

文章编号: 1001-4888(2018)01-0159-08

含水率及围压对砂岩蠕变特性影响的试验研究^{*}

孙彦峰¹, 李永辉²

(1. 河南省核工业地质局, 河南信阳 464000; 2. 河南郑州大学 土木工程学院, 河南郑州 450000)

摘要: 在荷载作用下, 岩石不仅表现出弹性和塑性, 而且具有与时间相关的性质, 即岩石的流变性。工程实践中, 岩石流变现象随处可见, 岩石流变所造成的危害也不容忽视。但目前对岩石含水率及围压对其流变特性影响研究仍不完善。本文采用岩石三轴压缩流变仪开展了不同含水率及围压条件下的砂岩压缩蠕变试验。试验发现, 围压越大, 砂岩的蠕变量越小; 但当围压达到一定值后, 围压对蠕变量的影响降低; 砂岩含水率越高, 瞬时应变越大, 破坏时应变越大, 长期强度越低; 瞬时应变和破坏时应变均与含水率呈线性关系, 长期强度与含水率呈负指数关系。

关键词: 压缩蠕变试验; 含水率; 围压; 砂岩; 蠕变特性

中图分类号: P589.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-235

0 引言

岩石在外荷载的长期作用下, 其应力、应变和破坏形态会不断变化, 表现出明显的时效特性, 岩石的这种时效特性常导致工程失稳破坏, 对人民的生命财产安全构成极大的威胁。如地壳各板块在地应力的长期作用下发生蠕滑甚至断裂, 导致地震频发; 隧道围岩、人工洞室随时间发生长期变形, 甚至坍塌、破坏或岩层失稳; 建筑物或者构筑物地基在使用过程中发生沉降; 煤层或者矿山在开采过程中引起地层迁移、地表塌陷; 山地人工活动引起边坡变形随时间的蠕滑或产生高速滑坡等。近年来, 随着我国经济的快速发展, 国家重大基础设施建设以前所未有的速度在全国展开, 在这些工程建设过程中, 岩石流变问题是亟待解决的主要问题之一, 给岩石流变理论带来了巨大的挑战。例如小湾、向家坝、龙滩水利工程以及锦屏一级和二级水电站等这些工程岩体, 均表现出明显的流变性, 给工程的长期稳定性带来了隐患; 石油与矿产资源开采正逐渐向深部延伸, 许多矿山开采深度达 1000 米以上, 复杂地质条件的存在使地下工程变形与时间的关系越来越突出。

解决以上工程建设中遇到的技术难题, 迫切需要岩石流变理论的发展与相关技术的突破。从 20 世纪 30 年代至今, 室内岩石流变试验一直是岩土工作者探索岩石流变理论最常用的方法之一, 试验对象包括软岩、中硬岩和高强度硬岩, 试验方法包括单轴压缩试验、三轴压缩试验、剪切蠕变试验、弯曲试验及扭转试验等, 通过流变试验, 获得了丰富的研究成果。如: Maranini 等^[1]对石灰岩进行了单轴和三轴压缩蠕变试验, 指出岩石流变原理在低围压下主要是裂纹发展贯通, 在高围压下主要是内部孔隙坍塌。Faber 等^[2]利用单轴压缩蠕变试验对三类沉积岩的蠕变特性进行研究, 指出仅当应力超过某特定值时才会出现等速蠕变和加速蠕变, 否则岩石仅表现出减速蠕变。在国内, 刘雄^[3]对砂岩进行了常规条件下逐级加载并作了长期变形观测, 研究表明岩石流变力学特性与载荷量级和加载史有关。Li Yongsheng 等^[4]对粉砂岩、红砂岩、大理岩和泥岩展开了单轴压缩流变试验, 研究结果表明当长期应力作用时, 岩石

^{*} 收稿日期: 2016-11-06; 修回日期: 2017-03-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 51508522)资助

通讯作者: 孙彦峰(1966—), 男, 高级工程师。主要研究领域: 岩土工程。Email: syfhgy1966@163.com

蠕变速率通常表现出衰减、稳定及加速三个过程,而岩石性质和荷载是影响各阶段持续时间的主要因素。赵永辉等^[5]对花岗斑岩开展了单轴流变试验,指出花岗斑岩在长期应力作用下首先发生瞬时弹性变形,随后产生与时间相关的蠕变变形,但整体上蠕变量较小。崔希海等^[6]利用自主研发的试验仪器对红砂岩单轴压缩流变特性进行研究,根据稳定蠕变阶段与加速蠕变阶段的应力阈值确定红砂岩长期强度,研究结果表明,由岩石横向蠕变应力阈值确定的岩石长期强度比由岩石轴向蠕变应力阈值确定的岩石长期强度值小 19%~35%。袁海平等^[7]对金川镍矿矿区岩石开展了单轴压缩流变试验,指出该矿区岩石呈现明显黏弹塑性非线性特征,并用改进的伯格斯模型对蠕变数据进行了辨识。刘传孝等^[8]就细砂岩开展了单轴压缩流变试验,指出细砂岩岩样的整体蠕变性质不强。湛文武等^[9]对甘肃引洮输水工程平硐红层软岩进行了多组单轴压缩流变试验,指出软岩抗压强度、蠕变速率与其含水量关系密切。韩庚友等^[10]对丹巴水电站薄层状二云石英片岩进行单轴蠕变试验,讨论了片理面与岩石长期强度的关系。Cao Ping 等^[11]通过单轴压缩蠕变试验,对斜长岩在饱水和风干状态下的蠕变特性进行了研究,指出饱水状态岩石达到稳定蠕变所需时间比风干状态岩石更长。

近年来,随着伺服试验机的研发和不断完善,三轴流变试验逐渐开展起来。Senseng^[12]利用三轴流变试验研究了加载历史和尺寸效应对岩盐蠕变的影响。Fujii 等^[13]通过三轴压缩流变试验,获得了花岗岩和砂岩体积、环向和轴向三种蠕变曲线。王俊光等^[14]以不同含水状态下油页岩三轴压缩蠕变试验数据为依据,对水作用下油页岩蠕变三个阶段各自的力学特征进行了分析,并提出了油页岩非线性损伤蠕变模型。上述试验从蠕变速率、蠕变量、长期强度等方面对多种岩石在单轴或三轴应力状态下的蠕变规律进行了研究,但工程岩体不仅处于三向复杂应力之中,而且存在不同的含水率,研究不同围压及含水率对岩石流变规律的影响无疑具有更实际的价值。

为了完善复杂地质环境中岩石蠕变特性的研究,本文采用岩石三轴压缩流变试验仪对完整粗砂岩开展压缩蠕变试验,研究了围压、轴压、含水率等因素与砂岩蠕变特性的关系。

1 压缩蠕变试验概况

蠕变试验使用成都伺服液压设备有限公司生产的岩石三轴压缩流变试验仪进行。该仪器不仅可以进行三轴压缩流变试验,还可以进行常规单轴压缩及常规三轴压缩试验。该仪器围压最大量程为 30MPa,轴向荷载为 600kN,控制精度为 $\pm 0.1\%$,压力稳定时间可达半年以上。与仪器配套的控制部分可自动记录设定的时间、压力或者位移变量,能方便地绘制应力—应变—时间的关系曲线。

目前岩石压缩蠕变试验的加载方式主要有三种:单级加载方式、单体分级增量加载方式和单体分级增量循环加卸载方式^[15],本试验选择单体分级增量加载方式进行。压缩蠕变试验的岩样为粗砂岩。根据试样在各级荷载下进入稳定蠕变的时间(约为 48h),确定每级恒载的时间为 48h 左右,但具体荷载恒定时间视蠕变变化速率而定,当蠕变速率增量不大于 0.001mm/d 时,施加下一级荷载。岩样轴向荷载加载速率为 2.55MPa/min。试验机自动采集试验数据,设置数据采集时间间隔为 10s。试验具体方案见表 1。

表 1 压缩蠕变试验方案
Tab. 1 Compression creep test scheme

岩石类型	试验编号	岩石状态	围压 σ_3 /MPa	试样数量/个	加载方式
粗砂岩	C1~C3	天然	0	3	单体分级 增量直至 岩石破坏
	C4~C6	天然	5	3	
	C7~C9	天然	10	3	
	C10~C12	天然	15	3	
	C13~C15	干燥	5	3	
	C16~C18	浸水	5	3	
	C19~C21	浸水 72h	5	3	

目前一般可采取两种方法对试样进行浸水:一种是自由吸水法;另一种是真空抽气法。本试验选择

自由吸水法,首先将干燥后的粗砂岩试样放在水盆里,淹没试样高度的 1/4,浸泡 2h,然后加水至试样高度的 1/2, 2h 后,升高水面至试样的 3/4 处,浸泡 2h,再加水全部淹没试样^[16]。

岩样 C1~C12 没有经过干燥和浸水处理而处于天然状态,因为本次试验所有岩样均采至同一岩块,因此可根据岩样 C13~C15 烘干试验测得的平均天然含水率代表其天然含水率;岩样 C13~C15 没有进行浸水处理,而是放在 110℃ 烘箱里烘干 24h 至恒重,烘干后,从烘箱里取出试样,立即放入干燥箱,待其温度降至室温,使用高精度电子秤对其称重;岩样 C16~C18 完全浸水后再经过 6h 从水中取出;岩样 C19~C21 完全浸水后再经过 66h 后从水中取出,因其完全浸水时间超过 48h,故可认为岩样 C19~C21 在浸水后处于完全饱和状态,各岩样的含水率如表 2 所示。浸水试样取出后立即用透明薄膜包裹,保证试验过程中试样水分不至过多散失。

表 2 岩样含水率
Tab. 2 Water content of samples

试样编号	初始质量 /g	烘干质量 /g	天然含水率 /%	浸水后质量 /g	试验岩样 含水率 w /%
C13~C15	436.5	429.1	1.7	/	0
C4~C6	/	/	1.7	/	1.7
C16~C18	430.9	423.5	1.7	435.9	2.9
C19~C21	430.8	423.1	1.8	449.3	6.2

2 压缩蠕变试验结果及分析

各个状态下的粗砂岩压缩蠕变试验分 7 组进行,如表 2 所示,试验时每组岩样的轴向应力 σ_1 加载路径完全相同(存在围压 σ_3 的,实际施加的轴向应力大小应为 $\sigma_1 + \sigma_3$)。试验结束后,从各组试验中选择代表岩样分析砂岩蠕变规律。表 3 为粗砂岩岩样的实际应力加载情况。图 1 为采用陈氏法^[17]处理试验结果得到的粗砂岩天然状态下的蠕变全过程曲线(图左)及不同应力水平蠕变曲线(图右)。图 2 为粗砂岩不同含水率状态下的蠕变过程曲线。

表 3 粗砂岩压缩蠕变加载应力水平
Tab. 3 Compressive creep stress level of sandstone

试样编号	围压 /MPa	1 级 /MPa	2 级 /MPa	3 级 /MPa	4 级 /MPa	5 级 /MPa	6 级 /MPa	7 级 /MPa	8 级 /MPa	9 级 /MPa	10 级 /MPa
C1~C3	0	20.4	28.1	35.7	43.4	51	58.7				
C4~C6	5	25.4	33.1	40.7	48.4	56	63.7	71.3	/	/	/
C7~C9	10	30.4	38.1	45.7	53.4	61	68.7	76.3	84	91.6	/
C10~C12	15	35.4	43.1	50.7	58.35	66	73.7	81.3	89	96.6	104.3
C13~C15	5	25.4	33.1	40.7	48.4	56	63.7	71.3	/	/	/
C16~C18	5	25.4	33.1	40.7	48.4	56	/	/	/	/	/
C19~C21	5	25.4	33.1	40.7	48.4	/	/	/	/	/	/

不同围压下粗砂岩的各级轴向蠕变量与轴压的关系如图 3 所示。由图 3 可知,粗砂岩蠕变量随轴向应力水平($\sigma_1 - \sigma_3$)增加,曲线的斜率逐渐变大,说明蠕变速率也变大。当围压增大时,试件的蠕变量也在降低,表明围压对岩石蠕变变形具有约束作用。分析围压为 10MPa 和 15MPa 时的粗砂岩蠕变量发现,两者相差很小,说明当围压达到一定值后,随着围压增加,其对蠕变量的影响降低。

粗砂岩在不同围压作用下的破坏形态如图 4 所示。在单轴压缩蠕变条件下,岩样存在多条平行于轴向荷载的裂隙而没有明显的剪切破裂面,所有试样均以纵向劈裂破坏为主,如图 4(a)所示,这是由于岩石在没有侧向约束情况下,轴向荷载会使岩样同时受到轴向的压力和纵向的拉力,而岩石本身属脆性

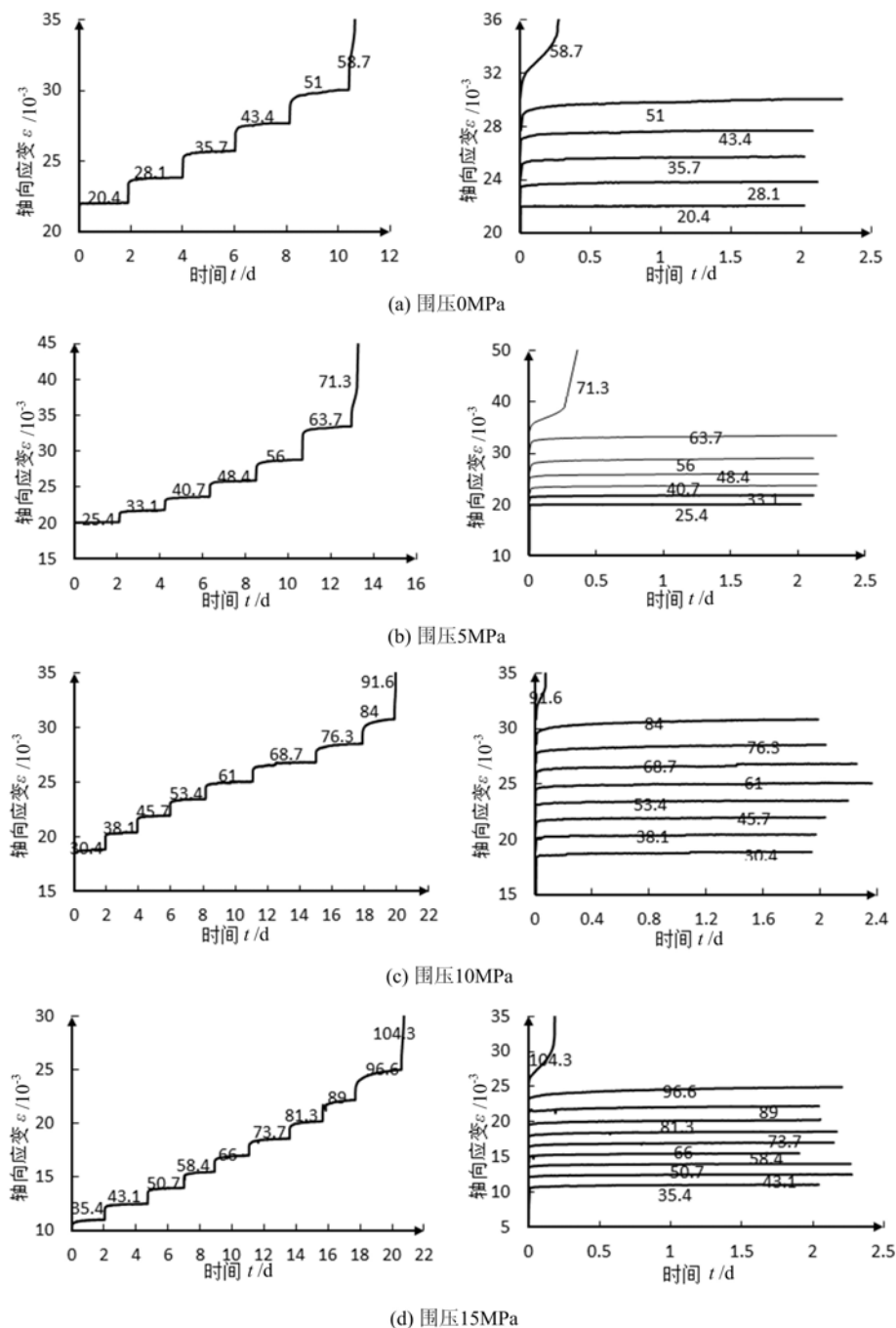


图 1 天然状态下粗砂岩压缩蠕变试验

Fig. 1 Creep test of sandstone under natural condition

材料,其抗拉强度远远低于抗压强度,故岩石在单轴压缩时被拉坏。围压为 5MPa 时,粗砂岩主要为剪切破坏,但是剪切面不规则,个别试样(如 C6)还存在 X 型共轭剪切破坏,这说明此时的围压还不足以完全限制粗砂岩的侧向张拉作用,如图 4(b)所示。当围压为 10MPa 和 15MPa 时,岩石呈现标准的剪切破坏形态,剪切面为规则的平面,而且从试样端口形态可以看到明显的擦痕和许多岩石粉末。这表明在高围压作用下,岩石的侧向变形被极大地约束,岩石主要是由于沿剪切面的滑移摩擦作用而破坏,如图 4(c)、(d)所示。

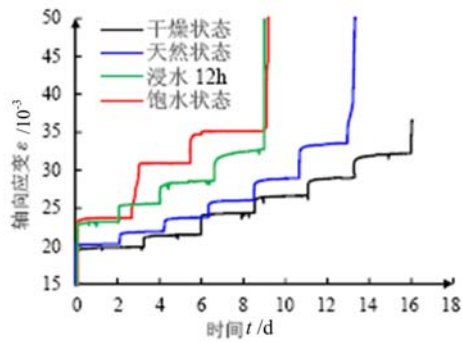


图2 不同含水率状态下粗砂岩压缩蠕变试验结果
(围压 5MPa)

Fig. 2 Creep test result of coarse sandstone
under different water content ratio
(confining pressure 5MPa)

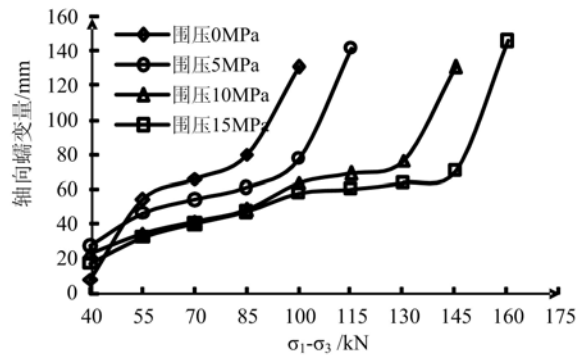


图3 不同围压下粗砂岩的各级轴向蠕变量与轴压的关系
Fig. 3 Relationship between creep variables and
axial compression of coarse sandstone
under different confining pressures

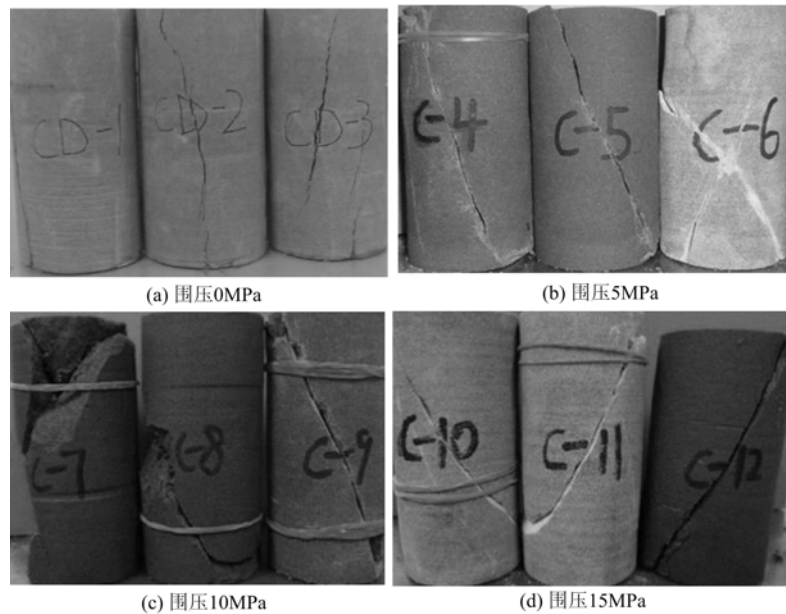


图4 试样蠕变破裂形态

Fig. 4 Fracture morphology of specimen

采用蠕变结果的等时簇曲线确定粗岩石的长期蠕变强度^[16]。通过分析得到干燥粗砂岩的长期强度为 64.4MPa,天然状态粗砂岩的长期强度为 66.2MPa,浸水 12h 粗砂岩的长期强度为 43.3MPa,饱水砂岩的长期强度为 40.7MPa。由含水率与岩石长期强度关系图 5 可知,含水率对岩石长期强度有较大的影响,即相同围压作用下岩石含水率越高,长期强度越低。但对天然状态岩样进行干燥处理后,其长期强度反而有所降低。对天然状态下及浸水处理后的岩样的长期强度变化关系进行拟合分析,粗砂岩的长期强度 σ_{∞} 与含水率的关系式如下:

$$\sigma_{\infty} = 645.50e^{-1.90w} + 40.69 \quad (1)$$

式(1)表明:长期强度与含水率成负指数关系,含水率增加会使天然状态的岩石的长期强度降低。这是由于岩石含水率增加,孔隙中自由水增加,颗粒之间的润滑作用加强,流动性变强,粘滞系数减小,内聚力减小,强度降低。但随着岩石含水率的持续增加,岩石的长期强度降低幅度不明显。这是由于孔隙中的自由水含量在一定的范围内变化,便会明显影响颗粒间的润滑作用,岩石的强度也明显改变,但孔隙中的自由水增加到一定值后,对岩石粘滞系数和内聚力的影响作用变小,对应的长期强度衰减也不

明显。

通过图 6 可知,在初始轴向荷载作用时,粗砂岩岩样 C13 的瞬时应变值为 19.36×10^{-3} ,岩样 C4 的瞬时应变值为 21.97×10^{-3} ,岩样 C16 的瞬时应变值为 23.12×10^{-3} ,岩样 C19 的瞬时应变值为 23.81×10^{-3} 。在相同围压、轴压作用时,含水率与岩石初始瞬时应变的拟合关系曲线如图 6 所示。

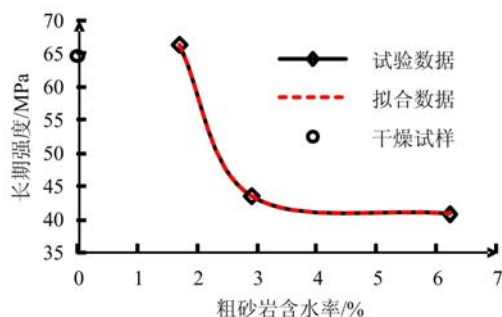


图 5 含水率对粗砂岩长期强度的影响

Fig. 5 Effect of water content on the long-term strength of sandstone

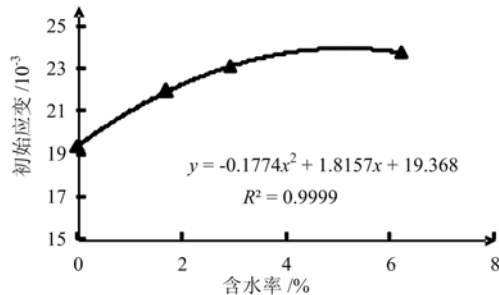


图 6 含水率与初始应变关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between water content and initial strain

从图 6 可以看出,含水率对岩石的瞬时应变影响较大。当其他外部条件相同时,岩石的瞬时应变随含水率增加而增大,当含水率达到一定程度时,增加程度变缓。通过曲线拟合,含水率与岩石的瞬时应变的关系式如下所示:

$$\epsilon = (-0.1774\omega^2 + 1.8157\omega + 19.368)10^{-3} \quad (2)$$

究其原因,水对岩石颗粒会起到润滑和溶蚀的作用,水一方面溶解了微矿物质从而使空隙变大,另一方面使颗粒间的接触更加光滑而变得不牢固,宏观表现为在同等应力条件下含水率更大的岩石瞬时变形更大。

根据图 2 最后一级荷载对应的粗砂岩应力—应变关系可以得到,岩样 C13 的最终应变值为 36.64×10^{-3} ;岩样 C4 的最终应变值为 38.96×10^{-3} ;岩样 C16 的最终应变值为 43.16×10^{-3} ;岩样 C19 的最终应变值为 46.28×10^{-3} 。试验结果表明含水率越大的岩石在最终破坏时的应变越大,蠕变量也越大。含水率与岩石破坏时应变的关系曲线如图 7 所示。含水率与岩石的破坏时应变的关系式如下所示:

$$\epsilon = (1.5901\omega + 36.967) \times 10^{-3} \quad (3)$$

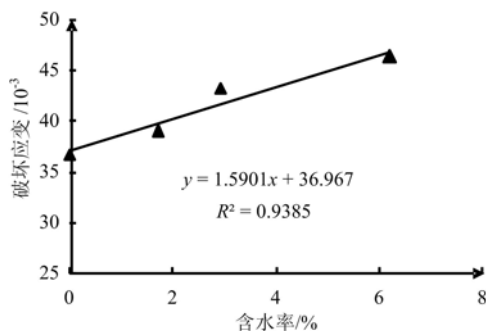


图 7 含水率与岩石破坏时应变的拟合关系曲线

Fig. 7 Relationship between water content and strain of rock failure

3 结论

(1) 对比不同围压下粗砂岩的各级蠕变量与轴向应力水平的关系发现,轴向应力和围压会对粗砂岩蠕变特征产生影响。轴向应力增加会加快蠕变变形发生,围压则会限制岩石蠕变变形,但约束作用效果会逐渐不明显;随着围压的增加,粗砂岩蠕变破坏形式由劈裂破坏向剪切破坏和 X 型共轭剪切破坏

转变。

(2) 粗砂岩的含水率对其蠕变特征具有明显影响。长期强度与含水率成负指数关系,含水率增加促进了岩石颗粒之间的润滑作用,反映为岩石长期强度显著降低,并最终趋于一个稳定的值;岩石干燥处理反而使其长期强度有所降低;含水率增加会使岩石各级瞬时蠕变量及破坏时蠕变量呈线性增加。

参考文献:

- [1] Maranini E, Brignoli M. Greep behavior of a weak rock[J]. *Experimental Characterization*, 1999(36):127—138.
- [2] Faber G R, Pellet F D. Greep and time-dependent damage in argillaceous rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*, 2006, 43(6):950—960.
- [3] 刘雄. 岩石扭转流变试验分析[J]. *岩土力学*, 1979, 2:95—100 (LIU Xiong. Analysis on torsional rheology test of rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1979, 2:95—100(in Chinese))
- [4] Li Y S, Xia C X. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*, 2000, 37(3):467—475.
- [5] 赵永辉, 何之民, 深明荣. 润扬大桥北锚碇岩石流变特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(4):583—586 (ZHAO Yonghui, HE Zhimin, SHEN Mingrong. Testing study on rock rheological characteristic of north anchor block of runyang bridge[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4):583—586 (in Chinese))
- [6] 崔希海, 付志强. 岩石流变特性及长期强度的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5):1021—1024 (CUI Xihai, FU Zhiliang. Experimental study on rheology properties and long-term strength of rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5):1021—1024 (in Chinese))
- [7] 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 Haiping, CAO Ping, WAN Wen, et al. Study on creep rules of soft and intricate ore-rock under step load and unloads[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8):1575—1581 (in Chinese))
- [8] 刘传孝, 张加旺, 张美政, 等. 分级加卸载硬岩短时蠕变特性实验研究[J]. *实验力学*, 2009, 24(5):459—466 (LIU Chuanxiao, ZHANG Jiawang, ZHANG Meizheng, et al. Experimental study of short-term creep characteristics base on step loading-unloading method for hard rock[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(5):459—466 (in Chinese))
- [9] 湛文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增1):3076—3081 (CHEN Wenwu, YUAN Pengbo, LIU Xiaowei. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(S1):3076—3081 (in Chinese))
- [10] 韩庚有, 王思敬, 张晓平, 等. 分级加载下薄层状岩石蠕变特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(11):2239—2247 (HAN Gengyou, WANG Sijing, ZHANG Xiaoping, et al. Study of creep properties of thinly laminated rock under step loading[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(11):2239—2247 (in Chinese))
- [11] Cao Ping, Wan Linhui, Wang Yixian. Viscoelasto-plastic properties of deep hard rocks under water environment [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21:2711—2718.
- [12] Senseny P E. Specimen size and history effects on creep of rock salt[C]//First conference on the mechanical behavior of salt. The Pennsylvania State University, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 1981:369—389.
- [13] Fujii Y, Kiyama T, Ishijima Y, et al. Circumferential strain behavior during Greep tests of brittle rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining*, 1999, 36:323—337.
- [14] 王俊光, 梁冰, 田蜜. 含水状态下油页岩非线性损伤蠕变特性研究[J]. *实验力学*, 2014, 29(1):112—118 (WANG Junguang, LIANG Bing, TIAN Mi. Study of creep characteristics produced by nonlinear damage of oil shale in hydrous state[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(1):112—118(in Chinese))
- [15] 孙钧. 岩石材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [16] 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]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(6):1081—1106 (in Chinese))

- [17] 陈宗基, 康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4):299—312 (CHEN Zongji, KANG Wenfa. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(4):299—312(in Chinese))

Experimental study of the influence of moisture content and confining pressure on sandstone creep characteristics

SUN Yan-feng¹, LI Yong-hui²

(1. Henan Nuclear Industry Geological Bureau, Henan 46400, China;

2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Henan 450000, China)

Abstract: Under the action of load, rocks not only show elasticity and plasticity, but also have the time-depending properties, i. e. rock rheology. In engineering practice, rock rheological phenomena can be seen everywhere, and the damage caused by rock rheology can't be ignored. However, the influence of moisture content and confining pressure on rheological properties of rock is still studied incomplete. Compressive creep experiment of sandstone was carried out, under condition of different moisture content and confining pressure based on a tri-axial compression rheological test apparatus. Experimental results show that the larger the confining pressure is, the smaller the sandstone creep value is. But when the confining pressure reaches a certain range, its influence on creep deformation reduces. The higher the moisture content is, the larger the instantaneous strain and failure strain becomes, and the lower the long-term strength gets. The instantaneous strain and failure strain are linearly related to moisture content; the long-term strength is negatively exponential with moisture content.

Keywords: compression creep test; moisture content; confining pressure; sandstone; creep characteristics