

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0544

# 万福煤矿不同含水率砂岩蠕变力学特性试验研究

孙晓明<sup>1,2</sup>, 姜 铭<sup>1,2</sup>, 王新波<sup>3</sup>, 臧金诚<sup>4</sup>, 高 祥<sup>4</sup>, 缪澄宇<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083;  
3. 北京特种工程设计研究院, 北京 100028; 4. 兖煤万福能源有限公司, 山东 菏泽 274922)

**摘 要:** 为研究深部巷道围岩在地下水作用下的长期蠕变力学特性, 采用自主研发的深部软岩五联流变试验系统, 开展不同含水率(0%、0.8%、1.6%、2.4%、3.3%)下砂岩吸水软化单轴压缩试验及单轴蠕变试验。通过试验结果研究表明: 砂岩的单轴抗压强度、弹性模量和蠕变破坏应力与含水率呈指数下降关系, 蠕变破坏应力与单轴抗压强度的比值在 0.76~0.84 之间; 砂岩衰减蠕变阶段时间随着含水率的增加而减少, 随应力水平的增加而增加。径向应变比轴向应变先进入稳态蠕变阶段, 破坏应力下径向应变的加速蠕变阶段开始时间要先于轴向应变; 基于稳态蠕变速率曲线确定了砂岩的长期强度, 径向稳态蠕变速率确定的值略小于轴向, 长期强度与含水率之间满足负指数关系; 将蠕变试验中径向应变与轴向应变之比定义为 $\mu_c$ , 提出了基于 $\mu_c$ 值的岩石长期强度确定方法且 $\mu_c$ 值与含水率无关, 对于本次砂岩样品可以认为 $\mu_c$ 值大于 0.3 时样品会在一定时间内发生加速蠕变破坏; 随着含水率的增加, 样品破坏形态由单斜面剪切破坏逐渐演变至 X 状共轭斜面剪切破坏。研究结果为地下水作用下巷道长期稳定性分析及巷道蠕变破坏的提前预报提供可靠的理论依据。

**关 键 词:** 砂岩蠕变; 单轴压缩蠕变; 含水率; 径向应变; 长期强度

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2023)03-0624-13

## Experimental study on creep mechanical properties of sandstone with different water contents in Wanfu coal mine

SUN Xiao-ming<sup>1,2</sup>, JIANG Ming<sup>1,2</sup>, WANG Xin-bo<sup>3</sup>, ZANG Jin-cheng<sup>4</sup>, GAO Xiang<sup>4</sup>, MIAO Cheng-yu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Beijing Special Engineering

Design and Research Institute, Beijing 100028, China; 4. Wanfu Energy Company Limited of Yanzhou Coal, Heze, Shandong 274922, China)

**Abstract:** To study the long-term creep mechanical properties of surrounding rock in the deep roadway under the action of groundwater, a self-developed five-joint rheological experimental system was used to carry out uniaxial compression tests and uniaxial creep tests on sandstone with different water contents (0%, 0.8%, 1.6%, 2.4%, and 3.3%) under water absorption and softening conditions. Some experimental findings were revealed. The uniaxial compressive strength, elastic modulus, and creep failure stress of sandstone decrease exponentially with water content, and the ratio of creep failure stress to uniaxial compressive strength ranges from 0.76 to 0.84. The attenuation creep time of sandstone decreases with the increase of water content and increases with the increase of stress level. The radial strain enters the steady-state creep stage earlier than the axial strain, and the accelerated creep stage of the radial strain under the damage stress starts earlier than the axial strain. The long-term strength of the sandstone is determined based on the steady-state creep rate curve, and the value of steady creep rate in the radial direction is slightly less than the axial one, and the long-term strength satisfies a negative exponential relationship with the water content. The ratio of radial strain to axial strain in the creep test is defined as  $\mu_c$ ,  $\mu_c$  value is independent of water content, and a method for determining the long-term strength of rock based on  $\mu_c$  value is proposed. For the sandstone samples used in this study, it can be considered that accelerated creep failure will occur in a particular period of time when the ratio surpasses 0.3. As the water content increases, failure pattern of samples gradually change from single inclined plane shear failure to X-shaped conjugate inclined plane shear failure. The research

收稿日期: 2022-04-18

录用日期: 2022-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51874311, No.52174096); 中央高校基本科研业务 (No.2022YJSSB03)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51874311, 52174096) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022YJSSB03).

第一作者简介: 孙晓明, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与软岩巷道支护方面教学与研究工作。E-mail: sunxiaoming@cumt.edu.cn

通讯作者: 缪澄宇, 男, 1992 年生, 博士, 在站博士后, 主要从事岩土工程与软岩巷道支护方面研究工作。E-mail: meycumt@163.com

results provide a reliable theoretical basis for long-term stability analysis and early prediction of roadway creep failure under groundwater.

**Keywords:** sandstone creep; uniaxial compression creep; water content; radial strain; long-term strength

## 1 引言

在与岩石相关的采矿、水电及石油等工程中,围岩变形表现出明显的时间效应,这些岩体工程的长期稳定性都与岩石蠕变有着密切联系<sup>[1-3]</sup>。水是诱发工程地质灾害最活跃的因素之一,岩体工程多赋存于水环境中,而岩石在干燥及饱和条件下力学行为有显著差异。万福煤矿泵房顶底板存在直接充水含水层,围岩与地下水作用呈现明显非线性大变形特征。泵房担负着所在区域正常生产所需的排水功能,服务周期可达几十年,其稳定性也直接影响着煤矿生产的安全。因此,研究不同含水状态下岩石蠕变力学性质,对于万福煤矿安全高效开采具有重要意义。

研究表明,水是影响岩石力学性质的一个重要因素,它会劣化岩石的力学性质<sup>[4-6]</sup>,对此国内外学者进行了广泛的研究。谢和平等<sup>[7]</sup>通过软化系数反映岩石强度变化,发现岩石强度与含水率之间存在线性关系。朱珍德等<sup>[8]</sup>对不同含水率的泥板岩进行单轴压缩试验,发现抗压强度的软化不仅与吸水率密切相关,而且还与吸水时间有关。Erguler等<sup>[9]</sup>发现黏土质软岩在饱和状态下强度指标相比于干燥时减小了90%以上。Roy等<sup>[10]</sup>研究了不同饱水时间对砂岩力学参数的影响,发现砂岩的抗拉强度、杨氏模量和断裂刚度均随含水率的增加而降低。

研究岩石的蠕变力学特性方面,目前主要是采用单轴压缩蠕变和三轴蠕变试验<sup>[11-13]</sup>。Mansouri等<sup>[14]</sup>对盐岩进行单轴压缩蠕变试验,结果表明蠕变应变和蠕变速率随轴向应力的增大而增大。Mishra<sup>[15]</sup>、刘新喜<sup>[16]</sup>等对岩石进行单轴压缩蠕变试验和三轴蠕变试验,发现岩石的长期强度大约为单轴抗压强度的80%。考虑到含水率对岩石强度的劣化影响<sup>[17-18]</sup>,Deng<sup>[19]</sup>、姚强岭<sup>[20]</sup>等开展不同含水率蠕变试验,研究发现随含水率的增大岩石的长期强度呈指数降低,且轴向压力相同时饱和状态下的最大蠕变变形大于自然状态下的最大蠕变变形<sup>[21]</sup>。Yu<sup>[22]</sup>、Tang<sup>[23]</sup>等对不同含水率红砂岩开展了单轴压缩蠕变试验,发现瞬时应变和稳态应变率随含水率的增加呈指数形式增大,蠕变应变和破坏时间随含水率增加而减小。

在万福煤矿-820水平泵房(埋深为865 m),

长期荷载作用下帮部出现收缩、钢筋弯曲和混凝土开裂等破坏特征。大量工程案例表明,研究岩体径向变形特征,对于控制巷道帮部径向变形具有一定的指导意义<sup>[24]</sup>。以上蠕变试验研究主要针对蠕变破坏强度及轴向应变规律,未对径向和体积应变进行分析。为此学者们开展了一系列针对径向和体积应变规律的研究<sup>[25-27]</sup>,Fujii等<sup>[28]</sup>对多种岩石进行蠕变试验,得到轴向、径向和体积应变的蠕变曲线,指出径向应变可以作为判断岩石损伤的一项重要指标。Chu等<sup>[29]</sup>对饱和状态砂岩进行短期和蠕变单轴压缩试验,发现蠕变试验轴向应变与短期试验基本一致,而径向应变大于短期试验。韩立军等<sup>[30]</sup>对泥质砂岩进行蠕变试验,发现径向应变较轴向应变的规律性更好、更明显。胡光辉等<sup>[31]</sup>发现在稳态蠕变阶段裂纹萌生导致的径向应变大于压缩引起的轴向应变,同样杨文东等<sup>[32]</sup>开展了辉绿岩蠕变试验,发现岩石临近破坏时径向蠕变速率均不同程度地大于轴向,并且都认为是导致岩石体积缩小、扩容破坏的主要原因。Zhou等<sup>[33]</sup>进行了单、三轴蠕变试验,发现三轴蠕变试验的轴向和径向的蠕变应变率都明显低于单轴压缩蠕变试验。同样Zhang<sup>[26]</sup>、李亚丽<sup>[34]</sup>、Huang<sup>[35]</sup>等进行了蠕变试验,结果表明径向变形表现出比轴向更为突出的蠕变特性。可以发现,目前针对岩石蠕变径向变形特征的研究主要集中于自然状态和饱和状态,对于不同含水率岩石的径向变形的规律研究有待进一步深入。

因此,本文以万福煤矿砂岩为研究对象,在吸水软化试验基础上<sup>[36-37]</sup>,进一步开展不同含水率砂岩单轴压缩蠕变试验,获取了蠕变全过程轴向应变、径向应变和体积应变的变化规律,分析了不同含水率砂岩轴向和径向蠕变量、蠕变速率的差异,研究了含水率对砂岩应变、蠕变速率和长期强度的影响,提出了一种基于径向应变与轴向应变比值的岩石长期强度确定方法。其研究结果可为深部巷道围岩在地下水作用下长期稳定性分析提供一定的理论指导。

## 2 试验仪器及方案

### 2.1 试验设备及试验样品

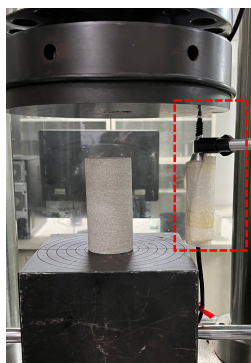
试验样品取自山东省菏泽市万福煤矿,取样处位于-950水平泵房通道,埋深约为1 040 m,泵房

通道位于中砂岩层位,底板为砂泥互层,顶板为细砂岩、泥岩、煤和砂质泥岩等。采用保鲜膜对现场砂岩样品进行及时封存,通过对现场取回砂岩样品烘干获得泵房通道围岩含水率稳定在 0.62%~1.78%。由地应力测试数据可知,在 800~1 100 m 的深度范围内,地应力主要以水平应力为主,最大水平主应力与垂直应力的比值平均为 1.96。泵房通道所处深度最大水平主应力为 42.74 MPa,最小水平主应力为 28.36 MPa。

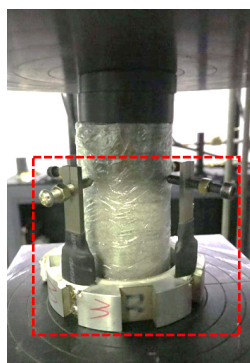
本文采用中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室自主研制的深部软岩五联流变试验系统(见图 1),系统轴向最大压力为 600 kN,配置轴向位移传感器、环向引伸计对岩石的轴向和径向应变进行测量。将取自万福煤矿现场的砂岩运至实验室后,按照国际岩石力学学会(International Society of Rock Mechanics,简称 ISRM)建议标准加工成直径为 50 mm、高为 100 mm 的样品。样品呈灰白色,结构致密,肉眼观察无层理、条纹及裂纹,表现完整性及均匀性良好。测量样品天然状态下的平均纵波波速为 3.52 km/s,选取波速相近且外观无缺损的样品作为试验样品。



(a) 试验系统



(b) 轴向位移传感器



(c) 环向引伸计

图 1 深部软岩五联流变试验系统

Fig.1 Five-joint rheological experimental system

将样品放入 105 °C 的烘干箱内烘 24 h,得到干燥状态样品。通过对干燥样品进行无压吸水试验<sup>[36]</sup>发现,样品吸水量在前 31 h 急速上升,113 h 后进入稳定的缓慢吸水阶段,含水率变化很小,经计算,自然饱和含水率约为 3.34%。无压吸水试验共进行 432 h,此时样品质量几乎不发生变化,认为砂岩样品已经达到极限饱和状态,此时含水率为 3.43%。可以将吸水时间分别为 3.17、31.00、113.00 h 对应的 0.8%、2.4%、3.3% 含水率作为临界含水率,为了更加连续、准确地获得含水率对砂岩强度的软化规律,在以上临界含水率的基础上增加 1.6% 含水率及 0% 含水率(干燥状态),共计 5 种含水率进行吸水软化试验研究,部分试验样品参数见表 1。

表 1 蠕变试验部分样品参数

Table 1 Parameters of some specimens in creep test

| 样品<br>编号 | 干燥质量<br>/g | 含水质量<br>/g | 含水率<br>/% | 长度<br>/mm | 直径<br>/mm | 密度<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------------------------|
| DR-10    | 462.33     | —          | 0.00      | 100.99    | 49.48     | 2.38                         |
| DR-11    | 462.47     | 465.71     | 0.72      | 100.46    | 49.38     | 2.41                         |
| DR-12    | 472.10     | 479.63     | 1.60      | 101.35    | 49.58     | 2.42                         |
| DR-13    | 473.35     | 485.07     | 2.48      | 101.56    | 49.56     | 2.42                         |
| DR-14    | 459.55     | 474.66     | 3.29      | 99.59     | 49.43     | 2.41                         |

## 2.2 试验方案

本文采用单级加载方式进行试验,根据单轴试验结果进行应力等级的设计,考虑到饱和样品的单轴抗压强度较低,将初始蠕变应力设为 18 MPa,相邻两级荷载水平应力差为 4.5 MPa。在进行充分蠕变过程后进入下一级,设计每级蠕变时间为 24 h,直至样品发生蠕变破坏。考虑到高含水率对岩石强度的软化作用,将 3.3% 含水率的初始蠕变应力设为 9 MPa,相邻两级荷载水平应力差为 2.25 MPa。同时为了获得蠕变加速破坏阶段曲线,在加载后期对应力增量梯度进行调整,缩小为最初设计值的一半,避免样品在施加过大的瞬时荷载过程中发生脆性破坏。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 单轴压缩试验结果

本次试验进行了多组含水率下砂岩吸水软化单轴压缩试验,获取了不同含水率下的单轴压缩试验曲线(见图 2),在加载初期随着含水率的增加,压密阶段越长。对比峰后应力-应变曲线,在含水率较低的状态下,岩石样品表现出脆性,含水率较高时脆性下降表现为塑性。图 3 为单轴抗压强度与弹性模量的含水软化曲线,可以看出水对岩石力学

性质影响显著,随着含水率的增加,单轴抗压强度不断降低,从最初的 90.67 MPa 下降到 33.74 MPa,下降了 62.79%,砂岩的弹性模量从 14.1 GPa 下降到 7.3 GPa,下降了 48.23%。将不同含水率样品的单轴抗压强度及弹性模量进行统计,发现砂岩的单轴抗压强度和弹性模量与含水率均呈指数下降关系,拟合获得两者与含水率的关系,具体表达式如图 3 所示。

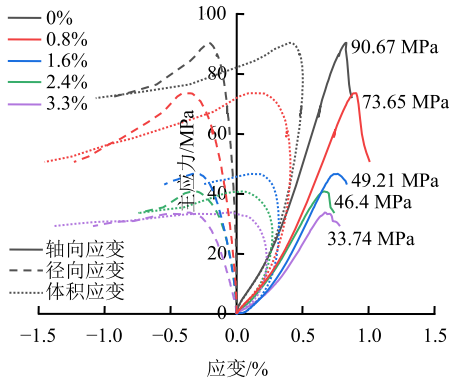


图2 砂岩吸水软化单轴压缩试验曲线

Fig.2 Uniaxial compression test curves of sandstone water absorption softening

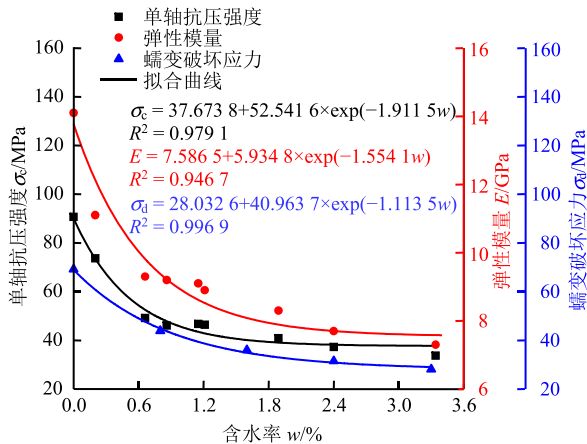


图3 砂岩强度软化曲线

Fig.3 Strength softening curves of sandstone

### 3.2 轴向和径向蠕变特征

不同含水率的砂岩分级加载蠕变曲线如图 4 所示。由于 0% 含水率样品未测得径向应变, 0% 含水率样品仅展示轴向应变。应变随时间呈阶梯式增长趋势, 在施加增量荷载瞬间产生瞬时应变, 之后进入蠕变阶段直至下一次增量荷载施加, 最终在破坏应力作用下, 在稳态蠕变后进入加速蠕变阶段, 发生蠕变破坏。试验过程中, 砂岩样品无明显脆性破坏, 整体曲线光滑连续, 能够很好地展现试验过程中砂岩蠕变变形及破坏过程。砂岩干燥状态 (0% 含

水率) 样品在第 1 级加载应力为 18 MPa, 蠕变破坏发生前经历了 21 级应力水平, 样品蠕变破坏总时间约为 487 h, 破坏应力为 59.63 MPa, 最后一级荷载作用下持续时间约 13 h 后发生加速蠕变破坏。砂岩饱和状态 (3.3% 含水率) 样品蠕变破坏发生前经历了 10 级应力水平, 样品蠕变破坏总时间约为 241 h, 破坏应力为 29.25 MPa, 在最后一级发生加速蠕变破坏, 持续时间约 26 h。

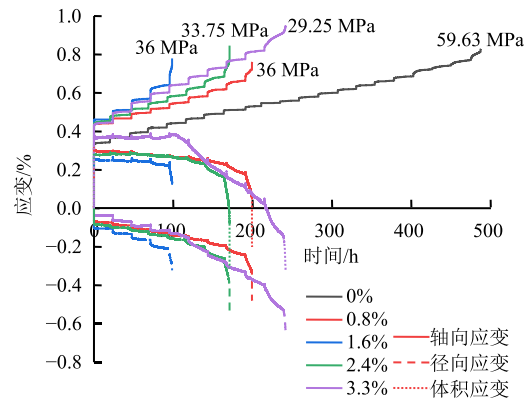


图4 不同含水率砂岩蠕变全过程曲线

Fig.4 Whole creep process curves of sandstone with different water contents

从总体上看, 不同含水率蠕变曲线在低应力水平下, 轴向应变和径向应变都有瞬时应变和蠕变应变两个阶段, 此时变形主要表现为明显的轴向压缩, 而径向膨胀变形较小。随着应力水平的增加, 径向应变逐渐开始占主导地位。在破坏阶段, 径向应变迅速增加, 其增加幅度远远大于轴向应变。

蠕变试验过程中不能直接测出样品的体积应变, 可根据下式获取样品的体积应变随时间的变化规律:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_v$  为体积应变;  $\varepsilon_1$  为轴向应变;  $\varepsilon_3$  为径向应变, 压应变为正, 拉应变为负。

由图 4 可知, 体积应变随时间的变化规律要比轴向、径向应变变化规律要复杂。体积应变扩容点为样品体积压缩和扩容的转折点, 扩容点后样品呈现出宏观的体积扩容。对于 2.4% 含水率样品, 从第 1 级应力水平到第 6 级应力水平, 样品整体处于平稳的体积压缩状态, 当样品应力状态进入第 7 级时, 体积应变以较快速率向负值偏移, 样品体积开始扩容。应力状态进入第 8 级后, 体积应变快速向负值偏移, 样品快速扩容, 直至样品破坏, 体积应变突变 ( $\varepsilon_v = 1.78 \times 10^{-3}$  变化到  $\varepsilon_v = -2.01 \times 10^{-3}$ ), 扩容效

应明显。

最终根据吸水软化单轴压缩试验和砂岩单轴蠕变试验结果, 获得了不同含水率砂岩蠕变破坏应力、体积应变扩容应力与单轴抗压强度之比, 如表 2

所示。破坏应力与单轴抗压强度比值在 0.76~0.84 之间相对稳定, 体积应变扩容应力与单轴抗压强度比值在 0.64~0.73 之间相对稳定。破坏应力与含水率之间满足负指数关系, 具体表达式如图 3 所示。

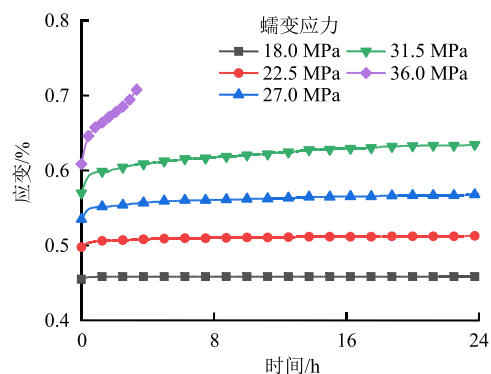
表 2 蠕变破坏应力、扩容应力与单轴抗压强度比值

Table 2 Relationship between creep failure stress, dilatancy stress and uniaxial compressive strength

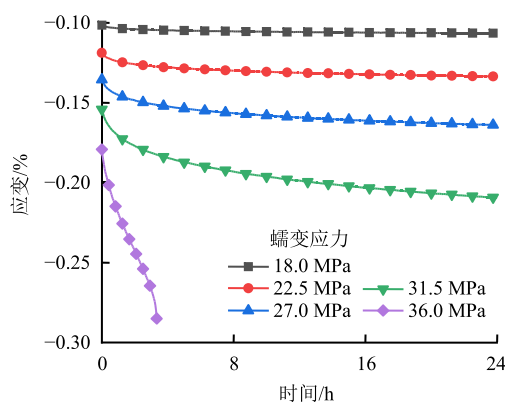
| 含水率 $w/\%$ | 样品编号  | 破坏应力 $\sigma_d/\text{MPa}$ | 破坏应力平均值 /MPa | 扩容应力 /MPa | 扩容应力平均值 /MPa | 单轴抗压强度 $\sigma_c/\text{MPa}$ | $\sigma_d/\sigma_c$ | 扩容应力/单轴抗压强度 |
|------------|-------|----------------------------|--------------|-----------|--------------|------------------------------|---------------------|-------------|
| 0          | DR-10 | 59.63                      | 69.19        | —         | —            | 90.67                        | 0.76                | —           |
|            | DR-20 | 78.75                      |              | —         |              |                              |                     |             |
| 0.8        | DR-11 | 36.00                      | 43.88        | 33.75     | 38.25        | 56.25                        | 0.78                | 0.68        |
|            | DR-21 | 51.75                      |              | 42.75     |              |                              |                     |             |
| 1.6        | DR-12 | 36.00                      | 36.00        | 31.50     | 31.50        | 42.91                        | 0.84                | 0.73        |
|            | DR-22 | 36.00                      |              | 31.50     |              |                              |                     |             |
| 2.4        | DR-13 | 29.25                      | 31.50        | 24.75     | 27.00        | 37.30                        | 0.84                | 0.72        |
|            | DR-23 | 33.75                      |              | 29.25     |              |                              |                     |             |
| 3.3        | DR-14 | 27.00                      | 28.13        | 22.75     | 21.50        | 33.74                        | 0.83                | 0.64        |
|            | DR-24 | 29.25                      |              | 20.25     |              |                              |                     |             |

运用陈氏加载处理法<sup>[38]</sup>将全过程轴向、径向蠕变曲线进行整理, 获得了不同含水率砂岩的分级荷载作用下的单轴蠕变曲线, 本文以 1.6% 含水率砂岩样品蠕变曲线为例展示, 见图 5。将砂岩样品蠕变过程中瞬时应变与蠕变应变进行分离, 获得了不同含水率砂岩轴向和径向瞬时应变规律曲线, 如图 6(a)、6(b)所示, 可以看出含水率一定时, 轴向和径向瞬时变形呈线性增长趋势。蠕变应力为 18 MPa 时, 干燥样品轴向瞬时应变为  $3.3 \times 10^{-3}$ , 饱和样品轴向瞬时应变为  $5.6 \times 10^{-3}$ , 瞬时应变表现为整体随含水率增加不断增大。随含水率增加单位荷载引起的轴向瞬时应变不断增加, 在图 6(a)中表现为线性增长斜率即弹性模量不断减小, 由于软化作用使得砂岩弹性模量降低, 含水率高的样品产生较大的瞬时轴向应变。0.8% 含水率样品径向瞬时应变为  $-6.4 \times 10^{-4}$ , 3.3% 含水率样品径向瞬时应变为  $-9.1 \times 10^{-4}$ , 整体随含水率增加不断增大, 由图 6(b)可以发现砂岩样品径向瞬时应变线性增长斜率随含水率增加而减小。同时获得了径向瞬时应变与轴向瞬时应变比值  $\mu$  随应力变化规律曲线, 如图 6(c)所示。可以看出含水率一定时,  $\mu$  值随应力的增加呈线性增长趋势。

进一步处理获得了蠕变应变与总应变比值随应力变化规律曲线, 如图 7 所示。可以看出每一级应力水平产生的蠕变应变随着应力的增加而增加, 且随着应力的增大蠕变应变占总应变比例也增大。随着含水率的增加, 蠕变应变与总应变比值也在增加。径向蠕变应变与径向总应变的比值均大于轴向



(a) 轴向应变

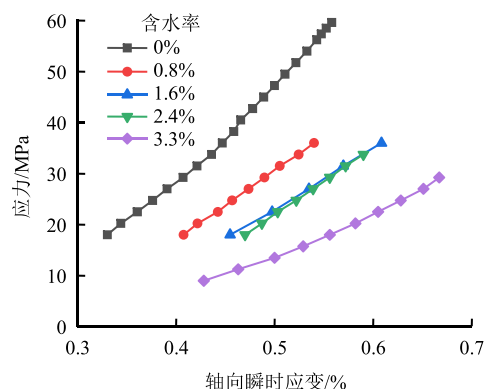


(b) 径向应变

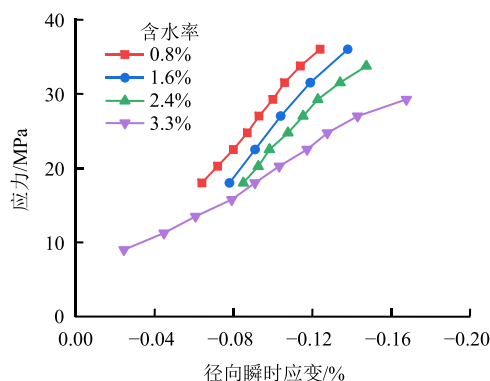
图 5 1.6% 含水率砂岩分级加载单轴蠕变曲线  
Fig.5 Uniaxial creep curves of sandstone with 1.6% water content under loading in increment

蠕变应变与轴向总应变的比值, 径向蠕变应变与径向总应变的比值斜率也大于轴向蠕变应变与轴向总

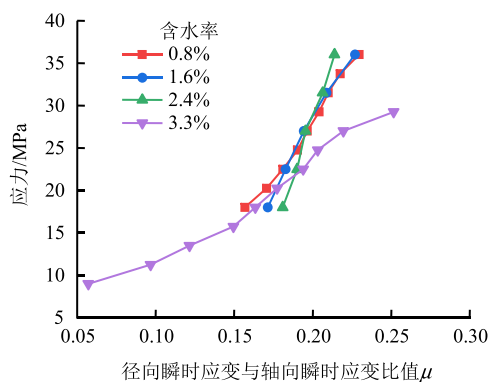
应变的比值斜率, 即样品的径向蠕变应变特性比轴向蠕变应变特性更显著。



(a) 轴向瞬时应变



(b) 径向瞬时应变



(c) 径向瞬时应变与轴向瞬时应变比值 $\mu$

图6 不同含水率砂岩瞬时应变变化规律曲线  
Fig.6 Curves of instantaneous strain variation of sandstone with different water contents

### 3.3 蠕变速率特征分析

为了进一步研究蠕变变形规律, 得到各级荷载下轴向和径向蠕变速率曲线, 图8为0.8%含水率样品蠕变速率曲线, 轴向和径向蠕变速率曲线均呈现衰减蠕变和稳态蠕变特征, 在各级应力加载阶段, 衰减蠕变阶段轴向和径向蠕变速率均在一定时间内达到一个相对稳定的速率范围。应力水平越大, 衰

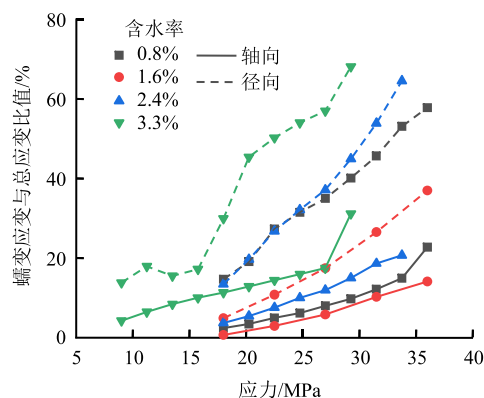
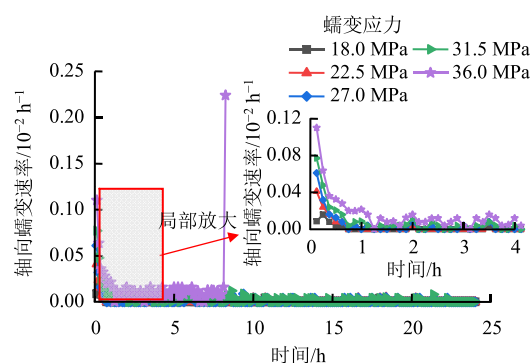
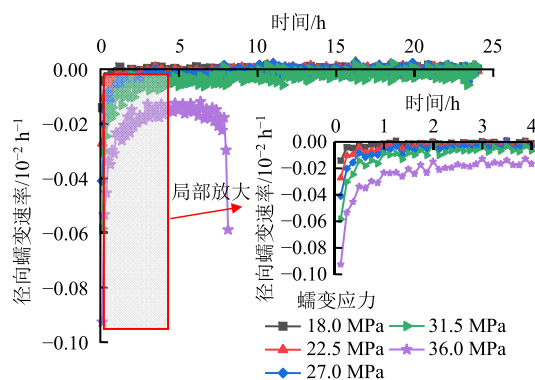


图7 蠕变应变与总应变比值随应力变化规律曲线  
Fig.7 Variation of the ratio of creep strain to total strain with stress



(a) 轴向蠕变速率



(b) 径向蠕变速率

图8 0.8%含水率砂岩轴向和径向蠕变速率曲线  
Fig.8 Axial and radial creep curves of sandstone with a water content of 0.8%

减蠕变的斜率越大, 衰减蠕变阶段耗时也更长, 且达到稳态蠕变阶段后的蠕变速率也就更大。将不同含水率样品衰减蠕变阶段时间进行统计记录, 得到了不同含水率砂岩样品蠕变衰减蠕变阶段时间变化规律, 如图9所示。可以发现不同含水率砂岩样品衰减蠕变阶段时间随应力的增加呈线性函数关系, 经拟合满足如下函数关系:

$$t = a\sigma + b \quad (2)$$

式中:  $t$  为衰减蠕变阶段时间;  $\sigma$  为轴向应力;  $a$ 、 $b$  为砂岩的材料参数, 如表 3 所示。

由图 9 和表 3 中的参数可知, 随着含水率的增大, 轴向和径向蠕变衰减蠕变阶段的时间也随之减少, 例如在 27 MPa 应力水平, 轴向蠕变衰减蠕变阶段时间分别为 0.75、0.69、0.62、0.50 h, 径向蠕变衰减蠕变阶段时间分别为 0.62、0.56、0.49、0.44 h。对比同一含水率样品轴向和径向蠕变衰减蠕变阶段时间可以发现, 径向蠕变衰减蠕变阶段时间要小于轴向蠕变衰减蠕变阶段时间, 即径向蠕变更早的进入稳态蠕变阶段。在最后一级应力水平, 蠕变应变速率明显增大, 径向蠕变要尤其明显。

表 3 砂岩衰减蠕变阶段时间-应力曲线拟合参数  
Table 3 Fitting parameters of time-stress curve for attenuation creep stage of sandstone

| 含水率<br>$w/\%$ | 轴向应力  |        |         | 径向应力  |        |         |
|---------------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
|               | $a$   | $b$    | $R^2$   | $a$   | $b$    | $R^2$   |
| 0.8           | 0.039 | -0.231 | 0.912 3 | 0.038 | -0.374 | 0.948 0 |
| 1.6           | 0.036 | -0.251 | 0.949 5 | 0.032 | -0.293 | 0.980 1 |
| 2.4           | 0.027 | -0.094 | 0.920 2 | 0.030 | -0.288 | 0.936 2 |
| 3.3           | 0.023 | -0.098 | 0.935 6 | 0.023 | -0.167 | 0.931 4 |

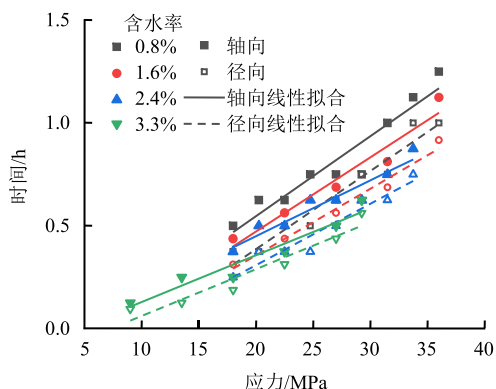
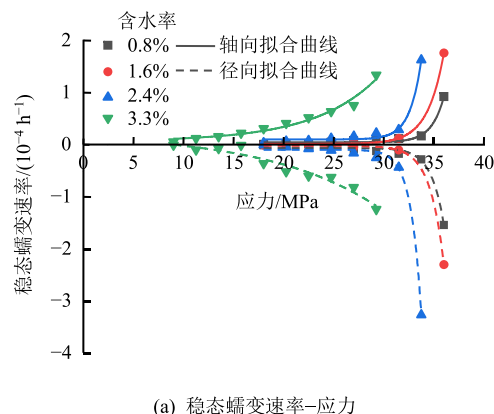


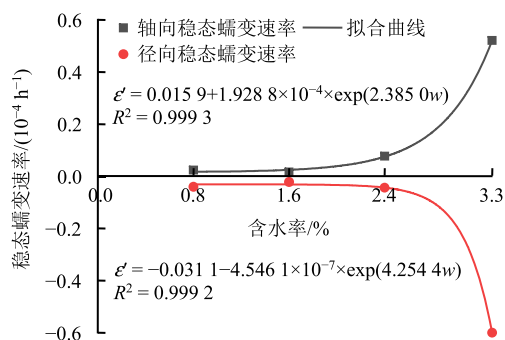
图 9 不同含水率砂岩样品衰减蠕变阶段时间变化规律  
Fig.9 Time-dependent variation of attenuation creep stage of sandstone specimens with different water contents

### 3.3.1 稳态蠕变速率

通过对稳态蠕变阶段蠕变速率统计分析, 得到不同含水率下样品轴向和径向稳态蠕变速率随应力变化曲线, 如图 10(a)所示。从图中可以看出, 样品的轴向和径向稳态蠕变速率不仅受应力的影响, 也与含水率密切相关。含水率一定时, 样品轴向和径向稳态蠕变速率随应力的增加逐渐增大。径向稳态蠕变速率较轴向稳态蠕变速率在破坏前几级应力水平增加更快, 此时的径向变形也就更为明显。0.8% 含水率样品轴向稳态蠕变速率由第 1 级应力水平的



(a) 稳态蠕变速率-应力



(b) 22.5 MPa 应力下稳态蠕变速率-含水率

图 10 砂岩样品轴向和径向稳态蠕变速率随应力和含水率变化规律

Fig.10 Variations of axial and radial steady creep rates with stress and water content of sandstone specimens

$0.007 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$  增加至最后一级应力水平的  $0.923 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 径向稳态蠕变速率由第 1 级应力水平的  $-0.011 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$  增加至最后一级应力水平的  $-1.540 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。可以发现不同含水率砂岩样品稳态蠕变速率随应力的增加呈指数函数关系:

$$\varepsilon' = ce^{-d\sigma} + e \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon'$  为稳态蠕变速率;  $c$ 、 $d$  和  $e$  均为砂岩的材料参数。砂岩样品稳态蠕变速率曲线函数拟合参数如表 4 所示。

表 4 砂岩稳态蠕变速率-应力曲线拟合参数  
Table 4 Steady-state creep rates-stress curve fitting parameters of sandstone

| 含水率<br>$w/\%$ | 轴向应力                  |       |       |         | 径向应力                   |       |        |         |
|---------------|-----------------------|-------|-------|---------|------------------------|-------|--------|---------|
|               | $c$                   | $d$   | $e$   | $R^2$   | $c$                    | $d$   | $e$    | $R^2$   |
| 0.8           | $1.5 \times 10^{-13}$ | -0.82 | 0.048 | 0.984 9 | $-4.9 \times 10^{-13}$ | -0.80 | -0.063 | 0.992 8 |
| 1.6           | $3.8 \times 10^{-10}$ | -0.62 | 0.017 | 0.999 7 | $-1.0 \times 10^{-11}$ | -0.73 | -0.021 | 0.999 9 |
| 2.4           | $2.3 \times 10^{-13}$ | -0.87 | 0.103 | 0.990 8 | $-2.8 \times 10^{-14}$ | -0.96 | -0.095 | 0.996 6 |
| 3.3           | $1.2 \times 10^{-2}$  | -0.16 | 0.066 | 0.970 6 | $-9.8 \times 10^{-2}$  | -0.09 | 0.223  | 0.944 6 |

为研究含水率对稳态蠕变速率的影响, 绘制了

砂岩样品轴向和径向稳态蠕变速率随含水率变化规律曲线(见图10(b))。在同一应力水平,样品的轴向和径向稳态蠕变速率随着含水率的增加呈指数级增大,轴向和径向稳态蠕变速率与含水率之间满足指数函数关系,具体表达式如图10(b)所示。

### 3.3.2 破坏阶段蠕变速率

加速蠕变破坏阶段相对于初始蠕变阶段与稳态蠕变阶段而言,仅仅占据蠕变试验过程极少的一部分,此阶段持续时间短却能够产生极大的非线性变形。图11展示了不同含水率砂岩破坏阶段轴向和径向蠕变应变速率曲线,受不同含水率及不同蠕变应力的影响,各加速曲线持续时间不同,从1.6%含水率的3.33 h到3.3%含水率的26.7 h不等。可以看出最后一级均表现出衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变3个阶段,蠕变应变速率曲线为“U”形。图中灰色矩形区域为蠕变速率曲线加速蠕变阶段,对比同一含水率轴向和径向加速蠕变阶段时间可以发现,径向变形的加速蠕变阶段开始时间要先于轴向变形,如1.6%含水率样品轴向和径向应变加速蠕变时间分别为3.16 h和2.54 h,3.3%含水率样品轴向和径向应变加速蠕变开始时间分别为26.50 h和24.75 h。

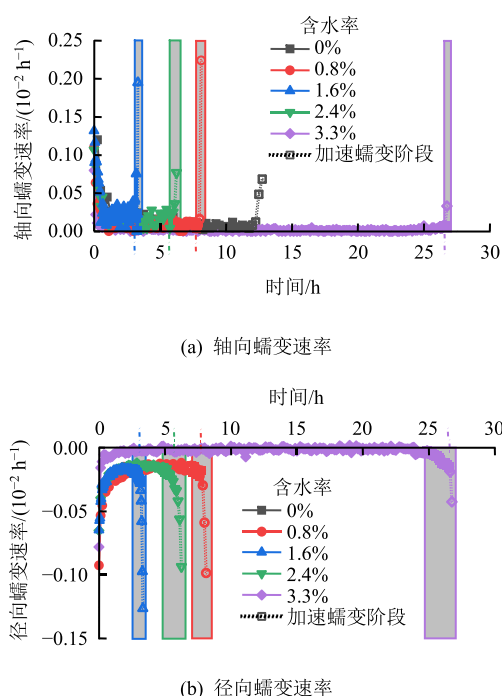


图11 砂岩破坏阶段轴向和径向蠕变速率曲线

Fig.11 Axial and radial creep curves of sandstone failure stage

### 3.4 长期强度分析

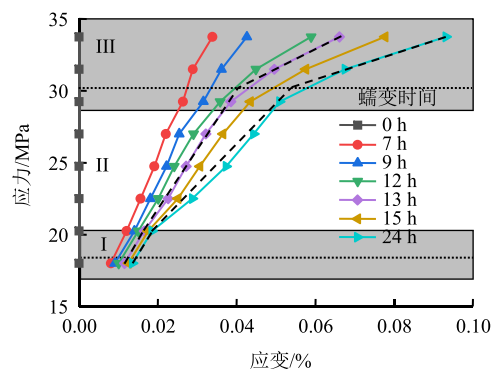
岩石的长期强度是指岩石在蠕变变形的过程

中由稳态蠕变转为非稳态蠕变时的临界应力值<sup>[39]</sup>,是判断岩石是否进入非稳态蠕变阶段的重要指标。目前常用的长期强度确定方法有过度蠕变法、体积应变转折点法、等时曲线法和稳态蠕变速率法等<sup>[40]</sup>。

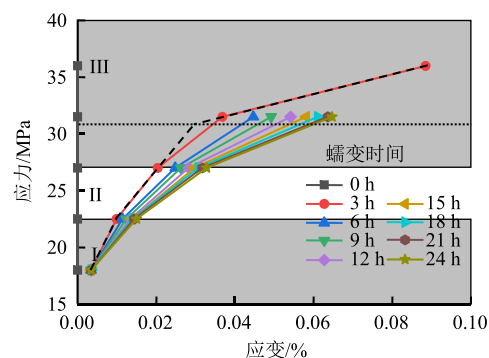
在文献[36]中,笔者将由施加应力产生的瞬时应变去除,只针对每一级蠕变加载结束后的黏弹塑性变形进行研究,对全过程进行统计,获得等时黏弹塑性应力-应变曲线,基于等时黏弹塑性应力-应变曲线提出了一种确定长期强度的新方法。由图12(a)、12(b)可知,在等时黏弹塑性应力-应变曲线上存在3个不同斜率,因此可以将斜率发生转折的应力作为蠕变状态的分界点。砂岩只在加载初期产生少量应变,在长期荷载施加过程中不会发生变形,此阶段的斜率较大;当强度分别大于29.25 MPa与27.00 MPa时,在进行充分蠕变过程后砂岩将发生蠕变破坏,斜率也因此不断降低。根据第II阶段与第III阶段2条直线的交点可以获得砂岩的长期强度,具体结果如表5所示。为了验证等时黏弹塑性应力-应变曲线法确定长期强度的可应用性,本文选用文献[40]和文献[41]中的蠕变试验数据。运用该方法绘制了等时黏弹塑性应力-应变曲线(见图12(c)、12(d)),并确定了长期强度为15.75 MPa和75.00 MPa,与原文作者确定的结果15.98 MPa和75.20 MPa基本一致,印证了该方法的合理性。

岩石蠕变的稳态蠕变阶段的特性是判断岩石是否会发生破坏的依据,诸多学者通过稳态蠕变速率曲线的拐点对确定了岩石的长期强度<sup>[39-42]</sup>。但现有研究均是基于轴向蠕变速率,未考虑径向蠕变速率的影响。鉴于此,利用上文中已获得的轴向和径向稳态蠕变速率拟合曲线,根据该曲线拐点前后切线交点得出砂岩的长期强度,具体结果如表5所示。限于篇幅,本文仅展示1.6%含水率样品(DR-12)稳态蠕变率拐点法曲线,如图13所示。从表5和图13可以看出,径向稳态蠕变速率确定的长期强度略小于轴向,说明径向变形进入非稳态蠕变时间要早于轴向,即径向变形加速破坏开始时间早于轴向,以径向变形特征来判别砂岩是否发生蠕变破坏更合理。

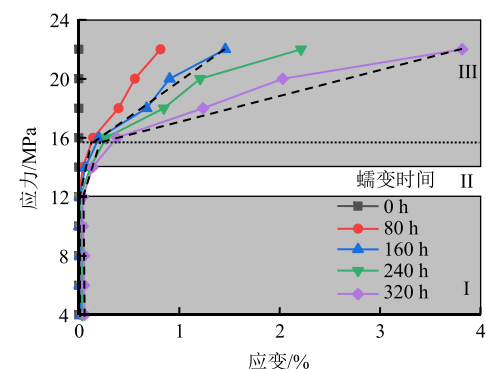
若以等时黏弹塑性应力-应变曲线法确定的长期强度值为基准,径向稳态蠕变速率法确定结果的最大相对误差仅为3%。可以看出,误差非常小,说明径向稳态蠕变速率法得到的长期强度是正确的,也印证了该方法的合理性。本文采用径向稳态蠕变速率法求得的结果为砂岩的长期强度,但0%



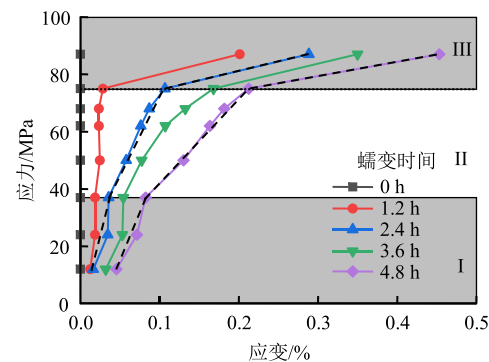
(a) 0.8%含水率 (DR-11)



(b) 1.6%含水率 (DR-12)



(c) 文献[40]



(d) 文献[41]

图 12 等时黏弹塑性应力-应变曲线

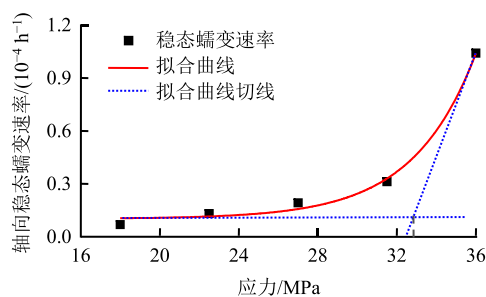
Fig.12 Isochronous viscoelasticity stress-strain curves

表 5 不同方法确定的长期强度

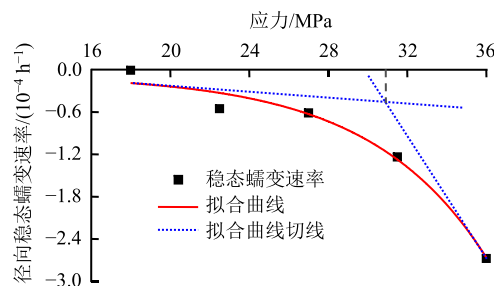
Table 5 Different methods to determine the long-term strength

| 含水率 $w/\%$ | 样品编号  | 长期强度/MPa |         | 等时曲线法 |
|------------|-------|----------|---------|-------|
|            |       | 轴向       | 径向      |       |
| 0          | DR-10 | 55.50    | (55.50) | 55.50 |
|            | DR-20 | 62.59    | (60.75) | 60.75 |
| 0.8        | DR-11 | 31.75    | 30.60   | 30.20 |
|            | DR-21 | 49.30    | 48.42   | 48.79 |
| 1.6        | DR-12 | 32.33    | 30.92   | 30.83 |
|            | DR-22 | 32.89    | 31.15   | 31.50 |
| 2.4        | DR-13 | 25.34    | 24.43   | 24.80 |
|            | DR-23 | 30.58    | 29.68   | 29.25 |
| 3.3        | DR-14 | 23.27    | 22.07   | 22.80 |
|            | DR-24 | 27.16    | 26.75   | 27.00 |

注: ()中值取等时曲线法对应值。



(a) 轴向稳态蠕变率法



(b) 径向稳态蠕变率法

图 13 1.6%含水率稳态蠕变率法曲线

Fig.13 Steady-state creep method curves of 1.6% water content

含水率样品未测得径向应变, 采用等时黏弹塑性应力-应变曲线法 0%含水率样品获得的长期强度, 在表 5 中为括号内结果。对砂岩样品长期强度和含水率进行拟合, 发现长期强度与含水率之间满足负指数关系, 如图 14 所示。对于不同含水率的样品, 长期强度与单轴抗压强度的比值在 0.64~0.74 之间。

将蠕变试验中径向应变与轴向应变之比定义为  $\mu_c$ 。图 15 为  $\mu_c$  值随蠕变应力与单轴抗压强度比值变化规律, 对数据进行指数函数 (图中红线) 和线性函数 (图中蓝色虚线) 拟合, 灰色阴影区域为可

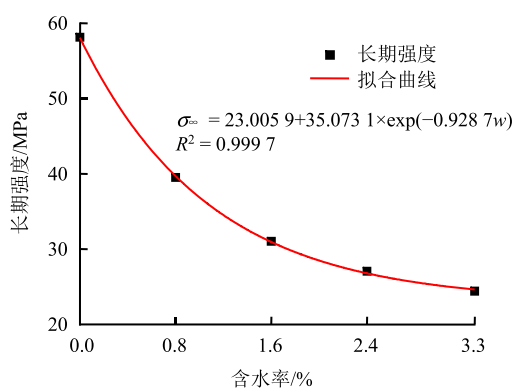
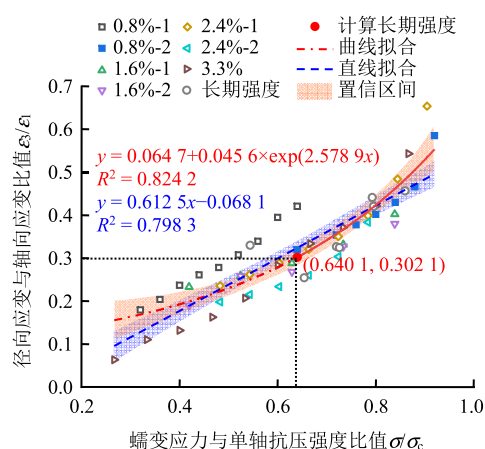


图 14 砂岩长期强度随含水率变化规律

Fig.14 Variation of the long-term strength of sandstone with water content

图 15  $\mu_c$  值随蠕变应力与单轴抗压强度比值变化规律Fig.15 Variations of  $\mu_c$  value with ratio of creep stress to uniaxial compressive strength

信限区间, 置信度为 95%, 拟合函数具体表达式如图所示。从 3.2 节可知, 蠕变破坏应力与单轴抗压强度的比值相对稳定, 运用蠕变应力与单轴抗压强度的比值可以去除含水率对应变的影响。蠕变应力较小时线性函数拟合较好, 指数函数对全过程拟合都较好, 将指数函数切线斜率等于线性函数的斜率处 (图中红点) 确定为计算长期强度。当指数函数切线斜率小于线性函数的斜率时, 蠕变应力小于计算长期强度, 轴向应变占主导地位, 样品处于线性蠕变阶段。当指数函数切线斜率大于线性函数的斜率时, 蠕变应力超过计算长期强度, 径向应变占主导地位, 样品处于非线性加速蠕变阶段。故可以认为, 当  $\mu_c$  值大于 0.3 时, 样品会在稳定蠕变阶段后出现加速蠕变, 并发生破坏。

### 3.5 蠕变破坏特征分析

图 16 为单轴压缩蠕变不同含水率砂岩样品的破坏形态。可以看出, 在含水率分别为 0%、0.8% 和 1.6% 时, 样品破坏整体呈现单斜面剪切破坏, 剪

切面两侧样品较为完整。0% 含水率样品剪切面下方有一条主裂纹, 且附近有细小岩块掉落。0.8% 含水率样品有一条贯穿剪切面的次裂纹, 裂纹缓慢扩展微小裂纹发育产生较多的伴生裂纹, 而 1.6% 含水率样品剪切面上方有一条主裂纹。在含水率为 2.4% 和 3.3% 时, 样品破坏整体呈现 X 状共轭斜面剪切破坏, 出现表面竖向裂纹, 且伴有大面积岩块脱落, 样品破坏程度较为严重。不同含水率砂岩的破坏形态均为剪切破坏, 而含水率的增加促使了次生断裂面的衍生, 长期荷载作用下破坏后样品更为破碎。根据主裂纹的类型, 样品破坏形态随着含水率的增加由单斜面剪切破坏逐渐演变至 X 状共轭斜面剪切破坏。

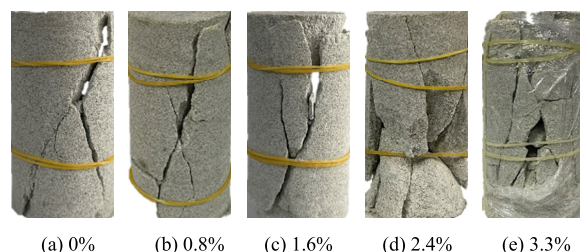


图 16 不同含水率砂岩蠕变宏观破坏模式

Fig.16 Macro failure modes of creep of sandstone with different water contents

## 4 结 论

(1) 从单轴压缩试验及单轴蠕变试验可知, 万福煤矿砂岩强度受含水率影响较大, 单轴抗压强度从 90.67 MPa 降低到 33.74 MPa, 软化系数为 0.372。砂岩蠕变破坏强度与单轴抗压强度的比值在 0.76~0.84 之间, 破坏应力与含水率之间满足负指数关系。样品破坏形态随含水率的增加由单斜面剪切破坏演变至 X 状共轭斜面剪切破坏。

(2) 相同蠕变应力下砂岩瞬时变形和蠕变变形随含水率的增加而增加。含水率一定时, 轴向和径向瞬时变形以及径向瞬时应变与轴向瞬时应变比值随应力的增加呈线性增长趋势。径向蠕变应变与径向总应变的比值均大于轴向应变的比值, 蠕变应变与总应变比值随应力变化曲线斜率也是径向大于轴向, 径向蠕变应变特性比轴向蠕变应变特性更显著。

(3) 砂岩衰减蠕变阶段的时间随着含水率的增加而减少, 随应力水平的增加而增加, 即径向应变比轴向应变先进入稳态蠕变阶段。轴向和径向稳态蠕变速率随应力和含水率增加呈指数型增长。在破坏应力水平, 径向变形优先进入加速蠕变阶段, 径向变形的加速蠕变阶段时间要早于轴向 6.45%~

19.62%。

(4) 基于径向稳态蠕变速率确定的长期强度略小于轴向, 以径向变形特征来判别砂岩是否发生蠕变破坏更具前瞻性。且长期强度与含水率之间满足负指数关系, 样品从干燥到饱和长期强度下降了约 63%。对于不同含水率的样品, 长期强度与单轴抗压强度的比值在 0.63~0.73 之间。将蠕变试验中径向应变与轴向应变之比定义为 $\mu_c$ , 提出了基于 $\mu_c$  值的岩石长期强度确定方法且 $\mu_c$  值与含水率无关, 对于本次砂岩样品可以认为 $\mu_c$  值大于 0.3 时样品会在一定时间内发生加速蠕变破坏。

### 参考文献

- [1] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.  
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [2] STERPI D, GIODA G. Visco-plastic behaviour around advancing tunnels in squeezing rock[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2009, 42(2): 319-339.
- [3] HE M C. Latest progress of soft rock mechanics and engineering in China[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2014, 6(3): 165-179.
- [4] WONG LNY, MARUVANCHERY V, LIU G. Water effects on rock strength and stiffness degradation[J]. **Acta Geotechnica**, 2015, 11(4): 713-737.
- [5] LI D Y, WANG W J. Quantitative analysis of the influence of saturation on rock strength reduction considering the distribution of water[J]. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, 2019, 5(2): 197-207.
- [6] 周辉, 宋明, 张传庆, 等. 三轴应力下水对泥质砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2391-2398.  
ZHOU Hui, SONG Ming, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental study of influences of water on mechanical behaviors of argillaceous sandstone under tri-axial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(9): 2391-2398.
- [7] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- XIE He-ping, CHEN Zhong-hui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [8] 朱珍德, 邢福东, 王思敬, 等. 地下水对泥板岩强度软化的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 2): 4739-4743.  
ZHU Zhen-de, XING Fu-dong, WANG Si-jing, et al. Analysis on strength softening of argillite under groundwater by damage mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Suppl.2): 4739-4743.
- [9] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 46(2): 355-370.
- [10] ROY D G, SINGH T N, KODIKARA J, et al. Effect of water saturation on the fracture and mechanical properties of sedimentary rocks[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2017, 50(10): 2585-2600.
- [11] 李福林, 杨健, 刘卫群, 等. 单轴压缩条件下泥岩加载速率变化效应研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 369-378.  
LI Fu-lin, YANG Jian, LIU Wei-qun, et al. Effect of loading rate changing on the mechanical properties of mudstone under uniaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 369-378.
- [12] YANG L, MEI J, SHENG X C, et al. Cracking and creep behavior of rocks considering propagation and interaction of adjacent cracks under hydro-mechanical coupling[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54(8): 4099-4110.
- [13] 王兴开, 夏才初, 朱哲明, 等. 单级荷载下极软煤岩长期蠕变规律及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2078-2088, 2098.  
WANG Xing-kai, XIA Cai-chu, ZHU Zhe-ming, et al. Long-term creep law and constitutive model of extremely soft coal rock subjected to single-stage load[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(8): 2078-2088, 2098.
- [14] MANSOURI H, AJALLOEIAN R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2018, 110: 19-27.

- [15] MISHRA B, VERMA P. Uniaxial and triaxial single and multistage creep tests on coal-measure shale rocks[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2015, 137(1): 55-65.
- [16] 刘新喜, 李盛南, 周炎明, 等. 高应力泥质粉砂岩蠕变特性及长期强度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 138-146.
- LIU Xin-xi, LI Sheng-nan, ZHOU Yan-ming, et al. Study on creep behavior and long term strength of argillaceous siltstone under high stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(1): 138-146.
- [17] YAN B Q, GUO Q F, REN F H, et al. Modified Nishihara model and experimental verification of deep rock mass under the water-rock interaction[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2020, 128: 104250.
- [18] 孙彦峰, 李永辉. 含水率及围压对砂岩蠕变特性影响的试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 159-166.
- SUN Yan-feng, LI Yong-hui. Experimental study of the influence of moisture content and confining pressure on sandstone creep characteristics[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2018, 33(1): 159-166.
- [19] DENG H F, ZHOU M L, LI J L, et al. Creep degradation mechanism by water-rock interaction in the red-layer soft rock[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2016, 9(12): 601.
- [20] 姚强岭, 朱柳, 黄庆享, 等. 含水率对细粒长石岩屑砂岩蠕变特征影响试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 1034-1042.
- YAO Qiang-ling, ZHU Liu, HUANG Qing-xiang, et al. Experimental study on the effect of moisture content on creep characteristics of fine-grained feldspar lithic sandstone[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2019, 36(5): 1034-1042.
- [21] 刘洪磊, 宋旭, 牛雷雷, 等. 不同含水状态砂岩分级加载蠕变变形特性研究[J]. 金属矿山, 2021(11): 25-32.
- LIU Hong-lei, SONG Xu, NIU Lei-lei, et al. Sandstone creep in different water-bearing states under graded loading[J]. **Metal Mine**, 2021(11): 25-32.
- [22] YU C Y, TANG S B, TANG C A, et al. The effect of water on the creep behavior of red sandstone[J]. **Engineering Geology**, 2019, 253: 64-74.
- [23] TANG S B, YU C Y, HEAP M J, et al. The influence of water saturation on the short- and long-term mechanical behavior of red sandstone[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(9): 2669-2687.
- [24] 马振乾, 梁旭超, 池恩安, 等. 不同加载速率下煤的侧向变形特征研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2007-2012, 2320.
- MA Zhen-qian, LIANG Xu-chao, CHI En-an, et al. Experimental study on lateral deformation characteristics of coal under different loading rates[J]. **Chinese Journal of Applied Mechanics**, 2020, 37(5): 2007-2012, 2320.
- [25] 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 Quan-sheng, KANG Yong-shui, et al. Triaxial unloading creep experimental study of sandy mudstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.1): 2653-2662.
- [26] ZHANG Z L, XU W Y, WANG W, et al. Triaxial creep tests of rock from the compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba hydropower station[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 50: 133-139.
- [27] ZHANG S G, LIU W B, LV H M. Creep energy damage model of rock graded loading[J]. **Results in Physics**, 2019, 12: 1119-1125.
- [28] FUJII Y, KIYAMA T, ISHIJIMA Y, et al. Circumferential strain behavior during creep tests of brittle rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(3): 323-337.
- [29] CHU Z F, WU Z J, LIU Q S, et al. Evaluating the microstructure evolution behaviors of saturated sandstone using NMR testing under uniaxial short-term and creep compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2021, 54(9): 4905-4927.
- [30] 韩立军, 王延宁, 蒋斌松, 等. 泥质砂岩蠕变特性与锚固控制效应试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 65-72.
- HAN Li-jun, WANG Yan-ning, JIANG Bin-song, et al.

- Experiment study of argillaceous sandstone creep characteristics and anchoring control effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(1): 65-72.
- [31] 胡光辉, 徐涛, 陈崇枫, 等. 基于离散元法的脆性岩石细观蠕变失稳研究[J]. 工程力学, 2018, 35(9): 26-36.
- HU Guang-hui, XU Tao, CHEN Chong-feng, et al. Amicroscopic study of creep and fracturing of brittle rocks based on discrete element method[J]. **Engineering Mechanics**, 2018, 35(9): 26-36.
- [32] 杨文东, 张强勇, 陈芳, 等. 大岗山水电站坝区辉绿岩流变特性的三轴试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(5): 64-70.
- YANG Wen-dong, ZHANG Qiang-yong, CHEN Fang, et al. Triaxial test research into rheological properties of diabase in Dagangshan hydropower station dam site[J]. **Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)**, 2011, 43(5): 64-70.
- [33] ZHOU H, YANG Y S, GAO H, et al. Experimental investigations on the short- and long-term behaviour of Jinping marble in deep tunnels[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2015, 19(Suppl.1): 83-96.
- [34] 李亚丽, 于怀昌, 刘汉东. 三轴压缩下粉砂质泥岩蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2035-2040, 2047.
- LI Ya-li, YU Huai-chang, LIU Han-dong. Study of creep constitutive model of silty mudstone under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 2035-2040, 2047.
- [35] HUANG X, LI S J, XU D P, et al. Time-dependent behavior of Jinping deep marble taking into account the coupling between excavation damage and high pore pressure[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2022, 55: 4893-4912.
- [36] 孙晓明, 缪澄宇, 姜铭, 等. 基于改进西原模型的不同含水率砂岩蠕变实验及理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2411-2420.
- SUN Xiao-ming, MIAO Cheng-yu, JIANG Ming, et al. Experimental and theoretical study on creep of sandstone with different moisture contents based on modified Nishihara model[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(12): 2411-2420.
- [37] 缪澄宇, 杨柳, 许永震, 等. 基于核磁共振监测的砂岩强度软化实验及微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2189-2198.
- MIAO Cheng-yu, YANG Liu, XU Yong-zhen, et al. Study on strength softening experiment and micro-mechanism of sandstone based on nuclear magnetic resonance[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(11): 2189-2198.
- [38] 刘雄. 流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 126-133.
- LIU Xiong. Introduction to rheology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 126-133.
- [39] LIN H X, ZHANG Q Y, ZHANG L Y, et al. The influence of water content on the time-dependent mechanical behavior of argillaceous siltstone[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2022, 55: 3939-3957.
- [40] WU F, GAO R B, ZOU Q L, et al. Long-term strength determination and nonlinear creep damage constitutive model of salt rock based on multistage creep test: Implications for underground natural gas storage in salt cavern[J]. **Energy Science & Engineering**, 2020, 8(5): 1592-1603.
- [41] 武东生, 孟陆波, 李天斌, 等. 灰岩三轴高温后效流变特性及长期强度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 183-191.
- WU Dong-sheng, Meng Lu-bo, LI Tian-bin, et al. Study of triaxial rheological property and long-term strength of limestone after high temperature[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 183-191.
- [42] YANG X R, JIANG A N, GUO X P. Effects of water content and temperature on creep properties of frozen red sandstone: an experimental study[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2022, 81(1): 51.