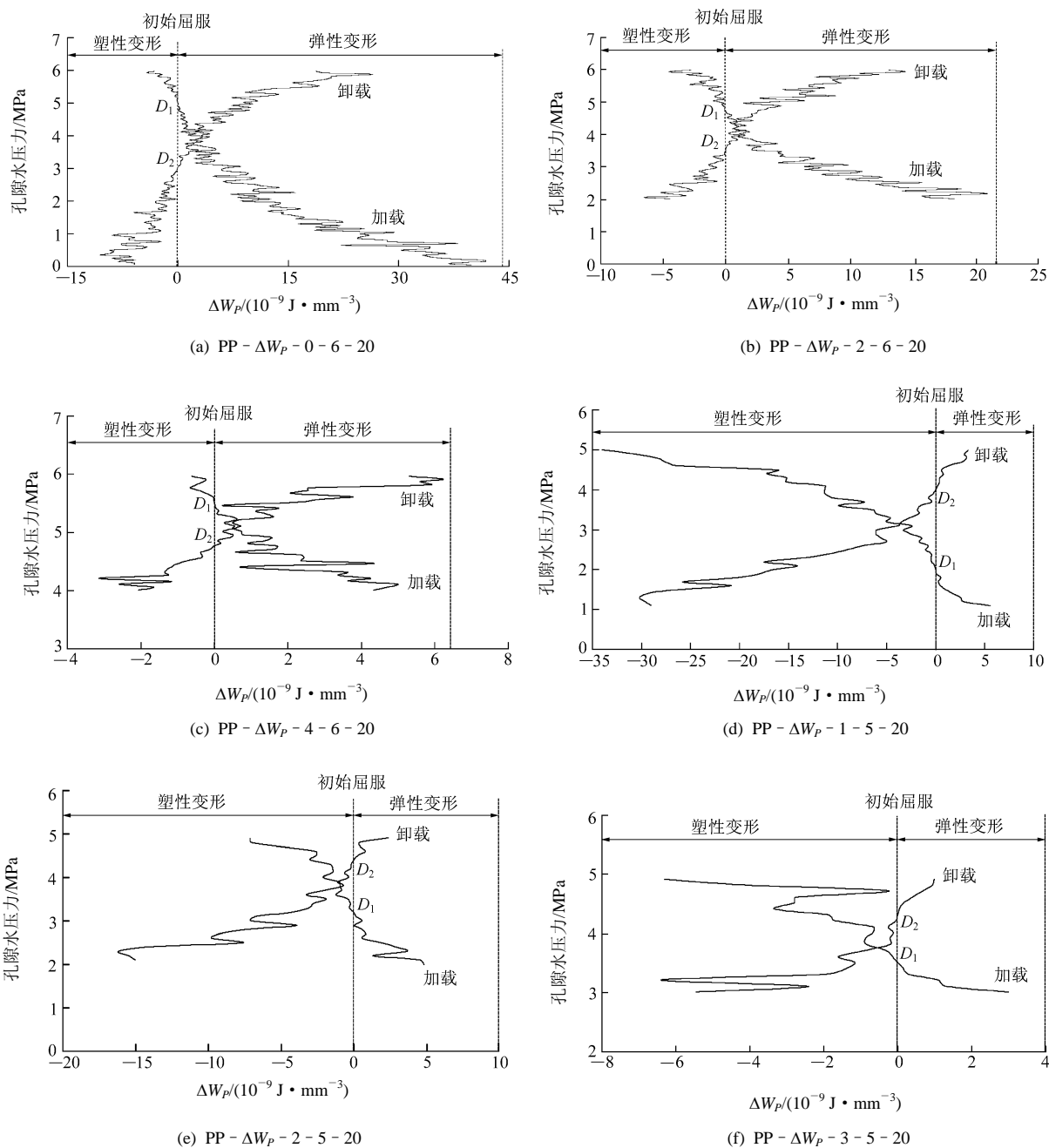


图 4 加、卸载孔隙水压力与耗散能关系

Fig.4 Curves of loading and unloading pore pressure vs. dissipated energy

亦然。

因此, 运用耗散能定义式不仅从理论上判定弹性变形、初始屈服和塑性变形区域, 还从不同的耗散能对比曲线中说明了弹性变形、初始屈服和塑性变形的演化规律。

### 3.3 残余应变与循环次数的关系

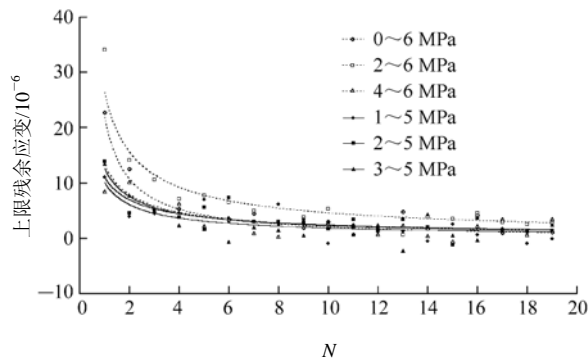
在循环孔隙水压力作用下, 饱和砂岩应力 - 应变滞回曲线演化过程中, 由于弹性变形和塑性变形的初始屈服位置不同, 造成残余变形的大小不同。

在孔隙充水微孔隙压密阶段, 砂岩中原生微裂隙大量存在于内部结构间, 轴向应变在弹性变形和塑性变形交替过程中变化很大, 未形成稳定的滞回曲线, 初始残余变形较大, 随着循环次数增加呈衰减趋势; 在孔隙水压力弹性耦合阶段, 弹性变形和塑性变形的初始屈服位置基本稳定, 残余变形随着循环次数趋于稳定。由于在循环孔隙水压力作用下, 滞回曲线点是瞬时发生, 所以上、下限转折会出现残余应变 $\epsilon_p$ (见图 3)。

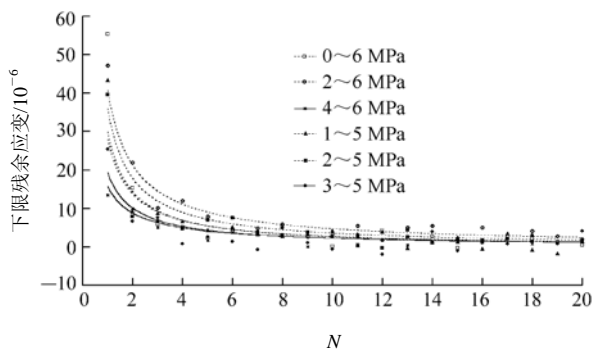
结合实验数据分析结果，得到了循环孔隙水压力作用下饱和砂岩的上、下限残余应变与循环次数的拟合曲线(见图 5)。分析残余应变实验数据可知，随着循环次数的增加，初始残余应变衰减很快，逐渐达到稳定。通过拟合参数曲线可知，残余应变与循环次数的关系符合乘幂负指数关系，即

$$\varepsilon_p = AN^b \quad (3)$$

式中：A，b 均为拟合参数(见表 1，2)。



(a) 上限残余应变与循环次数关系曲线



(b) 下限残余应变与循环次数关系曲线

图 5 残余应变与循环次数关系曲线

Fig.5 Curves of residual strain vs. cyclic numbers

表 1 上限拟合参数

Table 1 Parameters of fitting curves at upper value limit

| 孔隙水压力/MPa | $A_{\uparrow}$ | $b_{\uparrow}$ | $R^2$   |
|-----------|----------------|----------------|---------|
| 0~6       | 21.905         | -1.029 7       | 0.937 5 |
| 2~6       | 26.402         | -0.758 2       | 0.927 7 |
| 4~6       | 13.294         | -0.750 4       | 0.762 9 |
| 1~5       | 11.014         | -0.661 8       | 0.878 3 |
| 2~5       | 12.601         | -0.743 3       | 0.905 4 |
| 3~5       | 10.099         | -0.736 7       | 0.818 5 |

通过对比循环孔隙水压力作用下，不同上限值和不同幅值区间的上、下限残余应变与循环次数的

表 2 下限拟合参数

Table 2 Parameters of fitting curves at lower value limit

| 孔隙水压力/MPa | $A_{\downarrow}$ | $b_{\downarrow}$ | $R^2$   |
|-----------|------------------|------------------|---------|
| 0~6       | 35.910           | -1.004 5         | 0.890 9 |
| 2~6       | 40.701           | -0.938 5         | 0.923 7 |
| 4~6       | 15.755           | -0.842 5         | 0.870 0 |
| 1~5       | 29.961           | -1.061 1         | 0.913 3 |
| 2~5       | 27.936           | -1.018 1         | 0.921 7 |
| 3~5       | 19.261           | -0.935 0         | 0.825 7 |

数据及拟合曲线，说明残余应变与循环次数关系曲线符合乘幂负指数关系。

## 4 结 论

本文通过对饱和砂岩进行三轴等围压情况下的循环孔隙水压力实验，分析了孔隙充水微孔隙压密阶段和弹性耦合阶段的作用机制，研究了稳定滞回曲线的初始屈服条件，拟合了残余应变与循环次数的关系曲线，得到了如下结论：

(1) 循环孔隙水压力的 2 个阶段的作用机制：压密阶段，在加载和卸载曲线中出现了很多“Z”状的波动，这些小波的出现没有规律性，初始残余变形比较大，还没有形成明显的滞回曲线。弹性耦合阶段，砂岩应变包括弹性应变与塑性应变，稳定滞回曲线加载段，应变呈上凹“Z”状波动上升，在到达上限值前出现拐点，应变达最大值；卸载段，应变呈下凸“Z”状波动下降，在到达下限值前出现拐点，应变达最小值。该阶段形成稳定的滞回曲线，表现形式由疏变密。

(2) 运用耗散能定义式从理论上判定弹性变形、初始屈服和塑性变形区域。在孔隙水压力的不同上限值和不同幅值区间的耗散能构成不对称“X”形。在加载段，随着孔隙水压力增大，耗散能逐渐减小，达到初始屈服后耗散能为负值；卸载段，随着孔隙水压力减小，耗散能逐渐减小，达到初始屈服后耗散能为负值。“X”形的交点出现的位置和夹角与不同上限值和不同幅值区间有关。

(3) 分析实验参数和拟合曲线，得出残余应变与循环次数的关系符合乘幂负指数关系，曲线特征是随着循环次数的增加，初始残余应变衰减很快，

逐渐达到稳定。

### 参考文献(References):

- [1] HOLCOMB D J. Memory, relaxation, and microfracturing in dilatant rock[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(7): 6 235 - 6 248.
- [2] TUTUNCU A N, PODIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, part I: effect of frequency and strain amplitude[J]. *Geophysics*, 1998, 63(1): 184 - 194.
- [3] TUTUNCU A N, PODIO A L, GREGORY A R, et al. Nonlinear viscoelastic behavior of sedimentary rock, part II: hysteresis effects and influence of type of fluid on elastic moduli[J]. *Geophysics*, 1998, 63(1): 195 - 203.
- [4] BRUNO M S, NAKAGAWA F M. Pore pressure influence on tensile fracture propagation in sedimentary rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1991, 28(4): 261 - 273.
- [5] 周海林, 王星华. 动三轴实验中的饱和砂土孔隙水压力分析[J]. *铁道学报*, 2002, 24(6): 93 - 98.(ZHOU Hailin, WANG Xinghua. Study on the pore water pressure of saturated sand in dynamic triaxial test[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2002, 24(6): 93 - 98.(in Chinese))
- [6] 唐春安, 杨天鸿. 孔隙水压力对岩石裂纹扩展影响的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2003, 24(增): 17 - 20.(TANG Chun'an, YANG Tianhong. Numerical simulation of influence of pore water pressure magnitude and gradient on fracture propagation in brittle heterogeneous rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Supp.): 17 - 20.(in Chinese))
- [7] 杨天鸿, 唐春安, 徐 涛, 等. 岩石破裂过程的渗流特性——理论、模型与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 54 - 55.(YANG Tianhong, TANG Chun'an, XU Tao, et al. Seepage characteristic in rock failure—theory, model and applications[M]. Beijing: Science Press, 2004: 54 - 55.(in Chinese))
- [8] LADE P V, DE BOER R. The concept of effective stress for soil, concrete and rock[J]. *Geotechnique*, 1997, 47(1): 61 - 78.
- [9] NUR A, BYERLEE J. Exact effective stress law for elastic deformation of rocks with fluids[J]. *Journal of Geophysical Research* 1971, 76(26): 6 414 - 6 419.
- [10] GARY M, TAPAN M. Seismic pore space compressibility and Gassmann's relation[J]. *Geophysics*, 1995, 60(6): 1 743 - 1 749.
- [11] 史 调, 杨东全, 杨慧珠. 岩石的孔隙弹性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, 36(2): 214 - 220.(SHI Ge, YANG Dongquan, YANG Huizhu. The research of rock poroelasticity[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, 36(2): 214 - 220.(in Chinese))
- [12] 王春玲. 塑性力学[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2005: 35 - 50.(WANG Chunling. Plastic mechanics[M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2005: 35 - 50.(in Chinese))
- [13] IDRIS I M, DOBRY R, SINGH R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1978, 104(12): 1 427 - 1 447.
- [14] 王 军, 蔡袁强. 循环荷载作用下饱和软黏土应变累积模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2): 332 - 338.(WANG Jun, CAI Yuanqiang. Study on accumulative plastic strain model of soft clay under cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 332 - 338.(in Chinese))
- [15] 席道瑛, 陈运平, 陶月赞, 等. 岩石的非线性弹性滞后特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1 086 - 1 093.(XI Daoying, CHEN Yunping, TAO Yuezan, et al. Nonlinear elastic hysteretic characteristic of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1 086 - 1 093.(in Chinese))
- [16] 陈运平, 王思敬, 王思志. 岩石应力 - 应变滞后现象的定量研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增 2): 4 066 - 4 073.(CHEN Yunping, WANG Sijing, WANG Enzhi. Quantitative study on stress-strain hysteretic behaviors in rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.2): 4 066 - 4 073.(in Chinese))
- [17] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[R]. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 1975: 1 - 17.
- [18] 许 江, 尹光志, 王 鸿, 等. 不同应力水平时砂岩滞回曲线演化的实验研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2006, 28(2): 40 - 42.(XU Jiang, YIN Guangzhi, WANG Hong, et al. Experimental research on evolution of hysteresis curve of rock in different axial stress levels[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2006, 28(2): 40 - 42.(in Chinese))
- [19] 王 鸿, 许 江, 杨秀贵. 循环荷载条件下岩石塑性滞回环的演化规律[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2006, 29(4): 80 - 82.(WANG Hong, XU Jiang, YANG Xiugui. Evolution of plastic-loop of fine-sandstone under the loading and unloading conditions[J]. *Journal of Chongqing University(Natural Science)*, 2006, 29(4): 80 - 82.(in Chinese))