

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.003

## 不同初始损伤程度砂岩蠕变力学特性及破坏模式研究\*

邓运辰<sup>1</sup>, 罗忆<sup>1,2</sup>, 徐涛<sup>1</sup>, 李新平<sup>1,2</sup>, 瞿登星<sup>1,2</sup>, 华国威<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 三亚科教创新园, 三亚 572024)

**摘要:** 为深入探究含初始损伤砂岩在复杂应力环境下的长期稳定性和破坏机理, 指导深部岩石工程的安全设计与施工。本研究基于 SHPB 压杆系统, 通过控制冲击气压大小, 成功制备了三种不同初始损伤程度的砂岩试件( $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ )。继而采用全自动岩石三轴试验机, 在 5 MPa、10 MPa、20 MPa 三种围压条件下, 对损伤砂岩进行了系统的三轴蠕变力学试验。试验采用分级加载方式, 每级应力水平下维持 4 h 或直至试件破坏, 实时监测轴向应变变化。深入探究初始损伤程度和围压对砂岩瞬时变形特征、蠕变速率时程演化规律、蠕变破坏应力阈值以及宏观破坏模式的影响机制与耦合作用规律。研究表明: 蠕变应力水平显著影响损伤砂岩的瞬时应变和蠕变应变, 并控制着初始损伤对砂岩蠕变行为的影响程度; 损伤砂岩的稳态蠕变速率随蠕变应力增大呈指数型增长, 低应力下蠕变速率相对较小, 高应力下则急剧增长; 砂岩蠕变破坏应力随初始损伤程度增大呈线性递减趋势, 但随围压增大显著提高; 围压和损伤程度共同决定破坏模式的复杂程度, 低围压下呈现剪切-劈裂复合破坏模式且裂纹发育充分, 高围压下主要表现为简单的剪切破坏模式; 围压对初始损伤影响破坏模式具有弱化效应。研究成果揭示了损伤岩石蠕变破坏的内在机理, 为深部隧道、边坡、采矿等工程中含损伤岩体的长期稳定性评价、支护参数优化和安全预警提供了重要的理论依据和技术支撑。

**关键词:** 初始损伤; 砂岩; 蠕变速率; 蠕变破坏应力; 破坏模式

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0022-11

## Investigation of Creep Mechanical Properties and Failure Modes of Sandstones with Varying Levels of Initial Damage

DENG Yun-chen<sup>1</sup>, LUO Yi<sup>1,2</sup>, XU TAO<sup>1</sup>, LI Xin-ping<sup>1,2</sup>, QU Deng-xing<sup>1,2</sup>, HUA Guo-wei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya 572024, China)

**Abstract:** To thoroughly investigate the long-term stability and failure mechanisms of sandstone with initial damage under complex stress conditions, and to offer insights for the safe design and construction of deep rock engineer-

收稿日期 (Date of reception): 2025-06-25

网络首发日期 (Published online): 2025-07-21

作者简介: 邓运辰 (1997-), 男, 湖南永州人, 博士研究生, 主要从事深部岩体力学、压缩空气储能洞库稳定性研究, (E-mail) dengyunchen102@whut.edu.cn。

通信作者: 罗忆 (1984-), 男, 湖北武汉人, 博士、研究员, 主要从事矿山工程、隧道工程、海洋深地空间工程研究, (E-mail) 2021000077@usx.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (51979208); 湖北省自然科学基金杰出青年人才项目 (2020CFA102); 武汉理工大学自主创新基金项目 (3120625208-104972025RSCrc0007)

**About the author:** DENG Yun-chen (1997-), male, born in Yongzhou city, Hunan province, Ph. D. candidate, mainly engaged in deep rock mechanics and compressed air storage cavern stability research, (E-mail) dengyunchen102@whut.edu.cn.

**Corresponding author:** LUO Yi (1984-), male, born in Wuhan city, Hubei province, Ph. D. researcher, mainly engaged in the research of mine engineering, tunneling engineering, and marine deep earth space engineering, (E-mail) 2021000077@usx.edu.cn.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China (51979208), Outstanding Young Talent Project of Hubei Natural Science Foundation (2020CFA102), Wuhan University of Technology Independent Innovation Fund Project (3120625208-104972025RSCrc0007)

ing projects, this study conducted a systematic examination of the creep mechanical properties of damaged sandstone through comprehensive experimental analyses. The experimental methodology comprised three stages. Initially, a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) system was utilized to generate sandstone specimens with three distinct levels of initial damage ( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ) by precisely regulating the impact air pressure. This dynamic loading process induced controlled distributions of micro-cracks within the rock matrix, thereby simulating realistic damage scenarios encountered in engineering applications. Secondly, conventional triaxial compression tests were carried out to determine the fundamental mechanical properties of both intact and damaged specimens across a range of confining pressures. Thirdly, systematic triaxial creep tests were conducted using a fully automated rock triaxial testing apparatus, applying three different confining pressure levels (5 MPa, 10 MPa, and 20 MPa). The creep tests followed a step-loading procedure, wherein each stress level was sustained for 4 hours or until specimen failure occurred, while continuous monitoring of axial strain development was used to fully capture the creep behavior. The experimental results reveal several pivotal observations. Notably, the creep stress level exerts a substantial influence on both the instantaneous strain and creep strain of damaged sandstone, and it governs the degree to which initial damage impacts the creep behavior of sandstone. A stress threshold  $\sigma_c$  was identified, below which the instantaneous strain increases linearly with creep stress, whereas above this threshold, the growth rate accelerates nonlinearly. This critical threshold value rises progressively with increasing confining pressure. The steady-state creep rate of damaged sandstone demonstrates exponential growth patterns as creep stress increases, remaining modest under low stress conditions but escalating rapidly under high stress levels. Initial damage significantly influences steady-state creep rate only under higher stress conditions, whereas its impact diminishes considerably as confining pressure increases. Quantitative analysis reveals that the creep failure stress decreases linearly with increasing initial damage degree, but increases dramatically with rising confining pressure. Under different confining pressure conditions, the creep failure stress ranges from 67.4% to 94.5% of peak strength, providing essential quantitative parameters for engineering applications. Failure mode analysis elucidates that the complexity of failure patterns is collectively determined by confining pressure and damage degree, with confining pressure exerting a dominant influence. Specimens under low confining pressure exhibit composite failure modes, characterized by a combination of shearing and splitting mechanisms, accompanied by extensive crack propagation. Conversely, under high confining pressure, failure predominantly manifests as simple shear failure with minimal crack formation. Notably, confining pressure exhibits a marked weakening of the initial damage's impact on failure modes. The research findings illuminate the underlying mechanisms driving creep failure in damaged rocks and establish essential relationships between initial damage, stress conditions, and long-term mechanical behavior. These results provide vital theoretical foundations and technical support for assessing the long-term stability of damaged rock masses in deep tunnels, slope engineering, mining operations, and other critical infrastructure projects, as well as optimizing support parameters and developing early warning systems.

**Key words:** initial damage; sandstone; creep rate; creep damage stress; failure mode

随着地下工程开发深度不断增加,地应力、地温等因素对围岩稳定性的影响日益突出。在工程开挖过程中,围岩不可避免地受到各种干扰因素的影响,如爆破震动、钻孔扰动、应力卸载等<sup>[1,2]</sup>,这些因素会在岩体内部形成不同程度的初始损伤。初始损伤不仅会影响岩体的即时力学性能,还会显著改变其长期力学行为,特别是蠕变特性和破坏模式。砂岩作为一种常见的岩体材料,广泛分布于矿山巷道、隧道工程和边坡工程中,研究不同初始损伤程度砂岩的蠕变力学特性及破坏模式对于评估工程长期稳定性、指导支护设计具有重要的工程价值和现实意义。

近年来,国内外学者对含初始损伤岩石的蠕变特性开展了广泛研究。田学军等针对不同冻融循环作用下砂岩进行分级卸荷蠕变试验<sup>[3]</sup>,揭示砂岩衰

减、稳态和加速蠕变 3 阶段特征;通过引入非线性黏滞元件对牛顿黏性系数进行修正,将冻融循环与三轴卸荷蠕变行为相结合,提出能够表征蠕变全过程的非线性黏弹塑性本构模型,并基于 ABAQUS 用户自定义材料接口完成模型二次开发。郭永成等为研究内部岩体的变形特性<sup>[4]</sup>,通过选取库岸边坡岩体,按照相关规程制成标准岩样,利用 TOP INDUSTRIE 多功能岩石三轴测试系统,开展了无水压、有水压和循环水压 3 种状态下的饱和砂岩蠕变试验。Deng 等结合改进的 Burgers 模型、CS 模型和损伤力学理论<sup>[5]</sup>,建立了考虑初始损伤影响的岩石时效损伤模型,并通过 ANSYS/LS-DYNA 实现了二次开发。张加兵等为研究层状千枚岩横观各向同性蠕变特性对隧道衬砌结构变形特征的影响<sup>[6]</sup>,采用单轴压缩

蠕变试验,分析了不同层理倾角千枚岩的蠕变特性,基于现有黏弹塑性损伤蠕变模型,构建了千枚岩横观各向同性蠕变损伤本构模型。王洋等以变质砂岩为研究对象<sup>[7]</sup>,针对加轴压分级卸围压和加轴压恒围压 2 种不同加载方式进行三轴蠕变试验,研究变质砂岩的蠕变性质。程守业等通过循环加卸载后的蠕变试验<sup>[8]</sup>,研究了应力-应变响应在恒定偏应力下的硬化与软化效应,并揭示了轴向应变率和体积应变率之间的演化特征。李杨杨等基于长时蠕变-循环载荷-卸围压试验<sup>[9]</sup>,研究了初始蠕变损伤与循环载荷叠加作用下煤岩劣化特性的演化规律,创建了蠕变与循环载荷叠加作用损伤演化模型。姚梦圆等基于耗散能理论和加卸载试验确定不同围压下砂岩的初始损伤<sup>[10]</sup>,构建了一种新的考虑初始损伤的砂岩黏弹塑性蠕变模型。李杨杨等通过单轴循环荷载试验<sup>[11]</sup>,结合扫描电子显微镜和 XTDIC 三维全场应变测量系统,研究了循环扰动荷载下蠕变损伤煤岩宏-细观破裂演化规律及劣化失效机制。王春萍等将经典 Burgers 模型的黏性元件替换为分数阶黏弹性元件<sup>[12]</sup>,构建了裂隙花岗岩非线性蠕变本构模型。范浩等通过控制卸荷量制备了不同初始卸荷损伤程度的砂岩试样<sup>[13]</sup>,研究了初始卸荷损伤程度对砂岩应变特征、蠕变速率等参数的影响规律。秦哲等运用损伤力学理论和推广后的应变等价原理<sup>[14]</sup>,构建岩石宏细观耦合损伤变量,并建立了一种新型非线性蠕变损伤模型。

尽管上述研究取得了丰硕成果,但仍存在以下问题有待解决:一是现有研究主要集中在理论模型的建立,缺乏对不同初始损伤程度岩石蠕变力学特性全面、系统的试验研究;二是关于初始损伤程度对岩石蠕变破坏应力定量影响关系的研究较少;三是对围压与初始损伤程度耦合作用下岩石蠕变特性和破坏模式的研究不够深入;四是对初始损伤程度与围压交互作用下蠕变变形、蠕变速率特征等方面的机理探讨不足。针对这些问题,本研究借助 SHPB

压杆系统制备不同初始损伤程度的砂岩试件,通过全自动岩石三轴试验机开展损伤砂岩的三轴蠕变力学试验,系统研究初始损伤程度及围压对砂岩变形特征、蠕变速率特征、蠕变破坏应力以及破坏模式的影响规律。研究成果可为地下工程中岩体蠕变变形预测、支护设计以及长期稳定性评价提供理论基础和技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 初始损伤试件制备

将岩样加工成直径为 50 mm × 100 mm 的标准圆柱体砂岩试件(如图 1(a)),并利用 RSM-SY6 基桩声波检测仪剔除波速异常的试件。假定筛选后的试件处于无损状态,现对无损试件进行人工预损伤。由于地下洞室开挖时动力扰动对围岩造成的动力损伤,故通过分离式霍普金森压杆装置提供不同大小的冲击气压对试件进行不同程度的动力加载预损伤处理,如图 1(b)。由于 0.6 bar 的冲击气压下砂岩试件的损伤程度太小,而 1.0 bar 的冲击气压下试件两端面会出现较大的掉块,影响试件进行后续蠕变试验,故采用 0.7 bar、0.8 bar、0.9 bar 三种冲击气压对试件进行预损伤,分别对应  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  三种初始损伤程度,加载预损伤试验方案如表 1 所示。每种冲击气压下制备 13 组损伤砂岩试件,同样采用超声波测试仪将波速异常的试件剔除。见表 1。



(a) 标准试件 (a) Standard specimen  
(b) SHPB 压杆装置 (b) SHPB lever device

图 1 标准试件及 SHPB 压杆装置

Fig. 1 Standard specimen and SHPB lever device

表 1 加载预损伤试验方案

Table 1 Pre-damage loading test program

试验类型 Type of experiment	组别 Group	冲击气压 Shock pressure/ bar	试件数量/个 Number of specimens/pieces	初始损伤程度 Initial degree of damage
加载预损伤 Pre-damage loading	1	0.7	13	$D_1$
	2	0.8	13	$D_2$
	3	0.9	13	$D_3$

### 1.2 试验系统及方案

砂岩的蠕变试验采用 TOP INDUSTRIE 全自动

岩石三轴试验机,如图 2 所示。由于分级增量法(陈氏加载法)可以较好地避免岩石的非均质性对

试验结果造成离散性,也可以降低对设备的需求以及大大缩短试验的时间。因此,本文采用分级增量法。为给三轴蠕变试验起始轴压和分级增量加载法中荷载应力水平的选取提供参考依据,分别对三种不同初始损伤程度的砂岩进行单轴压缩试验,且以 *H-7* (在 0.7 bar 的冲击气压下经历了冲击预损伤后的砂岩试件,初始损伤程度为  $D_1$ ) 系列的损伤砂岩试件为对象,分别开展了围压 5 MPa、10 MPa、20 MPa 的三轴压缩试验。由单轴压缩试验知道,试件 *H-7* 的峰值强度为 45.3 MPa, *H-8* (在 0.8 bar 的冲击气压下经历了冲击预损伤后的砂岩试件,初始损伤程度为  $D_2$ ) 的峰值强度为 32.1 MPa, *H-9*

(在 0.9 bar 的冲击气压下经历了冲击预损伤后的砂岩试件,初始损伤程度为  $D_3$ ) 的峰值强度为 26.3 MPa,砂岩的峰值强度与损伤程度呈负相关,损伤程度越大,峰值强度越小;同时可以发现,损伤程度越大,曲线直线段的斜率越小,即砂岩的弹模越小。由此说明,初始损伤对砂岩的基本力学特性影响显著。由三轴压缩试验知道, *H-7* 系列的损伤砂岩在 5 MPa、10 MPa、20 MPa 围压下的峰值强度分别为 86.7 MPa、92.2 MPa、134.4 MPa。随着围压的增大,损伤砂岩试件受到的侧向约束越来越大,侧向变形受到了限制,试件的整体承载力能力得到增强。

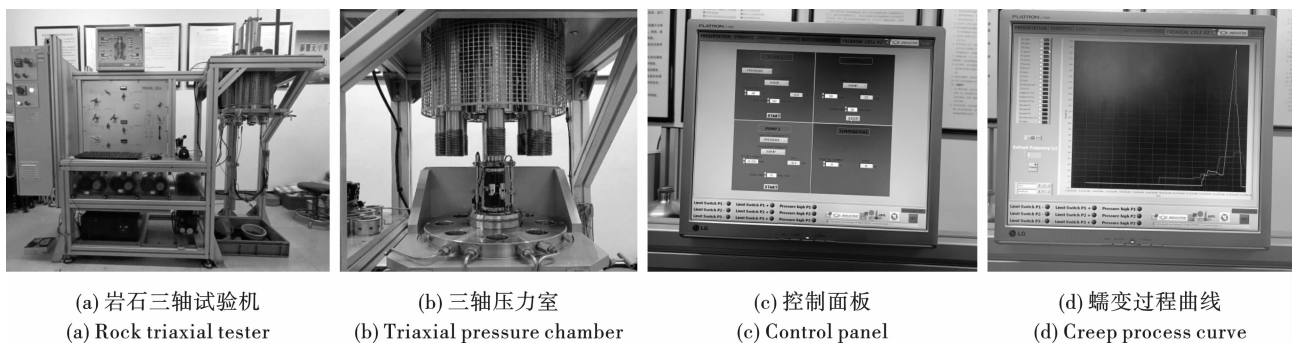


图 2 岩石三轴试验机  
Fig. 2 Rock triaxial tester

蠕变实试验时三轴压力室的围压值取 5 MPa、10 MPa、20 MPa,根据损伤砂岩的单轴压缩试验及三轴压缩试验的结果,初步设定 7 级加载应力,且每级加载应力的作用时间定为 4 h,图 3 为蠕变试验分级增量加载应力水平。为了便于区分试件,现将试件进行编号,例如,围压为 5 MPa,在 0.7 bar、0.8 bar、0.9 bar 的冲击气压下试样的初始损伤状态分别用  $5D_1, 5D_2, 5D_3$  表示,其中 5 代表试验的围压值,下标 1 至 3 分别代表三种初始损伤状态。

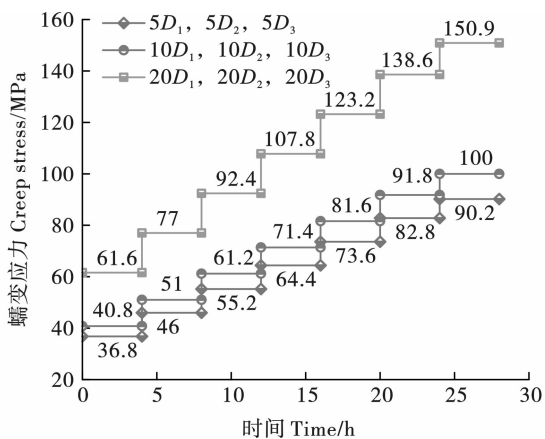


图 3 蠕变试验分级增量加载应力水平  
Fig. 3 Creep test graded incremental loading stress levels

## 2 试验结果

### 2.1 变形特征

图 4 为损伤砂岩在 5 MPa、10 MPa、20 MPa 围压下的蠕变时程曲线。由图 4 可知,损伤砂岩的蠕变时程曲线整体呈阶梯上升的趋势,荷载施加后,瞬时应变立即产生,之后随时间缓慢增加的应变即为蠕变应变。从图 4 中可以明显看出,蠕变应力水平不仅对损伤砂岩的瞬时应变的影响显著,对蠕变应变的影响也较大。当蠕变应力较小时,随着时间的增加,损伤砂岩的蠕变速率会逐渐降低至零,此时损伤砂岩发生衰减蠕变;当蠕变应力较大时,损伤砂岩的蠕变速率经历短暂的降低并最终保持为某一恒定值,蠕变应变稳定增加,损伤砂岩随之进入到了稳态蠕变阶段;当蠕变应力超过其破坏应力阈值时,损伤砂岩会经历蠕变完整的三个阶段,蠕变应变快速增长直至最终试件破坏。此外,砂岩的初始损伤程度对其蠕变的影响也较大。当损伤砂岩处于同一围压条件下时,初始损伤程度大的砂岩在较低蠕变应力下就会发生加速蠕变至试件破坏,蠕变的时效变形时间越短。并且,围压一定时损伤程度越大砂岩的变形值越大。

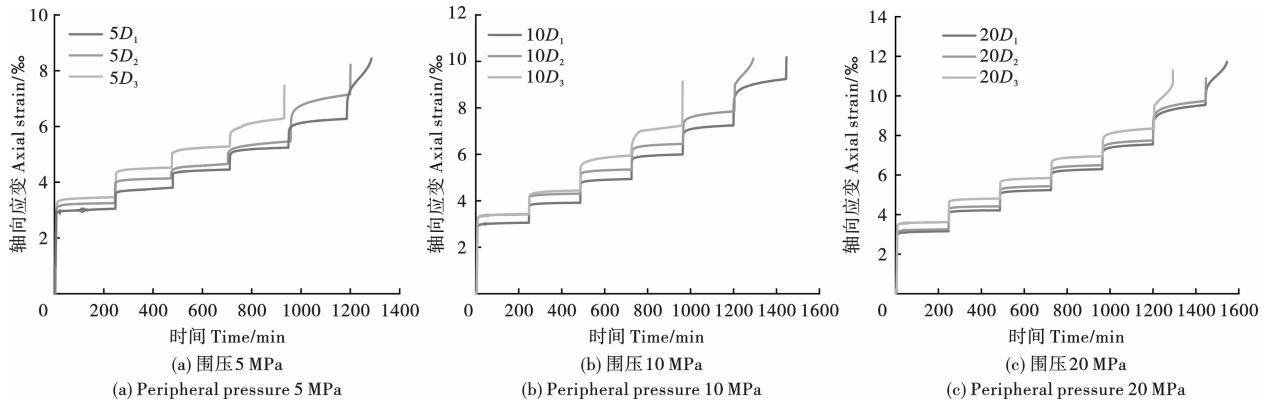


图4 不同初始损伤程度砂岩的蠕变时程曲线

Fig. 4 Creep time course curves for sandstones with different initial damage levels

采用陈氏加载法对蠕变时程曲线进行处理,得到了不同围压下不同初始损伤程度砂岩的分级蠕变曲线,如图5~图7所示。从图中可以发现,当蠕变应力水平较低时,损伤砂岩的蠕变速率在较短的时间内降低到零,分级蠕变曲线近似水平,但当蠕变应力逐渐增大后,砂岩试件会出现蠕变三阶段的后两个阶段。此外,在围压及初始损伤程度一定时,蠕变应力增大会延长损伤砂岩的衰减蠕变过程。以

10D<sub>1</sub>为例,当荷载水平为40.8 MPa时,衰减蠕变过程持续的时间为12 min;当荷载水平为51.0 MPa时,衰减蠕变过程持续的时间为18 min;当荷载水平为61.2 MPa时,衰减蠕变过程持续的时间为25 min;当荷载水平为71.4 MPa时,损伤砂岩的衰减蠕变时间为40 min;当荷载水平为81.6 MPa时,损伤砂岩的衰减蠕变时间为64 min;当荷载水平为91.8 MPa时,损伤砂岩的衰减蠕变时间为85 min。

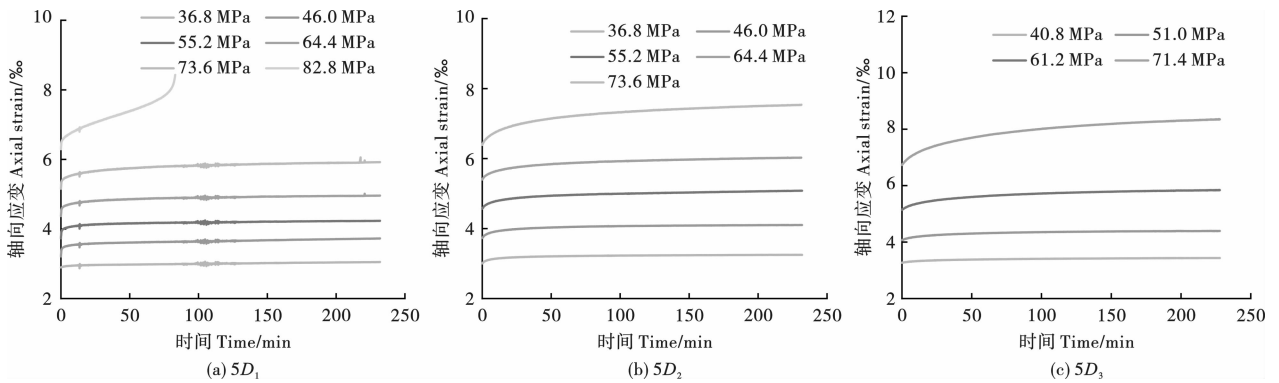


图5 5 MPa围压下不同初始损伤程度砂岩的分级蠕变曲线

Fig. 5 Graded creep curves of sandstones with different degrees of initial damage under 5 MPa perimeter pressure

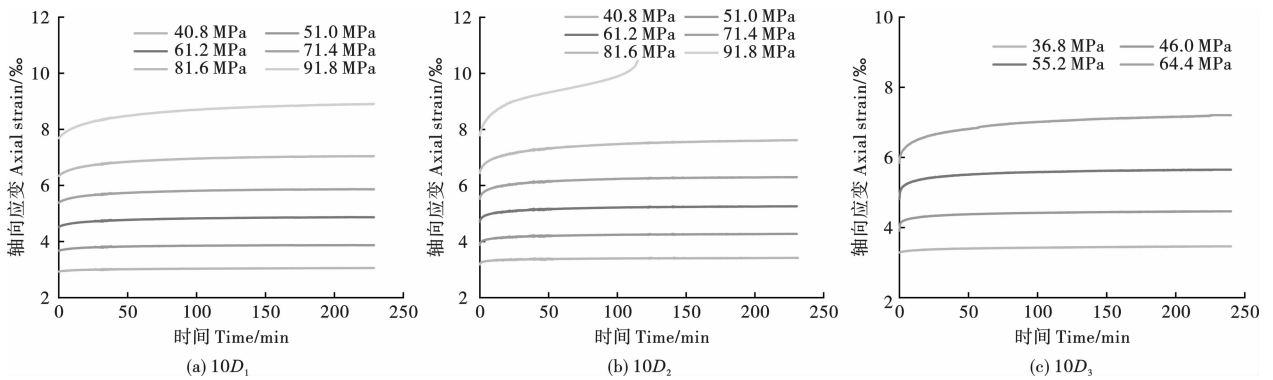


图6 10 MPa围压下不同初始损伤程度砂岩的分级蠕变曲线

Fig. 6 Graded creep curves of sandstones with different degrees of initial damage under 10 MPa perimeter pressure

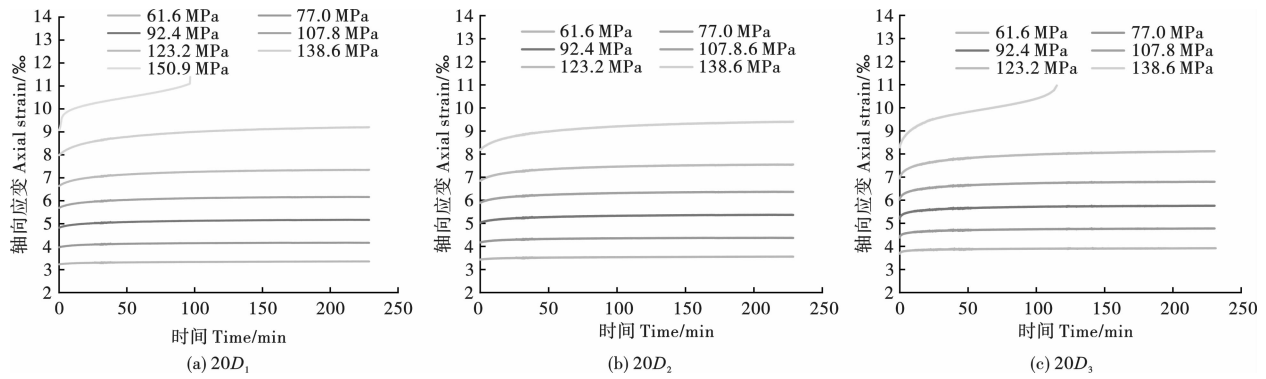


图 7 20 MPa 围压下不同初始损伤程度砂岩的分级蠕变曲线

Fig. 7 Graded creep curves of sandstones with different degrees of initial damage under 20 MPa perimeter pressure

现基于砂岩的分级蠕变曲线剥离出了瞬时变形以及蠕变变形,得到了 5 MPa、10 MPa、20 MPa 围压下不同蠕变应力时损伤砂岩的瞬时应变情况,如表 2~4 所示。损伤砂岩的瞬时应变与蠕变应力的关系如图 8 所示。由图 8 可知,损伤砂岩的蠕变应力越大,其瞬时应变也越大,曲线的前段近似呈直线,

后段曲线上扬出现非线性段。说明存在一个应力阈值  $\sigma_c$ ,当蠕变应力较小低于  $\sigma_c$  时,随着蠕变应力的增大损伤砂岩的瞬时应变线性增加;当蠕变应力较大高于  $\sigma_c$  时,随着蠕变应力的增大损伤砂岩的瞬时应变增速越大。并且,围压越大  $\sigma_c$  值也随之增大。此外,初始损伤对砂岩的瞬时应变影响较小。

表 2 围压 5 MPa 时不同蠕变应力下的瞬时应变

Table 2 Instantaneous strains under different creep stresses at a peripheral pressure of 5 MPa

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的瞬时应变 Instantaneous strain under different creep stress levels/%					
	36.8	46.0	55.2	64.4	73.6	82.8
5D <sub>1</sub>	2.895	3.610	4.365	5.171	6.157	7.395
5D <sub>2</sub>	3.004	3.727	4.466	5.401	6.789	
5D <sub>3</sub>	3.109	3.812	4.611	5.749		

表 3 围压 10 MPa 时不同蠕变应力下的瞬时应变

Table 3 Instantaneous strains under different creep stresses at a peripheral pressure of 10 MPa

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的瞬时应变 Instantaneous strain under different creep stress levels/%					
	40.8	51.0	61.2	71.4	81.6	91.8
10D <sub>1</sub>	3.030	3.672	4.425	5.290	6.348	7.691
10D <sub>2</sub>	3.184	3.884	4.605	5.527	6.447	7.788
10D <sub>3</sub>	3.268	4.068	4.842	5.831		

表 4 围压 20 MPa 时不同蠕变应力下的瞬时应变

Table 4 Instantaneous strains under different creep stresses at a peripheral pressure of 20 MPa

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的瞬时应变 Instantaneous strain under different creep stress levels/%						
	61.6	77.0	92.4	107.8	123.2	138.6	150.9
20D <sub>1</sub>	3.230	3.972	4.825	5.690	6.648	7.991	9.073
20D <sub>2</sub>	3.430	4.172	5.025	5.890	6.848	8.191	
20D <sub>3</sub>	3.684	4.384	5.205	6.027	6.947	8.288	

5 MPa、10 MPa、20 MPa 围压下不同蠕变应力时损伤砂岩的蠕变应变情况如表 5~表 7 所示,图 9

为损伤砂岩的蠕变应变与蠕变应力的关系。由图 9 可知,蠕变应力对蠕变应变影响显著,蠕变应力越

大,蠕变应变增加地越快。从图中还可以看到,存在一个应力阈值,此应力阈值可认为与裂纹不稳定扩展应力一致。在蠕变应力较低的时候,不同初始损伤程度砂岩的蠕变应变基本一致,而当蠕变应力进一步增大超过该应力阈值时,同一围压下不同初始

损伤程度砂岩的蠕变应变明显不同,此时初始损伤对砂岩的蠕变应变影响显著。从图 9 还可以看到,围压对试件破坏前所产生的蠕变应变的大小影响显著,围压越大,试件破坏前的蠕变应变越大。

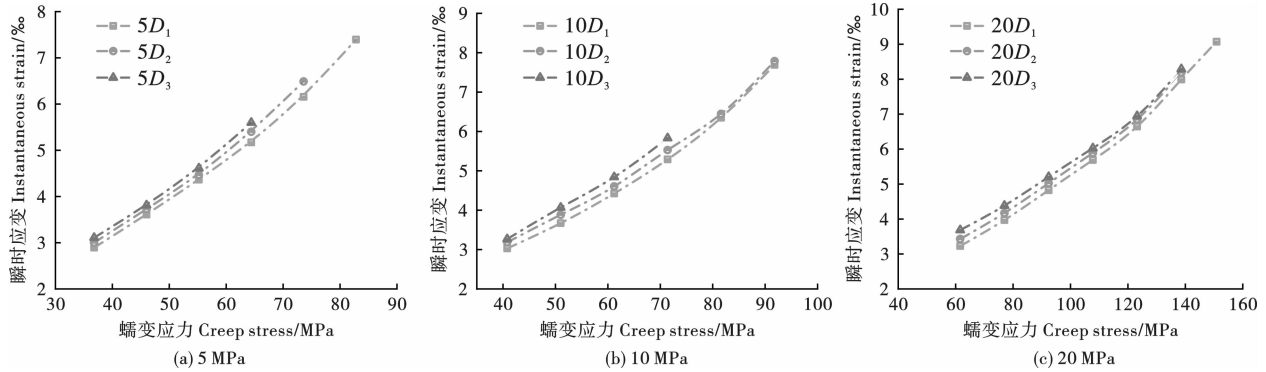


图 8 损伤砂岩的瞬时应变与蠕变应力的关系

Fig. 8 Transient strain versus creep stress in damaged sandstones

表 5 围压 5 MPa 时不同蠕变应力下的蠕变应变

Table 5 Creep strain under different creep stresses at a peripheral pressure of 5 MPa

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的瞬时应变 Instantaneous strain under different creep stress levels/%					
	36.8	46.0	55.2	64.4	73.6	82.8
5D <sub>1</sub>	0.157	0.301	0.369	0.461	0.767	2.105
5D <sub>2</sub>	0.173	0.323	0.475	0.725	1.450	
5D <sub>3</sub>	0.194	0.328	0.738	1.355		

表 6 围压 10 MPa 时不同蠕变应力下的蠕变应变

Table 6 Creep strain under different creep stresses at a peripheral pressure of 10 MPa

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的瞬时应变 Instantaneous strain under different creep stress levels/%					
	40.8	51.0	61.2	71.4	81.6	91.8
10D <sub>1</sub>	0.155	0.296	0.399	0.492	0.699	1.815
10D <sub>2</sub>	0.165	0.325	0.553	0.771	1.172	2.671
10D <sub>3</sub>	0.190	0.351	0.699	1.616		

表 7 围压 20 MPa 时不同蠕变应力下的蠕变应变

Table 7 Creep strain under different creep stresses at a peripheral pressure of 20 MPa

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的瞬时应变 Instantaneous strain under different creep stress levels/%						
	61.6	77.0	92.4	107.8	123.2	138.6	150.9
20D <sub>1</sub>	0.125	0.196	0.340	0.472	0.699	1.215	2.317
20D <sub>2</sub>	0.146	0.217	0.360	0.533	0.879	1.953	
20D <sub>3</sub>	0.165	0.251	0.413	0.671	1.172	2.672	

### 2.2 蠕变速率特征

岩石蠕变速率是反映其蠕变特性的重要指标,由于岩石衰减蠕变过程、加速蠕变过程的时间非常

短暂,岩石蠕变以稳态蠕变过程占主导地位,故对损伤砂岩的稳态蠕变速率进行了分析。损伤砂岩在 5 MPa、10 MPa、20 MPa 围压及不同蠕变应力下的稳

态蠕变速率情况表 8 ~ 表 10, 图 10 为损伤砂岩的稳态蠕变速率与蠕变应力的关系。由图 10 可知, 蠕变应力增大时, 损伤砂岩的稳态蠕变速率呈指数增大, 当蠕变应力较小时, 稳态蠕变速率也相对较小; 当蠕变应力较大时, 稳态蠕变速率迅速增长。在围压一

定时, 初始损伤对稳态蠕变速率的影响程度受蠕变应力大小的影响, 当蠕变应力较小时, 稳态蠕变速率几乎不受初始损伤的影响; 当蠕变应力较大时, 稳态蠕变速率受初始损伤的影响明显。并且, 围压增加, 不同损伤砂岩之间的稳态蠕变速率的差异逐渐减少。

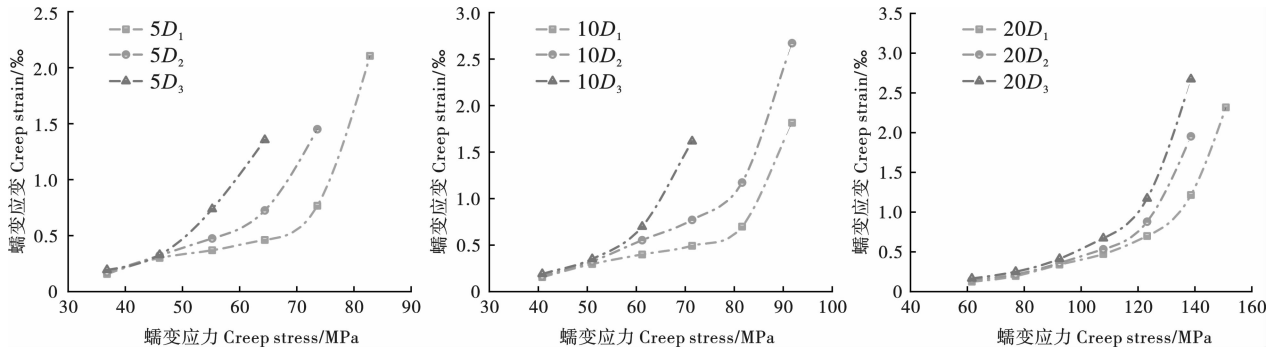


图 9 损伤砂岩的蠕变应变与蠕变应力的关系

Fig. 9 Creep strain versus creep stress in damaged sandstones

表 8 围压 5 MPa 时不同蠕变应力下的稳态蠕变速率

**Table 8 Steady state creep rate under different creep stresses at 5 MPa peripheral pressure**

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的稳态蠕变速率 Steady-state creep rate under different creep stress levels/(10 <sup>-4</sup> /h)				
	36.8	46.0	55.2	64.4	73.6
5D <sub>1</sub>	0.114	0.217	0.277	0.409	0.722
5D <sub>2</sub>	0.121	0.226	0.344	0.526	1.127
5D <sub>3</sub>	0.130	0.232	0.403	1.101	

表 9 围压 10 MPa 时不同蠕变应力下的稳态蠕变速率

**Table 9 Steady state creep rate under different creep stresses at 10 MPa peripheral pressure**

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的稳态蠕变速率 Steady-state creep rate under different creep stress levels/(10 <sup>-4</sup> /h)					
	40.8	51.0	61.2	71.4	81.6	91.8
10D <sub>1</sub>	0.116	0.134	0.245	0.374	0.598	1.217
10D <sub>2</sub>	0.121	0.154	0.286	0.461	0.877	
10D <sub>3</sub>	0.124	0.157	0.404	0.863		

表 10 特定裂纹长度所需压力

**Table 10 Pressure to rupture the given flaw length**

初始损伤 Initial damage	不同蠕变应力水平下的稳态蠕变速率 Steady-state creep rate under different creep stress levels/(10 <sup>-4</sup> /h)					
	61.6	77.0	92.4	107.8	123.2	138.6
20D <sub>1</sub>	0.116	0.134	0.225	0.374	0.598	1.217
20D <sub>2</sub>	0.122	0.144	0.232	0.413	0.728	
20D <sub>3</sub>	0.131	0.154	0.239	0.461	0.877	

### 2.3 初始损伤与蠕变破坏应力的关系

本文根据砂岩分级蠕变曲线的形态来确定蠕变破坏应力, 主要思路为: 如果损伤砂岩经历了完整的蠕变三阶段才破坏, 则认为此时的蠕变应力即为砂

岩的蠕变破坏应力; 如果砂岩试件在此级蠕变应力下出现了短暂的衰减蠕变及稳态蠕变后, 然后马上发生加速蠕变破坏, 则认为此级蠕变应力与上一级蠕变应力的平均值即为蠕变破坏应力; 如果砂岩试

件在此级蠕变应力的加载过程中发生破坏,则认为上一级蠕变应力即为蠕变破坏应力。例如,如图6所示,围压10 MPa时,10D<sub>1</sub>的砂岩在91.8 MPa的蠕变应力下没有发生破坏,但在加载100 MPa蠕变应力过程中破坏,故取蠕变破坏应力为91.8 MPa;

10D<sub>2</sub>的砂岩在91.8 MPa的蠕变应力下发生了衰减、稳态蠕变,随之进入加速蠕变过程并发生破坏,故取此级与上一级蠕变应力的平均值86.7 MPa作为蠕变破坏应力。

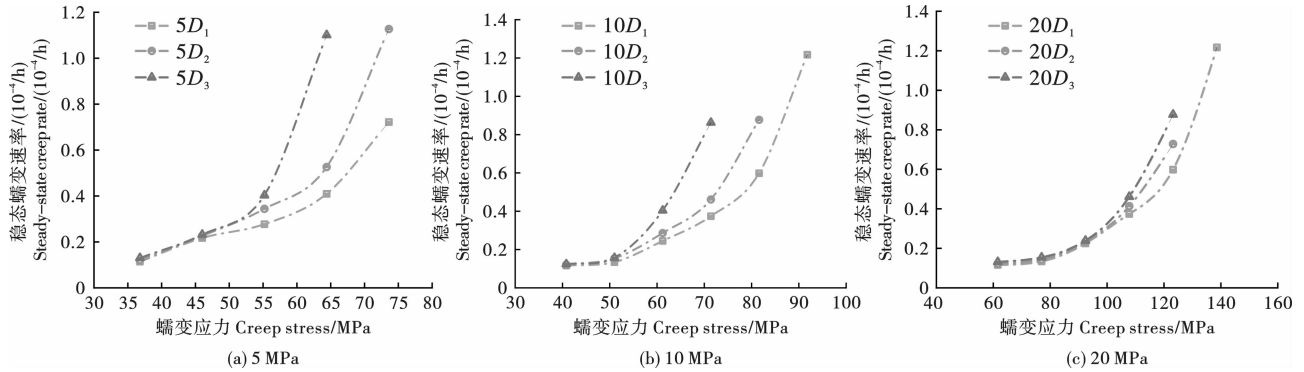


图10 损伤砂岩的稳态蠕变速率与蠕变应力的关系

Fig. 10 Steady-state creep rate versus creep stress in damaged sandstones

从图11中可以发现,随着初始损伤程度的增大,砂岩的蠕变破坏应力线性降低。但是,随着围压的增大,砂岩的蠕变破坏应力急剧增加。此外,由图11中的拟合曲线可以看到,围压为5 MPa时,蠕变

破坏应力处于峰值强度的73.8%~89.6%之间;围压为10 MPa时,蠕变破坏应力处于峰值强度的67.4%~86.6%之间;围压为20 MPa时,蠕变破坏应力处于峰值强度的85.4%~94.5%之间。

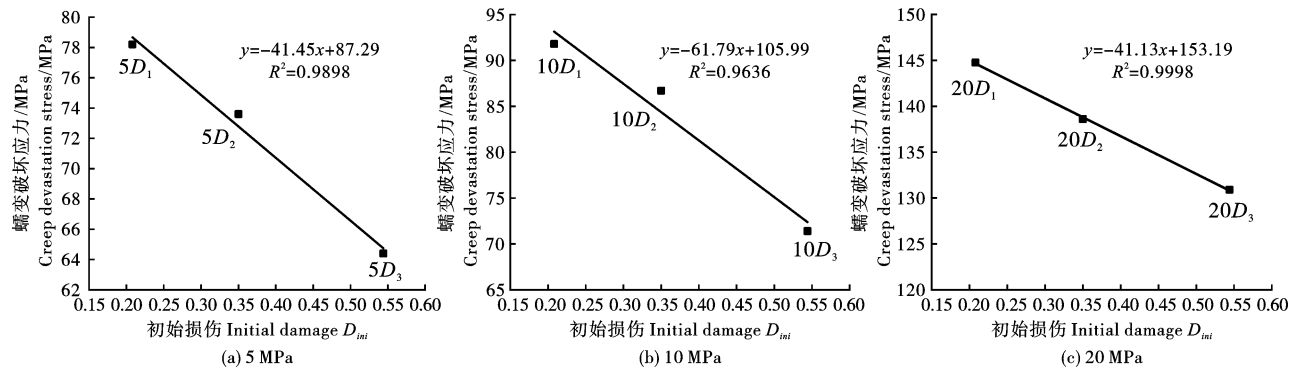


图11 不同围压下初始损伤与蠕变破坏应力的关系

Fig. 11 Relationship between initial damage and creep devastation stress under different perimeter pressures

## 2.4 蠕变破坏模式

由于损伤砂岩的蠕变过程具有不同的初始损伤程度、应力路径、围压等,其在经历加速蠕变后发生破坏,砂岩的破坏模式各不相同。本文开展了围压5 MPa、10 MPa、20 MPa下的三轴蠕变试验,基于蠕变试验结果可以明显地发现,损伤砂岩试件出现了三种破坏模式—剪切破坏、劈裂破坏、剪切和劈裂共同起主导作用的复合破坏模式,图12~图14为损伤砂岩在不同围压下的蠕变破坏情况。

由图12可知,围压为5 MPa时,不同初始损伤程度砂岩试件的破坏方式为剪切破坏以及剪切和劈裂共同起主导作用的复合破坏模式。当砂岩初始损

伤程度较小时(5D<sub>1</sub>、5D<sub>2</sub>),在试件的表面出现了一条剪切裂纹,剪切破坏面贯穿整个砂岩试件,并且试件的上端有较小的裂纹;当砂岩初始损伤程度较大时(5D<sub>3</sub>),砂岩试件有着较为复杂的破坏形式,不仅存在贯穿整个试件的剪切面,同时也存在劈裂面,不仅有主裂纹,还有不少的细小裂纹,裂纹数量较多,且裂纹宽度较大,试件较为破碎。

图13为10 MPa围压下损伤砂岩的破坏情况,由图可知,围压为10 MPa时,三种不同初始损伤程度砂岩均发生了剪切破坏。当砂岩初始损伤程度较小时(10D<sub>1</sub>、10D<sub>2</sub>),试件表面产生了一条显著的剪切裂纹,剪切破坏面贯穿整个砂岩试件,并将试件分

割成体积近似相等的两部分; 当初始损伤程度较大时 ( $10D_3$ ), 砂岩试件的表面不仅存在贯穿整个试件的剪切破坏面, 同时在试件端部还存在劈裂破坏面, 试件端部的侧面出现了局部的折断破坏, 裂纹数量相对较少, 裂纹宽度相对较小, 试件相对较为完整。

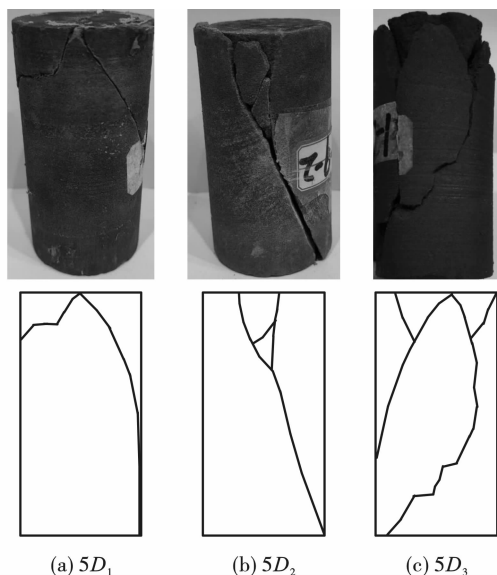


图 12 5 MPa 围压下不同初始损伤程度砂岩的破坏情况  
Fig. 12 Destruction of sandstones with different initial damage levels under 5 MPa perimeter pressure

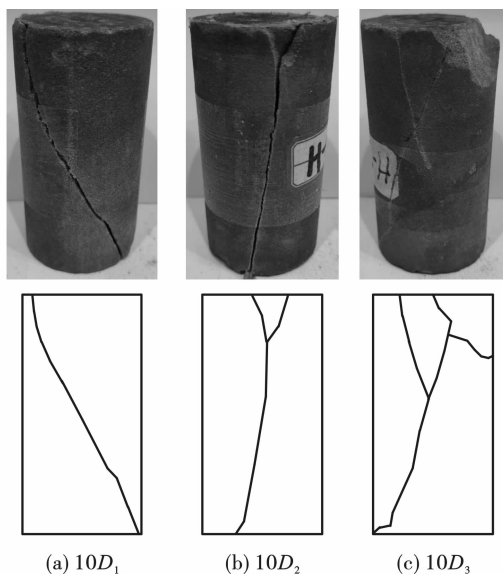


图 13 10 MPa 围压下不同初始损伤程度砂岩的破坏情况  
Fig. 13 Destruction of sandstones with different initial damage levels under 10 MPa perimeter pressure

从图 14 中可以知道, 围压为 20 MPa 时, 损伤砂岩均发生了剪切破坏。在 20 MPa 围压下, 损伤砂岩的破坏形式比较简单, 试件表面仅存在一个剪切破坏面将试件分成体积近似相等的两部分, 损伤程度较大的试件端部存在一条细小微裂纹, 裂纹整体数

量较少, 裂纹宽度较小, 试件较为完整。此外, 在 20 MPa 的高围压下, 初始损伤程度对砂岩的蠕变破坏形式基本没有影响。

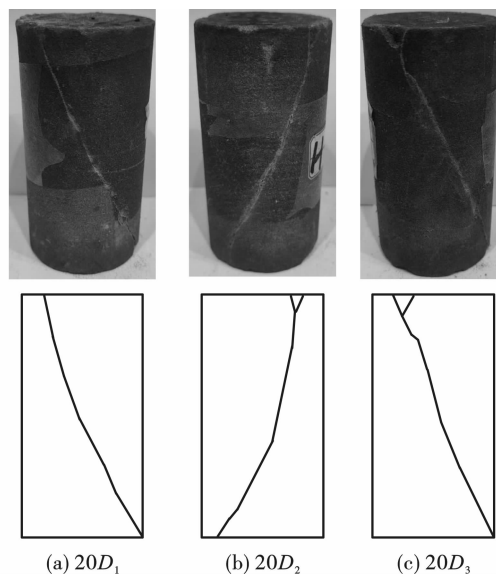


图 14 20 MPa 围压下不同初始损伤程度砂岩的破坏情况  
Fig. 14 Destruction of sandstones with different initial damage levels under 20 MPa perimeter pressure

综上所述, 当围压较低时, 损伤砂岩的破坏模式为剪切和劈裂共同起主导作用的复合破坏模式, 裂纹数量较多, 且裂纹宽度较大, 试件较为破碎。当围压进一步增加时, 损伤砂岩的破坏形式趋于简单, 裂纹数量减少, 试件越完整。当围压很高时, 损伤砂岩有着较为简单的破坏形式, 仅出现剪切主裂纹, 裂纹数量很少, 裂纹宽度小, 试件较为完整。此外, 在较低围压下, 砂岩试件随着初始损伤程度的增加蠕变破坏形式更复杂, 裂纹数量越多, 试件更为破碎; 当围压较大时, 初始损伤程度对砂岩试件的蠕变破坏模式几乎没有影响。

### 3 结论

通过动力加载制备不同初始损伤程度的砂岩试件, 系统开展了损伤砂岩的单三轴压缩试验和三轴蠕变试验, 深入研究了初始损伤程度和围压对砂岩蠕变力学特性及破坏模式的影响规律, 得出以下主要结论:

1) 蠕变应力水平控制着初始损伤对砂岩蠕变行为的影响程度。损伤砂岩的瞬时应变随蠕变应力呈非线性增长规律, 存在应力阈值  $\sigma_c$ , 当蠕变应力低于  $\sigma_c$  时瞬时应变线性增加, 高于  $\sigma_c$  时增速加快, 且  $\sigma_c$  值随围压增大而提高。蠕变应力对蠕变应变影响显著, 低应力水平下不同初始损伤程度砂岩的

蠕变应变基本一致,高应力水平下初始损伤对蠕变应变的影响才显现。这表明蠕变应力水平是决定初始损伤影响程度的关键因素,为损伤岩体的应力控制提供了重要依据。

2) 损伤砂岩的稳态蠕变速率演化规律受蠕变应力和围压共同控制。稳态蠕变速率随蠕变应力呈指数型增长,低应力下增长缓慢,高应力下急剧增长。初始损伤对稳态蠕变速率的影响程度与蠕变应力密切相关:低应力下稳态蠕变速率几乎不受初始损伤影响,高应力下影响明显。随着围压增加,不同损伤程度砂岩间的稳态蠕变速率差异逐渐减小。砂岩的蠕变破坏应力随初始损伤程度增大呈线性递减,但随围压增大急剧提高。不同围压下蠕变破坏应力占峰值强度的比例范围为 67.4%~94.5%,为工程中损伤岩体的长期强度评估提供了定量参考。

3) 围压和初始损伤程度共同决定砂岩的蠕变破坏模式,且围压具有主导作用。围压越高、损伤程度越小,破坏模式越简单,试件破坏后越完整。低围压下砂岩呈现剪切-劈裂复合破坏模式,裂纹数量多、宽度大、试件破碎严重;高围压下主要表现为简单的剪切破坏,仅出现少量窄小的剪切主裂纹,试件相对完整。在低围压条件下,初始损伤程度增加会使破坏形式更加复杂,裂纹发育更充分;而在高围压条件下,初始损伤程度对破坏模式的影响微弱。这种围压对初始损伤影响的弱化效应揭示了深部高应力环境下岩体破坏的主控因素,为深部工程的支护设计和稳定性评价提供了理论指导。

### 参考文献 (References)

- [1] 丁三毛. 考虑地应力影响的深埋圆形管道在爆破 P 波作用下的动力响应[J]. 爆破, 2023, 40(3): 177-183, 198.
- [1] DING San-mao. Dynamic response of deep buried circular pipeline subjected to blasting P-wave considering influence of in-situ stress [J]. Blasting, 2023, 40(3): 177-183, 198. (in Chinese)
- [2] 贾楠, 吴超, 罗周全, 等. 动力扰动下采空区围岩非线性响应演化特性分析[J]. 爆破, 2016, 33(3): 10-16.
- [2] JIA Nan, WU Chao, LUO Zhou-quan, et al. Nonlinear response evolution characteristics of goaf surrounding rocks under dynamic disturbance [J]. Blasting, 2016, 33(3): 10-16. (in Chinese)
- [3] 田学军, 刘峰, 牛小明, 等. 在冻融循环作用下砂岩三轴卸荷蠕变特性研究及模型二次开发[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(6): 87-94.
- [3] TIAN Xue-jun, LIU Feng, NIU Xiao-ming, et al. Study on triaxial unloading creep characteristics of sandstone under freeze-thaw cycles and secondary development of model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(6): 87-94. (in Chinese)
- [4] 郭永成, 王树楠, 李建林, 等. 不同水压下饱和砂岩分级加载蠕变特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(3): 910-916.
- [4] GUO Yong-cheng, WANG Shu-nan, LI Jian-lin, et al. Study on creep characteristics of saturated sandstone under graded loading with different water pressure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(3): 910-916. (in Chinese)
- [5] 邓云辰, 罗毅, 龚hang-li, 等. Creep properties and a time-dependent damage constitutive model of sandstone considering the effect of initial damage [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2025, 25(2): 1-17.
- [6] 张加兵, 阳宗泉, 都荣环, 等. 基于各向异性蠕变特性的隧道结构变形特征研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(3): 917-928.
- [6] ZHANG Jia-bing, YANG Zong-quan, DU Rong-huan, et al. Research on the deformation characteristics of tunnel structures based on anisotropic creep properties [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(3): 917-928. (in Chinese)
- [7] 王洋, 荣传新, 王镇森, 等. 变质砂岩分数阶蠕变损伤模型研究[J]. 金属矿山, 2025(6): 63-71.
- [7] WANG Yang, RONG Chuan-xin, WANG Zhen-sen, et al. Study on Fractional Creep Damage Model of Metamorphic Sandstone [J]. Metal Mine, 2025(6): 63-71. (in Chinese)
- [8] 程守业, 李民晟, 高峰. 开采扰动与蠕变作用下煤岩体力学响应特征研究[J]. 煤炭工程, 2025, 57(5): 171-177.
- [8] CHENG Shou-ye, LI Min-xi, GAO Feng. Mechanical response characteristics of coal and rock mass under mining disturbance and creep [J]. Coal Engineering, 2025, 57(5): 171-177. (in Chinese)
- [9] 李杨杨, 张士川, 沈宝堂, 等. 蠕变损伤煤岩分段增幅循环劣化机制[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(5): 64-76.
- [9] LI Yang-yang, ZHANG Shi-chuan, SHEN Bao-tang, et al. Subsection amplification cyclic deterioration mechanism of creep damaged coal [J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(5): 64-76. (in Chinese)