

不同层理倾角下千枚岩蠕变力学特性及本构模型研究

贺鑫¹, 陈国庆¹, 孙祥¹, 蒋楠², 鄢凯³

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 江汉大学 精细爆破全国重点实验室, 湖北 武汉 430056; 3. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为研究不同层理倾角岩质边坡开挖卸荷后的岩体蠕变力学特性, 选取层状千枚岩为研究对象, 通过开展多级加载-卸荷三轴蠕变试验, 建立考虑不同层理倾角各向异性特征与时效应变软化机制的层状岩体蠕变模型, 分析不同层理倾角对层状千枚岩蠕变力学特性、长期强度及变形破坏特征的影响。试验结果表明: (1) 层状千枚岩在经历多级加载-卸荷三轴蠕变过程中, 会依次经历衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变3个阶段。其中, 0°和90°层理倾角对蠕变三阶段影响小, 60°层理倾角岩石更快进入加速蠕变阶段, 且蠕变时间最短。(2) 蠕变速率受层理倾角影响显著, 呈各向异性特征, 在最后一级应力水平下, 环向应变增长幅度大于轴向应变, 岩石侧向扩容效应显著。(3) 长期强度随层理倾角的增加呈先降低再增加的趋势, 于45°~60°附近达到长期强度极值, 近似呈现“U型”规律分布。(4) 引入含有层理倾角因子的弹塑性变量体, 建立能够反映不同层理倾角岩体多级加载-卸荷蠕变特征的LSVISC蠕变模型, 试验数据结果与拟合曲线吻合, 可较好地表征不同层理倾角下千枚岩多级加载-卸荷三轴蠕变力学特性, 量化蠕变参数随层理倾角的“U型”变化, 为研究边坡工程中层状岩土体的蠕变力学特性及长期稳定性设计提供理论依据。

关键词: 岩石力学; 层理倾角; 各向异性; 卸荷蠕变; 长期强度; 本构模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)08-2139-14

Creep mechanical properties and constitutive model of phyllite under different bedding dip angles

HE Xin¹, CHEN Guoqing¹, SUN Xiang¹, JIANG Nan², WU Kai³

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan, Hubei 430056, China; 3. Sichuan Highway Planning Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: To investigate the creep mechanical properties of layered rock slopes with varying dip angles following excavation unloading, layered phyllite was selected as the research subject. Multistage loading-unloading triaxial creep tests were conducted to establish a creep model for layered rock masses, taking into account both the anisotropic characteristics associated with different dip angles and the time-dependent strain-softening mechanism. The influence of varying dip angles on the creep mechanical properties, long-term strength, and

收稿日期: 2024-12-02; **修回日期:** 2025-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42372326, 42090054); 四川省科技计划资助(2024YFFK0416)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42372326 and 42090054) and Science and Technology Plan Funding of Sichuan Province (Grant No. 2024YFFK0416)

作者简介: 贺鑫(2001-), 男, 2023年毕业于西南科技大学城市学院工程造价专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石力学与边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: hex_@stu.cdut.edu.cn。通讯作者: 陈国庆(1982-), 男, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: chenguoqing09@cdut.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0931

deformation and failure characteristics of layered phyllite was analyzed. The experimental results indicate that: (1) Layered phyllite experiences three sequential stages during multistage loading-unloading triaxial creep: decelerating creep, steady-state creep, and accelerating creep. Notably, dip angles of 0° and 90° have minimal impact on these three creep stages. In contrast, rock with a dip angle of 60° transitions into the accelerating creep stage more rapidly and exhibits the shortest creep duration. (2) The creep rate is significantly influenced by the dip angle, demonstrating anisotropic characteristics. At the final stress level, the increase in circumferential strain surpasses that in axial strain, indicating a pronounced effect of rock lateral dilatancy. (3) The long-term strength initially decreases and then increases as the dip angle rises, reaching its maximum near 45° – 60° and approximately following a “U-shaped” pattern. (4) An elasto-plastic variable body incorporating a dip angle factor was introduced to establish the LSVISC creep model, which effectively reflects the multistage loading-unloading creep characteristics of rock masses with varying dip angles. The experimental data align well with the model curves, accurately characterizing the multistage loading-unloading triaxial creep mechanical properties of phyllite under different dip angles and quantifying the “U-shaped” variation of creep parameters with respect to dip angle. This study provides a theoretical foundation for exploring the creep mechanical properties and long-term stability design of layered rock and soil masses in slope engineering.

Key words: rock mechanics; bedding dip angle; anisotropy; unloading creep; long-term strength; constitutive model

1 引言

愈多的岩石工程逐渐向边坡岩体内部拓展, 原生地质构造的复杂性日益凸显, 其中, 层理倾角成为影响岩石工程长期稳定性的重要地质因素^[1]。在边坡岩体工程建设开挖过程中, 工程开挖扰动、卸荷松弛、卸荷岩体结构演化等物理力学作用促进了岩体裂隙的衍生及贯通, 内部结构演化逐渐加剧, 层状岩体的承载能力大幅下降。随时间的累积和推移, 岩体变形不断发展, 最终会导致岩体的失稳和坍塌^[2]。因此, 研究层状岩石的各向异性力学特性及考虑不同层理倾角对开挖卸荷岩体蠕变变形破坏的影响变得愈发重要。

近年来, 相关学者针对不同层理倾角岩石的各向异性特征开展了研究。J. C. Fang 等^[3]对层理弱面显著的层状砂岩进行了三轴压缩试验, 分析岩体各向异性力学特性、三轴压缩强度、抗剪强度及破坏模式的影响效应和机制。王伟等^[4]揭示了千枚岩的强度、变形等力学行为与各向异性特性, 探讨了千枚岩宏观破坏机制同层理倾角及脆性的联系。A. Tavallali 和 A. Vervoort^[5]开展了巴西试验获取 Modave 层理砂岩的抗拉强度, 进行了断裂强度分析与能量计算, 总结了层理方向对薄层砂岩破坏应力和断裂模式的影响。研究表明, 当层理倾角为 45° – 60° 时, 岩石的破坏模式由中心断裂转变为层间激活断裂, 层理方向对岩石的破坏强度和模式影响显著。刘冬桥等^[6]对 7 种不同层理角度的黄砂岩

进行了纵波波速测试和单轴压缩试验, 发现随层理倾角增大, 黄砂岩纵波波速逐渐增大, 峰值抗压强度和弹性模量呈现先减小后增大再减小的倒 N 型变化趋势, 各向异性特性明显。

边坡岩体的开挖往往不是一次性完成的, 需要经过多级开挖卸荷的过程, 而岩体开挖卸荷后的失稳破坏也具有明显的时间效应^[7]。近年来关于岩石卸荷蠕变领域的研究也取得了显著进展, 比如: 水电站坝基绿片岩、冻融后红砂岩以及含单一裂隙的砂岩等多种岩石类型的研究^[8–11], 通过开展三轴分级加载蠕变试验与核磁共振检测技术, 揭示了岩石在不同初始卸荷损伤程度、温差及冻融作用影响, 以及不同应力水平条件下的损伤演化行为和蠕变规律。此外, 在岩石蠕变的研究领域中, 蠕变本构模型的构建与探索是蠕变研究最主要的内容之一^[12]。为此, 专业领域学者对蠕变本构模型展开了相关研究。例如, 袁海平等^[13]根据 Mohr-Coulomb 屈服准则提出新的塑性体, 并与经典 Burgers 模型串联, 建立了能呈现黏弹塑性变形的改进 Burgers 模型; B. Y. Zhao 等^[14]提出了一个和时间有关的非线性黏塑性体, 将其与 Burgers 蠕变模型串联形成非线性黏弹塑性蠕变模型, 用以描述单轴压缩和拉伸应力下岩石的蠕变行为; 唐劲舟^[15]基于损伤与断裂力学的非线性岩石流变模型, 考虑岩石内部的微裂隙初始损伤和高温作用下的热损伤, 通过引入损伤变量和温度损伤因子, 建立了能够描述不同热损伤条件下的非线性流变模型。

综上所述, 前人在岩石各向异性特征、卸荷损

伤特性与蠕变模型分析上有诸多方面的研究,但在考虑各向异性特征对岩石蠕变力学特性影响的同时,又考虑不同应力路径下卸荷损伤对蠕变特性的变化影响,并以此分析建立卸荷蠕变模型的研究却少有报道。鉴于此,本文通过对不同层理倾角千枚岩进行多级加载-卸荷三轴蠕变试验,研究千枚岩在复杂应力环境下的蠕变力学特性、长期强度表现及变形破坏模式,分析了不同层理倾角变量因素影响下的细观各向异性特征与非均质差异性特征,通过引入含有层理倾角因子的弹塑性变量体,建立了考虑不同层理倾角各向异性特征与时效应变软化机制的蠕变本构模型 LSVISC,以为层状岩体边坡的蠕变力学特性研究及长期稳定性设计提供参考。

2 试验材料与试验方案

2.1 试样材料与制样

本次试验选用千枚岩试样,其层理天然匀称,无明显节理发育。按照国际岩石力学学会(ISRM)标准,制备5种不同层理倾角(0° , 30° , 45° , 60° , 90°)下 $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ (直径 $\times$ 高度)的标准圆柱体岩样,通过岩块声波速度测试,剔除波速差异较大的试样,以减少试验结果的离散性。取样示意图及加工后千枚岩试样如图1所示。

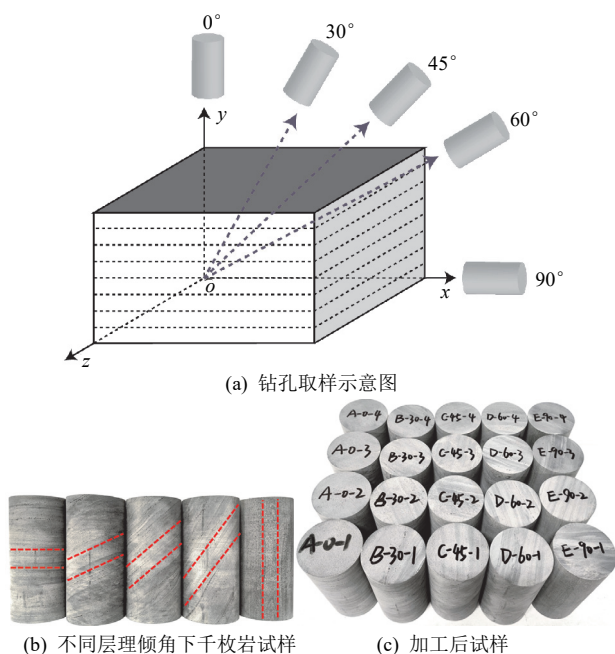


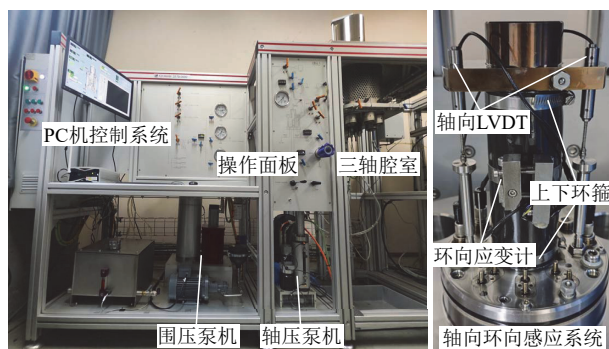
图1 试样钻取示意图及加工后实图

Fig.1 Schematic diagram of sample drilling and post-processing photos

2.2 试验设备

试验设备采用 TOP INDUSTRIE 公司生产的

ROCK600-50VHT 多功能岩石三轴测试系统,设备伺服压力加载系统包括轴向偏应力加载、围压加载,压力采集系统控制精度 $\pm 0.01\text{ MPa}$;试样应变测量系统采用轴向双通道 LVDT 传感器、径向变形量传感器,应变测量精度 $\leq 0.001\text{ mm}$,测量分辨率 $\leq 0.000\text{ 01 mm}$ 。试验设备及系统装置如图2所示。



(a) 岩石三轴流变仪 (b) 轴向环向测量系统图

图2 ROCK600-50VHT 岩石多场多相三轴流变仪及加载系统

Fig.2 ROCK600-50VHT rock multi-field multi-phase triaxial rheometer and loading system

2.3 试验方案

根据我国西南地区深部高地应力隧址区的应力统计情况,结合典型工程应力条件和以往试验设计情况,将初始围压设定为 20 MPa ^[16]。基于常规三轴试验测定的三轴抗压强度值,设计恒轴压-卸围压蠕变试验,进一步分析多级加载-卸荷条件下的蠕变差异行为。

(1) 恒轴-卸围蠕变加载试验

采用载荷加载控制,以 0.05 MPa/s 的速率将轴压和围压分别增加至设定值 $75\%\sigma_p$ (σ_p 为三轴抗压强度)和 20 MPa 后,轴向压力保持不变,同时按照 0.05 MPa/s 的速率卸围压至设计应力值,保持 24 h 时间,观察岩样蠕变情况,重复进行围压分级卸荷操作,直至岩样破坏。

(2) 多级加载-卸荷三轴蠕变试验

多级加载-卸荷三轴蠕变试验采用加轴压卸围压试验方案,初始围压 $\sigma_3 = 20\text{ MPa}$,分级卸荷围压应力梯度为 $5\%\sigma_3$, $10\%\sigma_3$, $15\%\sigma_3$, $20\%\sigma_3$, $25\%\sigma_3$,多级加载轴压数值取千枚岩 $40\%\sigma_p$, $50\%\sigma_p$, $60\%\sigma_p$, $70\%\sigma_p$, $80\%\sigma_p$,轴压进行加载-保持-加载循环,围压进行卸荷-保持-卸荷循环,如图3所示。初始围压 20 MPa 以 0.05 MPa/s 的速率进行分级卸荷,轴压以 0.05 MPa/s 的速率进行多级加载,循环操作直至试样破坏。

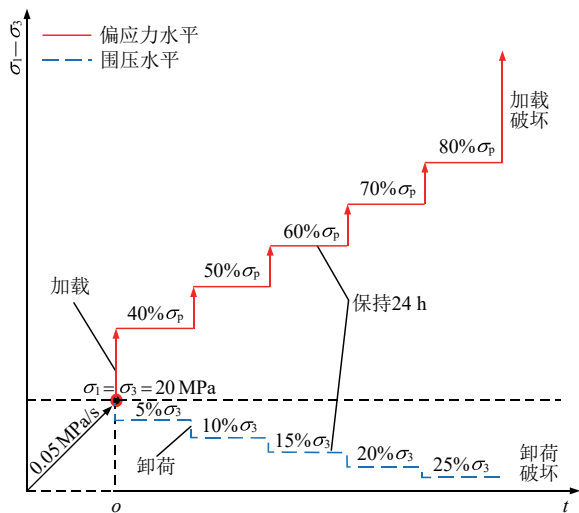


图 3 多级加载 - 卸荷三轴蠕变试验加载方案

Fig.3 Loading scheme for multi-stage loading-unloading triaxial creep test

本文开展了不同层理倾角千枚岩的常规三轴压缩试验, 系统获取了试样的基本物理力学参数, 如表 1 所示。结合常规三轴压缩试验结果和既定试验方案, 设计了不同层理倾角千枚岩分级卸荷三轴蠕变试验的围压应力值为 19, 18, 17, 16, 15 MPa, 多级加载三轴蠕变试验的轴压应力值, 如表 2 所示。

表 1 层状岩样物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of layered rock samples

层理倾角/(°)	γ /(kN·m ⁻³)	c /MPa	φ /(°)	E /GPa	μ
0	27.08	14.78	38.56	16.45	0.25
30	27.17	10.49	36.70	14.23	0.23
45	27.11	12.03	36.66	13.95	0.23
60	27.18	13.22	34.25	13.18	0.24
90	27.09	14.32	37.39	15.84	0.25

注: γ 为重度, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角, E 为弹性模量, μ 为泊松比。

表 2 不同层理倾角千枚岩多级加载三轴蠕变试验应力值

Table 2 Stress values for multi-level loading triaxial creep tests on phyllite with varying bedding dips

试样编号	层理倾角/(°)	Z1 (40% σ_p)	Z2 (50% σ_p)	Z3 (60% σ_p)	Z4 (70% σ_p)	Z5 (80% σ_p)
J-0°-1	0	98.23	122.79	147.35	171.91	196.47
J-30°-2	30	65.32	81.65	97.98	114.31	130.64
J-45°-1	45	49.53	61.91	74.29	86.67	99.05
J-60°-3	60	55.29	69.12	82.94	96.76	110.59
J-90°-1	90	129.88	162.34	194.81	227.28	259.75

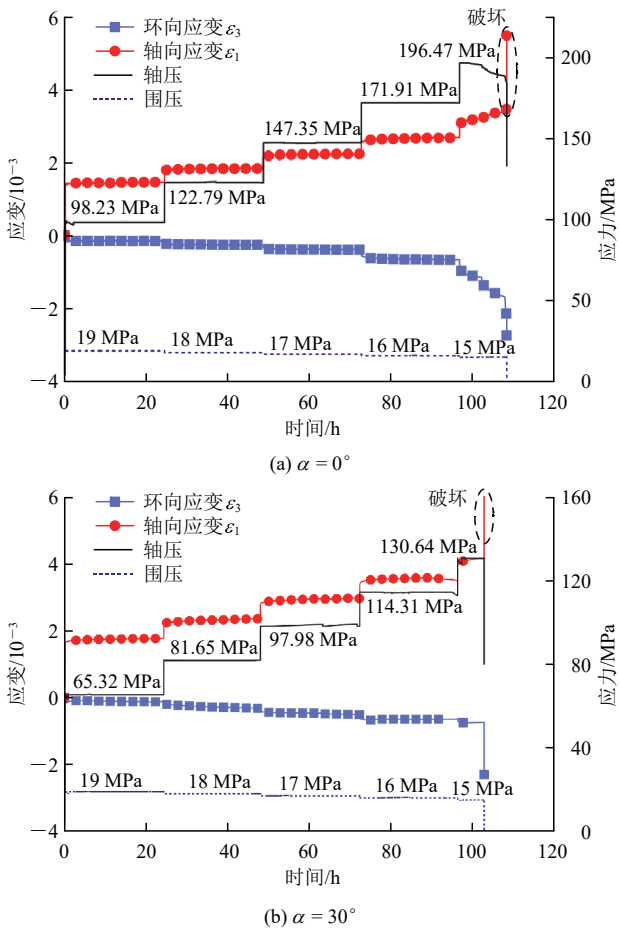
注: (1) 试样编号首位 J 为多级加载 - 卸荷三轴蠕变试验, 中位表示层理角度, 末位为序号; (2) Z1~Z5 为轴压水平。

3 试验结果分析

3.1 全应力 - 应变曲线

通过对 5 个不同层理倾角层状千枚岩的三轴蠕变试验数据进行整理, 建立了如图 4 所示的轴压分别为 40% σ_p , 50% σ_p , 60% σ_p , 70% σ_p 和 80% σ_p 多级加载 - 卸荷三轴蠕变全过程曲线。

层理倾角 $\alpha = 0^\circ$ 试样在前 4 级试验中均包含衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 第 5 级加 - 卸荷破坏应力阶段, 试样在加载完成后进入衰减蠕变阶段, 其间 12 h 内稳态蠕变特征不明显, 而后进入明显的加速蠕变阶段(见图 4(a)); 层理倾角 $\alpha = 30^\circ$ 试样在前 4 级试验中经过衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 于第 5 级轴压 80% σ_p 应力水平加载完成后进入加速蠕变阶段(见图 4(b)); 层理倾角 $\alpha = 45^\circ$ 和 60° 试样在前 4 级和前 3 级试验中均包含衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段, 下一级加 - 卸荷破坏应力阶段, 试样在加载完成后经过 3.87 和 10.32 h 衰减蠕变和稳态蠕变后, 进入加速蠕变阶段; 层理倾角 $\alpha = 60^\circ$ 试样轴向应变出现了“小阶跃式突增”, 而后出现



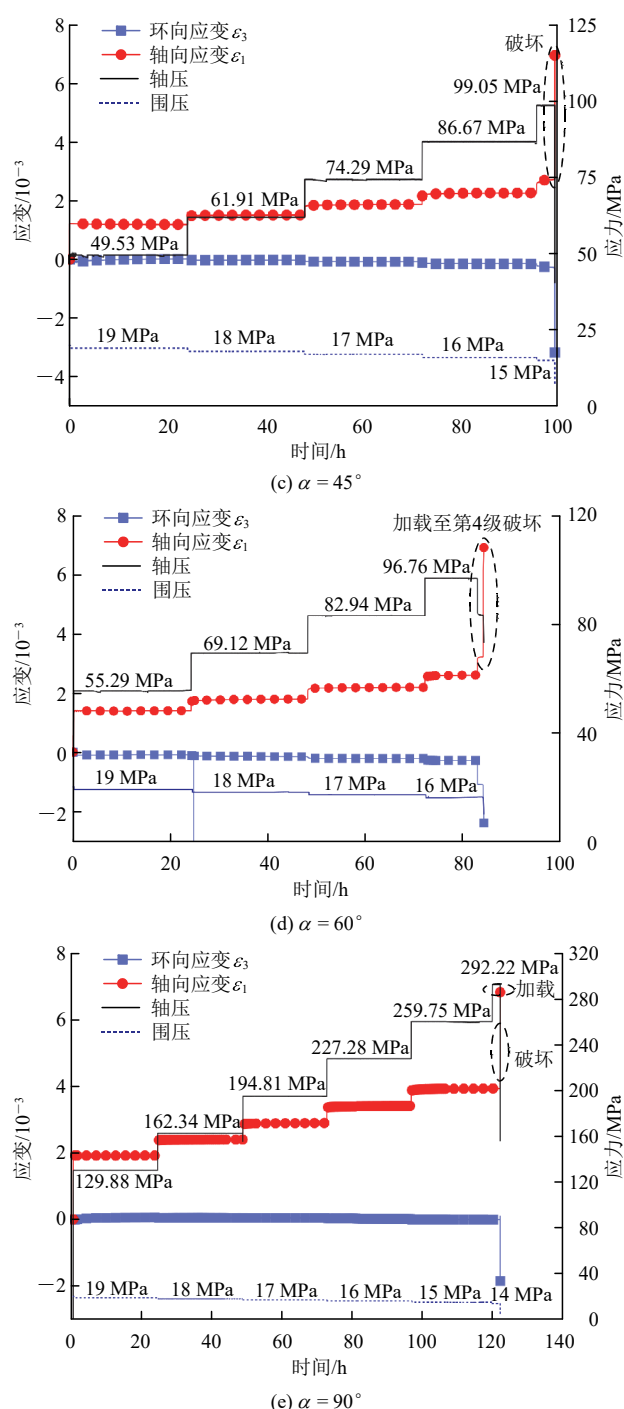


图 4 千枚岩多级加载-卸荷三轴蠕变全过程曲线

Fig.4 Complete process curves of multi-stage loading-unloading triaxial creep test for phyllite

“平台状”稳态蠕变,随后进入加速蠕变阶段,蠕变历时最短(见图 4(c), (d));层理倾角 90° 试样在前 5 级试验中均包含衰减蠕变阶段和稳态蠕变阶段,在轴压应力值至 292.22 MPa 的加-卸荷过程中,出现了加速蠕变破坏(见图 4(e))。

结果表明:不同层理倾角与多级加载-卸荷三轴蠕变破坏呈各向异性,其中 0° 和 90° 层理倾角对蠕变三阶段破坏影响小,加速蠕变阶段破坏受 60°

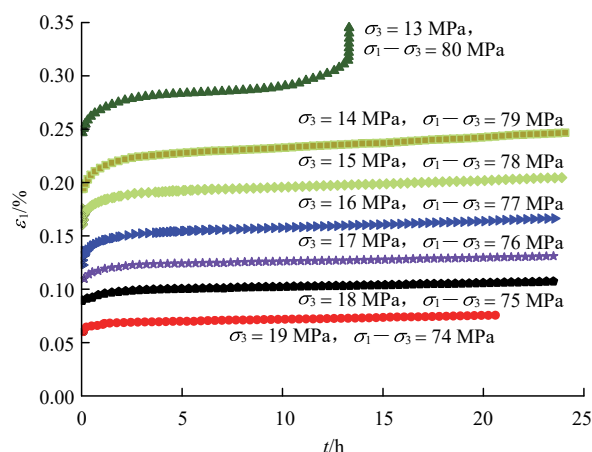
层理倾角影响最大,岩石更快进入加速蠕变阶段,且经历蠕变破坏的时间显著缩短;低应力水平作用下,蠕变变形不明显,随着应力水平的提高,蠕变曲线斜率增大,蠕变特征显现;试样加速蠕变存在应力阈值,在中低应力水平下,岩石蠕变仅包括衰减蠕变和稳态蠕变阶段;在高应力水平下,岩石蠕变呈现完整的衰减蠕变、稳态蠕变和加速蠕变三阶段。

3.2 蠕变变形

(1) 恒轴-卸围与多级加载-卸荷蠕变变形特征

多级加载、卸荷蠕变条件下得到的是一条偏应力逐级增加的全过程蠕变曲线,通过综合叠加原理和岩石试验规范^[17]推荐的分级增量蠕变试验数据处理原则,将全过程蠕变曲线转化为分级荷载下的蠕变曲线。限于篇幅有限,仅展示 45° 层理倾角试样恒轴-卸围蠕变与多级加载-卸荷蠕变试验轴向、环向分级显示曲线对比结果。

如图 5, 6 所示, 45° 层理倾角试件在 2 种不同应力路径下,各级蠕变曲线发展趋势平稳,随着时间增长各级应变呈缓慢增加趋势,且岩石加速蠕变存在阈值,当应力水平超过阈值时,岩石进入加速蠕变阶段,并迅速发生延性扩容破坏。对比 2 种应力路径的不同,恒轴-卸围条件下试件蠕变历经时间为 152.378 h,蠕变历经 7 个阶段,蠕变时间更长,是同条件下多级加载-卸荷试件蠕变时间的 1.53 倍,但其各级应变量增长幅度较小。表明蠕变应变受加卸荷增量的影响,各阶段加卸荷增量越大,蠕变时间越短,蠕变应变也越明显;多级加载-卸荷蠕变往往比恒轴-卸围蠕变的应变值更大,增幅更显著,破坏效应也更剧烈。



(a) 轴向蠕变曲线簇

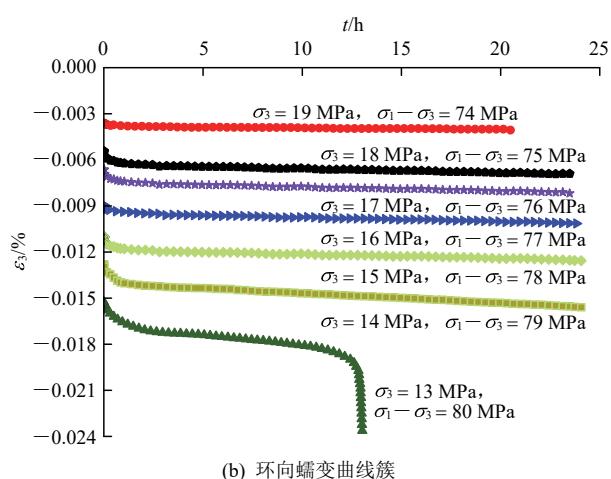
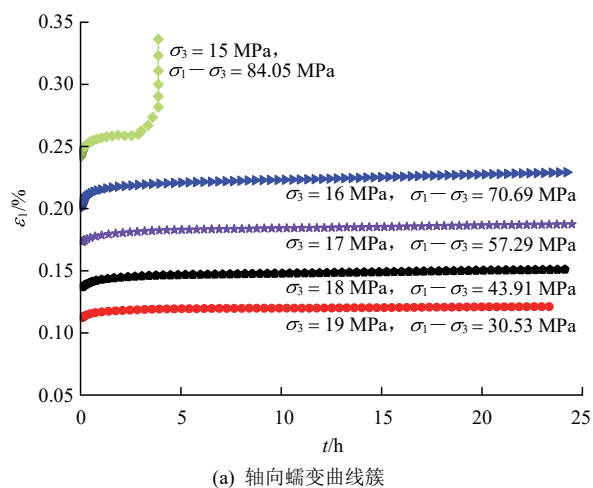
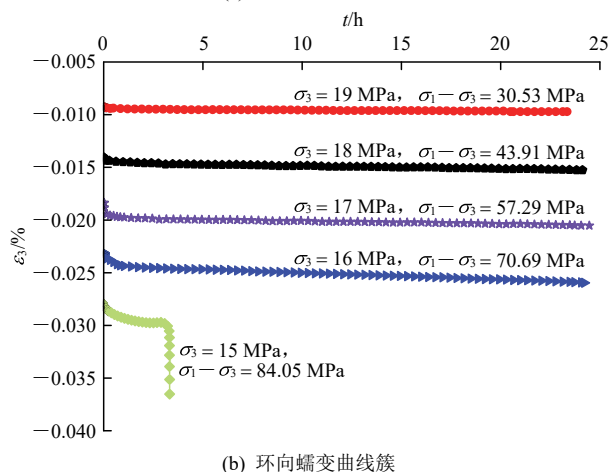


图 5 45°层理倾角恒轴 - 卸围蠕变试验曲线簇

Fig.5 Cluster of creep test curves for 45° bedding angle under constant axial stress and unloading confining pressure



(a) 轴向蠕变曲线簇



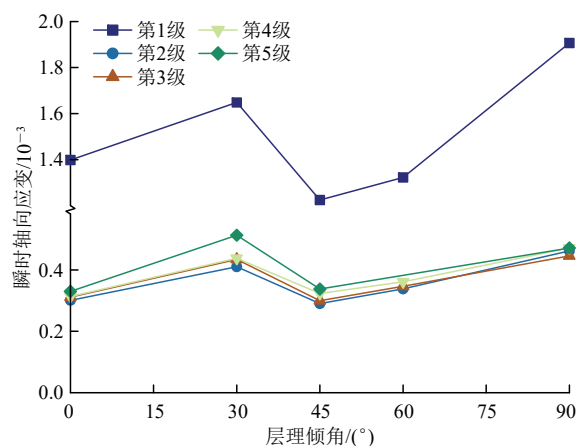
(b) 环向蠕变曲线簇

图 6 45°层理倾角多级加载 - 卸荷三轴蠕变试验曲线簇

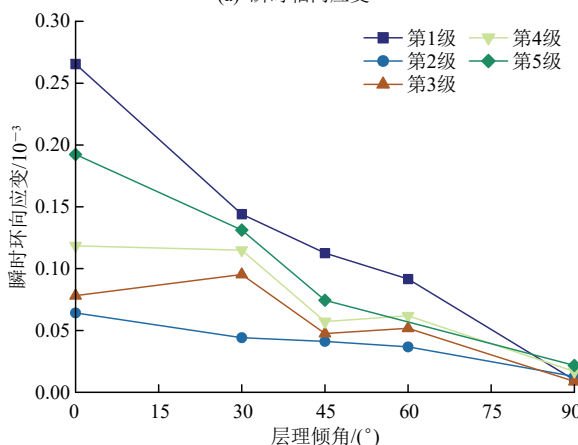
Fig.6 Cluster curves of multi-stage loading-unloading triaxial creep test for phyllite with 45° bedding angle

(2) 多级加载 - 卸荷蠕变试验变形结果

图 7 为 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 不同层理倾角下各等级瞬时变形曲线, 不同应力加载等级瞬时应变如表 3 所示。在多级加载 - 卸荷蠕变试验条



(a) 瞬时轴向应变



(b) 瞬时环向应变

图 7 不同层理倾角下多级加载 - 卸荷蠕变试验瞬时变形曲线

Fig.7 Instantaneous deformation curves of multi-stage loading-unloading creep tests under different bedding angles

件下, 第 1 级应力水平, 试样 J-0-3, J-30-1, J-45-3, J-60-2, J-90-4 初始瞬时轴向应变分别为 0.139 8%, 0.164 8%, 0.122 4%, 0.132 2% 及 0.190 6%, 此阶段瞬时轴向应变增幅较 2, 3, 4 级应力水平下瞬时轴向应变增幅最为显著, 分别占全过程瞬时轴向应变的 52.70%, 47.87%, 49.47%, 55.84% 和 46.58%。

从图 7 中可以看出, 整体而言, 不同层理倾角的轴向瞬时应变比横向瞬时应变效应更为突出, 说明瞬时轴向变形比环向变形更为敏感。J-90-4 试样每阶段瞬时环向变形较其他层理倾角试样应变量更小, 第 1 级应力水平下瞬时环向应变 -0.009×10^{-3} , 占比同级应力水平瞬时环向应变的 1.45%。这表明瞬时环向变形存在应力阈值, 受载初期岩石被压密, σ - ε 曲线呈上凹型, 此阶段环向膨胀较小, 不出现明显的瞬时环向变形。

图 8 为 0°, 30°, 45°, 60°, 90° 不同层理倾角下各等级蠕变变形曲线, 不同应力加载等级蠕变

表 3 不同层理倾角下各级瞬时应变
Table 3 Instantaneous strains at various levels under different bedding dip angles

试样 编号	第 1 级		第 2 级		第 3 级		第 4 级		第 5 级	
	$\varepsilon_{a,0}^i$	$\varepsilon_{b,0}^i$	ε_a^i	ε_b^i	ε_a^i	ε_b^i	ε_a^i	ε_b^i	ε_a^i	ε_b^i
J-0-3	1.398	-0.265	0.301	-0.064	0.311	-0.078	0.313	-0.118	0.330	-0.192
J-30-1	1.648	-0.144	0.410	-0.044	0.434	-0.095	0.437	-0.115	0.513	-0.131
J-45-3	1.224	-0.112	0.290	-0.041	0.300	-0.048	0.323	-0.057	0.338	-0.074
J-60-2	1.322	-0.091	0.338	-0.037	0.347	-0.052	0.361	-0.062	-	-
J-90-4	1.906	-0.009	0.461	-0.013	0.446	-0.009	0.471	-0.017	0.471	-0.022

注： $\varepsilon_{a,0}^i$ 为初始瞬时轴向应变， $\varepsilon_{b,0}^i$ 初始瞬时环向应变， ε_a^i 为瞬时轴向应变， ε_b^i 瞬时环向应变。

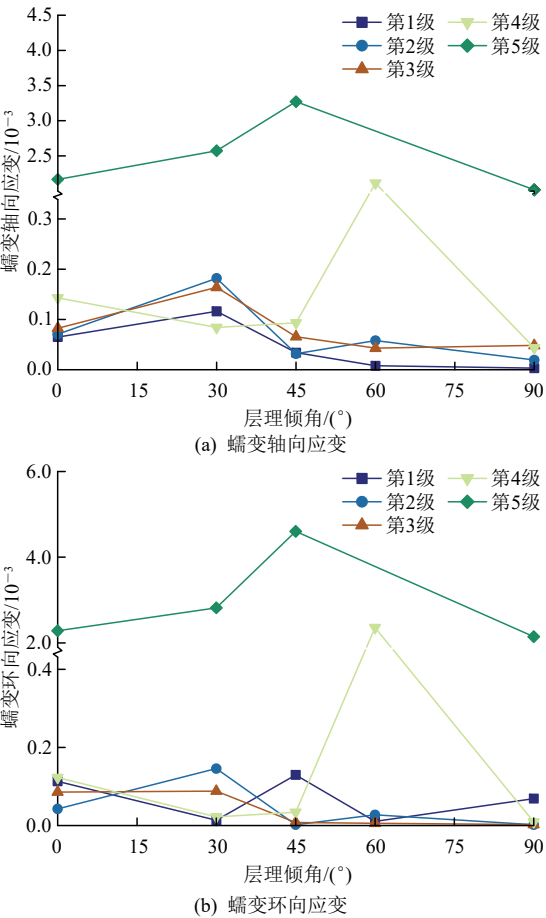


图 8 不同层理倾角下多级加载-卸荷蠕变试验蠕变变形曲线
Fig.8 Creep deformation curves of multi-stage loading-unloading creep tests under different bedding angles

表 4 不同层理倾角下各级蠕变应变
Table 4 Creep strains at various levels under different bedding dip angles

试样 编号	第 1 级		第 2 级		第 3 级		第 4 级		第 5 级	
	ε_a^c	ε_b^c	ε_a^c	ε_b^c	ε_a^c	ε_b^c	ε_a^c	ε_b^c	$\varepsilon_{a,c}^c$	$\varepsilon_{b,c}^c$
J-0-3	0.065	-0.114	0.071	-0.043	0.082	-0.086	0.142	-0.123	2.167	-2.283
J-30-1	0.116	-0.014	0.182	-0.146	0.164	-0.088	0.084	-0.022	2.574	-2.819
J-45-3	0.034	-0.130	0.032	-0.002	0.066	-0.008	0.094	-0.034	3.271	-4.603
J-60-2	0.008	-0.011	0.058	-0.027	0.043	-0.006	-	-	2.114	-2.355
J-90-4	0.004	-0.069	0.019	-0.002	0.048	-0.003	0.043	-0.010	2.018	-2.146

注： ε_a^c 为蠕变轴向应变， ε_b^c 为蠕变环向应变， $\varepsilon_{a,c}^c$ 为加速蠕变轴向应变， $\varepsilon_{b,c}^c$ 为加速蠕变环向应变。

应变量如表 4 所示。由图 8 可知，各试样在破坏应力水平之前，蠕变轴向应变量和环向应变变量均较小，在最后一级应力水平下，试件在整个蠕变过程中出现了蠕变突增，并发生了蠕变破坏。试样 J-0-3, J-30-1 和 J-45-3 于第 5 级加载发生了加速蠕变破坏，蠕变环向应变为-0.228 3%，-0.281 9%和-0.460 3%，蠕变环向应变增幅显著，分别占全过程蠕变环向应变的 86.20%，91.25%和 96.35%；蠕变轴向应变为 0.2167%，0.2574%和 0.327 1%。J-45-3 试样加速蠕变阶段轴向和环向应变为 3.271×10^{-3} 和 -4.603×10^{-3} ，应变增幅最大。由此可见，层状岩体其蠕变力学特性及破坏效应受层理倾角的影响，且呈显著各向异性，其中，45° 层理倾角蠕变应变效应最为显著。

3.3 长期强度

本文采用稳态蠕变速率法识别岩石不稳定扩展的应力阈值，并将稳态蠕变速率-应力水平关系曲线中的拐点作为表征岩石长期强度的关键指标^[18-19]。以层理倾角 45° 流变试验结果为例，如图 9 所示，通过分析轴向应变稳态蠕变速率与偏应力水平的非线性关系，采用指数函数拟合稳态蠕变速率整体曲线，并分别对拐点前后区段进行线性回归拟合，最终两直线的交点即作为曲线拐点来确定长期强度。

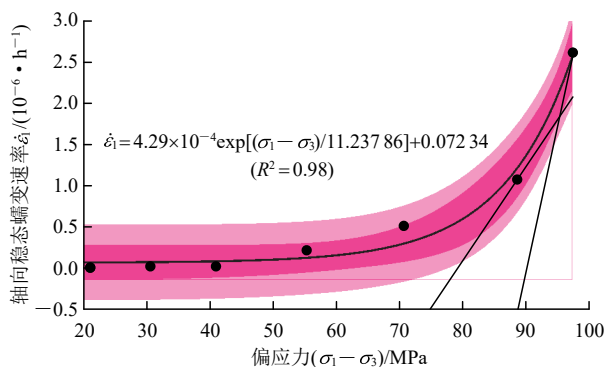


图9 层理倾角 45° 的轴向稳态蠕变速率与偏应力关系曲线
Fig.9 Relationship curve between axial steady-state creep rate and deviatoric stress for the bedding angle of 45°

图 10 给出了不同层理倾角千枚岩三轴卸荷蠕变长期强度, 0° 层理倾角千枚岩的长期强度为 193.85 MPa, 当层理倾角为 30°, 45° 和 60° 时, 千枚岩长期强度分别降至 140.29, 94.36 和 96.28 MPa, 降幅分别为 27.50%, 51.23% 和 50.24%, 层理倾角 90° 时千枚岩长期强度增至 284.30 MPa, 最大增幅为 46.91%。可见层状千枚岩的长期强度随不同层理倾角的增加呈非线性降低的趋势, 在 45°~60° 层理倾角时长期强度达到极值, 当层理倾角增加至 60° 后, 千枚岩长期强度增长趋势由非线性缓慢增长转为近线性增长的趋势; 层理倾角因素对试样的时效力学性能影响较大, 当层理倾角为 30°~60° 时各向异性效应最为显著, 千枚岩长期强度出现大幅度下降, 其变化趋势近似“U”型走向, 层理倾角作用对千枚岩长期强度的影响效应急剧突显。

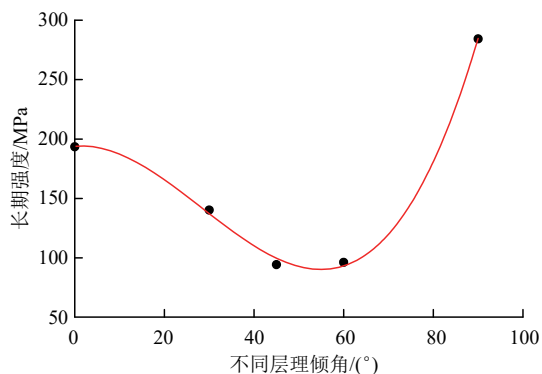


图 10 不同层理倾角千枚岩三轴卸荷蠕变长期强度
Fig.10 Long-term strengths of phyllite under triaxial unloading creep with different bedding plane dip angles

3.4 破坏模式

图 11 给出了不同层理倾角千枚岩试样恒轴 - 卸围及多级加载 - 卸荷蠕变试验下的破裂形态。在恒轴 - 卸围蠕变加载试验条件下, 千枚岩试样的破坏特征以剪切破坏为主, 层理倾角对岩石破坏模式

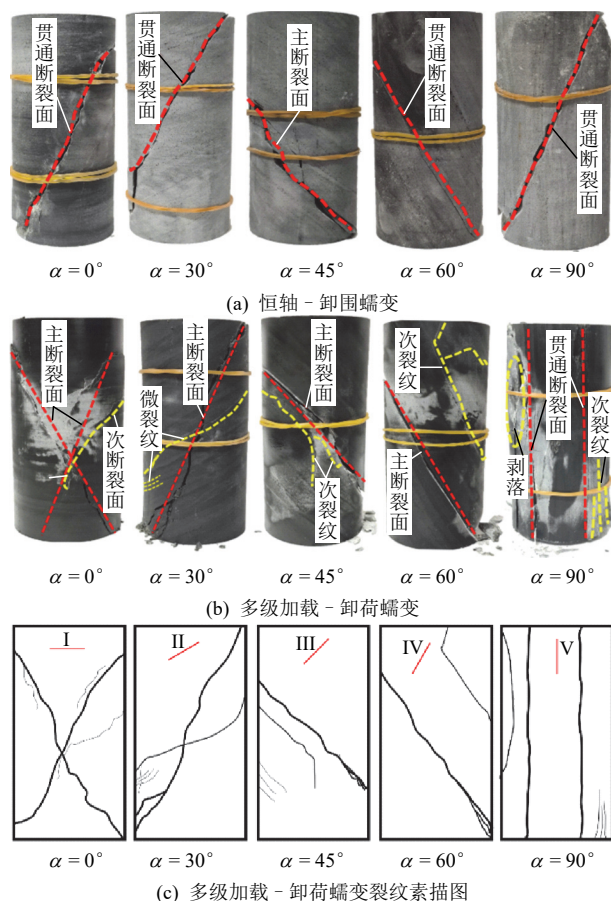


图 11 层状千枚岩恒轴 - 卸围及加载 - 卸荷蠕变破坏形态
Fig.11 Failure modes of layered phyllite under constant axial stress-unloading confining pressure and loading-unloading creep tests

具有显著影响: 当层理倾角为 0° 时, 试样主要表现为剪切破坏, 剪切面沿水平层理面斜切向下; 当层理倾角为 30°, 45° 和 60° 时, 破坏模式转变为近似沿各自弱层理面的剪切滑移破坏; 而当层理倾角为 90° 时, 则表现为沿层理与基质面之间的滑剪破坏。

在多级加载 - 卸荷蠕变试验条件下, 其破坏特征主要表现为张拉 - 剪切复合型破坏, 且破坏模式随层理倾角变化呈规律性差异: 层理倾角为 0° 时, 试样沿着层理面两端部发生“X”型共轭斜截面剪切破坏; 层理倾角为 30° 时, 试样产生近似沿层理面方向贯通的主破裂面, 沿 II 型层面发育数条微裂纹延伸至表面, 裂纹进一步扩展发育产生张裂纹, 最终表现为张拉 - 剪切复合型破坏; 在层理倾角分别为 45° 和 60° 时, 样品破坏整体呈沿 III 和 IV 型斜面剪切破坏, 有少量次生裂纹沿层理倾角面平行分布, 剪切面两侧岩样较为完整, 破坏模式以剪切贯通为主; 90° 层理倾角时, 样品表面出现大量竖向裂纹, 且伴随有岩块剥落, 蠕变破裂形态最为复杂。

4 考虑层理倾角的岩石损伤蠕变模型

4.1 SVISC 模型及层理倾角损伤元件的引入

传统 Burgers 模型为 Kelvin 体、Maxwell 体串联组成, 可表征岩体破坏过程中的黏弹性特性。X. Sun 等^[20]在传统 Burgers 模型的基础上, 串联了 Stain-Softening 应变软化元件, 建立了考虑时效特性的应变软化力学模型 SVISC, 其本构关系为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_m} + \left(\frac{\sigma}{\eta_m} \right) t + \frac{\sigma}{E_k} \left[1 - \exp \left(-\frac{E_k}{\eta_k} t \right) \right] + \varepsilon^p \quad (1)$$

式中: E_m , E_k , η_m , η_k 分别为弹性模量、黏弹性模量、马克斯韦尔黏滞系数和开尔文黏滞系数; ε , σ , t 分别为模型总应变、总应力和总时间; ε^p 为应变软化模型塑性应变。

本文基于 SVISC 应变软化模型理论, 引入含有层理倾角因子的弹塑性损伤 B&D 元件, 如图 12 所示。

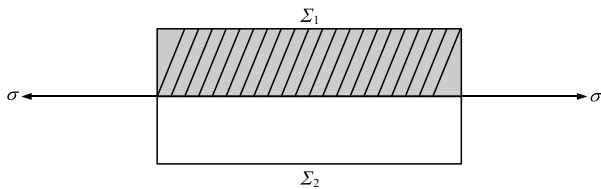


图 12 非线性层理倾角损伤 B&D 元件

Fig.12 Nonlinear bedding angle damage B&D element

设整体元件面积为 Σ , 受损伤部分面积表示为 Σ_1 , 未受损伤部分面积用 Σ_2 表示, 受损伤与未受损伤部分属于并联状态。在应力 σ 作用下, 该元件所产生的总应变 ε 与 Σ_1 , Σ_2 对应产生的 ε_1 , ε_2 相等, 平衡方程表示为

$$\sigma \Sigma = \sigma_2 \Sigma_2 \quad (2)$$

在应力加载过程中, 层状损伤元件中受损伤区域 Σ_1 不产生作用时, 此时非线性层理倾角损伤 B&D 元件退化为弹性元件, 未受损区域 Σ_2 满足 Hookean 定律:

$$\sigma'_2 = E_2 \varepsilon'_2 \quad (3)$$

式中: σ'_2 , E_2 , ε'_2 分别为未受损伤部分所受应力、弹性模量和应变。由此可得, 非线性层理倾角损伤 B&D 元件受损伤部分的损伤变量为 $D_m = \Sigma_1 / \Sigma$, 则

$$\sigma = \sigma_2 (1 - D_m) \quad (4)$$

根据非线性层理倾角损伤 B&D 元件并联关系的应力-应变关系准则, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon'_2$, 通过联立式(2)~(4), 得

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 (1 - D_m) \quad (5)$$

根据 Kachanov 蠕变损伤演化理论^[21], 将非线

性层理倾角损伤变量 θ 引入到 Kachanov 蠕变损伤演化方程中, 变材料模型参数 m 为关于 θ 的函数, 得

$$D_{m(\theta)} = \left[\frac{\sigma}{\delta(1-D)} \right]^{m(\theta)} \quad (6)$$

$$\dot{D}_{m(\theta)} = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_E} \right)^{\frac{1}{m(\theta)+1}} \quad (7)$$

式中: δ 和 m 为模型参数, 与岩石材料性质相关; D 为损伤因子。

根据 Kachanov 蠕变损伤演化理论, 将蠕变损伤时间阈值设定为 t_s , 在此之前岩石材料不发生损伤, 达到损伤起始阈值后, 层理倾角损伤元件中损伤区域 Σ_1 开启, 则可将式(7)改进得到:

$$\dot{D}_{m(\theta)} = \begin{cases} 0 & (t < t_s) \\ 1 - \left(1 - \frac{t}{t_E} \right)^{\frac{1}{m(\theta)+1}} & (t \geq t_s) \end{cases} \quad (8)$$

式中: t_s 为蠕变初始时刻, t_E 为蠕变破坏时刻。

考虑非线性层理倾角损伤变量 θ , 将层理倾角 θ 函数表达式代入式(8)中, 得到非线性层理倾角损伤 B&D 元件的蠕变本构方程:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_1}{E_1} & (t < t_s) \\ \frac{\sigma_1}{E_1} \left(1 - \frac{t}{t_E} \right)^{\frac{1}{m(\theta)+1}} & (t \geq t_s) \end{cases} \quad (9)$$

4.2 改进蠕变本构模型 LSVISC

基于岩体加-卸荷三轴蠕变时效演化机制和应变软化模型, 引入含有层理倾角因子的弹塑性变量体, 建立可以描述不同层理倾角岩体多级加载-卸荷蠕变各阶段特征的非线性蠕变模型(LSVISC)如图 13 所示。

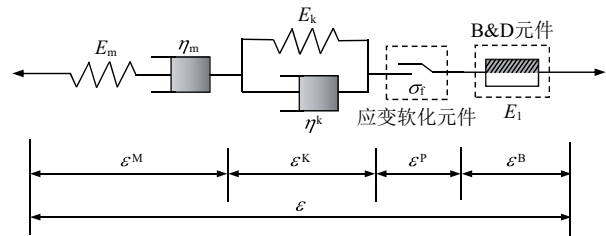


图 13 考虑不同层理倾角影响下的各向异性 LSVISC 蠕变本构模型

Fig.13 Anisotropic LSVISC creep constitutive model considering the influence of different bedding angles

根据试验应力-黏弹应变曲线可知, 不同层理倾角下千枚岩应变呈时效性, 即应变随时间增长而增加, 选择非松弛模型 Kelvin 体进行表示:

$$\sigma = \sigma' + \sigma'' = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (10)$$

若在 $t=0$ 时, 瞬时加上应力 $\sigma = \sigma_0$ 保持不变, 则可得其本构关系:

$$\eta\dot{\varepsilon} + E\varepsilon = \sigma_0 \quad (11)$$

通过对式(11)积分, 得非松弛模型 Kelvin 体应变为

$$\varepsilon^K = \frac{\sigma_0}{E} [1 - \exp(-\lambda t)] = \frac{\sigma_0}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k}{\eta^k} t\right) \right] \quad (12)$$

式中: σ_0 为初始应力, E 为弹性模量, λ 为松弛速率参数。

同理可得 Maxwell 体和 B&D 元件模型本构方程为

$$\varepsilon^M = \frac{\sigma_1}{E_m} + \frac{\sigma_1}{\eta_m} t \quad (13)$$

$$\varepsilon^B = \varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_1}{E_1} & (t < t_s, \sigma \geq \sigma_f) \\ \frac{\sigma_1}{E_1} \left(1 - \frac{t}{t_E}\right)^{\frac{1}{m(\theta)+1}} & (t \geq t_s, \sigma \geq \sigma_f) \end{cases} \quad (14)$$

定义 ε^P 为未知待定函数, 考虑非线性层理倾角损伤 B&D 元件影响未知参数。因此, 根据各元件的基本特征及应力作用情况, 按照 Boltzmann 叠加原理, 构建基于改进 LSVISC 非线性层理倾角千枚岩蠕变模型轴向蠕变方程:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_m} + \frac{\sigma}{\eta_m} t + \frac{\sigma}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k}{\eta^k} t\right) \right] & (\sigma < \sigma_f) \\ \frac{\sigma}{E_m} + \frac{\sigma}{\eta_m} t + \frac{\sigma}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k}{\eta^k} t\right) \right] + \varepsilon^P + \frac{\sigma}{E_1} & (t < t_s, \sigma \geq \sigma_f) \\ \frac{\sigma}{E_m} + \frac{\sigma}{\eta_m} t + \frac{\sigma}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k}{\eta^k} t\right) \right] + \varepsilon^P + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - \frac{t}{t_E}\right)^{\frac{1}{m(\theta)+1}} & (t \geq t_s, \sigma \geq \sigma_f) \end{cases} \quad (15)$$

式(15)为一维蠕变方程, 而本次试验对岩石进行了三轴蠕变试验, 为此, 引入弹塑性力学理论对上述一维方程进行三维扩展。在三维应力状态下, 应力张量 σ_{ij} 可分解为球形应力张量 σ_m 和应力偏斜张量 S_{ij} :

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m \quad (16)$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 函数。

对于 Hooke 体, 根据广义 Hooke 定律可知其弹性体三维本构关系为

$$\varepsilon_{ij}^h = \frac{1}{2G_h} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} \quad (17)$$

式中: ε_{ij}^h 为 Hooke 体应变; G_h , K 分别为剪切模量和体积模量。同理, 假设岩石的体积变化为弹性, 则 Kelvin 体三维本构方程为

$$\varepsilon_{ij}^k = \frac{1}{2G_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_k}{\eta_k} t\right) \right] S_{ij} \quad (18)$$

式中: ε_{ij}^k 为 Kelvin 体应变, G_k 为黏弹性剪切模量。

而对于黏塑性体, 根据广义塑性力学定律可知其三维本构关系为

$$\varepsilon_{ij}^{pb} = \frac{1}{\eta_p} \psi \left(\frac{F}{F_0} \right) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} t \quad (19)$$

式中: ε_{ij}^{pb} 为黏塑性体应变, F 为岩石屈服函数, F_0 为屈服参考值, g 为岩石的塑性势函数, η_p 为非线性层理倾角损伤元件的黏滞系数, $\psi(\cdot)$ 为幂函数。

本文以 Mohr-Coulomb 屈服准则描述岩石的塑性变形规律, 在主向空间中有剪切和张拉屈服, 其公式为

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (20)$$

$$f_t = \sigma_t - \sigma_3 \quad (21)$$

式中: σ_1 , σ_3 分别定义最大主应力和最小主应力; c 为岩石的黏聚力; φ 为内摩擦角。势函数 g 为

$$g_s = \sigma_1 - \sigma_3 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \quad (22)$$

$$g_t = -\sigma_3 \quad (23)$$

式中: ϕ 为剪胀角, g_s 为剪切塑性流动的势函数, g_t 为张拉塑性流动的势函数。定义 ε_s 为时效性损伤应变阈值, 当 $\varepsilon_e = \sqrt{(\varepsilon^M)^2 + (\varepsilon^K)^2 + (\varepsilon^P)^2 + (\varepsilon^B)^2} \geq \varepsilon_s$ 时, 岩石进入损伤阶段, 其蠕变参数开始变化。因此, 得到基于改进 LSVISC 非线性层理倾角千枚岩蠕变模型三维本构方程为

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2G_h} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{1}{2G_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_k}{\eta_k} t\right) \right] S_{ij} & (F < 0) \\ \frac{1}{2G_h} S_{ij} + \frac{1}{3K} \sigma_m \delta_{ij} + \frac{1}{2G_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_k}{\eta_k} t\right) \right] S_{ij} + \frac{1}{\eta_p} \psi \left(\frac{F}{F_0} \right) \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} t & (F \geq 0) \end{cases} \quad (24)$$

式(24)联合球应变张量 $\delta_{ij} \varepsilon_m$, 整理得到千枚岩蠕变模型的三维轴向蠕变方程为

$$\varepsilon_{ij} = \begin{cases} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_h} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_k} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{G_k}{\eta_k} t\right) \right] & (\sigma < \sigma_f) \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_h} + \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{9K} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3G_k} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{G_k}{\eta_k} t\right) \right] + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{3\eta_p} t & (\sigma \geq \sigma_f) \end{cases} \quad (25)$$

4.3 参数辨识与本构模型验证

由于篇幅有限，选取 0°，30° 和 90° 层理倾角加－卸荷试验进行阐释。本文所构建模型参数涉及 G_h ， K ， G_k ， η_k 和 η_p ，采用数学算法优化软件 1stOpt 进行曲线迭代拟合及参数求解，优化算法综合比拟了准牛顿法 Quasi-Newton(BFGS)和麦夸特法 Levenberg-Marquardt(LM)，决定采用 Levenberg-Marquardt(LM)+通用全局优化法求解，辨识的 LSVISC 模型参数见表 5~7。以最后一阶段应力加

载为例，将传统 Burger 元件模型与本文所建改进后的 LSVISC 蠕变模型对试验数据进行拟合，对比曲线如图 14 所示。

由表 5~7 和图 14 可知，本文改进的 LSVISC 蠕变模型对千枚岩蠕变数据的总体辨识效果较好，蠕变曲线更加接近于试验曲线，平均 $R^2=0.990\ 5$ ，高于传统 Burgers 元件模型的平均 $R^2=0.958\ 4$ ；其中，0° 层理倾角的曲线拟合相关性最强，拟合效果最佳。改进后的 LSVISC 蠕变模型与传统 Burgers 元件模型的差异主要体现在最后一级的加速蠕变阶段，曲线更贴合于试验数据，对蠕变过程前期衰减蠕变和稳态蠕变的辨识相差不大。

因层理倾角蠕变损伤参数 η_p 在模型加速蠕变阶段起重要作用，在此对蠕变损伤参数 η_p 进行敏感性分析。图 15，16 给出了层理倾角蠕变损伤参数 η_p 对模型加速蠕变阶段的影响规律。由图 15 可以看出，在加速蠕变阶段各层理倾角 η_p 值呈比例减小

表 5 0° 层理倾角加－卸荷试验改进 LSVISC 蠕变模型参数
Table 5 Parameters of the improved LSVISC creep model for loading-unloading tests at a 0° bedding dip angle

试样编号	w_y /MPa	p_y /MPa	G_h /GPa	K /GPa	G_k /GPa	η_k /(GPa·h)	η_p /(GPa·h)	R^2
J-0-3	19	98.23	74.10	93.35	74.57	316.20	—	0.995 4
	18	122.79	77.39	88.30	75.39	320.63	—	0.986 2
	17	147.35	83.49	98.12	63.94	283.52	—	0.997 4
	16	171.91	98.97	99.52	57.29	211.76	52.53	0.988 9
	15	196.47	42.48	76.38	3.46	63.82	43.69	0.991 5

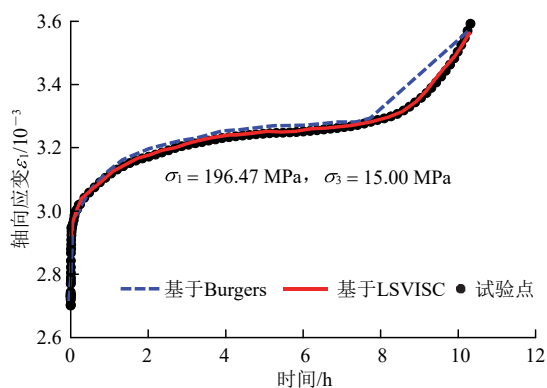
注： w_y 表示各级围压水平， p_y 表示各级轴压水平。下同。

表 6 30° 层理倾角加－卸荷试验改进 LSVISC 蠕变模型参数
Table 6 Parameters of the improved LSVISC creep model for loading-unloading tests at a 30° bedding dip angle

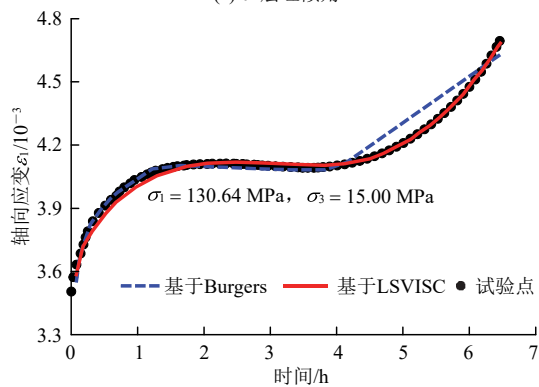
试样编号	w_y /MPa	p_y /MPa	G_h /GPa	K /GPa	G_k /GPa	η_k /(GPa·h)	η_p /(GPa·h)	R^2
J-30-1	19	49.53	53.49	63.93	52.86	253.90	—	0.996 8
	18	61.91	66.71	64.85	43.94	259.04	—	0.991 3
	17	74.29	68.32	66.39	39.75	208.56	—	0.984 7
	16	86.67	71.02	60.28	14.72	131.86	37.81	0.993 6
	15	99.05	24.56	31.63	2.33	40.11	36.831	0.978 3

表 7 90° 层理倾角加－卸荷试验改进 LSVISC 蠕变模型参数
Table 7 Parameters of the improved LSVISC creep model for loading-unloading tests at a 90° bedding dip angle

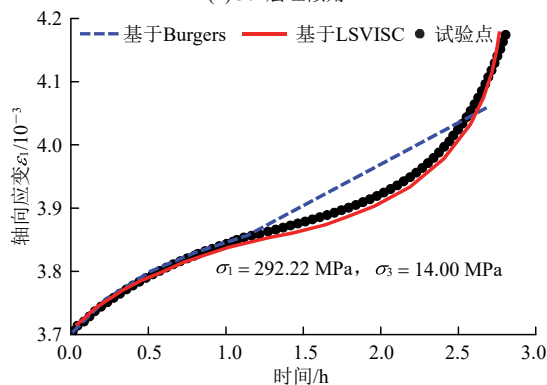
试样编号	w_y /MPa	p_y /MPa	G_h /GPa	K /GPa	G_k /GPa	η_k /(GPa·h)	η_p /(GPa·h)	R^2
J-90-4	19	129.88	80.25	96.30	62.36	428.48	—	0.990 5
	18	162.34	96.35	98.56	70.37	530.92	—	0.985 7
	17	194.81	103.48	108.39	68.04	433.64	—	0.997 2
	16	227.28	103.07	115.38	60.37	384.65	63.36	0.993 4
	15	259.75	147.59	83.47	56.35	350.69	62.75	0.994 8
	14	292.22	63.08	41.86	13.06	103.57	50.81	0.983 0



(a) 0°层理倾角



(b) 30°层理倾角



(c) 90°层理倾角

图 14 破裂围压下试验曲线与 2 种模型曲线的拟合对比
Fig.14 Comparison of experimental curves under confining pressure with fitting curves of two models

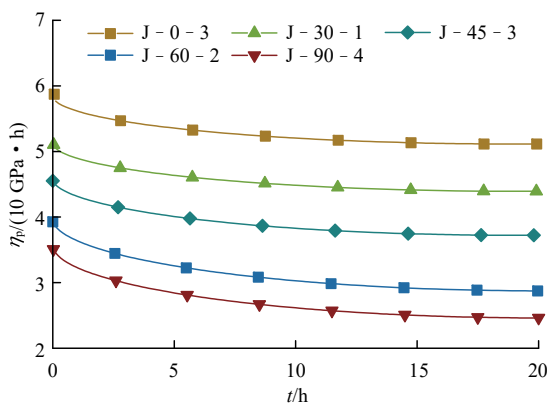
图 15 加速蠕变阶段损伤参数 η_p 变化规律

Fig.15 Variation law of damage parameter η_p during the accelerated creep stage

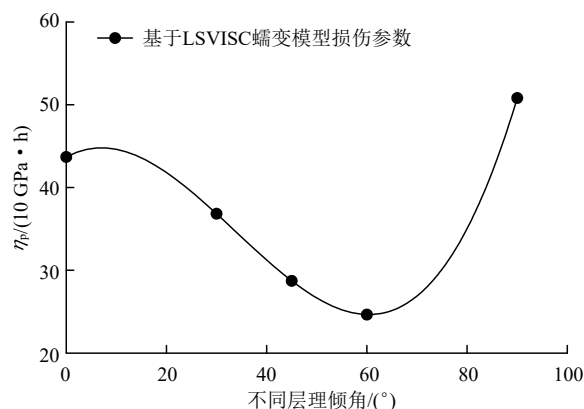
图 16 损伤参数 η_p 随层理倾角的变化规律

Fig.16 Variation law of damage parameter η_p with the bedding angle

趋势，如在本次试验中，加速蠕变阶段各层理倾角千枚岩的 η_p 均值为 36.94 GPa·h，受层理倾角因素控制效果明显；其中 90° 层理倾角千枚岩的 η_p 值为 50.81 GPa·h，受层理倾角因素控制效果最弱，60° 层理倾角千枚岩的 η_p 值为 24.65 GPa·h，进入加速蠕变阶段的时间最快，经历蠕变破坏的时间最短，对加速蠕变阶段破坏影响最明显。由图 16 可知， η_p 随层理倾角先减小后增大，在 60° 层理倾角时取得最小值，表明不同层理倾角千枚岩蠕变阶段的蠕变速率随层理倾角先增大后减小，受层理倾角因素影响，呈显著各向异性。

5 结 论

本文对层状千枚岩进行了不同角度下的多级加载-卸荷蠕变试验研究，分析了不同层理倾角 0°，30°，45°，60°，90° 下千枚岩蠕变力学特性和各向异性力学行为，包括蠕变变形、长期强度、破坏模式、本构模型和参数显化。主要结论如下：

(1) 在多级加载-卸荷条件下，岩石表现出典型的三阶段蠕变特征，0° 层理倾角试样沿层理面两端形成“X”型共轭斜截面剪切破坏，90° 层理倾角试样则产生大量竖向张拉裂纹，其中 45° 层理倾角的蠕变效应最为显著，而 60° 层理倾角则更易进入加速蠕变阶段。

(2) 长期强度随不同层理倾角的增加先呈非线性降低趋势，在 45°~60° 附近长期强度达到极值，当层理倾角增加至 60° 后，增长趋势由非线性缓慢增长转为近线性增长，近似呈现“U 型”规律分布，且 90° 层理倾角岩石长期强度大于 0° 层理倾角岩石

长期强度。

(3) 考虑了层状岩体的各向异性特征与时效应变软化机制, 引入含有层理倾角因子的弹塑性变量体, 建立了描述不同层理倾角千枚岩多级加载-卸荷蠕变特性的力学本构模型, 量化了蠕变参数随层理倾角的“U型”变化。

本文聚焦边坡工程中层状岩土体的卸荷蠕变力学特性研究, 相关成果可为工程长期稳定性设计与应用提供理论参考。

参考文献(References):

- [1] 王伟, 罗霄, 陈超, 等. 层状岩石不排气三轴压缩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(5): 1 334 - 1 342.(WANG Wei, LUO Xiao, CHEN Chao, et al. Experimental study on the mechanical properties of layered rocks under undrained triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(5): 1 334 - 1 342.(in Chinese))
- [2] 陈兴周, 白亚妮, 陈莉莉, 等. 高渗透与循环加卸载环境下开挖卸荷岩体力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(4): 737 - 745.(CHEN Xingzhou, BAI Yani, CHEN Lili, et al. Experimental study on the mechanical properties of excavated unloaded rock mass under high osmotic pressure and cyclic loading-unloading conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(4): 737 - 745.(in Chinese))
- [3] FANG J C, DENG H F, WANG W, et al. Experimental study on anisotropic unloading mechanical behavior of bedded sandstone[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 13988.
- [4] 王伟, 张宽, 曹亚军, 等. 层状千枚岩各向异性力学特性与脆性评价研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(4): 975 - 989.(WANG Wei, ZHANG Kuan, CAO Yajun, et al. Study on anisotropic mechanical properties and brittleness evaluation of layered phyllite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(4): 975 - 989.(in Chinese))
- [5] TAVALLALI A, VERVOORT A. Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(2): 313 - 322.
- [6] 刘冬桥, 郭允朋, 李杰宇, 等. 基于耗散能演化的层状黄砂岩损伤本构模型及其验证[J]. 工程科学学报, 2024, 46(5): 784 - 799.(LIU Dongqiao, GUO Yunpeng, LI Jieyu, et al. Damage constitutive model and verification of layered yellow sandstone based on dissipated energy evolution[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2024, 46(5): 784 - 799.(in Chinese))
- [7] 张培森, 许大强, 颜伟, 等. 应力-渗流耦合作用下不同卸荷路径对砂岩损伤特性及能量演化规律的影响研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 325 - 339.(ZHANG Peisen, XU Daqiang, YAN Wei, et al. Study on the influence of different unloading paths on sandstone damage characteristics and energy evolution under stress-seepage coupling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2): 325 - 339.(in Chinese))
- [8] 范浩, 王磊, 罗勇, 等. 卸荷损伤砂岩的分级加载三轴蠕变力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增1): 277 - 288.(FAN Hao, WANG Lei, LUO Yong, et al. Experimental study on triaxial creep mechanical properties of unloaded damaged sandstone under graded loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(Supp.1): 277 - 288.(in Chinese))
- [9] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531 - 537.(XU Weiya, YANG Shengqi, YANG Songlin, et al. Study on triaxial rheological mechanical properties of chlorite schist (I): experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 531 - 537.(in Chinese))
- [10] 陈国庆, 万亿, 孙祥, 等. 不同温差冻融后砂岩蠕变特性及分数阶损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1 962 - 1 975.(CHEN Guoqing, WAN Yi, SUN Xiang, et al. Study on creep characteristics and fractional-order damage model of sandstone after freezing and thawing under different temperature differences[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1 962 - 1 975.(in Chinese))
- [11] 王宇, 李建林, 邓华锋, 等. 软岩三轴卸荷流变力学特性及本构模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3 338 - 3 344.(WANG Yu, LI Jianlin, DENG Huafeng, et al. Study on rheological mechanical properties and constitutive model of soft rock under triaxial unloading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3 338 - 3 344.(in Chinese))
- [12] 王泽祺, 胡斌, 李京, 等. 动力扰动效应影响下软岩蠕变损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增1): 3 229 - 3 242.(WANG Zeqi, HU Bin, LI Jing, et al. Study on creep damage model of soft rock under dynamic disturbance effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Supp.1): 3 229 - 3 242.(in Chinese))
- [13] 袁海平, 曹平, 许万忠, 等. 岩石黏弹塑性本构关系及改进的Burgers蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 796 - 799.(YUAN Haiping, CAO Ping, XU Wanzhong, et al. Viscoelastic-Plastic constitutive relationship of rock and improved burgers creep model[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 796 - 799.(in Chinese))
- [14] ZHAO B Y, LIU D Y, DONG Q. Experimental research on creep behaviors of sandstone under uniaxial compressive and tensile stresses[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(Supp.1): 438 - 444.
- [15] 唐劲舟. 深部高温作用下双裂隙砂岩流变力学行为及破坏机制研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.(TANG Jinzhou. Study on rheological mechanical behavior and failure mechanism of double-fractured sandstone under deep high temperature[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2021.(in Chinese))
- [16] 王成虎, 高桂云, 杨树新, 等. 基于中国西部构造应力分区的川藏铁路沿线地应力的状态分析与预估[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2 242 - 2 253.(WANG Chenghu, GAO Guiyun, YANG Shuxin, et al. Analysis and prediction of in-situ stress along Sichuan-Tibet Railway based on tectonic stress zoning in western China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2 242 - 2 253.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T5368—2007 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T5368—2007 Technical code for rock tests in hydropower engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2007.(in Chinese))
- [18] 孙晓明, 姜 铭, 王新波, 等. 万福煤矿不同含水率砂岩蠕变力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(3): 624 - 636.(SUN Xiaoming, JIANG Ming, WANG Xinbo, et al. Experimental study on creep mechanical properties of sandstone with different water contents in Wanfu coal mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(3): 624 - 636.(in Chinese))
- [19] 李良权, 徐卫亚, 王 伟, 等. 基于流变试验的向家坝砂岩长期强度评价[J]. 工程力学, 2010, 27(11): 127 - 136.(LI Liangquan, XU Weiya, WANG Wei, et al. Long-term strength evaluation of Xiangjiaba sandstone based on rheological tests[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 127 - 136.(in Chinese))
- [20] SUN X, CHEN G Q, YANG X, et al. A process-oriented approach for identifying potential landslides considering time-dependent behaviors beyond geomorphological features[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(3): 961 - 978.
- [21] ASKES H, HARTIKAINEN J, KOLARI K, et al. On the Kachanov-Rabotnov continuum damage model[J]. Rakenteiden Mekaniikka, 2020, 53(2): 125 - 144.

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 高温 - 水冷处理花岗岩循环加卸载抗拉特性及破裂机制试验研究;
- (2) 基于 DDA 水 - 力耦合的三峡库区消落带岸坡破坏特征研究;
- (3) 间接拉伸作用下煤样声发射多重分形的层理效应研究;
- (4) 砂化白云岩隧洞围岩结构面几何参数精准表征及工程地质特性评价;
- (5) 超高温下花岗岩微观结构与能量演化特征的多尺度研究;
- (6) 基于岩石微流控芯片的渗流 - 溶蚀可视化实验与溶蚀速率表征;
- (7) 隧道工程围岩开挖渐进破坏近场动力学 GPU 高效算法;
- (8) 高速铁路刚性面板加筋土挡墙地震作用下变形计算方法研究。

土工基础