



中文核心期刊  
中科院双效期刊  
Caj-cd规范获奖期刊

CSCD核心期刊  
中国科技核心期刊

## 温度-渗流耦合作用下砂岩卸荷蠕变试验研究

梁金平, 张振铎, 李小瑞, 荆浩勇, 侯公羽, 苏占东, 张明磊, 张建勇

### Experimental study on unloading creep of sandstone under temperature-seepage coupling conditions

LIANG Jinping, ZHANG Zhenduo, LI Xiaorui, JING Haoyong, HOU Gongyu, SU Zhandong, ZHANG Minglei, and ZHANG Jianyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311057>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 红层砂岩高温后效蠕变试验研究

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature

李畅, 任光明, 孟陆波, 代晗, 张晓东, 李科 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 71–71

#### 典型黄土滑坡滑带土不同含水率下蠕变特性试验研究

An experimental study of the creep characteristics of loess landslide sliding zone soil with different water content

王新刚, 刘凯, 王友林, 张培栋, 石卫, 罗力 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 137–143

#### 桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

杨卫波, 张来军, 汪峰 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 176–185

#### 基于断裂及高温损伤的岩石蠕变模型研究

A study of the creep model of rock considering fractures and thermal damage

李修磊, 李起伟, 李倩 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 46–56

#### 西藏贡觉粉砂质泥岩工程地质特性与蠕变强度研究

Engineering geology properties and creeping strength characteristics of the silty mudstone in Gongjue County in Tibet of China

郭长宝, 王磊, 李任杰, 吉锋, 王炀, 严孝海, 刘贵 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 54–64

#### 非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建炳, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67–73



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311057](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311057)

梁金平, 张振铎, 李小瑞, 等. 温度-渗流耦合作用下砂岩卸荷蠕变试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 105-113.  
LIANG Jinping, ZHANG Zhenduo, LI Xiaorui, et al. Experimental study on unloading creep of sandstone under temperature-seepage coupling conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 105-113.

## 温度-渗流耦合作用下砂岩卸荷蠕变试验研究

梁金平<sup>1,2</sup>, 张振铎<sup>3</sup>, 李小瑞<sup>1,2</sup>, 荆浩勇<sup>4</sup>, 侯公羽<sup>5</sup>, 苏占东<sup>1,2</sup>, 张明磊<sup>1,2</sup>, 张建勇<sup>1,2</sup>

(1. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北 三河 065201; 3. 北京住总置地有限公司, 北京 100010; 4. 国家管网集团技术创新有限公司, 天津 300450; 5. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 巷道/隧道开挖后环境因素(温度、水)及耦合作用会改变围岩的卸荷蠕变性质, 从而对围岩稳定及施工现场的安全维护产生威胁。为研究温度、渗流水及耦合作用对砂岩卸荷蠕变特性的影响, 采用自主设计的温度控制系统和改良的孔隙水传导试件密封装置, 开展了砂岩试件( $\varphi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ )三轴卸荷蠕变试验。研究发现: (1)在卸围压后的 300 min 蠕变时长内, 轴向压缩及径向扩容蠕变速度先逐渐增加后放缓, 以径向蠕变为主。(2)温度降低( $65^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C}$ )最终会导致干燥及饱和试件的轴向蠕变量增加, 而径向蠕变量减小。(3)随着渗流水压增加, 轴向蠕变量减小, 渗流水压增加对开挖后轴向蠕变起到抑制作用; 而径向蠕变量显著增加, 扩容现象明显, 渗流水压增加对径向蠕变起到促进作用。(4)随着渗流水压增加, 轴向卸荷蠕变速率减小, 径向卸荷蠕变速率增大。温度-渗流耦合作用下, 卸荷蠕变速率曲线分为衰减阶段和稳定阶段, 衰减阶段变形量占主导地位。径向蠕变速率高于轴向, 且径向蠕变速率的波动幅度较小, 趋于稳定的速度更快。研究结果可为深部地下工程围岩稳定评价提供参考。

**关键词:** 开挖卸荷; 温度; 渗流; 蠕变特性

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0105-09

## Experimental study on unloading creep of sandstone under temperature-seepage coupling conditions

LIANG Jinping<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhenduo<sup>3</sup>, LI Xiaorui<sup>1,2</sup>, JING Haoyong<sup>4</sup>, HOU Gongyu<sup>5</sup>, SU Zhandong<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Minglei<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianyong<sup>1,2</sup>

(1. College of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201, China;  
2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe, Hebei 065201, China; 3. Beijing UNI-construction Group, Beijing 100010, China; 4. Pipe China Engineering Technology Innovation Co. Ltd., Tianjin 300450, China; 5. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** Environmental factors (such as temperature and water) and their coupling effects will change the unloading creep properties of surrounding rock after tunnel excavation, threatening the stability of surrounding rock and the safety maintenance of construction sites. To analyze the effects of temperature, seepage flow, and their coupling on the creep characteristics of sandstone unloading, the triaxial unloading creep test was carried out

收稿日期: 2023-11-29; 修订日期: 2024-05-10

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(ZY20230208); 廊坊市科技支撑计划项目(2023013199)

第一作者: 梁金平(1993—), 女, 博士, 讲师, 主要从事地下空间工程及岩石力学方面的教学及研究工作。E-mail: [mlkageljp@163.com](mailto:mlkageljp@163.com)

on the sandstone specimen ( $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ) by using the self-designed temperature control system and the improved pore water conduction specimen sealing device. The results show that during the creep time of 300 min after unloading the confining stress, the axial compression and radial expansion creep speed increase gradually and then slow down. The strain is mainly radial creep. The decrease in temperature leads to the increase in axial creep deformation and the decrease in radial creep deformation of the dry and saturated specimens. With the increase in seepage water pressure, the axial strain reduces, and the seepage water pressure suppresses the axial creep deformation, while the radial strain increases significantly, and the expansion phenomenon is obvious. Seepage water pressure promotes radial creep deformation. With the increase of seepage water pressure, the axial unloading creep rate decreases and the radial unloading creep rate increases. Under the coupling effect of temperature and seepage, the creep rate curve of unloading is divided into the attenuation stage and the stable stage, and the deformation in the attenuation stage is dominant. The radial creep rate is higher than the axial creep rate, and the fluctuation amplitude of the radial creep rate is small, which reaches stability fast. This study can provide scientific information for the stability evaluation of surrounding rock in deep underground engineering.

**Keywords:** excavation unloading; temperature; seepage; creep deformation characteristics

深部高温巷道/隧道工程的开挖,往往伴随着围岩应力场、渗流场及温度场的改变<sup>[1]</sup>,会严重影响开挖后围岩的卸荷蠕变性质,从而对围岩稳定及施工现场的安全维护产生威胁。其中,渗流作用在水利、采矿、边坡等岩石工程中普遍存在,越来越受到专家学者们的重视<sup>[2~4]</sup>,是各工程必须研究和解决的问题。由于其深藏地下,没有确定的手段可以准确预测地下水,所以往往工程设计中的重点与难点都与地下水影响有关。此外,深部工程岩体所处的环境温度较高,开挖后产生的温降也会对岩石蠕变特性有重大影响<sup>[5~9]</sup>。温度降低会导致岩石收缩,内部微观孔隙容积减小,同时水的体积也由于温度降低而减小,两者的相互关系需经试验考证。不同温度下水的黏度、热膨胀系数、密度均不同,使岩石性质与恒温、常温状态相比更复杂多变。因此,有必要对温度、渗流、应力及耦合作用下岩体蠕变特性及蠕变模型进行深入研究。

目前,很多学者对加载条件下温度、渗流、应力及其耦合作用岩石的蠕变特性及本构模型进行室内试验<sup>[10~14]</sup>、理论分析<sup>[15~16]</sup>或数值模拟<sup>[17]</sup>等研究。其中,陈卫忠等<sup>[11]</sup>使用常规三轴试样,开展不同温度与压力下的渗透试验、三轴压缩及蠕变试验,研究了温度作用下试样的强度、渗透性、蠕变性等特征。Liang 等<sup>[12]</sup>开展了盐岩高温三轴蠕变试验,发现随着温度的升高,累积平均体积应变增大。江宗斌等<sup>[14]</sup>开展石英岩蠕变-渗流耦合试验,研究循环加卸载条件下岩石的蠕变规律及渗透规律,获得了石灰岩体积应变与渗透率之间的关系。Tang 等<sup>[15]</sup>和 Lyu 等<sup>[16]</sup>将损伤的非线性黏壶引入到蠕变加速阶段,建立了基于分数阶理论

的盐岩非线性蠕变模型。

实际上,岩石地下工程的开挖,是岩体在某一个方向应力或应变逐渐卸除的过程<sup>[18]</sup>。为此,朱杰兵等<sup>[19]</sup>开展了岩石三轴卸荷流变试验,获得了砂岩及页岩的卸荷流变特性。黄兴等<sup>[20]</sup>开展了三轴卸荷条件下,泥质砂岩逐级卸荷压的蠕变试验研究,并获得卸荷后轴向、侧向及体积蠕变规律。侯会明等<sup>[21]</sup>考虑了因开挖卸荷导致围岩产生的损伤,建立了围岩损伤与温度-渗流-应力之间的联系。尽管,对岩石的卸荷蠕变规律、损伤破坏特征及本构关系研究方面取得了一些成果,但针对不同因素及耦合作用对岩体蠕变影响的研究较少,有待进一步研究。

基于上述分析,本文对岩石三轴试验系统进行改造,增加了温度控制系统并改良孔隙水传导密封装置,开展了温度、渗流水及耦合作用下砂岩卸荷蠕变试验。重点研究卸荷结束后,应力场、渗流场及温度场变化及耦合作用对砂岩卸荷蠕变的影响。

## 1 试验与模拟方法

试验系统由 SAM-3000 型微机控制电液伺服试验系统、水压加载控制系统与温控系统 3 部分组成。

### 1.1 试验装置

SAM-3000 型微机控制电液伺服岩石三轴试验系统如图 1 所示。该系统的轴向加载力最大值为 3 000 kN,围压最高可达 100 MPa,精度为 0.01 MPa。加载方式可分为应力控制与位移控制 2 种,其中应力控制精度为 0.01 MPa/s,位移控制精度为 0.001 mm/min<sup>[22]</sup>。

水压加载控制系统主要由供水系统、增压油缸、

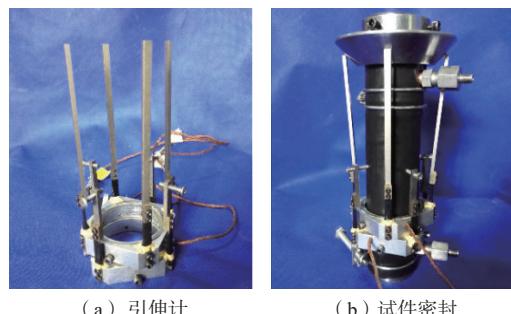


(a) 三轴试验系统 (b) 水压加载控制系统

图 1 三轴试验系统及水压加载控制系统

Fig. 1 Triaxial testing and water pressure loading control system

伺服电机、输水管线等模块组成,由微机客户端软件通过伺服电机控制,最大可以提供 40 MPa 的孔隙水压,控制精度为 0.01 MPa。密封装置(图 2)由引伸计、不锈钢渗流专用压头(图 3)、带热熔胶的热缩管、不锈钢箍组成,保证试件在水源充足的情况下能够长时间保持稳定。



(a) 引伸计 (b) 试件密封

图 2 试件密封图

Fig. 2 Specimen seal diagram



图 3 渗流专用压头

Fig. 3 Special indenter for seepage

温度控制系统包括加热装置和冷却装置,如图 4 所示。加热装置原理是在压力腔外部的加热线圈中通入交变电流,交变磁场的磁力线通过金属腔体产生涡流,使得金属油缸温度升高,通过热传递方式将液压油加热至设定温度,并最终将岩石试件加热至设定温

度。加热装置可将内部液压硅油温度加热至 250 °C,其控制精度为 0.1 °C。冷却装置是通过在压力腔外部缠绕冷凝水管与散热片来控制温度下降。经实际测量,冷却装置可以使温度下降的速率增加 60%,能够满足温度从 65 °C 下降到 30 °C 的试验要求。



(a) 加热装置 (b) 冷却装置

图 4 温度控制系统

Fig. 4 Temperature control system

## 1.2 试样制备

试验使用的砂岩取样地层为四川盆地地区三叠系,采用机床精加工成标准岩芯试件( $\varphi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ),如图 5 所示。岩样制备标准及加工精度符合《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)<sup>[23]</sup>。砂岩试件密度约为  $2550 \text{ kg/m}^3$ ,基本力学参数见表 1。



图 5 砂岩试样

Fig. 5 Sandstone rock specimens

表 1 砂岩基本力学参数

Table 1 Basic mechanical parameters of sandstone

参数	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	泊松比	弹性模量 /GPa	单轴抗压强度 /MPa
取值	20.27	28	0.25	31.2	47.99

将砂岩试件分为 7 组,编号为试验 1—7,每组 3 个试件,剩下的试件留作备用。其中,研究温度及饱和水分别对蠕变的影响试验共 3 组,研究不同渗流水压对蠕变的影响共 3 组,剩下 1 组研究温度变化造成的金属传感器变形,来修正其对实验数据产生的影响。

## 1.3 试验方案

试验模拟地下埋深 1 000 m 处的砂岩巷道开挖,温度约为 65 °C,考虑应力重分布并选取 30 MPa 作为

试验初始应力进行卸荷。巷道开挖后, 使用通风设备的情况下, 温度约为 30 °C, 故选取温度由 65 °C 下降至 30 °C 的过程进行试验。

为避免渗流水溢出进入油缸, 必须保证外围压大于渗流水压, 故试验选择卸荷至 5 MPa。为使试验结果更加清晰, 设置渗流水压分别为 0, 2, 4 MPa。1 MPa 对试验的影响较小, 不同水压差异不显著, 且其影响趋势也可从无压渗流与渗流水压 2 MPa 的试验对比中推断而来, 因此不进行 1 MPa 水压渗流试验。具体试验方案详见表 2。

表 2 试验方案表  
Table 2 Test schedule

试验名称	轴压/MPa	围压/MPa	渗流水压/MPa	温度/°C
试验1	30	30→5	干燥	65
试验2	30	30→5	干燥	65→30
试验3	30	30→5	0(饱和水)	65→30
试验4	30	30→5	2	65→30
试验5	30	30→5	4	65→30
试验6	30	30→5	0(饱和水)	65
试验7	—	30→5	—	65→30

注: —表示无。

蠕变试验的应力加载路径如图 6, 试验全过程温度变化曲线如图 7。试验过程如下:

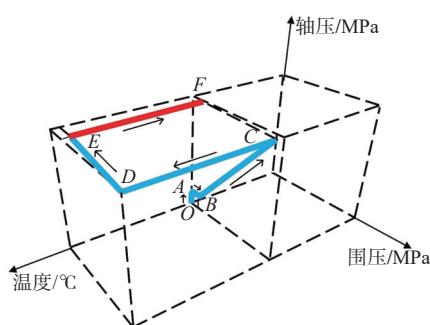


图 6 应力路径图  
Fig. 6 Stress path diagram

(1) 准备阶段: 轴向初始加压 3 MPa, 加载速度为 1 mm/min, 即点 A; 围压加至 3 MPa, 加载速度 0.1 MPa/s, 即点 B; 渗流系统在管道排出空气后, 初始水压加载到 0.5 MPa, 加载速度 0.05 MPa/s。

(2) 加载阶段: 首先, 进行轴压与围压的同步加载至 30 MPa, 速度均为 0.1 MPa/s, 油压做功, 温度升高 4 °C, 即点 C; 其次, 开启油缸外部的电磁加热装置开始加热油缸, 加热速度大约为 1 °C/min, 待所有参数均达到设定值, 即点 D; 维持现有状态 30 min, 试验各个部分均进入稳定阶段。

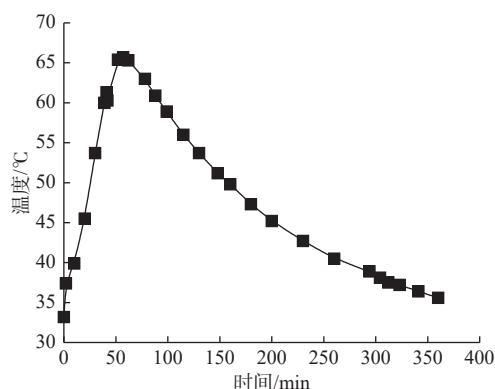


图 7 试验全程温度变化曲线

Fig. 7 Temperature change during the whole testing

(3) 卸荷阶段: 关闭电磁加热装置, 开启制冷装置, 控制降温速度为 0.1 °C/min。与此同时, 以 0.5 MPa/s 的速率将围压卸至 5 MPa, 液压油对外做工, 温度降低 4 °C, 即点 E。卸荷后维持轴压、围压与渗流水压不变, 直到油缸 300 min 后温度降至 30 °C, 即点 F, 停止试验, 此阶段为试验主要观测段。

应当指出, 由于传感器属于金属制品, 热膨胀系数约为  $1.6 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , 受温度影响会产生变形, 需修正其对实验数据的影响。因此, 设计试验 7, 不装载试件, 仅放置传感器于试验油缸中加热, 获得 4 组测试值 941  $\mu\epsilon$ 、902  $\mu\epsilon$ 、933  $\mu\epsilon$ 、928  $\mu\epsilon$ , 取平均值 926  $\mu\epsilon$  来降低引伸计测试误差, 所有降温试验的结果均应减去这个平均值, 最终获得砂岩试件的蠕变试验数据。如图 8 所示为引伸计构造, 其中 S 为试件, AB 为变形前的测量端,  $AB'$  为缩短后的测量端, Y 为引伸计测量所用应变片。当温度下降时, 引伸计的测量端缩短, 使得测量端与试件母线的夹角减小, 导致测量结果偏小。由于测量端  $AB$  或  $AB'$  与水平面夹角接近 90°, 且测量端缩短后  $\angle BAB' \approx 0^\circ$ , 故可认为测量端的缩短值, 即为试件母线长度的增加值。

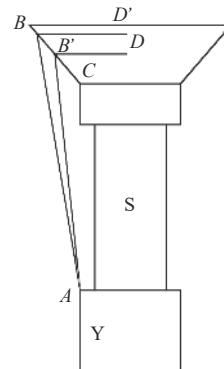


图 8 引伸计构造示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the extensometer construction

## 2 温度、饱和水对砂岩卸荷蠕变的影响

### 2.1 试验全程变形特征

以渗流水压为2 MPa的全过程应变-时间变化试验曲线及应力-应变曲线为例进行展示,如图9、图10所示。

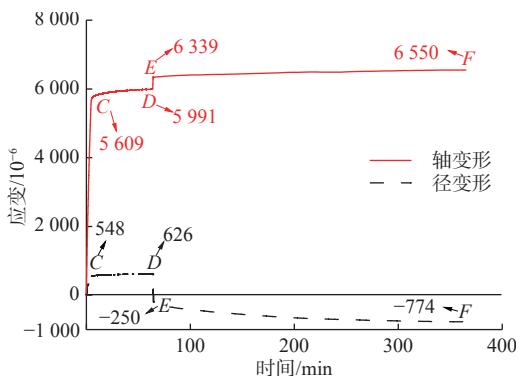


图9 试验全程卸荷时间-应变曲线

Fig. 9 Unloading time-strain curve in the whole testing process

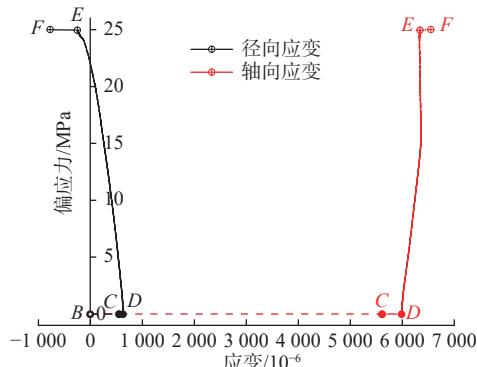


图10 应力-应变曲线

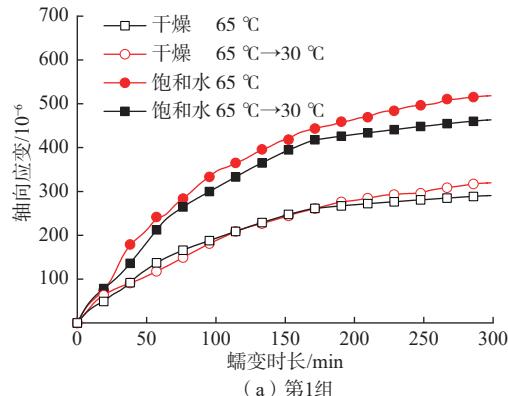
Fig. 10 Stress-strain curves

其中,以预加载完成点B为起始点;BC段为轴压及围压同时加载阶段,试件整体压密,变形快速增加,轴向应变量达到5609  $\mu\epsilon$ ,径向应变量达到548  $\mu\epsilon$ ,轴向产生的应变量为径向应变量的10倍;CD段为加热升温阶段,试件在压密及高温作用下,试件内部结构更加致密,变形持续增加;DE段为卸围压阶段,侧向约束力降低,轴向呈现压缩状态,而径向由受压状态快速朝受拉扩容状态转化;EF段为卸荷后蠕变阶段,为本试验主要研究阶段。

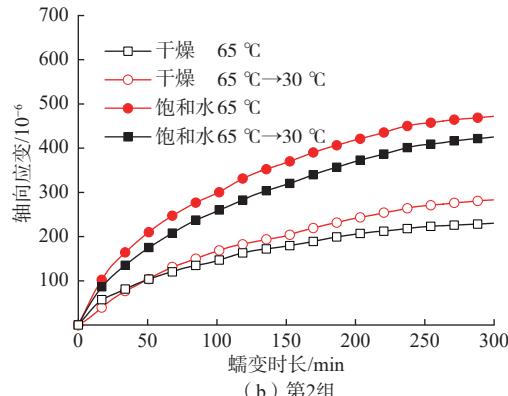
### 2.2 温度、饱和水对卸荷蠕变的影响

剔除数据奇异的试样,取相同试验中2组具有代表性的数据进行分析。由于卸荷后蠕变量相对于加压与卸荷阶段的变形量来说变化相当小,为体现其特

征,故将EF段独立成图,如图11、图12所示。图11和图12分别展示了温度、饱和水对砂岩试件轴向蠕变及径向蠕变规律的影响。



(a) 第1组



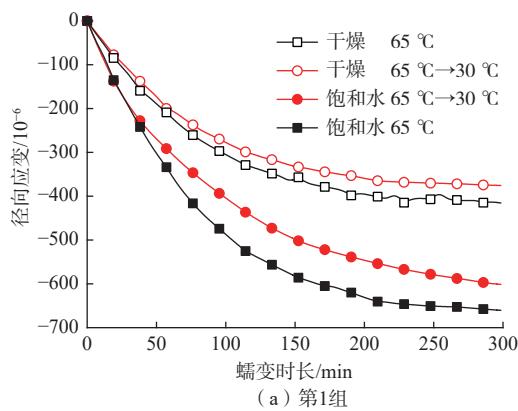
(b) 第2组

图11 温度和饱和水对试件轴向蠕变的影响

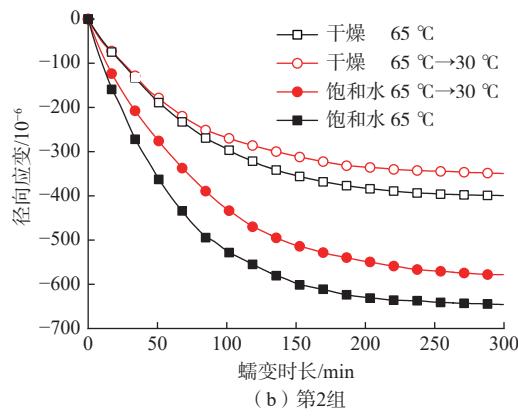
Fig. 11 Effects of temperature and saturated water on axial creep of specimens

由图11可知,对于干燥试件,未降温和降温和轴向蠕变曲线在蠕变前期产生交点,随后降温和轴向蠕变曲线居于上方,随着蠕变时长的增加,蠕变增量越来越大。对于饱和试件,从蠕变初始至结束,降温和轴向蠕变曲线始终居于未降温和轴向蠕变曲线的上方,随着蠕变时长的增加,蠕变增量越来越大,且高于干燥试件因温度降低而产生的轴向蠕变增量。此外,温度相同情况下的饱水试件轴向蠕变增量值明显高于干燥试件的轴向蠕变增量。这表明,温度降低会促进轴向蠕变的增加,但其影响显著低于水对轴向蠕变的影响。

由图12可知,对于干燥试件及饱和试件,从蠕变初始至结束,降温和径向蠕变曲线始终居于未降温和径向蠕变曲线的上方,产生明显的蠕变量差值,且随着蠕变时长的增加,蠕变量差值越来越大。此外,温度相同情况下的饱水试件径向蠕变增量值明显高于干燥试件的径向蠕变增量。这表明,温度降低导致试件



(a) 第1组



(b) 第2组

图 12 温度和饱和水对试件径向蠕变的影响

Fig. 12 Effect of temperature and saturated water on radial creep of specimens

径向蠕变量减小, 其中, 温度降低对饱水试件径向蠕变的影响更为显著, 但温度变化对径向蠕变的影响显著低于水对径向蠕变的影响。

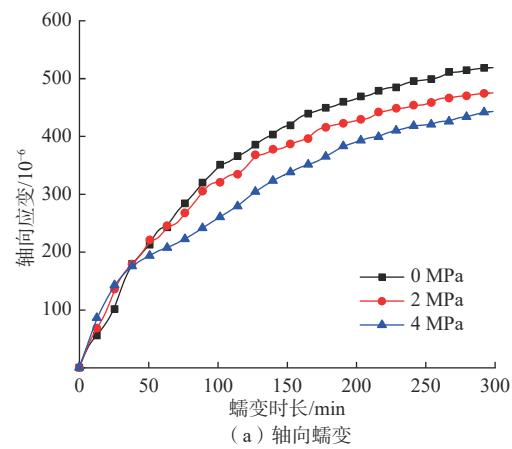
在相同试验条件下, 温度、饱和水变化对砂岩试件轴向及径向蠕变影响显著: (1)开挖造成的温度降低会导致卸荷后试件轴向蠕变增加, 在饱水试件中表现更为明显; 而温度降低会导致卸荷后试件径向蠕变减小, 在干燥试件中表现更为明显。(2)试件饱水后, 轴向及径向蠕变量均比同等条件下干燥试件蠕变量高, 且水对蠕变的影响更显著。

### 3 温度作用下渗流水压对卸荷蠕变的影响

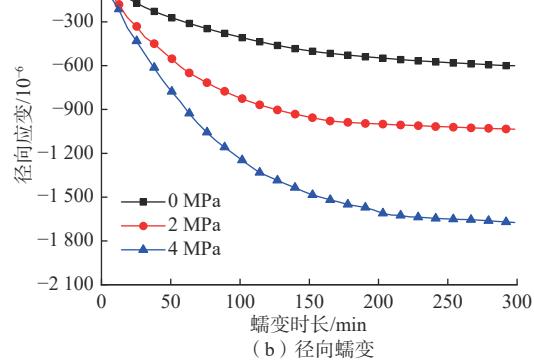
#### 3.1 渗流水压对卸荷蠕变的影响

图 13 是温度变化(65 °C→30 °C)作用下渗流水压对砂岩试件轴向及径向蠕变影响的试验结果。在主应力差恒定后蠕变持续增加, 但速度逐渐放缓, 径向最终卸荷蠕变量高于轴向。

如图 14 所示, 随着渗流水压的增大, 试件蠕变增加, 径向扩容现象极为明显, 且蠕变增量大于轴向。



(a) 轴向蠕变



(b) 径向蠕变

图 13 温度作用下渗流水压对轴向、径向蠕变的影响

Fig. 13 Effect of seepage water pressure on axial and radial creep under the action of temperature

孔隙水压力的增加, 使得试件轴向蠕变减小、径向蠕变显著增加。其中, 渗流水压从 0 增加至 2 MPa, 轴向蠕变减小约 8.6%, 径向蠕变增加约 72%; 渗流水压从 2 MPa 增加至 4 MPa, 轴向蠕变减小约 6.6%, 径向蠕变增加约 62%。分析获得, 渗流水压对砂岩试件轴向及径向蠕变规律影响为: 随着渗透水压的增大, 轴向蠕

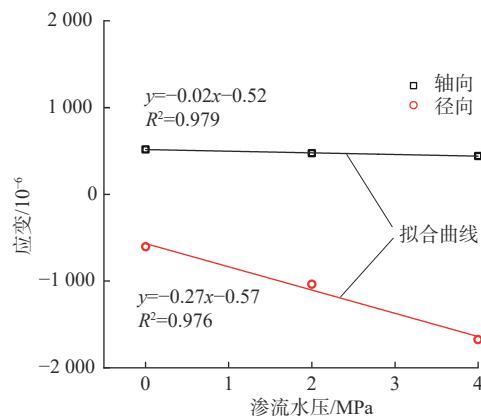


图 14 温度作用下渗流水压对卸荷蠕变的影响

Fig. 14 Effect of seepage water pressure on unloading creep under the action of temperature

变量减小,渗透水压对轴向蠕变起抑制作用;而径向应变量显著增加,渗流水压对径向蠕变起促进作用。

分析认为,保持轴向压力不变,卸围压会导致轴向压缩和径向扩容。渗流水的存在,会在岩石内部的孔隙空间内(连通孔隙及喉道)产生一个轴向方向的抵抗力,渗流水压增大,这个抵抗作用加强。这也解释了本文中渗流水压逐渐增加至4 MPa,轴向变形减小的现象。另外,试件横向也存在孔隙水压,会促进因卸荷作用导致的径向扩容。因此,随着渗流水压逐渐增加至4 MPa,径向变形增加。

### 3.2 渗流水压对卸荷蠕变速率的影响

图15是温度变化( $65^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}$ )作用下渗流水压对砂岩试件轴向及径向蠕变速率的影响曲线。在卸荷后300 min的蠕变时长内,不同情况下试件轴向、径向蠕变速率随时间变化曲线明显分为2个阶段:衰减阶段和稳定阶段。衰减阶段,蠕变快速增加,蠕变速率较高并很快减小,最后达到稳定,稳定后轴向及径向蠕变速率均趋于0。

轴向蠕变速率随着渗透水压的增加而减小,且在

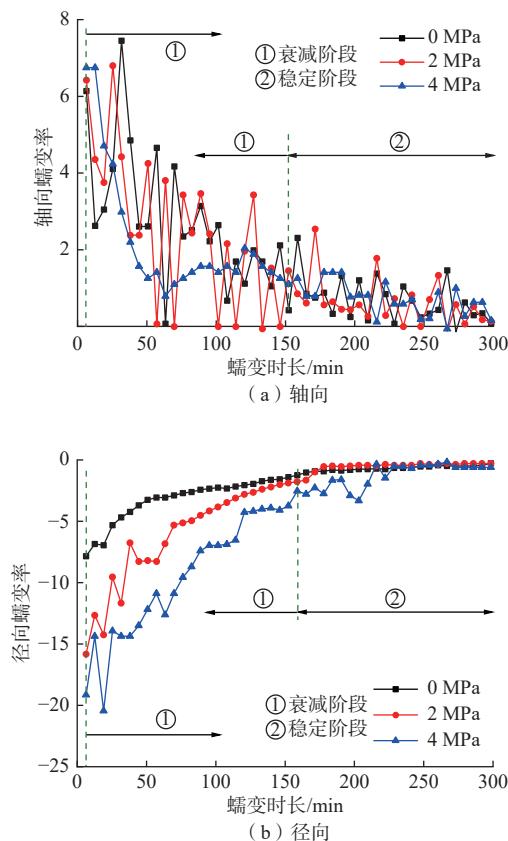


图15 温度作用下渗流水压对蠕变速率的影响

Fig. 15 Effect of seepage water pressure on creep rate under the action of temperature

较大变化幅度范围内逐渐波动减小后进入稳定阶段。注意到在蠕变初始阶段,当渗流水压4 MPa时,初始轴向蠕变速率最高,且波动幅度较小。分析认为在轴向力及较大水压力的协同作用下,砂岩内部孔隙体积快速压缩减小,渗水通道体积数量都减小,蠕变更快趋于稳定。与轴向相比,径向蠕变速率更大,且径向蠕变速率随着渗流水压增加而增大,波动幅度较小,衰减阶段蠕变速率曲线的斜率降低,径向蠕变速率相对平稳降低,趋于稳定的速度快。

本次试验测得的蠕变衰减阶段时长约为150 min,但其变形量能占到卸荷后蠕变总量的65%以上,即衰减阶段的蠕变量非常可观。故在实际含水地下工程开挖卸荷后一段时间内,应当特别注意围岩的及时反应,因为此时段正处于围岩卸荷后的蠕变衰减阶段,变形速率很高,变形量很大,加上温度变化对围岩变形的影响,必须要在充分发挥围岩自承能力的同时,考虑采取相应支护手段,及时对围岩进行有效支护,以确保施工安全。另外,应当注意,随着渗流水压的增加,蠕变速率并非线性增加,在较大的渗流水压作用下,蠕变变形更大。

## 4 结论

(1)主应力差恒定后的300 min内,蠕变(轴向压缩、径向扩容)持续增加,但速度逐渐放缓,径向最终产生的蠕变量高于轴向,即以径向蠕变为主。

(2)温度、饱和水对砂岩试件轴向及径向蠕变的影响为:试件饱水后,轴向及径向蠕变量均显著高于同等条件下干燥试件产生的蠕变量;温度降低会导致卸荷后轴向蠕变增加,而径向蠕变减小。

(3)渗流水压从0增加至2 MPa,轴向蠕变减小约8.6%,径向蠕变增加约72%;渗流水压从2 MPa增加至4 MPa,轴向蠕变减小约6.6%,径向蠕变增加约62%。即,渗透水压抑制轴向蠕变,而促进径向蠕变。

(4)随渗流水压增加,轴向蠕变速率减小,径向蠕变速率增大。径向蠕变速率均比轴向大,且径向蠕变速率的波动幅度较小,趋于稳定阶段速度更快。温度-渗流耦合作用下,轴向及径向卸荷蠕变速率的变化明显分为2个阶段:衰减阶段和稳定阶段。

## 参考文献 (References) :

- [1] 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,2000. [SUN Jun. Rheology of geotechnical materials and their engineering applications [M]. Beijing:

- China Architecture and Building Press, 2000. (in Chinese) ]
- [ 2 ] 张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 等. 渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 41 – 47. [ ZHANG Xiaoyu, BI Huanjun, CAO Feng, et al. Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 41 – 47. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 何峰, 李彬, 王振伟, 等. 煤岩渗流-蠕变耦合试验研究 [J]. 金属矿山, 2016(8): 63 – 68. [ HE Feng, LI Bin, WANG Zhenwei, et al. Experimental study on seepage-creep coupling of coal rock[J]. Metal Mine, 2016(8): 63 – 68. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] ZHAO Zhihong. Thermal influence on mechanical properties of granite: A microcracking perspective[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 747 – 762.
- [ 6 ] 宋勇军, 孟凡栋, 毕冉, 等. 冻融岩石蠕变特性及孔隙结构演化特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 69 – 79. [ SONG Yongjun, MENG Fandong, BI Ran, et al. Research on creep characteristics and pore structure evolution characteristics of freezing-thawing rocks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 69 – 79. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 张强勇, 张龙云, 向文, 等. 考虑温度效应的片麻状花岗岩三轴蠕变试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2507 – 2514. [ ZHANG Qiangyong, ZHANG Longyun, XIANG Wen, et al. Triaxial creep test of gneissic granite considering thermal effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2507 – 2514. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 蔡婷婷, 冯增朝, 姜玉龙, 等. 不同温度应力下煤体蠕变中的渗流规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报. 2018, 37(增刊 2): 3898 – 3904. [ CAI Tingting, FENG Zengchao, JIANG Yulong, et al. Seepage evolution in coal creep under different temperatures and different stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Sup 2): 3898 – 3904. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] HÜPERS A, KOPF A J. The thermal influence on the consolidation state of underthrust sediments from the Nankai margin and its implications for excess pore pressure[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 286(1/2): 324 – 332.
- [ 10 ] MONFARED M, SULEM J, DELAGE P, et al. A laboratory investigation on thermal properties of the opalinus claystone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44(6): 735 – 747.
- [ 11 ] 陈卫忠, 龚哲, 于洪丹, 等. 黏土岩温度-渗流-应力耦合特性试验与本构模型研究进展 [J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1217 – 1238. [ CHEN Weizhong, GONG Zhe, YU Hongdan, et al. Review of thermo-hydro-mechanical coupled tests and constitutive models of clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1217 – 1238. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] LIANG Chao, LIU Jianfeng, CHEN Zhaowei, et al. Study on salt rock creep characteristics of wellbore under high temperature and high pressure[J]. Journal of Porous Media, 2022, 25(3): 51 – 69.
- [ 13 ] 李祥春, 张良, 赵艺良. 常规三轴压力下含瓦斯煤蠕变-渗流演化规律 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50(4): 55 – 62. [ LI Xiangchun, ZHANG Liang, ZHAO Yiliang. Evolution of gas-filled coal creep-seepage under conventional triaxial compression[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(4): 55 – 62. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 江宗斌, 姜培男, 李宏, 等. 加卸载条件下石英岩蠕变-渗流耦合规律试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1832 – 1841. [ JIANG Zongbin, JIANG Annan, LI Hong, et al. Creep-seepage coupling laws of quartzite under cyclic loading-unloading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1832 – 1841. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] TANG Hao, WANG Dongpo, HUANG Runqiu, et al. A new rock creep model based on variable-order fractional derivatives and continuum damage mechanics[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(1): 375 – 383.
- [ 16 ] LYU Cheng, LIU Jianfeng, REN Yi, et al. Study on very long-term creep tests and nonlinear creep-damage constitutive model of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 146: 104873.

- [17] 王力, 王世梅, 李高, 等. 考虑渗流与蠕变耦合作用的水库滑坡变形数值分析 [J]. 工程科学与技术, 2020, 52(1): 66 – 74. [ WANG Li, WANG Shimei, LI Gao, et al. Numerical analysis on deformation of reservoir landslides considering coupling effect of seepage and creep[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(1): 66 – 74. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] QIAN Qihu, QI Chengzhi, WANG Mingyang. Dynamic strength of rocks and physical nature of rock strength[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, 1(1): 1 – 10.
- [19] 朱杰兵, 汪斌, 杨火平, 等. 页岩卸荷流变力学特性的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊2): 4552 – 4556. [ ZHU Jiebing, WANG Bin, YANG Huoping, et al. Experimental study on rheological mechanical properties of shale under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup 2): 4552 – 4556. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 黄兴, 刘泉声, 康永水, 等. 砂质泥岩三轴卸荷蠕变试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2653 – 2662. [ HUANG Xing, LIU Quansheng, KANG Yongshui, et al. Triaxial unloading creep experimental study of sandy mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup 1): 2653 – 2662. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 侯会明, 胡大伟, 周辉, 等. 考虑开挖损伤的高放废物地质处置库温度-渗流-应力耦合数值模拟方法 [J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 1056 – 1064. [ HOU Huiming, HU Dawei, ZHOU Hui, et al. Thermo-hydro-mechanical coupling numerical simulation method for high-level waste geological repository considering excavation damage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 1056 – 1064. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 侯公羽, 李小瑞, 张振铎, 等. 使用小型围岩试件模拟与再现巷道围岩开挖卸荷过程的试验系统 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2136 – 2145. [ HOU Gongyu, LI Xiaorui, ZHANG Zhenduo, et al. Experimental system for simulating excavation unloading process of rock around roadway by using small cylindrical hollow specimen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2136 – 2145. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. [ Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.(in Chinese) ]

编辑: 刘真真