

DOI: 10.11779/CJGE201509007

渗流水压力分级加载岩石蠕变特性研究

杨红伟^{1,2}, 许江², 聂闻², 彭守建²

(1. 宜宾学院矿业工程研究所, 四川 宜宾 644007; 2. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 采用 RLW-2000M 微机控制煤岩流变仪, 以细粒砂岩为研究对象, 对三轴压缩条件下岩石渗流水压力分级加载蠕变试验进行了蠕变特性研究。重点分析了渗流水压力分级加载时蠕变条件下岩石的应变、渗流体积(体积速率)演化曲线, 同时对不同渗流水压力分级加载条件下的岩石蠕变与渗透系数演化曲线进行了分析和对比。试验结果表明: 分级加载渗流水压力作用下细粒砂岩的蠕变曲线符合蠕变演化三阶段特征; 随着渗流水压的逐级加载, 瞬时轴向、横向应变和瞬时泊松比呈增大的趋势; 随着应变的累积, 横向应变量大于轴向应变量呈扩容效应, 直至发生蠕变破坏; 分级加载渗流水压力作用下渗流体积曲线呈线性演化。研究认为: 渗透系数先瞬时减小后增大, 初始渗透系数都具有记忆性, 即岩石孔隙通道具有记忆特征, 孔隙通道经过变形→闭合→冲蚀→形成新通道过程。

关键词: 岩石力学; 砂岩; 蠕变; 分级加载; 渗流压力

中图分类号: TD458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)09-1613-07

作者简介: 杨红伟(1977-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: yhw982313@163.com。

Experimental study on creep of rocks under step loading of seepage pressure

YANG Hong-wei^{1,2}, XU Jiang², NIE Wen², PENG Shou-jian²

(1. Institute of Mining Engineering, Yibin University, Yibin 644007, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: The creep and damage of fine sandstone rock under gradual loading of seepage stress are investigated through a series of triaxial compression tests using RLW-2000M coal and rock computer-controlled rheological testing machine. The volumetric strain and seepage volume (volume rate) evolution curves of rock creep under different seepage stresses are highlighted. In addition, the transformation curves of rock creep and permeability coefficient under different seepage stresses are analyzed and compared. The results show that the porosity evolution has agreement with three stages in typical creep process. As the gradual loading of seepage water pressure, the instantaneous axial and transverse strains as well as Poisson's ratio have an increasing trend. With the accumulated strain, the transverse strain is greater than the axial one in company with expansion effect until the occurrence of creep damage. The seepage volume curve is linearly evolved under the gradual loading of seepage water pressure. It is concluded that the permeability coefficient decreases firstly and then increases. The initial permeability has a memory (a memory of rock pore channels) that pore channels are formed through the process of deformation-closing-erosion-new channel.

Key words: rock mechanics; sandstone; creep; step loading; seepage pressure

0 引言

岩石的蠕变特性是岩石类材料的重要力学性质, 关于恒定荷载下的岩石蠕变模型和蠕变特性已有不少文献述及, 而对于分级加载条件下的岩石蠕变特性研究则相对较少^[1-2]。很多岩体工程, 包括地下洞室、岩石边坡及岩基等工程中, 岩体受到的荷载或围岩应力的改变一般是随施工进度或程序逐级增加(或减少)的, 这种逐级加荷条件下的岩石蠕变是工程岩体重要的物理力学特性和工程现象^[3-5], 张忠亭等^[3]、袁海平

等^[4]、范庆忠等^[5]对不同岩石材料进行分级加载的流变特性分析。因此, 对分级加载下岩石蠕变特性的研究具有重要的理论和实践的意义。

水, 作为自然界普遍存在的流体, 往往参与到岩石环境中, 当受力会产生变形过程。学者研究表明,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51474040); 国家青年科学基金项目(51304255); 宜宾市科学技术局重点科研项目(2014SF032); 宜宾学院博士科研启动金项目(2012B18)

收稿日期: 2014-11-24

水对岩石流变的影响主要包括物理化学作用和力学作用。前者使岩石性状逐渐恶化,后者主要表现为静水压力的有效应力作用和动水压力的冲刷作用。目前,水对岩石流变的影响已经引起众多学者的重视^[6-10],朱合华等^[6]探讨含水状态下围岩的蠕变力学特性,分析含水影响特点,上述研究仅关注了含水状态下的岩石,水在岩石内部处于准静止状态。阎岩等^[10]研究了岩石的渗流蠕变特性,分析了渗流-流变耦合模型参数。而在工程实践中,很多岩石内部的水在水力梯度作用下持续流过岩石内部的微小孔隙及裂隙而形成渗流。较多研究学者注重分析的渗透率或渗透系数的变化,较少分析渗透系数与水力梯度间的相关性、渗透系数与体应变对应关系。

本文以细粒砂岩为研究对象,在恒定轴向应力、围压条件下,进行渗流水压逐级加载作用下的蠕变试验。分析不同渗流压力-蠕变耦合作用下变形特性,探讨渗透系数演化规律,反映渗流压力作用下岩石内部孔隙损伤特征,初步探讨了渗透系数与通道记忆特征的联系,为工程实践提出新的认识。

1 试验概述

1.1 试验设备

试验所用设备为 RLW-2000M 微机控制煤岩流变仪,可研究煤岩在多种环境下的流变特性,主要完成煤岩的单轴抗压强度、三轴抗压强度、循环载荷以及流变等力学试验(见图1)^[11]。



(a) 控制测试系统



(b) 加载系统

图1 RLW-2000M 微机控制煤岩流变仪^[11]

Fig. 1 RLW-2000M coal and rock computer-controlled rheological testing machine^[11]

1.2 试验方法

试验分析渗流水压力分级加载条件下岩石三轴压缩蠕变特性,选用试件为圆柱体 $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 细粒砂岩,取自三峡库区的三叠系上统须家河组,属陆源细粒碎屑沉积岩,粒径 $0.1 \sim 0.5\text{ mm}$,主要成分为石英、长石、燧石和白云母等。

(1) 试验方案

试验选取了围压为 10 MPa 时,三轴峰值破坏强度 σ_{\max} 的70%作为恒定轴向应力 σ_1 (为了保证蠕变破坏的发生,依据文献[16]中对岩石长期强度与瞬时强度比值,因此,本文采用比值为0.7),进行渗流水压力分级加载 $2, 4, 6, 8\text{ MPa}$ (9 MPa)条件下渗流水压差为 $1.9, 3.9, 5.9, 7.9\text{ MPa}$ (8.9 MPa),出口压力开关打开,其压力为大气压力 0.1 MPa ,不同渗流压差作用下岩石蠕变试验。

(2) 试验步骤

- a) 安装试件(#92, #96 试件);
- b) 围压加载:根据试验要求设定施加围压,达到设定围压值保持恒定;
- c) 应力加载:施加轴向应力,其位移加载速率 0.10 mm/min ,达到设定值保持恒定;
- d) 渗流水压力加载:根据试验要求设定施加渗流水压力,达到设定值保持恒定;
- e) 蠕变时间:根据试验要求设定蠕变时间,达到设定时间,即进行下一级渗流水压力加载或破坏即停止试验;
- f) 卸载:先卸载渗流水压力到“0”,后卸载轴向应力到“0”,最后卸载围压到“0”,更换试件。

2 试验结果分析

在轴向应力 66 MPa ,围压 10 MPa ,渗流水压差为 $1.9, 3.9, 5.9$ 和 7.9 MPa (8.9 MPa)条件下细粒砂岩的蠕变试验,分别进行了轴向应变、横向应变和体应变曲线的对比。其中,将孔隙水压力恒定时,渗水体积等效成渗流体积。在蠕变演化过程,可以计算得到瞬时渗流系数变化,同时可以分析蠕变体应变与渗流系数对应关系。

参照文献[16]中岩石蠕变通常形式为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon^0 + \varepsilon^I(t) + \varepsilon^{II}(t) + \varepsilon^{III}(t) \quad (1)$$

式中 $\varepsilon(t)$ 为 t 时间的应变; ε^0 为加载瞬时应变; $\varepsilon^I(t)$ 为蠕变初始段(I)应变; $\varepsilon^{II}(t)$ 为稳定段(II)应变; $\varepsilon^{III}(t)$ 为加速段(III)应变。其中 ε^0 为三轴压缩加载到设定蠕变应力条件前的应变; $\varepsilon^I(t)$, $\varepsilon^{II}(t)$ 和 $\varepsilon^{III}(t)$ 为蠕变发生的3个阶段(I、II和III)的应变。

表 1 渗流水压分级加载力学参数

Table 1 Mechanical parameters under step loading of seepage pressure

试件编号	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	$P(\Delta P)$ /MPa	瞬时加载及蠕变阶段				蠕变时间 t/h
				$\varepsilon_1^0 / 10^{-3}$	$\varepsilon_2^0 / 10^{-3}$	$\varepsilon_v^0 / 10^{-3}$	泊松比 ν_0	
#92	66	10	2(1.9)	4.59	-0.70	3.19	0.153	9.00
			4(3.9)	4.61	-0.81	2.99	0.176	10.13
			6(5.9)	4.76	-1.01	2.74	0.212	10.07
			8(7.9)	4.85	-1.19	2.47	0.245	11.17
#96	66	10	2(1.9)	4.68	-0.50	3.68	0.107	11.31
			4(3.9)	4.76	-0.53	3.71	0.111	3.30
			6(5.9)	4.77	-0.57	3.63	0.119	2.00
			8(7.9)	4.79	-0.65	3.49	0.136	4.46
			9(8.9)	4.91	-0.84	3.23	0.171	2.96

2.1 应变分析

(1) 逐级加载渗流水压力作用下的蠕变规律分析
 根据试验方案要求对于不同的加载路径将进行基本参数的分析, 对照蠕变演化曲线 (图 2) 可知, #92 和 #96 砂岩试件的分级加载渗流水压力作用下细粒砂岩的蠕变曲线符合蠕变演化三阶段特征。未发生蠕变破坏前每级加载蠕变曲线都表现出两个蠕变阶段 (初始蠕变阶段 I; 稳定蠕变阶段 II)。对于每级加载的瞬时蠕变变形的的基本参数进行对比分析, 文中的试验曲线按照惯例, 应变均以压缩为正, 拉伸为负, 其中轴向应变为正向 (压缩) 增长, 横向应变为负向 (扩容) 增长, 瞬时过程基本参数见表 1。其中表 1 参数包括瞬时轴向应变 (ε_1^0), 横向应变 (ε_2^0) 和体应变 (ε_v^0), 瞬时泊松比 (ν_0), 蠕变时间 (t)。由表 1 参数可知, 随着渗流水压的逐级加载, 瞬时轴向应变和瞬时泊松比呈增大的趋势; 而横向应变呈负增大。对比参数说明相对横向应变变化量大于轴向应变变化量, 体应变受横向应变影响, 表现为扩容演化规律。

(2) 逐级加载渗流水压力作用下的应变曲线分析
 从应变角度分析 (图 2): #92 试件与 #96 试件在不同渗流压差阶段的轴向、横向和体应变曲线随着水压力的逐级加载呈递增趋势, 其中在 $\Delta P \leq 7.9$ MPa 的蠕变曲线符合蠕变的 I, II 阶段规律, 应变演化过程呈增大趋势, 其原因原始孔隙被压实过程, 岩石体积减小, 体应变变化较大; 稳定蠕变阶段体应变率保持稳定演化, 其原因体积等速压缩变形, 体应变恒定变化, 分级加载的平均体应变率相差不大; 当 #96 试件在 $\Delta P = 8.9$ MPa 的蠕变曲线符合蠕变的三阶段规律, 发生蠕变破坏。利用表 2 的参数对比了 #92 试件与 #96 试件的蠕变阶段的时间比例、相对体应变和平均应变速率 (II 阶段), 参照图 2 和表 2 数据, 说明受分级加载渗流水压力增加影响, 轴向、横向和体应变呈快速

增加 (I 阶段); 各级加载时平均体应变速率呈由小变大, 后有减小的趋势, 但是平均体应变率相差不大 (II 阶段), 除在 $\Delta P = 8.9$ MPa 的平均体应变率较大; 随着应变的累积, 横向应变变量大于轴向应变变量呈扩容演化, 直至发生蠕变破坏。

表 2 分级加载阶段蠕变相关参数表

Table 2 Parameters of creep under step loading of seepage pressure

试件编号	$P(\Delta P)$ /MPa	蠕变时间比例/%			平均体应变速率 (II)	平均渗流体积速率 (II)	
		I	II	III			
#92	2 (1.9)	①	0.2	99.8	—	—	
		②	-26	-75	—	-8.35	2.196
		③	1.31	19.72	—	—	—
	4 (3.9)	①	0.5	99.5	—	—	—
		②	-14	-248	—	-24.60	4.470
		③	3.29	45.05	—	—	—
	6 (5.9)	①	0.3	99.7	—	—	—
		②	-58	-212	—	-21.12	6.144
		③	1.16	61.69	—	—	—
8 (7.9)	①	3.9	96.1	—	—	—	
	②	-137	-139	—	-12.95	9.806	
	③	4.93	105.26	—	—	—	
#96	2 (1.9)	①	55.0	45.0	—	—	—
		②	99	-64	—	-12.57	2.320
		③	11.89	11.81	—	—	—
	4 (3.9)	①	9.0	91.0	—	—	—
		②	-31	-46	—	-15.32	3.706
		③	2.35	11.13	—	—	—
	6 (5.9)	①	8.0	92.0	—	—	—
		②	-78	-64	—	-34.78	5.565
		③	2.04	10.24	—	—	—
8 (7.9)	①	4.5	95.5	—	—	—	
	②	-137	-123	—	-28.88	8.337	
	③	2.7	35.51	—	—	—	
9 (8.9)	①	4.8	92.5	2.7	—	—	
	②	-14	-242	-3109	-88.38	12.348	
	③	2.04	33.81	2.13	—	—	

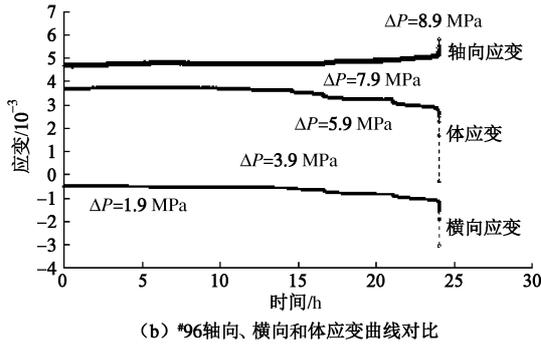
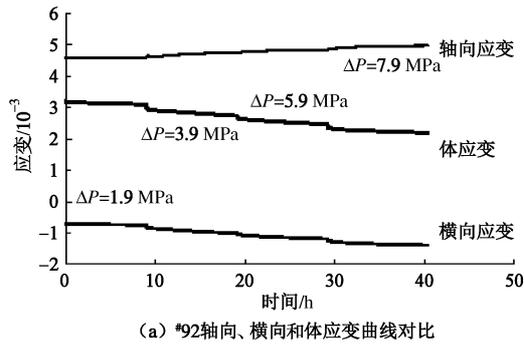


图2 分级加载岩石应变曲线对比

Fig. 2 Strain evolution curves of rock creep under different seepage stresses

2.2 渗流体积分析

通过表2的数据分析等效渗流体积在分级加载的蠕变阶段的变化量以及平均渗流体积速率,同时结合图3的渗流体积(渗流速率)曲线对比。可知:渗流体积曲线呈线性演化,随着渗流压差的增大,平均渗流体积速率呈增大的趋势(见表2)。不同渗流压差阶段的渗流体积速率呈“L”型演化,即初始渗流体积速率快速减小,稳定阶段渗流体积速率趋于稳定;当发生蠕变破坏过程的渗流体积速率呈“U”型演化,即初始渗流体积速率快速减小,稳定阶段渗流体积速率趋于稳定,加速阶段渗流体积速率加速增大直至破坏。通过渗流体积(速率)曲线演化规律,说明瞬时加载渗流水压力增大,在水压力作用下导致孔洞发生挤压变形,喉道及通道变小;随着渗流水压力恒定时,水压力冲蚀微孔洞开裂,喉道及通道逐渐增多,渗流体积增大,渗流体积速率呈稳定演化趋势。为了分析等效渗流体积与蠕变时间的对应关系,采用线性公式拟合曲线,其中 y 表示等效渗流体积, x 表示蠕变时间, A, B 为拟合参数(拟合方程及参数见表3)。对比表2平均渗流体积速率和表3拟合参数 A 值相符,即线性斜率 A 值反映了平均渗流体积速大小。

3 渗透系数分析

在试件进口加上稳定水压,出口和大气相通即为

大气压,保持恒定压差,测得稳定渗流量,就可以通过式(2)计算出渗透系数^[10]:

$$k = -\frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta h} \quad (2)$$

式中, Q 为单位时间内通过试件的渗流量, A 为试件截面积, L 为试件沿渗流方向长度, $\Delta h = \Delta P / \rho g$ 为压力水头。利用式(2)可以由渗流量 Q 得到试件的渗透系数 k 。

表3 拟合方程参数

Table 3 Parameters of fitting curve equation

试件编号	$P(\Delta P)$ /MPa	线性拟合方程: $y=Ax+B$		
		A	B	R^2
#92	2(1.9)	2.19	1.31	1.0000
	4(3.9)	4.41	4.92	0.9969
	6(5.9)	6.12	1.38	1.0000
	8(7.9)	9.82	0.08	0.9999
#96	2(1.9)	2.08	0.57	0.9991
	4(3.9)	3.77	1.20	0.9994
	6(5.9)	5.62	1.10	0.9995
	8(7.9)	8.30	0.97	1.0000
	9(8.9)	12.24	-0.004	0.9994

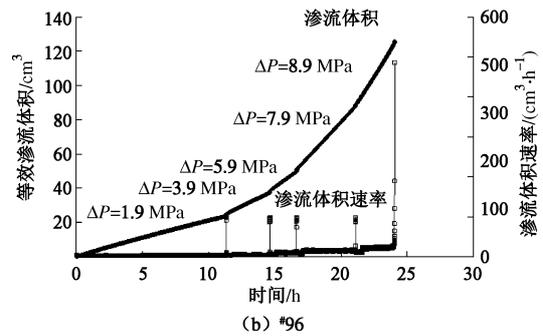
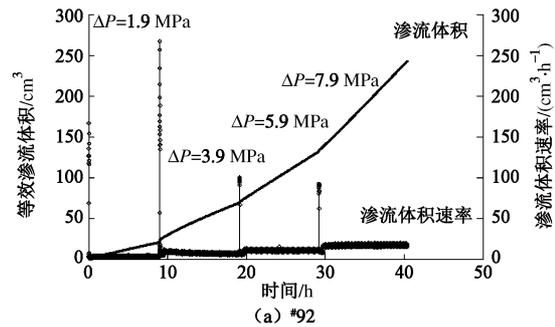


图3 分级加载阶段渗流体积与渗流速率曲线对比

Fig. 3 Relation between seepage volume and volume rate evolution curves under step loading of seepage pressure

通过分级加载渗流水压条件下渗透系数和体应变曲线对比(图4),体应变与渗透系数规律存在着比较紧密的联系。由图4(a)可知:蠕变时间基本相等条件下,分级加载蠕变过程的体应变分为一级、二级、三级和四级,并将逐级加载渗透系数分为 A, B, C 和 D 级。通过体应变曲线和渗透系数的时间对应关系,可知一级加载体应变蠕变阶段的渗透系数呈线性增大;二级加载体应变初始蠕变阶段的渗透系数呈瞬时

减小, 由 $A_2 \rightarrow B_0$ (最低点), 稳定蠕变阶段的渗透系数呈线性增大, 由 $B_0 \rightarrow B_2$; 三级和四级得到与二级相似结论, 得到三级和四级渗透系数最低点 C_0 和 D_0 , 其中得到渗透系数关系 $B_0=A_1, A_2=B_1=C_0, B_2=C_1 \approx D_0$ 和 $C_2=D_1$ (见表4)。

表4 分级加载阶段渗透系数

Table 4 Permeability coefficient of specimens under step loading of seepage pressure

试件编号	渗透系数 $k/(10^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{d}^{-1})$					
	分级 ΔP	1.9 MPa	3.9 MPa	5.9 MPa	7.9 MPa	8.9 MPa
#92	A_0	0.00917				
	A_1	0.08397	B_0			
	A_2	0.15116	B_1	C_0		
	B_0		0.08396			
	B_1		0.15117			
	B_2		0.24284	C_1	D_0	
	C_0			0.16309		
	C_1			0.24285		
	C_2			0.30606	D_1	
	D_0				0.23036	
#96	A_0	0.00013				
	A_1	0.08725	B_0	C_0	D_0	
	A_2	0.17074				
	B_0		0.08725			
	B_1		0.13103			E_0
	C_0			0.08918		
	C_1			0.11523		
	D_0				0.08794	
	D_1				0.15237	
	E_0					0.13614
E_1					0.19534	

由图4(b)、(c)可知: 蠕变时间不相等条件下, 分级加载蠕变过程的体应变分为一级、二级、三级、四级和五级, 并将逐级加载渗透系数分为 A, B, C, D 和 E 级。通过体应变曲线和渗透系数的时间对应关系, 其中图4(c)可知: 一级加载体应变蠕变阶段出现体应变的由体积变形阶段 \rightarrow 体积不变阶段演化规律, 根据体积不变点确定初始体积渗透系数 A_1 ; 当二级、三级和四级加载蠕变时间少于一级加载时间 ($t_3 < t_2 < t_4 < t_1$), 体应变初始蠕变阶段的渗透系数呈瞬时减小由 $A_2 \rightarrow B_0, B_1 \rightarrow C_0, C_1 \rightarrow D_0$ (最低点) 且 $A_1=B_0 \approx C_0 \approx D_0$ (见表4), 稳定蠕变阶段的渗透系数呈线性增大, 但 $C_1 < B_1 < D_1 < A_2$; 五级加载发生蠕变破坏, 初始蠕变阶段的渗透系数瞬时减小, 由 $D_1 \rightarrow E_0$ (最低点) 且 $B_1 \approx E_0$ (见表4), 稳定蠕变阶段的渗透系数呈线性增大, 加速蠕变的渗透系数呈瞬间急速增大。根据以

上数据分析, 可得出分级加载过程渗透系数具有记忆性, 即岩石孔隙通道具有记忆特征。对这种现象, 可以从岩石的内部结构进行解释。

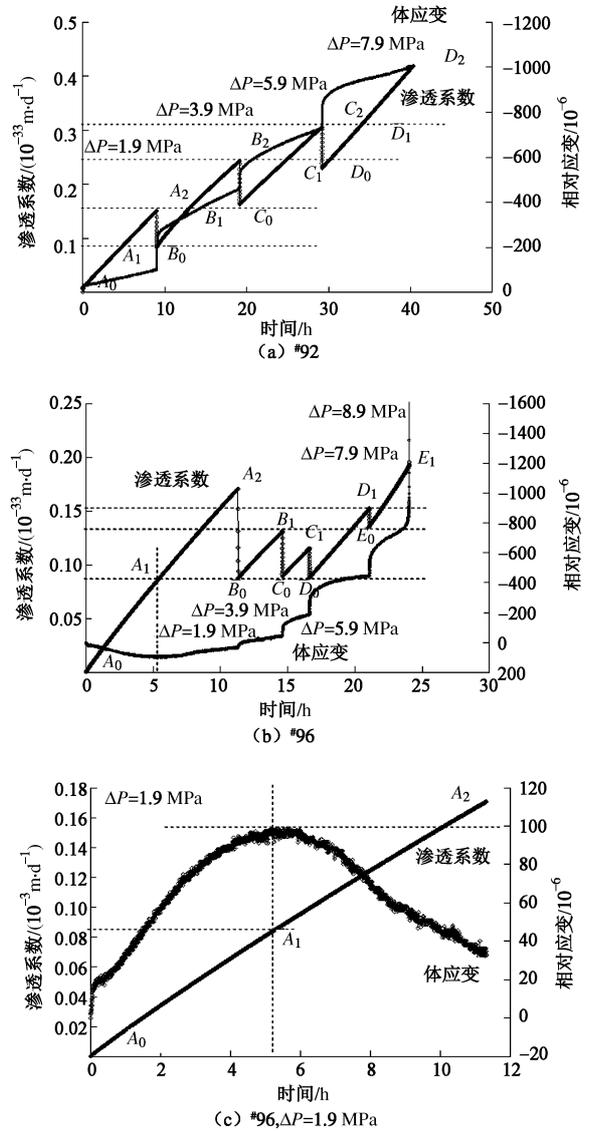


图4 分级加载阶段渗透系数与体应变的关系

Fig. 4 Relation between permeability coefficient and volumetric strain under step loading of seepage pressure

众所周知, 岩石是由不同形状与尺度的矿物颗粒组合而成的多孔材料, 由于在一定的地质和应力环境中经历了漫长的成岩和改造历史, 其内部存在着大量微小孔隙及裂纹等初始损伤。在低应力水平作用下, 岩石试件主要表现为原生裂隙压密及孔洞闭合等局部结构的调整, 随着时间的增长, 试件的体积不断缩小。渗流的主要通道是试件内部固体骨架之间相互连通的孔隙、裂隙及各种类型毛细管。在此阶段由于应力的作用, 有些渗流通道会因闭合而失去过水能力, 因此, 试件的渗透系数会随着试件横向应变增大而减小。若提高渗流水压力, 则渗流对试件内部孔隙、裂隙及其

内部充填物质的作用力会增大,在高渗流水压力冲刷下新产生的损伤,会受到外部轴向应力、围压作用下被压密闭合,但是渗流过程都是按照记忆通道进行渗流,通道在分级加载渗流水压作用下进行变形→闭合→冲蚀→形成新通道。

4 结 论

(1) 分级加载渗流水压作用下细粒砂岩的蠕变曲线符合蠕变演化三阶段特征;随着渗流水压的逐级加载,瞬时轴向、横向应变和瞬时泊松比呈增大的趋势;相对横向应变变化量大于轴向应变变化量,体应变受横向应变影响表现为扩容演化规律。

(2) 随着分级加载渗流水压增加,初始轴向、横向和体应变呈快速增加(I阶段);稳定平均体应变速率影响不大,各级体应变率相差较小(II阶段);随着应变的累积,横向应变量大于轴向应变量呈扩容效应,直至发生蠕变破坏(III阶段)。

(3) 分级加载渗流水压作用下渗流体积曲线呈线性演化,不同渗流压差阶段的渗流体积速率呈“L”型演化;当发生蠕变破坏的渗流体积速率呈“U”型演化。

(4) 对比分级加载过程蠕变时间相等和不相等条件下,渗透系数先瞬时减小后增大,初始渗透系数都具有记忆性,即岩石孔隙通道具有记忆特征;渗流压力增大对试件内部孔隙、裂隙及其内部充填物质有改造作用,渗流冲刷下产生的新孔隙损伤,但是渗流会沿着记忆的孔隙通道发散,即孔隙通道经过变形→闭合→冲蚀→形成新通道过程。

参考文献:

- [1] 孙 钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081 - 1106. (SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081 - 1106. (in Chinese))
- [2] 李化敏, 李振华, 苏承东. 大理岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3745 - 3749. (LI Hua-min, LI Zhen-hua, SU Cheng-dong. Testing study on creep characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3745 - 3749. (in Chinese))
- [3] 张忠亭, 罗居剑. 分级加载下岩石蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 218 - 222. (ZHANG Zhong-ting, LUO Ju-jian. Study on creep properties of rock under step load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 218 - 222. (in Chinese))
- [4] 袁海平, 曹 平, 万 文, 等. 分级加卸载条件下软弱复杂矿岩蠕变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1575 - 1581. (YUAN Hai-ping, CAO Ping, WAN Wen, et al. Study on creep rules of soft and intricate ore-rock under step load and unload[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1575 - 1581. (in Chinese))
- [5] 范庆忠, 高延法. 分级加载条件下岩石流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1273 - 1276. (FAN Qing-zhong, GAO Yan-fa. Experimental study on creep properties of rocks under stepwise loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1273 - 1276. (in Chinese))
- [6] 朱合华, 叶 斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1791 - 1796. (ZHU He-hua, YE Bin. Experimental study on mechanical properties of rock creep in saturation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1791 - 1796. (in Chinese))
- [7] 李 铀, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1673 - 1677. (LI You, ZHU Wei-shen, BAI Shi-wei, et al. Uniaxial experimental study on rheological properties of granite in air-dried and saturated states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1673 - 1677. (in Chinese))
- [8] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 33 - 38. (ZHOU Cui-ying, DENG Yi-mei, TAN Xiang-shao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 33 - 38. (in Chinese))
- [9] 陈钢林, 周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的试验研究[J]. 地球物理学报, 1991, 34(3): 335 - 342. (CHEN Gang-lin, ZHOU Ren-de. An experimental study concerning the macro-scopic effect of water on the deformation and failure of loaded rocks[J]. Acta Geophysica Sinica, 1991, 34(3): 335 - 342. (in Chinese))
- [10] 阎 岩, 王恩志, 王思敬, 等. 岩石渗流_流变耦合的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2095 - 2013. (YAN Yan, WANG En-zhi, WANG Si-jing, et al. Study of seepage-rheology coupling experiment of rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2095 - 2013. (in Chinese))
- [11] 杨红伟. 循环载荷作用下岩石与孔隙水耦合作用机理研

- 究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. (YANG Hong-wei. Study on coupling mechanism of rock and pore water under cyclic loading[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese))
- [12] 姜永东, 鲜学福, 熊德国, 等. 砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1478 - 1481. (JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, XIONG De-guo, et al. Study on creep behaviour of sandstone and its mechanical models[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1478 - 1481. (in Chinese))
- [13] 阎岩. 渗流作用下岩石蠕变试验与变参数蠕变方程的研究[D]. 北京: 清华大学, 2009. (YAN Yan. Research on rock creep tests under seepage flow and variable parameters creep equation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese))
- [14] 张向东, 李永靖, 张树光, 等. 软岩蠕变理论及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1635 - 1639. (ZHANG Xiang-dong, LI Yong-jing, ZHANG Shu-guang, et al. Creep theory of soft rock and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1635 - 1639. (in Chinese))
- [15] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. (YU Shou-wen, FENG Xi-qiao. Damage mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese))
- [16] 蔡美峰, 何满朝, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))

中国地质学会2015年学术年会通知 (第三号)

会议主题

推动地质科技创新, 支撑找矿突破实践, 服务美丽中国建设。

会议主办、协办单位

主办单位: 中国地质学会; 协办单位: 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西延长石油(集团)有限责任公司, 中煤科工集团西安研究院; 承办单位: 32个理事单位、分支机构、省级地质学会。

会议地点: 西安陕西宾馆。

会议论文: 会议将论文(摘要)汇编成册, 作为会议资料发至参会代表。各分会场负责本分会场优秀论文的评选, 由我会统一发放获奖证书, 将于会后推荐到《地质学报》(中文版)、《地质学报》(英文版)、《地质论评》、《矿床地质》、《岩石矿物学杂志》、《地质与勘探》、《地球学报》和《地质学刊》等刊物发表。

展览: 年会期间设立国内外地质找矿领域的设备、仪器、软件、图书等展览、展示。

会议报名注册及食宿费用

报名注册费2015年9月20日前注册: 会员(持会员证)报名注册费: 1000元/人。非会员报名注册费: 1200元/人。学生(持学生证)报名注册费: 800元/人。陪同人员(指院士专家陪同人员等)费: 600元/人。2015年9月20日后(或现场)注册: 会员(持会员证)报名注册费: 1200元/人。非会员报名注册费: 1400元/人。学生(持学生证)报名注册费: 1000元/人。陪同人员(指院士专家陪同人员等)费: 800元/人。

参会代表住宿由会议统一安排, 费用自理; 会议用餐由会议统一安排, 费用由会议统一支付。住宿标准: 单间: 410元/间、510元/间; 标间: 510元/间 特别提醒: 由于参会人数在不断增加, 房源紧张。为准确掌握参会人数, 更好的为参会代表服务, 请务必通过银行汇款的方式提前缴纳报名注册费。受客观因素制约, 会务组将优先满足提前缴纳报名注册费参会代表, 敬请谅解。注册费银行汇款 注册费如选择银行汇款请务必在9月20日前完成, 并注明“注册-姓名-单位”。单位户名: 中国地质学会账号: 0200001409014430830 开户行: 中国工商银行北京百万庄支行。

会议组织重要日期: 9月10日, 论文摘要接收截止日期; 9月20日, 报名参会截止日期, 编制会议手册; 10月8日, 会议报到; 10月9~11日, 大会报告、分会场会议; 10月12日, 会后地质考察。

会议联系人

分会场: 凡涉及论文提交、分会场报告、参会报名的请联系分会场召集人。

年会学术交流联系人: 郝梓国010-68999023, 唐序010-68999020。

会议协调联系人: 华丽娟010-68999018, 高梦瑶010-68999021。

会议报名、注册: 朱凡010-68990791, 赵小萱010-68999019, 王静010-68999019, 李彬颀010-68311539, 邮箱: dzhixuehui@sina.com; 传真: 010-68995305, 地址: 北京市西城区百万庄大街26号中国地质学会, 邮编: 100037。

(中国地质学会 供稿)