

CO_x 黏土岩三轴压缩蠕变特性及速率 阈值试验研究

张帆^{1,2}, 唐永生¹, 刘造保^{1,3}, 邵建富^{1,3}, 盛谦², 周辉²

(1. 湖北工业大学 岩土力学与混凝土材料中法联合研究中心, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学和工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 法国里尔科技大学 里尔力学实验室, 法国 里尔 59650)

摘要: 黏土岩具有低渗性和自我裂缝修复能力等优点, 被用于高放废物地质处置的候选基岩。出于高放废物处置库的长期性及高安全性要求, 研究黏土岩的蠕变破坏特征显得极其重要。通过一系列黏土岩的单级三轴压缩蠕变试验, 获得 Callovo-Oxfordian(CO_x)黏土岩较为精确的蠕变速率阈值范围。试验结果表明, 发生蠕变破坏的蠕变速率阈值与黏土岩的湿度及所处围压等因素有关。总体上, 当轴向蠕变速率低于 2.5 με/h, 该类黏土岩很难发生蠕变破坏; 但若高于 58 με/h, 则黏土岩极易发生加速蠕变破坏; 而处于两者之间的速率值, 目前试验尚无明确结论。该阈值可用于在稳定蠕变阶段判断黏土岩是否会出现加速蠕变破坏。

关键词: 岩石力学; 黏土岩; 蠕变试验; 蠕变速率; 加速蠕变; 蠕变阈值

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)03-0644-06

Experimental study on creep rate thresholds of CO_x clay rock under triaxial compression

ZHANG Fan^{1,2}, TANG Yongsheng¹, LIU Zaobao^{1,3}, SHAO Jianfu^{1,3}, SHENG Qian², ZHOU Hui²

(1. Sino-French Joint Research Center of Rock and Soil Mechanics and Concrete Materials, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Laboratory of Mechanics of Lille, University of Lille, Villeneuve d'Ascq 59650, France)

Abstract: Clay rocks have the advantages of low permeability and crack self-sealing ability and are thus chosen as a potential geological barrier for underground disposal of radioactive waste in France and other countries. The high security and long-term requirements of underground radioactive waste disposal require that it is necessary to investigate the time-dependent behaviors of clay rocks. This paper presents the results of a series of one-step creep tests for the purpose of identifying with a relative high precision the creep rate thresholds of the Callovo-Oxfordian argillite with different moistures under the triaxial creep conditions. Three moisture levels are investigated in this paper for complete creep tests. The results show that the creep rate threshold values are related to the moisture and confining pressure. Generally, if the axial creep rate is smaller than 2.5 με/h, the tertiary creep does not occur. Otherwise, if the axial creep rate is greater than 58 με/h, the tertiary creep is likely to happen. Although the values between the two thresholds are still questionable, the thresholds are helpful to know in

收稿日期: 2015-12-09; **修回日期:** 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579093, 51479193); 国家重点基础发展计划(973)项目(2015CB057905)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51579093 and 51479193) and National Basic Research Program of China(973 Program)(Grant No. 2015CB057905)

作者简介: 张帆(1981-), 女, 2012年于法国里尔科技大学土木工程专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩石力学试验研究方面的工作。E-mail: fanzhang@aliyun.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1710

advance whether the tertiary creep would happen.

Key words : rock mechanics ; clay rock ; creep test ; creep rate ; tertiary creep ; creep threshold

1 引言

随着全世界范围内核能的广泛应用,核废料的安全与长期存储问题受到世界核能生产和消费大国的关注,一直以来都在寻求一种安全且可靠的存储方式。目前核废料的地质封存已经获得了绝大多数国家的认可。黏土岩具有很低的渗透性以及裂缝自我修复能力,而且分布广泛,便于施工,因此其受到了许多国家作为地质封存介质的首选材料,尤其是法国近十多年来对黏土岩的地质物理学化学等性质开展了大量的科学研究^[1-2],为黏土岩作为地质封存材料的可行性奠定了良好的基础。

由于核废料地下存储的长期性,因此很有必要研究黏土岩的蠕变特征。围绕黏土岩的蠕变特性,法国核废料管理中心多次专门立项,以期了解和掌握黏土岩的蠕变规律。国内在饱和与非饱和泥质岩研究方面也取得了较好的成果^[3-5]。

针对 CO_x 黏土岩的时滞变形,目前已取得了一些研究成果。例如, P. Bérest^[6]通过试验发现,当偏压小于 6 MPa 时该黏土岩几乎没有黏塑性变形;并且当该黏土岩在低偏应力(如 3 MPa)时,其蠕变变形被其黏土矿物的膨胀效应所掩盖^[7]。M. Ghoreychi^[8]通过试验发现 CO_x 黏土岩的时滞变形相比盐岩及 Boom 黏土要小。然而, C. L. Zhang 和 T. Rothfuchs^[9]的试验结果表明,一些黏土岩试样即便在偏应力为 0.7~1.0 MPa 时,仍然会有明显的蠕变现象,其观测到的稳定蠕变速率在 $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ 范围。

同时, M. Gasc-Barbier 等^[10]通过多级蠕变试验研究了该黏土岩的在偏应力 2, 5, 10, 15 和 20 MPa 时的温度及饱和度效应,其初步试验结果表明, CO_x 黏土岩的蠕变特征对应力历史、饱和度以及温度都比较敏感;同时,他们发现该黏土岩在不同偏应力水平下,蠕变变形在 5~10 d 后即趋于稳定。另外, G. Fabre 等^[11-12]通过多级蠕变试验认为存在一个应力阈值,低于该阈值,黏土岩的蠕变变形会趋于稳定。然而多级蠕变无法排除前一级蠕变应力对后级蠕变应力的影响,以至于其试验结果尚未足以得到确切结论,并且多级蠕变无法反映及解释在偏应力作用下蠕变变形的塑性硬化机制。

本文在该黏土岩的系列研究框架下,承接前人的研究成果,开展 CO_x 黏土岩的常规三轴压缩蠕变

试验,力求通过室内单级蠕变试验,获得黏土岩蠕变速率特征,得到不同加载条件下蠕变速率阈值范围,以期采用稳定蠕变速率作为黏土岩发生蠕变破坏的判据。

2 试验材料及方法

2.1 试样制作及准备

试验所用岩芯编号为 EST44311,取样于法国核废料地下实验室所在 Meuse/Haut-Marne 地区的 Callovo-Oxfordian 沉积岩层,埋深为 490~520 m。该沉积层黏土岩矿物组成大致为石英、方解石、白云石以及黏土矿物,其中黏土矿物包括云母片、伊利石、高岭土以及蒙脱石类高膨胀性矿物^[1, 13],孔隙率为 8%~19%,其矿物间孔隙尺寸大部分处于纳米级^[14-15]。天然岩样的含水率为 $(6.27 \pm 1.38)\%$,弹性模量为 $(4\ 096 \pm 1\ 822) \text{ MPa}$ 。

岩芯通过现场取样后,首先用一层约 1 mm 厚专用高强橡皮包裹,然后用浇筑的混凝土密封四周,端部各铺一个专用硬质橡胶垫块,然后使用金属垫块加螺栓固定,并给一定的约束力,防止试样应力释放后膨胀以及运输过程中的损坏。试样到实验室后,先拆开端部螺栓,然后锯开混凝土,割掉橡皮套,取出岩芯,最后再用风钻机钻取三轴压缩蠕变试验所用的试样(见图 1)。

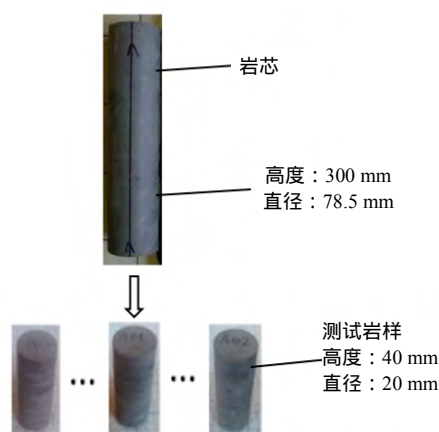


图 1 试样准备示意图

Fig.1 Sketch of sample preparation

选取所钻质量良好的试样,置于温度恒定、且用一定浓度的盐溶液所维持的湿度环境中,维持至少 2~3 周时间,直到试样质量不发生变化,即认为试样的饱和度达到指定值且已稳定,然后在一个由

中央空调控制温度的相对密闭实验室开展三轴压缩蠕变试验。试验采用法国里尔国家力学实验室研发的热-水-力-化学耦合三轴流变仪^[16](见图2)。

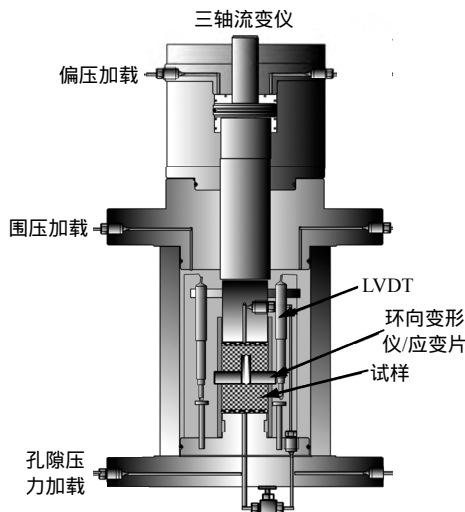


图2 多场耦合三轴流变仪^[16]

Fig.2 Used testing apparatus with multi-physics coupling^[16]

2.2 试验方案及实施

本次试验所用岩芯编号为 EST44311, 深度约 462.2 m。根据本研究目的, 首先开展常规三轴压缩试验, 得到其三轴抗压强度参考值 q_t , 然后开展三轴蠕变试验。当三轴蠕变试验偏压 q 加载持续到 500 h 以上且蠕变速率依然持续减小时, 停止蠕变试验, 开始偏压加载直至试样发生破坏, 得到该试样蠕变后的峰值强度 q_{peak} , 则该试样的蠕变时偏应力实际水平为 $q/q_{peak} \times 100\%$ 。试验过程中对围压、偏压、轴向变形和侧向变形进行记录, 数据采集间隔 2 s。

在实际核废料存储过程中, 由于微生物及核辐射反应长时间产生的气体, 使得黏土岩存在一定的孔隙气压, 为了更接近该状态, 试验过程中通过气压阀控制, 向试样内部注入氮气, 并维持试样的孔隙气压为 0.95 MPa。为方便起见, 实际有效围压按 Terzaghi 有效应力原理计算。

本试验方案初始考虑围压 2, 6 和 12 MPa 下, 在同一偏应力水平下的蠕变特性, 由于钻取试样难度大, 且试样在高湿度饱和过程中会出现吸水膨胀引起断裂损坏等情况, 尤其是黏土岩试样之间固有的离散性, 试验过程中很难控制实现不同围压下、处于同一偏应力水平的蠕变结果, 最终围压 12 MPa 下未能成功实现与 2 和 6 MPa 围压情况下相同偏应力水平 (q/q_{peak}) 的蠕变试验。

另外, 试验考虑了不同湿度的影响, 最终通过单级蠕变试验得到了该黏土岩材料的三阶段蠕变破

坏特征。由于在蠕变第三阶段岩石内部微裂纹扩展造成渐变的非线性蠕变破坏特征, 而仅试验较难确定黏弹性蠕变到黏弹塑性蠕变转变点; 此外, 由于加载条件(围压、偏压、孔隙压力等)不同, 较难准确获得一个统一的应变阈值或等效应变阈值用于判断加速蠕变破坏^[17]。因此, 本文拟基于前人建立的非线性元件改进模型^[18]和非线性黏弹塑性蠕变模型^[19], 分析该黏土岩产生蠕变破坏机制, 初步获得蠕变速率阈值范围, 为判断是否发生破坏蠕变的蠕变速率阈值上下界限提供试验基础。

3 试验结果及讨论

3.1 两阶段蠕变试验

偏应力水平 q/q_{peak} 接近 81% 的两阶段蠕变试验以及围压 2 和 6 MPa 的常规三轴试验的三轴应力-应变曲线(加载路径)及试验条件如图 3 所示。由图 3 可知, 该黏土岩在相对湿度 59% 情况下, 在图示偏应力水平下持续一段时间蠕变后, 材料达到破坏时的变形都有所增加, 但材料强度并未出现降低, 围压 2 和 6 MPa 条件下, 其长期强度分别比短期强度增加了 2.4 和 1.2 MPa。这说明该条件下的蠕变过程引起了黏土岩中原生裂纹的闭合和部分孔隙的压密, 对黏土岩的强度起到了一定的强化作用^[20]。

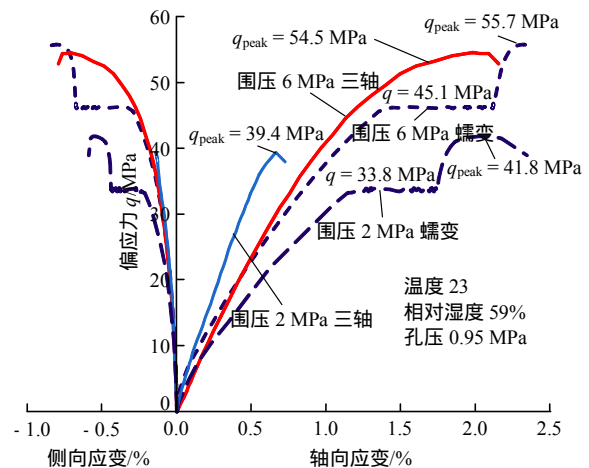


图3 蠕变和三轴试验应力-应变关系 ($q/q_{peak} = 81\%$)

Fig.3 Stress-strain curves of triaxial test and creep test ($q/q_{peak} = 81\%$)

图 4 给出了上述蠕变条件下的黏土岩试样在两个围压下的轴向和侧向应变。由图 4 可知, 在偏应力水平均为试样本身蠕变后峰值强度的 81% 时, 轴向应变明显大于侧向应变, 稳定蠕变过程中材料以体积压缩为主; 另外, 围压 6 MPa 情况下的应变要显著大于 2 MPa 下的应变, 轴向和侧向变形皆是如

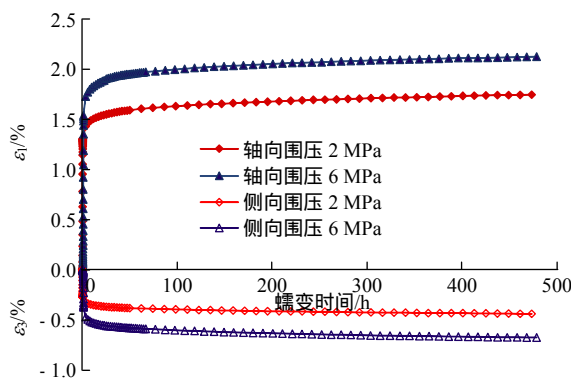


图 4 蠕变变形应变-时间关系曲线($q/q_{peak} = 81\%$)

Fig.4 Relation curves between strain and time ($q/q_{peak} = 81\%$)

此。因此，在其他条件相同情况下，围压会强化该黏土岩的蠕变变形。

图 5 中给出了蠕变过程中相应的轴向和侧向蠕变速率，其中蠕变速率由下式计算得到

$$\dot{\varepsilon}_T = (\varepsilon_{T+1} - \varepsilon_T) / \Delta T \quad (1)$$

式中： $\dot{\varepsilon}_T$ 为时刻 T 的蠕变速率； ε_{T+1} ， ε_T 分别为相邻时刻 $T+1$ 和 T 的蠕变应变； ΔT 为两蠕变时刻间隔，快速衰减蠕变阶段取 1~2 h，第二阶段取 11~13 h。

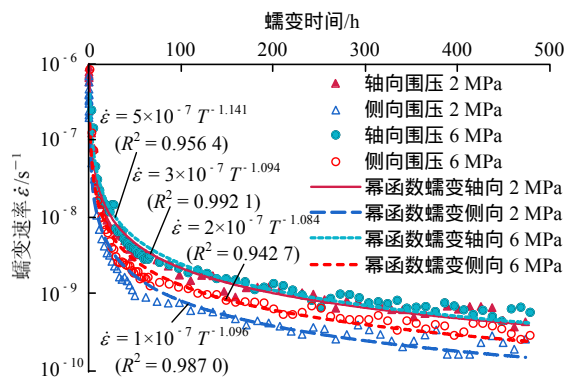


图 5 蠕变速率-时间曲线($q/q_{peak} = 81\%$)

Fig.5 Relation curves between creep rate and time ($q/q_{peak} = 81\%$)

通常的蠕变试验尤其是单级蠕变所得结果都是类似于图 4 所示的仅有主要蠕变阶段和稳定蠕变阶段的蠕变曲线，对于此类两阶段蠕变，已知时间硬化形式的 Bailey-Norton 幂函数蠕变定率^[21]为

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n m T^{m-1} \quad (2)$$

式中： $\dot{\varepsilon}$ 为蠕变速率； σ 为施加应力； T 为蠕变时间； A ， n 和 m 均为材料参数与温度相关。由于本实验中温度基本恒定，且是单级蠕变，则 Bailey-Norton 幂函数蠕变定率式(2)退化为

$$\dot{\varepsilon} = K T^m \quad (3)$$

式中： K ， m 为单级蠕变材料常数，与材料性质以及所施加的偏应力和围压有关。

图 5 同时给出了由式(3)所示蠕变定律计算所得

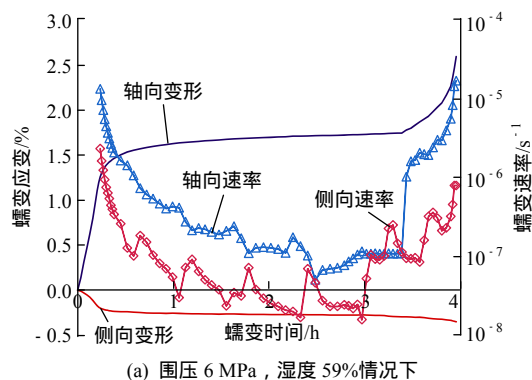
的不同围压下黏土岩的蠕变曲线，由图中系数 R^2 可知，式(3)可以很好地描述黏土岩材料在上述条件下的蠕变规律。同时，从图 5 中可以清楚看到，相同围压及偏应力水平 q/q_{peak} 下，轴向蠕变速率明显大于侧向蠕变速率；高围压情况下的蠕变速率要高于低围压状态下的蠕变速率。

根据图 5 中式(3)所模拟结果可知，蠕变过程基本趋于稳定，其轴向蠕变速率基本不大于 $7 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ，约 $60 \mu\text{e/d}$ ，侧向蠕变速率基本不大于 $4 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ，约 $35 \mu\text{e/d}$ ，变形速率表现出很明显的持续减小趋势。因此，在室内蠕变试验的条件下，在此条件下基本不会出现第三阶段蠕变，即很难发生蠕变破坏。该结论与 M. Gasc-Barbier 等^[10]持续 2 a 以上的蠕变试验结果基本吻合。

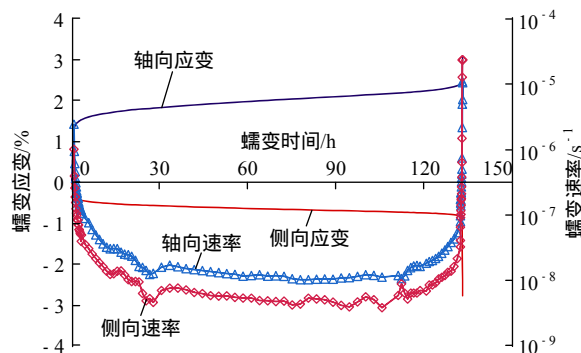
3.2 三阶段蠕变试验

为了获取该黏土岩材料在单级偏应力情况下的三阶段蠕变特性，本研究通过严格控制室内试验条件并多次重复试验的情况下，最终获得了在 3 个不同初始湿度(59%，85%和 99%)下黏土岩材料的蠕变破坏特性。

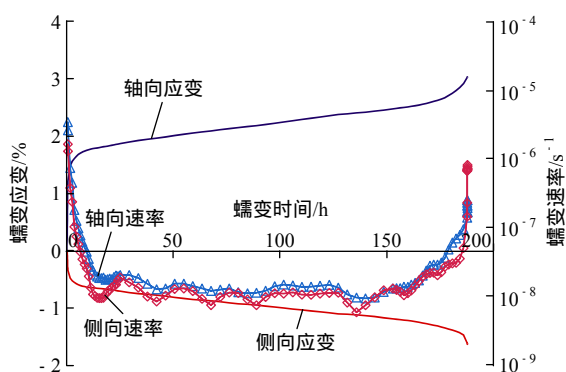
图 6(a)为该黏土岩试样在初始湿度 59%、围压为 6 MPa、单级偏应力加载情况下出现的三阶段蠕变特性。由于蠕变偏应力水平非常接近其本身峰值强度，因此该试样在几个小时内即发生了蠕变破坏，但其仍表现出了很明显的三阶段蠕变特征。由图 6(a)可知，其轴向应变明显大于侧向应变；在稳定蠕变



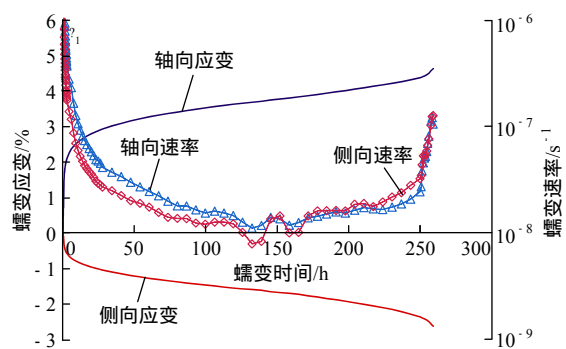
(a) 围压 6 MPa，湿度 59%情况下



(b) 围压 6 MPa，湿度 85%情况下



(c) 围压 6 MPa, 湿度 99% 情况下



(d) 围压 12 MPa, 湿度 59% 情况下

图 6 黏土岩蠕变特性

Fig.6 Creep behaviors of clayey rock

阶段, 轴向蠕变速率约 $1.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, 大于侧向蠕变速率 $2.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$; 在加速蠕变阶段, 变形速率加速增加, 破坏前轴向蠕变速率达到 10^{-5} s^{-1} , 破坏时刻, 体积变形仍以压缩为主, 轴向应变约 2.6%。

图 6(b)为在初始湿度 85%、围压为 6 MPa、单级偏应力加载情况下, 该黏土岩表现出的三阶段蠕变特性。由图可知, 整个蠕变过程持续约 130 h, 初期蠕变变形较为明显, 变形速率减速下降, 此后即趋于稳定。稳定蠕变出现在加载后的 30 h 左右, 表现出较为明显的线性蠕变特征, 蠕变变形线性增加, 轴向蠕变速率维持在约 $1.2 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, 侧向蠕变速率维持在 $5.0 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$, 线性蠕变持续约 70 h 后结束。然后进入到加速蠕变阶段, 加速蠕变初期变形速率缓慢增加, 然后快速增加, 濒临破坏前, 变形速率急剧增加, 此过程中体积变形由压缩转为膨胀, 直至蠕变破坏, 破坏时轴向应变总量约 2.9%。

图 6(c)为在初始湿度 99%、围压为 6 MPa、单级偏应力加载情况下, 该黏土岩表现出的三阶段蠕变特性。由图可知, 初期蠕变变形较为明显, 但变形速率快速下降, 20 h 后即趋于稳定, 进入稳定蠕变阶段。稳定蠕变则表现出较为明显的线性蠕变特征, 轴向和侧向应变均呈现出明显的线性增加特点, 轴向蠕变速率维持在约 $1.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, 侧向蠕变

速率维持在 $1.2 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, 线性蠕变持续约 150 h 后结束, 然后进入到加速蠕变阶段。加速蠕变阶段初期, 变形速率缓慢增加, 然后快速增加, 濒临破坏前, 变形速率急剧增加, 濒临破坏前体积变形由压缩转为膨胀, 直至蠕变破坏。破坏时, 轴向应变总量约为 3.1%。

图 6(d)为在初始湿度 59%、围压为 12 MPa、单级蠕变加载情况下, 该黏土岩呈现出的蠕变变形及速率特征曲线。由图 6(d)可知, 该蠕变曲线也表现出明显的初期蠕变、稳定线性蠕变和加速蠕变 3 个阶段的特征, 总持续约 260 h。初期蠕变变形量较大, 但变形速率快速减小, 持续约 60 h 后, 进入到稳定蠕变阶段。稳定蠕变阶段变形近似线性的稳定增加, 轴向和侧向蠕变速率基本维持在 $1.6 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 左右。在稳定阶段末期, 围压为 6 和 12 MPa 条件下, 侧向变形速率与轴向变形速率逐渐接近乃至相等并反超, 说明了出现了体积膨胀。稳定蠕变阶段持续约 160 h 后, 进入加速蠕变阶段。加速蠕变阶段初期, 变形表现出缓慢增加趋势, 尔后变形开始加速, 直至破坏前, 应变快速增大, 破坏时轴向应变达到 4.7%, 侧向应变达 2.6%。加速蠕变阶段体积应变均表现为膨胀。

3.3 比较与讨论

由两阶段蠕变试验可知, 该黏土岩材料在较高偏应力水平的蠕变条件下, 围压对其蠕变变形能力的强化作用明显, 稳定蠕变阶段, 轴向蠕变速率在围压 6 MPa 时略高于围压 2 MPa 的情况, 而两围压下侧向蠕变速率差异性显著, 说明高围压下, 侧向变形能力更强。蠕变速率基本不大于 $7 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$, 约 $2.5 \mu\epsilon/h$, 与前人在很低偏应力水平下的蠕变试验^[7, 10]相比, 此稳定蠕变速率值要高, 但与不同偏应力水平的蠕变试验结果基本一致。因此, 高偏应力水平 q/q_{peak} 会导致稳定蠕变速率值增大。

另外, 比较两阶段蠕变试验和常规三轴试验可知, 经过一定时间的蠕变后, 黏土岩材料的强度并非降低, 而是出现了一定程度的强化, 这可能与其孔隙和原生裂纹压密以及含水率的演化有关, 也可能与其黏土矿物成分密切相关, 确切原因尚需另外专门的试验确定。因此, 黏土岩材料在蠕变 20 d 后, 稳定蠕变速率低于 $60 \mu\epsilon/d$ 情况下, 很难出现蠕变破坏。因此, 可将此作为黏土岩不会出现破坏蠕变的上限阈值。

由于试验难度大, 目前黏土岩单级加载偏应力下的三阶段蠕变试验结果尚不多见, 因此无法横向比较。本研究中相对湿度 59%、围压 6 MPa 的蠕变

破坏时间很短,蠕变破坏前的稳定蠕变速率值也较大,高于 $1.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$,约 $540 \mu\text{e}/\text{h}$ 。同样湿度、围压为 12 MPa 的蠕变试验三阶段特征非常明显,稳定蠕变速率基本维持在 $1.6 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$,约 $58 \mu\text{e}/\text{h}$ 。相对湿度 85%、围压 6 MPa 的试验结果也表现出了明显的三阶段蠕变特点,稳定蠕变阶段轴向和侧向蠕变速率基本恒定,轴向蠕变速率维持在 $1.2 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$,约 $43 \mu\text{e}/\text{h}$ 。相对湿度 99%、围压 6 MPa 的蠕变也表现出了显著的三阶段蠕变特点,稳定蠕变阶段轴向和侧向蠕变速率基本恒定且相差不大,轴向速率 $1.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ 约 $54 \mu\text{e}/\text{h}$ 。因此,当稳定蠕变速率恒定且高于 $58 \mu\text{e}/\text{h}$ 时,则加速蠕变即会出现。相对湿度对该速率阈值有一定的影响,相对湿度越低,会发生蠕变破坏所对应的稳定蠕变速率阈值会降低。

4 结 论

通过系列两阶段和三阶段蠕变试验,得到了黏土岩蠕变特性,分析了其蠕变变形即速率特征,可得到如下结论:

(1) 围压会强化黏土岩材料的蠕变变形及稳定蠕变速率;低围压下轴向蠕变以体积压缩为主,高围压下侧向变形显著,以体积膨胀为主。

(2) 黏土岩两阶段蠕变特性与 Bailey-Norton 的幂函数蠕变定率符合地很好。经过一定时间的两阶段蠕变后,黏土岩长期强度并未出现降低,而是出现了一定程度的强化。

(3) 不同加载条件下,该黏土岩稳定蠕变的蠕变速率阈值不同,当蠕变 20 d 后,稳定蠕变速率低于 $2.5 \mu\text{e}/\text{h}$,且呈下降趋势,则加速蠕变基本不出现;当稳定蠕变速率恒定且高于 $58 \mu\text{e}/\text{h}$ 时,加速蠕变即会出现。

(4) 相对湿度即含水率对黏土岩蠕变特性有一定影响,高含水率下的蠕变变形能力强。

参考文献(References):

[1] ANDRA. Referentiel du site meuse-haute marne[R]. Paris: National Radioactive Management Agency, 2005.

[2] ANDRA. Recherche et développement à l'Andra pour les projets de stockage[R]. Paris: National Radioactive Management Agency, 2012.

[3] 陈卫忠,邵建富,DUVEAU G,等.黏土岩饱和-非饱和渗流应力耦合模型及数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3 011-3 016.(CHEN Weizhong, SHAO Jianfu, DUVEAU G, et al. Constitutive of saturated-unsaturated clay and its numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3 011-3 016.(in Chinese))

[4] 刘俊新,杨春和,刘伟,等.泥质岩盖层前期名义固结压力及封闭特性研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(12):2 377-2 387.(LIU Junxin, YANG Chunhe, LIU Wei, et al. Apparent preconsolidation

stress and sealing characteristics of argillaceous cap rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2 377-2 387.(in Chinese))

[5] 杨圣奇,徐卫亚,杨松林.龙滩水电站泥板岩剪切流变力学特性研究[J].岩土力学,2007,28(5):895-902.(YANG Shengqi, XU Weiya, YANG Songlin. Investigation on shear rheological mechanical properties of shale in Longtan hydropower project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 895-902.(in Chinese))

[6] BÉREST P. Viscoplasticité en mécanique des roches[C]// DARVE F, ed. Manuel de Rhéologie des Géomatériaux. Paris: Presses de l'ENPC, 1987: 235-257.

[7] BÉREST P, CHARPENTIER J-P, VALES F. Creep of argillite under small mechanical loading[C]// Proceedings of the Kiwir Conference. Paris: [s. n.], 2001: 27.

[8] GHOREYCHI M. Comportement thermo-hydro-mécanique des argillites de l'Est et son incidence sur les ouvrages souterrains[C]// Actes des Journées scientifiques CNRS/ANDRA, EDP Sciences. Les Ulis, France: [s. n.], 1999: 397-418.

[9] ZHANG C L, ROTHFUCHS T. Experimental Study on Self-sealing capacity of clay rocks[C]// Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. Lille: ANDRA, 2007: 539-540.

[10] GASC-BARBIER M, CHANCHOLE S, BÉREST P. Creep behavior of Bure clayey rock[J]. Applied Clay Science, 2004, 26(1/4): 449-458.

[11] FABRE G, PELLET F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(6): 950-960.

[12] YANG D, BORNERT M, CHANCHOLE S, et al. Experimental investigation of the delayed behavior of unsaturated argillaceous rocks by means of Digital Image Correlation techniques[J]. Applied Clay Science, 2011, 54(1): 53-62.

[13] HU D W, ZHANG F, SHAO J F, et al. Influences of mineralogy and water content on the mechanical properties of argillite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 47(1): 157-166.

[14] ROBINET J C. Minéralogie, porosité et diffusion des solutés dans l'argilite du Callovo-Oxfordien de Bure(Meuse, Haute-Marne, France) de l'échelle centimétrique à micrométrique[J]. Bibliogr, 2008.

[15] LIU Z, SHAO J, XIE S, SECQ J. Gas permeability evolution of clayey rocks in process of compressive creep test[J]. Mater Letters, 2015, 139: 422-425.

[16] 徐卫亚,杨圣奇,杨松林,等.绿片岩三轴流变力学特性的研究(I):试验结果[J].岩土力学,2005,26(4):531-537.(XU Weiya, YANG Shengqi, YANG Songlin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(I): experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 531-537.(in Chinese))

[17] 余成学,崔旋.高孔隙水压力对岩石蠕变特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1 603-1 609.(SHE Chengxue, CUI Xuan. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1 603-1 609.(in Chinese))

[18] 曹树刚,边金,李鹏.岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):632-634.(CAO Shugang, BIAN Jin, LI Peng. Rheologic constitutive relationship of rocks and a modified model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 632-634.(in Chinese))

[19] 余成学.岩石非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):2 006-2 011.(SHE Chengxue. Research on nonlinear viscoelasto-plastic creep model of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2 006-2 011.(in Chinese))

[20] LIU Z, XIE S, SHAO J, et al. Effects of deviatoric stress and structural anisotropy on compressive creep behavior of a clayey rock[J]. Applied Clay Science, 2015, 114: 491-496.

[21] NORTON F H. The creep of steel at high temperatures[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1929: 12-14.