

岩盐蠕变行为的宏细观损伤特性试验研究

杨典森¹, 陈卫忠^{2,3}, 杨建平³, 李术才²

(1. 巴黎综合理工大学 固体力学实验室, 法国 巴黎 91128; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061;

3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 岩盐的长期力学行为是地下储气库建设安全评估的重要参数, 其蠕变特性和所受荷载条件(应力、温度、湿度)与其内部结构紧密相关。利用数字图像相关技术研究金坛岩盐不同尺度下蠕变过程及损伤演化。数字图像测试技术不仅给出材料在 100 μm 和厘米尺度全场应变分布, 而且跟踪裂纹的发展变化。重点介绍不同应力水平下材料的蠕变行为, 试验结果验证了蠕变速率随应力水平的提高而增加, 测量到该岩盐在 11 MPa 的单轴条件下的宏观尺度稳定蠕变速率为 10^{-9} s^{-1} 左右, 而细观蠕变速率与其对应的结构紧密相关。蠕变过程中, 裂纹扩展引起的损伤被准确定位, 主要在晶粒与晶粒之间, 且主要属于张拉破坏。

关键词: 岩石力学; 岩盐; 地下储气库; 蠕变行为; 数字图像相关技术; 多尺度测量

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2011)07 - 1363 - 05

EXPERIMENTAL STUDY OF MICRO-MACRO DAMAGE PROPERTIES OF ROCK SALT DURING CREEP TEST BY MEANS OF DIGITAL IMAGE CORRELATION TECHNIQUE

YANG Diansen¹, CHEN Weizhong^{2,3}, YANG Jianping³, LI Shucai²

(1. Laboratoire de Mécanique des Solides, École Polytechnique, Palaiseau 91128, France;

2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The creep behaviour is an important parameter to estimate the feasibility and safety of underground gas storage in rock salt caverns. The paper mainly presents an experimental study about the creep behaviour of Jintan rock salt by means of the digital image correlation(DIC) techniques, which not only can give a full-field strain, but also can follow the evolution of the microstructure of the material. The two symmetrical surfaces of the cubic samples have been investigated during the creep test by two digital cameras. The results show that the strain rate in stable creep is about 10^{-9} s^{-1} at the axial stress of 11 MPa. The dependence of the strain rate upon the stress, time-dependent damage and the relation between this dependence and the microstructure are discussed.

Key words: rock mechanics; rock salt; underground gas storage; creep behaviour; digital image correlation technique; multiscale measurement

1 引言

由于地下能源储存具有安全性高, 经济性好, 近年来我国开展了大量的这方面的理论、试验和数

值模拟研究^[1-2]。在不同的地质储存介质(花岗岩、泥岩等)中, 岩盐因为具备低渗透性, 良好的蠕变特性和损伤自恢复特性, 以及易溶于水而便于建设, 被认为是一种较有利的介质。岩盐的蠕变特性是地下油气储存洞室长期稳定性分析的重要参数。F.

收稿日期: 2011 - 03 - 30; **修回日期:** 2011 - 05 - 14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41077238, 51004097); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724603)

作者简介: 杨典森(1978 -), 男, 2001年毕业于武汉大学工程力学专业, 现为巴黎综合理工大学固体力学实验室研究员工程师, 主要从事多介质水力行为多尺度方面的研究工作。E-mail: yang@lms.polytechnique.fr

Fabre 等^[3-10]已经从宏观和微观方面对岩盐进行了多方面的试验研究,结果表明,由于地质情况的复杂性,不同岩盐的含盐成分、含量以及结晶程度都有着许多差异,这些材料的非均质特征会导致其力学行为在一定尺度下呈现非均匀化。岩盐具有明显的结晶重塑性,其微观结构会随外部的荷载条件(温度、应力、湿度)的改变而发生变化,这种变化必然会改变其力学行为及破坏形式(温度、应力和湿度等外部条件会对岩盐的微观变形破坏机制产生影响):高温条件下,晶界滑动和晶界扩散比较充分,促进了空洞、裂纹沿晶界形成和发展。高应力会引起穿晶蠕变断裂,空洞在晶粒中夹杂物处形成,并随蠕变进行而长大、汇合的过程。由于岩盐是低孔隙率的材料,它的渗透率极低,因此湿度主要对已出现体积膨胀的岩盐起作用,当水分子进入微裂纹中后会溶解裂纹周围晶体结构并形成一层水膜,它可有效地释放存储的弹性能,从而加速蠕变速率^[11]。

和其他地质材料一样,岩盐材料蠕变行为一般分为3个阶段^[9-10]:初始蠕变,稳定蠕变和加速蠕变。在实际工程中,前2种蠕变是比较有意义的。由于稳定蠕变通常是影响地下储存库长期运行的主要行为,因此本文将主要研究该阶段的力学行为。

20世纪80年代发展起来的数字图像相关技术^[12-14],已经开始大量地在金属材料,复合材料中得到了应用,因为它们具有无损观测,全场分析,以及微观结构跟踪等优点。因此,该技术被用来代替常规的应变片测量对岩盐进行宏观和细观蠕变试验研究。

2 材料的基本物理和力学参数

金坛岩盐主要分布在埋深900~1200m的岩层内,该层段岩性主要为岩盐、含泥岩盐夹含盐泥岩、钙芒硝泥岩、云质泥岩、泥岩、粉砂岩等,其中主要矿石以石盐为主。石盐以中细晶、中粗晶及不等粒结构为主,局部为巨晶结构。石盐的化学组成主要是NaCl,占74.9%~90.8%,其次是Na₂SO₄, CaSO₄,其他盐类甚微。Na₂SO₄可溶于水,30%~50%的CaSO₄溶于水,所以金坛岩盐水溶性很好,便于开挖成库。样品取自茅10井,其平均表面密度为2.32 g/cm³。

宏观试验结果^[1]表明,该岩层内的岩盐的弹性模量为18.5~21.8 GPa,泊松比为0.04~0.24,单向压缩状态下的破坏强度为11.3~27.2 MPa(饱和盐

水状态),10.4~35.0 MPa(自然风干状态),抗剪切强度为2.1~2.9 MPa(饱和盐水状态),抗拉强度为0.8~1.6 MPa(饱和盐水状态)。这些力学参数表明该岩盐属于软岩。

金坛岩盐的微观结构显示该岩盐的晶粒大小在10 μm左右(见图1),一些微小初始裂纹存在于晶粒团之间。这些初始裂纹会引起局部高应力从而加速材料的破坏。

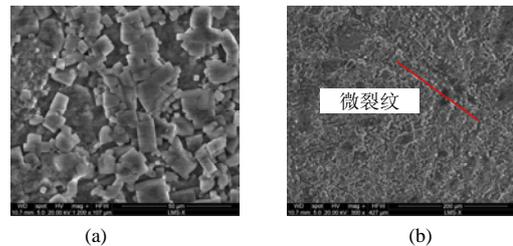


图1 金坛岩盐的微观结构

Fig.1 Microstructures of Jintan rock salt

3 数字图像测试技术及试验方案

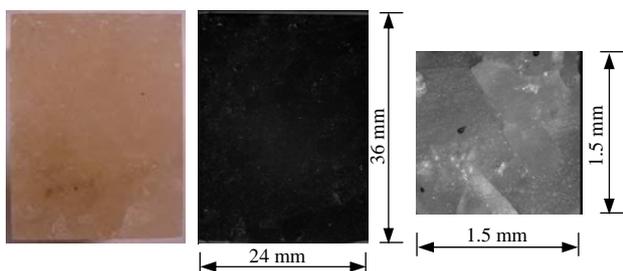
数字图像相关技术是由M. A. Sutton等^[11-12]在20世纪80年代发展起来的一门无损测量技术,它利用数码相机记录物体不同状态下的图像,然后对2张图像内同一大小面积的子空间进行像素相似度比较,从而找到物体初始位置对应的变形后的实际位置。根据物体初始空间位置到变形后的空间位置之间转换关系,利用不同方法(比如有限元,平均梯度法)确定全场应变分布。本试验利用巴黎综合理工大学固体力学实验室最新研制出的宏细观光学测量设备^[14],对金坛岩盐试样进行单轴条件下的蠕变测试。该设备主要包括3个部分:宏观和细观光学系统、荷载控制系统和吸力控制系统,这里主要使用其中的光学系统和荷载控制系统。

宏观光学控制系统使用一台高分辨率的数码相机,它配有一个24 mm×36 mm大小的CCD,拥有1600万像素,其中每个像素代表7.5 μm的实际物理大小,细观光学系统使用400万像素的数码相机,其CCD大小为15 mm×15 mm,同时配有10倍的放大镜头,它的每个像素则能代表0.74 μm的实际物理大小。宏观数码相机是正对着细观数码相机,他们观察物体的2个对称的表面。

荷载控制是通过电子伺服系统实现的,该系统的最大加载是100 kN,最小控制速度是1 μm/s。该系统的详细信息见相关介绍^[13]。通过使用一些特殊的控制方法,该光学系统能够给出一个非常令人满意地应变测量精度,它不仅可以在宏观尺度(厘米尺

度)上达到 10^{-5} ，而且在细观尺度(100 μm)上也达到 10^{-4} 。这样的测量精度完全满足岩盐蠕变测量的要求。

根据该系统的特点，从取自金坛茅 10 井的岩芯上制备了 2 个长方体试样(试样 1, 2)，高度为 36 mm，宽度为 24 mm，厚度为 26 mm。宽度和高度的控制是为了宏观测量可以在 1 倍放大条件下进行。这样物体表面的尺寸大小刚好就是数码相机 CCD 的大小。为了更好地观测物体变形情况，首先对 2 个对称的表面进行了抛光处理，然后通过喷漆达到增加物体表面像素的对比度，而且可以避免岩样对光比较敏感的这一特点，详见图 2。



(a) 初始状态 (b) 宏观相机观测的表面 (c) 微观相机观测的表面

图 2 岩盐试样 1 的表面图像信息

Fig.2 Different forms of surface of sample 1

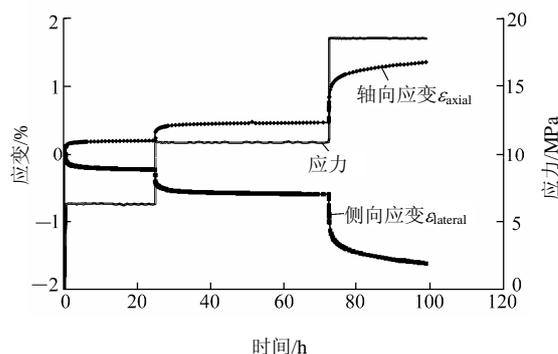
通过对岩盐基本力学参数的分析，选择 3 组不同应力水平，分别为 6.0, 11.0, 18.5 MPa 来观测应力水平对岩盐蠕变行为的影响。为了控制温度变化对岩样的影响，整个试样过程是在恒温 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行。每个试样具体的应力历史将结合试验结果介绍。

4 试验结果及讨论

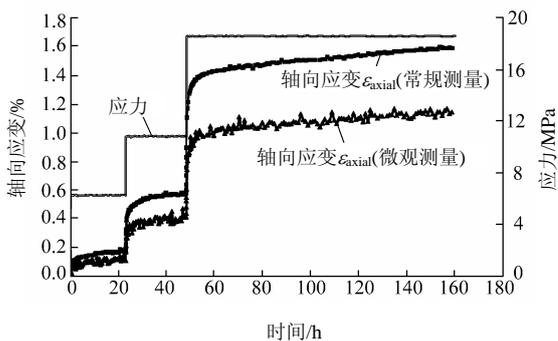
4.1 岩盐应变速率

试样 1 和 2 试验分别持续了 100 和 160 h，其应变和应力随时间变化曲线见图 3。每个应力水平下，蠕变的时间控制在 1 d。但是为了进一步观察稳定蠕变的情况，试样 1 在 11.0 MPa 应力水平和试样 2 在 18.5 MPa 应力水平下的蠕变时间控制的比较长。图 3(a)介绍了通过数字图像相关技术得到的宏观尺度下的轴向和侧向应变，而图 3(b)则介绍了细观尺度下的轴向应变，并将其与常规测量的结果进行比较。常规 LVDT 所得到的结果相对较大，这一方面与该测试方法是外部测量的局限有关，另一方面也与材料的非均质特性相关。

试验结果表明，该岩盐呈现显著的蠕变特性。



(a) 试样 1

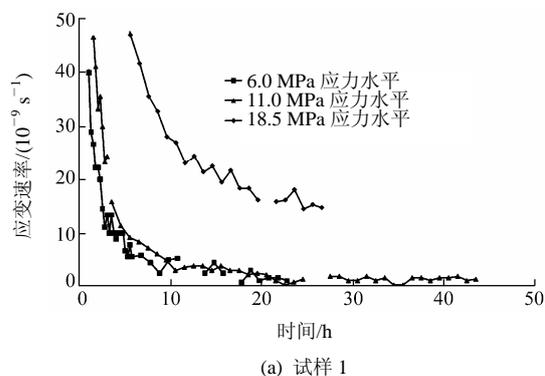


(b) 试样 2

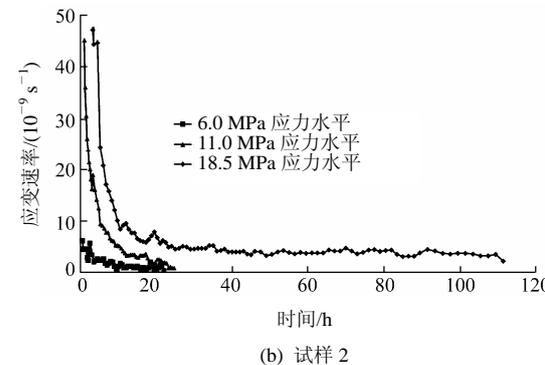
图 3 应变和应力随时间变化曲线

Fig.3 Variation curves of strain(LVDT, MicroDIC) and stress with time

材料在低应力水平就表现出明显蠕变行为。如图 4 所示，应变速率在初始蠕变阶段下降很快，但是到



(a) 试样 1



(b) 试样 2

图 4 宏观应变速率

Fig.4 Strain rate (MacroDIC) histories

了一定阶段，由于测量的精度和外界条件的变换(温度，湿度等)引起的干扰，这种下降的趋势变得不再明显，可以认为是稳定蠕变速率。其实从时间较长的2个蠕变试验可以看出，该岩盐的轴向应变速率一直在减少。材料初始蠕变的时间随应力水平的提高而延长，总体上试验在20 h左右达到了稳定蠕变阶段。材料不同应力水平稳定阶段的宏观应变速率归纳于表1。总体上，该岩盐宏观尺度应变速率为 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ，而位于晶粒和晶粒之间局部区域细观(100 μm)测量表明应变速率达 10^{-7} s^{-1} 。

表1 试样1和2的应变速率

Table 1 Strain rates of samples 1 and 2

σ_{axial} /MPa	试样1		试样2	
	$\dot{\epsilon}_{\text{axial}}$ /(10^{-9} s^{-1})	$\dot{\epsilon}_{\text{lateral}}$ /(10^{-9} s^{-1})	$\dot{\epsilon}_{\text{axial}}$ /(10^{-9} s^{-1})	$\dot{\epsilon}_{\text{lateral}}$ /(10^{-9} s^{-1})
6.0	0.88	-2.11	0.55	-1.25
11.0	1.28	-1.56	2.57	-2.14
18.5	15.72	-18.89	2.75	-2.80

不同应力水平的蠕变结果表明该岩盐的应变速率随应力水平的提高而增加，当轴向应力接近于单轴抗压强度时，这种变化趋势显得尤其明显。全场应变结果表明侧向应变速率随着时间逐渐增大，并且它的量值明显大于轴向应变速率，这表明在蠕变阶段，该岩盐从最初的微空隙闭合引起的体积减少进入体积膨胀阶段。

4.2 岩盐蠕变损伤演化

图5, 6分别描述了试样1在11 MPa应力条件下宏观和细观尺度不同时刻等效应变和侧向应变演变过程，应变云图清晰地给出了研究区间应变集中的位置和大小。岩盐的蠕变微观机制通常认为是由晶粒内部原子间的位错运动引起，这种蠕变变形在细观尺度表现为晶粒内部的相对均匀应变。图5, 6均表明，应变集中主要出现在晶粒与晶粒之间，且应变集中随时间而越来越明显。从图5可以看出，晶粒之间的等效应变从1 h的1.4%增大到1 d之后的1.8%，而晶粒内部的平均等效应变变化则小于0.1%；从图6可以看出，晶粒与晶粒之间的侧向应变1 d内发展超过了14%。测量得到的不同位置各个方向应变值表明，晶粒之间的蠕变一方面是剪切变形，另外一方面主要是晶粒之间张拉变形，其中后者是材料损伤变形的主要原因。由图7可知，原有微孔隙和新发育出来微孔隙(最大的裂纹超过20 μm)，均集中在晶粒之间，而且这些微裂纹的扩展

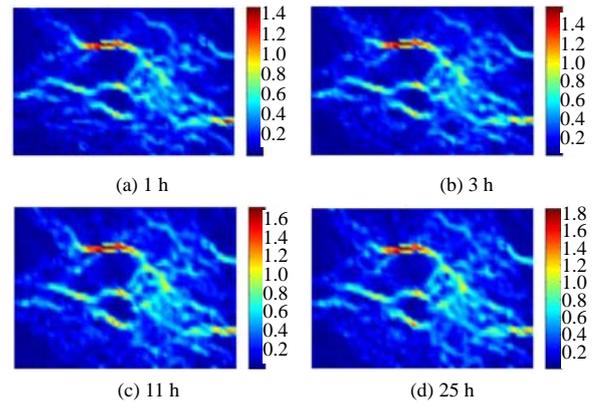


图5 试样1在11 MPa应力条件下宏观(厘米)尺度等效应变演变过程(单位: %)

Fig.5 Evolution of Von-Mises equivalent strain at macroscopic scale(cm) in creep test at stress of 11 MPa for sample 1(unit: %)

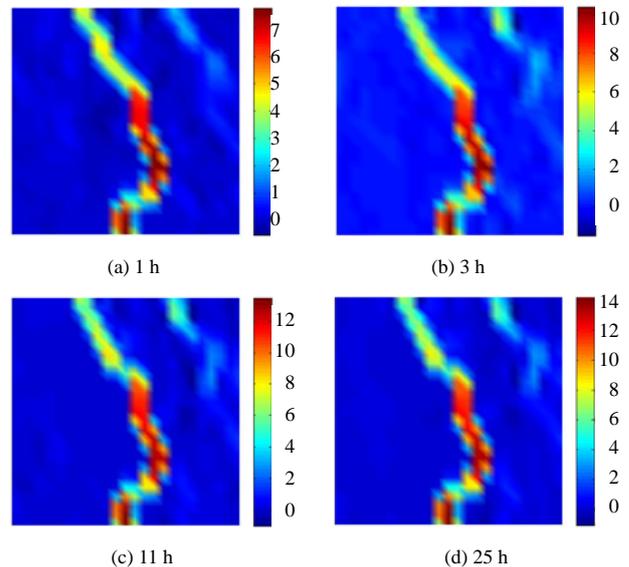


图6 试样1在11 MPa应力条件下蠕变阶段细观(100 μm)尺度侧向应变演变(单位: %)

Fig.6 Evolution of lateral strain at microscopic scale (100 μm) in creep test at stress of 11 MPa for sample 1 (unit: %)

方向比较一致，它具体表现为侧向应变的增加，也就是岩盐的剪胀效应的本质原因。这种微孔隙的增加主要是由于岩盐内部的应力分布不均匀，从而在局部地方引起了超过其抗拉强度的拉应力。如上面晶粒内部变形和晶粒之间变形比较可以发现晶粒之间的蠕变行为是岩盐蠕变损伤行为的主要控制因素。

这种微观结构变化在3组不同应力水平下都有表现，说明该岩盐的晶粒之间的黏聚力和抗拉强度比较低。微孔隙逐渐扩展，最终构成一些大的裂纹，导致材料的破坏。因此，岩盐的细观结构形态和晶粒之间的力学特征是岩盐蠕变行为的关键参数，这

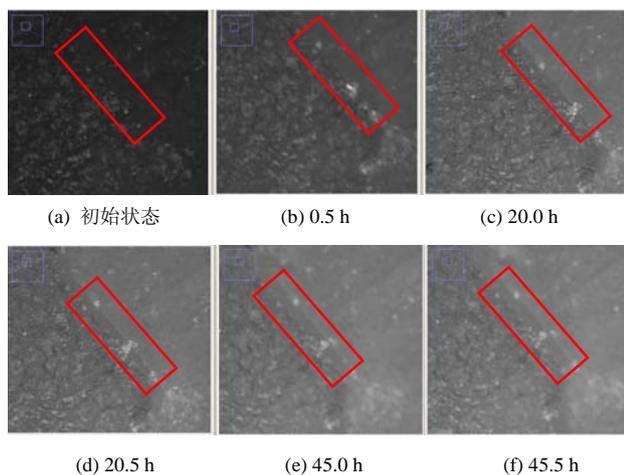


图7 试样1细裂纹延展过程(最大裂纹超过20 μm)

Fig.7 Evolution of capillary cracks of sample 1 during test(maximum crack greater than 20 μm)

在建立理论模型时需要予以考虑。

5 结论

本文通过对金坛岩盐不同应力水平下的蠕变行为进行宏观试验研究,得到如下结论:

(1) 数字图像相关技术不仅能精确地确定材料不同尺度(100 μm 和厘米尺度)下全场应变分布,而且可以跟踪其微观结构的变化。

(2) 金坛岩盐的蠕变特性显著,其初始蠕变时间在20 h左右,该时间随应力水平的增加而延长。稳定蠕变阶段,其宏观应变速率为 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ s}^{-1}$,而晶粒之间局部细观应变率则达到 10^{-7} s^{-1} ,其侧向应变随着应力水平的提高而变得越来越大,且大于轴向应变,表明该材料具有显著的剪胀效应。

(3) 宏观全场测量都显示晶粒内部的应变变化是相对均匀的,而晶粒与晶粒之间出现显著的应变集中,它的量值是晶粒内部的数十倍。材料的损伤演化主要由晶粒之间的应变集中引起,跟踪比较发现,这些应变集中一方面是晶粒之间的剪切变形,另外一个主要方面是晶粒之间产生的抗拉破坏而引起新裂纹的产生和扩展。正是这些裂纹的扩展导致了材料最后的破坏。因此在理论模型中,应该考虑这种随时间变化的损伤因素。

由于试验时间的限制,地下储存库内的温度和湿度变化对岩盐蠕变行为都会产生影响。因此,有必要进行系统研究该材料不同尺度下的损伤蠕变行为,最终给出比较合理的科学参数,以便能更好地评估地下岩穴的长期稳定性。

参考文献(References):

- [1] 杨春和,陈峰,曾义全.岩盐蠕变损伤关系研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(11):1602-1604.(YANG Chunhe, CHEN Feng, ZENG Yijin. Investigation on creep damage constitutive theory of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1602-1604. (in Chinese))
- [2] 陈卫忠,伍国军,戴永浩,等.废弃盐穴地下储气库稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(4):848-854.(CHEN Weizhong, WU Guojun, DAI Yonghao, et al. Stability analysis of abandoned salt caverns used for underground gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4): 848-854. (in Chinese))
- [3] FABRE F, PELLET F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(5): 950-960.
- [4] SHAO J F, ZHU Q Z, SU K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(4): 549-555.
- [5] YANG S Q, JIANG Y Z. Triaxial mechanical creep behaviour of sandstone[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(2): 339-349.
- [6] YANG C H, DAEMEN J J K, YIN J H. Experimental investigation of creep behaviour of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(2): 233-242.
- [7] LANGER M. The rheological behaviour of rock salt[C]// Proceedings of the 1st Conference on Mechanics Behaviour of Salt. Clausthal: Translation Technique Publication, 1984: 201-230.
- [8] CLEACK L, CLEACH J M, GHAZALI A, et al. Experimental study of the role of humidity on the thermomechanical behaviour of various halitic rocks[C]// Proceedings of the 3rd Conference on Mechanical Behaviour of Salt. Paris: [s.n.], 1993: 217-222.
- [9] JEREMIC M L. Rock mechanics in salt mining[M]. [S.l.]: [s.n.], 1994: 532.
- [10] GITTS J C. Viscoelasticity and creep fracture in solids[M]. [S.l.]: [s.n.], 1975: 725.
- [11] HORSEMAN S T. Moisture content—a major uncertainty in storage cavity closure prediction[C]// Proceedings of the 2nd Conference on Mechanical Behaviour of Salt. [S.l.]: Translation Technique Publication, 1988: 53-68.
- [12] SUTTON M A, WOLTERS W J, PETERS W H, et al. Determination of displacements using an improved digital correlation method[J]. Image and Vision Computing, 1983, 1(3): 133-139.
- [13] CHU T C, RANSON W F, SUTTON M A, et al. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. Experimental Mechanics, 1985, 25(3): 232-244.
- [14] YANG D S, BORNERT M, NGUYEN MINH D, et al. Experimental investigation of the micromechanisms governing the hydromechanical behaviour of argillaceous rocks under combined moisture and mechanical loads by means of multiscale full-field strain measurement techniques[C]// Proceedings of the 14th International Conference on Experimental Mechanics. Poitiers: [s.n.], 2010: 556-562.