引用格式：蔡冠军，吴琼，刘运荣，等，2025. 不同顶板强度垮落带破碎岩体蠕变特性研究[J]. 地质力学学报，31（4）：657−672. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024135

Citation: CAI G J，WU Q，LIU Y R，et al.，2025. Study on creep characteristics of fractured rock masses in caved zones with different roof strengths[J]. Journal of Geomechanics，31（4）：657−672. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024135

不同顶板强度垮落带破碎岩体蠕变特性研究

蔡冠军[1]，吴　琼[1]，刘运荣[2]，李一丹[2]

CAI Guanjun[1]，WU Qiong[1]，LIU Yunrong[2]，LI Yidan[2]

1. 北京京能地质工程有限公司，北京 102300；
2. 中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083

1. *Beijing Jingneng Geological Engineering Co.*, *LTD.*, *Beijing* 102300, *China*;
2. *School of Engineering and Technology*, *China University of Geosciences* (Beijing), *Beijing* 100083, *China*

Study on creep characteristics of fractured rock masses in caved zones with different roof strengths

Abstract: ［**Objective**］The caved zone in goaf areas is filled with fractured rock masses, and the strength of these fractured rock masses after collapse serves as a key factor causing differential long-term creep characteristics of the goaf. This study aims to comprehensively explore the creep characteristics of fractured rock masses with varying strengths. ［**Method**］Grounded in the similarity theory, we selected analogous models of fractured rock masses representing three strength categories: soft rock, moderately hard rock, and hard rock. By integrating indoor step-loading creep tests with theoretical analysis, a systematic comparison of creep characteristics of fractured rock masses with varying strengths was carried out. ［**Results**］The creep test results of three types of fractured rock masses reveal distinct deformation characteristics. Soft rock masses exhibit “sudden axial strain increments” under loads of 3 kN and 4 kN, while moderately hard rock masses display this phenomenon under a broader range of 3–5 kN. Evolution patterns of instantaneous, creep, and total strains show marked differences as the creep stress increases: soft rock masses demonstrate progressive decreases before stabilizing (instantaneous strain dropping from 0.084% at 1 kN to stable values beyond 4 kN); moderately hard rock masses exhibit an initial increase followed by subsequent decrease with peak strains occurring at different stresses (instantaneous at 2 kN, creep at 3 kN, total at 2 kN); and hard rock masses present more complex characteristics with instantaneous strain initially declining (0.033% to 0.020% in the 1–3 kN range) before rebounding slightly, while creep strain shows a triphasic pattern (increase–decrease–increase) peaking at 0.009% (3 kN) and total strain exhibits an overall trend of initial decrease followed by subsequent increase. Notably, all rock types share decreasing initial and steady-state creep rates with increasing stress. Compared with soft and hard rock masses, moderately hard rock masses experience more significant particle breakage and rearrangement during the creep process. This leads to an initial peak creep rate of 0.176 h^{-1} at 2 kN, exhibiting distinct peak characteristics. In contrast, hard rock masses exhibit rapid decay in creep rate and quick stabilization, reflecting their dense internal structure and strong interparticle contacts. These characteristics endow hard rock masses with rapid and stable mechanical response properties during the load-bearing process. The response differences of rock masses with varying strengths under the same load show positive correlation between rock strength and initial creep rate but an inverse relationship with steady-state rate. This indicates that while high-strength rocks respond more vigorously initially, they stabilize faster than low-strength rocks which sustain a longer duration of deformation. ［**Conclusion**］Under incremenal loading, all three types of fractured rock masses exhibit decreasing trends in both initial and steady-state creep rates with increasing load, with particularly pronounced creep rate variations in the initial stage. ［**Significance**］This study reveals creep characteristics of fractured rock masses of varying strength, providing a theoretical foundation for

第一作者：蔡冠军（1982—），男，正高级工程师，主要从事岩土工程勘察、设计与施工。Email：349621645@qq.com

收稿日期：2025−03−05；**修回日期**：2025−06−06；**录用日期**：2025−06−11；**网络出版日期**：2025−06−12；**责任编辑**：范二平

predicting long-term deformation of caved zones in goaf areas and developing geohazard prevention and control strategies.
Keywords: different strength; fractured rock mass; similar materials; creep characteristics

摘　要：采空区垮落带分布着大量破碎岩体，其中垮落后破碎岩体的强度是导致采空区长期蠕变存在差异的关键因素，亟需明确不同强度破碎岩体的蠕变特性。基于相似理论，选取软岩、中硬岩和硬岩3种不同强度的破碎岩体相似模型，采用室内分级加载蠕变试验与理论分析相结合的方法，系统性对比不同强度破碎岩体蠕变特性。研究结果表明：不同强度破碎岩体的初始蠕变率与稳定蠕变率均随应力增大而减小，且初始阶段蠕变率变化较快；与软岩、硬岩破碎岩体相比，中硬破碎岩体在蠕变过程中发生更为明显的颗粒破碎并引发颗粒重排列，导致其初始蠕变率在2 kN时达到峰值0.176 h^{-1}，呈现出明显的峰值特征；此外，中硬破碎岩体在进入稳定蠕变阶段前蠕变率存在一定波动，而软岩和硬岩破碎岩体则表现为平稳衰减。研究成果揭示了不同强度破碎岩体的差异化蠕变特性，为采空区垮落带长期变形预测与地质灾害防控提供了一定的理论指导。
关键词：不同强度；破碎岩体；相似材料；蠕变特性
中图分类号：TU452　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)04−0657−16
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024135

0　引言

在煤炭资源开采过程中，采空区的形成会导致上覆岩体发生变形、开裂、破碎和压实，尤其在垮落带区域，大量岩体垮落后破碎堆积，形成结构松散、组成复杂的非连续介质(马占国等，2003，张振南等，2005；胡炳南等，2009；王俊光等，2016；张俊文等，2018；张天军等，2021)。相较于完整岩体，破碎岩体强度更低、结构更松散、力学响应更具非线性，其蠕变过程更加复杂，表现出应力敏感性强、变形持续性长、破坏形式多样等特征，严重影响采空区稳定性和工程建设安全性(郭广礼等，2002；刘松玉等，2006；马占国等，2009；王振康，2017)。

外部因素(压力、地下水)以及破碎岩体自身粒径、级配等特性，对其蠕变行为具有显著影响。大量研究表明，由于采空区垮落带破碎岩体与堆石料的蠕变特征及规律具有相似性，因此众多学者开展堆石料蠕变试验探究采空区垮落带破碎岩体的蠕变特征(李海芳等，2010；郁邦永等，2016；徐琨和杨启贵，2021；孙向军等，2024)。相关学者针对堆石料开展了大型三轴蠕变试验，并对其蠕变机理和模型进行了探讨(Sanzeni Alex et al.，2012；题正义等，2012；魏浩等，2020)，对堆石坝粗粒料开展了单级加载和分级加载，在考虑了蠕变模型参数的影响因素和取值范围后，建议将试验开始1 h作为蠕变应力加载瞬时应变与蠕变应变开始的分界点(樊秀娟和茅献彪，2007；孙亚楠等，2019；孙向军等，2023)。采用分级加载方式对破碎煤岩体开展不同应力、不同温度条件下的压实试验，结果表明在压实变形过程中破碎煤岩体的割线模量和切线模量均随着温度的升高而降低(刘楠，2021；戚双星，2022；叶为民等，2022)。此外，由于室内试验仪器尺寸限制，多位学者开展了蠕变相似材料相关研究，针对选取的原则、相似模型制作设计及试验流程开展了系统论述(韩伯鲤等，1997；刘永莉等，2020；温蓬，2023；许尚博等，2023)；同时对不同类型的岩石开展相似模拟试验，研究其蠕变特性及变化规律，其结果表明相似材料与原岩常规力学特性和蠕变破坏规律具有一致性，但缺乏对碎裂体颗粒重组过程的动力学描述(储昭飞，2018；宁奕冰等，2020；李媛和王永岩，2024；孙文斌等，2025)。目前关于不同荷载作用、破碎粒径、级配等因素对破碎岩体蠕变特性的研究已较为丰富。然而，在实际情况中，采空区顶板岩性差异较大，导致形成强度不同的垮落带破碎岩体。破碎岩体的强度是影响采空区蠕变特性的关键因素，直接关系到采空区长期稳定性。目前关于综合对比不同强度垮落带破碎岩体蠕变特性的研究仍存在不足。

基于相似理论，以软岩、中硬岩和硬岩3种强度的破碎岩体相似模型为研究对象，开展室内分级加载蠕变试验，研究不同强度破碎岩体的蠕变规律，阐明不同强度破碎岩体蠕变差异性特征。研究结果有助于深入了解采空区垮落带在不同顶板强度条件下破碎岩体的相关蠕变行为，可为采空区垮落带长期变形预测与地质灾害防控提供一定理论

依据和参考。

1　破碎岩石相似模拟试验

1.1　相似材料的选取及配比的确定

破碎岩体相似模拟试验旨在通过构建与实际破碎岩体在某些关键特性上相似的物理模型，对岩体在不同工况下的变形、破坏等行为进行直观观测与分析，进而为实际工程提供理论依据与决策支持。单轴抗压强度是划分岩石坚硬程度的重要指标，其大小也是相似材料的特征指标。《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)依据岩石的饱和单轴抗压强度划分为软岩、中硬岩和硬岩(表 1)。

表 1　岩石坚硬程度分类

Table 1　Classification of rock hardnes

坚硬程度	硬岩	中硬岩	软岩
饱和单轴抗压强度/MPa	R_c>60	60>R_c>15	15>R_c>5

R_c—岩石单轴饱和抗压强度实测值

根据多位学者针对采空区垮落带原岩岩体物理力学特性的相关研究，选择软岩、中硬岩和硬岩 3 种不同强度的破碎岩体，其原岩的物理力学参数见表 2、Burgers 蠕变本构模型中相关的蠕变参数见表 3。

表 2　不同强度岩性物理力学参数

Table 2　Physical and mechanical parameters of lithologies with different strengths

原岩强度	γ/(kN/m^3)	σ_c/MPa	E/MPa	μ	c/MPa	φ/(°)
软岩	22.7	16.8	2280	0.25	36.5	3.2
中硬岩	22	31.1	5769	0.196	38.2	6.28
硬岩	25.1	63.9	6870	0.27	39.3	8.84

γ—重度；σ_c—单轴抗压强度，E—弹性模量，μ—泊松比，c—黏聚力，φ—内摩擦角

表 3　不同强度岩性蠕变力学参数

Table 3　Creep mechanical parameters of lithologies with different strength

原岩强度	E_1/MPa	η_1/(GPa·h)	E_2/MPa	η_2/(GPa·h)
软岩	7.36	10709.84	15.92	434.34
中硬岩	9.39	12851.21	22.15	1228.93
硬岩	14.88	21165.31	35.70	2114.76

E_1—控制延迟弹性模量；E_2—弹性剪切模量、η_1—决定延迟弹性速率、η_2—黏滞流动速率

基于采空区垮落带岩性的物理力学参数和实际试验需求，且由于模型材料和原型材料重度不同，故选取重度相似常数(C_γ)为 0.9；依据模型试验缸尺寸大小选择几何相似常数(C_l)为 30。根据相似理论试验的相似常数(表 4)，将不同强度岩体参数经相似常数折减后得到相似材料目标参数。对于元件模型，时间相似常数满足公式(1)，求得软岩、中硬岩和硬岩时间相似常数(C_t)分别为 6.35、5.95、4.52。通过计算得到其不同强度相似材料的配比，根据各参数的影响规律进行配比。

$$C_t = \frac{C_\eta}{C_\sigma} \tag{1}$$

式中，C_t—时间相似常数；C_η—黏滞系数相似常数；C_σ—应力相似常数。

根据破碎岩石分形理论研究(谢和平等，2003)，破碎岩体筛分试验的粒径与累积试样总质量的比例关系为：

$$\frac{M_r(x<r)}{M_t} = \frac{r^n - r_{\min}^n}{r_{\max}^n - r_{\min}^n} \tag{2}$$

式中，M_r—粒径小于 r 的颗粒质量，g；M_t 为块体总质量，g；x—破碎岩体颗粒的某一具体粒径，mm；$r_{\min}$ 为破碎岩体颗粒的最小粒径，mm；$r_{\max}$ 为破碎岩体颗粒的最大粒径，mm；n 为与破碎岩体粒径分形维数相关的级配参数。

表 4 相似常数选取

Table 4 Selection of similarity constants

相似常数	相似比	相似常数	相似比
几何相似常数	30	应力相似常数	27
泊松比相似常数	1	应变相似常数	1
黏聚力相似常数	27	弹性模量常数	27
内摩擦角相似常数	1	重度相似常数	0.9

依据选取的相似常数(表 4),以精铁粉(I)、重晶石粉(B)和石英砂(S)作为骨料,酒精松香溶液为胶结剂,液压油为黏滞剂,搅拌均匀,破碎岩体的级配特征均选取公式(2)中的 n 为 0.6。根据 3 种不同强度岩体的配比制作相似材料(表 5)。

表 5 不同强度相似材料配比

Table 5 Proportions of similar materials with different strengths

相似材料强度	酒精松香溶液含量/%	IB/IBS	I/IB	液压油含量/%
软岩	12.77	0.82	0.56	1.83
中硬岩	18.70	0.67	0.52	5.67
硬岩	24.88	0.56	0.58	3.87

IB/IBS—精铁粉与重晶石粉质量之和与骨料总质量的比值; I/IB—精铁粉质量与精铁粉和重晶石粉质量之和的比值

根据配比称量的骨料和松香粉以及液压油(表 5),用烧杯取工业酒精,采用水浴加热方法加速配制酒精松香溶液,并进行搅拌后多次筛分直至混合料细腻且无明显大颗粒(图 1)。利用直径 50 mm、高 100 mm 的标准岩石试样规格模具制成试件,自然养护 10 d 以上。然后进行单轴压缩试验及直剪试验,得到不同强度岩体的物理力学参数。将试样按照试验需求切割成近似立方体的不同粒径的颗粒形态,根据 n=0.6 的级配方案对各粒径进行称重,采用自然堆积的方式填入试验缸中进行不同强度破碎岩体蠕变试验,同时设置每组 3 个试样的平行试验。

1.2 试验方案及过程

根据配制的相似材料制成的试样进行单轴压缩试验,3 种不同强度破碎岩体的单轴抗压强度分别为:软岩为 0.65 MPa,中硬岩为 1.29 MPa,硬岩为 2.14 MPa。以中硬岩为基准,其对应的最大加载应力为 4 kN,为更好模拟实际效果,最终确定分级加载等级为 1～7 kN,共 7 个等级(表 6)。由于顶板岩层不断垮落,采空区垮落带破碎岩体的蠕变应力随着时间推移不断增加,试验选择分级加载法开展蠕变模型试验。在该级蠕变应力下应变稳定后,保持应力不变,继续进行试验,依次逐级增加应力进行试验直至结束。

2 不同强度破碎岩体蠕变特性分析

2.1 软岩破碎岩体蠕变特性分析

对软岩破碎岩体相似模型试样开展试验后得到软岩破碎岩体蠕变时间−应变曲线。同时蠕变试验结束后,通过筛分方式将试验后的破碎岩体按照粒径大小进行了分离,且对不同粒径均重新进行称重。对比蠕变前后的粒径变化(图 2)可发现:大颗粒棱角被磨平,整体未发生蠕变或者压实破坏;对于中小颗粒破碎岩体,由于其棱角过多,在施加蠕变应力过程中被逐级碾碎,在蠕变曲线上表现为应变增大。中颗粒的破碎岩体作为主要承压颗粒,在应力施加过程以及蠕变过程中以旋转、平移为主,其颗粒棱角磨平后出现蠕变破坏产生小颗粒,最终孔隙减小,导致应变突增。软岩破碎岩体在 3 kN、4 kN 的应力作用下可出现“应变突增”现象(图 3)。

(1)蠕变与蠕变应力关系

岩体蠕变由瞬时应变和蠕变应变组成,即:

$$\varepsilon_{总}=\Sigma(\varepsilon_i+\varepsilon_s) \tag{3}$$

式中,$\varepsilon_{总}$—总应变,%;ε_i—第 i 阶段瞬时应变,%,其中 i=1, …, 7;ε_s—蠕变应变,%。

将每级应力产生的瞬时应变和蠕变应变提取(图 4),在蠕变应力不断增长的过程中,瞬时应变呈



图 1　试件制样及试验过程示意图

Fig. 1　Schematic diagram of specimen preparation and testing process

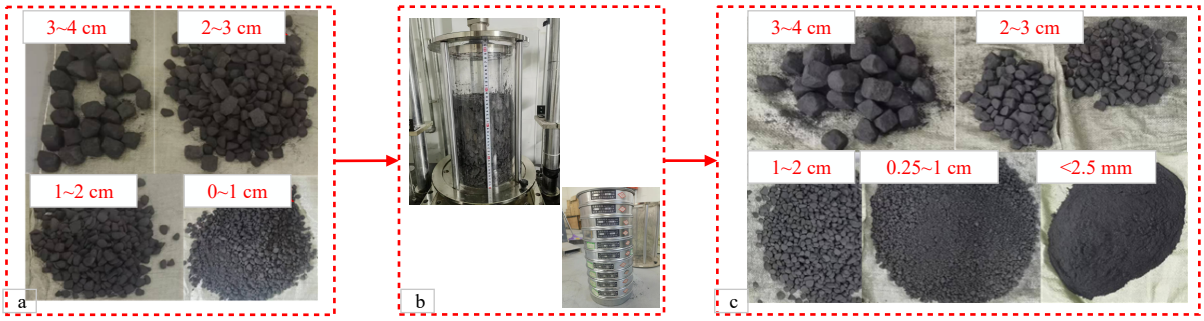
(a) The process of making test specimens; (b) Schematic diagrams of an uniaxial compression test and a direct shear test; (c) The entire process of particle cutting and creep test model making

表 6 不同强度蠕变试验方案

Table 6 Creep test scheme for different strengths

蠕变试验相似材料强度方案	0.65 MPa 试样(软岩)	1.29 MPa 试样(中硬岩)	2.14 MPa 试样(硬岩)
蠕变应力/kN	1	1	1
	2	2	2
	3	3	3
	4	4	4
	5	5	5
	6	6	6
	7	7	7
蠕变时长/h	24	24	48

现出逐渐减小的趋势。在 1 kN 的蠕变应力下，瞬时应变为 0.084%，占比高达 42.303%；当蠕变应力增加到 7 kN 时，瞬时应变减小至 0.005%，占比为 2.705%。这表明随着蠕变应力的增大，软岩破碎岩体颗粒间孔隙逐渐减小，颗粒被进一步压密，使得瞬时应变不断降低。在低应力阶段，瞬时应变在总应变中占主导地位，随着应力增大，其主导作用逐渐减弱。蠕变应变在蠕变应力施加过程中先减小后趋于稳定。在 1 kN 蠕变应力时，蠕变应变相对较大，为 0.009%，占比为 4.795%；在 4～7 kN 应力区间内，蠕变应变基本稳定在 0.002%，占比维持在 0.90% 左右。这反映出在蠕变初期，蠕变应变占总应变比例较小，随着应力增加和时间推移，其占比逐渐增加并趋于稳定。由于瞬时应变和蠕变应变的综合变化，在 1～4 kN 应力区间内，总应变随着应力增大而减小较为明显，从 0.093% 减小到 0.022%；在 5～7 kN

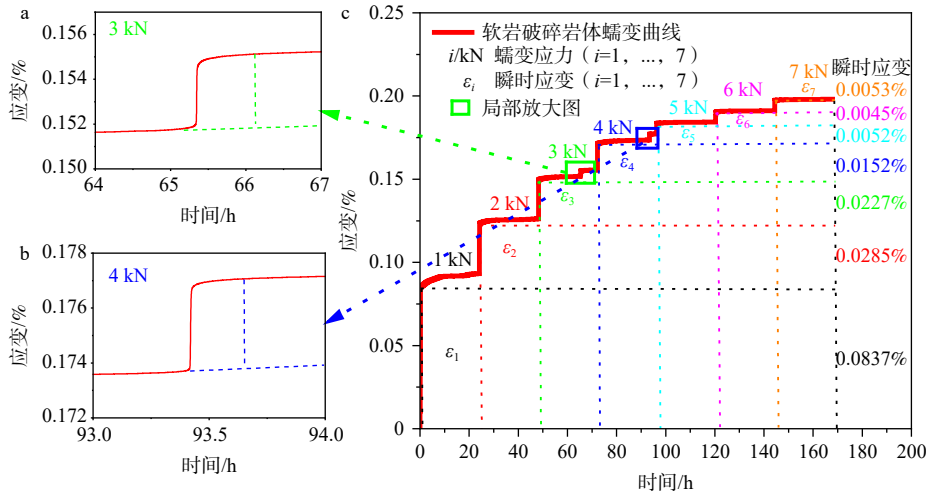


a—蠕变前颗粒形态；b—试验结束后筛分不同粒径；c—蠕变后颗粒形态

图 2 蠕变前后颗粒形态对比图

Fig. 2 Comparison of particle morphology before and after creep

(a) Particle morphology before creep; (b) Sieving of different particle sizes after the test; (c) Particle morphology after creep

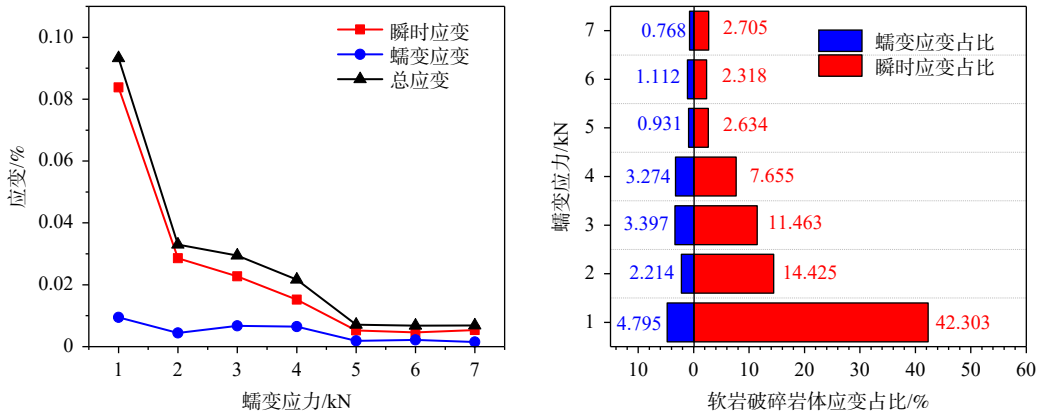


a—3 kN 蠕变曲线；b—4 kN 蠕变曲线；c—软岩破碎岩体蠕变曲线

图 3 软岩破碎岩体全程蠕变曲线

Fig. 3 Full-process creep curve of fractured soft rock mass

(a) Creep curve under 3 kN load; (b) Creep curve under 4 kN load; (c) Creep curve of fractured soft rock mass



（a）应变–蠕变应力　　（b）应变占比–蠕变应力

图 4　软岩破碎岩体瞬时、蠕变应变趋势图

Fig. 4　Trend diagram for instantaneous and creep strain of fractured soft rock mass

(a) Strain vs.creep stress; (b) Strain proportion vs. creep stress

应力区间内，总应变变化相对平缓，维持在 0.007%左右。

（2）蠕变参数计算

利用陈氏加载法（陈昌富等，2016）将软岩破碎岩体全程蠕变曲线转为分级加载蠕变曲线（图 5），采用 Burgers 一维蠕变方程将每级应力下的时间–应变蠕变曲线进行拟合，得到 Burgers 模型拟合结果。Burgers 一维蠕变方程如下：

$$\varepsilon_{总}(t)=\left\{\frac{1}{E_1}+\frac{t}{\eta_1}+\frac{1}{E_2}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}\right)\right\}\sigma_0 \qquad (4)$$

式中，$\varepsilon_{总}$—总应变，%；σ_0—蠕变应力，MPa；t—时间，h；E_1—控制延迟弹性的模量，MPa；E_2—弹性剪切模量，MPa；η_1—决定延迟弹性的速率，GPa·h；η_2—黏滞流动的速率，GPa·h。

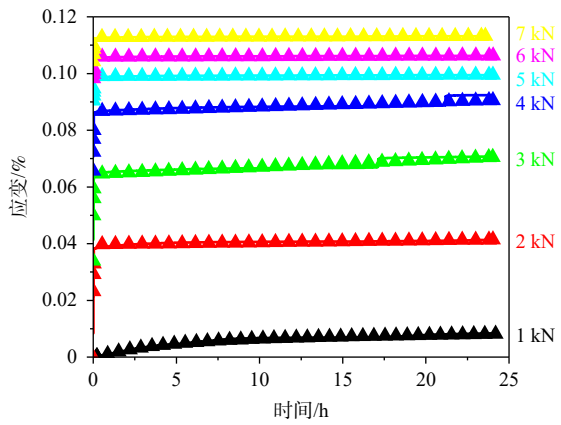


图 5　软岩破碎岩体分级加载蠕变曲线

Fig. 5　Creep curve of fractured soft rock under incremental loading

软岩破碎岩体初始蠕变率和稳定蠕变率会随着蠕变应力的增大而减小，说明总应变主要是前期中间颗粒受力压缩变形引起（图 6）。初始蠕变率在应力增加初期迅速下降，这意味着当初次施加蠕变应力时，软岩破碎岩体迅速适应了这种变化，其蠕变率因为内部的微裂缝闭合和塑性区的形成而降低。随着蠕变应力的继续增加，蠕变率下降速度减缓，表明岩体的初始应变大部分已经发生，后续蠕变应力增加对蠕变率的影响逐渐减小。稳定蠕变率也是随着应力的增加而迅速下降，随后趋于平稳。这表明在前期应力施加下颗粒间重排列调整之后，破碎岩体内部结构趋于稳定，虽然依然在持续变形，但速率保持相对恒定。

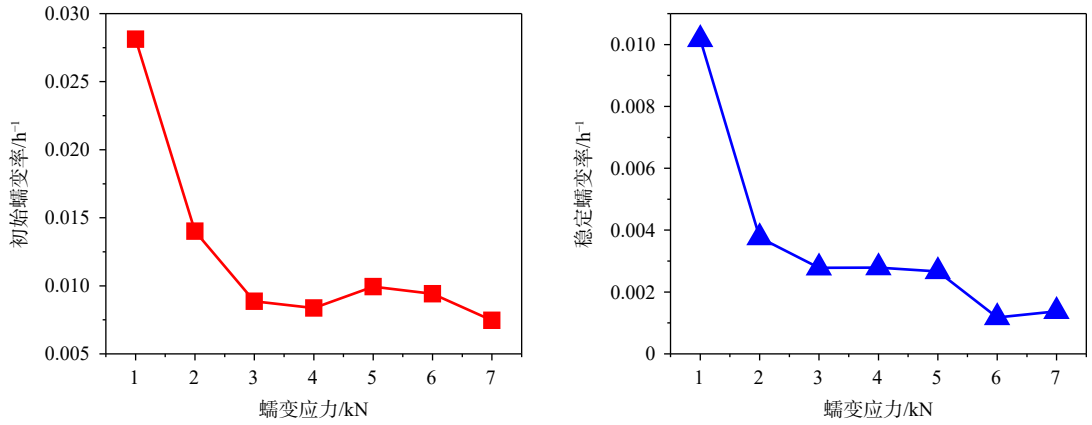
通过对比表明，无论是初始蠕变率还是稳定蠕变率，都随着应力的增加而减小，但初始蠕变率的降低更为迅速。这意味着软岩破碎岩体在初期更为敏感，而一旦达到一定的应力水平，在 3kN 后，蠕变率就趋于一个较为稳定的状态，即使在应力进一步增加的情况下，也不会有太大的变化，且大颗粒破碎岩体在后续大蠕变应力下未出现蠕变变形。

2.2　中硬岩破碎岩体蠕变特性分析

对中硬岩破碎岩体相似模型开展试验后得到中硬岩破碎岩体蠕变时间–应变曲线（图 7），同时试验结束前后对破碎岩体颗粒进行筛分称重对比。在中硬岩破碎岩体蠕变过程中，“应变突增”出现在蠕变应力为 3 kN、4 kN、5 kN 时，说明在不同蠕变应力阶段，不同颗粒破碎岩体均出现蠕变压实破坏。

（1）蠕变应变与蠕变应力关系

蠕变应力在 1～2 kN 之间时，中硬岩破碎岩体瞬时应变增大，在 2 kN 时达到峰值，为 0.045%，占比为 26.78%，表明破碎颗粒间孔隙减小同时颗粒破坏

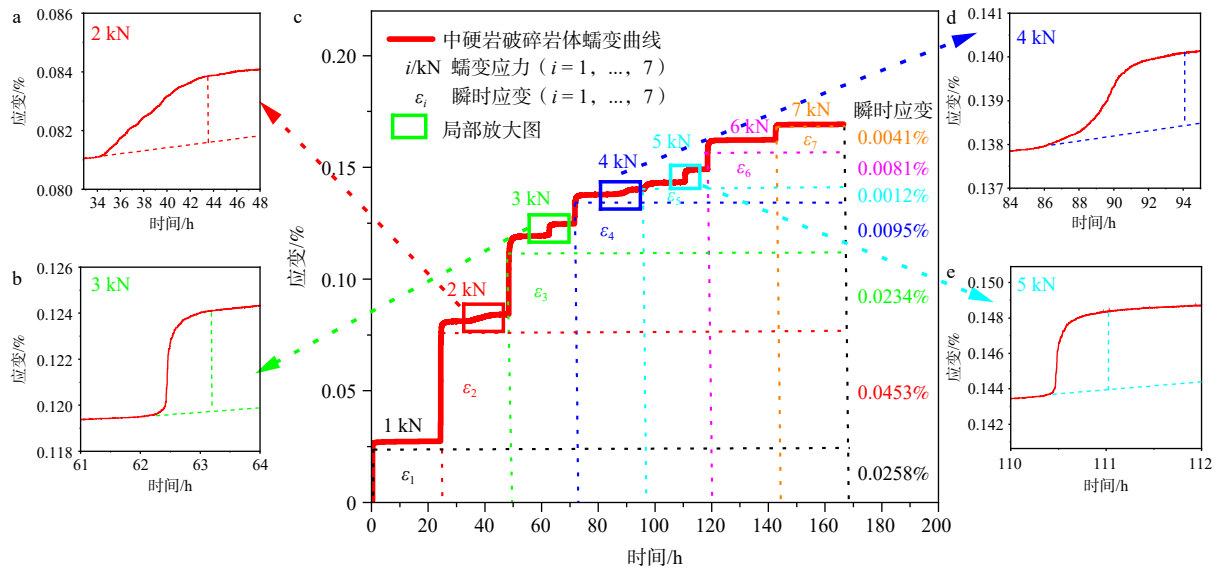


（a）初始蠕变率　　（b）稳定蠕变率

图 6　软岩破碎岩体蠕变率随蠕变应力变化趋势

Fig. 6　Variation of creep rate with creep stress in fractured soft rock mass

(a) Initial creep rate; (b) steady-state creep rate



a—2 kN 蠕变曲线；b—3 kN 蠕变曲线；c—中硬岩破碎岩体蠕变曲线；d—4 kN 蠕变曲线；e—5 kN 蠕变曲线

图 7　中硬岩破碎岩体全程蠕变曲线

Fig. 7　Full-process creep curve of fractured moderately hard rock mass

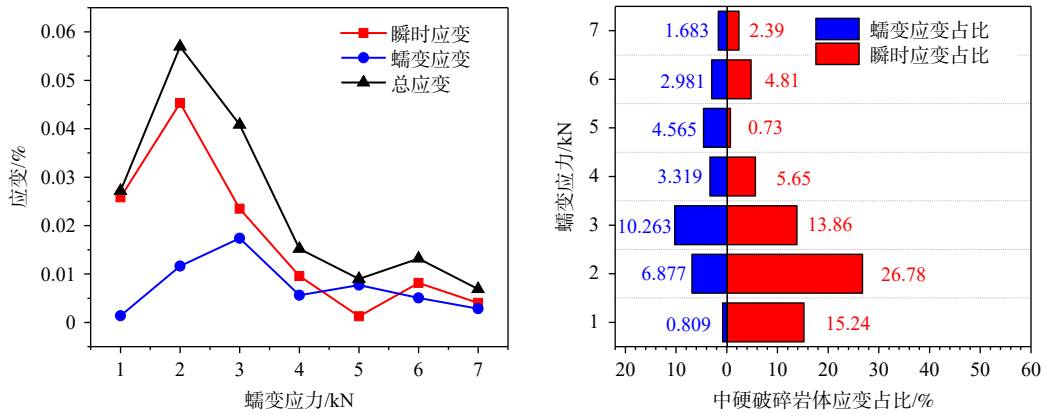
(a) Creep curve under 2 kN load; (b) Creep curve under 3 kN load; (c) Creep curve of fractured moderately hard rock mass; (d) Creep curve under 4 kN load; (e) Creep curve under 5 kN load

变形，致使瞬时应变增大；2 kN 后随蠕变应力的增加，瞬时应变逐渐减小，到 7 kN 时为 0.004%，占比为 2.39%，这表明随着应力进一步增大，岩体颗粒被持续压密，孔隙减小，瞬时应变降低。在 1～4 kN 应力区间，蠕变应变占总应变比例先减小后增大，在 3 kN 时达到峰值 0.017%，在 5 kN 阶段蠕变应变为 0.007%，占比为 0.73%，大于瞬时应变 0.001%，占比 4.565%；在 5～7 kN 阶段，蠕变应变相对平稳，约为 0.005%。在 1～2 kN 应力区间，总应变因瞬时应变增大而增大，2 kN 时达到 0.057%；2～7 kN 应力阶段，总应变随应力增大而减小，7 kN 时为 0.007%，这是由于瞬时应变减小幅度大于蠕变应变变化幅度（图 8）。

（2）蠕变参数计算

利用陈氏加载法将中硬岩破碎岩体全程蠕变曲线转为分级加载蠕变曲线（图 9），利用公式 (4) 将每级应力下的时间−应变蠕变曲线进行拟合，得到 Burgers 模型拟合结果。

中硬岩破碎岩体的蠕变率随蠕变应力的变化



（a）应变-蠕变应力　　（b）应变占比-蠕变应力

图 8　中硬岩破碎岩体瞬时、蠕变应变趋势图

Fig. 8　Trend diagram for instantaneous and creep strains of fractured moderately hard rock mass

(a) Strain vs. creep stress; (b) Strain proportion vs.creep stress

趋势为先增大后减小(图 10)。初始蠕变率在 2 kN 蠕变应力时达到峰值，为 0.176 h^{-1}，随后随应力的增加而下降；这表明在该特定应力下，引起颗粒重排列，导致蠕变率短暂上升，当中硬岩破碎岩体内部逐渐稳定，蠕变率开始下降，这种峰值现象与破碎岩体内部的微裂缝扩展、颗粒重排列等有关。稳定蠕变率在 2 kN 蠕变应力时达到峰值，为 0.014 h^{-1}，随后蠕变率迅速下降，在 3～5 kN 蠕变应力趋于平稳后继续下降；这表明中硬岩破碎岩体在经过一个瞬时的变形加速阶段后，内部结构达到新的稳态，使得稳定蠕变率降低并维持在一个较稳定的水平。

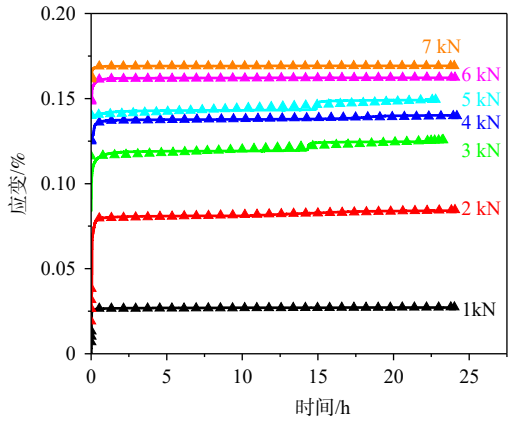


图 9　中硬岩破碎岩体分级加载蠕变曲线

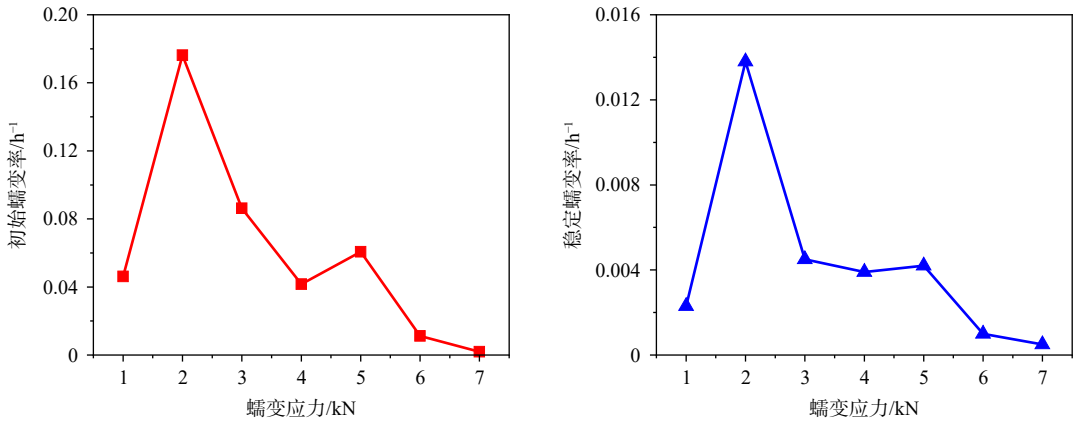
Fig. 9　Creep curve of fractured moderately hard rock mass under incremental loading

2.3　硬岩破碎岩体蠕变特性分析

硬岩破碎岩体蠕变时间-应变曲线如图 11 所示，硬岩破碎岩体蠕变曲线未出现“应变突增”现象。

(1)蠕变应变与蠕变应力关系

提取硬岩破碎岩体每级应力产生的瞬时应变和蠕变应变(图 12)可知：在 1～3 kN 应力区间，硬岩



（a）初始蠕变率　　（b）稳定蠕变率

图 10　中硬岩破碎岩体蠕变率随蠕变应力变化趋势

Fig. 10　Variation of creep rate with creep stress in fractured moderately hard rock mass

(a) Initial creep rate; (b) Steady-state creep rate

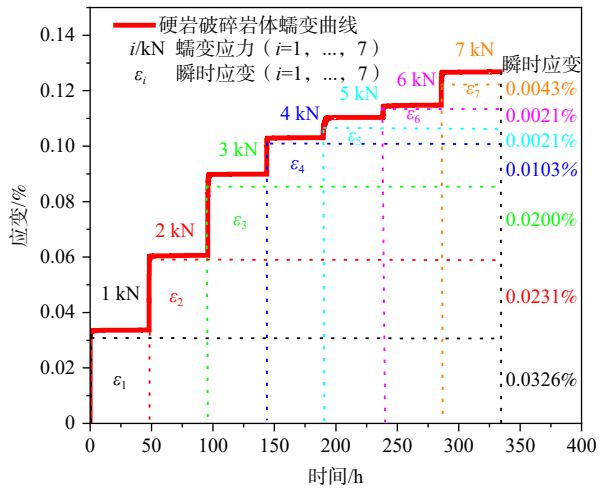
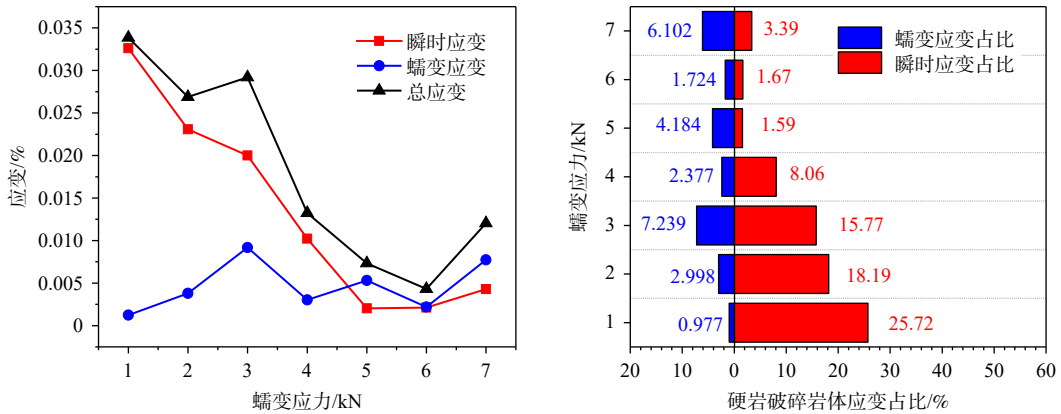


图 11 硬岩破碎岩体全程蠕变曲线

Fig. 11 Full-process creep curve of fractured hard rock mass

破碎岩体的瞬时应变迅速降低，由 0.033% 占比 25.72%，下降至 0.020% 占比 15.77%；这表明在该应力阶段，硬岩破碎岩体中间颗粒受应力作用，发生破坏变形和重排列，使得颗粒间孔隙减小，瞬时应变降低。在 5～7 kN 应力区间，瞬时应变呈现缓慢增大趋势，在 7 kN 时为 0.004%，占比 3.390%；这是由于应力的持续增加，岩体内部结构进一步调整，颗粒变形加剧，导致瞬时应变有所回升。在 1～3 kN 应力区间，蠕变应变逐渐增大，由 0.001% 占比 0.977%，增长至 0.009% 占比 7.239%；在 3～7 kN 应力区间，蠕变应变缓慢增大，在 7 kN 时约为 0.008%，占比 6.102%。总应变由瞬时应变和蠕变应变组成，在 1～3 kN 应力区间，总应变因瞬时应变降低而减小，由 1 kN 的 0.034% 下降至 2 kN 的 0.026%，又因蠕变应变的增加而增大，增加至 3 kN 的 0.030%；在 3～7 kN 应力区间，总应变随着蠕变应力的增大而减小，在 7 kN 时又因瞬时蠕变和蠕变应变的增加而增大，为 0.012%。



（a）应变–蠕变应力 （b）应变占比–蠕变应力

图 12 硬岩破碎岩体瞬时、蠕变应变趋势图

Fig. 12 Trend diagram for instantaneous and creep strains of fractured hard rock mass

(a) Strain-creep stress; (b) Strain proportion vs. creep stress

（2）蠕变参数计算

将硬岩破碎岩体的全程蠕变曲线转为分级加载蠕变曲线（图 13），利用公式（4）对分级加载蠕变曲线进行拟合，得到硬岩破碎岩体 Burgers 拟合结果。

初始蠕变率和稳定蠕变率随蠕变应力的增大，二者出现不同程度的下降（图 14）。随着蠕变应力的增加，初始蠕变率整体上呈现下降趋势，初始蠕变率由 1 kN 的 0.265 h^{-1} 增大至 2 kN 时的 0.284 h^{-1}，随后减小至 3 kN 的 0.174 h^{-1}；在 5 kN 之后趋于稳定，基本维持在 0.044 h^{-1} 左右。稳定蠕变率在初期随着应力的增加而急剧下降，1 kN 时稳定蠕变率为 0.0008 h^{-1}，到 3 kN 时降至 0.0002 h^{-1}，但在 4 kN 时增长至 0.0004 h^{-1}，随后再次下降并维持稳定状态。这个峰值表明在某个应力水平下，硬岩破碎岩体颗粒的内部结构发生了变化，导致蠕变率增加，随后随着应力的继续增加，内部结构的再次稳定，蠕变率减小并稳定。

依据试验结果分析，初始蠕变率和稳定蠕变率逐渐降低的现象大致由以下几个因素引起：①孔隙减小，破碎岩体中存在大量的裂隙和孔隙。随着蠕变应力逐级施加，这些孔隙会逐渐闭合，导致破碎岩体内部颗粒间逐渐紧密和坚固。因此，在后续的加载过程中，即使蠕变应力增大，岩体的初始蠕变率和稳定蠕变率也会因为孔隙闭合而降低。②颗粒

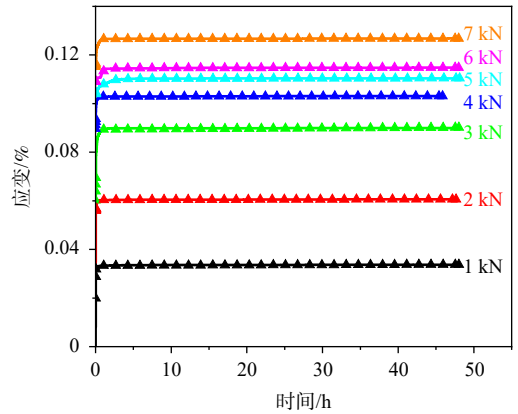


图 13　硬岩破碎岩体分级加载蠕变曲线图

Fig. 13　Creep curves of fractured hard rock mass under incremental loading

重排列，在破碎岩体中，颗粒在应力作用下会发生重新排列和重组，使得岩体结构更加稳定。随着蠕变应力的增大，颗粒的重排和重组减缓，导致蠕变率降低。③应力硬化，在连续加载过程中，相似材料破碎岩体会经历应力硬化过程，即随着应力的增加，相似材料颗粒的强度和抗变形能力增强，这会导致初始蠕变率和稳定蠕变率随着应力的增大而降低。

3　不同强度破碎岩体蠕变率分析

3 种不同强度的破碎岩体蠕变前后颗粒质量、粒径分布以及级配的变化如图 15 所示。

通过对上述 3 种不同强度相似材料破碎岩体蠕变研究发现，采用指数衰减公式(5)拟合蠕变率随应力变化的趋势效果较好。该方程假设蠕变率随着应力的增大而减小，这种趋势与材料的应力松弛、微裂纹闭合或其他与时间相关的物理过程有关。

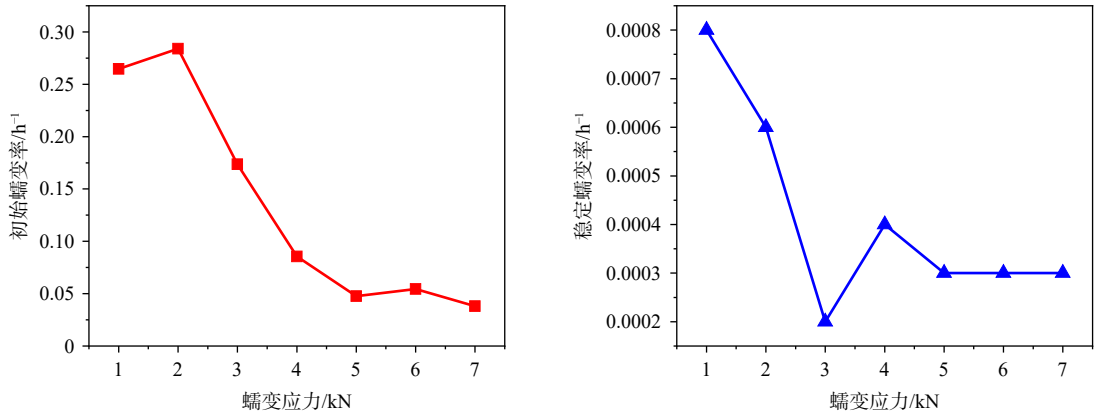
$$\dot{\varepsilon} = A \times \mathrm{e}^{-B\sigma} + C \tag{5}$$

式中，$\dot{\varepsilon}$—蠕变率，h^{-1}；σ—应力，MPa；A、B、C—拟合参数，其中 A、C 为与蠕变行为有关的系数，B 为蠕变率衰减的速率，B 值越大则蠕变率下降越快，即材料可快速达到稳定状态。利用公式(5)对上述蠕变率−蠕变应力曲线进行拟合得到不同强度破碎岩体的拟合公式以及相关系数(R^2; 表 7)。

R^2 均在 0.741 以上，拟合效果较好。对于初始蠕变率和稳定蠕变率，其拟合参数 B 均呈现硬岩>中硬岩>软岩的规律，说明对于不同强度的相似材料其蠕变率下降越快，破碎岩体蠕变可快速达到稳定状态。

以相似材料强度为横坐标，不同蠕变应力下的蠕变率为纵坐标，得到3 种不同强度破碎岩体相似材料强度−蠕变率曲线(图 16)。结果表明，在同一蠕变应力水平下，初始蠕变率会随着相似材料强度的增大而增大，稳定蠕变率会随着相似材料破碎岩体强度的增大而减小。

综上所述，针对 3 种不同强度破碎岩体开展的不同应力下的蠕变试验，研究表明：蠕变率在整体上呈现出随蠕变应力增大而下降的趋势。在破碎岩体蠕变过程中，随着应力逐级施加，颗粒间会发生重排列和重组，使得岩体结构更加稳定，从而导致蠕变率降低。同时高于岩体本身单轴抗压强度的加载等级，使破碎岩体经历了应力硬化过程，随应力的增加，相似材料颗粒的强度和抗变形能力增



(a) 初始蠕变率　　(b) 稳定蠕变率

图 14　硬岩破碎岩体蠕变率随蠕变应力变化趋势

Fig. 14　Variation of creep rate with creep stress in fractured hard rock mass

(a) Initial creep rate; (b) Steady-state creep rate

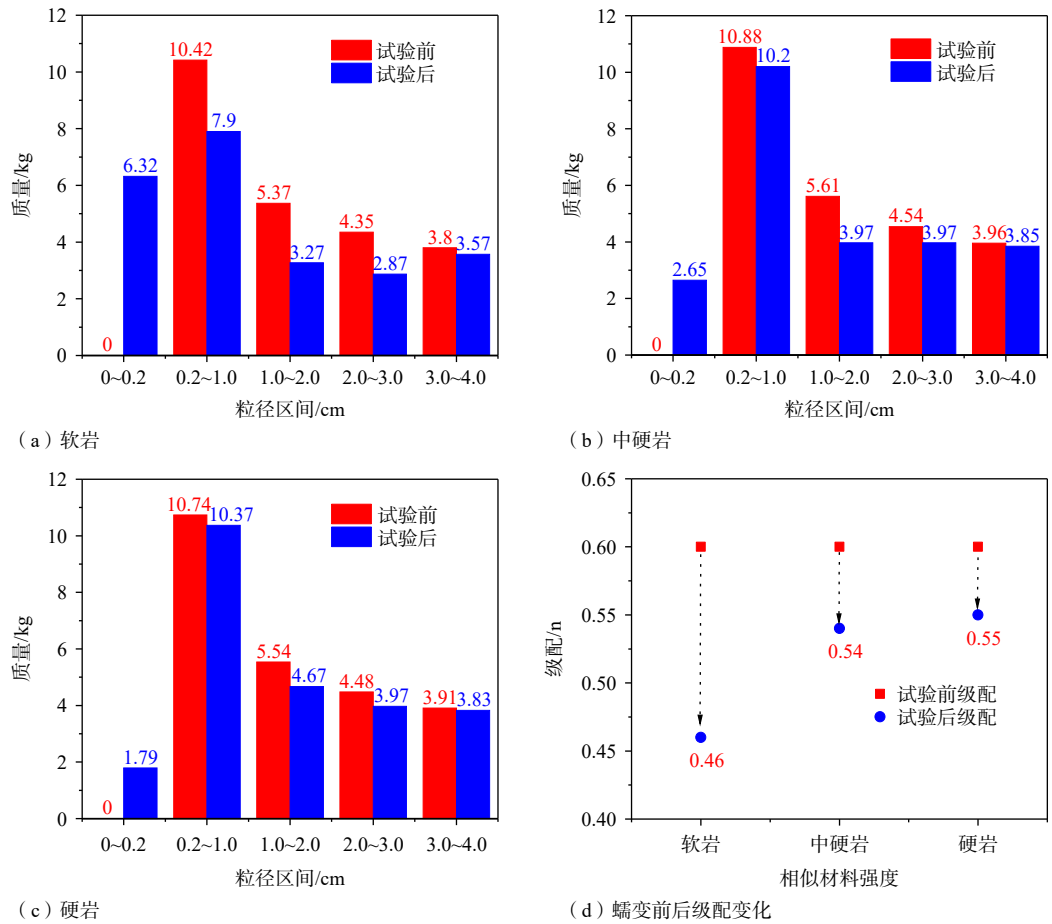


图 15 不同强度破碎岩体蠕变前后粒径分布以及级配变化

Fig. 15 Particle size distribution and gradation changes of fractured rock mass with different strengths before and after creep

(a) Initial creep rate; (b) Moderately hard rock; (c) Hard rock; (d) Gradation changes before and after creep

表 7 不同强度蠕变试验方案

Table 7 Creep test scheme for rocks of different strengths

相似材料强度	拟合结果	
0.65 MPa试样(软岩)	$\dot{\varepsilon}_0 = 0.07747 \times e^{-1.37306\sigma} + 0.00856$ $\dot{\varepsilon}_s = 0.03155 \times e^{-1.35275\sigma} + 0.00196$	R^2=0.976 R^2=0.944
1.29 MPa试样(中硬岩)	$\dot{\varepsilon}_0 = 0.60271 \times e^{-0.63791\sigma} + 0.00481$ $\dot{\varepsilon}_s = 0.114 \times e^{-1.13069\sigma} + 0.00173$	R^2=0.894 R^2=0.874
2.14 MPa试样(硬岩)	$\dot{\varepsilon}_0 = 0.48059 \times e^{-0.2026\sigma} - 0.09625$ $\dot{\varepsilon}_s = 0.00132 \times e^{-0.91859\sigma} + 0.00028826$	R^2=0.842 R^2=0.741

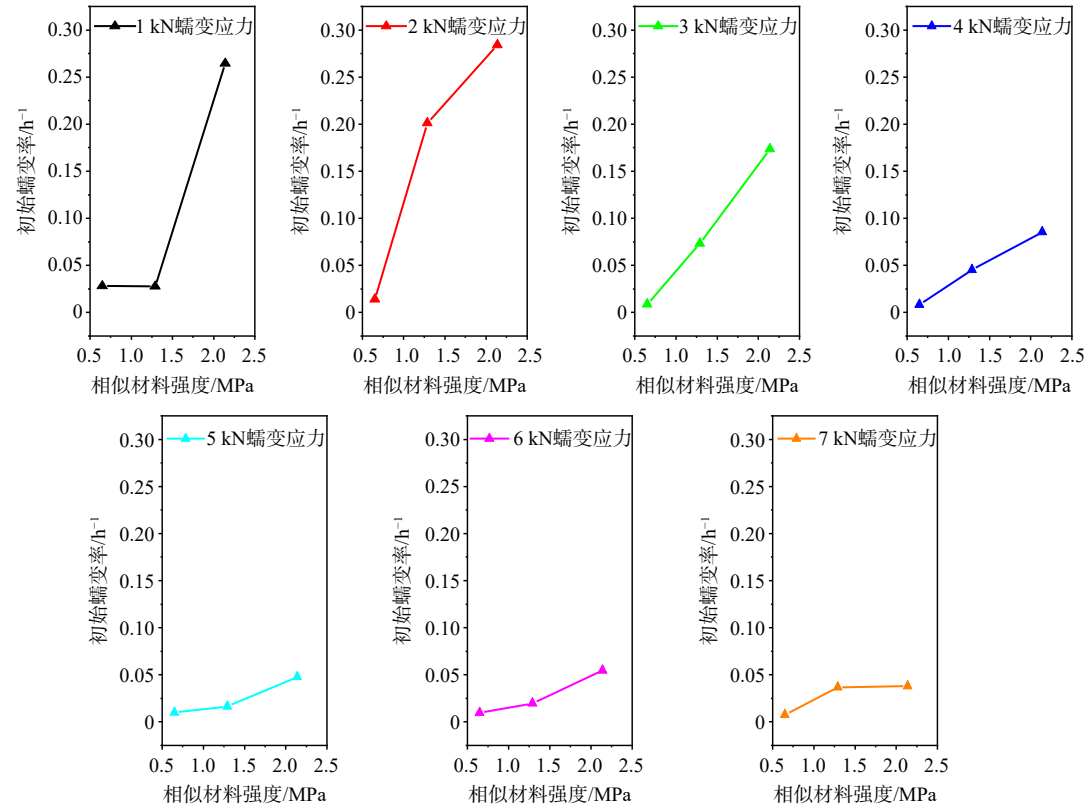
$\dot{\varepsilon}_0$—初始蠕变率; $\dot{\varepsilon}_s$—稳定蠕变率; σ—应力; R^2—相关系数

强，导致初始蠕变率和稳定蠕变率随应力的增大而降低。

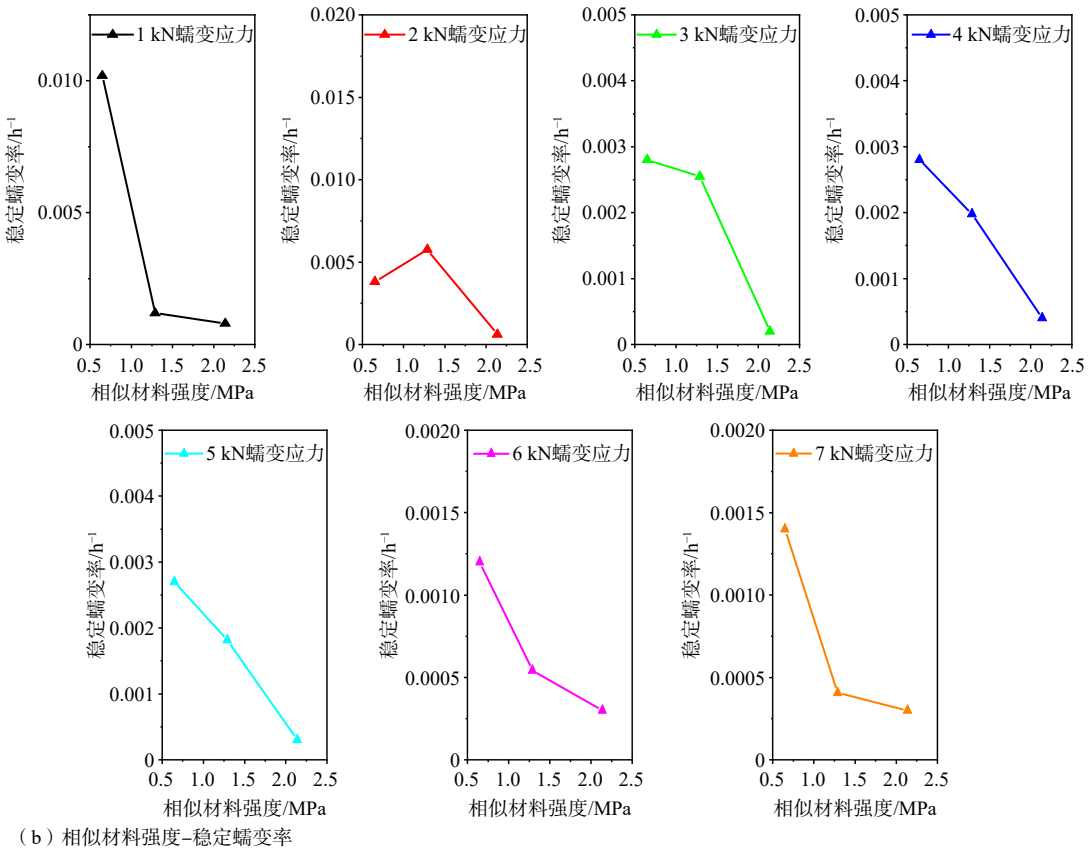
4 讨论

研究聚焦于不同强度破碎岩体在分级加载下的蠕变行为演化，结果表明：初始蠕变率和稳定蠕变率均随荷载增加呈下降趋势，且初期蠕变率变化迅速。这一趋势说明破碎岩体在外部荷载作用下，其内部裂隙和孔隙在初始阶段发生闭合和压密，材料由松散演化为相对致密，逐步进入稳态变形阶段。这一应力敏感性特征与堆石料的研究结论相似(李海芳等, 2010; 李媛和王永岩, 2024)，体现了破碎岩体在荷载响应中的结构调整机制。此外，硬岩破碎岩体的蠕变率下降速度快、趋于稳定时间短，表明其内部结构致密、颗粒间接触刚性强，在承载过程中表现出快速稳定的力学响应特征。

相比之下，中硬岩破碎岩体表现出更为复杂的蠕变行为，尤其在 2kN 荷载水平下，其初始蠕变率



（a）相似材料强度–初始蠕变率



（b）相似材料强度–稳定蠕变率

图 16　3 种不同强度破碎岩体相似材料强度–蠕变率

Fig. 16　Strength vs.creep rate of similar materials in three types of fractured rock masses with different strengths

(a) Strength vs. initial creep rate; (b) Strength vs.steady-state creep rate

出现峰值(0.176 h^{-1}),并在3～5 kN范围内多次出现“应变突增”现象。这表明中硬岩破碎岩体在特定应力条件下,其内部结构易发生颗粒破碎和重排列,形成新的受力平衡结构。不同于软岩和硬岩的稳定响应,中硬岩破碎岩体在稳定蠕变阶段前表现出较明显的变形波动性,其在蠕变过程中存在动态重构行为。

从不同强度岩体在相同荷载下的响应差异来看,初始蠕变率随岩体强度增大而增大,而稳定蠕变率则随强度提升而减小,说明高强度岩体在初期响应更剧烈,但更容易进入稳定阶段;低强度岩体则表现出更长的变形持续性。这一现象与岩体内部结构的稳定性及对持续荷载的适应能力有关。

5 结论

(1)软岩破碎岩体随蠕变应力增加,瞬时应变、蠕变应变和总应变均呈现出逐渐减小后趋于稳定的趋势。在蠕变应力为1 kN时,瞬时应变为0.084%,蠕变应变为0.009%;3 kN、4 kN时出现“应变突增”现象,在蠕变应力为4 kN后,应变均趋于稳定,7 kN时瞬时应变为0.002%,蠕变应变为0.007%;其初始蠕变率和稳定蠕变率均随应力增加而减小,3 kN后蠕变率趋于稳定;指数衰减方程拟合显示其蠕变率下降缓慢,达到稳定状态耗时较长。

(2)中硬岩破碎岩体的瞬时应变、蠕变应变和总应变均呈现出先增大后减小的趋势。瞬时应变、蠕变应变和总应变峰值分别在蠕变应力为2 kN、3 kN和2 kN出现。在3～5 kN应力区间出现“应变突增”现象,印证了蠕变压实破坏过程;蠕变应变占比先减小后增大,在5 kN阶段占比最小(0.73%);初始蠕变率与稳定蠕变率均在2 kN时达到峰值;利用指数衰减方程拟合结果表明其蠕变率下降速度适中。

(3)硬岩破碎岩体的瞬时应变随应力增加逐渐减小,在1～3 kN区间由0.033%下降至0.020%,随后呈现缓慢增大的趋势;蠕变应变呈现先增大后减小再增大的趋势,蠕变应变在3 kN达到峰值0.009%后,蠕变应变缓慢增大;总应变整体上呈先减小后增大的趋势;初始蠕变率先增大后减小至3 kN时的0.174 h^{-1},在5 kN后稳定在0.044 h^{-1}左右;稳定蠕变率波动后趋于稳定;指数衰减方程拟合结果表明,其蠕变率下降迅速,能快速达到稳定状态。

References

CHEN C F, LIU J B, XU Y L, et al, 2016. Tests on shearing creep anchor-soil interface and its empirical model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 38(10): 1762-1768. (in Chinese with English abstract)

CHU Z F, 2018. Study on interaction between tunnel support and surrounding rock in soft rheological rock[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)

FAN X J, MAO X B, 2007. Experimental study of time-dependent deformation of broken sandstones under pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 24(4): 486-489. (in Chinese with English abstract)

GUO G L, MIAO X X, ZHANG Z N, 2001. Research on ruptured rock mass deformation characteristics of longwall goafs[J]. Science Technology and Engineering, (5): 44-47. (in Chinese with English abstract)

HAN B L, CHEN X L, SONG Y L, et al., 1997. Research on similar material of rockmass[J]. Engineering Journal of Wuhan University, (2): 7-10. (in Chinese with English abstract)

HU B N, GUO A G, 2009. Testing study on coal waste back filling material compression simulation[J]. Journal of China Coal Society, 34(8): 1076-1080. (in Chinese with English abstract)

LI H F, XU Z P, WEN Y F, et al., 2010. Study of Jiudianxia rockfill creep behaviors by triaxial creep model test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 29(6): 166-171. (in Chinese with English abstract)

LI Y, WANG Y Y, 2024. Development and experimental analysis of soft rock analog with creep characteristics[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 41(2): 151-156. (in Chinese with English abstract)

LIU N, 2021. Research on compaction characteristics and re-crushing mechanism of graded broken coal and rock[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, doi: 10.27397/d.cnki.gxaku.2021.000155. (in Chinese with English abstract)

LIU S Y, QIU Y, TONG L Y, et al., 2006. Experimental study on strength properties of coal wastes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(1): 199-205. (in Chinese with English abstract)

LIU Y L, ZHOU W Z, GUO B, et al., 2020. Study on marl similar materials in similar simulation test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(S1): 2795-2803. (in Chinese with English abstract)

MA Z G, LAN T, PAN Y G, et al., 2009. Experimental study of variation law of saturated broken mudstone porosity during creep process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(7): 1447-1454. (in Chinese with English abstract)

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2015. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218-2014[S]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)

NING Y B, TANG H M, ZHANG B C, et al, 2020. Investigation of the rock similar material proportion based on orthogonal design and its application in base friction physical model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 41(6): 2009-2020. (in Chinese with English abstract)

QI S X, 2022. Study on creep characteristics and critical failure constitutive model of silt mudstone[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology. (in Chinese with English abstract)

SANZENI A, WHITTLE A J, GERMAINE J T, et al., 2012. Compression

and creep of Venice lagoon sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(10): 1266-1276.

SUN W B, TIAN D J, XUE Y C, et al., 2025. Experimental study on compressive deformation and fractal characteristics of fractured rock based on Talbol theory[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 52(1): 61-69. (in Chinese with English abstract)

SUN X J, PAN J J, DING L H, et al, 2023. Regularities of particle gradation change before and after soft rock fill tests[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 40(9): 133-138. (in Chinese with English abstract)

SUN X J, LIU L Q, DENG S H, et al. , 2024. Experimental study on creep characteristics of rockfill material of Lianghekou hydropower station in high stress state[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 41(3): 88-93, 101. (in Chinese with English abstract)

SUN Y N, ZHANG P S, YAN W, et al, 2019. Experimental study on pressure-bearing deformation characteristics of crushed sandstone in gob[J]. Coal Science and Technology, 47(12): 56-61. (in Chinese with English abstract)

TI Z Y, QIN H Y, LI S X, 2012. Experimental analysis of compaction characteristics filled by coal gangue[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 23(4): 129-131. (in Chinese with English abstract)

WANG J G, LIU W F, LIANG, et al, 2016. On the similar material for creep characteristic study of weak and broken oil shale[J]. Journal of Experimental Mechanics, 31(2): 263-268. (in Chinese with English abstract)

WANG Z K, 2017. Petrologic studies on mechanical properties of sedimentary rocks of Jurassic coal measures in Shendong[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University. (in Chinese with English abstract)

WEI H, SHEN C M, LIU S H, et al., 2020. Experimental study on compression and crushing characteristics of coarse granular materials considering influence of gradations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 48(2): 182-188. (in Chinese with English abstract)

WEN P, 2023. Compaction characteristics of broken rock in longwall goaf and its influence on surface residual deformation[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University. (in Chinese with English abstract)

XIE H P, GAO F, ZHOU H W, et al., 2003. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 23(4): 1-9. (in Chinese with English abstract)

XU K, YANG Q G, 2021. Spatiotemporal distribution of post-operation deformation of Shuibuya concrete-faced rockfill dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 38(7): 51-57. (in Chinese with English abstract)

YE W M, WANG Q L, LUO W J, et al., 2022. Compressive creep property and model for unsaturated argillaceous siltstone[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 50(8): 1154-1162. (in Chinese with English abstract)

YU B Y, CHEN Z Q, WU J Y, et al., 2016. Experimental study of compaction and fractal properties of grain size distribution of saturated crushed mudstone with different gradations[J]. Rock and Soil Mechanics, 37(7): 1887-1894. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J W, WANG H L, CHEN S J, et al, 2018. Bearing deformation characteristics of large-size broken rock[J]. Journal of China Coal Society, 43(4): 1000-1007. (in Chinese with English abstract)

ZHANG T J, LIU N, PANG M K, et al, 2021. Re-crushing characteristics in the compaction process of graded crushed coal rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 38(2): 380-387. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z N, MIAO X X, GE X R, 2005. Testing study on compaction breakage of loose rock blocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(3): 451-455. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈昌富，刘俊斌，徐优林，等，2016. 锚–土界面剪切蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土工程学报，38(10)：1762-1768.

储昭飞，2018. 流变软岩中隧道支护-围岩相互作用关系研究[D]. 北京：北京交通大学.

樊秀娟，茅献彪，2007. 破碎砂岩承压变形时间相关性试验[J]. 采矿与安全工程学报，24(4)：486-489.

郭广礼，缪协兴，张振南，2002. 老采空区破裂岩体变形性质研究[J]. 科学技术与工程，(5)：44-47.

韩伯鲤，陈霞龄，宋一乐，等，1997. 岩体相似材料的研究[J]. 武汉水利电力大学学报，(2)：7-10.

胡炳南，郭爱国，2009. 矸石充填材料压缩仿真实验研究[J]. 煤炭学报，34(8)：1076-1080.

李海芳，徐泽平，温彦锋，等，2010. 九甸峡堆石料蠕变特性试验研究[J]. 水力发电学报，29(6)：166-171.

李媛，王永岩，2024. 模拟软岩蠕变特性相似材料的研制及试验分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版)，41(2)：151-156.

刘楠，2021. 级配破碎煤岩体压实特征及其再破碎机理研究[D]. 西安：西安科技大学. doi:10.27397/d.cnki.gxaku.2021.000155..

刘松玉，邱钰，童立元，等，2006. 煤矸石的强度特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，25(1)：199-205.

刘永莉，周文佐，郭斌，等，2020. 相似模型实验中泥灰岩相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报，39(S1)：2795-2803.

马占国，浦海，张帆，等，2003. 煤矸石压实特性研究[J]. 矿山压力与顶板管理(1)：95-96.

马占国，兰天，潘银光，等，2009. 饱和破碎泥岩蠕变过程中孔隙变化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，28(7)：1447-1454.

宁奕冰，唐辉明，张勃成，等，2020. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学，41(6)：2009-2020.

戚双星，2022. 粉砂质泥岩蠕变特性及临界破坏本构模型研究[D]. 长沙：长沙理工大学.

孙文斌，田殿金，薛彦超，等，2025. 基于Talbol理论的破碎岩石压缩变形及分形特征试验研究[J]. 矿业安全与环保，52(1)：61-69.

孙向军，潘家军，丁立鸿，等，2023. 软岩堆石料试验前后级配变化规律[J]. 长江科学院院报，40(9)：133-138.

孙向军，刘立强，邓韶辉，等，2024. 高应力状态下两河口堆石料蠕变特性试验研究[J]. 长江科学院院报，41(3)：88-93, 101.

孙亚楠，张培森，颜伟，等，2019. 采空区破碎砂岩承压变形特性试验研究[J]. 煤炭科学技术，47(12)：56-61.

题正义，秦洪岩，李树兴，2012. 矸石充填的压实特性试验分析[J]. 水资源与水工程学报，23(4)：129-131.

王俊光，刘文峰，梁冰，等，2016. 软弱破碎油页岩蠕变特性相似材

料实验研究[J]. 实验力学, 31(2): 263-268.

王振康, 2017. 神东侏罗纪煤系沉积岩力学特性的岩石学研究[D]. 焦作: 河南理工大学.

魏浩, 沈超敏, 刘斯宏, 等, 2020. 考虑级配影响的粗粒料压缩破碎特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 48(2): 182-188.

温蓬, 2023. 长壁采空区破碎岩石压实特性及其对地表残余变形影响机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学.

谢和平, 高峰, 周宏伟, 等, 2003. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 23(4): 1-9.

徐琨, 杨启贵, 2021. 水布垭面板堆石坝坝体后期变形时空分布规律研究[J]. 长江科学院院报, 38(7): 51-57.

许尚博, 李哲良, 郭鑫伟, 2023. 分级加载下级配破碎煤岩体压实特性试验研究[J]. 能源技术与管理, 48(6): 178-182.

叶为民, 王启力, 罗文静, 等, 2022. 非饱和泥质粉砂岩蠕变特性及其模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 50(8): 1154-1162.

郁邦永, 陈占清, 吴疆宇, 等, 2016. 饱和级配破碎泥岩压实与粒度分布分形特征试验研究[J]. 岩土力学, 37(7): 1887-1894.

张俊文, 王海龙, 陈绍杰, 等, 2018. 大粒径破碎岩石承压变形特性[J]. 煤炭学报, 43(4): 1000-1007.

张天军, 刘楠, 庞明坤, 等, 2021. 级配破碎煤岩体压实过程中再破碎特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 38(2): 380-387.

张振南, 缪协兴, 葛修润, 2005. 松散岩块压实破碎规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 24(3): 451-455.

中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015. 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014[S]. 北京: 中国计划出版社