# 渗流-应力耦合作用下砂岩蠕变特性与损伤特征研究*

许江[1,2],崔梦芹[1,2],彭守建[1,2],陈奕安[1,2],饶豪魁[1,2],曹琦[1,2]

(1.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;
2.重庆大学 复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

**摘要**:为降低渗透水压作用下蠕变对工程长期稳定性造成的不利影响,利用渗流-应力耦合伺服控制加载试验系统开展不同水力梯度下的蠕变试验,探究砂岩的流变特性和渗流特性;结合三维数字图像相关技术(3D-DIC),研究砂岩的微裂纹演化规律及变形局部化特征;同时基于CT扫描技术探究砂岩的裂纹损伤特征。结果表明:(1) 水力梯度越大,蠕变变形量越大,微裂纹发育扩展速率更快,应变场云图变化越明显,相较于轴向应变场云图,径向应变场云图中更早出现较大应变点和应变局部化特征;(2) 水力梯度越大,应变增量越大,应变变化速率越快,砂岩蠕变寿命越短,通过建立虚拟应变片,发现砂岩局部破坏带内外的应变变化不一致,表明砂岩蠕变变形过程中存在局部化特征;(3) 低水力梯度下,孔裂隙更多被压密闭合,渗流通道减少,流量不断减小,高水力梯度下,损伤不断积累,渗流通道增多,流量出现增加现象;(4) 通过CT扫描可知,3条主裂纹贯通整个试样,引导砂岩破坏,同时生成次生裂纹,促进裂纹扩展,靠近砂岩的加载端,施加的渗透水压更大,砂岩上部分衍生出的次生裂纹更多,形成复杂的裂纹网络结构。

**关键词**:砂岩;渗流-应力耦合;蠕变;水力梯度;变形局部化;应变增量

**中图分类号**:TD313;TU452 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)01-0144-14

## Study on Creep Properties and Damage Characteristics of Sandstone Under Seepage-Stress Coupling Effect

*XU Jiang*[1,2], *CUI Mengqin*[1,2], *PENG Shoujian*[1,2], *CHEN Yian*[1,2], *RAO Haokui*[1,2], *CAO Qi*[1,2]

(1.State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2.State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract**: In order to reduce the adverse effect of creep on the long-term stability of the project under the action of seepage water pressure, creep tests under different hydraulic gradients were carried out using the seepage-stress coupling servo control loading test system to explore the rheological properties and seepage characteristics of sandstone. Combined with three-dimensional digital image correlation technology (3D-DIC), the micro-cracks evolution law and deformation localization characteristics of sandstone were studied. At the same time, the crack damage characteristics of sandstone were explored based on CT scanning technology. The results are concluded as follows. Firstly, the larger the hydraulic gradient is, the larger the creep deformation is, the faster the micro-cracks growth rate is, and the more obvious the change of strain field cloud map is. Compared with the axial strain field cloud maps, the larger strain points and strain localization characteristics appear earlier in the radial strain field cloud maps. Secondly, the larger the hydraulic gradient is, the larger the strain increment is, the faster the strain change rate is, and the shorter the creep life of sandstone is. By establishing a virtual strain gauge, it is found that the strain changes inside and outside the local failure zone of sandstone are inconsistent, indicating that there are localization characteristics in the creep deformation process of sandstone. Thirdly, under the low hydraulic gradient, more pores and fissures are pressed and sealed, the seepage channel is reduced, and the flow rate is continuously reduced. Under the high hydraulic gradient, the damage is continuously accumulated, the seepage channel is increased, and the flow rate is increased. Finally, it can be seen from the CT scanning that the three main cracks penetrate the whole sample, guide the sandstone failure, and generate secondary cracks to promote crack propagation. Near the loading end of sandstone, the applied seepage water pressure is larger, and more

* **收稿日期**:2024-03-04
**基金项目**:中央高校基本科研业务费专项项目(2022CDJQY-011);国家自然科学基金面上项目(51974041)
**作者简介**:许江(1960—),男,湖南永兴人,教授,博士生导师,主要从事岩石力学试验方面的研究。E-mail:jiangxu@cqu.edu.cn
**通信作者**:崔梦芹(1998—),女,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事岩石力学试验方面的研究。E-mail:mqcui980803@163.com

secondary cracks are derived from the upper part of sandstone, forming a complex crack network structure.

**Key words**: Sandstone, Seepage-stress coupling, Creep, Hydraulic gradient, Deformation localization, Strain increment

## 0 引言

随着国家经济的不断发展,岩土工程建设范围和深度不断扩大,遇到的地质问题愈加难以解决[1-3]。由于工程建设成本较高,为保障工人的生命和财产安全,岩土工程的使用年限一直是众多学者不断探索和研究的重点和难点。由于围岩的赋存环境复杂,渗流场对围岩的力学性质影响较大,渗流水处理是工程建设中需要重点考虑的因素。因此开展渗流-应力耦合作用下岩石蠕变特性和渗流特性的相关研究具有重要意义。

岩石流变中比较常见的是蠕变和应力松弛,有较多的学者对此开展了研究。范秋雁等[4]、巫德斌等[5]、李化敏等[6]通过岩石蠕变试验,探究各种岩石的蠕变力学特性。张玉等[7]通过分级加载的方式对碎屑岩开展流变试验,探究围压、应力、渗透压力等要素对流变变形的影响。蔡燕燕等[8]在大理岩不同的变形阶段进行蠕变预处理,探究不同蠕变条件处理后大理岩的力学性质与损伤特征的变化规律。辛亚军等[9]利用 RLW-2000 型岩石三轴流变仪开展蠕变试验,研究发现岩石的变形模量与加载应力水平成正相关。陈文玲等[10]对云母石英片岩开展三轴蠕变试验,利用统计学原理建立损伤与应力、应变之间的关系方程式。陈卫忠等[11]、朱昌星等[12]、韦立德等[13]、曹文贵等[14]对不同岩石建立蠕变损伤的本构模型。由于试验设备的限制,蠕变研究多为理论模拟,蠕变物理试验多用来探究岩石的蠕变特性[15-16]。

常见岩石赋存于有地下水或地表水的渗流场中,渗流水会对岩石产生物理化学作用,改变岩石内部微观结构[17-18]。许江等[19]以凝灰岩为研究对象,探究不同排水条件下岩石力学性质的变化规律。JI 等[20]研究发现泥岩的弹性模量和抗压强度与含水率成负相关。彭守建等[21]探究渗透水压与砂岩局部化破坏特征之间的关系,研究发现渗透水压越大,发生变形的时间越早。XIAO 等[22]开展渗流-应力耦合试验,探究渗流压力对岩石力学特性的影响。李铀等[23]、朱合华等[24]、阎岩等[25]开展不同含水条件下的岩石蠕变试验,分析不同含水条件对蠕变特性的影响。杨红伟等[26]对细砂岩开展渗流-应力耦合作用下的蠕变试验,探究渗透水压对蠕变特性的影响。目前,关于渗流试验方面的研究多集中在静水研究,而有关渗流与流变耦合的研究较少。

基于以上分析,利用实验室渗流-应力耦合伺服控制加载试验系统开展蠕变试验,利用柱塞泵在砂岩试样两端施加渗透水压,并对岩石蠕变过程中的流变特性、渗流特性进行分析,同时对砂岩试样进行 CT 扫描测试,分析砂岩渗流和蠕变耦合作用下产生的损伤特征,研究结果有望为岩土工程建设维护中的稳定性设计提供参考。

## 1 蠕变试验方法

### 1.1 试验系统

渗流-应力耦合伺服控制加载试验系统[27]主要由伺服控制系统、加载系统、可视化透明围压室和渗流系统组成,同时结合 3D-DIC 系统。

加载系统由液压缸、紧密伺服阀、反力柱、压头、底座构成,在机架顶端配有轴向位移传感器,底部支座上配有轴向荷载传感器。伺服控制系统由位移计、信号指令盒、荷载显示器构成。轴压油源系统由液压油泵和囊式蓄能器组成,最大轴向荷载为 500 kN;围压油源系统由手动油泵和囊式蓄能器组成,最大围压为 15 MPa,蓄能器用于避免出现油压不稳情况。渗流系统由 260D 型高精度柱塞泵组成,通过金属管将柱塞泵与围压室连接,在试样上下端施加渗透水压,水压范围为 0.07～51.70 MPa,流量范围为 0.001～107 mL/min。3D-DIC 系统能获取蠕变过程中的砂岩表面云图,该系统主要由工业相机灯源、控制箱和 3D-DIC 软件构成,加载机的周围均匀分布 3 组采集单元,3 组采集单元分布方式如图 1 所示。

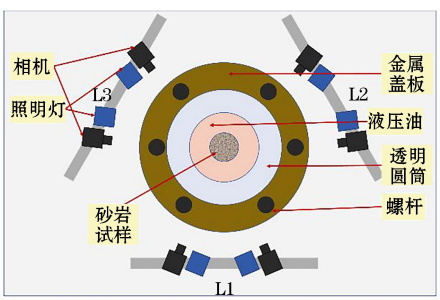



**图 1 采集单元分布方式**

**Fig.1 Distribution mode of acquisition unit**

### 1.2 试样制备

试样取自重庆地区三叠系上统的须家河组的井口砂岩,砂岩层理均匀,硬度较高,物理力学参数见表1。砂岩矿物组成为石英、长石和白云石等,经过核磁共振测试,砂岩内部孔隙结构主要为小孔和中孔。依据文献[28],利用实验室的设备对长块状砂岩进行取样制备,通过取芯、切割、研磨等工序将砂岩加工成尺寸为 $\Phi$25 mm×50 mm 的圆柱形试样,直径控制在 25(±0.1) mm,高度控制在 50(±0.1) mm。按照国际岩石力学学会(ISRM)的要求[29],对试样端面进行磨平,保证端面平度控制在 0.05 mm 内,砂岩试样如图2所示。



**图2 砂岩试样**

**Fig.2 Sandstone samples**

### 1.3 试验方案及步骤

蠕变过程中围压恒定为 9 MPa,在试样两端施加渗透水压,为实现不同的水力梯度,进口水压恒定为 8.0 MPa,出口水压分别为 2.0 MPa、3.5 MPa、5.0 MPa、6.5 MPa、8.0 MPa。同等条件下将砂岩峰值强度的 80%作为蠕变试验的启动应力。以 $1\times10^{-5}$ $s^{-1}$的应变速率加载至启动应力后停止加载,开启渗流-应力耦合作用下的蠕变试验,考虑到 DIC 控制箱的使用时限,试验开展 100 000 s 后结束,如果试验过程中出现破坏,将提前结束蠕变,不同水力梯度条件下砂岩蠕变试验方案见表2。

**表1 砂岩的物理力学参数**

**Table 1 Physical and mechanical parameters of sandstone**

| 围压/MPa | 进口水压/MPa | 出口水压/MPa | 水力梯度/(MPa/m) | 峰值强度/MPa | 弹性模量/GPa | 启动应力/MPa |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 9.0 | 8.0 | 8.0 | 0 | 62.0 | 18.2 | 49.6 |
| 9.0 | 8.0 | 6.5 | 30 | 67.4 | 19.1 | 53.9 |
| 9.0 | 8.0 | 5.0 | 60 | 76.5 | 19.8 | 61.2 |
| 9.0 | 8.0 | 3.5 | 90 | 83.5 | 20.7 | 66.8 |
| 9.0 | 8.0 | 2.0 | 120 | 87.9 | 22.0 | 70.3 |

**表2 不同水力梯度下砂岩蠕变试验方案**

**Table 2 Creep test schemes of sandstone under different hydraulic gradients**

| 围压/MPa | 启动应力/MPa | 加载速率/($\times10^{-5}$ $s^{-1}$) | 进口水压/MPa | 出口水压/MPa | 水力梯度/(MPa/m) |
|---|---|---|---|---|---|
| 9.0 | 49.60 | 1 | 8.0 | 8.0 | 0 |
| 9.0 | 53.92 | 1 | 8.0 | 6.5 | 30 |
| 9.0 | 61.20 | 1 | 8.0 | 5.0 | 60 |
| 9.0 | 66.80 | 1 | 8.0 | 3.5 | 90 |
| 9.0 | 70.32 | 1 | 8.0 | 2.0 | 120 |

渗流-应力耦合作用下蠕变试验具体步骤如下。

(1) 选取加工好的砂岩试样,在试样表面涂抹防油防水黑胶,将黑漆和白漆均匀喷在砂岩表面,制作白底黑斑的人工散斑,并将处理好的试样抽真空负压饱水 48 h。

(2) 按照组装顺序分别将砂岩试样、压缩杆、金属盖板和 6 根螺杆进行组装,接着将柱塞泵的金属管与透明围压室连接,组装完成后将其置于加载台的底座上。

(3) 开启试验设备,施加轴向预紧力和围压,再施加预设好的渗透水压,渗流 3~5 h 以保证试样内部渗流水流动连续稳定。

(4) 稳流完成后,以 $1\times10^{-5}$ $s^{-1}$的应变速率对试样进行轴向加载,轴向应力加载至启动应力后停止加载,开启蠕变试验。

(5) 蠕变 100 000 s 后停止试验,若试样出现破坏,应提前停止试验。

(6) 试验结束后保存、备份数据。

为了更好地理解试验流程,绘制了 60 MPa/m 水力梯度下砂岩蠕变试验参数变化曲线,如图3所示。

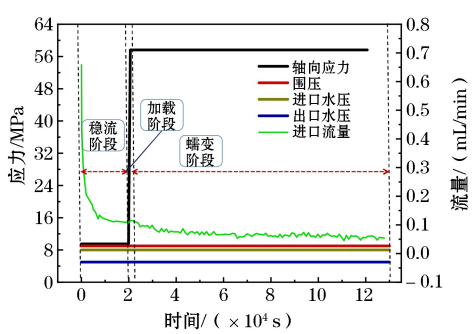



**图3 60 MPa/m 水力梯度下砂岩蠕变试验参数变化曲线**

**Fig.3 Variation curves of sandstone creep test parameters under the hydraulic gradient of 60 MPa/m**

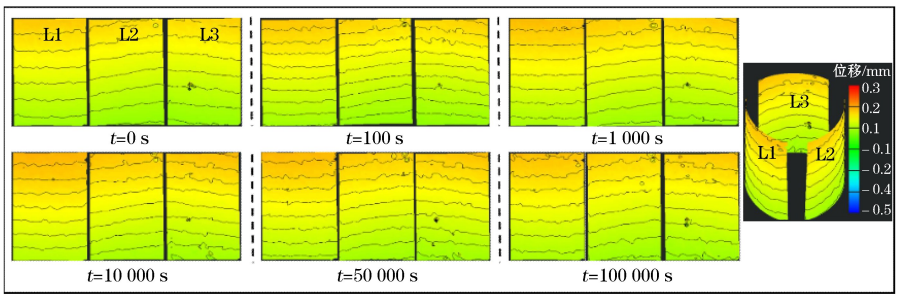
## 2 砂岩表面云图分析

为了解砂岩表面变形特征,利用 3D-DIC 技术获取砂岩表面云图。限于篇幅,本文对 0,60,120

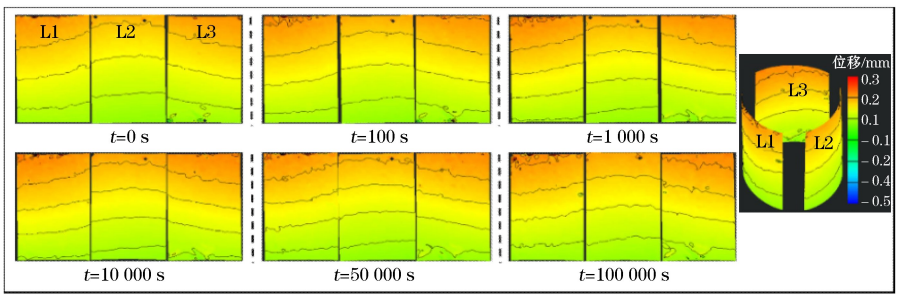
MPa/m 水力梯度条件下的云图进行研究,选取有代表性的云图进行展示分析。

### 2.1 砂岩表面位移场云图演化

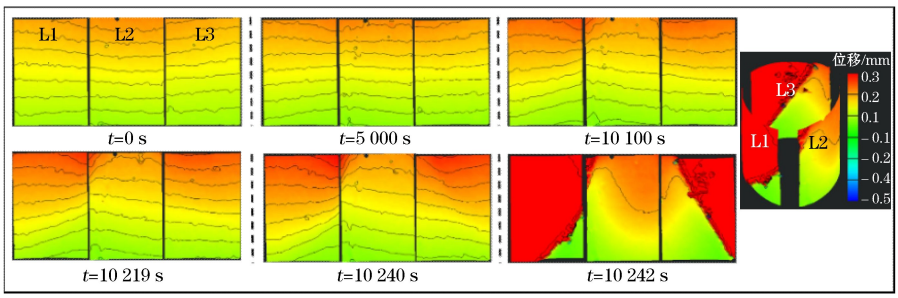
首先分析蠕变对砂岩表面的位移场云图,包括轴向位移场云图和径向位移场云图,分别如图 4 和图 5 所示。图中展示了 3 个观测面 L1、L2、L3 上的位移云图,从不同角度观测砂岩位移演化特征。位移云图中色度条取值以压缩为正值,拉伸为负值,轴向云图中色度条数值范围为 −0.5～0.3 mm,径向云图中色度条数值范围为 −0.3～0.5 mm。




(a) 水力梯度 0 MPa/m




(b) 水力梯度 60 MPa/m




(c) 水力梯度 120 MPa/m

**图 4 蠕变时砂岩表面的轴向位移场云图**

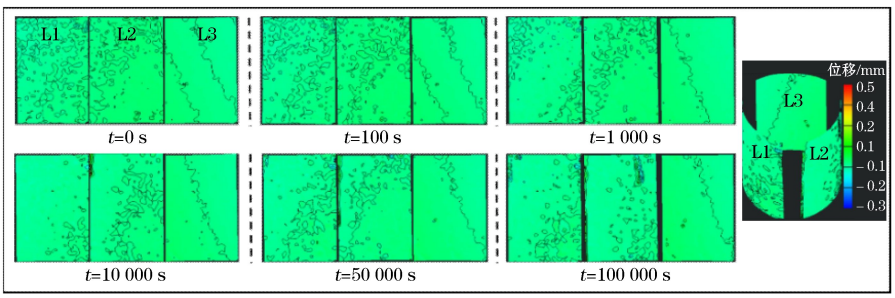
**Fig.4 Axial displacement field cloud maps of sandstone surface during creep**

由图 4 可知,0 MPa/m 水力梯度下,即蠕变初始时刻,砂岩试样表面的位移等值线均匀分布,表明砂岩表面轴向产生的变形较为均匀,随着蠕变的进行,位移等值线仍均匀分布,未发生明显的偏转,砂岩在蠕变过程中未产生局部化变形。60 MPa/m 水力梯度下,位移等值线均匀分布,随着蠕变的进行,轴向位移场云图颜色缓慢加深(颜色标识见电子版),说明轴向位移值缓慢增大。整个蠕变过程中,L1、L3 面上的位移等值线倾斜分布,说明 3 个观测面上轴向位移变化并不一致。相较于 0 MPa/m,相同蠕变时间内 60 MPa/m 水力梯度下的云图中颜色更深,呈现红黄色,位移值更大,轴向压缩程度更大。120 MPa/m 水力梯度下,砂岩出现蠕变破坏,$t=0$ s 时,砂岩轴向变形均匀,随着蠕变的进行,位移等值线发生偏转,云图颜色逐渐加深,轴向位移出现区域增大的趋势;$t=10\ 100$ s 时,L1 云图右上角位移等值线顺时针偏转明显,随着时间的延长,等值线局部倾斜聚集,表明裂纹在此区域发育扩展;$t=10\ 240$ s 时,等值线在破裂面处密集,2 s 后,砂岩破坏,沿着等值线偏转的方向形成倾斜的破裂面,倾斜

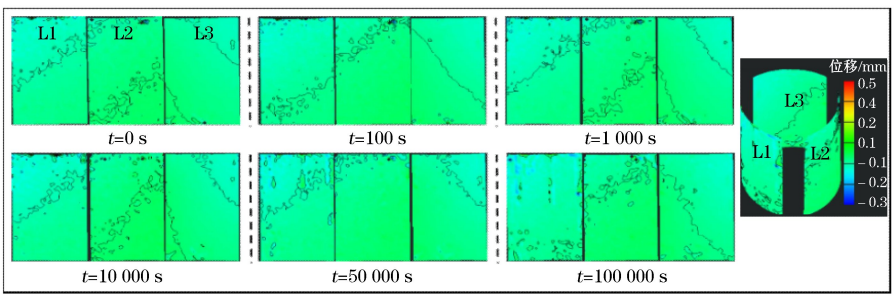
面的上方产生的轴向位移大于下方产生的轴向位移。

由图 5 可知,0 MPa/m 水力梯度下,初始时刻砂岩在径向产生较小位移,随着蠕变的进行,云图未发生明显变化,说明在蠕变试验过程中,砂岩径向产生的位移量较小。60 MPa/m 水力梯度下,$t=0$ s 时,径向变形均匀,蠕变 10 000 s 后,在 L1 云图左上角和 L2 云图右上角颜色渐变为蓝绿色(颜色标识见电子版),L1、L2 面上径向膨胀变形,砂岩相同高度上径向位移变化不同步。随着蠕变的进行,整个试验过程中未出现较大的径向位移变化,蠕变较为稳定。120 MPa/m 水力梯度下,砂岩径向不断膨胀变形,$t=5\ 000$ s 时,L1 云图中出现位移量较大的蓝绿色区域,随着时间的延长,蓝绿色区域面积不断增大,颜色不断加深。蠕变至 10 240 s 时,L1 和 L3 面上产生明显的膨胀变形,2 s 后砂岩破坏,砂岩在 L1 面膨胀变形,L3 破坏面上方膨胀变形,L3 破坏面下方及 L2 面的岩块在破坏瞬间应力卸载,故呈现变形恢复。

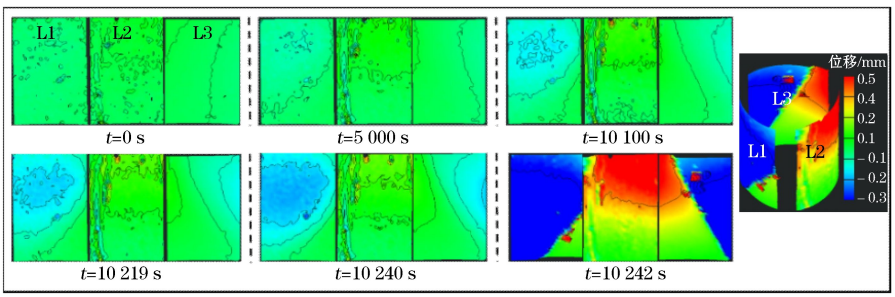
水力梯度较低时,L1、L2、L3 面上的变形一致;高水力梯度时,各观测面之间的变形不同步,同一个观测面上不同区域变形不同步,表明在高水力梯度下砂岩内部的应力状态更加复杂,更容易出现局部化变形现象。相同流变时间内,随着水力梯度的增大,轴向压缩越大,径向膨胀也越大。砂岩出现破坏的情况下,径向位移云图比轴向位移云图更早出现局部位移变化。




(a) 水力梯度 0 MPa/m




(b) 水力梯度 60 MPa/m




(c) 水力梯度 120 MPa/m

**图 5 蠕变时砂岩表面的径向位移场云图**

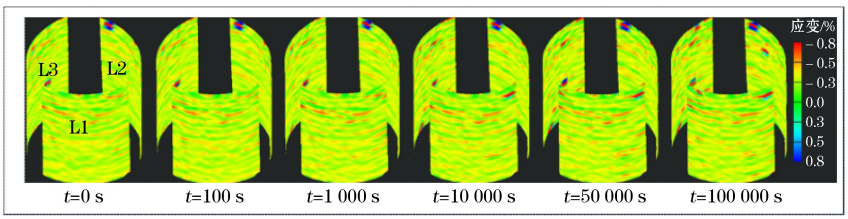
**Fig.5 Radial displacement field cloud maps of sandstone surface during creep**

## 2.2 砂岩表面三维应变场云图演化

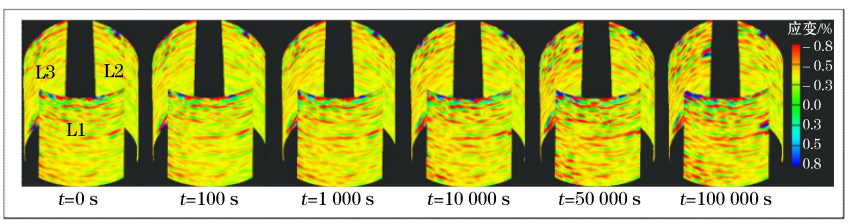
蠕变时砂岩表面的轴向应变场三维云图和径向应变场三维云图分别如图 6 和图 7 所示。借助三维云图能够更直观地从空间上观察砂岩表面的应变变

化情况。

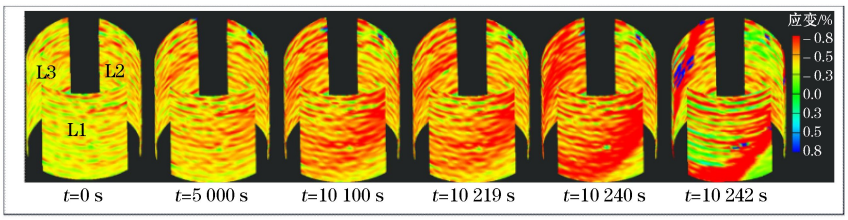
由图 6 可知,0 MPa/m 水力梯度下,$t=0$ s 时应变场云图中均匀分布着条状黄色应变区域(颜色标识见电子版),随着蠕变的进行,砂岩轴向被缓慢压缩,直至流变结束,云图中未出现较大应变点,轴向压缩变形较为均匀。60 MPa/m 水力梯度下,蠕变初始时刻砂岩变形均匀,云图中有红色较大应变点出现,说明相同流变时刻内,60 MPa/m 水力梯度下的轴向应变量比 0 MPa/m 水力梯度下的应变量更大,压缩变形更明显。$t=50\ 000$ s 时,较大应变点数量和面积增大,表面微裂纹发育萌生,但未出现较大应变点集中现象。120 MPa/m 水力梯度下,$t=0$ s 时,砂岩表面变形均匀,5 000 s 后在云图中出现红色较大应变点,砂岩表面微裂纹发育扩展,集中出现在 L1 右上角和 L3 左上角区域,出现应变集中的趋势,$t=10\ 100$ s 时,较大应变点聚集形成较大应变区域,砂岩表面微裂纹扩展连接。10 240 s 时在云图中形成倾斜的较大应变区域,2 s 后出现破坏,云图中有明显的局部应变破坏带,沿着应变集中的方向倾斜分布。




(a) 水力梯度 0 MPa/m




(b) 水力梯度 60 MPa/m



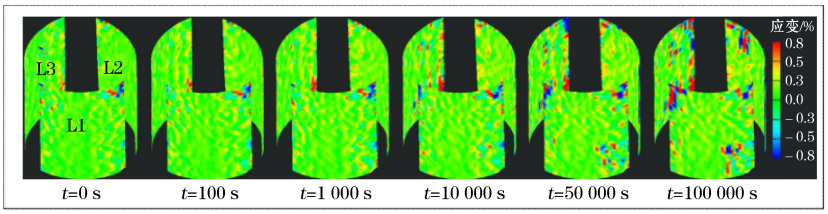

(c) 水力梯度 120 MPa/m

**图 6 蠕变时砂岩表面的轴向应变场三维云图**

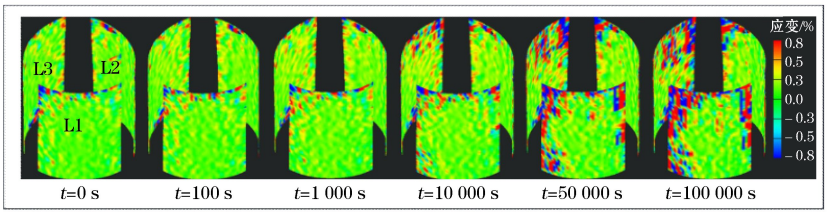
**Fig.6 Three-dimensional cloud maps of axial strain field on sandstone surface during creep**

由图 7 可知,0 MPa/m 水力梯度下,初始时刻云图以绿色应变区域为主(颜色标识见电子版),砂岩表面径向变形较小,随着蠕变的进行,云图中出现黄色应变点,说明砂岩径向产生较小变形。60 MPa/m 水力梯度下,随着蠕变的进行,黄色应变区域的数量和面积不断扩大,$t=10\ 000$ s 时可以观察到弥散分布的黄色应变点,10 000 s 后蠕变平缓进行,径向应变场云图未发生明显变化。相较于 0 MPa/m,60 MPa/m 水力梯度下的云图中黄色应变区域分布更广,径向变形量更大。120 MPa/m 水力梯度下,蠕变 5 000 s 时,L1 云图中较大应变点开始聚集,砂岩表面微裂纹不断扩展连接,10 240 s 时云图中形成了明显较大应变点区域,2 s 后发生破坏,云图中出现倾斜的局部应变破坏带。

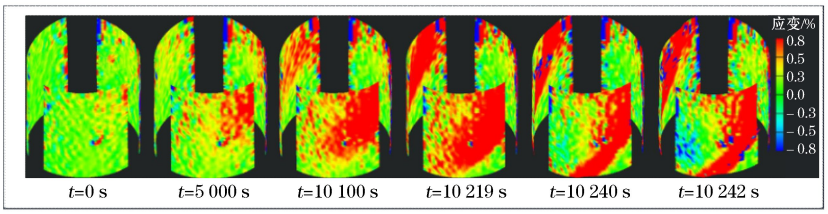
相同蠕变时间内,与轴向应变云图相比,径向应变云图中应变集中区域更加清晰明显,对工程中围岩失稳预警具有重要意义。水力梯度越大,径向应变场云图中产生较大应变点的速率越快,更容易出现应变局部化特征,砂岩更容易发生破坏,说明水力梯度越大,渗流水对砂岩力学性质的劣化作用越明显,更能促进砂岩蠕变。




(a) 水力梯度 0 MPa/m




(b) 水力梯度 60 MPa/m




(c) 水力梯度 120 MPa/m

**图 7 蠕变时砂岩表面的径向应变场三维云图**

**Fig.7 Three-dimensional cloud maps of radial strain field on sandstone surface during creep**

## 3 砂岩蠕变特性和渗流特性

### 3.1 应力和应变时程演化规律

不同水力梯度下的砂岩应力增量和应变增量时程演化曲线如图 8 所示。为了便于理解施加水压的方式及大小,围压恒定为 9.0 MPa,砂岩上端施加恒定水压 8.0 MPa,下端水压分别取 8.0 MPa、6.5 MPa、5.0 MPa、3.5 MPa、2.0 MPa,对应水力梯度分别为 0 MPa/m、30 MPa/m、60 MPa/m、90 MPa/m、120 MPa/m。根据应变时程演化曲线,同时绘制应变增量数值,见表 3 和表 4。

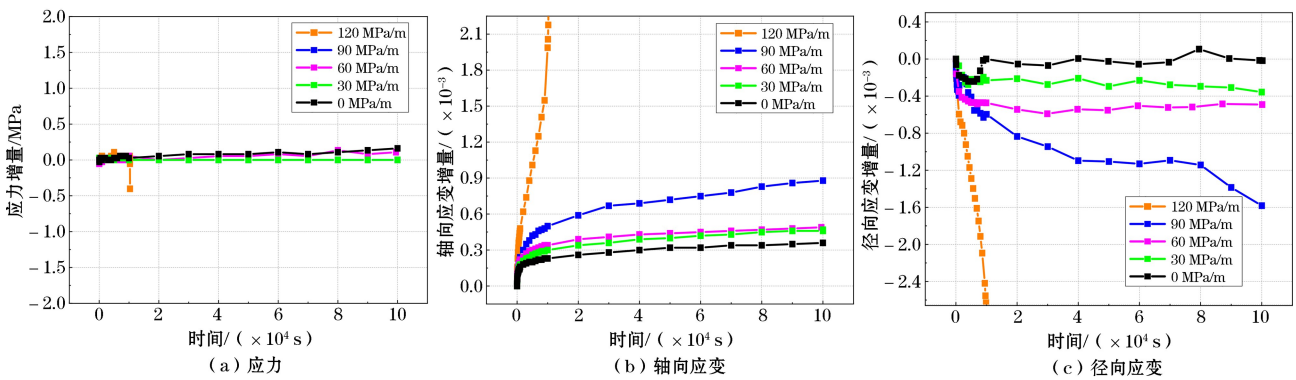



**图 8 不同水力梯度下应力增量和应变增量时程演化曲线**

**Fig.8 Time history evolution curves of stress increment and strain increment under different hydraulic gradients**

从图 8(a)中可以看出,不同水力梯度下,整个蠕变过程中轴向应力始终保持不变,符合蠕变的试验条件。图 8(b)为轴向应变增量时程演化曲线,0 MPa/m、30 MPa/m、60 MPa/m 水力梯度下,轴向应变增量先减速增加,10 000 s 后蠕变较为稳定,轴向产生的应变变化量较小,符合第 2 节中对砂岩表面云图的分析结果。水力梯度较低时,产生的轴向应变增量主要集中在蠕变前的 10 000 s 内,占整个

蠕变过程应变增量的60%～70%。由表3可知,蠕变结束时,0 MPa/m、30 MPa/m、60 MPa/m水力梯度下产生的轴向应变依次为$3.6\times10^{-4}$、$4.6\times10^{-4}$、$4.9\times10^{-4}$,随着水力梯度的增大,轴向应变增量也越大。90 MPa/m水力梯度条件下,轴向应变增量先减速增大,增至一定值后应变开始匀速增大,轴向应变增量为$8.8\times10^{-4}$,在砂岩轴向产生更大的变形。120 MPa/m水力梯度条件下,应变曲线呈现出典型的三阶段,即减速流变、稳定流变和加速流变阶段,轴向应变先减速增加,一段时间后匀速增大开始稳定流变,砂岩轴向不断压缩变形,在应力-渗流耦合作用下,内部微裂纹不断发育、连接、贯通,损伤不断积累,蠕变速率加快,轴向应变快速增大,砂岩破坏。

**表3 不同水力梯度下特征时刻的轴向应变增量**

**Table 3 Axial strain increment at characteristic time under different hydraulic gradients**

| 水力梯度/(MPa/m) | 轴向应变增量/($\times10^{-4}$) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $t$=1 000 s | $t$=10 000 s | $t$=50 000 s | $t$=100 000 s |
| 0 | 1.6 | 2.3 | 3.2 | 3.6 |
| 30 | 1.8 | 3.0 | 4.0 | 4.6 |
| 60 | 2.2 | 3.4 | 4.4 | 4.9 |
| 90 | 2.4 | 5.0 | 7.2 | 8.8 |
| 120 | 4.8 | 19.9 | >20.0 | >30.0 |

**表4 不同水力梯度下特征时刻的径向应变增量**

**Table 4 Radial strain increment at characteristic time under different hydraulic gradients**

| 水力梯度/(MPa/m) | 径向应变增量/($\times10^{-4}$) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $t$=1 000 s | $t$=10 000 s | $t$=50 000 s | $t$=100 000 s |
| 0 | −1.8 | −0.1 | −0.3 | −0.2 |
| 30 | −0.7 | −2.3 | −3.0 | −3.6 |
| 60 | −3.5 | −4.7 | −5.5 | −4.9 |
| 90 | −2.8 | −6.0 | −11.1 | −15.8 |
| 120 | −5.9 | −28.2 | <−30.0 | <−40.0 |

图8(c)为径向应变增量时程演化曲线,砂岩径向产生膨胀变形,因此曲线上应变增量均为负值。0 MPa/m水力梯度下,径向应变增量较小,径向膨胀变形不明显,与图7中径向应变场云图分析结果一致。30 MPa/m和60 MPa/m水力梯度下,10 000 s后径向应变值基本上维持不变。在较高水力梯度(90 MPa/m)下,渗流水在砂岩内部产生的孔隙压力较大,裂纹发育更充分,砂岩内部损伤不断积累,表现为径向应变增量先减速增加,一段时间以后,砂岩内部结构调整至新的平衡,径向应变增量匀速增大。由表4可知,0 MPa/m、30 MPa/m、60 MPa/m、90 MPa/m水力梯度下,在蠕变结束后径向应变增量分别为$-0.2\times10^{-4}$、$-3.6\times10^{-4}$、$-4.9\times10^{-4}$、$-15.8\times10^{-4}$,水力梯度越大,径向膨胀变形越明显。120 MPa/m水力梯度下,径向应变增量变化规律与轴向应变增量一致,应变曲线呈现出典型的三阶段,即减速流变、稳定流变和加速流变阶段,高水力梯度下,渗流水在砂岩内部的运动更加剧烈,使得砂岩内应力分布更加复杂,渗流水对砂岩的力学性质劣化影响更大,促进砂岩蠕变,使砂岩更容易发生破坏。

综上,水力梯度作用下渗流水对砂岩的蠕变特性影响显著,低水力梯度下,轴向应变增量和径向应变增量较小,流变速率较小;水力梯度增大,相同流变时间内应变增量增大,流变速率加快。随着水力梯度的增大,渗流水对结构的弱化作用更加明显,劣化影响更大,加快蠕变的进行。

图9为不同水力梯度下应变速率时程演化曲线。

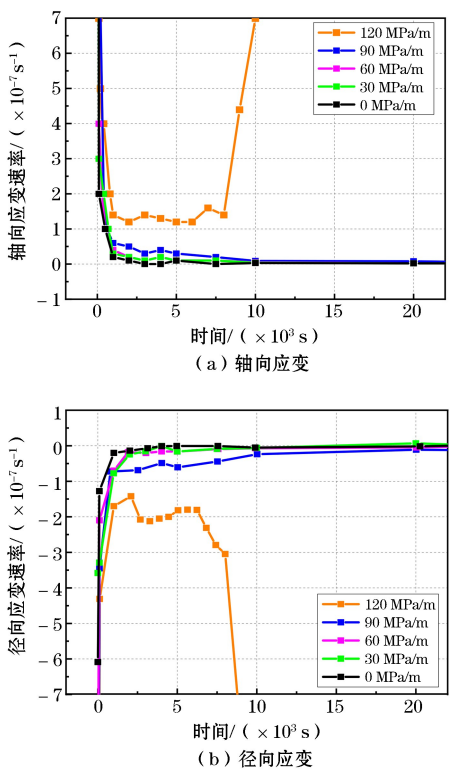



**图9 不同水力梯度下应变速率时程演化曲线**

**Fig.9 Time history evolution curves of strain rate under different hydraulic gradients**

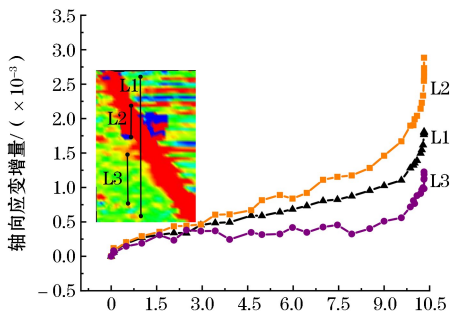
图9(a)为轴向应变速率曲线,蠕变轴向应变速率曲线可分为2种形式,低水力梯度未出现破坏的情况下,轴向应变速率快速减小,稳定流变阶段速率较小,此阶段产生的变形较小。高水力梯度砂岩发生破坏的情况下,速率曲线表现为典型的三阶段,即

快速减小、稳定变化和快速增大阶段,轴向应变速率曲线呈“U”形,与 YANG 等[30]研究结果相符。图 9(b)为径向应变速率曲线,径向应变增量为负值,因此径向应变速率也为负值,径向应变速率演化规律与轴向较为一致。

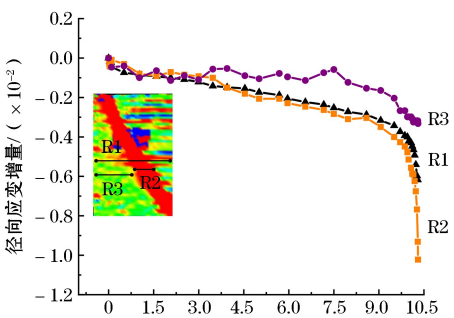
水力梯度越大,蠕变稳定阶段的速率越大,砂岩产生的应变变化量越大。水力梯度较高时,蠕变寿命缩短,更容易破坏,其原因在于水力梯度的增加,使得内部结构的孔隙压力增加,在劣化砂岩力学性质的同时,改变砂岩的内部孔隙结构,促进砂岩加速蠕变。

### 3.2 破坏带内外应变演化规律

120 MPa/m 水力梯度下,砂岩出现破坏,砂岩表面出现明显宏观破坏带,蠕变过程中较大应变点的聚集具有明显的局部化特征,利用 DIC 软件在云图中的破坏带内外建立轴向和径向虚拟应变片,获取破坏带内外的应变增量时程演化曲线,如图 10 所示,L1、L2、L3 分别代表整体、破坏带内、破坏带外的轴向虚拟应变片,R1、R2、R3 分别代表整体、破坏带内、破坏带外的径向虚拟应变片。




(a) 轴向应变




(b) 径向应变

**图 10 120 MPa/m 水力梯度下砂岩局部破坏带内外的应变增量时程演化曲线**

**Fig.10 Time history evolution curves of strain increment inside and outside the local failure zone of sandstone under the hydraulic gradient of 120 MPa/m**

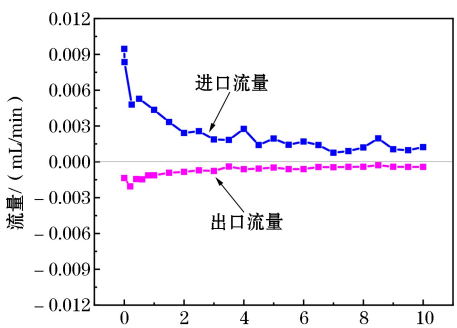
图 10(a)为砂岩局部破坏带内外的轴向应变增量变化曲线。随着蠕变的进行,局部破坏带内外的轴向应变增量均随时间的延长而不断增大,砂岩破坏带内外区域轴向均出现压缩变形。蠕变前 3 000 s 内,破坏带内外的应变增量曲线与整体应变增量曲线一致;3 000 s 后,3 条曲线之间逐渐出现差异,破坏带外的轴向应变增量基本上保持不变,整体的轴向应变匀速增大,破坏带内的轴向应变增量以更大的速率增大,随着时间的延长,3 条曲线之间的差距越来越大。这说明在同一观测面内,砂岩轴向变形存在区域性差异,发生局部破坏的区域应变增大速率更大,变形更明显,此特征可为围岩破坏和工程失稳预警提供新思路。

图 10(b)为砂岩局部破坏带内外的径向应变增量变化曲线,砂岩在径向膨胀变形,因此应变增量为负值,与轴向变化规律相似,相同蠕变时间内,破坏带内应变变化量大于整体,破坏带外的应变变化量最小。不同于轴向的是,砂岩径向在 1 500～3 000 s 内出现带内外应变以不同速率增大的现象,径向更早出现应变局部化特征,此特征与第 2 节中砂岩表面云图分析结果一致。

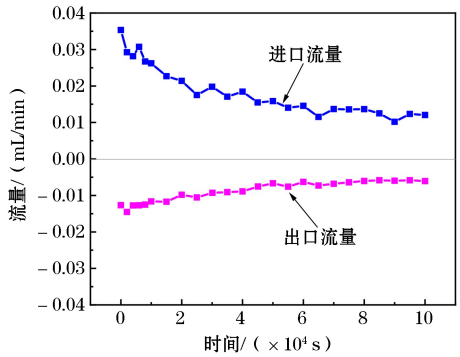
### 3.3 渗流特性

实时监测记录试样流量,流量演化可以反映出砂岩内部孔裂隙的损伤发育、扩展、贯通情况,通过分析进出口流量变化规律,探究不同水力梯度作用下蠕变过程中砂岩的渗流特性。

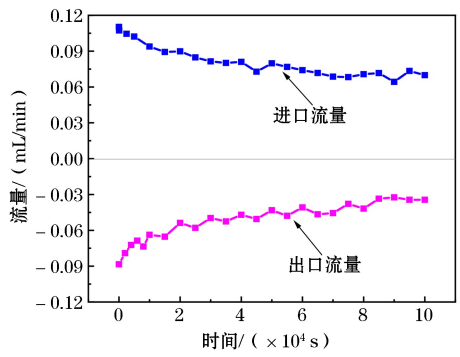
图 11 为不同水力梯度下砂岩进出口流量的时程演化曲线。整体来看,出口流量值低于进口流量值,相同水力梯度时进口流量和出口流量的演化规律较为一致,说明在砂岩内部形成渗流通道。水力梯度越大,流量值越大,说明渗流水在砂岩内部的流速越大,渗流运动越剧烈。



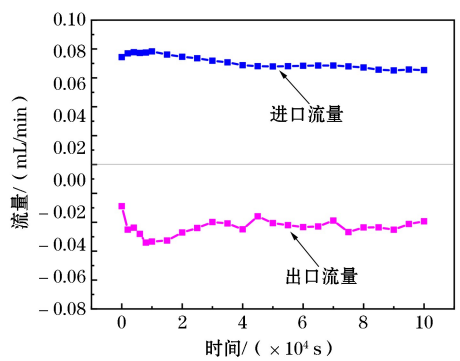

(a) 水力梯度 0 MPa/m



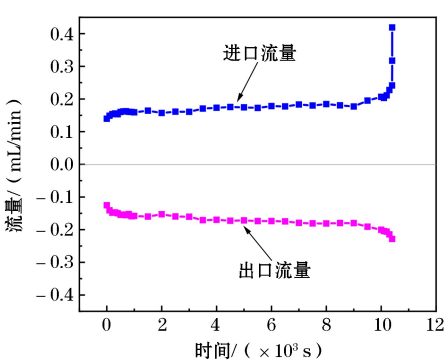
(b) 水力梯度 30 MPa/m



(c) 水力梯度 60 MPa/m



(d) 水力梯度 90 MPa/m



(e) 水力梯度 120 MPa/m

**图 11 不同水力梯度下砂岩进出口流量的时程演化曲线**

**Fig.11 Time history evolution curves of sandstone inlet and outlet flow rate under different hydraulic gradients**

低水力梯度(0 MPa/m、30 MPa/m、60 MPa/m)时,流量值先减小后维持稳定。流变初期砂岩内主要是孔裂隙被压密,应力作用下裂纹发育,孔裂隙减少量要多于增加量,渗流通道数量减少且开度降低,表现为在流变初期流量值减小。随着蠕变的进行,在应力与渗流的耦合作用下,砂岩内部结构不断调整,孔裂隙增加量与减少量之间的差异逐渐减小,流量变化逐渐稳定,渗流水对砂岩的弱化作用减小,内部结构形成新的平衡状态,进出口流量基本维持稳定。

90 MPa/m 水力梯度下,流量先增加,10 000 s 后流量开始缓慢降低,说明在较高水力梯度的影响下,渗流水对砂岩内部结构的弱化作用增大,裂纹充分发育,流变初期萌生的裂纹数量多于被压密闭合的裂纹数量,随着蠕变的进行,砂岩内部结构不断调整,形成新的动态平衡,流量逐渐平缓。120 MPa/m 高水力梯度下,流量变化规律与应变变化规律较为一致,呈现三阶段,即流量减速、流量稳定和流量加速阶段。与 90 MPa/m 水力梯度下相似的是,开始阶段,砂岩内部孔裂隙增多,损伤积累,孔裂隙的增加量要多于减少量,渗流通道的数量增加且开度增加,表现为初期流量减速增加。在应力的作用下,裂纹被压密,内部结构不断调整,此阶段流量缓慢增加,直至出现破坏,流量快速增加。不同于 90 MPa/m,120 MPa/m 水力梯度下砂岩内部的动水压力更大,内部应力分布更加复杂,因此渗流水对砂岩的劣化影响更大,在砂岩内部产生更多不可逆损伤,损伤不断积累,蠕变过程中流量始终增加。

水力梯度越高,进出口流量值越大,渗流水在内部产生的动水压力越大,应力分布更加复杂,劣化砂岩力学性质,同时渗流速率越快,渗流水对砂岩内胶结物的溶解和矿物颗粒的冲刷更严重,弱化内部结构,水力梯度增大,促进砂岩蠕变。

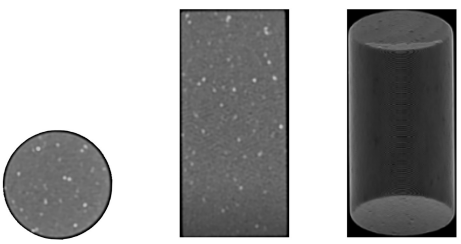
## 4 CT 扫描内部损伤特征分析

3D-DIC 技术获取的云图可以分析砂岩表面裂纹变化特征,对内部结构变化无法探测,因此利用工业 X 射线 CT 机对蠕变破坏前后的岩样开展 CT 扫描试验。

CT 扫描间隔为 0.75 mm,分别沿着砂岩轴向和径向扫描。自砂岩底端开始,沿着砂岩轴向进行扫描,均匀取样 5 张图像,取样间隔为 8.3 mm,取样层数 $S$ 分别为 8, 20, 32, 44, 56;沿着砂岩径向扫描,均匀取样 5 张图像,取样间隔为 4.1 mm,取样层

数 S 分别为 5，11，17，23，29。分析前，先对 CT 切片中不同材料属性进行区分定义，将砂岩试块主要分为以石英为主的矿物颗粒、绿泥石等黏土矿物以及裂纹。由 CT 扫描原理可知，图像中的颜色越亮表示灰度值越大，材料属性密度越大，因此切片图像中白色部分代表石英等颗粒，灰黑色部分是较低密度的长石、白云母以及绿泥石等胶结物，黑色部分是裂纹。

图 12 为试验前原始砂岩试样的 CT 扫描图像及三维重构图。切片扫描图较多且无明显差异性，分别选择其中一张进行展示。二维切片图像中以白色亮点和灰色区域为主，白色亮点表示高密度石英颗粒，灰色区域表示低密度长石、白云母和绿泥石等，可见砂岩内部质地较为均匀。轴向以及径向二维扫描图像中未观察到孔裂隙区域，砂岩中初始裂纹较小，CT 扫描分辨率有限难以观测。砂岩的三维重构图呈现为标准圆柱形，在三维图中也未观测出明显的裂纹。



（a）轴向扫描图 （b）径向扫描图 （c）三维重构图

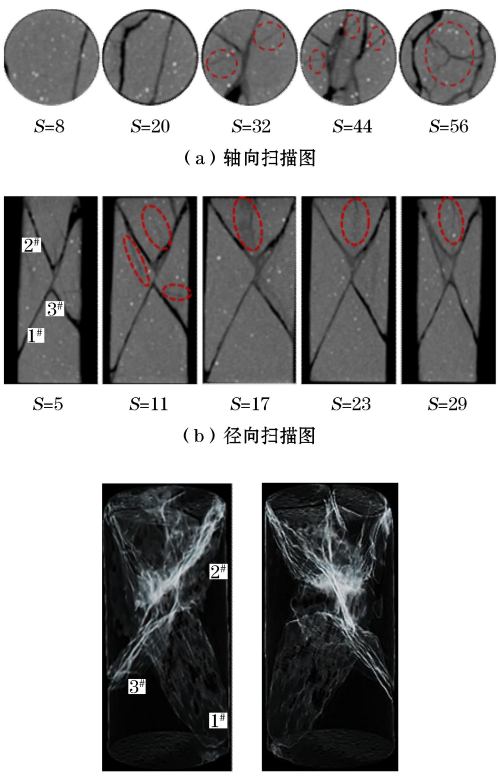
**图 12 试验前试样 CT 扫描图及三维重构图**

**Fig.12 CT scanning diagram and three-dimensional reconstruction diagram of sample before test**

图 13 为 120 MPa/m 水力梯度下砂岩蠕变试验后 CT 扫描图及三维重构图。

图 13(a)为砂岩轴向扫描图，不同层数扫描图像上分布的裂纹数量、大小及分布特征差异较大。第 8 层图像上，有一条较为明显的直线形主裂纹，靠近砂岩侧面边缘开始延伸扩展，在第 20 层上出现另一条主裂纹。随着扫描层数的增加，裂纹数增加，并且逐渐向砂岩内部延伸，2 条主裂纹逐渐靠近汇合，并且在主裂纹上衍生出次生裂纹，如图中红色线圈出的部分(颜色标识见电子版)。靠近砂岩加载端的扫描图中主裂纹越来越弯曲，产生的次生裂纹数越来越多，次生裂纹与主裂纹相互交叉，在第 56 层扫描图上呈现出复杂的二维裂纹网络结构。

图 13(b)为砂岩径向扫描图，不同层上裂纹分布特征差异较小。在各层上的扫描图中均有 3 条主裂纹，标注为 1#、2#、3#，其中 1# 主裂纹倾斜贯通砂岩端面与部分侧面，2# 和 3# 主裂纹与 1# 主裂纹相交贯通，并且倾斜延伸至砂岩表面，形成清晰的“X”形裂纹分布结构。主裂纹上衍生出多条次生裂纹，如图 13(b)中红色线圈出的部分，次生裂纹向砂岩表面延伸，但并未与表面贯通。由此可见，砂岩试样内部主裂纹引导发生破坏，在砂岩内部形成主裂纹贯通面，次生裂纹促进裂纹扩展贯通。第 5 层和第 29 层的径向扫描图中次生裂纹较多，裂纹交汇面更加粗糙，径向断面中未形成复杂裂纹网络结构，靠近砂岩边缘处的破坏程度较大。




（a）轴向扫描图

（b）径向扫描图

（c）三维重构图

**图 13 120 MPa/m 水力梯度下砂岩蠕变试验后 CT 扫描图及三维重构图**

**Fig.13 CT scanning diagrams and three-dimensional reconstruction diagrams of sandstone after creep test under the hydraulic gradient of 120 MPa/m**

图 13(c)为三维重构图，主裂纹 1# 倾斜由砂岩上端面延伸至下端面，贯穿整个砂岩试样，在内部形成一条沿着对角线倾斜扩展的破坏主裂纹面。在 1# 主裂纹上方和下方岩块中分别倾斜分布着 2# 和 3# 主裂纹，2# 和 3# 主裂纹分别与 1# 主裂纹相互交叉，分布特征与图 13(a)和图 13(b)中的裂纹分布一致，在 3 条主裂纹共同作用下砂岩发生破坏。3 条

主裂纹面近似为平面,根据三维重构图中内部裂纹在空间中的分布状态可知,砂岩试样的破坏形式属于“X”形共轭斜面剪切破坏。在砂岩上半部分同时还存在多条次生裂纹,次生裂纹与主裂纹连接,在空间上形成复杂的裂纹网络,表明砂岩加载端的破坏更严重。

## 5 结论

以砂岩为试验对象,采用渗流-应力耦合伺服控制加载试验系统,开展渗流-应力耦合作用下的蠕变试验,探究砂岩和蠕变特性损伤特征,主要结论如下。

(1) 低水力梯度下,蠕变稳定,位移云图变化不明显,砂岩表面变形较小;高水力梯度下,砂岩发生蠕变破坏,云图中出现应变局部化特征,形成倾斜局部破坏带;水力梯度越大,云图变化越明显,较大应变点出现的速率越大。蠕变破坏时,相较于轴向应变云图,径向应变云图中更早地出现较大应变点萌生、集中、贯通现象。

(2) 砂岩的应力、应变演化规律反映出蠕变特性。轴向和径向应变增量随着蠕变的进行不断增大;相同流变时间内,水力梯度越大,砂岩产生的应变变化量越大,内部损伤积累越多,表面变形越明显,蠕变寿命越短;随着水力梯度的增大,砂岩在蠕变稳定阶段的应变变化速率增大。局部破坏带内外应变增量演化曲线表明,蠕变前期砂岩破坏带内外的应变曲线较为一致,随着蠕变的进行,各曲线之间差异增大,破坏带内应变变化量大于整体应变变化量,破坏带外的应变变化量最小。

(3) 较低水力梯度时,蠕变前期,裂纹减小量大于增加量,表现为流量不断减小,内部结构不断调整,达到平衡时流量值保持稳定。90 MPa/m 水力梯度下,蠕变前期,裂纹减小量小于增加量,表现为流量增加,内部结构不断调整,流量开始缓慢减小。高水力梯度下,渗流水对内部结构的弱化作用更大,产生的孔隙水压更大,产生的损伤不断积累,使得流量值在蠕变整个过程中不断增加。

(4) 通过 CT 扫描图可知,蠕变破坏时,砂岩内部 3 条主裂纹贯通整个试样,引导试样发生“X”形共轭斜面剪切破坏,同时衍生出多条次生裂纹,促进裂纹的扩展。靠近砂岩的加载端,施加的渗透水压更大,砂岩上半部分衍生出的次生裂纹更多,裂纹分布的范围更广,形成了复杂的裂纹网络结构。

**参考文献**(References):


[1] 张农,许兴亮,李桂臣,等.巷道围岩裂隙演化规律及渗流灾害控制[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):330-335.
ZHANG Nong, XU Xingliang, LI Guichen, et al. Fissuer-evolving laws of surrounding rock mass of roadway and control of seepage disasters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(2):330-335.

[2] 杨天鸿,唐春安,谭志宏,等.岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):268-277.
YANG Tianhong, TANG Chun'an, TAN Zhihong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(2):268-277.

[3] IVERSON R M. Landslide triggering by rain infiltration[J]. Water Resources Research,2000,36(7):1897-1910.

[4] 范秋雁,张波,李先,等.不同膨胀状态下膨胀岩剪切蠕变试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊 2):3734-3746.
FAN Qiuyan, ZHANG Bo, LI Xian, et al. Experimental research on shear creep properties of a swelling rock under different expansive states [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(Suppl.2):3734-3746.

[5] 巫德斌,徐卫亚,朱珍德,等.泥板岩流变试验与粘弹性本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1242-1246.
WU Debin, XU Weiya, ZHU Zhende, et al. Study on rheological test and viscoelastical constitutive model for shale [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(8):1242-1246.

[6] 李化敏,李振华,苏承东,等.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 Huamin, LI Zhenhua, SU Chengdong, et al. Testing study on creep characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3745-3749.

[7] 张玉,徐卫亚,邵建富,等.渗流-应力耦合作用下碎屑岩流变特性和渗透演化机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1679-1690.
ZHANG Yu, XU Weiya, SHAO Jianfu, et al. Experimental investigation on rheological properties and permeability of clastic rock under hydro-mechanical coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(8):1679-1690.

[8] 蔡燕燕,孙启超,俞缙,等.蠕变作用后大理岩强度与变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(11):2767-2777.

CAI Yanyan, SUN Qichao, YU Jin, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of marble after creep[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(11):2767-2777.

[9] 辛亚军,李梦远.岩石分级加载蠕变的能量耗散与变形机制研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):2883-2897.
XIN Yajun, LI Mengyuan. Study on deformation mechanism and energy dissipation of rock creep under step loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(Suppl.1):2883-2897.

[10] 陈文玲,赵法锁,弓虎军.基于微观试验的云母石英片岩蠕变损伤变量研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(增刊1):2661-2666.
CHEN Wenling, ZHAO Fasuo, GONG Hujun. Study of creep damage variable of mica-quartzose schist based on microscopic test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(Suppl.1):2661-2666.

[11] 陈卫忠,王者超,伍国军,等.盐岩非线性蠕变损伤本构模型及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(3):467-472.
CHEN Weizhong, WANG Zhechao, WU Guojun, et al. Nonlinear creep damage constitutive model of rock salt and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(3):467-472.

[12] 朱昌星,阮怀宁,朱珍德,等.岩石非线性蠕变损伤模型的研究[J].岩土工程学报,2008,30(10):1510-1513.
ZHU Changxing, RUAN Huaining, ZHU Zhende, et al. A study of the nonlinear rheological damage model for rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(10):1510-1513.

[13] 韦立德,杨春和,徐卫亚,等.基于细观力学的盐岩蠕变损伤本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4253-4258.
WEI Lide, YANG Chunhe, XU Weiya, et al. Study on creep damage constitutive model of salt rock based on mesomechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(23):4253-4258.

[14] 曹文贵,李翔,刘峰,等.裂隙化岩体应变软化损伤本构模型探讨[J].岩石力学与工程学报,2007,26(12):2488-2494.
CAO Wengui, LI Xiang, LIU Feng, et al. Discussion on strain softening damage constitutive model for fissured rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(12):2488-2494.

[15] LI Y S, XIA C C. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3):467-475.

[16] ZHANG Y, SHAO J F, XU W Y, et al. Time-dependent behavior of cataclastic rocks in a multi-loading triaxial creep test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9):3793-3803.

[17] 陆银龙.渗流-应力耦合作用下岩石损伤破裂演化模型及其应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2015.
LU Yinlong. Rock damage and fracture evolution model and its application under coupling of seepage and stress[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2015.

[18] 李根,唐春安,李连崇,等.水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J].力学进展,2012,42(5):593-619.
LI Gen, TANG Chun'an, LI Lianchong, et al. Advances in rock deformation and failure process under water-rock coupling[J]. Advances in Mechanics,2012,42(5):593-619.

[19] 许江,王晓震,张倩文,等.不同含水状态凝灰岩损伤演化试验研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(6):1189-1197+1209.
XU Jiang, WANG Xiaozhen, ZHANG Qianwen, et al. Experimental study on damage evolution of tuff under different moisture states[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2021,38(6):1189-1197+1209.

[20] JI M, ZHANG N, GAO F. Damage evolution analysis of calcareous mudstone with different water content under uniaxial compression [J]. Advanced Materials Research, 2011,168:1388-1395.

[21] 彭守建,张倩文,许江,等.基于三维数字图像相关技术的砂岩渗流-应力耦合变形局部化特性试验研究[J].岩土力学,2022,43(5):1197-1206.
PENG Shoujian, ZHANG Qianwen, XU Jiang, et al. Experimental study of deformation localization characteristics of sandstone under seepage-stress coupling based on 3D digital image correlation technology[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(5):1197-1206.

[22] XIAO W J, ZHANG D M, WANG X J. Experimental study on progressive failure process and permeability characteristics of red sandstone under seepage pressure[J]. Engineering Geology,2020,265:105406.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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):2095-2103.
YAN Yan, WANG Enzhi, WANG Sijing, et al. Study of seepage-rheology coupling experiment of rocks[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(7):2095-2103.

[26] 杨红伟,许江,聂闻,等.渗流水压力分级加载岩石蠕变特性研究[J].岩土工程学报,2015,37(9):1613-1619.
YANG Hongwei, XU Jiang, NIE Wen, et al. Experimental study on creep of rocks under step loading of seepage pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(9):1613-1619.

[27] 大久保诚介,汤杨,许江,等.可视化三轴压缩伺服控制试验系统的改进和应用[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊1):238-245.
OKUBO Seisuke, TANG Yang, XU Jiang, et al. Improvement and application of transparent triaxial compression servo-control test system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(Suppl.1):238-245.

[28] International Society for Rock Mechanics. Suggested methods for determiningthe strength of rock material in triaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978,15(2):47-51.

[29] KIM K, FRANKLIN J A, BOWLING A J. International society for rock mechanics commission on testing methods [J]. Intcrnational Society for Rock Mechanics,1999,24(1): 279-289.

[30] YANG C H, DAEMEN J J K, YIN J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36 (2):233-242.