

辛亚军,安定超,李梦远,等.不同加载速率红砂岩峰后蠕变特性试验研究[J].煤炭学报,2017,42(S1):60-67. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1455

Xin Yajun, An Dingchao, Li Mengyuan, et al. Study of red-sandstone post-peak creep test in different loading rates[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1):60-67. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.1455

## 不同加载速率红砂岩峰后蠕变特性试验研究

辛亚军<sup>1,2</sup>,安定超<sup>1</sup>,李梦远<sup>1</sup>,郝海春<sup>1</sup>

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454000; 2.煤炭安全生产河南省协同创新中心,河南 焦作 454000)

**摘要:**低强度岩石峰后蠕变特性复杂,在实验室通过 RLW-2000 型三轴流变仪,对 2 种加载速率 9 个红砂岩样进行峰后增量加载单轴蠕变试验,分析岩样峰后不同应力水平与不同加载速率下瞬时应变与蠕变应变特征,确定瞬时强度与峰后蠕变破坏强度关系,探讨不同阶段红砂岩样破坏失稳基本形态。结果表明:在相同应力加载条件下,加载速率越大,瞬时应变变化越小,衰减蠕变应变增量越大,等速蠕变应变增量越小;随着蠕变应力水平的提高,红砂岩样瞬时应变表现为快速减小—缓慢减小—缓慢增加—快速增加的整体减小趋势,而红砂岩样峰后蠕变应变则表现为平缓—增加—急速增加的非线性增加趋势,且非衰减蠕变具有明显蠕变 3 阶段特征;峰后岩样蠕变破坏强度较为接近,离散性小,岩样峰后蠕变破坏强度平均达到了瞬时强度的 89.73%;瞬时压缩破坏岩样呈现压剪破坏,岩样破坏块度大,峰后蠕变破坏主控破裂面形态复杂,加载速率越小,峰后蠕变岩样局部弱化特征越明显,但破坏失稳以主破裂面压剪失稳为主。

**关键词:**岩石力学;加载速率;峰值卸载;峰后蠕变;蠕变破坏强度;失稳形态

**中图分类号:**TD315

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-9993(2017)S1-0060-08

## Study of red-sandstone post-peak creep test in different loading rates

XIN Ya-jun<sup>1,2</sup>, AN Ding-chao<sup>1</sup>, LI Meng-yuan<sup>1</sup>, HAO Hai-chun<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. The Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan Province, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Due to the complex creep properties on low-strength post-peak rock, a uniaxial incremental loading creep test was conducted on two groups of nine red-sand rock specimens in two loading rates by RLW-2000 rock triaxial rheology test system. The characteristics of post-peak instantaneous and creep strain were analyzed in different stresses, the relationship between instantaneous strength and long-term one was determined, and the basic rock failure morphology was discussed in different stress stages. The results showed that in same loading, the higher the rate was, the smaller instantaneous strain change was; the more the attenuation creep-strain increment was, the smaller the isokinetic one was. With the stress increasing, the instantaneous strain reduced through reducing rapidly, slowly, and then increasing slowly, rapidly, while the post-peak creep strain increased linearly through slowly, average, and then rapidly, which had obviously three stages. The creep failure strength of post-peak rock specimens was similar, the discreteness was small, which was averagely 89.73% of instantaneous one; Instantaneous compress specimen failed in compressing and shearing, and failure rock block was larger. Main post-peak creep failure surfaces were complex; the lower the loading rate was, the more obviously partial specimen was weaken in post-peak creep, and the instability type was mainly compress-

收稿日期:2016-11-15 修回日期:2016-12-12 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174078);河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14B440001);河南省焦作市科技攻关计划资助项目(20151021103453)

作者简介:辛亚军(1974—),男,河南襄城人,硕士生导师,博士。E-mail:xinyj2007@163.com

shear failure along main fracture surface.

**Key words:** rock mechanics; loading rate; peak unloading; post-peak creep; creep failure strength; instability morphology

目前,我国较多矿井已进入深部开采,巷道围岩岩性开始由塑性向脆性转化,其围岩流变特性显著<sup>[1-3]</sup>,巷道围岩三区特征明显,更多围岩开始表现为峰后承载状态,围岩峰后蠕变特性研究进入人们视野,而深部矿井在不同开巷(或开采)速度影响下,围岩峰后流变特性更趋复杂<sup>[4]</sup>,巷道围岩峰后承载能力降低<sup>[5]</sup>,虽然仍具有一定的承载能力,但由于工作开采速率不同,极易造成巷道围岩产生不同失稳形态。因此,进行不同加载速率(开巷或开采速度)条件下岩石峰后蠕变试验,分析不同加载速率下岩石峰后蠕变承载及变形特性,对软岩峰后蠕变稳定性控制具有重要意义。

目前,关于不同加载速率对岩石力学参数的影响,主要集中在不同加载速率下岩石瞬时破坏特征研究上<sup>[6-7]</sup>。茅献彪等<sup>[8]</sup>对 2 种温度状态下石灰岩试件进行不同加载速率单轴压缩试验,得到了石灰岩力学性能随加载速率变化的规律。纪文栋等<sup>[9]</sup>进行了不同围压不同加载速率下盐岩三轴压缩实验,得到了盐岩物理力学性质随加载速率变化的规律。宫能平等<sup>[10]</sup>采用 CCD-SHPB 试验系统对花岗岩试件实施不同加载速率下的纯 I 型加载试验,获得花岗岩在不同加载速率下的动态断裂韧度。尹小涛等<sup>[11]</sup>通过 4 个加载速率下的单轴压缩数值试验,分析了加载速率对岩石破裂形态、裂纹数量和扩展、应力-应变曲线和能量转换的影响。许金余等<sup>[12]</sup>利用  $\phi 100$  mm 分离式 Hopkinson 压杆装置,研究了峰值应力、峰值应变、弹性模量等与加载速率关系。

对于岩样峰后蠕变特性试验,由于岩石峰值点确定困难,较多研究集中在岩石蠕变特性的研究上,而对岩石进行峰后蠕变试验,确定岩石峰后的长期承载能力的相关研究较少。牛双建等<sup>[13]</sup>对不同破裂损伤程度的峰前屈服、峰后破裂损伤岩样进行单轴蠕变试验,研究其单轴蠕变力学特性;张帆等<sup>[14]</sup>通过对三峡花岗岩进行常规三轴压缩试验,得到了不同围压下应力-应变全过程曲线,建立花岗岩峰后应变软化模型,并进行了数值模拟;孙闯等<sup>[15]</sup>通过室内试验方法研究花岗岩峰后力学特性,获得了泥岩峰后软化模量与围压关系,构建了考虑围压影响的泥岩峰后应变软化模型;赵宝云等<sup>[16]</sup>对红砂岩进行了单轴压缩蠕变试验,建立了非线性黏弹塑性蠕变模型,并基于 BFGS 非线性优化算法对该模型参数进行了识别;平洋

等<sup>[17]</sup>采用 RLW-1000 型岩石三轴伺服刚性机对不同围压贯穿裂隙圆柱体标准试件进行常规三轴压缩试验,分析了裂隙岩体在不同围压下峰后强度和变形特性;陈绍杰等<sup>[18]</sup>采用水泥、粉煤灰、煤矸石等材料按照 1:4:6 配比制成充填膏体试件,对其进行了单轴压缩与蠕变试验;陆银龙等<sup>[19]</sup>通过对软弱泥岩进行常规三轴压缩试验,得到了不同围压下的全应力-应变曲线,建立了以广义黏聚力和广义内摩擦角 2 个状态参数来表征软弱岩石后继屈服面模型;刘传孝等<sup>[20]</sup>通过对剪应力-剪切位移曲线分析,提出了一种利用峰后曲线计算岩石抗剪强度参数近似方法;李树忱等<sup>[21]</sup>用微机控制高刚度伺服试验机,开展预制贯穿节理类岩石试件单轴压缩试验,系统研究贯穿节理类岩石试件峰后应力-应变曲线、破坏形式、峰后残余强度、峰后视泊松比等与裂隙倾角之间的关系;何峰等<sup>[22]</sup>设计了基于自主研发三轴渗流蠕变测试仪的渗流蠕变实验,通过采用控制变量法分别递增围压、轴压、孔压,拟合曲线得出了随着围压、轴压、孔压分别递增情况下煤岩体峰前及峰后渗流蠕变规律。

可以看出,上述研究主要集中在对完整岩石峰前峰后力学特性的研究上,依据岩石单轴压缩试验确定岩石峰后蠕变试验方法,进行岩石峰后蠕变特性相关研究也有初步探索。文中通过采用 RLW-2000 型三轴伺服流变仪,对 9 个红砂岩样进行峰后蠕变特性试验,分析 2 种不同加载速率峰后蠕变特性,获得了红砂岩基本力学参数,分析了峰后岩样不同应力水平与不同加载速率下瞬时应变、蠕变应变特征,确定了岩样瞬时强度与蠕变破坏强度关系,探讨了不同阶段红砂岩破坏失稳基本形态。研究结果可为软岩巷道围岩峰后稳定性控制与开采(掘进)速率关系提供参考。

## 1 岩样制作与试验方法

### 1.1 岩样制作

试验岩样为红砂岩,砂粒明显。在实验室沿垂直层理方向用取样机取样,切割机切样,以制成  $\phi 50$  mm $\times$ 100 mm 标准岩样,岩样两端用双端面磨石机打磨,不平行度小于 0.05 mm,要求现场取样和实验室标准岩样加工均按规定标准进行<sup>[23]</sup>。

由于先前进行过 3 组(A、B、C 组)红砂岩样力学特性研究,本次试验红砂岩样为 D 组 9 个岩样均取自同一岩石(图 1),根据制样顺序,红砂岩样依次编

号为 D1 ~ D9, 岩样基本特征见表 1。

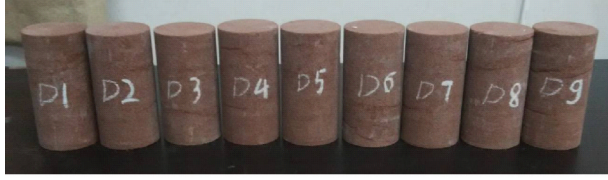


图 1 岩样制作

Fig. 1 Produce of rock specimens

表 1 岩样基本特征

Table 1 Basic characteristics of rock specimens

编号	直径/ mm	高度/ mm	质量/ g	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	高径比
D1	49.58	98.18	404.48	2.13	1.98
D2	49.58	98.18	401.70	2.12	1.98
D3	49.54	96.28	399.35	2.15	1.94
D4	49.62	99.02	405.20	2.12	2.00
D5	49.70	98.80	406.48	2.12	1.99
D6	49.70	99.12	407.55	2.12	1.99
D7	49.68	98.44	404.58	2.12	1.98
D8	49.64	98.80	401.77	2.10	1.99
D9	49.66	98.00	402.30	2.12	1.97

## 1.2 试验方法

试验在 RLW-2000 型岩石三轴流变仪上进行(图 2), 试验机采用计算机进行全伺服控制, 实时显示, 自动采集数据, 具有良好的动态响应功能。本次试验主要研究不同加载速率下红砂岩样峰后蠕变特性及蠕变破坏强度变化, 试验采用负荷加载方式, 试验过程中岩样加载应力与位移变化均由电脑自动采集完成。



图 2 RLW-2000 型岩石三轴流变仪

Fig. 2 RLW-2000 rock triaxial rheology test system

### (1) 峰值卸载方案

由于试验红砂岩样强度小于 60 MPa, 且取自同一块岩石, 在试验过程中采用较小加载速率(50 N/s)进行试验, 当应力-应变曲线出现平台(应变增加而应力不变)的瞬间进行卸载而岩样没有破坏失稳时, 此时卸载应力初步判定为岩样峰值。之后对卸载

岩样进行增量加载蠕变试验, 当蠕变破坏载荷大于卸载强度时, 原峰值卸载点不作为峰值强度, 而作为损伤强度, 进行峰值卸载强度分析时, 剔除此岩样; 当卸载岩样进行增量加载蠕变试验破坏载荷小于卸载强度时, 岩样卸载点确定为峰值点。

当应力-应变曲线出现平台(应变增加而应力不变)的瞬间岩样出现破坏失稳, 此时应力判定为峰值强度, 只进行基本力学特性分析。

由于峰值点位置控制难度较大, 出现过峰值点破坏试验的岩样作为岩样单轴抗压强度试验, 采集其应力-应变曲线; 而峰前卸载增量加载蠕变试验, 作为峰前卸载蠕变试验, 以和红砂岩峰后蠕变试验进行对比分析。

### (2) 峰后蠕变试验设计

红砂岩样峰后蠕变试验初始加载载荷为 20 MPa, 加载梯度为 5 MPa, 即  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \dots$  分别为 20, 25, 30, 35 MPa,  $\dots$ , 所有岩样每次加载蠕变时间设计为 24 h, 采用增量加载蠕变方式至岩样破坏(图 3)。试样卸载峰值前瞬时加载速率为 50 N/s, D1 ~ D5 蠕变应力水平加载速率为 50 N/s, D6 ~ D9 蠕变应力水平加载速率为 100 N/s。

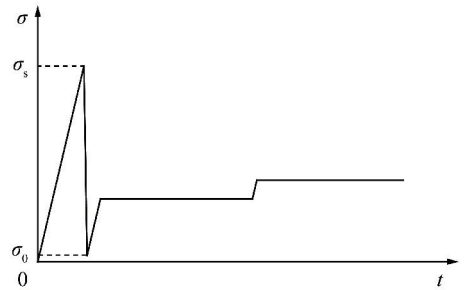


图 3 岩样载荷路径

Fig. 3 Load path of rock specimens

设计试验过程为: ① 将编号岩样放入三轴伺服流变仪加载台, 启动轴向油泵使岩样上端面与三轴流变仪轴向压缩端接触, 将位移千分表清零; ② 采用不同载荷加载速率至岩样峰值点后卸载到 1.5 MPa, 位移卸载速率为 200 mm/min, D1 ~ D5 加载速率为 50 N/s, D6 ~ D9 加载速率为 100 N/s; ③ 将轴向应力从 1.5 MPa 加载到第一级相应应力水平  $\sigma_1$  蠕变 24 h 后, 直接加载至第二级相应应力水平  $\sigma_2$ , 蠕变 24 h 后进行第三级相应应力水平加载; ④ 每次按 5 MPa 加载梯度与 24 h 蠕变时间进行增量加载蠕变至岩样最终破坏; ⑤ 对采集试验数据进行记录保存, 分析数据。

## 2 试验结果

D 组 9 个红砂岩样增量加载蠕变试验过程中,

D1 岩样为过峰值点直接破坏, D3 为非过峰值点(峰前)卸载后增量加载蠕变, 其余均完成峰后增量加载蠕变试验, D9 蠕变试验过程中受到振动影响。D 组岩样试验应力-应变及应变-时间曲线如图 4, 5 所示, 破坏形态如图 6 所示, 试验结果见表 2。

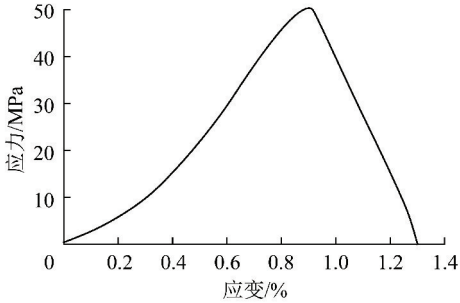


图 4 D1 岩样瞬时加载应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of instantaneous loading on D1 rock specimens

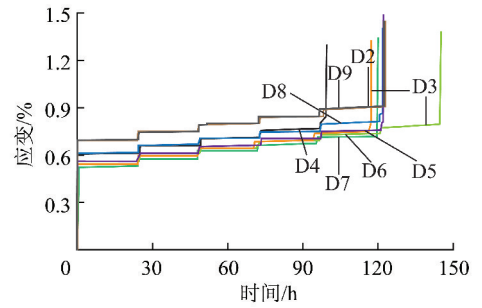


图 5 红砂岩蠕变曲线

Fig. 5 Creep curves of red-sand rock specimens



图 6 岩样破坏形态

Fig. 6 Failure morphology of rock specimens

表 2 试验数据

Table 2 Data of post-peak creep test

编号	应力/MPa	蠕变前应变/%	蠕变后应变/%	瞬时应变/%	蠕变应变/%	蠕变时间/h	峰值强度/MPa	蠕变破坏强度/MPa
D1				0.923 8			50.150 0	
D2	20	0.689 5	0.698 7	0.689 5	0.009 2	23.994 4	49.498 4	45.000 0
	25	0.742 5	0.752 7	0.0438	0.010 2	23.993 8		
	30	0.789 4	0.798 5	0.036 7	0.009 2	23.997 4		
	35	0.838 3	0.846 4	0.039 7	0.008 1	25.528 6		
	40	0.887 1	0.908 5	0.040 7	0.021 4	24.013 1		
D3	45	0.960 5	0.987 4	0.051 9	0.026 9	0.011 3	48.260 6	50.000 0
	20	0.552 6	0.560 9	0.552 6	0.008 3	24.009 6		
	25	0.601 4	0.609 7	0.040 5	0.008 3	24.000 9		
	30	0.641 9	0.651 2	0.032 2	0.009 3	23.998 3		
	35	0.684 5	0.691 7	0.033 2	0.007 3	23.996 5		
D4	40	0.727 0	0.737 4	0.035 3	0.010 4	23.995 7	51.570 9	40.000 0
	45	0.765 5	0.796 6	0.028 0	0.031 2	23.999 7		
	50	0.836 1	0.904 7	0.039 5	0.068 6	0.129 4		
	20	0.604 9	0.612 0	0.604 9	0.007 1	24.004 0		
D5	25	0.655 4	0.661 5	0.043 4	0.006 1	23.988 7	53.693 7	45.000 0
	30	0.707 9	0.715 0	0.046 5	0.007 1	24.172 7		
	35	0.758 4	0.769 5	0.043 4	0.011 1	23.970 5		
	40	0.813 0	0.866 5	0.043 4	0.053 5	2.452 2		
	20	0.559 7	0.565 8	0.559 7	0.006 1	24.000 5		
D5	25	0.608 3	0.612 3	0.042 5	0.004 0	24.032 1	53.693 7	45.000 0
	30	0.653 8	0.660 9	0.041 5	0.007 1	24.258 7		
	35	0.696 4	0.706 5	0.035 4	0.010 1	24.003 6		
	40	0.742 9	0.757 1	0.036 4	0.014 2	24.003 5		
	45	0.797 6	0.857 3	0.040 5	0.059 7	0.608 5		

续 表

编号	应力/ MPa	蠕变前应 变/%	蠕变后应 变/%	瞬时应 变/%	蠕变应 变/%	蠕变时间/h	峰值强 度/MPa	蠕变破坏 强度/MPa
D6	20	0.537 7	0.545 8	0.537 7	0.008 1	23.994 5	52.412 3	45.000 0
	25	0.589 2	0.596 2	0.043 4	0.007 1	23.983 5		
	30	0.638 6	0.648 7	0.042 4	0.010 1	22.297 8		
	35	0.684 0	0.694 1	0.035 3	0.010 1	23.989 1		
	40	0.731 4	0.745 6	0.037 3	0.014 1	22.120 4		
	45	0.780 9	0.858 6	0.035 3	0.077 7	0.515 4		
D7	20	0.521 1	0.529 3	0.521 1	0.008 1	24.000 0	55.024 6	45.000 0
	25	0.569 9	0.579 0	0.040 6	0.009 1	24.000 0		
	30	0.617 6	0.624 7	0.038 6	0.007 1	23.966 5		
	35	0.663 3	0.672 5	0.038 6	0.009 1	23.935 6		
	40	0.709 1	0.722 3	0.036 6	0.013 2	24.010 6		
	45	0.762 9	0.833 0	0.040 6	0.070 1	0.227 5		
D8	20	0.607 3	0.614 4	0.607 3	0.007 1	25.051 8	54.849 8	45.000 0
	25	0.654 9	0.664 0	0.040 5	0.009 1	23.973 3		
	30	0.701 4	0.710 5	0.037 4	0.009 1	23.974 8		
	35	0.744 9	0.757 1	0.034 4	0.012 1	23.972 5		
	40	0.790 5	0.813 8	0.033 4	0.023 3	23.929 6		
	45	0.850 2	0.973 7	0.036 4	0.123 5	1.189 2		
D9	20	0.690 8	0.698 0	0.690 8	0.007 1	24.008 2	52.573 1	45.000 0
	25	0.739 8	0.751 0	0.041 8	0.011 2	24.014 9		
	30	0.788 8	0.805 1	0.037 8	0.016 3	24.044 7		
	35	0.839 8	0.848 0	0.034 7	0.008 2	24.039 2		
	40	0.884 7	0.906 1	0.036 7	0.021 4	26.104 4		
	45	0.946 9	0.989 8	0.040 8	0.042 9	0.109 7		

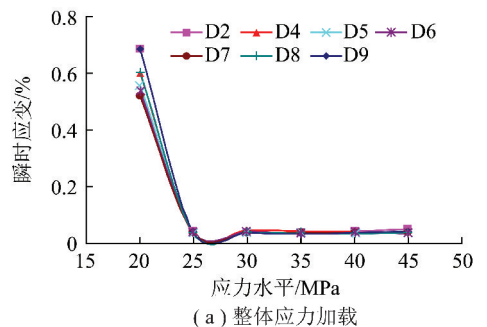
### 3 结 果

#### 3.1 瞬时应变与应力水平、加载速率关系

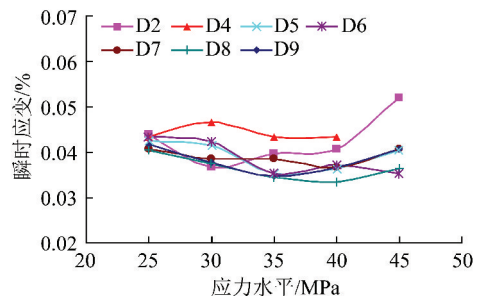
这里以 D 组岩样的 D2, D4, D5, D6, D7, D8 与 D9 (均完成峰后蠕变试验) 进行分析。

对于瞬时应变来说(图 7(a)), 在第 1 次加载到 20 MPa 应力水平时, 岩样 D2, D4 与 D5 (加载速率 50 N/s) 瞬时应变均值为 0.618 0%, 岩样 D6, D7, D8 与 D9 (加载速率 100 N/s) 瞬时应变均值为 0.589 2%, 岩样瞬时应变变化较大, 岩样处于压密阶段。

从 20 MPa 蠕变应力水平后(图 7(b)), 加载应力水平梯度为 5 MPa, 随着应力水平提高, 从 25 MPa 增加到 35 MPa, 岩样瞬时应变变化呈减小趋势, 均值从 0.042 3% 减小到 0.037 4%, 减小幅度 11.58%, 表明岩样处于持续压密阶段中; 从 35 MPa 增加到 40 (D4) ~ 45 MPa (D2, D5, D6, D7, D8 与 D9), 岩样瞬时应变变化呈微小增加趋势, 均值从 0.037 4% 增加到 0.040 9%, 增加幅度 9.36%, 表明岩样内部压密或压密后新裂隙打开出现塑性及颗粒转动, 但不存



(a) 整体应力加载



(b) 相同梯度加载

图 7 岩样瞬时应变与应力水平关系曲线

Fig. 7 Relationship of instantaneous strain and loading level

在岩石破坏前瞬时应变变化较大情况,岩样处于塑性阶段;应力水平大于 40 ~ 45 MPa 后,岩样出现破坏,表明岩样内部细微裂隙的贯通及岩样整体失稳。

在相同应力加载条件下,加载速率越大,瞬时应变变化越小,随着蠕变应力水平提高,瞬时应变表现为快速减小—缓慢减小—缓慢增加—快速增加的整体减小趋势。

### 3.2 蠕变应变与应力水平、加载速率关系

对于蠕变应变来说(图 8),D9 岩样蠕变过程中受到其它试验机试验震动,蠕变应变试验数据受到影响,其离散较大,这里只对岩样 D2, D4, D5, D6, D7 与 D8 进行分析。

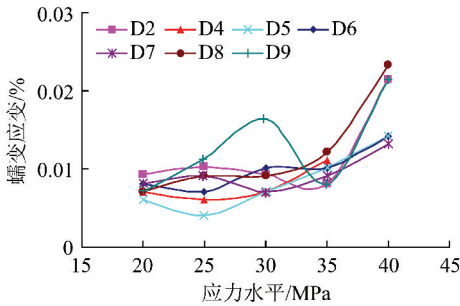


图 8 岩样蠕变应变与应力水平关系曲线

Fig. 8 Relationship between creep strain and loading level

在第 1 级蠕变应力水平下,岩样呈现出明显的衰减蠕变特征,在相同蠕变时间条件下,随着蠕变应力水平提高,红砂岩样压密阶段(20 ~ 25 MPa)蠕变应变均值变化不明显,但加载速率越大,蠕变应变增量越大,两种加载速率下的蠕变应变分别增加 0.000 3% 和 0.015 2%,表现为蠕变应力水平越大,蠕变应变增加越大,表现为岩样瞬时应变下持续压密,且呈现衰减蠕变特征;红砂岩样弹性阶段(25 ~ 35 MPa)蠕变应变表现为缓慢增加,蠕变应变分别均值由 0.007 6% 增加到 0.010 1%,增加幅度为 32.90%,两种加载速率下的蠕变应变分别增加 0.003 0% 和 0.002 0%,加载速率大,岩样蠕变应变增量小,蠕变应变的缓慢增加表现为岩样蠕变过程中岩石裂隙的持续压密;红砂岩样塑性(屈服)阶段(35 ~ 40 MPa)蠕变应变均值由 0.010 1% 增加到 0.017 3%,增加幅度为 71.62%,两种加载速率下的蠕变应变分别增加 0.008 0% 和 0.006 4%,同样加载速率大,岩样蠕变应变增量小,岩样蠕变应变呈急速增加趋势,表现为岩样蠕变过程中岩样内部裂隙的扩展与贯通;最后一级蠕变应力水平下,峰后岩样呈现蠕变破坏,蠕变曲线与常规蠕变曲线相同,衰减蠕变、等速蠕变与加速蠕变 3 阶段特征明显(图 9)。

整体上看,随着蠕变应力水平提高,红砂岩样峰

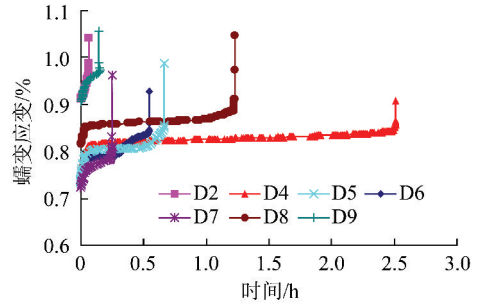


图 9 岩样高应力水平非衰减蠕变曲线

Fig. 9 Attenuation creep curves of rock specimens in high stress level

后蠕变应变表现为平缓—增加—急速增加的非线性增加趋势,加载速率越大,衰减蠕变应变增量越大,等速蠕变应变增量越小,且非衰减蠕变具有明显蠕变 3 阶段特征。

### 3.3 瞬时强度与蠕变破坏强度关系

在对 9 个红砂岩样进行峰后蠕变试验过程中, D1 岩样在卸载前破坏。通过 D1 岩样应力—应变曲线及其拟合,得出 D1 岩样抗压强度、弹性模量、变形模量及坚固性系数等基本力学参数。其中,岩样弹性模量以岩样平均模量进行计算,则可得 D1 岩样基本力学参数见表 3。

表 3 瞬时破坏岩样力学参数

Table 3 Mechanics parameters of instantaneous failure rock

岩样	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	变形模量/GPa	普氏系数
D1	50.150	8.290	5.429	5.015

D 组红砂岩样强度较低,应力—应变曲线 4 阶段特征明显,低蠕变应力区范围确定合理,同时为峰值卸载位置合理掌握提供了依据。

从岩样峰后蠕变破坏强度来看, D2 ~ D9 峰后蠕变破坏强度达到了瞬时强度(D1)的 79.76% ~ 99.70%,蠕变破坏强度值较为接近,离散性小,红砂岩样峰后蠕变破坏强度平均达到了瞬时强度的 89.73%。

### 3.4 岩样破坏基本形态

在 D 组岩样中, D1 为瞬时压缩破坏,岩样呈现压剪破坏,主破裂面大于岩样内摩擦角端面,岩样破坏块度大(图 10(a))。

以典型峰值后岩样 D2 与 D6 加载速率为 50 与 100 N/s 分析,岩样破坏主控破裂面形态复杂,加载速率越小,内部微缺陷越多、均匀性越差,局部弱化特征越明显,但岩样破坏以主破裂面压剪失稳为主(图 10(b),(d))。

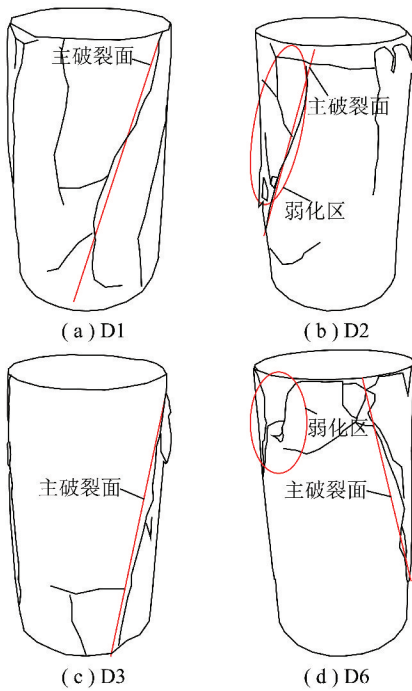


图 10 典型岩样破坏形态素描

Fig. 10 Failure morphology sketch of rock samples

峰前卸载 D3 岩样破坏形态介于单轴压缩瞬时破坏与峰后蠕变破坏之间,岩样对初期损伤具有记忆效应,岩样破坏基本沿内摩擦角失稳,且破裂面规整(图 10(c))。

可以看出,不同加载速率与相同加载速率下红砂岩样破坏形态迥异,但基本形态相似,差异性不仅与卸载峰值、蠕变破坏强度有关,还与红砂岩样本本身存在的节理、裂隙有关。

## 4 结 论

(1)在相同应力加载条件下,加载速率越大,瞬时应变变化越小,衰减蠕变应变增量越大,等速蠕变应变增量越小。

(2)随着蠕变应力水平提高,红砂岩样瞬时应变表现为快速减小-缓慢减小-缓慢增加-快速增加的整体减小趋势。

(3)随着蠕变应力水平提高,红砂岩样峰后蠕变应变表现为平缓-增加-急速增加的非线性增加趋势,且非衰减蠕变具有明显蠕变 3 阶段特征。

(4)峰后岩样蠕变破坏强度较为接近,离散性小,岩样峰后蠕变破坏强度平均达到了瞬时强度的 89.73%。

(5)瞬时压缩破坏岩样呈现压剪破坏,岩样破坏块度大,峰后蠕变破坏主控破裂面形态复杂,加载速率越小,局部弱化特征越明显,但岩样破坏以主破裂面压剪失稳为主。

## 参考文献 (References):

- [1] 王波,高延法,夏方迁.流变特性引起围岩应力场演变规律分析[J].采矿与安全工程学报,2011,28(3):441-445.  
Wang Bo, Gao Yanfa, Xia Fangqian. Analysis of the evolution rule of surrounding rock stress field induced by rheological property[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 441-445.
- [2] 高延法,曲祖俊,牛学良,等.深井软岩巷道围岩流变与应力场演变规律[J].煤炭学报,2007,32(12):1244-1252.  
Gao Yanfa, Qu Zujun, Niu Xueliang, et al. Rheological law for soft-rock tunnel and evolution law for stress field in deep mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1244-1252.
- [3] 韦四江,勾攀峰,于春生.大断面破碎洞室围岩蠕变模拟及控制技术[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):489-494.  
Wei Sijiang, Gou Panfeng, Yu Chunsheng. Creep simulation on fractured surrounding rock of large section chamber and its control technology[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(4): 489-494.
- [4] 王金安,焦申华,谢广辉.综放工作面开采速率对围岩应力环境影响的研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1118-1124.  
Wang Jinan, Jiao Shenhua, Xie Guanghui. Study on influence of mining rate on stress environment in surrounding rock of mechanized top caving mining face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1118-1124.
- [5] 韩立军,贺永年,蒋斌松,等.环向有效约束条件下破裂岩体再破坏特性分析[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3483-3489.  
Han Lijun, He Yongnian, Jiang Binsong, et al. Analysis of refracture properties of cracked rock mass under hoop effective constraint[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3483-3489.
- [6] 张连英,茅献彪.高温状态下加载速率对石灰岩力学效应研究[J].岩土力学,2010,31(11):3511-3515.  
Zhang Lianying, Mao Xianbiao. Experimental study of the mechanical effects of loading rates on limestone at high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3511-3515.
- [7] 薛东杰,周宏伟,王子辉,等.不同加载速率下煤岩采动力学响应及破坏机制[J].煤炭学报,2016,41(3):595-602.  
Xue Dongjie, Zhou Hongwei, Wang Zihui, et al. Failure mechanism and mining-induced mechanical properties of coal under different loading rates[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 595-602.
- [8] 茅献彪,刘瑞雪,张连英.加载速率对不同温度状态石灰岩力学性能影响的试验研究[J].中国科技论文,2014,9(5):574-577.  
Mao Xianbiao, Liu Ruixue, Zhang Lianying. Effect of loading rate on mechanical properties of limestone at different temperatures[J]. China Science Paper, 2014, 9(5): 574-577.
- [9] 纪文栋,杨春和,姚院峰,等.应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12):2507-2513.  
Ji Wendong, Yang Chunhe, Yao Yuanfeng, et al. Effect of loading strain rate on mechanical performance of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2507-

- 2513.
- [10] 宫能平,罗裕繁,高远. 加载速率对岩石动态断裂韧度影响的试验[J]. 上海交通大学学报,2012,46(10):1570-1580.  
Gong Nengping, Lou Yufan, Gao Yuan. Experimental study on the effect of loading rate for dynamic fracture toughness of rock[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(10): 1570-1580.
- [11] 尹小涛,葛修润,李春光,等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2610-2615.  
Yin Xiaotao, Ge Xiurun, Li Chunguang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2610-2615.
- [12] 许金余,刘石. 加载速率对高温后大理岩动态力学性能的影响研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(5):879-883.  
Xu Jinyu, Liu Shi. Effect of impact velocity on dynamic mechanical behaviors of marble after high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 879-883.
- [13] 牛双建,党元恒,冯文林,等. 损伤破裂砂岩单轴蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(5):1249-1258.  
Niu Shuangjian, Dang Yuanheng, Feng Wenlin, et al. Uniaxial experimental study of creep properties of sandstone in damage and fracture states[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1249-1258.
- [14] 张帆,盛谦,朱泽奇,等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S1):2651-2655.  
Zhang Fan, Sheng Qian, Zhu Zeqi, et al. Study on post-peak mechanical behaviour and strain-softening model of three gorges granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2651-2655.
- [15] 孙闯,惠心敏楠,张强. 泥岩峰后应变软化行为及围岩-支护结构相互作用研究[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(2):254-260.  
Sun Chuang, Hui Xinminnan, Zhang Qiang. Study on the post peak strain softening behavior of mudstone and the interaction between surrounding rock and supporting structure[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(2): 254-260.
- [16] 赵宝云,刘东燕,郑颖人,等. 红砂岩单轴压缩蠕变试验及模型研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(5):744-747.  
Zhao Baoyun, Liu Dongyan, Zheng Yingren, et al. Uniaxial compressive creep test of red sandstone and its constitutive model[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(5): 744-747.
- [17] 平洋,李树忱,汪雷. 贯通节理砂岩峰后变形试验研究及其在隧道支护中的应用[J]. 煤炭学报,2014,39(4):644-650.  
Ping Yang, Li Shuchen, Wang Lei. Experimental study of post-peak deformation of sandstone with pre-existing transfixion joint and its application in tunnel support[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 644-650.
- [18] 陈绍杰,朱彦,王其锋,等. 充填膏体蠕变宏观硬化试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2016,33(2):348-353.  
Cheng Shaojie, Zhu Yan, Wang Qifeng, et al. Experimental study on creep macroscopic hardening of filling paste[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 348-353.
- [19] 陆银龙,王连国,杨峰,等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(3):640-648.  
Lu Yinlong, Wang Lianguo, Yang Feng, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 640-648.
- [20] 刘传孝,黄东辰,张秀丽,等. 深井泥岩峰前/峰后单轴蠕变特征实验研究[J]. 实验力学,2011,26(3):267-273.  
Liu Chuanxiao, Huang Dongchen, Zhang Xiuli, et al. Experimental study of uniaxial creep properties of mudstone in deep site front and rear the ultimate strength[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3): 267-273.
- [21] 李树忱,汪雷,李术才,等. 不同倾角贯穿节理类岩石试件峰后变形破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3391-3395.  
Li Shuchen, Wang Lei, Li Shucui, et al. Post-peak deformation and failure experimental study of rock-like specimens with different inclination angles persistent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3391-3395.
- [22] 何峰,贾渊,邴英楼. 破碎煤岩峰后渗流-蠕变实验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(9):999-1003.  
He Feng, Jia Yuan, Tai Yinglou. Experimental study on creep-seepage peak after crushing coal[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2015, 34(9): 999-1003.
- [23] GT/T 23561—2009,煤和岩石物理力学性质测定方法[S]. 北京:中国标准出版社,2009.  
GT/T 23561—2009, Methods for determining the physical and mechanical properties of coal and rock[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.