

# 孔隙水压力与恒定时间对砂岩变形的实验研究

许江, 杨红伟, 彭守建, 张媛, 李道娟, 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:** 探讨三峡库水位在 145—175 m 之间涨落及蓄水时水压对岩(石)体的变形特性影响。以实验为基础,进行了不同轴向应力( $\sigma_1 = 55.54, 34.18$  和  $12.82$  MPa)条件下,周期孔隙水压力( $P_{\min} = 2$  MPa,  $P_{\max} = 6$  MPa)与上、下限恒定时间( $\Delta T = 120$  和  $240$  s)作用下砂岩的变形特性实验。通过分析  $\epsilon_1 - T$  与  $p - T$  关系曲线和  $p - \epsilon_1$  滞回曲线,可知: $\epsilon_1 - T$  砂岩曲线呈连续正弦波形演化,当孔隙水压力加载时,应变减小;上限恒定时,应变持续减小到谷值;卸载时,应变逐渐增大;下限恒定时,应变持续增大到峰值。砂岩  $p - \epsilon_1$  滞回曲线的 2 个阶段变化,一是微孔隙压密阶段,未形成明显的滞回曲线;二是孔隙水压力耦合阶段,形成了稳定的滞回曲线,表现形式由疏变密,并且稳定的滞回曲线呈逆时针演化。还对比了不同轴向应力和不同恒定时间条件下,每个  $p - \epsilon_1$  滞回曲线的四区段(加载段、卸载段、上限恒定段和下限恒定段)的  $\Delta\epsilon - n$  关系曲线。

**关键词:** 孔隙水压力;砂岩;恒定时间;滞回曲线;应变差

**中图分类号:** TU458.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2010)02-0019-07

## Experimental Analysis on the Deformation of Sandstone under Pore Pressure and Constant Time

XU Jiang, YANG Hong-wei, PENG Shou-jian, ZHANG Yuan, LI Dao-juan, JIANG Yong-dong

(Key Lab. for Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to discuss the deformation characteristics of rock mass under different water levels changing between 145 and 175 meter in the Three Gorges reservoir area, an experiment was carried out for the studying sandstone deformation under the conditions of three different axial stresses ( $\sigma_1 = 55.54, 34.18, 12.82$  MPa), two cyclic pore pressures ( $P_{\min} = 2$  MPa,  $P_{\max} = 6$  MPa) and two kinds of constant time (the upper limit time and the lower limit time ( $\Delta T = 120, 240$  s)). With  $\epsilon_1 - T$  curves and  $p - T$  curves, as well as  $p - \epsilon_1$  hysteresis curves, it was found that the curves were continuous sine wave-shaped curves. At first, the strain decreased with loading pore pressure. And then, it decreased to valley value with pore pressure at stable upper limit. Next, it increased with unloading pore pressure and increased to peak value with pore pressure at stable lower limit. The  $p - \epsilon_1$  hysteresis curves of the sandstone had two typical stages. And one was caused by the closure of some primary pores and crack under increasing compaction, in which the strain did not form obviously hysteresis curves, and the other was pore pressure coupling stage which showed obvious hysteresis curve in form of the anti-clockwise from the dispersed to the dense. In addition,  $\Delta\epsilon - n$  curves in four sections (loading, unloading, steady upper limit, steady lower limit) of  $p - \epsilon_1$  curves were

收稿日期: 2009-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50974141); 国家重大专项(2008ZX05034-002)

作者简介: 许江(1960-), 男, 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, (E-mail) jiangxu@cqu.edu.cn.

compared and respectively analyzed in the condition of various axial stress and different constant time .

**Key words:** pore pressure; sandstone; constant time; hysteresis curve; strain difference

随着三峡水利工程的逐步建成,在水库运营过程中,库水位在 145—175 m 之间变化,库水位的周期性变化必将引起地下水位的波动,从而影响库区内地质体的稳定性。水是导致滑坡发生发展的最活跃和最普遍的因素,同时也是最难确定和定量研究的因素。据不完全统计,其中的 80%~90% 的滑坡破坏与水有关<sup>[1]</sup>。

国内外在载荷作用下岩(石)体的变形演化规律及孔隙水压力影响滑坡等方面取得了一定的研究成果<sup>[1-17]</sup>。Holcomb D J<sup>[2]</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。Tutuncu A N 等<sup>[3-4]</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。Bruno and Nakagawa<sup>[5]</sup>通过现场试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。中村浩之<sup>[6]</sup>通过对水库滑坡的分析及其实测研究认为,浸水、库水位急剧下降和降雨,是水库滑坡形成的主要因素。在日本,大约 60% 的水库滑坡发生在库水位骤降时期,其余 40% 发生在水位上升时期,包括初期蓄水时期。王士天等<sup>[7]</sup>认为水库滑坡有两种:一种是库水位达到敏感水位后滑体内孔隙水压力分布达到新的平衡过程中产生的滑坡;一种是发生在库水位消落,特别是快速消落期。蔡耀军<sup>[8]</sup>认为,水库诱发岸坡变形与失稳可归结为 3 个方面的因素,1)材料力学效应,2)水力学效应,3)水力机械作用。严福章<sup>[9]</sup>通过对清江隔河岩水库茅坪滑坡的研究,认为该滑坡在水库蓄水后发生持续的缓慢滑移,其根本原因是水库蓄水产生的材料力学效应和水力学效应综合作用的结果。大部分滑坡发生在工程的早期,美国 Columbia 河上的 Grand Coulee 水库 1941 年建成蓄水后,在 12 a 内先后发生滑坡 500 起,其中 49% (245 起)发生在蓄水后 2 a 内,30% 发生在水位骤降 10~20 m 情况下<sup>[10]</sup>。Riemer 统计了 60 个水库滑坡实例,指出 85% 的滑坡发生在建设或蓄水期,或工程完工 2 a 内<sup>[11]</sup>。

为探讨水库蓄水产生的材料力学效应和水力

学效应综合作用下岩(石)体的变形演化规律,该文拟以实验为基础,通过实验数据分析岩石的变形特性。实验拟在 3 种不同轴向应力(55.54、34.18 和 12.82 MPa,以三轴平均抗压峰值的 52%、32% 和 12% 确定)下进行周期孔隙水压力的砂岩变形特性研究,分析不同轴向应力对岩(石)体的变形影响。还拟进行孔隙水压力在上、下限恒定不同时间的砂岩变形特性实验,对比不同水位蓄水时间对岩(石)体的变形影响。进而探讨库水位在 145—175 m 之间变化时岩(石)体的变形特性,即涨水、高水位蓄水、排水和低水位蓄水对岩(石)体的变形影响。

## 1 实验方法

实验选用砂岩取自重庆地区的三叠系上统须家河组,属陆源细粒碎屑沉积岩,粒径 0.1~0.5 mm,主要成分为石英、长石、燧石和白云母等。砂岩各向同性性状较好,质地较均匀,试件个体力学性质较接近。加工采用了水钻法,经切割、打磨等过程最终加工制成国际标准的  $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  试件。最后将试件采用浸泡方法处理为饱水状态(浸泡 90 d)。

实验在 MTS815 岩石力学试验系统(图 1a)上完成。实验中主要由安装在试验系统上的荷重计检测其轴向应力,由压力传感器检测其围压,由与之配套的位移引伸计(图 1b)测定出轴向位移并得到实验所需的相关数据。通过实验过程中采集到的各相关数据便可进行处理和分析。

实验时,按照以下加载方式对砂岩试件施加外载荷以及周期孔隙水压力:

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 10.68 MPa;围压以 1.0 MPa/min 的加载速率加载到 10.68 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 10.68 MPa 加载到  $\sigma_1$ ,并保持恒定;

2)将孔隙水压力以 1.0 MPa/min 的速率从零预加载到  $P_{\min} = 2.0 \text{ MPa}$ ,再从  $P_{\min}$  开始加载到达  $P_{\max} = 6.0 \text{ MPa}$ ,保持  $P_{\max}$  恒定,恒定  $\Delta T(120 \text{ 或 } 240 \text{ s})$  后以相同的速率卸载至  $P_{\min}$ ,又保持  $P_{\min}$  恒定,恒定  $\Delta T(120 \text{ 或 } 240 \text{ s})$ ;

3)不间断重复第 2 步,直至完成实验设定的周期次数  $n$ ;



(a) MTS815岩石力学试验系统 (b) 引伸计

图 1 MTS815 岩石力学试验系统及其引伸计

4)卸孔隙水压力进行三轴破坏实验。完成周期实验后,将孔隙水压力卸到 0,轴向应力以相同的速率卸载到 10.68 MPa,围压保持恒定;轴向应力以相同加载速率从 10.68 MPa 加载到峰值破坏。

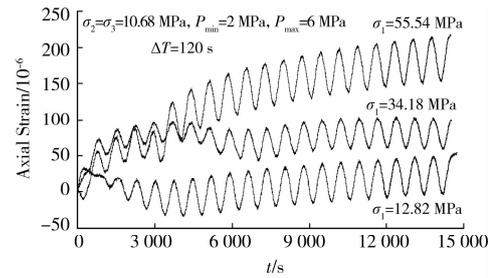
5)更换试件,进行下 1 个实验项目。

## 2 实验结果与分析

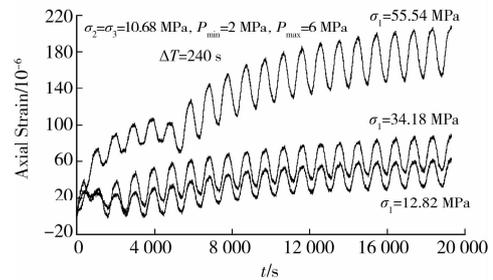
### 2.1 $\epsilon_1 - T$ 和 $p - T$ 关系曲线

在周期孔隙水压力作用下,不同  $\sigma_1$  对砂岩  $\epsilon_1 - T$  关系曲线演化影响明显(图 2a、b)。由于岩石在应力作用下应变曲线具有非线性、滞后性、离散记忆和能量耗散等特征。在不同  $\sigma_1$ , 周期孔隙水压力的  $\epsilon_1 - T$  曲线都呈连续正弦波形演化。在相同的周期孔隙水压力作用下, $\epsilon_1$  范围与  $\sigma_1$  大小有关,随着  $\sigma_1$  的逐渐增大, $\epsilon_1$  范围呈逐渐上升的趋势。 $\epsilon_1 - T$  曲线中初始应变呈随机性变化,随着周期增加, $\epsilon_1$  呈有序性变化且逐渐增大,应变累积趋势与  $\sigma_1$  大小关系呈正相关。对比不同的上、下限恒定时间  $\Delta T$ (120 或 240 s) 的  $\epsilon_1 - T$  曲线也具有相似性。说明在相同周期孔隙水压力作用下, $\epsilon_1 - T$  曲线的  $\sigma_1$  大小将影响  $\epsilon_1$  范围和应变累积的变化趋势。

为研究每个周期演化过程,将  $\epsilon_1 - T$  曲线分解为同周期下的应变曲线,将  $p - T$  曲线作为辅助曲线。分析在相同时间下, $p$  变化对  $\epsilon_1$  的影响(图 3),可知:随着周期增加, $\epsilon_1 - T$  曲线由无序向有序演化;曲线由疏变密,应变累积逐渐增加并趋于稳定。稳定的  $\epsilon_1 - T$  曲线呈正弦波演化, $p$  加载时, $\epsilon_1$  呈减小的趋势; $p_{\max}$  恒定时, $\epsilon_1$  呈持续减小到谷值; $p$  卸载时, $\epsilon_1$  逐渐增加; $p_{\min}$  恒定时, $\epsilon_1$  呈持续增加到峰值。

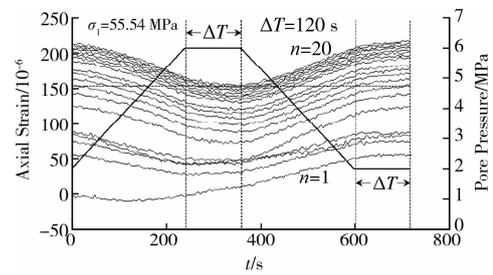


(a)  $\Delta T=120$  s

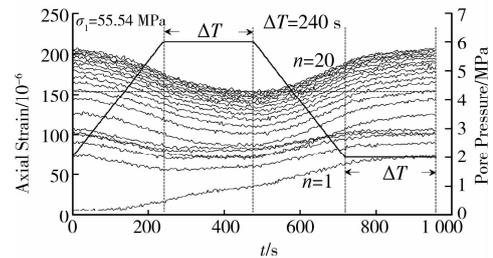


(b)  $\Delta T=240$  s

图 2  $\epsilon_1 - T$  关系曲线



(a)  $\Delta T=120$  s



(b)  $\Delta T=240$  s

图 3  $\epsilon_1 - T$  和  $p - T$  关系曲线

### 2.2 $p - \epsilon_1$ 滞回曲线

从实验设备安全考虑,未进行周期破坏实验。实验主要研究砂岩  $p - \epsilon_1$  曲线演化的前 2 个阶段(图 4a、c)。分析了微孔隙压密阶段和孔隙水压力耦合阶段的作用机理,阐述周期孔隙水压力和轴向应变的关系曲线的稳定周期的发展趋势。

1)微孔隙压密阶段。该阶段处于周期的初期阶段,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。在周期孔隙水压力作用下,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,随着周期孔隙水压力加载,轴向应变呈“Z”状波动性的逐步上升;随着周期孔隙水压力卸载,轴向应变呈“Z”状波动性的逐步下降。这可以理解为,在该阶段,砂岩在周期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。微裂隙、颗粒接触面、孔洞等还处于压密阶段,初始变形比较大,该阶段变形特征未形成明显的  $p-\epsilon_1$  滞回曲线。

2) 孔隙水压力耦合阶段。该阶段变形特征形成了稳定的  $p-\epsilon_1$  滞回曲线。由于砂岩应变包括弹性应变与粘性应变,两者对砂岩的孔隙变形影响不同。对应不同的应变区段,将稳定  $p-\epsilon_1$  滞回曲线分为 4 个不同区段分析其演化机理。加载 AB 段:随着孔隙水压力上升,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减小;上限

恒定 BC 段:孔隙水压力在上限恒定时,有效应力达到最小值。有效应力、有效围压与孔隙水压力及恒定时间共同作用下,导致砂岩颗粒摩擦及微裂隙、颗粒接触面、孔洞等产生拉伸变形;卸载 CD 段:随着孔隙水压力下降,从而引起有效应力的增加,导致以弹性变形形式储存在颗粒中的可恢复应变增大;下限恒定 DA 段:孔隙水压力在下限恒定时,有效应力为最大值。有效应力、有效围压与孔隙水压力及恒定时间共同作用下,导致砂岩颗粒摩擦及微裂隙、颗粒接触面、孔洞等产生压缩变形(图 4b、4d)。由于体积相容条件,孔隙体积的变化等于砂岩结构的净体积变化。该阶段特征表现为孔隙水压力和砂岩孔隙处于弹粘性耦合变化;随着周期增加逐渐形成稳定的滞回曲线,表现形式由疏变密,稳定  $p-\epsilon_1$  滞回曲线呈逆时针演化,即  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 。

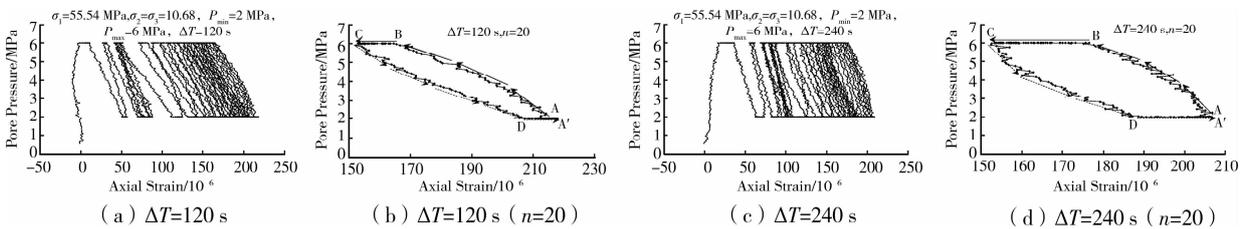


图 4  $p-\epsilon_1$  关系曲线

2.3  $\Delta\epsilon-n$  关系曲线

通过分析微孔隙压密阶段和孔隙水压力耦合阶段的作用机理,针对单个周期  $p-\epsilon_1$  的关系曲线的加载段、卸载段、上限恒定段和下限恒定段的应变差进行量化分析。首先分析在周期孔隙水压力作用下,相同恒定时间的不同  $\sigma_1$  的  $\Delta\epsilon-n$  关系;其次对比不同恒定时间,相同  $\sigma_1$  的  $\Delta\epsilon-n$  关系。

采用以下表达式进行计算单个周期的每个区段的应变差:

加载段:  $\Delta\epsilon_{AB} = \epsilon_B - \epsilon_A$

上限恒定段:  $\Delta\epsilon_{BC} = \epsilon_C - \epsilon_B$

卸载段:  $\Delta\epsilon_{CD} = \epsilon_D - \epsilon_C$

下限恒定段:  $\Delta\epsilon_{DA} = \epsilon_A - \epsilon_D$

1) 加载段  $\Delta\epsilon_{AB}-n$  关系曲线

对比  $\Delta T = 120$  s 作用下,不同  $\sigma_1$  的加载段  $\Delta\epsilon_{AB}-n$  关系曲线(图 5)可知:初始加载段  $\Delta\epsilon_{AB}$  近似于正值,但在第二个周期时衰减为负值,随着周期增加,  $\Delta\epsilon_{AB}$  逐渐减小并趋于稳定。对比  $\Delta T = 240$  s 的不同  $\sigma_1$  的  $\Delta\epsilon_{AB}-n$  曲线也具有相似规律。说明  $p$  加载过程有效应力减小,有效围压同时作用下,初期加载段的

砂岩处于压缩变形过程,  $\Delta\epsilon_{AB}$  为正值;随着周期增加处于拉伸变形过程,  $\Delta\epsilon_{AB}$  为负值(表 1)。

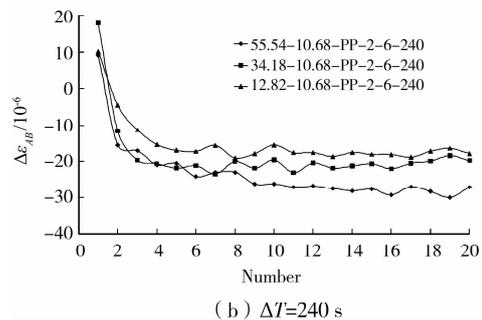
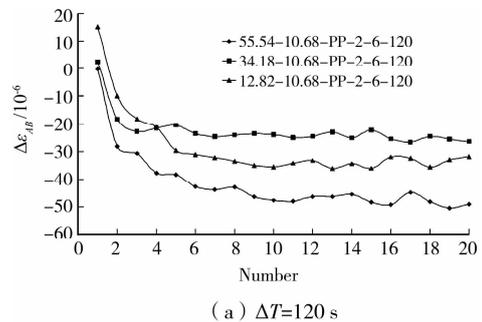


图 5  $\Delta\epsilon_{AB}-n$  加载段关系曲线

表 1 加载段  $\Delta\epsilon_{AB}$  基本参数表

实验条件		$\Delta\epsilon_{AB}/10^{-6}$			
$\sigma_1/MPa$	$\Delta T/s$	最大值	最小值	总和	平均
55.54	120	-0.24	-50.61	-836.30	-41.815
34.18		2.45	-26.66	-449.62	-22.481
12.82		15.09	-36.13	-570.02	-28.501
55.54	240	9.24	-30.01	-466.77	-23.339
34.18		17.96	-23.46	-369.86	-18.493
12.82		10.22	-19.11	-301.10	-15.055

2) 卸载段  $\Delta\epsilon_{CD} - n$  关系曲线

对比  $\Delta T = 120$  s 作用下,不同  $\sigma_1$  的卸载段  $\Delta\epsilon_{CD} - n$  关系曲线(图 6)可知:初始卸载段  $\Delta\epsilon_{CD}$  波动较大,处于不稳定状态;随着周期增加, $\Delta\epsilon_{CD} - n$  曲线逐渐增大并在周期  $n = 6$  后趋于稳定, $\Delta\epsilon_{CD}$  为正值。对比  $\Delta T = 240$  s 的不同  $\sigma_1$  的  $\Delta\epsilon_{CD} - n$  关系曲线也具有相似规律,曲线演化层次分明。说明  $p$  卸载过程有效应力增大,卸载段的砂岩处于压缩变形过程, $\Delta\epsilon_{CD}$  为正值(表 2)。

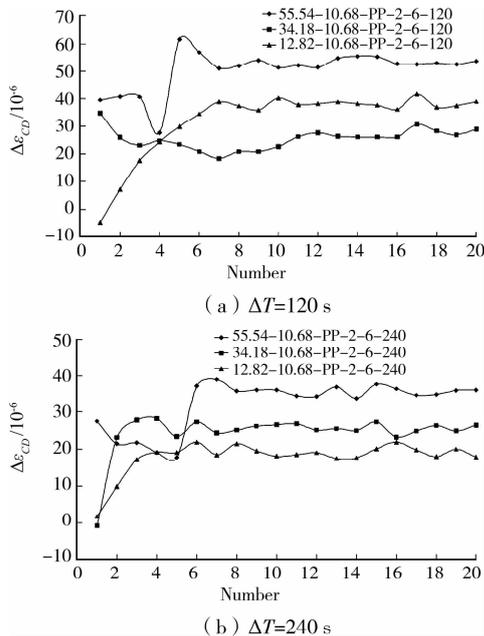


图 6  $\Delta\epsilon_{CD} - n$  卸载段关系曲线

表 2 卸载段  $\Delta\epsilon_{CD}$  基本参数表

实验条件		$\Delta\epsilon_{CD}/10^{-6}$			
$\sigma_1/MPa$	$\Delta T/s$	最大值	最小值	总和	平均
55.54	120	61.65	27.52	1010.11	50.506
34.18		34.63	18.33	506.52	25.326
12.82		41.70	-4.72	642.61	32.130
55.54	240	38.99	17.78	647.86	32.393
34.18		28.28	-0.79	487.46	24.373
12.82		21.96	1.81	357.59	17.879

3) 上限恒定段  $\Delta\epsilon_{BC} - n$  关系曲线

对比  $\Delta T = 120$  s 作用下,不同  $\sigma_1$  的上限恒定段  $\Delta\epsilon_{BC} - n$  关系曲线(图 7)可知:随着周期增加,上限恒定段  $\Delta\epsilon_{BC} - n$  曲线呈衰减趋势,并逐渐稳定  $\Delta\epsilon_{BC}$  为负值。对比  $\Delta T = 240$  s 的不同  $\sigma_1$  的  $\Delta\epsilon_{BC} - n$  曲线也具有相似规律,曲线的演化层次分明。说明  $p$  在上限恒定时,有效应力为下限恒定,有效围压恒定,在恒定时间作用下,初期上限恒定时砂岩为压缩变形过程,随着周期增加处于拉伸变形过程, $\Delta\epsilon_{BC}$  为负值(表 3)。不同的  $\Delta T$  对  $\Delta\epsilon_{BC} - n$  曲线演化有一定的影响, $\Delta T = 240$  s 下的  $\Delta\epsilon_{BC} - n$  曲线相比较稳定平缓。

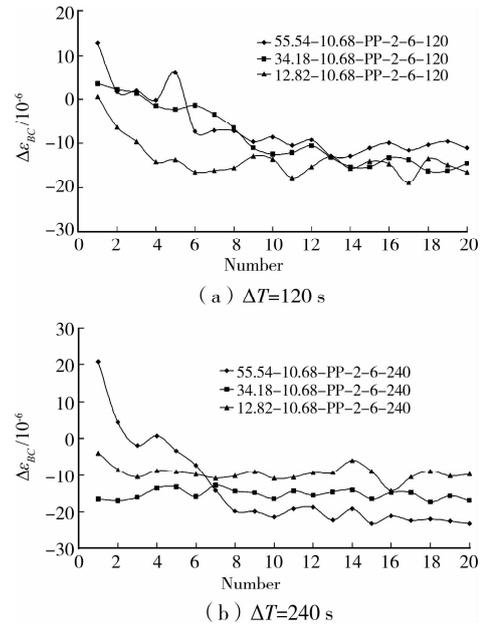


图 7 上限恒定段  $\Delta\epsilon_{BC} - n$  关系曲线

表 3 上限恒定段  $\Delta\epsilon_{BC}$  基本参数表

实验条件		$\Delta\epsilon_{BC}/10^{-6}$			
$\sigma_1/MPa$	$\Delta T/s$	最大值	最小值	总和	平均
55.54	120	12.78	-12.93	-127.48	-6.374
34.18		3.52	-16.26	-172.23	-8.612
12.82		0.54	-18.87	-272.29	-13.614
55.54	240	20.73	-23.22	-275.41	-13.771
34.18		-12.82	-17.36	-305.27	-15.280
12.82		-3.95	-14.30	-189.58	-9.479

4) 下限恒定段  $\Delta\epsilon_{DA} - n$  关系曲线

对比  $\Delta T = 120$  s 作用下,不同  $\sigma_1$  的下限恒定段  $\Delta\epsilon_{DA} - n$  关系曲线(图 8)可知:下限恒定段  $\Delta\epsilon_{DA} - n$  曲线波动较大,随着周期增加, $\Delta\epsilon_{DA} - n$  曲线逐渐增大并向稳定发展。 $\Delta T = 240$  s 作用下, $\Delta\epsilon_{DA} - n$  关系曲线的初期  $\Delta\epsilon_{DA}$  波动较大,从  $n = 6$  后,曲线逐渐趋于稳定。说明在  $p$  下限恒定时,有效应力在上限恒定,有效围压恒定,在恒定时间作用下,砂岩呈压缩变形过程, $\Delta\epsilon_{DA}$  为正值。对比不同的恒定时间, $\Delta T = 240$  s 作用下, $\Delta\epsilon_{DA} - n$  曲线演化相对稳定,层次比较

明显。

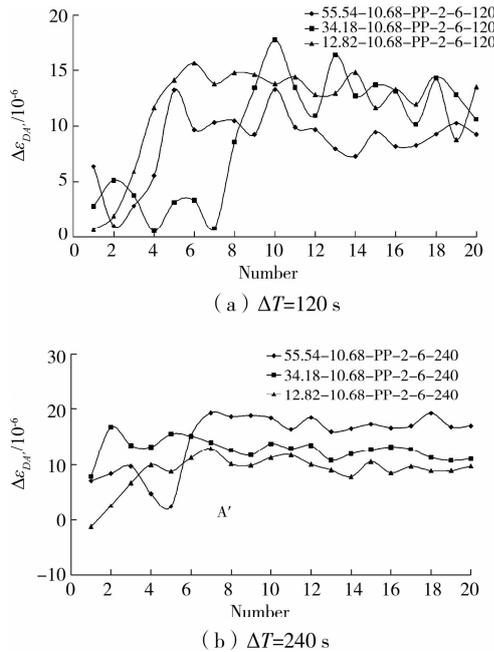


图 8 下限恒定段  $\Delta\epsilon_{DA'}$  -  $n$  关系曲线

表 4 下限恒定段  $\Delta\epsilon_{DA}$  基本参数表

实验条件		$\Delta\epsilon_{DA}/10^{-6}$			
$\sigma_1/\text{MPa}$	$\Delta T/\text{s}$	最大值	最小值	总和	平均
55.54		13.32	1.03	172.00	8.600
34.18	120	17.80	0.55	187.88	9.394
12.82		15.65	0.67	235.95	11.798
55.54		19.31	2.49	294.40	14.720
34.18	240	16.77	7.91	255.27	12.763
12.82		12.93	-1.17	177.92	8.896

分析了  $p - \epsilon_1$  滞回曲线的四个区段的  $\Delta\epsilon - n$  关系曲线和基本参数,进一步分析了  $\Delta\epsilon_{AB}$  与  $\Delta\epsilon_{CD}$ 、 $\Delta\epsilon_{BC}$  与  $\Delta\epsilon_{DA'}$  的变化量(表 5)。对比可知: $\Delta\epsilon_{CD}$  大于  $\Delta\epsilon_{AB}$ ;  $\Delta\epsilon_{BC}$  与  $\Delta\epsilon_{DA'}$  的大小与  $\sigma_1$  大小有关,当  $\sigma_1$  足够大时,  $\Delta\epsilon_{DA'}$  大于  $\Delta\epsilon_{BC}$ 。对比不同  $\Delta T$  的相同  $\sigma_1$  的  $\Delta\epsilon - n$  关系曲线的参数表(表 6)可知:加载段的  $\Delta\epsilon_{T=240}$  小于  $\Delta\epsilon_{T=120}$ ;卸载段的  $\Delta\epsilon_{T=240}$  小于  $\Delta\epsilon_{T=120}$ ;上限恒定段  $\Delta\epsilon_{T=240}$  大于  $\Delta\epsilon_{T=120}$ (除  $\sigma_1 = 12.82 \text{ MPa}$ );下限恒定段  $\Delta\epsilon_{T=240}$  大于  $\Delta\epsilon_{T=120}$ (除  $\sigma_1 = 12.82 \text{ MPa}$ )。

表 5 对比加载和卸载段,上限恒定和下线恒定段的应变差的参数表

实验条件		$\Delta\epsilon_{DA} -  \Delta\epsilon_{AB}  / 10^{-6}$		$\Delta\epsilon_{DA} -  \Delta\epsilon_{BC}  / 10^{-6}$	
$\sigma_1/\text{MPa}$	$\Delta T/\text{s}$	总和差	平均差	总和差	平均差
55.54		173.81	8.691	44.52	2.226
34.18	120	56.90	2.845	15.65	0.782
12.82		72.59	3.629	-36.34	-1.816

续表 5

实验条件		$\Delta\epsilon_{DA} -  \Delta\epsilon_{AB}  / 10^{-6}$		$\Delta\epsilon_{DA} -  \Delta\epsilon_{BC}  / 10^{-6}$	
$\sigma_1/\text{MPa}$	$\Delta T/\text{s}$	总和差	平均差	总和差	平均差
55.54		181.09	9.054	18.99	0.949
34.18	240	117.60	5.880	-50.00	-2.517
12.82		56.49	2.824	-11.66	-0.583

表 6 对比不同时间条件下加载和卸载段,上限恒定和下线恒定段的轴向应变差的参数表

实验条件	$ \Delta\epsilon_{T=240}  -  \Delta\epsilon_{T=120}  / 10^{-6}$			
	加载段	卸载段	上限恒定段	下限恒定段
55.54	-369.53	-362.25	147.93	122.40
34.18	-79.76	-19.06	133.04	67.39
12.82	-268.92	-285.02	-82.71	-58.03

### 3 结论

该文以实验为基础,进行了不同轴向应力条件下,周期孔隙水压力与不同恒定时间作用下砂岩变形特性实验。分析和对比了  $\epsilon_1 - T$  与  $p - T$  关系曲线,  $p - \epsilon_1$  滞回曲线;进一步分析了每个周期的加载段、上限恒定段、卸载段和下线恒定段的  $\Delta\epsilon - n$  关系曲线。通过以上的实验数据和图表分析,得到以下结论:

1) 在不同轴向应力和不同稳定时间条件下,周期孔隙水压力作用下砂岩  $\epsilon_1 - T$  曲线呈连续正弦波形演化。分析每个稳定周期  $\epsilon_1 - T$  关系曲线,则随着孔隙水压力加载时,应变减小;上限恒定时,应变持续减小到谷值;卸载时,应变逐渐增大;下线恒定时,应变持续增大到峰值。

2) 研究了砂岩  $p - \epsilon_1$  滞回曲线的 2 个阶段变化,一是微孔隙压密阶段,未形成明显的滞回曲线;二是孔隙水压力耦合阶段,形成了稳定的滞回曲线,表现形式由疏变密,并且稳定的滞回曲线呈逆时针演化,即  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A'$ 。

3) 通过  $\Delta\epsilon_{AB}$ 、 $\Delta\epsilon_{CD}$ 、 $\Delta\epsilon_{BC}$  和  $\Delta\epsilon_{DA'}$  量化分析,加载段:处于拉伸变形过程,  $\Delta\epsilon_{AB}$  为负值;卸载段:处于压缩变形过程,  $\Delta\epsilon_{CD}$  为正值;上限恒定段:处于拉伸变形过程,  $\Delta\epsilon_{BC}$  为负值;下线恒定段:处于压缩变形过程,  $\Delta\epsilon_{DA'}$  为正值。 $\Delta\epsilon_{CD}$  变化量大于  $\Delta\epsilon_{AB}$ ;当轴向应力足够大时,  $\Delta\epsilon_{DA'}$  变化量大于  $\Delta\epsilon_{BC}$ 。

4) 不同恒定时间条件下,加载段的  $\Delta\epsilon_{T=240}$  小于  $\Delta\epsilon_{T=120}$ ;卸载段的  $\Delta\epsilon_{T=240}$  小于  $\Delta\epsilon_{T=120}$ ;上限恒定段  $\Delta\epsilon_{T=240}$  大于  $\Delta\epsilon_{T=120}$ (除  $\sigma_1 = 12.82 \text{ MPa}$ );下线恒定段  $\Delta\epsilon_{T=240}$  大于  $\Delta\epsilon_{T=120}$ (除  $\sigma_1 = 12.82 \text{ MPa}$ )。

综上所述,周期孔隙水压力与恒定时间实验的曲线和数据分析将对库区的地质体的稳定性分析提供一定的实验参数和依据。

#### 参考文献:

- [1] 彭良泉,王钊. 对边坡稳定性分析中危险水力学条件的研究[J]. 人民长江, 2003, 34(5): 39-41.  
PEN LIANG-QUAN, WANG ZHAO. Study on hydraulic condition in slope stability analysis [J]. Yangtze River, 2003, 34(5): 39-41.
- [2] HOLCOMB D J. Memory relaxation, and microfracturing in dilatant rock [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86: 6235-6248.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] BRUNO M S, NAKAGAWA F M. Pore pressure influence on tensile fracture propagation in sedimentary rock [J]. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech Abstr, 1991, 28(4): 261-273.
- [6] 中村浩之. 论水库滑坡 [J]. 水土保持通报, 1990, 10(1): 53-64.  
NAKAMURA K. On reservoir landslide [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(1): 53-64.
- [7] 王士天, 刘汉超, 张悼元, 等. 大型水域水岩相互作用及其环境效应研究 [J]. 地质灾害与环境, 1997, 8(1): 69-89.  
WANG SHI-TIAN, LIU HAN-CHAO, ZHANG DAO-YUAN, et al. Study on water-rock interaction and the environment effect in large-scales water area [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1997, 8(1): 69-89.
- [8] 蔡耀军, 郭麒麟, 余永志. 水库诱发岸坡失稳的机制及其预测 [J]. 湖北地矿, 2002, 16(4): 4-8.  
CAI YAO-JUN, GUO QI-LIN, YU YONG-ZHI. The reservoir-induced slope failure mechanism and prediction [J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 2002, 16(4): 4-8.
- [9] 严福章, 王思敬, 徐瑞春. 清江隔柯岩水库蓄水后茅坪滑坡的变形机理及其发展趋势研究 [J]. 工程地质学报, 2003, 11(1): 15-24.  
YAN FU-ZHANG, WANG SI-JING, XU RUI-CHUN. Deformation mechanism and development tendency of maoping landslide after impounding of reservoir on Qingjiang river, Hubei province, China [J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(1): 15-24.
- [10] LANE K S. Stability of reservoir slopes [C] // Proc 8th Symp on Rock Mechanics 1967, 321-336.
- [11] RIEMER W. Landslides and reservoirs (keynote paper) [C] // Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides Christchurch, 1992, 1373-2004.
- [12] 王军, 蔡袁强. 周期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 YUAN-QIANG. 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.
- [13] 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): 1086-1093.  
XI DAO-YING, CHEN YUN-PING, TAO YUE-ZAN, et al. Nonlinear elastic hysteresis characteristic of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1086-1093.
- [14] 陈运平, 王思敬, 王恩志. 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(S2): 4066-4073.  
CHEN YUN-PING, WANG SI-JING, WANG EN-ZHI. Quantitative study on stress-strain hysteretic behaviors in rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4066-4073.
- [15] 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.
- [16] 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 GUANG-ZHI, WANG HONG, et al. Experimental research on the evolution of hysteresis curve of rock in different axial stress levels [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(2): 40-42.
- [17] 王鸿, 许江, 杨秀贵. 周期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 XIU-GUI. 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.

(编辑 胡玲)