

# 砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应试验研究

刘建<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 乔丽苹<sup>1</sup>, 朱杰兵<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 针对干燥、饱水以及不同离子浓度和酸碱度水溶液循环流动作用至水-岩反应平衡后的砂岩试件, 完成一系列单轴压缩蠕变试验。根据试验结果, 通过对不同应力水平下干燥砂岩和饱水砂岩的应变-时间关系、瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率的比较分析, 揭示饱水砂岩蠕变特性的水物理作用效应与机制。在此基础上, 分别针对砂岩在酸碱度相同而离子浓度不同以及酸碱度不同而离子浓度相同这两类流动水溶液作用后, 其应变-时间关系、瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率的差异性开展系统研究, 获得砂岩蠕变特性的水溶液离子浓度影响效应和酸碱度影响效应, 进而探讨其水物理化学作用机制。研究表明, 饱水砂岩蠕变性质比干燥砂岩明显; 上述不同流动水溶液作用后的砂岩蠕变特性又比干燥、饱水砂岩显著; 饱水砂岩蠕变特性主要存在水物理作用效应; 而不同流动水溶液作用后砂岩的蠕变特性则兼具水物理作用效应和水化学作用效应; 砂岩蠕变的水溶液离子浓度作用效应呈现出离子浓度越高则蠕变特性越显著的特点。研究成果对于岩石流变力学及水-岩相互作用领域的理论与应用研究, 具有良好的启示与借鉴意义。

**关键词:** 岩石力学; 砂岩; 蠕变特性; 水物理化学作用; 试验研究; 机制分析

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2008)12-2540-11

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON CREEP BEHAVIOR AND MECHANISM OF SANDSTONES WITH HYDRO-PHYSICO-CHEMICAL EFFECTS

LIU Jian<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, QIAO Liping<sup>1</sup>, ZHU Jiebing<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** A series of uniaxial compression creep tests on dry, saturated sandstones, and the sandstones with hydro-physico-chemical influencing effects due to the circulating flow of different hydro-chemical solutions are conducted. Based on the test results, the strain versus time relations, instantaneous strains, creep strains and creep rates of dry and saturated sandstones under different stress levels are compared; and the hydro-physical influencing effects and mechanisms of saturated sandstone are derived. Furthermore, the differences of creep strain versus time relations, creep strains, instantaneous strains and creep rates of the sandstones with hydro-physico-chemical influencing effects due to the circulating flow of different hydro-chemical solutions are systematically and originally researched respectively. The influencing effects of ion concentrations and pH values of the different hydro-chemical solutions are revealed; and the corresponding mechanisms of hydro-physico-chemical actions are

**收稿日期:** 2008-06-24; **修回日期:** 2008-10-06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(40672192, 50479072); 国家自然科学基金重点项目(50539090); 湖北省自然科学基金资助项目(2007ABB040)

**作者简介:** 刘建(1966-), 男, 博士, 1987年毕业于湘潭矿业学院地质学专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩土力学与工程的理论与应用方面的研究工作。E-mail: jliu@whrsm.ac.cn

investigated. The research demonstrates that the creep behavior of saturated sandstone is more obvious than that of dry sandstone, while the creep behavior of the sandstones with hydro-physico-chemical influencing effects due to the circulating flow of different hydro-chemical solutions are larger than those of dry and saturated sandstones. The creep behavior of saturated sandstone is affected dominantly by the hydro-physical action. The creep behavior of the sandstones due to the circulating flow of different hydro-chemical solutions has both the hydro-physical and hydro-chemical influencing effects. The larger the creep behaviors of sandstones are, the stronger the ion concentrations of the hydro-chemical solutions are. This paper has a useful reference to the theoretical and applied research in the field of rock rheological mechanics and water-rock interaction.

**Key words:** rock mechanics; sandstone; creep behaviour; hydro-physico-chemical effect; experimental research; mechanism analysis

## 1 引言

岩体工程失稳许多是由于岩石及结构面的时效变形积累而导致的流变破坏, 而水是诱发各种工程地质灾害最活跃的载体。地下水一方面对岩体介质产生润滑、软化、泥化、结合水强化以及冲刷运移等物理作用, 另一方面又与岩体之间不断进行着离子交换、溶解、溶蚀、水化、水解、氧化还原等化学作用<sup>[1]</sup>。地下水与岩体之间的水物理化学作用不仅会使岩体矿物颗粒间的摩擦因数和黏聚力减小, 还可改变岩体的矿物组成与微细观结构, 使其产生孔隙、溶洞及溶蚀裂隙等, 并增加其孔隙率, 由此而引起其强度和刚度等力学性质的劣化。对遇水后强度降低的岩石, 水是造成其损伤的一个重要原因, 有时它比力学因素造成的损伤更为严重<sup>[2]</sup>, 而岩石的时效变形行为及流变破坏正是源于其内部损伤随时间逐渐积累, 且同时伴随着宏观主裂纹的流变时效扩展<sup>[3]</sup>。所有这些过程都具有很强的时间效应, 并且通过应力作用下岩体的水物理化学损伤积累, 最终从宏观上影响岩体的流变力学行为。因此, 对于存在地下水作用的大坝基础、边坡、地下洞室等岩体工程而言, 其长期稳定性不单纯取决于应力作用下岩石和结构面本身的流变行为, 而是依赖于应力与水长期共同作用下的耦合流变过程, 这一过程同时也是一个复杂的水物理化学 - 力学作用过程。

已有的研究表明, 水对岩体的流变性质具有十分显著的影响。Wawersik 和 Brown 通过试验发现花岗岩和砂岩的时效变形随含水量的增高而增大, 在单轴应力状态下, 其干燥和饱水试件的稳态蠕变率可相差两个数量级<sup>[4]</sup>。孙 钧<sup>[3]</sup>的研究表明, 饱水状态下黏性红砂岩的长期抗压强度仅为干燥状态下的

46.3%。朱合华和叶 斌<sup>[5]</sup>通过对干燥和饱水状态下凝灰岩的单轴蠕变试验发现, 含水量对凝灰岩极限蠕变量的影响非常明显, 其干燥和饱水试样的极限蠕变值可相差 5~6 倍。李 铀等<sup>[6]</sup>通过对风干和饱水花岗岩的单轴蠕变试验研究, 获得饱水花岗岩长期强度明显降低、流变速率和应变量显著增大的结论。刘光廷等<sup>[7]</sup>对软弱砾岩的单、双轴流变试验结果显示, 相同应力条件下, 泡水砾岩流变变形相当于干燥状态的 10 倍。迄今为止, 关于水对岩体流变特性作用效应的研究主要涉及饱水及不同含水量的影响<sup>[3~12]</sup>, 且所获成果非常有限, 而针对其水物理化学作用效应所开展的研究, 目前尚未见报道。毫无疑问, 就这一问题开展深入细致和定量化研究, 不但可以丰富岩体流变学理论, 而且对于存在水物理化学作用效应的岩体工程长期稳定性、石油工程油井井壁稳定、核废料储存库安全以及环境工程中污染物处置等问题均具有重要的应用价值。

本文在已完成的砂岩水物理化学微细观损伤试验与机制分析<sup>[13]</sup>以及砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应试验与本构研究<sup>[14]</sup>等工作的基础上, 进一步针对干燥、饱水以及不同离子浓度和酸碱度水溶液循环流动作用至水 - 岩反应平衡后的砂岩试件, 完成了一系列单轴压缩蠕变试验。根据试验结果, 通过对不同应力水平下干燥和饱水砂岩的应变 - 时间关系、瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率的比较分析, 揭示了饱水砂岩蠕变特性的水物理作用效应与机制。在此基础上, 分别针对砂岩在酸碱度相同而离子浓度不同以及酸碱度不同而离子浓度相同这两类流动水溶液作用后, 其应变 - 时间关系、瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率的差异性开展了系统研究, 获得了砂岩蠕变特性的水溶液离子浓度影响效应和酸碱度影响效应, 进而探讨了其水物理化

学作用机制。研究表明,饱水砂岩蠕变性质比干燥砂岩明显;上述不同流动水溶液作用后的砂岩蠕变特性又比干燥、饱水砂岩显著;饱水砂岩蠕变特性主要存在水物理作用效应;而不同流动水溶液作用后砂岩的蠕变特性则兼具水物理作用效应和水化学作用效应;砂岩蠕变的水溶液离子浓度作用效应呈现出离子浓度越高则蠕变特性越显著的规律。本文的研究对于岩石流变力学及水-岩相互作用领域的理论与应用研究,具有良好的启示与借鉴意义。

## 2 试验方案与过程

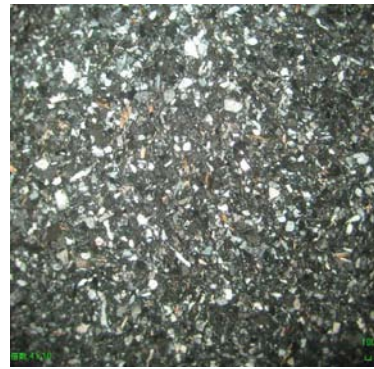
### 2.1 砂岩试件的制备与选择

试验所用岩样为重庆市侏罗纪沙溪庙组砂岩。岩石矿物成分鉴定为嵌晶结构,接触孔隙式胶结细粒砂状结构。岩石由石英、长石、岩屑、云母及少量副矿物经绿泥石、石膏胶结组成。碎屑呈次圆状,粒径为0.05~0.20 mm。长石以正长石为主,部分长石晶粒中含有绿帘石、绿泥石包体。岩屑由基性火山岩、绿帘石石英片岩及绿泥石板岩屑组成。主要矿物成分含量为:石英 58.5%,长石 13.5%,绿泥石胶结物 10%,生物岩屑 18%。岩样为细粒砂状结构,颗粒呈次棱角状至次圆状,呈点接触至线接触。其平均孔隙率与容重经过测定分别为 7.50%和 24.9 kN/m<sup>3</sup>。

考虑到试件的均匀性及成果的可比性等,试件在同一完整的岩块上切割加工而成,均为 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱形标准试件。除去具有缺陷的试件,进而对试件进行声波波速测试,并将声波波速离散性大的试件剔除。图 1 为随机选择的不同砂岩试件在干燥状态下的显微结构图像,表明用于本次试验研究的试件均一性良好。



(a) 砂岩试件的显微结构照片 1



(b) 砂岩试件的显微结构照片 2

图 1 不同砂岩试件的显微结构照片

Fig.1 Microscopic-structure photos of different sandstone samples

### 2.2 试验方案与过程

对大量资料的调研分析表明,地下水中的阳离子主要为 Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, 阴离子主要包括 Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等。考虑到水溶液作用因素的典型性与代表性,同时根据本次研究的目的,设计如表 1 所示的 5 种水溶液配制方案来模拟实际的地下水环境。

表 1 不同水环境的溶液配制方案

Table 1 Initial concentrations of Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> ions, and pH values of different hydrochemical solutions used in the research

水溶液类型	Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> 离子浓度 (mol · L <sup>-1</sup> )	pH 值
A	0.001	6
B	0.010	6
C	0.500	6
D	0.010	9
E	0.010	3

本次试验研究的方案与基本思路为:以干燥砂岩的蠕变试验结果为基准,饱水砂岩蠕变试验主要研究砂岩蠕变特性的水物理作用效应;表 1 中 pH 值相同而离子浓度不同的情况(水溶液 A, B, C)用于对比分析其水溶液离子浓度效应;离子浓度相同而 pH 值不同的情况(水溶液 B, D, E)则用于研究其水溶液酸碱度效应。

试验采用自行设计的循环水作用装置,试件在浸入水溶液前先以 45 °C 恒温烘干 48 h,然后在抽真空箱中按 0.1 MPa 压力抽真空 12 h;试验过程中保持各装置中的水流循环速率为 150 L/h;试件浸入水溶液后对水作用装置进行严格密封。待测试结果

表明水 - 岩反应平衡后(180 d)<sup>[13]</sup>, 取出试件并以其相应的水溶液采用抽真空方法强制饱和。此外, 为防止不同水溶液及蒸馏水饱和后的砂岩试件在试验中的水份蒸发, 同时避免干燥状态砂岩在试验中吸收空气中的水份, 试验前均用聚氯乙烯树脂和环己酮按质量比为 1 : 4 调和后, 用毛刷均匀薄抹于试件表面密封。

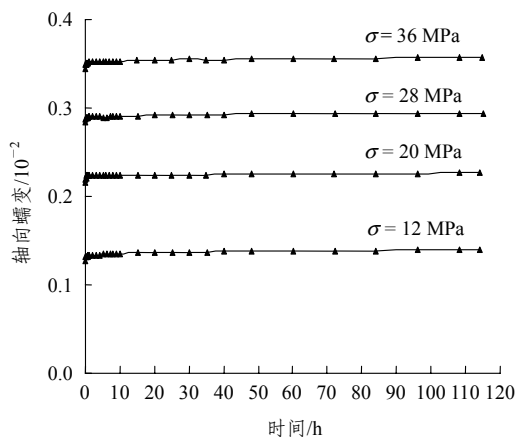
蠕变试验采用分级增量加载的方式。蠕变试验前在 MTS 试验机上按照 0.002 MPa/s 的加载速率开展常规单轴试验, 获得干燥、饱水及不同水溶液作用后砂岩的单轴抗压强度, 以此作为蠕变试验加载分级的依据。最后确定的蠕变试验分级荷载值分别为 12, 20, 28, 36 MPa。

在完成上述准备工作后, 分别针对干燥、饱水以及上述不同离子浓度和 pH 值水溶液循环流动作用至水 - 岩反应平衡后的饱和砂岩试件, 开展一系列单轴压缩蠕变试验。蠕变试验在 TAJW - 2000 岩石蠕变试验机上进行, 同时, 为避免温度等外界条件的影响, 整个蠕变试验过程中实验室的室内温度均控制在 20 °C ± 0.5 °C。

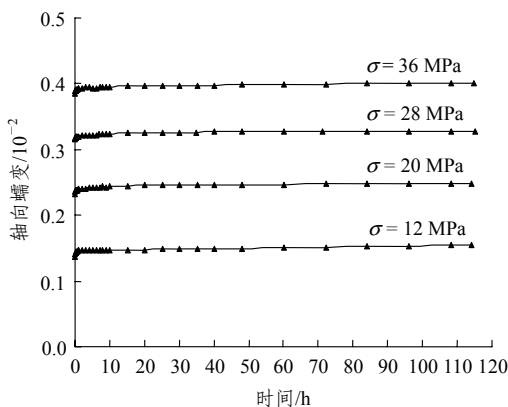
### 3 饱水砂岩蠕变特性水物理作用效应

用于单轴压缩蠕变试验的干燥砂岩试件中无水存在, 而饱水砂岩试件采用蒸馏水饱和且未经水溶液循环流动作用, 可视为无水化学作用效应, 故可通过比较饱水砂岩与干燥砂岩试验结果的差异, 来获得饱水砂岩蠕变特性的水物理作用效应。

图 2 分别给出了单轴压缩蠕变试验所得干燥和饱水砂岩在各级应力水平下的轴向蠕变 - 时间关系曲线。



(a) 干燥砂岩



(b) 饱水砂岩

图 2 干燥和饱水砂岩轴向蠕变 - 时间关系曲线  
Fig.2 Axial creep-time curves of dry and saturated sandstones

从图 2 所示蠕变曲线的形态来看, 加载完成时, 砂岩发生瞬时变形, 继而产生随时间而增长的蠕变变形, 随后, 蠕变变形随时间增长而逐渐趋缓, 当达到一定时间后, 变形不再增长, 岩石的最终变形趋向于一个稳定值。这说明, 对于本次试验的各级应力水平, 干燥和饱水岩样只存在减速蠕变和稳态蠕变段, 而未出现加速蠕变段。对图 2 的分析还表明: 在同一恒定应力水平下, 饱水砂岩在试验中任何时刻的蠕变应变量均大于对应时刻干燥砂岩的蠕变应变量。

表 2, 3 分别对比列出了干燥和饱水砂岩在各级应力水平下的瞬时应变值和  $t = 115$  h 时的轴向蠕变应变量。

表 2 各应力水平下干燥和饱水砂岩瞬时应变值

Table 2 Instantaneous strains of dry and saturated sandstones under different stress levels

状态	瞬时应变/ $10^{-4}$			
	12 MPa	20 MPa	28 MPa	36 MPa
干燥	12.70	20.30	26.00	31.20
饱水	13.80	21.60	28.10	34.00

表 3 各应力水平下干燥和饱水砂岩轴向蠕变应变量( $t = 115$  h)

Table 3 Axial creep strains of dry and saturated sandstones under different stress levels( $t = 115$  h)

状态	轴向蠕变应变量/ $10^{-4}$			
	12 MPa	20 MPa	28 MPa	36 MPa
干燥	1.27	1.17	0.85	1.24
饱水	1.67	1.64	1.28	1.54

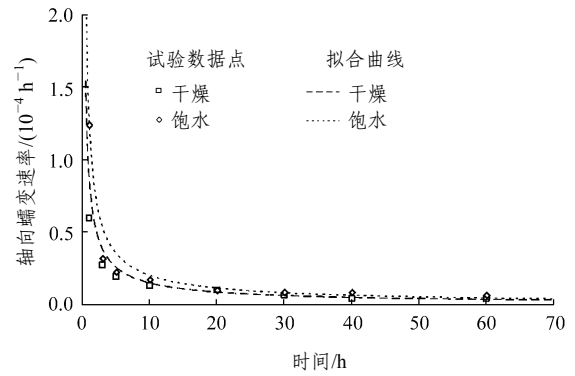
由表 2 可见, 对于同一应力水平, 当轴向加载完成时, 饱水砂岩的瞬时应变均大于干燥砂岩, 其最大增量为 8.97%, 最小为 6.40%, 一般为 8%~9%。

表 3 表明, 在同一恒定应力水平下, 饱水砂岩  $t = 115 \text{ h}$  时的蠕变应变值也均大于干燥砂岩, 其最大增量为 50.59%, 最小为 24.19%; 饱水砂岩的蠕变应变值为干燥砂岩的 1.24~1.51 倍。

对比分析图 3 中的干燥和饱水砂岩轴向蠕变速率 - 时间曲线, 可发现如下特点:

(1) 对于同一恒定应力水平, 饱水砂岩的蠕变速率大于相同时刻干燥砂岩的蠕变速率。

(2) 与干燥砂岩相比, 饱水砂岩蠕变速率下降较慢, 进入稳定蠕变阶段需要的时间更长。



(d)  $\sigma = 36 \text{ MPa}$

图 3 干燥和饱水砂岩轴向蠕变速率 - 时间曲线比较

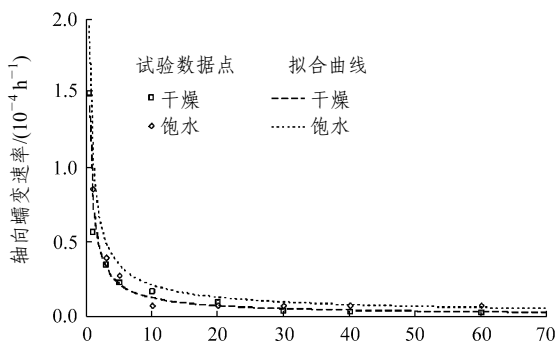
Fig.3 Comparison of axial creep rate-time curves of dry and saturated sandstones

上述分析表明, 对于相同应力水平, 饱水砂岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率均比对应时刻的干燥砂岩大, 显然, 其差异正好反映了饱水砂岩蠕变特性中水物理作用效应的存在。

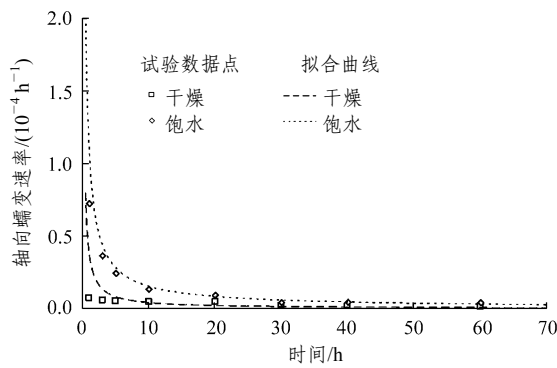
## 4 砂岩蠕变特性的水化学作用效应

### 4.1 水溶液离子浓度对砂岩蠕变特性的影响效应

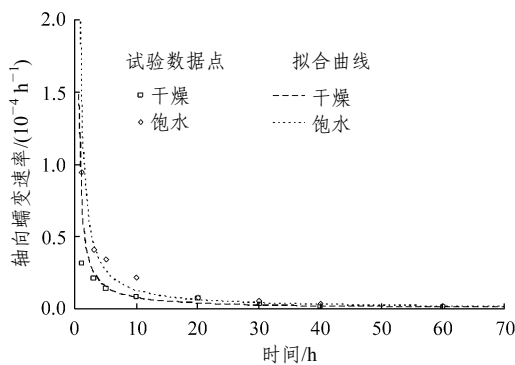
图 4 分别给出了单轴蠕变试验所得水溶液 A,



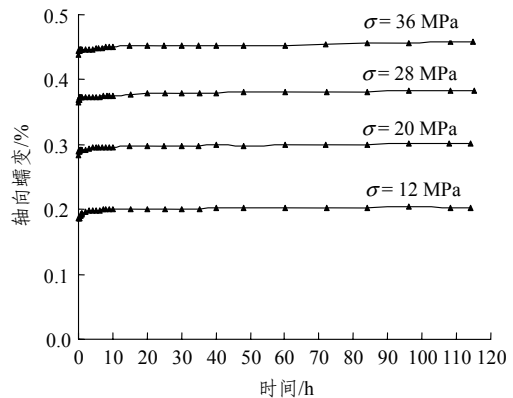
(a)  $\sigma = 12 \text{ MPa}$



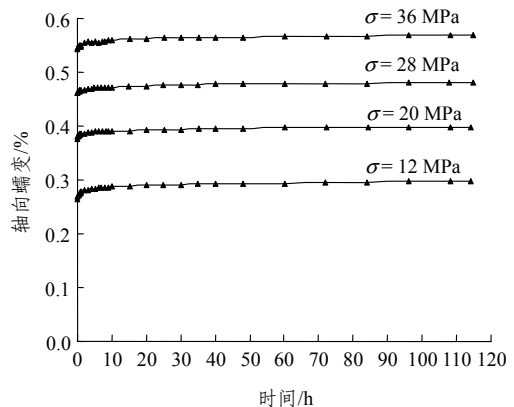
(b)  $\sigma = 20 \text{ MPa}$



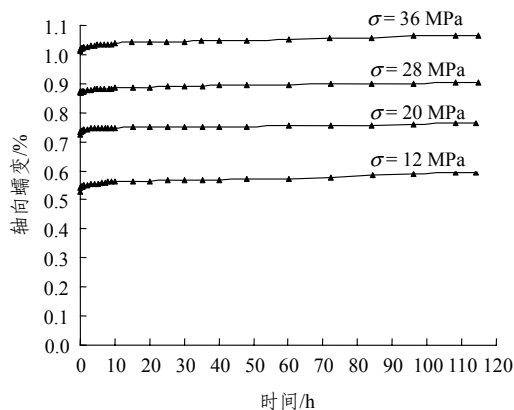
(c)  $\sigma = 28 \text{ MPa}$



(a) 水溶液 A



(b) 水溶液 B



(c) 水溶液 C

图 4 水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的轴向蠕变 - 时间曲线

Fig.4 Uniaxial creep curves of sandstones with hydro- physico-chemical effects due to the circulating flow of hydrochemical solutions A, B, and C

B, C 循环流动作用至水 - 岩反应平衡(180 d)后砂岩在各级应力水平下的轴向蠕变 - 时间关系曲线。表 4 和 5 分别对比列出了各级应力水平下的瞬时应变值和  $t = 115 \text{ h}$  时的轴向蠕变应变值。

表 4 水溶液 A, B, C 循环流动作用后各应力水平下砂岩的瞬时应变值

Table 4 Instantaneous strains of sandstones with hydro-physico-chemical effects due to the circulating flow of hydrochemical solutions A, B, and C under different stress levels

水溶液类型	砂岩瞬时应变值/ $10^{-4}$			
	12 MPa	20 MPa	28 MPa	36 MPa
A	18.60	26.70	33.10	38.70
B	26.40	34.30	40.60	46.80
C	52.70	65.80	76.30	87.30

表 5 水溶液 A, B, C 循环流动作用后各应力水平下砂岩蠕变应变值( $t = 115 \text{ h}$ )

Table 5 Axial creep strains of sandstones with hydro-physico-chemical effects due to the circulating flow of hydrochemical solutions A, B, and C under different stress levels( $t = 115 \text{ h}$ )

水溶液类型	轴向蠕变应变值/ $10^{-4}$			
	12 MPa	20 MPa	28 MPa	36 MPa
A	1.724	1.698	1.691	1.900
B	3.455	2.128	1.934	2.657
C	6.704	4.059	3.328	5.138

上述试验中水溶液 A, B, C 的酸碱度(pH 值)相同而离子浓度不同, 可反映砂岩蠕变性质的水溶

液离子浓度影响效应。若以  $\epsilon^e$ ,  $\epsilon^{cr}$  分别表示砂岩的瞬时应变和轴向蠕变应变值, 以下标 “dry”, “sat”, “a”, “b”, “c” 分别代表干燥、饱水和水溶液 A, B, C 循环作用等状态或条件, 则对图 4 和 2 所示蠕变曲线进行综合对比分析后表明, 在同一恒定应力水平下, 均存在如下特点:

(1) 对于瞬时应变  $\epsilon^e$ , 有

$$\epsilon_c^e > \epsilon_b^e > \epsilon_a^e > \epsilon_{sat}^e > \epsilon_{dry}^e \quad (1)$$

(2) 对于任意时刻  $t$  的轴向蠕变应变  $\epsilon^{cr}$ , 有

$$\epsilon_c^{cr} > \epsilon_b^{cr} > \epsilon_a^{cr} > \epsilon_{sat}^{cr} > \epsilon_{dry}^{cr} \quad (2)$$

从表 2 和 4 所列的瞬时应变值可见, 对于同一应力水平, 水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的瞬时应变值均比干燥和饱水砂岩大。如在 20 MPa 应力水平时, 与干燥砂岩相比, 水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的瞬时应变增量分别为 31.53%, 68.97%, 224.14%; 若与饱水砂岩相比, 其相应的增量分别为 23.61%, 58.80%, 204.63%。仅从表 4 来看, 则呈现出瞬时应变值随水溶液离子浓度增高而增大的特点, 如, 同样在 20 MPa 应力水平下, 水溶液 C 循环流动作用后的砂岩瞬时应变比水溶液 B 增加 91.84%, 而水溶液 B 条件下又比水溶液 A 增加 28.46%。其他应力水平亦存在类似的规律。

从表 3 和 5 所列  $t = 115 \text{ h}$  时的蠕变应变值可见, 对于同一应力水平, 水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的蠕变应变值均比干燥和饱水砂岩大。如在 36 MPa 这一应力水平, 与干燥砂岩相比, 水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的蠕变应变增量分别为 53.23%, 114.27%, 314.36%(约 1.53, 2.14, 4.14 倍); 若与饱水砂岩相比, 其相应的增量分别为 23.38%, 72.53%, 233.64%(约 1.23, 1.73, 3.34 倍)。仅从表 5 来看, 则呈现出蠕变应变值随水溶液离子浓度增高而增大的特点, 如, 同样在 36 MPa 应力水平, 水溶液 C 循环流动作用后的砂岩蠕变应变比水溶液 B 增加 93.38%(约 1.93 倍), 而水溶液 B 条件下又比水溶液 A 增加 39.84%(约 1.40 倍)。其他应力水平下规律相同。

对比分析图 5 中的干燥、饱水和水溶液 A, B, C 循环作用后砂岩的轴向蠕变速率 - 时间曲线, 可发现如下特点:

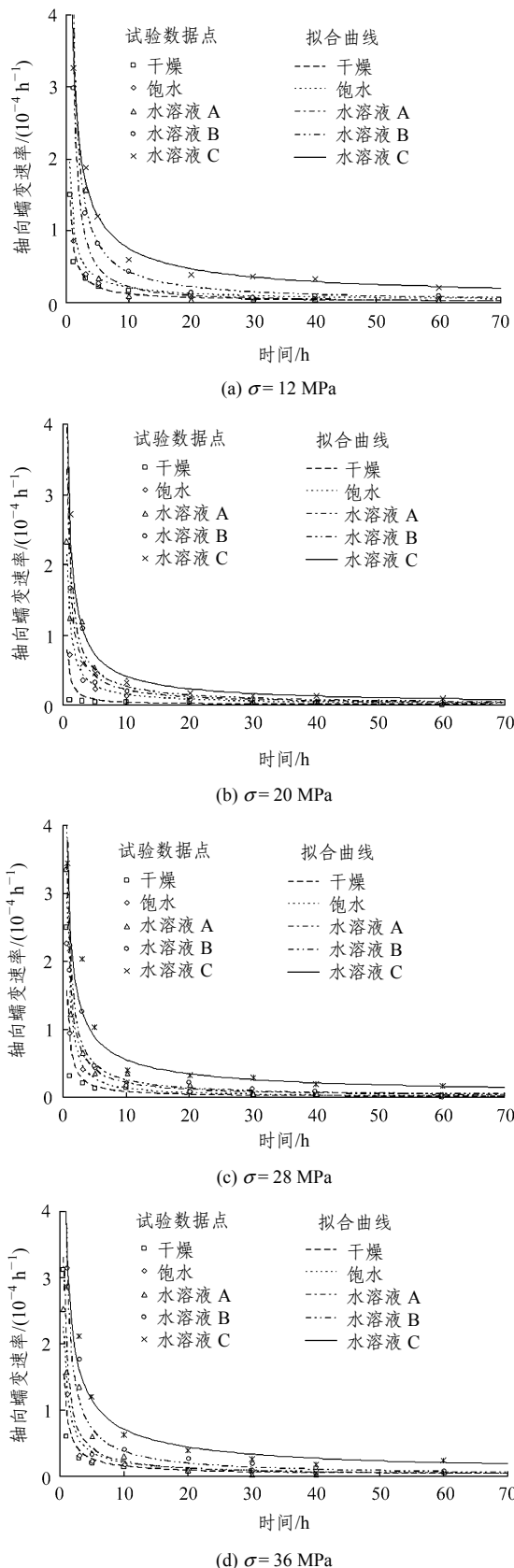


图5 干燥、饱水和水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的轴向蠕变速率-时间曲线比较

Fig.5 Comparison of axial creep rates-time curves of dry, saturated sandstones and those with hydro-physico-chemical effects due to the circulating flow of hydrochemical solutions A, B, and C

(1) 对于同一恒定应力水平, 水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的蠕变速率一般均比干燥、饱水砂岩增大较多。

(2) 与干燥、饱水砂岩相比, 水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的蠕变速率下降明显减缓, 进入稳定蠕变阶段需要的时间明显延长。

(3) 对于同一恒定应力水平, 水溶液 A, B, C 循环流动作用后砂岩的蠕变速率随水溶液离子浓度增高而增大。

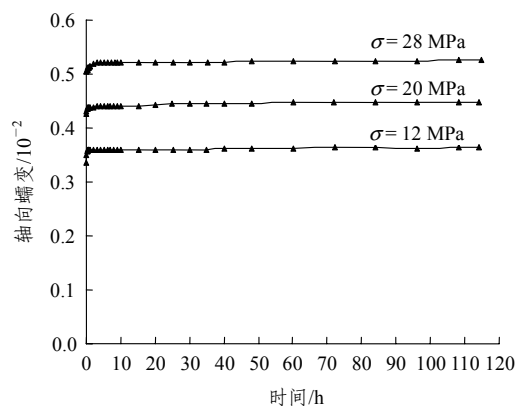
(4) 水溶液 A, B, C 循环流动作用后, 砂岩进入稳定蠕变阶段需要的时间随水溶液离子浓度增高而明显延长。

上述蠕变试验结果及分析表明, 在具有不同离子浓度水溶液循环流动作用后, 对于同一应力水平, 砂岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率均比对应时刻的干燥、饱水砂岩增大较多, 且呈现出水溶液离子浓度越高砂岩蠕变特性越显著的特点。由此可见, 砂岩蠕变特性的水溶液离子浓度作用效应不但存在而且十分明显。

### 4.2 水溶液酸碱度对砂岩蠕变特性的影响效应

图 6 分别给出了单轴蠕变试验所得水溶液 D, E 循环流动作用至水-岩反应平衡(180 d)后砂岩在各级应力水平下的轴向蠕变-时间关系曲线。表 6 和 7 分别对比列出了水溶液 D, E 循环流动作用后各级应力水平下的砂岩瞬时应变值和  $t = 115$  h 时的轴向蠕变应变值。

上述试验中水溶液 B, D, E 的离子浓度相同而酸碱度(pH 值)不同, 可以用来在一定程度上分析砂岩蠕变性质的水溶液酸碱度(pH 值)影响效应。对图 6 和 4(b)所示蠕变曲线的综合对比分析表明, 在同一恒定应力水平下, 具有如下特点:



(a) 水溶液 D



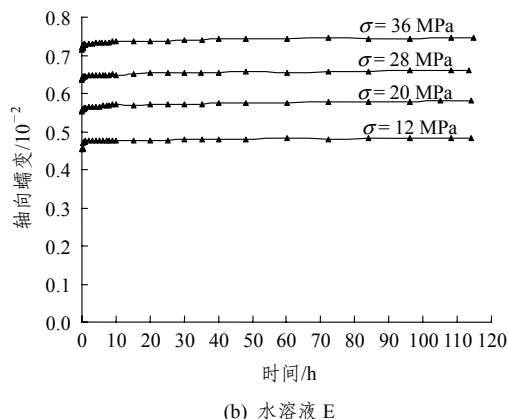


图 6 水溶液 D, E 循环流动作用后砂岩轴向蠕变 - 时间曲线  
Fig.6 Axial creep-time curves of sandstones with hydro-physico-chemical effects due to the circulating flow of hydrochemical solutions D, E

表 6 水溶液 D, E 循环流动作用后各应力水平下砂岩瞬时应变值

Table 6 Instantaneous strains of sandstones with hydro-physico-chemical effects due to the circulating flow of hydrochemical solutions D, E under different stress levels

水溶液类型	瞬时应变值/ $10^{-4}$			
	12 MPa	20 MPa	28 MPa	36 MPa
D	45.30	55.20	63.60	71.40
E	33.50	42.60	50.40	58.10

表 7 水溶液 D, E 循环流动作用后各应力水平下砂岩轴向蠕变应变( $t = 115$  h)

Table 7 Axial creep strains of sandstones with hydro-physico-chemical effects due to the circulating flow of hydrochemical solutions D, E under different stress levels( $t = 115$  h)

水溶液类型	各应力水平下 $t = 115$ h 时蠕变应变值/ $10^{-4}$			
	12 MPa	20 MPa	28 MPa	36 MPa
D	2.929	2.189	2.135	-
E	3.085	2.771	2.412	3.150

(1) 对于瞬时应变  $\epsilon^e$ , 有

$$\epsilon_d^e > \epsilon_e^e > \epsilon_b^e > \epsilon_{sat}^e > \epsilon_{dry}^e \quad (3)$$

(2) 对于任意时刻  $t$  的蠕变应变  $\epsilon^{cr}$ , 有

$$\epsilon_d^{cr} > \epsilon_{sat}^{cr} > \epsilon_{dry}^{cr}, \epsilon_b^{cr} > \epsilon_{sat}^{cr} > \epsilon_{dry}^{cr}, \epsilon_e^{cr} > \epsilon_{sat}^{cr} > \epsilon_{dry}^{cr} \quad (4)$$

式中: 下标 “d”, “e” 分别表示水溶液 D, E 循环流动作用条件。

从表 6 和 2 所列的瞬时应变值可见, 对于同一应力水平, 水溶液 D, E 循环流动作用后砂岩的瞬

时应变值均比干燥和饱水砂岩大。如在 20 MPa 应力水平, 与干燥砂岩相比, 水溶液 D, E 循环流动作用后砂岩的瞬时应变由  $20.30 \times 10^{-4}$  分别增至  $55.20 \times 10^{-4}$  和  $42.60 \times 10^{-4}$ , 其增量分别为 171.92%, 109.85%。若与该应力水平下饱水砂岩的瞬时应变  $21.60 \times 10^{-4}$  相比, 其相应的增量则分别为 155.56%, 97.22%。仅从表 6 来看, 呈现出水溶液酸性或碱性越强则砂岩瞬时应变越大的特点, 如同样在 20 MPa 应力水平, 水溶液 D 和 E 循环流动作用后的砂岩瞬时应变比水溶液 B 分别增加了 60.93%和 24.20%。其他应力水平亦有类似现象。

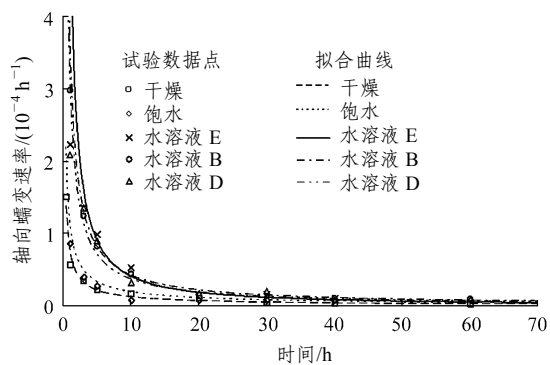
从表 7 和 3 所列的  $t = 115$  h 时的蠕变应变值可见, 对于同一应力水平, 水溶液 D, E 循环流动作用后砂岩的蠕变应变值均比干燥、饱水砂岩大。如, 在 28 MPa 应力水平, 与干燥砂岩相比, 水溶液 D, E 循环流动作用后砂岩的蠕变应变增量百分比分别为 151.18%和 183.76%(约 2.51 和 2.84 倍); 若与饱水砂岩相比, 其增量百分比分别为 66.80%和 88.44%(约 1.68 和 1.88 倍)。仅从表 7 来看, 随着水溶液酸性或碱性的增强, 不同应力水平下蠕变应变大小或增或减, 未见有明显的规律。

对比分析图 7 中的干燥、饱水和水溶液 B, D, E 循环作用后砂岩的轴向蠕变速率 - 时间曲线, 可发现如下特点:

(1) 对于同一恒定应力水平, 水溶液 B, D, E 循环流动作用后砂岩的蠕变速率均比干燥、饱水砂岩明显增大。

(2) 与干燥、饱水砂岩相比, 经水溶液 B, D, E 循环流动作用后砂岩的蠕变速率下降明显减缓, 进入稳定蠕变阶段需要的时间明显延长。

(3) 对于同一恒定应力水平, 经水溶液 B, D, E 循环流动作用后砂岩的蠕变速率随水溶液酸性或



(a)  $\sigma = 12$  MPa



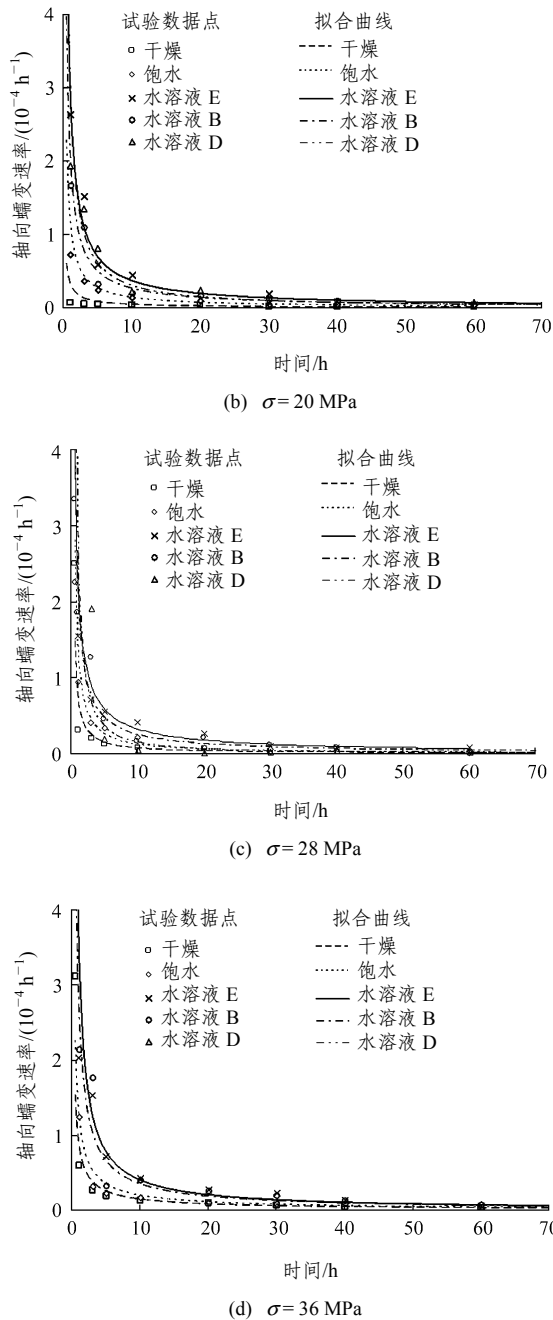


图7 干燥、饱水和水溶液 B, D, E 循环流动作用后砂岩的轴向蠕变速率 - 时间曲线比较

Fig.7 Comparison of creep rates-time curves of dry, saturated sandstones and those with hydro-physico-chemical effects due to the circulating flow of hydrochemical solutions B, D, E

碱性增强有增大的趋势。

(4) 经水溶液 B, D, E 循环流动作用后, 砂岩进入稳定蠕变阶段需要的时间随着水溶液酸性或碱性的增强变化并不显著。

上述分析表明, 在具不同酸碱度水溶液循环流动作用后, 对于同一应力水平, 砂岩的瞬时应变、

蠕变应变及蠕变速率均比对应时刻的干燥、饱水砂岩增大较多; 但不同酸碱度溶液彼此之间对其蠕变特性影响效应的差异性 or 规律性则较不明显。

### 5 砂岩蠕变的水物理化学作用机制

已有的研究表明, 岩体的流变变形与破坏, 是一个兼具矿物微观晶格位错滑移或攀移、微观微破裂萌生扩展以及宏观结构面摩擦滑动的不可逆演化过程, 而这一过程因环境与荷载因素的差异会表现出不同的时间效应<sup>[3, 15, 16]</sup>。结合前述的蠕变试验结果, 可就砂岩蠕变特性的水物理化学作用机制分析如下。

设砂岩在某一时刻的总应变为  $\epsilon$ , 瞬时应变为  $\epsilon^e$ , 蠕变应变为  $\epsilon^{cr}$ , 一般情况下有

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{cr} \tag{5}$$

若考虑水物理和水化学作用效应, 则其瞬时应变  $\epsilon^e$  和蠕变应变  $\epsilon^{cr}$  可分别表示为

$$\epsilon^e = \epsilon_{dry}^e + \epsilon_{phy}^e + \epsilon_{chem}^e \tag{6}$$

$$\epsilon^{cr} = \epsilon_{dry}^{cr} + \epsilon_{phy}^{cr} + \epsilon_{chem}^{cr} \tag{7}$$

式中: 下标 “phy” 和 “chem” 分别代表由于水物理作用和水化学作用产生的瞬时应变和蠕变应变。下同。

对于干燥砂岩试件, 在本次单轴压缩蠕变试验中无水存在, 可视为不存在物理、化学作用效应, 即  $\epsilon_{phy}^e = \epsilon_{chem}^e = 0$ ,  $\epsilon_{phy}^{cr} = \epsilon_{chem}^{cr} = 0$ , 故其总应变为

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{cr} = \epsilon_{dry} = \epsilon_{dry}^e + \epsilon_{dry}^{cr} \tag{8}$$

对于饱水砂岩试件, 由于采用蒸馏水饱和, 其离子浓度为 0, 酸碱度为中性(pH 值为 7), 且未经水溶液循环流动作用, 因此, 在其蠕变试验结果中无水化学作用效应, 也无水物理作用中的冲刷、物质扩散与运移等效应。因此, 饱水砂岩蠕变特性的水物理作用效应除体现为孔隙水压力的存在造成矿物颗粒骨架所承受的有效应力降低外, 主要是由于水对矿物颗粒或晶体之间的接触面以及岩石内在微破裂面的润滑、软化或泥化使其摩擦因数和黏聚力减小所引起的。若将由该类水物理作用机制所产生的瞬时应变和蠕变应变部分记为  $\epsilon_{phy1}^e$  和  $\epsilon_{phy1}^{cr}$ , 则饱水砂岩的总应变可表示为

$$\epsilon_{sat} = \epsilon_{sat}^e + \epsilon_{sat}^{cr} = (\epsilon_{dry}^e + \epsilon_{phy1}^e) + (\epsilon_{dry}^{cr} + \epsilon_{phy1}^{cr}) \tag{9}$$

对于经水溶液 A~E 循环流动作用至水-岩反应平衡(180 d)后的砂岩试件, 由于试验前均采用其相应的水溶液饱和, 且都经历水溶液的循环流动作用, 因此, 其蠕变特性既具有水物理作用效应, 又存在水化学作用效应。其中, 水物理作用效应中包括两类: (1) 孔隙水压力存在造成有效应力降低和水对矿物颗粒或晶体之间的接触面以及岩石内在微破裂面的润滑、软化或泥化使其摩擦因数和黏聚力减小所引起(记为  $\varepsilon_{\text{phy1}}^e$  和  $\varepsilon_{\text{phy1}}^{\text{cr}}$ ); (2) 由冲刷、物质扩散与运移等所导致(记为  $\varepsilon_{\text{phy2}}^e$  和  $\varepsilon_{\text{phy2}}^{\text{cr}}$ )。水化学作用效应中也包括两类: (1) 水溶液离子浓度影响效应(记为  $\varepsilon_{\text{chem1}}^e$  和  $\varepsilon_{\text{chem1}}^{\text{cr}}$ ); (2) 水溶液酸碱度影响效应(记为  $\varepsilon_{\text{chem2}}^e$  和  $\varepsilon_{\text{chem2}}^{\text{cr}}$ )。因此, 其总应变为

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{\text{cr}} = (\varepsilon_{\text{dry}}^e + \varepsilon_{\text{phy}}^e + \varepsilon_{\text{chem}}^e) + (\varepsilon_{\text{dry}}^{\text{cr}} + \varepsilon_{\text{phy}}^{\text{cr}} + \varepsilon_{\text{chem}}^{\text{cr}}) \quad (10)$$

其中,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{phy}}^e &= \varepsilon_{\text{phy1}}^e + \varepsilon_{\text{phy2}}^e \\ \varepsilon_{\text{chem}}^e &= \varepsilon_{\text{chem1}}^e + \varepsilon_{\text{chem2}}^e \\ \varepsilon_{\text{phy}}^{\text{cr}} &= \varepsilon_{\text{phy1}}^{\text{cr}} + \varepsilon_{\text{phy2}}^{\text{cr}} \\ \varepsilon_{\text{chem}}^{\text{cr}} &= \varepsilon_{\text{chem1}}^{\text{cr}} + \varepsilon_{\text{chem2}}^{\text{cr}} \end{aligned}$$

比较式(8)~(10)可知, 水溶液 A~E 循环流动作用后的砂岩蠕变特性显然会比干燥、饱水砂岩显著, 而饱水砂岩蠕变性质又会比干燥砂岩明显。这一规律与本次试验结果是一致的。

关于水-岩物理化学作用的微细观与损伤机制, 笔者已进行了较详细的研究和阐述<sup>[13, 14]</sup>, 这些机制同样也体现在砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应中, 故本文不再赘述。

## 6 结 论

(1) 本文的试验研究表明, 砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应是明显的, 因此, 对于相关岩体工程的长期稳定性问题而言, 考虑岩体蠕变特性的水物理化学作用效应是必要的。

(2) 对于同一应力水平, 饱水砂岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率均比对应时刻的干燥砂岩大, 其差异正好体现了饱水砂岩蠕变特性中的水物理作用效应; 饱水砂岩蠕变特性主要存在水物理作用效应, 其水物理作用机制除来源于孔隙水压力的存在造成颗粒骨架有效应力的降低主要体现为水对矿物

颗粒或晶体之间的接触面以及岩石内在微破裂面的润滑、软化或泥化而使其摩擦因数和黏聚力减小。

(3) 在具不同离子浓度的流动水溶液作用后, 对于同一应力水平, 砂岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率均比对应时刻的干燥、饱水砂岩明显增大, 达到稳态蠕变阶段的时间也明显延长。砂岩蠕变的水溶液离子浓度作用效应呈现出离子浓度越高则其蠕变特性越显著的规律。

(4) 在具不同酸碱度的流动水溶液作用后, 对于同一应力水平, 砂岩的瞬时应变、蠕变应变及蠕变速率均比对应时刻的干燥、饱水砂岩增大较多, 进入稳定蠕变阶段所需要的时间增大。但不同酸碱度溶液彼此之间对砂岩蠕变特性影响效应的差异性并不显著。

(5) 在具不同离子浓度和酸碱度的流动水溶液下, 砂岩的蠕变特性既具有水物理作用效应, 又存在水化学作用效应; 其水物理作用机制主要包括: 孔隙水压力的存在造成有效应力降低和水对矿物颗粒或晶体之间的接触面以及岩石内在微破裂面的润滑、软化或泥化而使其摩擦因数和黏聚力减小; 以及水流冲刷、物质扩散与运移等; 其水化学作用机制则兼具水溶液离子浓度作用效应和酸碱度作用效应。

本文的工作对于岩石流变力学及水-岩相互作用领域的理论与应用研究, 具有良好的启示与借鉴意义。

## 参考文献(References):

- [1] 作彦卿. 地下水与地质灾害[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 303 - 310. (WU Yanqing. Groundwater flow and geological hazards water and geohazard[J]. Underground Space, 1999, 19(4): 303 - 310.(in Chinese))
- [2] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.(XIE Heping. Damage mechanics of rock and concrete[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [3] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(SUN Jun. Rheological behavior of geomaterials and its engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [4] 刘 雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(LIU Xiong.

- The conspectus of rock rheology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese)
- [5] 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 Hehua, 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))
- [6] 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 Weishen, BAI Shiwei, 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))
- [7] 刘光廷, 胡昱, 陈凤歧, 等. 软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1237 - 1241.(LIU Guangting, HU Yu, CHEN Fengqi, et al. Rheological property of soft rock under multiaxial compression and its effect on design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1237 - 1241.(in Chinese))
- [8] LIPPONEN A, MANNINEN S, NIINI H, et al. Effect of water and geological factors on the long-term stability of fracture zones in the Päijänne Tunnel, Finland: a case study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(1): 3 - 12
- [9] 周瑞光, 成彬芳, 高玉生, 等. 断层泥蠕变特性与含水量的关系研究[J]. 工程地质学报, 1998, 6(3): 217 - 222.(ZHOU Ruiguang, CHENG Binfang, GAO Yusheng, et al. Relationship between creep behavior of fault gouge and its water contents[J]. Journal of Engineering Geology, 1998, 6(3): 217 - 222.(in Chinese))
- [10] 荣耀, 许锡宾, 靖洪文, 等. 不同含水岩石蠕变试验电磁辐射频谱分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增1): 5090 - 5095.(RONG Yao, XU Xibin, JING Hongwen, et al. Spectrum analysis of electromagnetic radiation for creep test of rock with different water contents[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 5090 - 5095.(in Chinese))
- [11] 杨圣奇, 徐卫亚, 谢守益, 等. 饱和状态下硬岩三轴流变变形与破裂机制研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 962 - 969.(YANG Shengqi, XU Weiya, XIE Shouyi, et al. Studies on triaxial rheological deformation and failure mechanism of hard rock in saturated state[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 962 - 969.(in Chinese))
- [12] 李鹏, 刘建, 朱杰兵, 等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1865 - 1871.(LI Peng, LIU Jian, ZHU Jiebing, et al. Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1865 - 1871.(in Chinese))
- [13] 乔丽苹, 刘建, 冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2117 - 2124.(QIAO Liping, LIU Jian, FENG Xiating. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2117 - 2124.(in Chinese))
- [14] 刘建, 乔丽苹, 李鹏. 砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应——试验研究与本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1)(待刊).(LIU Jian, QIAO Liping, LI Peng. Experimental and theoretical studies on elasto-plastic constitutive behavior of sandstone with hydro-physico-chemical influencing effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1)(to be pressed).(in Chinese))
- [15] 滕吉文, 张中杰, 白武明. 岩石圈物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(TENG Jiwen, ZHANG Zhongjie, BAI Wuming. Physics of the lithosphere[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [16] 白武明, 傅冰骏. 陈宗基论文选[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1994.(BAI Wuming, FU Bingjun. Selected papers of TANG Tjongkie[M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1994.(in Chinese))