https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.047

智能评估开挖与孔压耦合下千枚岩的蠕变特性

李小双[1],王运敏[2],李启航[3*],杨欣淇[1],蒋宏伟[1]

1. 常州大学城市建设学院,江苏常州 213164
2. 金属矿山安全与健康国家重点实验室,安徽马鞍山 243000
3. 重庆大学资源与安全学院,重庆 400044

摘 要: 为探究开挖扰动与长期降雨渗流共同作用下边坡岩体的蠕变特性.通过分级加载蠕变试验,测试了千枚岩在不同孔隙水压力下的力学性能,结合PFC数值模拟与智能图像识别技术,系统分析了岩体的蠕变行为.试验结果表明,随着孔隙水压力和K值的增加,岩体蠕变破坏模式由剪切破坏逐渐加速转为拉伸破坏.基于改进的Burgers-PSC接触模型,PFC数值模拟显示当偏应力超过33.7 MPa时,开挖卸荷与孔隙水压力共同促进岩石中拉伸微裂隙的形成与扩展.此外,基于三维点云坐标提出的IRGSM方法,能够智能、快速、高精度地提取裂隙特征,与实验结果和ORGSM方法对比误差小于3%.研究为评估开挖—渗流耦合作用下矿山边坡的稳定性提供了理论依据.

关键词: 千枚岩;开挖卸荷;孔隙水压力;蠕变破坏;PFC数值模拟;智能识别;工程地质.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-3637-18 **收稿日期:** 2026-06-18

Intelligent Evaluation of Creep Characteristics of Phyllite under Coupling Effect of Excavation and Pore Water Pressure

Li Xiaoshuang[1], Wang Yunmin[2], Li Qihang[3*], Yang Xinqi[1], Jiang Hongwei[1]

1. *School of Urban Construction*, *Changzhou University*, *Changzhou* 213164, *China*
2. *State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines*, *Ma'anshan* 243000, *China*
3. *School of Resources and Safety Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*

Abstract: Herein this study aims to explore the creep characteristics of slope rock masses under the combined effects of excavation disturbance and long-term rainfall seepage. Through stepped-loading creep tests, the mechanical properties of phyllite under different pore water pressures were tested, and the creep behavior of the rock masses was systematically analyzed by combining PFC numerical simulation and intelligent image recognition technology. The tests demonstrate a gradual shift in the creep failure mechanism of the rock masses from shear to tensile failure with the increase in pore water pressure and K value. Based on the improved Burgers-PSC contact model, PFC numerical simulation shows that when the deviatoric stress exceeds 33.7 MPa, excavation unloading and pore water pressure jointly promote the formation and propagation of tensile microcracks in the rock. Furthermore, the IRGSM method, proposed based on 3D point cloud coordinates, can intelligently, rapidly, and highly

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(Nos. 42277154, 42477142);国家自然科学基金青年项目(No. 52404113).

作者简介: 李小双(1983-),男,教授,博士,从事矿山岩土工程方面的研究工作. ORCID: 0000-0001-7469-8390. E-mail: xsli2011@126.com

* **通讯作者:** 李启航(1997-),男,博士生,从事边坡监测预警方面的研究工作. ORCID: 0000-0002-1303-2621. E-mail: qihangli0325@126.com

引用格式: 李小双,王运敏,李启航,杨欣淇,蒋宏伟,2026.智能评估开挖与孔压耦合下千枚岩的蠕变特性.地球科学,51(10):3637-3654.

Citation: Li Xiaoshuang, Wang Yunmin, Li Qihang, Yang Xinqi, Jiang Hongwei, 2026. Intelligent Evaluation of Creep Characteristics of Phyllite under Coupling Effect of Excavation and Pore Water Pressure. *Earth Science*, 51(10): 3637-3654.

accurately extract fracture features. Compared with experimental results and the ORGSM method, its error is less than 3%. Thus, this research provides a theoretical basis for evaluating the stability of mine slopes under the coupled effects of excavation and seepage.

Key words: phyllite; excavation unloading; pore water pressure; creep failure; PFC numerical simulation; intelligent recognition; engineering geology.

0 引言

矿产资源作为人类物质生产领域的重要支柱，在促进经济和社会繁荣发展方面发挥着关键作用（Rahbek *et al.*, 2019; Mudd *et al.*, 2020; 彭铭等, 2025）. 在中国，诸如江西、贵州、云南、四川和福建等省份广泛分布着诸如金、铁、铜、磷等战略矿产资源（朱磊等, 2025）. 由于近 70 a 的开采，一些大型露天金属矿的边坡高度已超过 200 m，甚至有少数达到 500 m. 浅层资源的枯竭，推动着多数矿山向深凹露天开采或露天转地下开采模式转变（Li *et al.*, 2023, 2024, 2025）. 然而，这种开采方式的变化导致了对边坡卸荷干扰问题的关注增加，进而可能影响到地下矿体的安全. 特别是在南方地区，由于梅雨季节（每年 4～7 月）降雨量大，大量雨水下渗极易诱发边坡岩体的流变，因此，必须采取严格的安全管理与稳定性维护措施（Bar and Barton, 2025）. 据中国地质环境监测院提供的统计数据，2024 年中国南方地区共发生中型及以上规模的地质灾害 262 起. 其中，滑坡 136 起，泥石流 69 起，崩塌 39 起，地面沉降 12 起，地面裂缝 6 起. 这些灾害造成了大量人员伤亡和巨大的财产损失（Zhan *et al.*, 2025）. 矿山滑坡灾害是最常见的地质灾害之一，通常由地表裂缝、内部扰动裂缝以及降雨渗透和开挖扰动引起的岩石变形所导致. 其表现形式有 3 种：滑动破坏、崩塌破坏和蠕变破坏（Puzrin and Schmid, 2012; 郭长宝等, 2022; Miao *et al.*, 2025）（图 1）. 因此，受复杂外界环境与岩体自身性质的双重影响，在露天转地下开采过程中，维持边坡岩体的长期稳定性已成为一项关键的技术难题.

岩石的蠕变行为是诱发高陡岩质边坡及地下工程失稳破坏的主要诱因之一，这已成为工程实践与研究领域的共识（Maqsood *et al.*, 2020; 张志强等, 2022）. 目前，室内力学测试、物理模型实验、数值计算和机器学习是系统研究岩石蠕变特性和岩质边坡失稳的主流方法（Aghajanzadeh *et al.*, 2025）. 早在 20 世纪 30 年代，一些研究就开始初步探索在室温及大气围压条件下石灰岩、页岩、盐岩和砂岩等各类岩石的蠕变特性（Liu *et al.*, 2023）. 此后，通过使用单轴和三轴试验仪器，对不同时期岩石的蠕变破坏特性进行了研究（刘造保等, 2021）. 然而在实际工程中，评估岩体稳定性必须考虑降雨、开挖卸荷、风化、地震等复杂环境下其蠕变的力学特性. 在传统的岩石蠕变试验中，Mishra and Ver-

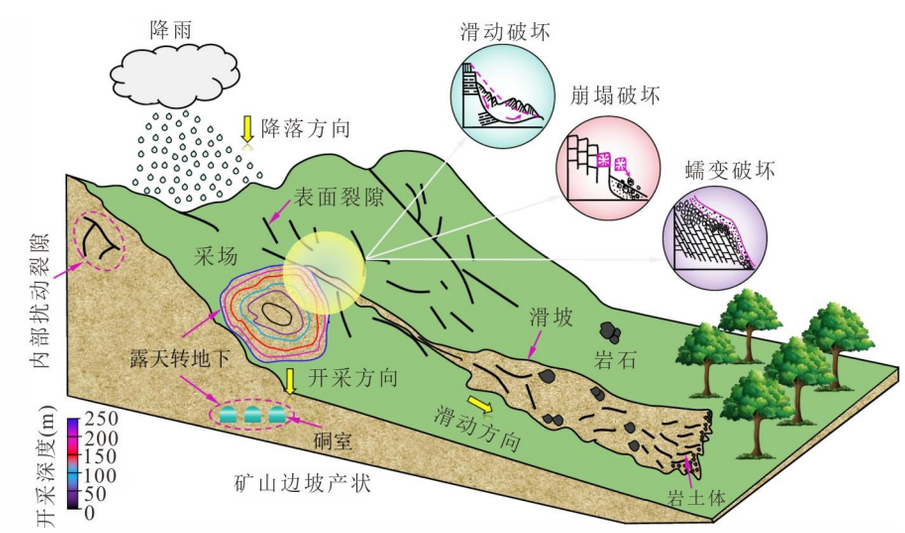

图 1 降雨入渗及露天矿对地下开采扰动引发的滑坡示意图

Fig. 1 Schematic diagram of landslide triggered by infiltration of rainfall and disturbance of open-pit to underground mining

ma (2015) 的研究表明,当蠕变荷载达到页岩单轴抗压强度的75%～85%时,该应力区间可界定为其临界破坏应力.Zhao *et al.* (2022) 通过真三轴蠕变试验,模拟了不同初始裂隙下岩石的破裂过程.结果表明,花岗岩的破坏机制以峰值点为界,此前以拉伸开裂为主,此后则转为剪切破裂.Discenza *et al.* (2020) 通过物理模型实验研究了水－力耦合下边坡岩体的蠕变过程,发现孔压是影响岩体蠕变破坏的关键因素.Huang *et al.* (2022) 对开挖扰动下的千枚岩进行了不同孔隙水压力的三轴蠕变试验,发现孔压升高会显著加快其蠕变破坏速率.Huang *et al.* (2023)利用自主研发的物理模型试验系统揭示,地应力作用下岩石的蠕变损伤演化具有非线性累积特征.此外,李胜前等(2025)针对开挖和孔压条件下千枚岩的蠕变特性,建立了非线性蠕变损伤本构模型.然而,这些研究仅开展了相关力学试验,并未进行有效且智能化验证.

数值模拟与机器学习以其低成本、高速度和高效率等特点,被广泛视为验证岩石蠕变与物理模型实验的关键手段.近年来,在数值模拟领域,有限元法(FEM)、有限差分法和离散元法(DEM)得到了发展,用于模拟复杂应力环境下岩石的蠕变过程(Feng, 2022;王佳文, 2024).Wang *et al.* (2017) 采用FEM建立了一个蠕变损伤模型,该模型基于岩石参数服从威布尔分布的假设,成功再现了室内试验中观测到的岩石蠕变行为.Gutiérrez-Ch *et al.* (2022)基于速率过程理论与离散元法,开发了一种可在颗粒流代码(PFC)中模拟岩石加速蠕变阶段的新方法.Zhang *et al.* (2024) 利用PFC软件对不同围压下的岩石进行了分级加载蠕变试验,有效地捕捉了蠕变过程中微裂隙的扩展行为.此外,机器学习通过训练支持向量机(SVM)、卷积神经网络(CNN)等多种模型,能够有效优化蠕变参数,以更精确地获取与关键岩石损伤相关的信息(Hasanipanah *et al.*, 2015).Zhang *et al.* (2022)为量化坡体岩石蠕变破坏时间预测中涉及的模型与观测不确定性,开发了一种贝叶斯机器学习方法,并验证了其性能优于传统预测方法.随后,Zhu *et al.* (2022) 利用改进的CNN模型分析了来自伊朗西南部地区的130个坡体的1 240张高分辨率图像.

当前对开挖卸荷－水力耦合下岩体蠕变行为的研究虽手段多样,但仍存在显著局限:首先,多数模型忽视了开挖扰动应力与水压的真实耦合效应;其次,传统研究侧重于深部岩体的加载响应,未能充分反映地下采矿中围岩经历复杂卸荷应力路径的特征.因此,系统阐明卸荷－渗流耦合作用对围岩蠕变行为的影响,是当前面临的核心科学问题.为解决上述难题,本研究对原状饱和千枚岩开展了三轴压缩与分级加载蠕变试验,通过设置不同孔隙水压力P,并引入应力集中系数K来表征开挖卸荷程度.核心创新在于揭示了卸荷－渗流耦合作用对岩石蠕变力学行为的影响机制.此外,基于PFC数值模拟软件,通过融合Burgers模型与PSC模型,构建了一种改进的Burgers-PSC混合接触模型,其合理性得到了长期蠕变试验结果的验证.最后,提出了基于三维点云坐标的IRGSM方法,实现了裂隙特征的智能、快速与高精度提取.研究成果可为我国南方类似地质与开采条件下的边坡岩体,在安全维护与灾害防控方面提供参考.

1　工程背景

银山矿隶属于江西铜业公司,位于中国德兴市银城镇.矿区坐落于东经117°36′20″、北纬28°58′29″,属丘陵地貌,整体呈现北高南低的趋势.东北部地形起伏剧烈,有山峰海拔逾千米;其北部与西部则广泛分布着丘陵、山谷及盆地,地貌类型丰富(图2).2024年研究区域的年平均气温为16.8 ℃.极端气温最低达－10.1 ℃,最高达40.7 ℃.此外,笔者对2024年江西省和德兴市的月降水量分布进行了分析(图2),结果表明4～7月的降雨量最大.7月的降水量最为突出,江西省总计达329 mm,德兴市为193 mm.该矿区的围岩主要由绢云母千枚岩构成,硫含量在1%～8%之间,铜含量在0.05%～0.29%之间(蔡鸿宇等, 2024).

2　方法

2.1　力学参数的获取

本力学试验所用的绢云母千枚岩采自研究区域3号斜井处,其主要矿物组分为绢云母、石英和绿泥石(Sawicka *et al.*, 2018).为消除各向异性的影响,所有岩心均沿同一方向钻取.使用岩石切割机与打磨机将岩心加工成标准圆柱型试样(ϕ50 mm×100 mm)与圆盘型试样(ϕ25 mm×50 mm).筛选出表面无裂隙及无明显缺陷的试样进行后续力学与蠕变试验.为模拟雨水渗流的软化效应,对所选试

样进行饱和处理:首先在105 ℃下烘干24 h,自然冷却至室温.随后,每隔2 h向水箱中注水,直至水位达到试件高度的1/4,8 h后千枚岩试样完全浸没.经过48 h的浸泡,岩石试样达到饱和状态(图3).其中,千枚岩的天然含水率为0.91%,饱和含水率为5.06%.在这项研究中,笔者使用RMT-150C机械测试系统对饱和千枚岩试样进行了单轴压缩、三轴压缩和巴西劈裂力学试验(蔡鸿宇等, 2024).其中,这3种常规力学试验各进行3组,取平均值,其力学参数的测试结果如表1所示.

2.2 开挖扰动下围岩应力路径的模拟方法

在露天转地下开采过程中,周围岩石的应力分布会发生显著变化.根据垂直应力和水平应力的不同反应,开挖面前方的岩体可以被划分为软化区、硬化区以及原岩应力区(图4).其中,软化区紧邻开挖面,其特征是垂直和水平方向上的应力均处于卸载状态;相反,在硬化区内,垂直应力集中而水平应力有所减少;至于远离挖掘活动影响的原岩应力区,则几乎不受干扰.研究表明,应力重分布后硬化区的力学行为是控制边坡长期稳定性的关键因素(Karthik *et al.*, 2022).在图5中,路径OB表征岩体的原位应力模拟阶段,B点为其初始应力状态.开挖扰动阶段由路径BC表示,该阶段历经轴向应力集中与水平应力释放,最终使应力状态发展至代表扰动完成的C点.根据连续介质力学理论,千枚岩的应力分量确定如下:

$$A点:\sigma_{1A}=\gamma L,\quad \sigma_{3A}=\gamma L\ , \tag{1}$$

$$B点:\sigma_{1B}=\lambda\gamma L,\quad \sigma_{3B}=\gamma L\ , \tag{2}$$

$$C点:\sigma_{1C}=K\lambda\gamma L,\quad \sigma_{3C}=0.4\gamma L\ , \tag{3}$$

式中:L为岩体埋藏深度,取250 m;γ表示覆盖层的堆积密度,约为16 KN/m^3;λ是指侧向压力系数,在这里取值为1.2 (Si *et al.*, 2024);K则用来衡量由于开挖卸载而引起的岩石应力集中程度.

试验首先采用0.1 MPa/s的加载速度,同步施加围压与轴向应力,直至达到预设的初始应力状态(σ_{3A}, σ_{1B}).随后进行开挖卸荷模拟,此阶段轴向应力维持0.1 MPa/s的加载速率,而围压则以0.05 MPa/s的速率同步卸载.最终的应力状态(σ_{1C}, σ_{3C})取决于

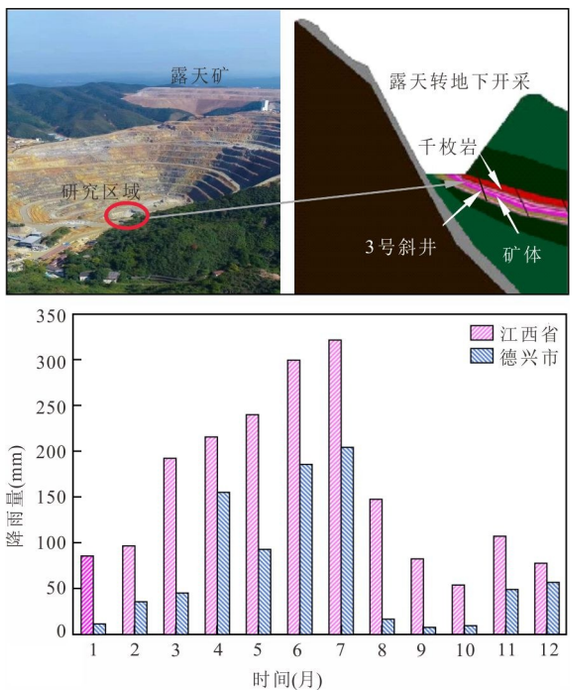

图2 工程地质图和2024年江西省和德兴市月降雨数据

Fig. 2 Engineering geological map and monthly rainfall data in Jiangxi Province and Dexing City in 2024

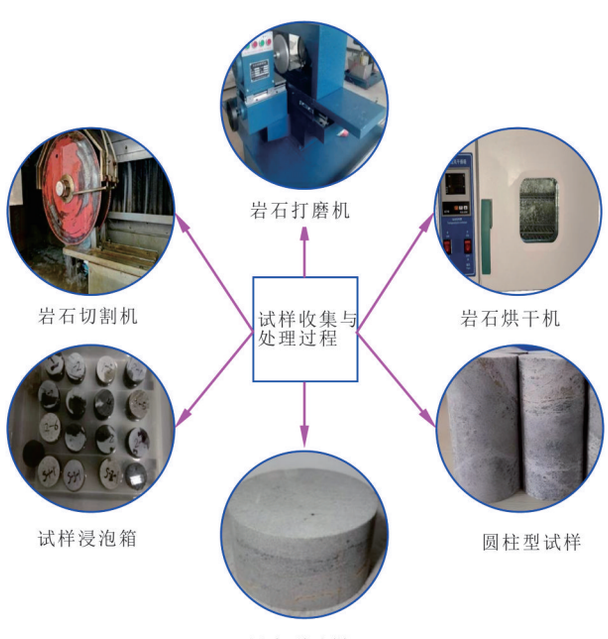

图3 千枚岩试样收集与处理过程

Fig. 3 The process of collecting and treating phyllite samples

表1 饱水状态下千枚岩的力学特性指标

Table 1 Mechanical properties of phyllite in saturated state

抗压强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	弹性模量(GPa)	泊松比	内聚力(MPa)	内摩擦角(°)
56.35	5.51	22.27	0.22	21.20	17.03

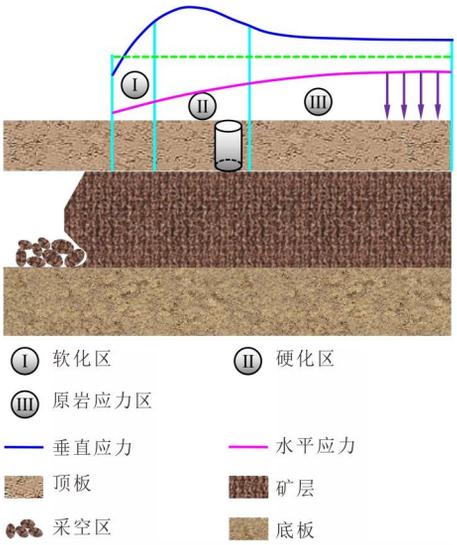

图4　千枚岩的应力分布特征

Fig. 4　The stress distribution characteristics of phyllite

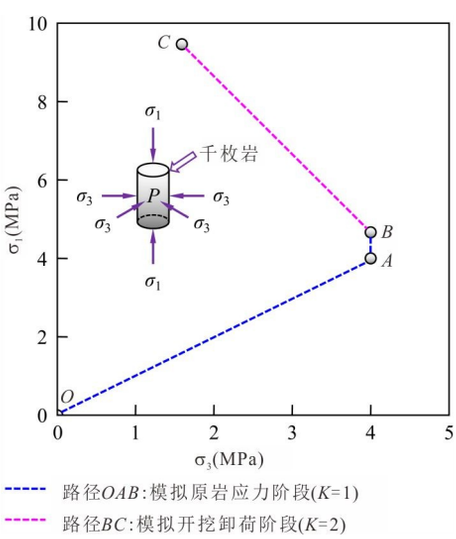

图5　模拟硬化区岩体路径

Fig. 5　Simulation of rock mass paths in hardening zones

给定的K值,达到后即停止加载并保持围压恒定,以模拟开挖后岩体的应力分布.参考 Zha *et al.* (2021) 的研究,全断面开挖的K值介于1.5～2.0之间,结合本矿区全断面开挖的实际情况,本研究设定K=1(未扰动)与K=2(扰动)两种工况,以对比分析饱和千枚岩在不同卸荷程度下的蠕变行为.

2.3　试验方案设计

为探究开挖卸荷应力与孔隙水压力对饱和千枚岩长期流变特性的影响,本小节利用GDS-VIS三轴流变仪开展了分级加卸载蠕变试验.结合地质水文资料,开挖扰动区孔隙水压力范围在0～1.5 MPa之间.因此,在这项研究中,设定孔隙水压力(P)为0、0.5、1.0和1.5 MPa,并设置了K=1与K=2两组卸荷系数(郝君明等, 2025).试验全程保持围压恒定,轴向载荷则依据试样的短期峰值强度(σ_P=56.15 MPa),按0.30 σ_P、0.45 σ_P、0.60 σ_P、0.75 σ_P和0.90 σ_P分为5个等级逐级施加(表2),以确保分析开挖卸荷与孔隙水压力影响时具有一致的加载水平.具体试验流程如下(Wang *et al.*, 2024):

(1)在遵循第2.2节所述流程执行饱和千枚岩试样的开挖与卸荷操作后,保持轴向与径向应力恒定,随后以0.1 MPa/s的加载速率施加P,直至达到预设值;

(2)为模拟特定卸荷阶段,需先维持围压恒定,随后以0.1 MPa/s的速率施加轴向应力,直至达到第1阶段的预设卸荷水平;

(3)在每个加载阶段中,需维持偏应力的恒定值.在此基础上,同步收集应力、轴向应变及时间的相关数据,并保证蠕变过程至少持续12 h;

(4)为确保各加载阶段的有效性与数据可比性,在每级载荷持续施加12 h的条件下,以轴向蠕变速率降至1×10^{-5} h以下作为进入下一加载阶段的稳定判据.在满足此判据后,轴向应力以0.1 MPa/s的速率增至下一预定水平.此过程重复进行,直至载荷达到第5阶段.在该最终阶段,若试样在12 h内未发生破坏,则随后维持此偏应力恒定,进行恒载蠕变试验,记录直至破坏的时间;

(5)在试验全程,按每间隔36 s计数1次.

3　结果

3.1　蠕变试验结果

根据不同K值与P值下饱和千枚岩的轴向应变－时间曲线(图6),其变形呈现典型的阶梯状增长.变形过程揭示了其力学行为的演化过程,即加载瞬时主要表现为弹性变形;随后,在持续压应力作用下,岩石内部孔隙与裂隙逐渐压密,表现出显著的粘弹性特征,此阶段对应于蠕变曲线上的衰减与稳态蠕变阶段.当轴向荷载进入第5阶段,不可逆损伤持续累积,微裂隙进入非稳定扩展阶段,导致轴向变形急剧增大,此时岩石表现出粘弹塑性,并经过短暂的加速蠕变后迅速发生脆性断裂.总体而言,饱和千枚岩的蠕变行为呈现阶段性差异:前4级载荷下主要表现为衰减与稳态蠕变;至第5级加载时,则进一步发展为包含加速段在

表 2 饱和千枚岩分级三轴蠕变试验设计方案

Table 2 Experimental design for a stepped-loading triaxial creep study on saturated phyllite

编号	开挖类型	K	P(MPa)	σ_3(MPa)	σ_1(MPa)	$\sigma_1-\sigma_3$(MPa)				
						1阶段	2阶段	3阶段	4阶段	5阶段
K1-P0	无开挖	1	0	4	4.8	16.9	25.3	33.7	42.1	50.5
K1-P0.5		1	0.5	4	4.8					
K1-P1		1	1	4	4.8					
K1-P1.5		1	1.5	4	4.8					
K2-P0	有开挖	2	0	1.6	9.6					
K2-P0.5		2	0.5	1.6	9.6					
K2-P1		2	1	1.6	9.6					
K2-P1.5		2	1.5	1.6	9.6					

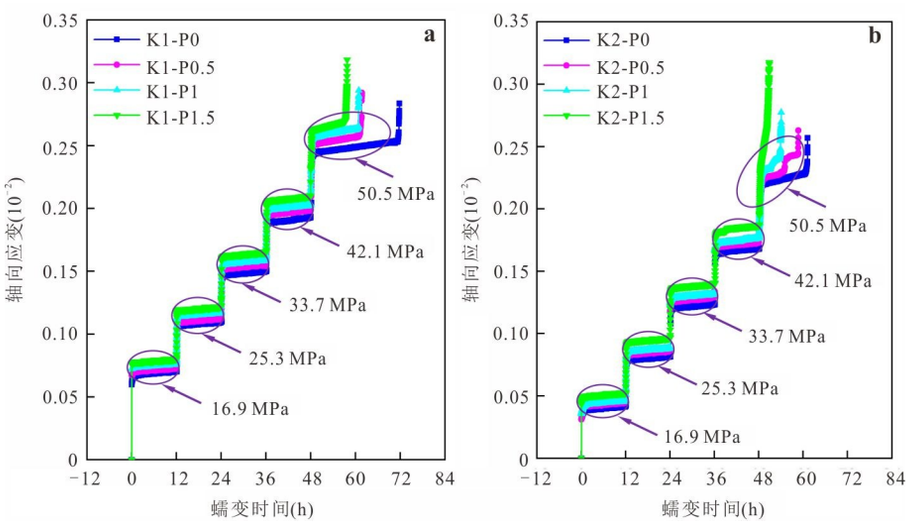

图 6 开挖卸荷下孔隙水压力对千枚岩的蠕变特性

Fig. 6 Creep characteristics of phyllite with pore water pressure during excavation unloading

a. K1, σ_1=4.8 MPa, σ_3=4 MPa; b. K2, σ_1=9.6 MPa, σ_3=1.6 MPa

内的完整蠕变过程.

利用玻尔兹曼叠加原理及相关数据分析,笔者得出了饱和千枚岩在不同侧向压力作用下的轴向应变与时间之间的关系曲线(图 7).研究表明,随着轴向负载的增加,衰减蠕变阶段的时间显著延长,并且稳态蠕变期间的变形速度也相应加快.当荷载增至第 5 阶段时,试样在经历短暂的稳态蠕变后迅速过渡至加速阶段并发生破坏,呈现出典型的脆性岩石瞬态破坏特征.以试样 K1-P0 为例,在最后一级荷载作用下,其衰减蠕变历时约 0.95 h,随后进入长达 22.22 h 的稳态蠕变阶段,而加速蠕变过程仅持续 0.46 h 试样受损.特别值得注意的是,加速蠕变曲线显示出一个明显的瞬间凸起现象,这表明在高应力状态下,千枚岩内部裂隙会快速扩展并相互连接,最终导致试样破坏.

3.2 蠕变参数统计

根据第 3.1 节分级加载蠕变试验结果,本部分进一步探讨了饱和千枚岩试样在不同应力条件下的几个关键参数:轴向瞬时应变(ε_e)、瞬时弹性模量(E_S)、蠕变应变(ε_r)、总应变(ε_T)、稳态蠕变速率(V_S)以及破坏时间(t).研究发现,在不同的应力作用下,岩石的总应变主要由两部分组成:一是即时响应于外加荷载而产生的瞬时应变;二是即使在恒定偏应力条件下也会随时间逐渐累积的蠕变应变.这里所说的瞬时应变是指当应力被施加到岩石上时立即发生的变形程度;相对地,蠕变应变指的是随着时间推移,在持续不变的压力作用下岩石所经历的额外形变量.通过计算应力偏量与瞬时应变之间的比率,可以得出瞬时弹性模量的具体数值.因此,瞬时弹性模量可定义如下:

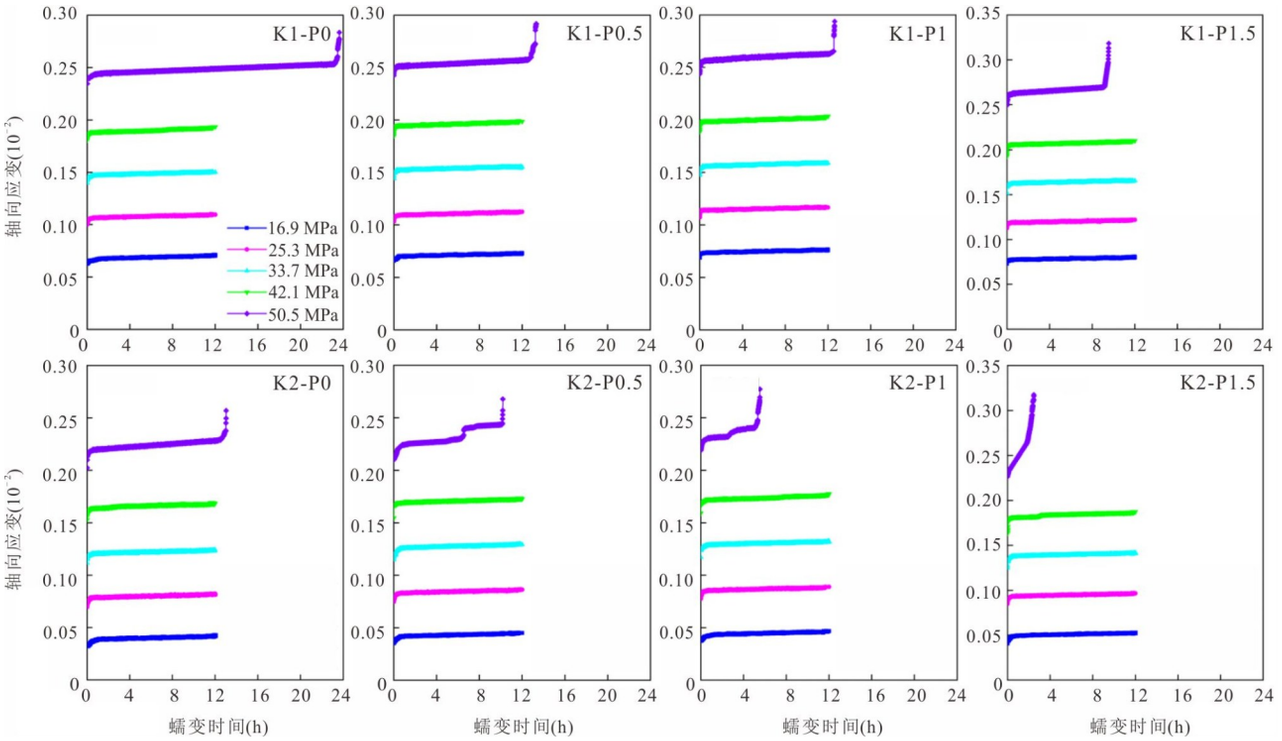

图 7　饱和千枚岩在开挖卸荷和孔隙水压力作用下的应力分级蠕变特性

Fig. 7　Stress grading creep characteristics of saturated phyllite with pore water pressure during excavation unloading

$$E_S=\frac{\sigma_1-\sigma_{1C}}{\varepsilon_e}\ , \tag{4}$$

式中:σ_{1C}表示开挖后岩石的初始轴向压力,MPa.

如图 7 所示,千枚岩的稳态蠕变阶段在总蠕变过程中占据主导地位,其持续时间最长.为定量分析不同卸荷应力与孔隙水压力下的蠕变行为,本研究重点计算了稳态蠕变率.鉴于试验误差导致低应力下难以获得绝对为零的蠕变率,本研究将蠕变率不大于 3×10^{-6} h 的数据点定义为稳态蠕变的起始判据.对于大多数曲线(如 K2-P1.5 试样),稳态阶段表现为线性特征,其斜率即为稳态蠕变率;而对于呈现“凸起”的曲线(如 K2-P0.5 试样),则取该阶段各点蠕变率的平均值.基于上述方法获得饱和千枚岩的蠕变指标(表 3),重要发现如下:

(1)随着轴向荷载水平的增加,饱和千枚岩表现出瞬时应变、蠕变应变及稳态蠕变速率的持续增长趋势,与此同时,其瞬时弹性模量则呈现出下降的现象.

(2)随着轴向荷载增加,饱和千枚岩的变形响应表现出一定规律:瞬时应变增幅趋于降低,而蠕变应变的增长则明显加快.同时,蠕变应变在总应变中所占比例的变化也呈现先减小后增大的非线性特征.以试件 K1-P1.5 在第 5 阶段为例,其轴向瞬时应变增至 $0.249\ 38\times10^{-2}$,增幅为 29.44%;此外,蠕变应变急剧增至 $0.069\ 06\times10^{-2}$,增幅高达 297%.进一步分析显示,该阶段蠕变应变增量已达到瞬时应变增量的 91%,且蠕变变形在总变形中占比约 21.7%,反映出蠕变在变形过程中的主导作用显著提升.

(3)稳态蠕变速率在较低荷载阶段(如前 3 级)随轴向应力平缓增加,但在达到第 4 级荷载后出现急剧上升的转折.这一转折性变化在试样 K1-P1 的数据中尤为显著.举例来说,当荷载水平依次增至失效载荷的 45%、60%、75% 和 90% 时,其稳态蠕变率相较于前一阶段的增幅分别达 49%、54%、580% 和 256%.

3.3　蠕变破坏模式

饱和千枚岩试样表现出明显的孔隙结构和分布特征,在不同的卸载应力和孔隙水压力条件下,其宏观破坏模式也有所不同.在 $K=1$ 下,随着孔隙水压力升高,破坏模式由单一剪切向拉剪复合破坏演化.当 $P=0$ MPa 时,试样表现为典型的陡倾剪切破坏,单一倾斜裂隙贯穿试件上下端面(图 8);$P=0.5$ MPa 时,仍以剪切破坏为主,但断裂面右侧出现明显岩体剥落,破坏程度加剧;$P=1$ MPa 时,破坏模式发展为拉剪复合型,表现为右斜贯穿的主剪切

表 3 蠕变参数统计

Table 3 Creep parameter statistics

试样编号	σ_3(MPa)	轴压(MPa)	$\varepsilon_e(10^{-2})$	$\varepsilon_r(10^{-2})$	$\varepsilon_T(10^{-2})$	E_S(GPa)	V_s(h)	失效时间(h)
K1-P0	4	20.9	0.062 00	0.009 19	0.071 19	25.97	6.13×10^{-8}	23.63
		29.3	0.100 18	0.009 41	0.109 59	24.46	7.09×10^{-8}	
		37.7	0.139 73	0.010 45	0.150 18	23.55	7.14×10^{-8}	
		46.1	0.191 73	0.012 61	0.193 60	22.82	9.01×10^{-7}	
		54.5	0.234 75	0.048 86	0.283 61	21.17	5.00×10^{-6}	
K1-P0.5	4	20.9	0.065 96	0.007 27	0.073 23	24.41	1.46×10^{-7}	13.31
		29.3	0.103 37	0.009 21	0.112 58	23.70	1.75×10^{-7}	
		37.7	0.144 24	0.011 64	0.155 88	22.81	2.57×10^{-7}	
		46.1	0.185 04	0.013 74	0.198 78	22.32	1.41×10^{-6}	
		54.5	0.242 64	0.049 39	0.292 03	20.48	9.02×10^{-6}	
K1-P1	4	20.9	0.069 11	0.007 15	0.076 26	23.30	1.53×10^{-7}	12.62
		29.3	0.107 58	0.009 19	0.116 77	22.77	2.80×10^{-7}	
		37.7	0.147 61	0.011 27	0.158 88	22.29	4.23×10^{-7}	
		46.1	0.188 93	0.014 48	0.203 41	21.86	2.23×10^{-6}	
		54.5	0.244 04	0.049 88	0.293 92	20.37	1.06×10^{-5}	
K1-P1.5	4	20.9	0.073 18	0.007 09	0.080 27	22.00	2.25×10^{-7}	9.55
		29.3	0.112 83	0.009 25	0.122 08	21.71	3.36×10^{-7}	
		37.7	0.151 67	0.013 01	0.164 68	21.69	5.16×10^{-7}	
		46.1	0.192 66	0.017 38	0.210 04	21.44	3.51×10^{-6}	
		54.5	0.249 38	0.069 06	0.318 44	19.93	1.25×10^{-5}	
K2-P0	1.6	18.5	0.034 40	0.008 35	0.042 75	25.87	4.50×10^{-7}	13.03
		26.9	0.070 44	0.010 78	0.081 52	24.46	5.52×10^{-7}	
		35.3	0.111 72	0.012 68	0.124 40	23.00	6.01×10^{-7}	
		43.7	0.152 87	0.015 51	0.168 38	22.31	3.12×10^{-6}	
		52.1	0.202 34	0.054 59	0.256 93	21.00	1.00×10^{-5}	
K2-P0.5	1.6	18.5	0.037 24	0.007 77	0.045 01	23.90	4.18×10^{-7}	10.19
		26.9	0.074 58	0.012 07	0.086 65	23.20	8.67×10^{-7}	
		35.3	0.115 03	0.014 15	0.129 18	22.34	9.85×10^{-7}	
		43.7	0.154 67	0.018 12	0.172 79	22.05	6.98×10^{-6}	
		52.1	0.210 54	0.057 42	0.267 96	20.19	2.04×10^{-5}	
K2-P1	1.6	18.5	0.039 47	0.007 23	0.046 70	22.55	1.05×10^{-6}	5.53
		26.9	0.077 45	0.011 43	0.088 88	22.34	1.19×10^{-6}	
		35.3	0.117 10	0.015 74	0.132 84	21.95	2.23×10^{-6}	
		43.7	0.159 21	0.018 43	0.177 64	21.42	9.67×10^{-6}	
		52.1	0.218 94	0.058 44	0.277 38	19.41	2.64×10^{-5}	
K2-P1.5	1.6	18.5	0.042 89	0.009 98	0.052 87	20.75	1.47×10^{-6}	2.47
		26.9	0.085 11	0.011 58	0.096 69	20.33	2.15×10^{-6}	
		35.3	0.125 01	0.016 10	0.141 11	20.56	8.48×10^{-6}	
		43.7	0.163 52	0.023 88	0.187 40	20.85	3.22×10^{-5}	
		52.1	0.226 37	0.091 12	0.317 49	18.77	8.89×10^{-5}	

裂隙,其左侧发育有垂直次生拉伸裂隙,剪切成分仍占主导;当P=1.5 MPa时,拉伸作用进一步增强,形成一条垂直与一条倾斜的主裂隙,其间分布多条次生裂隙,构成拉伸—剪切复合破坏.另一方面,在K=2下,孔隙水压力的增加进一步诱导破坏模式向拉伸主导转变.当P=0 MPa时,已呈现拉剪复合特征,试样上下表面出现倾斜裂隙,右侧伴生短次生拉伸裂隙(图 8);P=0.5 MPa时,演变为典型的“Y型”剪切破坏,由两条相交的倾斜主裂隙控制;P=1 MPa时,再次表现为拉剪复合破坏,以一条垂直裂

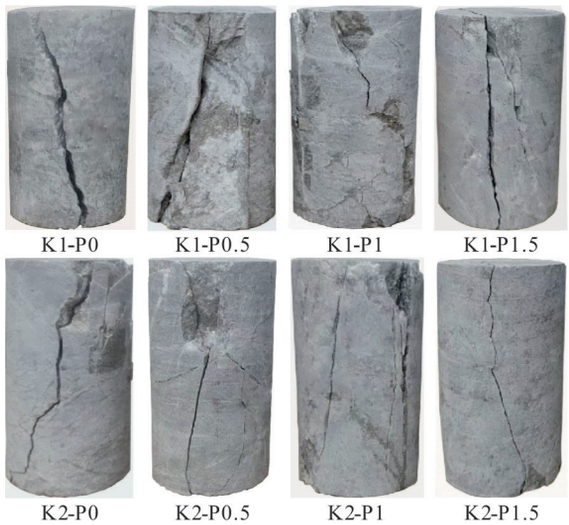

图 8　饱和千枚岩的宏观破坏模式

Fig. 8　Macroscopic failure modes of saturated phyllite

隙与一条倾斜裂隙共存为特征;而当 P=1.5 MPa 时,最终转变为典型的拉伸破坏,表现为一条垂直拉伸裂隙及其底部的局部剥落.相较于 K=1,当 K=2 时,开挖力的存在使得岩样从局部裂隙、崩落向整体割裂破坏演化,这主要由于千枚岩受围压作用发生脆性破坏.此外,随着 P 值的增加,试样内部逐渐软化,加快了试样达到饱和状态的速度,在围压的作用下发生整体性破坏.

综上所述,孔隙水压力的升高是控制饱和千枚岩蠕变破坏模式的关键因素.未扰动岩样的破坏模式从剪切破坏向拉剪复合破坏转变;而受开挖扰动的岩样则直接从拉剪复合破坏进一步演化为最终的拉伸破坏.

4　讨论

4.1　基于 PFC 方法的千枚岩蠕变仿真与验证

4.1.1　Burgers-PSC 混合接触模型　本节提出了一种 Burgers-PSC 混合接触模型,用于模拟并验证物理蠕变试验结果.如图 9 所示,该复合模型整合了线性粘结元素、PSC 组件以及 Burgers 单元.其材料响应特性依据接触应力水平而变化:当颗粒间相互作用力低于 PSC 破裂阈值时,整体表现为 Burgers-线性粘合组合模式,能够精确捕捉低载荷条件下岩石的初期衰减及后续稳定蠕变行为.一旦接触应力超过该阈值,模型即能完整模拟高荷载作用下岩石从蠕变开始直至破坏的全过程行为.

根据已有研究(Carcione *et al.*, 2018),试样模型中 Burgers 模型与线性平行粘结模型的配比关系已被明确.研究表明,增加颗粒系统中 Burgers 模型的比例会强化试样的蠕变特性,但若该比例过高,则可能导致蠕变响应出现不稳定.结合饱和千枚岩蠕变试验的结果,本研究最终确定了模型中 Burgers 模型与线性粘结模型之间的比率为 2.5∶7.5.值得注意的是,在应用 Burgers-PSC 复合接触模型的过程中,模型涉及两种时间尺度:一种是用于伺服控制及应力加载过程中的计算时间步长;另一种则是 PSC 模型中损伤演变所需的时间长度.由于脆性岩石的损伤发展表现出显著的时间依赖特征,因此在模拟过程中将 PSC 损伤平衡迭代阶段对应的时间也一并计入了蠕变时间的考量范围之内.具体模型参数按如下设定:时间步长为 4.5×10^{-8} s,物理模拟时长为 1.2×10^{-2} s,以等效模拟实际蠕变试验中 12 h 的过程,两者采用等比例时间映射关系.

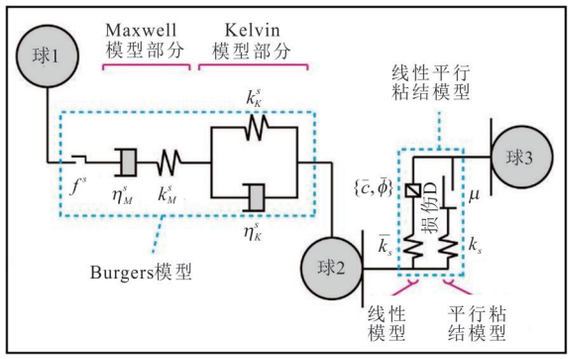

图 9　Burgers-PSC 混合接触模型

Fig. 9　Burgers-PSC hybrid contact model

4.1.2　数值模型的建立　数值模型的建立完全参照实际千枚岩试样尺寸,采用直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体构型,其在二维剖面上以矩形形式呈现(图 10).构成此模型的颗粒半径介于 3×10^{-4}~6×10^{-4} m 之间,孔隙度设定为 0.12,材料密度则为 2 700 kg/m^3.整个模型由 6 641 个颗粒及 14 906 个接触单元组成.如图 10 所示,通过不同颜色来区分各类接触方式:绿色标记代表 Burgers 模型下的接触关系;蓝色标识线性平行粘结模型中的接触;而红色则表示颗粒与边界之间的线性接触形式.值得注意的是,在所有颗粒间的接触类型中,Burgers 模型所占比例为 25%,剩余 75% 则是线性平行粘结模型.在模拟过程中,首先通过伺服控制加载系统对岩石样本实施卸载操作,随后进行预压缩处理,预压缩阶段设定的围压为 0.8 MPa.

4.1.3　蠕变程序的应用　在 PFC2D 软件中,孔隙

水压力采用管状渗流模型进行模拟.该模型通过构建流体域与渗流通道,再现岩石内部孔隙水的流动与分布规律.具体而言,在每个流体域中,依据水压传递的基本原理向颗粒施加相应的压缩力,以此方式有效展示了孔压如何影响岩石的力学特性.如图11,可以清楚地看到岩石试样内部流体区及其渗流路径的布局.这些流体区是由相邻粒子中心连线界定出的封闭空间组成的,它们共同形成了一个类似网络的结构贯穿于岩石试样内.各流体域的几何中心作为核心节点,主导着流体的运移;渗流通道则连接这些节点,用于模拟孔隙水在岩体中的实际渗流路径.

孔隙水压力载荷的施加主要通过以下几个核心步骤实现:

(1)模型的边界条件通过以下方式设定:对岩石试件的四周施加应力约束以模拟固相边界,同时在流体域中预设孔隙水压力;

(2)基于千枚岩模型,通过划分流体区域网格来确定每个流体区的中心点,并依据这些中心位置构建相应的渗流路径连接;

(3)依据流体力学的基础理论,并结合平行平板间流体运动的特性,计算渗流管道内的流量:

$$Q = k\frac{P_d}{l}\rho^3 , \tag{5}$$

$$\rho = \frac{\rho_0 F^n_{0.5}}{F^n + F^n_{0.5}} , \tag{6}$$

$$l = \frac{4r_a r_b}{r_a + r_b} , \tag{7}$$

式中:Q表示水流,m^3/s;k为渗透系数,m/s,其值取决于岩体特性;F^n为渗流通道中的法向应力,MPa;$F^n_{0.5}$对应渗流通道孔隙度降至初始孔隙度一半时的法向应力,MPa;r代表当前状态下渗流路径的直径,m;r_0则指其最终保持不变的最小直径,m;P_d描述的是两个相邻流体区域间存在的水压差异,MPa;l用来衡量渗流路径的长度,m,这个长度可以通过位于路径两端的颗粒a和b的半径计算得出.

(4)模型采用逐步迭代的方式再现压力的动态变化过程,具体表现为在每一计算步长中对全部流体域的压力数值进行重新计算.

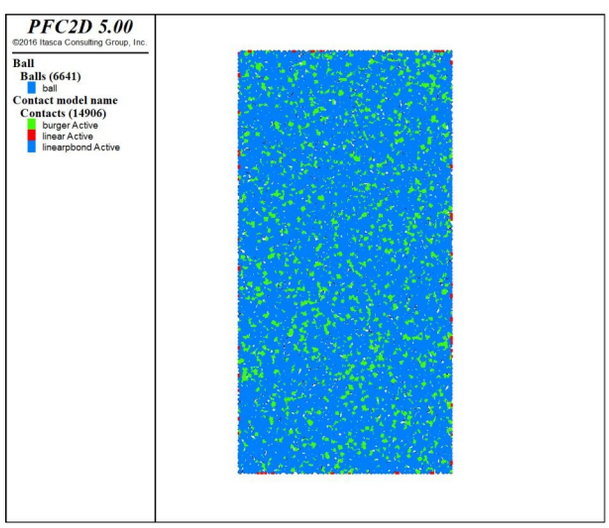

图10 PFC模拟千枚岩的数值模型

Fig. 10 A numerical model of PFC simulating phyllite

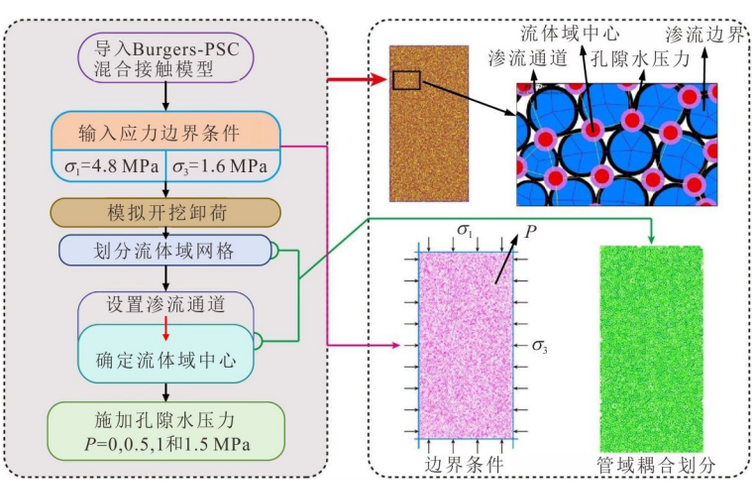

图11 数值模拟方法流程

Fig. 11 Flowchart of numerical simulation method

$$\Delta P_{\mathrm{f}}=\frac{k_b}{A_{\mathrm{f}}}\left(\sum Qd_t-A_{\mathrm{ef}}\right), \tag{8}$$

式中：ΔP_{f}表示流体区域内部压力的变化，MPa；k_{b}代表渗透水的体积模量，MPa；A_{f}指的是流体区域的面积，m^2；d_t则为模型采用的时间步长，s；A_{ef}反映由于水压变化而导致的流体区域面积变动，m^2.

(5)求解渗流作用下作用于各颗粒的外部力.

$$F_{\mathrm{a}}=Pn_{\mathrm{c}}l_{\mathrm{ac}}, \tag{9}$$

式中：F_{a}指的是作用于颗粒 a 上的水压力，MPa；P代表孔隙水的压力，MPa；n_{c}表示颗粒接触点 c 处沿法线方向的单位向量；而l_{ac}则指从颗粒 a 中心至接触点 c 之间的距离，m.

本测试旨在考察孔隙水压力的静力学影响，暂不涉及水的渗流过程及渗透压变化.因此，模拟中省略了步骤(3)和步骤(4)的相关计算.在完成流体域划分后，直接通过步骤(5)将指定的孔隙水压力施加于各流体域.据此，图 12 展示了本次研究采用的基于 PFC 的蠕变模拟最终流程.

4.1.4　参数标定　参数标定的依据在于：Burgers-PSC 复合接触模型的微观参数与岩石宏观力学特性的关联并非直接建立，需要通过细致的参数校准来重现特定岩石的力学特性.此过程涉及对线性平行粘结模型、PSC 模型及 Burgers 模型 3 个部分的微观参数进行调整(表 4).如表 4 所示，在利用 Burgers-PSC 复合接触模型进行计算时，总共需要校正多达 20 个参数.然而，通过对微观参数与宏观

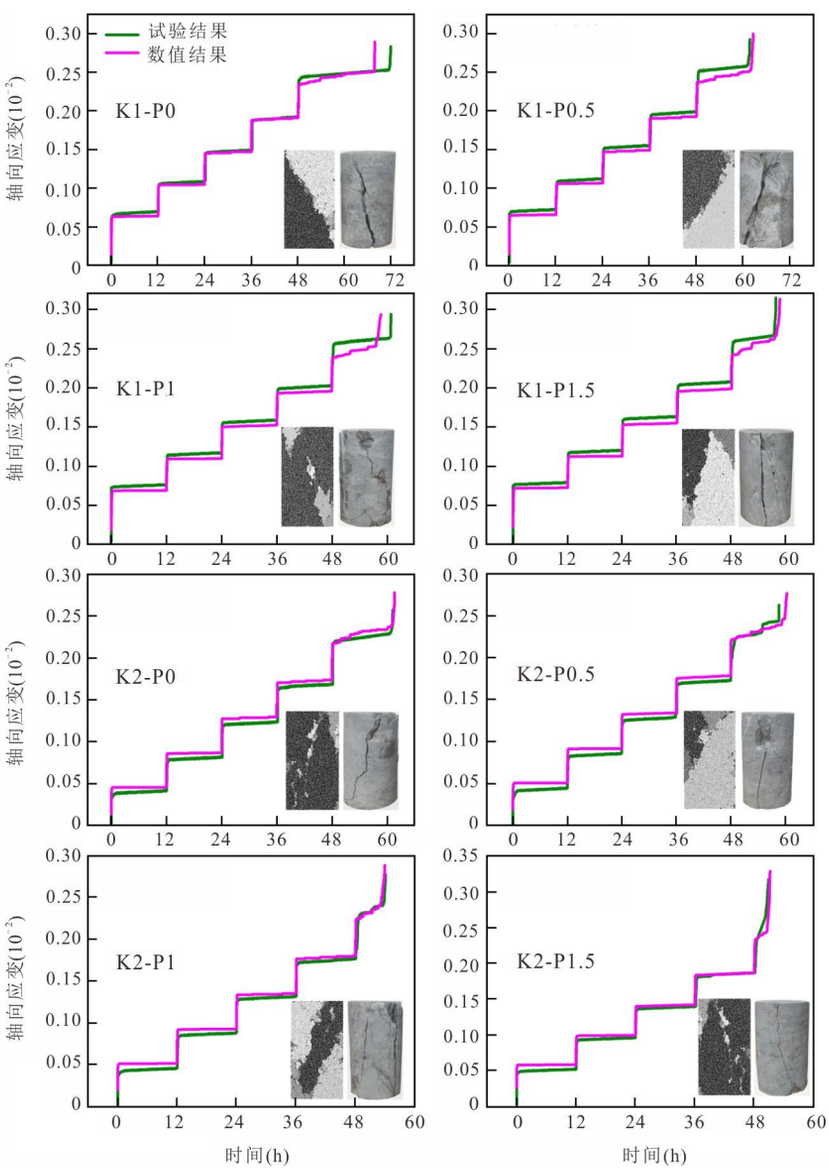

图 12　数模结果与试验结果对比

Fig. 12　Comparison of numerical results with test results

表4 Burgers-PSC混合接触模型的参数标定结果

Table 4 Parameter calibration results of the Burgers-PSC hybrid contact model

接触模型	微观参数名称	参数值
线性平行粘结模型	无线性接触模量的孔压(MPa)	$2.064\,8\times10^{4}$
	无平行粘结接触模量的孔压(MPa)	$2.064\,8\times10^{4}$
	线性接触刚度比	1.5
	平行粘结刚度比	1.5
	法向粘结强度(MPa)	36.061
	切向粘结强度(MPa)	72.122
	摩擦系数	0.5
	平行粘结摩擦角(°)	14.581
	V(MPa^{-1})	0.125
PSC模型	b1	1×10^{-20}
	b2	120
	σ_t(MPa)	24
Burgers模型	Maxwell体法向/切向刚度(MPa)	1×10^{4}
	Maxwell体法向/切向粘度系数	40.5×10^{3}
	Kelvein体法向/切向刚度(MPa)	50
	Kelvein体法向/切向粘度系数	5×10^{3}
	蠕变摩擦系数	0

力学特性之间关系的系统归纳总结,可以大幅度提升参数校准工作的效率.在这项研究中,通过对参数的标定,发现PSC模型和Burgers模型的微观参数标定结果对数值模拟结果影响更大,这主要是由于千枚岩的脆性决定的.

本研究对线性平行粘结模型进行了改进,将孔隙水压力(P)作为变量引入模量定义.改进后,线性接触模量与平行粘结接触模量均为P的函数,分别记为$\bar{k}(P)$与$k(P)$.当孔隙水压力增加ΔP时,两类模量的具体降低量由相应函数关系确定.模型改进所涉及的参数详见表4.

$$\Delta\bar{k}(P)=v\bar{k}\Delta P\,, \tag{10}$$

$$\Delta k(P)=vk\Delta P\,, \tag{11}$$

式中:v是线性衰减系数,m^{-1}.

图12展示了本研究中数值模型对于室内三轴蠕变测试的模拟成果.从图表可以看出,模型预测出的蠕变趋势与实验观察到的数据之间存在良好的一致性,并且模型所揭示的失效机制也与实际岩石试样在蠕变过程中的破坏行为相吻合.这一发现验证了本小节提出的Burgers-PSC混合模型能够有效地描述饱和千枚岩在卸载力及孔压力双重影响下的长期力学特性.

4.2 裂隙时效演化规律分析

图13展示了在不同卸荷应力及孔压力条件下,试样于蠕变破坏期间微裂隙数量的变化模拟.观察发现,所有试样均遵循相似的发展模式:在较低应力阶段(16.9 MPa与25.3 MPa),试样内未产生微裂隙;当应力增至第3级(33.7 MPa)时,微裂隙开始萌生并随时间呈线性增长;而至第5级应力(50.5 MPa)时,微裂隙数量转为非线性加速增长.因此,微裂隙的演化过程可划分为3个阶段:萌生阶段、稳定扩展阶段与不稳定扩展阶段.

图13的模拟结果揭示了不同卸荷应力与孔隙水压力下试样蠕变破坏时的微裂隙数量变化.在$K=1$的情况下,各试样演化规律总体相近.在较低的P值(如0 MPa和0.5 MPa)下,饱和千枚岩于整个蠕变阶段主要产生剪切型微裂隙;然而,随着应力水平的升高,剪切型微裂隙所占比例逐渐减少.当P值增加到1 MPa及1.5 MPa时,蠕变过程中则以拉伸型微裂隙为主导;此时,尽管应力水平继续上升,剪切型微裂隙的比例却呈现增长趋势.特别是在$K=2$的情形下,虽然蠕变过程依然以拉伸型微裂隙为主要特征,但伴随应力强度的提升,剪切型微裂隙的比例也呈现出逐步增大的态势.这些发现表明,随着卸荷程度与孔压的增强,岩石内部的微裂隙类型逐渐由剪切主导转向拉伸主导,试样由裂隙、崩落向整体性破坏过渡.

当荷载从42.1 MPa提升至50.5 MPa时,微裂隙曲线在极短时间内出现了一次小幅的陡峭跃升.这一变化的原因在于应力值已经超过了岩石材料

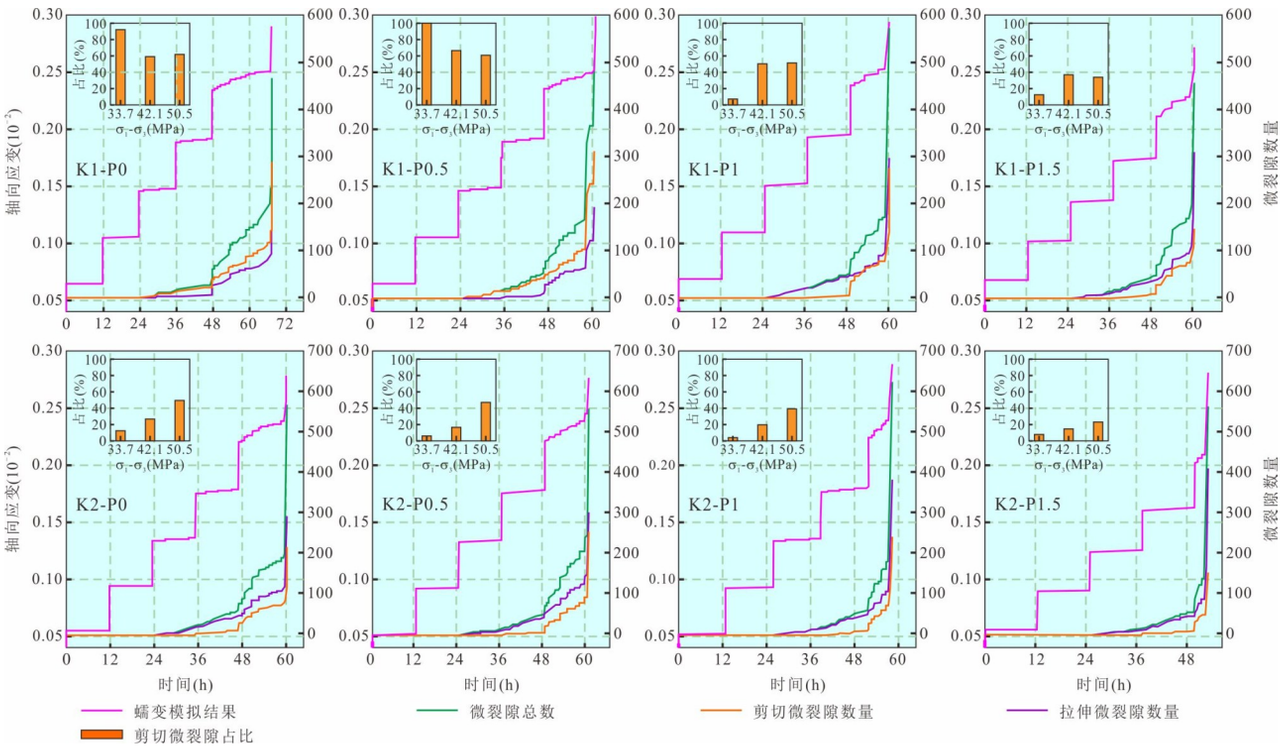

图 13　不同卸荷应力与孔隙水压力对蠕变微裂隙演化的影响

Fig. 13　Effects of unloading stress and pore water pressure on the evolution of creep microcracks

的屈服点,导致其内部结构在快速加载条件下遭受了明显的破坏.

随着孔隙水压力的增大,拉伸微裂隙数量呈上升趋势,剪切微裂隙数量则相反.以 K=2 的情况为例,P 值为 0、0.5、1 及 1.5 MPa 时,对应的蠕变破坏拉伸微裂隙数量依次为 243、250、325 和 363 条.相比之下,剪切微裂隙的数量则逐渐减少,具体数值分别是 263、247、231 和 144 条.此外,与未受开挖扰动影响的试样相比,经历开挖扰动后的试样在蠕变破坏阶段形成了更多的拉伸微裂隙以及更少的剪切微裂隙.以 P=1.5 MPa 为例,当 K=1 时,蠕变拉伸微裂隙和蠕变剪切微裂隙的数量分别为 361 条和 173 条.当 K=2 时,蠕变拉伸微裂隙和蠕变剪切微裂隙的数量分别为 411 条和 154 条.

为明确孔隙水压力与开挖卸荷对蠕变过程中裂隙形态的作用,本研究对比了第 3、第 4 和第 5 级应力水平下拉伸微裂隙占总微裂隙的比例.图 14 反映了拉伸微裂隙比例随孔隙水压力变化的规律.在偏应力为 33.7 MPa 时,该比例与孔隙水压力之间未见明显关联;而当偏应力升高至 42.1 MPa 和 50.5 MPa 时,拉伸微裂隙比例随孔隙水压力增大而逐渐上升.在相同偏应力水平下,经历了开挖干扰的试样(图 14b)中拉伸微裂隙的比例明显高于未经历此类干扰的试样(图 14a).由此可以得出结论,在较高的应力状态下,开挖卸荷与孔隙水压力共同作用会促进岩石内拉伸微裂隙的生成与扩展.

图 15 展示了在不同卸荷应力及孔隙水压力条件下,试样于蠕变破坏过程中微裂隙的发展与分布状况.蠕变进行至加载第 3 阶段末(36 h)时,试样内部开始出现少量随机分布的离散微裂隙.进入第 4 阶段末(48 h),微裂隙数量有所增加,局部出现聚集现象.当蠕变进入第 5 阶段初期(48.2 h),微裂隙进一步增多并逐渐贯通形成具有倾斜角度的主裂隙,该主裂隙总体沿试样轴向延伸.至第 5 阶段末期,岩石内部微裂隙数量急剧上升,新生成的微裂隙逐渐与主裂隙汇聚形成宏观断裂面,导致岩石发生蠕变破坏.因此,卸荷程度和孔隙水压力的增大会使饱和千枚岩的蠕变破坏模式从剪切破坏逐渐转向拉伸破坏.

4.3　智能识别裂隙特征

在本小节中笔者采用改进的区域生长分割算法(IRGSM)对实验得到的不同工况的破坏试样进行智能化识别,识别结果如图 16 所示(红色曲线).这种方法最开始用于岩质/岩土边坡的形变区域自动识别(Li *et al.*, 2022),核心算法在于将三维点云坐标与多像素种子点结合起来,并通过区域生长的

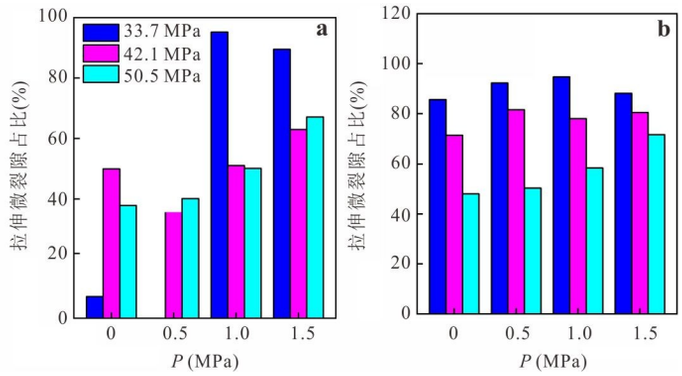

图 14 不同偏应力下拉伸微裂隙的占比

Fig. 14 Proportion of tensile microcracks under different deviatoric stresses

a. $K=1$; b. $K=2$

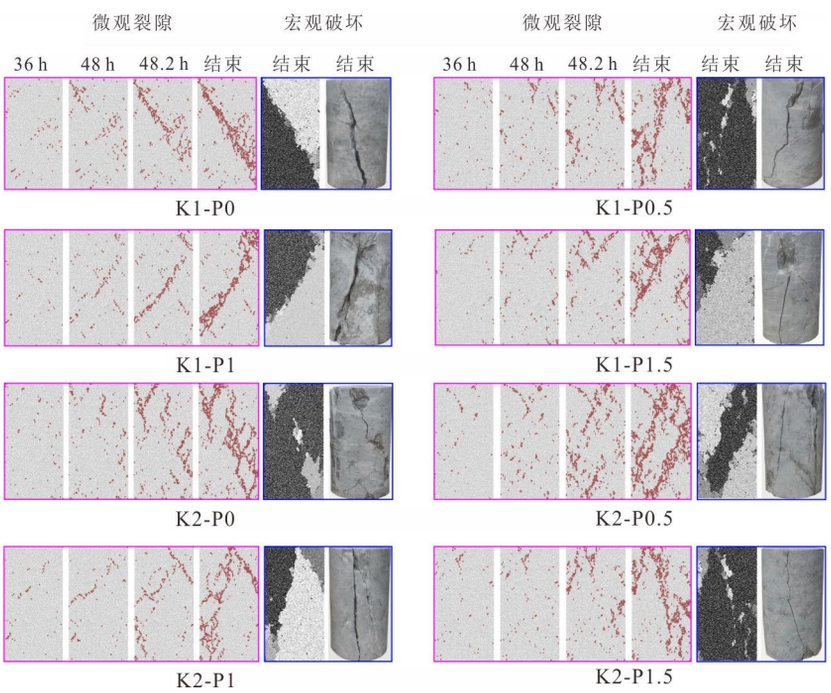

图 15 饱和试样蠕变过程中微观裂隙和宏观破坏现象

Fig. 15 Microscopic cracks and macroscopic failure phenomena during creep in saturated specimens

方式进行衍生.此外,将这种方法应用到千枚岩试样形变区域同样也是可行的.如图 16 所示,对比了千枚岩蠕变实验结果与原始的区域生长分割算法(ORGSM),可以清晰地看出 IRGSM(红色曲线)与实验值(蓝色曲线)相近,而 ORGSM 识别的一些区域存在较大的误差.导致这种差异性的原因在于 ORGSM 是二维层面的识别,仅能识别岩体表面 RGB 颜色的变化,而针对岩体内部变形却无法有效识别.例如:K1-P0 和 K1-P0.5 试样由于变形区域与临近区域颜色相近,错误地识别了非变形区域.此外,针对 K2-P0.5 和 K2-P1.5 试样由于裂隙宽度较小,区域生长的过程中无法有效地识别连续的形变区域,再加上去噪过程中 contourArea 函数小于 200,一些小的形变区域会自动剔除.总的来说,IRGSM 相较于 ORGSM 来说具有较好的精确度,可以较为准确地定位变形轮廓.

接下来利用平均分割误差方法定量的分析了 IRGSM 和 ORGSM 的误差范围.误差公式如下所示:

$$R^i_{\text{error}} = \left| R^i_{\text{seg}} - R^i_{\text{gt}} \right| \Big/ R^i_{\text{gt}} \times 100\% \,, \tag{12}$$

$$\bar{R}_{\text{error}} = \sum_{i=0}^{N} R^i_{\text{gt}} \Big/ N \,, \tag{13}$$

式中:R^i_{error}、R^i_{seg}、R^i_{gt} 和 $\overline{R}_{\text{error}}$ 分别表示第 i 个样点的分割误差(%)、第 i 个样点的分割值、第 i 个样点的实

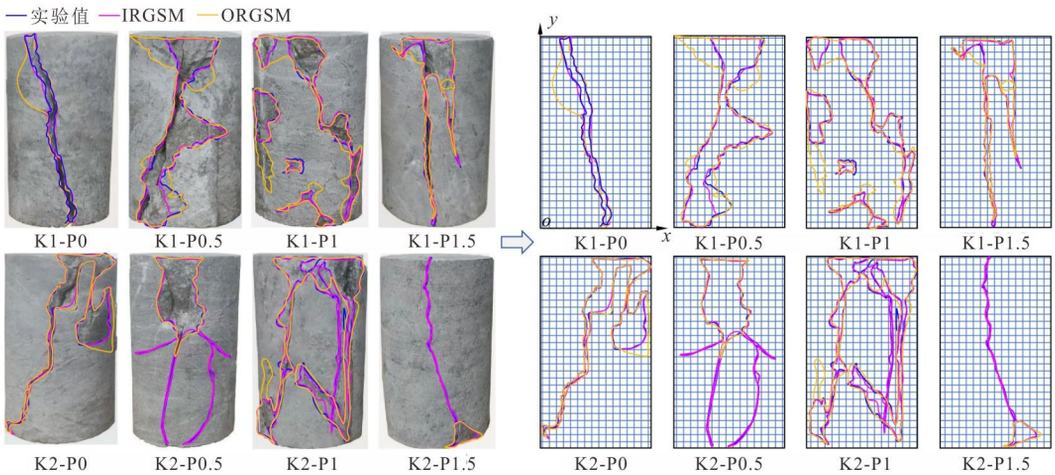

图 16　不同方法智能识别试样的变形区域

Fig. 16　Intelligent identification of the deformation zone in specimens using different methods

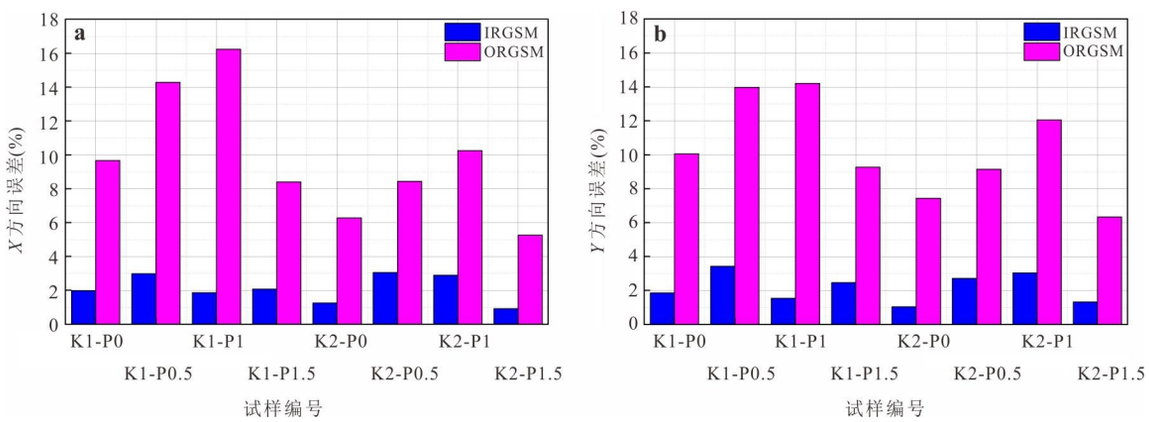

图 17　不同智能方法下的误差分析

Fig. 17　Error analysis under different intelligent methods

a. X方向误差; b. Y方向误差

验值以及所有采样点的平均分割误差(%).

笔者选取了图 16 中每个千枚岩试样裂隙轮廓(IRGSM 和 ORGSM)上分别 120 个坐标点(X, Y),然后与实际实验值进行差值计算,取平均值得到了每个试样不同智能识别方法 X 和 Y 方向上的误差值.如图 17 所示,可以看出 IRGSM 识别精度要优于 ORGSM.IRGSM 识别误差在 0~4% 之间;ORGSM 识别误差在 5%~17% 之间.最后,通过对这 8 个试样不同智能识别算法下的 X、Y 方向误差值再次取平均值,可以计算得出 IRGSM、ORGSM 的 X 和 Y 方向的平均误差值分别为 2.13%、2.18%、9.85% 和 10.32%(图 18).因此,基于 IRGSM 相较于 ORGSM 识别的裂隙误差在 3% 以内,确定了其智能、快速和高精度的优势.

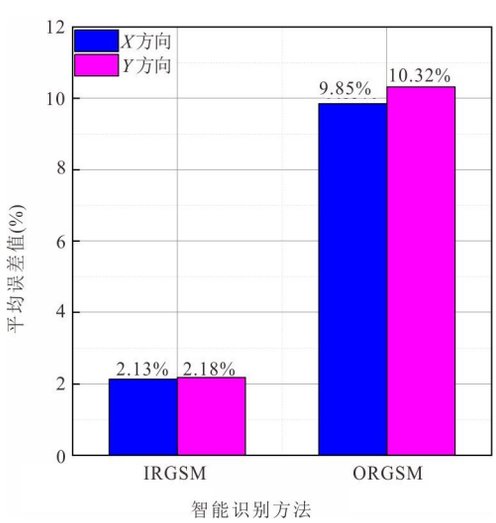

图 18　X 和 Y 方向上的平均误差分析

Fig. 18　Analysis of average error in the X and Y directions

5 结论

(1) 在前4个加载阶段,饱和千枚岩的蠕变行为主要表现为衰减与稳态蠕变特征;而在第5加载阶段,其蠕变过程则呈现出典型的岩石流变三阶段规律:衰减、稳定和加速蠕变.试样从稳定蠕变阶段迅速进入加速蠕变阶段,破坏过程突发且剧烈,表现出典型的脆性破坏特征.

(2) 在低应力水平下,岩石试样的稳态蠕变率对孔隙水压力的变化相对不敏感,且在不同孔隙水压力下均趋近于0.然而,当轴向载荷超过特定的蠕变应力阈值之后,随着孔隙水压的增加,稳态蠕变速率会经历一个指数级别的增长过程;而且,这种增长率与所施加的应力强度成正比关系.这种行为特征与开挖卸载过程中的力学响应具有相似性.

(3) 基于Burgers模型与PSC模型,构建了一种改进的Burgers-PSC混合接触模型,并通过长期蠕变试验结果验证了该模型的准确性.PFC数值模拟表明,当偏应力超过33.7 MPa时,开挖卸载作用与孔隙水压力共同促进了岩石内部拉伸微裂隙的形成与扩展.蠕变试验与数值分析结果进一步揭示,提高K值与P值会显著加速饱和千枚岩由剪切破坏向拉伸破坏的转变进程.

(4) 基于三维点云坐标提出的IRGSM算法,能够智能、快速、高精度地提取裂隙特征,与实验结果和ORGSM方法对比误差小于3%.

本研究目前的局限性在于,所提出的PFC数值模拟方法与IRGSM智能算法仅在实验室小尺度试样的蠕变破坏案例中得到验证,尚未能应用于实际工程场景.笔者建议在实际矿山边坡开挖过程中做好地下水和地表水的管道疏通工作.未来,笔者将致力于将这些方法进一步集成化、设备化,发展适用于大尺度岩体变形与失稳的智能化预测与识别工具.

References

Aghajanzadeh, M., Masoumi, H., Heidarpour, A., et al., 2025. Estimating Time-to-Failure and Long-Term Strength of Rocks Based on Creep Strain Rate Model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(4): 4207-4223. https://doi.org/10.1007/s00603-024-04088-x

Bar, N., Barton, N., 2025. Q-Slope: Rock Slope Engineering 10 Years on. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(10): 11453-11474. https://doi. org/10.1007/s00603-024-04064-5

Cai, H. Y., Wang, Y. M., Li, X. S., et al., 2024. Study on the Creep Mechanical Properties of Phyllite under the Coupling Effect of Excavation Unloading and Pore Water Pressure. *Gold Science and Technology*, 32(6): 1016-1029 (in Chinese with English abstract).

Carcione, J. M., Poletto, F., Farina, B., 2018. The Burgers/Squirt-Flow Seismic Model of the Crust and Mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 274: 14-22. https://doi. org/10.1016/j. pepi.2017.10.008

Discenza, M. E., Martino, S., Bretschneider, A., et al., 2020. Influence of Joints on Creep Processes Involving Rock Masses: Results from Physical-Analogue Laboratory Tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 128: 104261. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104261

Feng, X. D., 2022. Experiment and Numerical Simulation on Creep Mechanical Behaviors of Mudstone under Unloading Condition. *Geofluids*, 2022: 7175774. https://doi.org/10.1155/2022/7175774

Guo, C. B., Yan, Y. Q., Zhang, Y. S., et al., 2022. Research Progress and Prospect of Failure Mechanism of Large Deep-Seated Creeping Landslides in Tibetan Plateau, China. *Earth Science*, 47(10): 3677-3700 (in Chinese with English abstract).

Gutiérrez-Ch, J. G., Senent, S., Zeng, P., et al., 2022. DEM Simulation of Rock Creep in Tunnels Using Rate Process Theory. *Computers and Geotechnics*, 142: 104559. https://doi. org/10.1016/j. compgeo.2021.104559

Hao, J. M., Zhong, J. S., Jia, P. Q., et al., 2025. A Review of Retrogressive Thaw Slumps Characteristics, Evolution, and Permafrost Stability Analysis Methods. *Earth Science*, 50(12): 4919-4937 (in Chinese with English abstract).

Hasanipanah, M., Monjezi, M., Shahnazar, A., et al., 2015. Feasibility of Indirect Determination of Blast Induced Ground Vibration Based on Support Vector Machine. *Measurement*, 75: 289-297. https://doi. org/10.1016/j.measurement.2015.07.019

Huang, J., Chen, S. H., Liu, M. L., et al., 2023. Physical Model Test and Numerical Simulation Study of Cumulative Damage to Deep Tunnel Surrounding Rock under Cyclic Blasting Load. *International Journal of Damage Mechanics*, 32(2): 161-184. https://doi. org/10.1177/10567895221133133

Huang, X., Li, S. J., Xu, D. P., et al., 2022. Time-Dependent Behavior of Jinping Deep Marble Taking into Account the Coupling between Excavation Damage and High Pore Pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(8): 4893-4912. https://doi. org/10.1007/s00603-022-02912-w

Karthik, A. V. R., Manideep, R., Chavda, J. T., 2022.

Sensitivity Analysis of Slope Stability Using Finite Element Method. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(2): 184. https://doi.org/10.1007/s41062-022-00782-3

Li, Q. H., Song, D. Q., Yuan, C. M., et al., 2022. An Image Recognition Method for the Deformation Area of Open-Pit Rock Slopes under Variable Rainfall. *Measurement*, 188: 110544. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110544

Li, Q. H., Wang, Y. M., Li, X. S., et al., 2025. Evolutionary Characteristics of the Fracture Network in Rock Slopes under the Combined Influence of Rainfall and Excavation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(1): 47. https://doi. org/10.1007/s10064-025-04084-7

Li, S. Q., Li, Q. H., 2025.. Investigation on Damage Constitutive Model of Phyllite under Nonlinear Step Loading. *Mining and Metallurgical Engineering*, 45(6): 39－46, 54 (in Chinese with English abstract).

Li, X. S., Li, Q. H., Wang, Y. M., et al., 2023. Experimental Study on Instability Mechanism and Critical Intensity of Rainfall of High-Steep Rock Slopes under Unsaturated Conditions. *International Journal of Mining Science and Technology*, 33(10): 1243－1260. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.07.009

Li, X. S., Li, Q. H., Wang, Y. M., et al., 2024. Effect of Slope Angle on Fractured Rock Masses under Combined Influence of Variable Rainfall Infiltration and Excavation Unloading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(10): 4154－4176. https://doi. org/10.1016/j.jrmge.2024.08.019

Liu, W., Li, Q. H., Yang, C. H., et al., 2023. The Role of Underground Salt Caverns for Large-Scale Energy Storage: A Review and Prospects. *Energy Storage Materials*, 63: 103045. https://doi. org/10.1016/j. ensm.2023.103045

Liu, Z. B., Wang, C., Zhou, H. Y., et al., 2021.. A True Triaxial Time-Dependent Test System with Two Rigid and One Flexible Loading Frame for Rock under Real-Time High Temperature and High Pressure and Its Application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(12): 2477－2486 (in Chinese with English abstract).

Maqsood, Z., Koseki, J., Miyashita, Y., et al., 2020. Experimental Study on the Mechanical Behaviour of Bounded Geomaterials under Creep and Cyclic Loading Considering Effects of Instantaneous Strain Rates. *Engineering Geology*, 276: 105774. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2020.105774

Miao, M. H., Tang, H. M., Fang, K., et al., 2025. Influence of Tensile Crack Development on the Deformation Behavior and Failure Mode of Reservoir-Induced Landslides: Insights from Model Tests. *Landslides*, 22(6): 1989－2004. https://doi. org/10.1007/s10346-025-02458-2

Mishra, B., Verma, P., 2015. Uniaxial and Triaxial Single and Multistage Creep Tests on Coal-Measure Shale Rocks. *International Journal of Coal Geology*, 137: 55－65. https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.11.005

Mudd, G. M., Roche, C., Northey, S. A., et al., 2020. Mining in Papua New Guinea: A Complex Story of Trends, Impacts and Governance. *Science of the Total Environment*, 741: 140375. https://doi. org/10.1016/j. scitotenv.2020.140375

Peng, M., Wang, Y., Ma, C. Y., et al., 2025.. Review of Risk Assessment and Prevention for Valley Landslide Disaster Chains. *Earth Science*, 50(10): 3723－3760 (in Chinese with English abstract).

Puzrin, A. M., Schmid, A., 2012. Evolution of Stabilised Creeping Landslides. *Géotechnique*, 62(6): 491－501. https://doi.org/10.1680/geot.11.p.041

Rahbek, C., Borregaard, M. K., Antonelli, A., et al., 2019. Building Mountain Biodiversity: Geological and Evolutionary Processes. *Science*, 365(6458): 1114－1119. https://doi.org/10.1126/science.aax0151

Sawicka, N., Janeczek, J., Fabiańska, M., et al., 2018. Mineralogy and Organic Geochemistry of Phyllite from the Dewon-Pokrzywna Deposit, the Opava Mountains (SW Poland). *Geological Quarterly*, 62(4): 817－828. https://doi.org/10.7306/gq.1439

Si, X. F., Luo, Y., Luo, S., 2024. Influence of Lithology and Bedding Orientation on Failure Behavior of "D" Shaped Tunnel. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 129: 104219. https://doi. org/10.1016/j. tafmec.2023.104219

Wang, J. C., Zheng, J., Guo, J. C., et al., 2024. A Method for Evaluating the Maximum Bending Degree of Flexural Toppling Rock Masses Based on the Rock Tensile Strain-Softening Model. *Journal of Earth Science*, 35 (4): 1243－1253. https://doi.org/10.1007/s12583-022-1805-z

Wang, J. W., 2024. Research on the Creep Characteristics and Damage Constitutive Model of Rock Mass in Mine Slopes under the Coupling of Excavation Unloading and Pore Water Pressure (Dissertation). Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou (in Chinese with English abstract).

Wang, Q. Y., Zhu, W. C., Xu, T., et al., 2017. Numerical Simulation of Rock Creep Behavior with a Damage-Based Constitutive Law. *International Journal of Geomechanics*, 17(1): 04016044. https://doi. org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000707

Zha, E. S., Zhang, Z. T., Zhang, R., et al., 2021. Long-Term Mechanical and Acoustic Emission Characteristics of Creep in Deeply Buried Jinping Marble Considering

Excavation Disturbance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 139: 104603. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104603

Zhan, J. W., Yao, Z. W., Shen, Y. J., et al., 2025. Sediment Transport Evolution and Impact on Vegetation Recovery in the Hanping Village Landslide-Debris Flow Disaster Chain in Shaanxi, China. *Ecological Engineering*, 219: 107718. https://doi. org/10.1016/j. ecoleng.2025.107718

Zhang, J., Wang, Z. P., Hu, J. Z., et al., 2022. Bayesian Machine Learning-Based Method for Prediction of Slope Failure Time. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4): 1188－1199. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.09.010

Zhang, W. G., Lin, S. C., Wang, L. Q., et al., 2024. A Novel Creep Contact Model for Rock and Its Implement in Discrete Element Simulation. *Computers and Geotechnics*, 167: 106054. https://doi. org/10.1016/j. compgeo.2023.106054

Zhang, Z. Q., Zhu, X. Y., Liu, X. H., 2022. Study on Creep Characteristics and Constitutive Model of Peridotite. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(8): 1525－1535 (in Chinese with English abstract).

Zhao, J., Feng, X. T., Guo, H. S., et al., 2022. Time-Dependent Failure Characteristics of Excavated Rock Masses in Deep Buried Engineering: A Field Case and Experimental Study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(12): 520. https://doi. org/10.1007/s10064-022-03026-x

Zhu, H. H., Azarafza, M., Akgün, H., 2022. Deep Learning-Based Key-Block Classification Framework for Discontinuous Rock Slopes. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4): 1131－1139. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.06.007

Zhu, L., Liu, M., Mao, J. W., et al., 2025.. Evaluation and Resource Security Strategy Study on the International Supply Chain of Zirconium Resources in China. *China Mining Magazine*, 34(10): 1－14 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

蔡鸿宇, 王运敏, 李小双, 等, 2024. 开挖卸荷与孔隙水压耦合作用下千枚岩蠕变力学特性研究. 黄金科学技术, 32(6): 1016－1029.

郭长宝, 闫怡秋, 张永双, 等, 2022. 青藏高原大型深层蠕滑型滑坡变形机制研究进展与展望. 地球科学, 47(10): 3677－3700.

郝君明, 钟积身, 贾佩钱, 等, 2025. 热融滑塌形态特征、演化过程和稳定性模拟综述. 地球科学, 50(12): 4919－4937.

李胜前, 李启航, 2025.. 非线性分级荷载下饱和千枚岩的蠕变损伤本构模型研究. 矿冶工程, 45(6): 39－46, 54.

刘造保, 王川, 周宏源, 等, 2021. 岩石高温高压两刚一柔型真三轴时效力学试验系统研制与应用. 岩石力学与工程学报, 40(12): 2477－2486.

彭铭, 王悦, 马晨议, 等, 2025. 河谷滑坡灾害链风险评估及防控研究进展. 地球科学, 50(10): 3723－3760.

王佳文, 2024. 开挖卸荷与孔隙水压耦合下矿山边坡岩体蠕变特征及损伤本构模型研究(硕士学位论文). 赣州: 江西理工大学.

张志强, 朱星宇, 刘新华, 2022. 橄榄岩蠕变特性及本构模型研究. 岩石力学与工程学报, 41(8): 1525－1535.

朱磊, 刘敏, 毛景文, 等, 2025. 中国锆资源国际供应链评价与资源保障战略研究. 中国矿业, 34(10): 1－14.