

文章编号:1673-9469(2023)04-0052-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.04.008

北山花岗岩短长期常规三轴力学特性试验研究

朱其志^{1,2}, 纵跃^{1,2*}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究北山花岗岩的物理力学特性, 开展了常规三轴、蠕变和松弛试验, 研究过程与结论如下: (1) 开展北山花岗岩在不同围压条件下的常规三轴压缩试验, 对比分析试样的变形和破坏形式等力学特征, 得出北山花岗岩岩石破坏时的不可恢复变形较小, 且随着围压增大未出现脆-延性转变现象的结论; (2) 开展北山花岗岩单级蠕变试验及不同围压条件下的多级蠕变试验, 分析不同偏应力的形变和单级蠕变的蠕变速率, 得出北山花岗岩的蠕变形式为非稳定蠕变, 其应变曲线出现了典型的蠕变三阶段特征的结论; (3) 开展北山花岗岩单级应力松弛试验及循环松弛试验, 分析偏应力的变化规律, 得出北山花岗岩在应力松弛过程的初始松弛阶段, 其偏应力下降速率很快, 在较短时间内即能够达到稳定状态的结论。

关键词: 北山花岗岩; 常规三轴压缩试验; 蠕变试验; 松弛试验

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Experimental Study on Short-and Long-Term Mechanical Properties of Beishan Granite Under Conventional Triaxial Compression

ZHU Qizhi^{1,2}, ZONG Yue^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Dam Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to study the physical and mechanical properties of Beishan granite, conventional triaxial, creep, and relaxation tests were conducted. The main research process and conclusions are as follows: (1) Conventional triaxial compression tests were conducted on Beishan granite under different confining pressure conditions and mechanical characteristics, such as the deformation and failure modes of the samples, were compared and analyzed. It was found that the irreversible deformation of Beishan granite rock during failure was relatively small and there is no brittle ductile transition phenomenon with the increase of confining pressure; (2) Single stage creep tests on Beishan granite and multi-level creep tests were conducted under different confining pressure conditions and the deformation of different deviatoric stress pairs and the creep rate of single stage creep were analyzed, which showed that the creep form of Beishan granite was unstable creep, and its strain curve showed typical third-order creep characteristics; and (3) Single stage stress relaxation and cyclic relaxation tests were conducted on Beishan granite and the variation law of deviatoric stress was analyzed, which found that the deviatoric stress of Beishan granite decreased rapidly during the initial relaxation stage of stress relaxation process and reached a stable state in a relatively short period of time.

Key words: Beishan granite; conventional triaxial compression test; creep test; relaxation test

收稿日期: 2023-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679068, 11902111); 国家重点研发计划(2017YFC1501100)

作者简介: 朱其志(1979-), 男, 江苏泗洪人, 博士, 教授, 从事多尺度多场耦合岩石本构理论、细观损伤力学及数值方法的研究。

* 通讯作者: 纵跃(1997-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 从事岩石力学与岩土工程方面的研究。

甘肃北山花岗岩体已经被确定为我国高放废物地质处置地下实验室的推荐场址,开展预选区代表性硐室围岩的岩体力学性质研究,对围岩的时效力学行为的试验研究是地下实验室开工的重要准备工作之一^[1-4]。田洪铭等^[5-6]针对花岗岩开展力学特性试验研究,深入分析了其力学行为、变形规律和破坏特征;陈亮等^[7]使用声发射定位系统,对北山深部花岗岩开展了单轴拉伸和三轴压缩下的损伤演化特征试验,为北山花岗岩损伤演化规律研究奠定了基础;赵星光等^[8-9]分析了北山花岗岩在单、三轴压缩条件下的破裂过程和强度特性、全应力-应变曲线规律;李鹏飞等^[10-16]对北山花岗岩进行三轴循环加、卸载试验,建立强度参数随塑性参数变化的数学模型,以上研究成果为研究和分析北山花岗岩力学特性提供了重要参考。

本文以甘肃北山花岗岩为研究对象,利用全应力岩石三轴试验机,开展如下研究:首先,进行一系列的常规三轴压缩试验得到岩样的基本力学参数,为后面的流变试验提供试验依据。其次,进行相同围压不同偏应力等级下的单级蠕变试验,得到试样的蠕变曲线及变形特征;进行不同围压等级条件下的两次多级蠕变试验,得到试样的多级蠕变曲线并研究试样的蠕变变形特征。最后,进行相同围压不同初始偏应力等级下的单级松弛试验,得到试样的单级松弛试验及变形特征;进行不同围压下的循环松弛试验,得到试样的循环松弛试验曲线及变形特征。

1 试验准备

1.1 试样制备

用于实验测试的岩石标本是从地下研究实验室新昌遗址#BS28 钻孔取芯的。寄主岩为花岗岩,称为北山花岗岩,其表面呈灰白色。所有三轴压缩试验都是在直径 50 mm、长度 100 mm 的

圆柱形试样上进行的。采用经典饱和法确定岩石的初始平均密度,测试岩石样品的平均干容重约为 2.72 g/cm^3 。

1.2 试验仪器

本实验试样在岩石三轴压缩机的 MTS815 岩石力学试验系统进行。试件被黑色橡胶夹套,然后放置在两个钢制塞之间。试验在一个热隔离的小房间中进行,实验期间保持恒温。轴向变形是用一对线性可变差动变压器(LVDTs)测量的,横向变形是用放置在试件中心部分的周向伸度计测量的。

1.3 试验方案

在常规三轴试验中,开展岩石三轴压缩试验,是为了得到如下所示的不同围压条件下的岩石试样的应力-应变关系,北山花岗岩在低围压情况下和高围压的破坏形式明显不同,因此对低围压试验的围压进行加密实验。本文的常规三轴压缩试验在 9 个围压等级(0、1、2、5、10、15、25、30 和 40 MPa)下进行。首先在轴向和横向同时增加围压,直到达到规定的静水应力状态。然后沿轴向以 0.02 mm/min 的应变速率施加偏应力,直至试件破坏。为了排除试样中偶然出现的试样缺陷或较大的实验误差,在同一围压下进行了 1 至 4 组重复实验,共 25 组实验。

在蠕变试验中,常规三轴蠕变试验考虑了 2 个围压等级,即 5 和 15 MPa。选择围压等级为 15 MPa 的条件进行了 3 个不同偏应力等级下的单级蠕变试验,分别为峰值偏应力的 92%、93%、95% (225.7、228、232.5 MPa);分别进行了围压等级为 5、15 MPa 条件下的多级蠕变试验,其中,对于围压 5 MPa 的情况,最终试验的偏应力为 5 级,各级偏应力为 130、140、145、150、155 MPa;对于围压 15 MPa 的情况,最终试验的偏应力为 7 级,各级偏应力为 180、190、200、210、220、230 和 235 MPa。表 1 为三轴蠕变试验的具体试验方案及对应试样参数。

表 1 三轴蠕变试验方案及试样参数

Tab. 1 Triaxial creep test scheme and parameters of samples

序号	类型	编号	D/mm	H/mm	m/g	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$(\sigma_1 - \sigma_3) / \text{MPa}$
1	单级(15)	BS28-1605-01-01	48.75	101.50	515.3	2.72	225.7
2	单级(15)	BS28-1605-11-01	48.84	100.71	513.6	2.72	228
3	单级(15)	BS28-1605-04-01	48.90	100.74	514.6	2.72	232.5
4	单级(5)	BS28-1605-03-02	48.72	101.07	513.7	2.73	130-155
5	单级(15)	BS28-1605-10-01	48.76	100.90	512.3	2.72	180-235

表2 应力松弛试验方案及试样参数

Tab. 2 Stress relaxation rest scheme and parameters of samples

序号	类型	编号	D/mm	H/mm	m/g	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$(\sigma_1 - \sigma_3) / MPa$
1	单级(15)	BS28-1605-01-03	48.83	100.57	512.42	2.72	171
2	单级(15)	BS28-1605-04-06	48.83	101.87	514.66	2.72	196
3	单级(15)	BS28-1605-04-02	48.77	100.93	513.16	2.72	221
4	单级(5)	BS28-1605-12-04	48.72	101.14	513.70	2.73	233
5	循环(15)	BS28-1605-15-01	48.80	100.57	511.64	2.72	200

在松弛实验中,试验围压选择为 15 MPa,进行了不同偏应力等级下的单级松弛试验,初始偏应力等级设置为 4 个等级,分别为峰值偏应力的 70%、80%、90%、95% (171、196、221、233 MPa);进行了一组循环松弛,初始偏应力等级设置为 200 MPa,共进行了 6 次循环。表 2 为应力松弛试验的具体试验方案及对应参数。

2 实验结果与分析

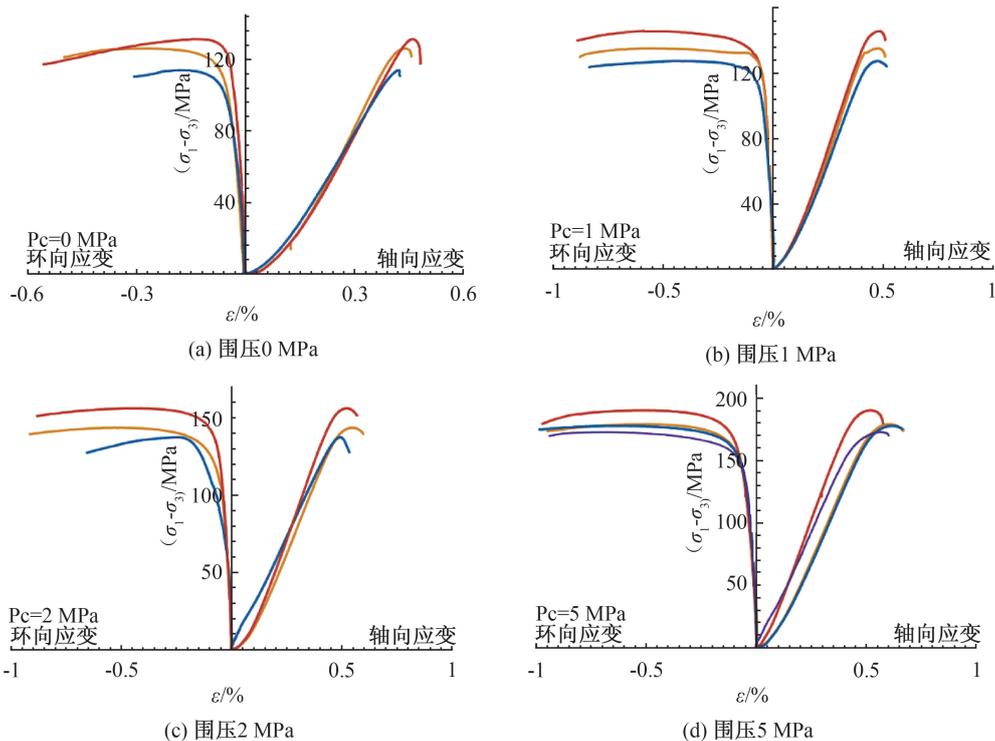
2.1 常规三轴实验

2.1.1 常规三轴实验结果

按照前文的试验方案对北山花岗岩进行常规三轴压缩试验,得到不同围压下的应力应变曲线如图 1 所示,轴压为 σ_1 ,围压为 σ_3 ,轴向应变为 ε_1 ,侧向应变为 ε_3 ,则偏应力为 $\sigma_1 - \sigma_3$,体应变为 $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ 。从偏应力-应变曲线可以看出,花岗岩在加

载过程中经历了压密阶段、线弹性阶段、裂纹扩展阶段、应变软化阶段。根据应力-应变曲线,确定花岗岩试样的弹性模量 E 、泊松比 ν 、峰值强度 σ_c 、峰值轴向应变 ε_c 、峰值侧向应变 ε_d 等力学参数。

从图 1 中可以看出,随着围压的增加,试样的峰值强度逐渐增大,说明北山花岗岩的峰值强度对围压的变化很敏感。随着围压的增加,峰值强度对应的应变也随之增大。需要指出的是,随着围压的增加,北山花岗岩峰前非线性行为增强,并且该趋势随围压的增大而逐渐增强。考虑到压缩应力条件下,花岗岩塑性变形的主要原因是由于微裂纹之间的相互滑移、搓动导致,可认为不可恢复变形是岩石损伤演化的结果,反过来非弹性变形又对损伤的演化趋势产生影响。



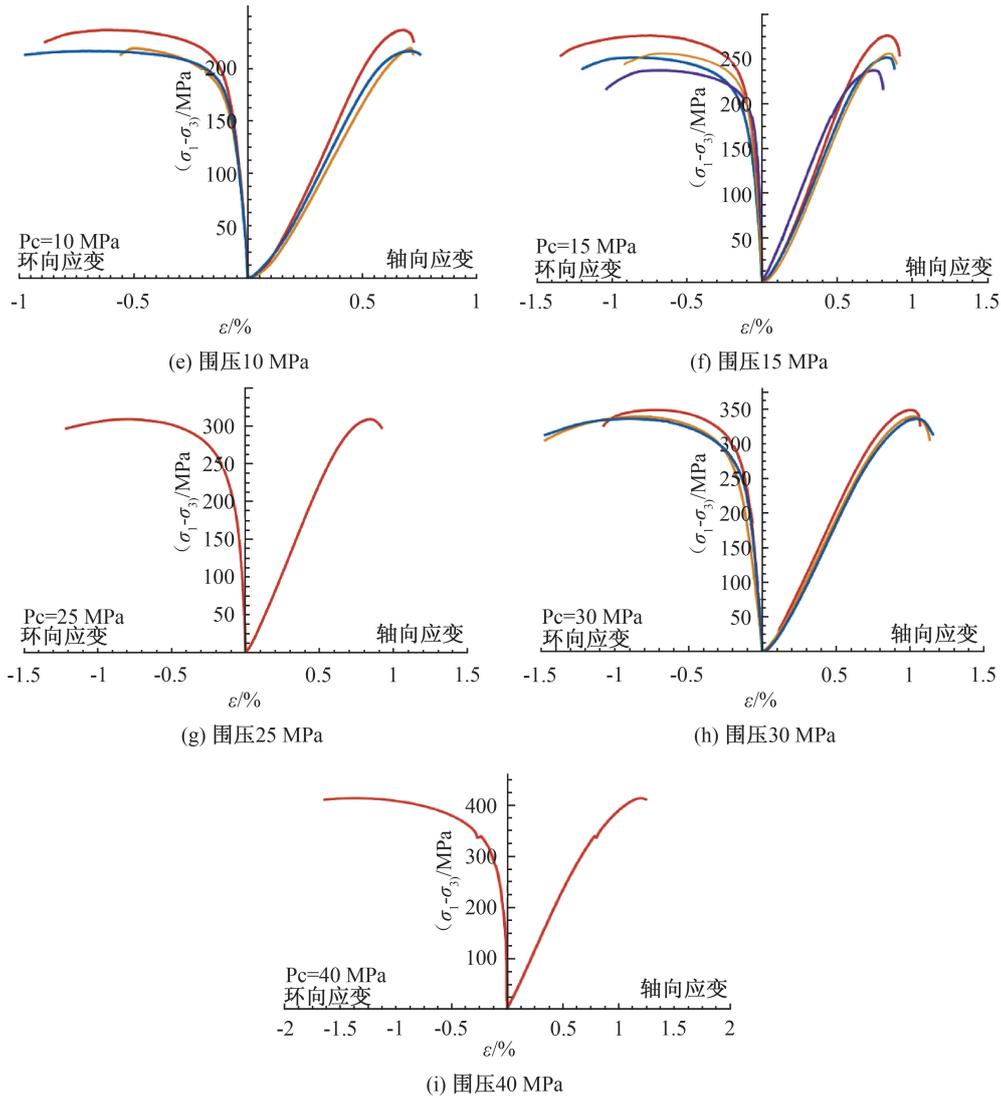


图 1 不同围压下试样的应力应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of samples under different confining pressures

2. 1. 2 常规三轴实验结果分析

从上述试验的偏应力-应变曲线可以看出,所有试样在加载过程中均经历了以下 4 个阶段:压密阶段、线弹性阶段、裂纹扩展阶段、应变软化阶段。

试样的体积应变在试样的加载过程中不断变化,随着偏应力逐渐增大,在压密阶段体积应变不断增大,且增大速率逐渐减小。当试样变形进入线弹性阶段时,体积应变同样线性增大。当试样变形进入裂纹扩展阶段时,体积应变增大速率逐渐变缓,当偏应力达到裂纹损伤应力时,体积应变达到最大值,之后体积应变逐渐减小,试样开始发生扩容,逐渐由压缩变为膨胀,直到试样破坏。

在低围压等级下,北山花岗岩试样表现出明显的脆性,试样破坏主要以劈裂为主;而随着围压的继续增大,试样的脆性特征减弱,延性逐渐增强,在围压等级较高的条件下,试样的破坏形式主

要以剪切破坏为主。

在试样的破坏形式方面,北山花岗岩在低围压下主要以劈裂为主;在围压等级较高的条件下,试样的破坏形式主要以剪切破坏为主。结果表明,北山花岗岩为一种典型的脆性岩石,岩石破坏时的不可恢复变形较小,且随着围压增大没有出现脆-延性转变现象。

2. 2 蠕变试验结果与分析

2. 2. 1 单级蠕变试验结果与分析

图 2 至图 4 为单级蠕变试验的试验曲线,偏应力等级分别为峰值强度的 92%、93% 和 95% (225.7、228 和 232.5 MPa)。试验结果可以明显观察到典型蠕变过程的三个阶段:初始蠕变阶段、稳定蠕变阶段及加速蠕变阶段。初始蠕变阶段从试样的偏应力刚达到预设值开始,该阶段持续时

表3 常规三轴压缩试验力学参数

Tab. 3 Mechanical parameters of conventional triaxial compression tests

序号	σ_3/MPa	σ_1/MPa	σ_c/MPa	$\varepsilon_c/\%$	$\varepsilon_d/\%$	E/GPa	ν
1	0	126.02	126.02	0.438	0.286	40.66	0.130
2	0	133.27	133.27	0.462	0.128	38.80	0.094
3	0	123.89	123.89	0.423	0.178	32.95	0.106
4	1	146.85	145.85	0.480	0.592	39.99	0.103
5	1	136.18	135.18	0.476	0.561	39.55	0.103
6	1	128.46	127.46	0.519	0.455	34.39	0.108
7	2	145.71	143.71	0.545	0.537	35.43	0.108
8	2	139.48	137.48	0.490	0.242	29.77	0.141
9	2	158.18	156.18	0.526	0.482	39.66	0.117
10	5	184.01	179.01	0.600	0.499	40.66	0.090
11	5	195.01	190.01	0.507	0.549	48.57	0.144
12	5	182.55	177.55	0.615	0.679	32.95	0.106
13	5	177.55	172.55	0.572	0.684	38.43	0.097
14	10	246.81	236.81	0.676	0.609	46.12	0.206
15	10	226.80	219.40	0.709	0.490	39.83	0.189
16	10	229.40	216.80	0.710	0.690	42.84	0.202
17	15	291.35	276.35	0.829	0.743	43.95	0.175
18	15	266.65	251.65	0.835	0.829	41.15	0.216
19	15	271.25	256.25	0.843	0.622	40.96	0.170
20	15	252.38	237.38	0.745	0.659	43.94	0.093
21	25	334.16	309.16	0.840	0.810	47.57	0.159
22	30	378.63	348.63	1.013	0.714	44.31	0.168
23	30	369.13	339.13	1.025	0.824	42.10	0.239
24	30	366.10	336.10	1.048	0.907	42.30	0.172
25	40	453.91	413.91	1.202	1.139	49.29	0.182

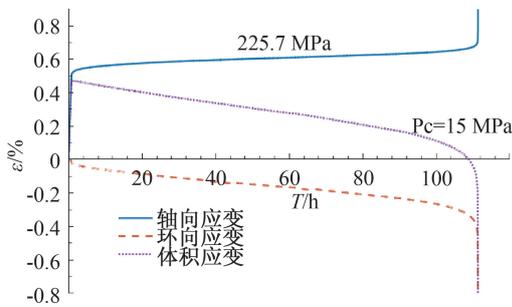


图2 单级加载蠕变试验曲线(225.7 MPa)

Fig. 2 Single stage loading creep test curve (225.7 MPa)

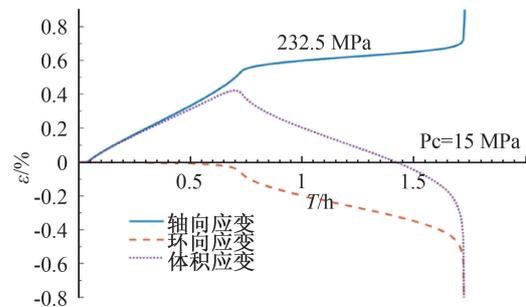


图4 单级加载蠕变试验曲线(232.5 MPa)

Fig. 4 Single stage loading creep test curve (232.5 MPa)

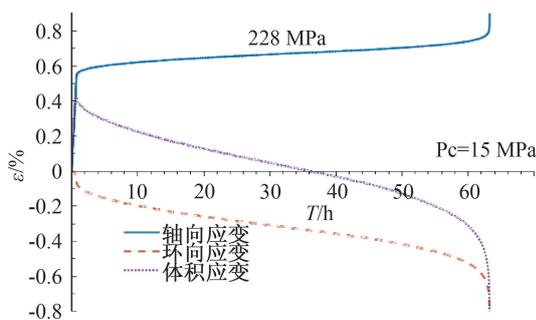


图3 单级加载蠕变试验曲线(228 MPa)

Fig. 3 Single stage loading creep test curve (228 MPa)

间较短,期间试样的蠕变速率会很快降低并逐渐趋近于一个稳定值,在蠕变速率达到稳定值时试样进入稳定蠕变阶段;稳定蠕变阶段持续时间最长,该阶段试样应变持续增长,蠕变速率基本保持不变;试样进入加速蠕变阶段后,试样蠕变速率在较短时间内迅速变大,最终试样破坏。

在蠕变前的瞬时加载过程中,试样的轴向变形要明显大于环向变形,轴向变形大小约为环向的3~4倍。试验的体积应变的变化趋势与轴向应变相同,在加载偏应力达到裂纹损伤应力 σ_{cd} 后,

体积应变开始减小,试样中出现轴向微裂纹,试样开始扩容。

在蠕变过程中,试样的环向应变会先于轴向应变进入初始蠕变阶段,且其应变的改变量会更加明显,这是由于在蠕变过程开始时,试样中产生了许多竖向的细小裂纹,这导致了试样的环向膨胀变形加剧。在流变进入加速蠕变阶段时,试样内部的轴向裂缝已经充分发展,且主破坏面的剪切裂缝已经成型,试样的应变开始加速。试样的环向应变先于轴向应变开始加速,且环向应变的变化趋势明显大于轴向应变,体积应变同样开始加速的时间与环向应变相同,体积应变在蠕变阶段的变化趋势总体与环向应变一致。

2.2.2 多级蠕变试验结果与分析

多级加载蠕变试验过程中,偏应力按照多个不同等级进行加载。围压为 5 MPa 的多级加载蠕变试验,最终实现的偏应力等级为 5 级,分别为 130、140、145、150 和 155 MPa;围压为 15 MPa 的多级加载蠕变试验,最终实现的偏应力等级为 7 级,分别为 180、190、200、210、220、230 和 235 MPa。

图 5 和图 6 分别给出了围压为 5、15 MPa 条件下的蠕变曲线,从中可以看出,北山花岗岩蠕变变形具有明显的三阶段蠕变特征。分析试验曲线,每一级蠕变的加载阶段均导致了一定的瞬时变形,进入初始蠕变阶段,蠕变速率逐渐降低,一段时间后蠕变速率达到了一个稳定值,进入稳定蠕变阶段。在稳定蠕变阶段试样的蠕变速率基本保持不变,在最后一级加载之前,试样均未进入加速蠕变阶段。在最后一级的蠕变过程中,试样在经历初始蠕变阶段及稳定蠕变阶段之后,蠕变速率急剧加速,进入加速蠕变阶段,试样迅速发生破坏。在该蠕变试验中,试样的轴向应变及环向应变有相同的应变规律,但环向应变相较于轴向应变的变化出现的更早,且更为显著,在最后的加速蠕变阶段,环向应变曲线出现了明显的加速现象。

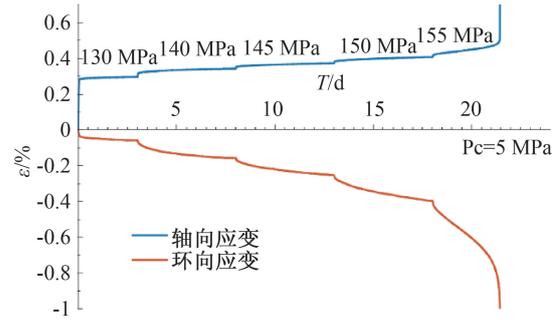


图 5 多级加载蠕变试验曲线图(围压 5 MPa)
Fig. 5 Multistage loading creep test curve under confining pressure of 5 MPa

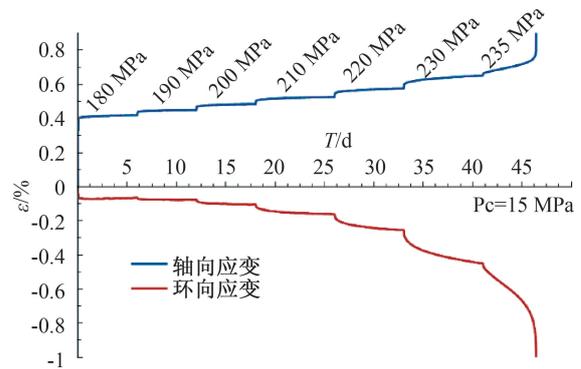


图 6 多级加载蠕变试验曲线图(围压 15 MPa)
Fig. 6 Multistage loading creep test curve under confining pressure of 15 MPa

由图 5 和图 6 可以看出,在未达到发生破坏的偏应力等级时,蠕变量及蠕变速率随偏压的增大有增大的趋势,但变化不显著。当偏应力等级达到了足以发生破坏时,蠕变量及蠕变速率显著增长。表 4 和表 5 为各级蠕变的蠕变量以及稳定蠕变速率的完整数据。

2.3 松弛实验结果与分析

2.3.1 单级应力松弛实验结果与分析

图 7 为单级松弛试验过程中偏应力随时间变化的曲线。从曲线中可以看出,北山花岗岩存在着明显的应力松弛现象,在应力松弛试验进行的前 30 min,岩石试样的偏应力迅速降低,并在 30 min 左右出现拐点,偏应力的降低速度逐渐减

表 4 多级蠕变试验结果(围压 5 MPa)

Tab. 4 Multistage creep test results under confining pressure of 5 MPa

级数	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\text{MPa}$	$\varepsilon_A/\%$	$\varepsilon_L/\%$	$\varepsilon_V/\%$	$\nu_A/(\% \cdot \text{h}^{-1})$	$\nu_L/(\% \cdot \text{h}^{-1})$	$\nu_V/(\% \cdot \text{h}^{-1})$
1	130	0.016	0.026	0.036	0.047	0.091	0.135
2	140	0.027	0.088	0.149	0.058	0.154	0.205
3	145	0.020	0.084	0.148	0.056	0.206	0.356
4	150	0.025	0.127	0.229	0.077	0.393	0.709
5	155	0.087	0.551	1.015	0.377	2.123	3.869

表 5 多级蠕变试验结果(围压 15 MPa)

Tab. 5 Multistage creep test results under confining pressure of 15 MPa

级数	$(\sigma_1 - \sigma_3)/\text{MPa}$	$\varepsilon_A/\%$	$\varepsilon_L/\%$	$\varepsilon_V/\%$	$\nu_A/(\% \cdot \text{h}^{-1})$	$\nu_L/(\% \cdot \text{h}^{-1})$	$\nu_V/(\% \cdot \text{h}^{-1})$
1	180	0.018	-0.003	-0.024	0.023	0.001	-0.021
2	190	0.012	0.008	0.004	0.008	0.001	-0.006
3	200	0.016	0.021	0.026	0.032	0.030	0.028
4	210	0.023	0.048	0.073	0.030	0.042	0.054
5	220	0.030	0.075	0.120	0.046	0.107	0.168
6	230	0.053	0.161	0.269	0.082	0.252	0.422
7	235	0.137	0.493	0.849	0.310	1.162	2.014

缓。在 12 h 偏应力逐渐趋于平稳进入稳定阶段,但曲线出现波动,分析原因是仪器伺服过程中产生的误差。图中虚线为试验数据校正值。

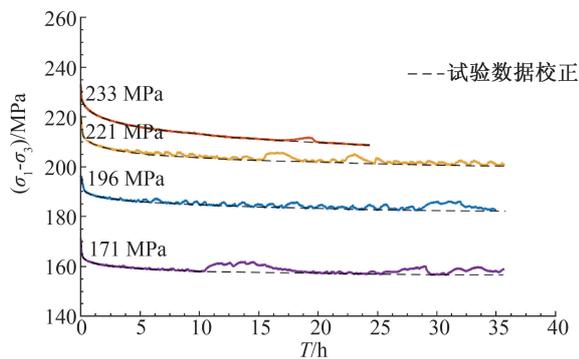


图 7 单级松弛试验曲线

Fig. 7 Single stage relaxation test curve

引入应力松弛量、应力松弛度对试验结果进行分析,描述试样的偏应力衰减程度,定义应力松弛度 λ 为

$$\lambda = \frac{\sigma'}{\sigma_0} = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中, σ_0 为初始偏应力, σ_t 为剩余偏应力, σ' 为应力松弛量。

通过分析曲线得到松弛试验进行 12 h 时的应力松弛度 λ_{12h} , 对比最终应力松弛度 λ , 在 $\sigma < \sigma_s$ 的条件下, λ_{12h}/λ 随着初始偏应力的增大而表现出增大的趋势, 表明初始偏应力越大, 应力松弛过程发展的越快。单级松弛试验的部分结果见表 6。

在应力松弛试验中, 应力松弛过程的影响因

表 6 单级松弛试验结果

Tab. 6 Single stage relaxation test results

序号	σ_0 /MPa	$\varepsilon_0/$ $\times 10^{-3}$	σ_t /MPa	λ	λ_{12h}	λ_{12h}/λ	ν_A /(MPa · h ⁻¹)	ν_{A12h} /(MPa · h ⁻¹)
1	171	3.984	158.1	0.075	0.061	80.4	0.013	0.091
2	196	4.584	180	0.076	0.067	88.4	0.053	0.192
3	221	5.381	202.6	0.083	0.079	94.6	0.051	0.301
4	233	7.232	208.8	0.104	0.089	85.92	0.217	0.421

素主要有初始偏应力以及加载速率。本文松弛试验的轴向预应变加载速率均为 0.03 mm/min。从表 6 中可以得出, 剩余偏应力 σ_t 随着初始偏应力 σ_0 的增大而增大。

2.3.2 循环松弛试验结果分析

循环加卸载试验的试验结果如图 8 所示, 图中黑色虚线为松弛试验曲线的修正曲线, 循环松弛试验每次循环的初始偏应力均为 200 MPa, 每次循环松弛过程时间为 12 h, 共进行 6 次循环。分析曲线可以得出, 6 次松弛过程中偏应力在一段时间后均未持续降低且逐渐趋于定值, 属于衰减松弛过程。表 7 为循环松弛试验的部分试验结果, 6 次松弛的轴向应变 ε_0 分别为 4.893×10^{-3} 、 5.112×10^{-3} 、 5.207×10^{-3} 、 5.265×10^{-3} 、 5.302×10^{-3} 、 5.324×10^{-3} , ε_0 随着循环次数的增加不断增加。12 h 偏应力 σ_{12h} 分别为 158.1、189.7、191.9、193.3、194.2、194.6 MPa, σ_{12h} 随着次数的增加不断增加。

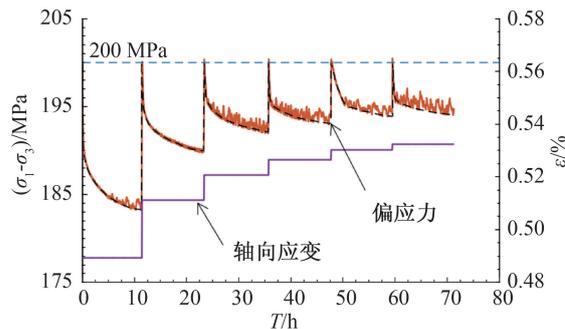


图 8 循环松弛试验曲线

Fig. 8 Cyclic relaxation test curve

表7 循环松弛试验结果

Tab.7 Cyclic relaxation test results

序号	σ_0/MPa	$\varepsilon_0/\times 10^{-3}$	σ_{12h}/MPa	λ_{12h}	$v_A/(\text{MPa} \cdot \text{h}^{-1})$
1	199.8	4.89	183.1	0.083 6	0.506
2	200.1	5.11	189.7	0.052 0	0.501
3	200.3	5.21	191.9	0.041 9	0.485
4	200.4	5.27	193.3	0.035 4	0.476
5	200.1	5.30	194.2	0.029 5	0.471
6	200.4	5.32	194.6	0.028 9	0.469

可以看出, σ_{12h} 随循环松弛试验的进行会逐渐趋于一个稳定值。随着循环次数的增大, 最终轴向应变的走向将会与蠕变试验相似, 这是因为从循环松弛试验的整个过程看, 其类似于进行了一次偏应力为 200 MPa 的蠕变试验, 而本次循环松弛试验结束时进行到对应蠕变试验的稳定蠕变阶段。可以推测, 如果循环松弛试验的循环次数足够多, 轴向应变会表现出与蠕变试验相对应的三阶段变化, 即在初始蠕变阶段, 轴向应变随循环次数的增加而逐渐增大, 且其增大的速率会逐渐减小并趋近于定值; 进入稳定蠕变阶段, 轴向应变会稳定增大, 应变随循环次数增大的速率为一稳定值; 最后进入加速蠕变阶段, 轴向应变会迅速增大, 且应变速率也随之不断增大, 最终试样破坏。

3 结论

1) 北山花岗岩三轴压缩过程中经历了压密阶段、线弹性阶段、裂纹扩展阶段、应变软化阶段。在试样的破坏形式方面, 北山花岗岩在低围压下主要以劈裂为主; 在围压等级较高的条件下, 试样的破坏形式主要以剪切破坏为主。北山花岗岩为一种典型的脆性岩石, 岩石破坏时的不可恢复变形较小, 且随着围压增大没有出现脆-延性转变现象。

2) 北山花岗岩主要经历了三个典型蠕变阶段: 初始蠕变阶段、稳定蠕变阶段及加速蠕变阶段, 随着试验偏应力的增大, 蠕变各阶段的蠕变速率均会增大, 且蠕变各阶段的持续时间会逐渐减小。北山花岗岩的蠕变形式为非稳定蠕变, 其应变曲线出现了典型的蠕变三阶段特征。

3) 北山花岗岩在应力松弛试验中, 试样主要经历了两个阶段, 即衰减松弛阶段和稳定松弛阶段, 随着松弛应力随着初始偏应力的增大而逐渐增大, 且随着初始偏应力继续增大, 其增大的速度也会增大。北山花岗岩在应力松弛过程的初始松弛阶段, 其偏应力下降速度很快, 在较短时间内即能够达到稳定状态。

参考文献:

- [1] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 026(006): 1081-1106.
- [2] 陈亮, 刘建锋, 王春萍, 等. 北山深部花岗岩弹塑性损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 10.
- [3] 万玲, 彭向和, 杨春和, 等. 泥岩蠕变行为的实验研究及其描述[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 5.
- [4] 田洪铭, 陈卫忠, 田田, 等. 软岩蠕变损伤特性的试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(003): 610-617.
- [5] 田洪铭, 陈卫忠, 肖正龙, 等. 泥质粉砂岩高围压三轴压缩松弛试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1433-1439.
- [6] 郭永海, 王驹. 高放废物地质处置中的地质、水文地质、地球化学关键科学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S2): 6. DOI: CNKI: SUN: YSLX. 0. 2007-S2-048.
- [7] 陈亮, 刘建锋, 王春萍, 等. 北山深部花岗岩不同应力状态下声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3618-3624.
- [8] 赵星光, 马利科, 苏锐, 等. 北山深部花岗岩在压缩条件下的破裂演化与强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(A02): 11.
- [9] 赵星光, 李鹏飞, 马利科, 等. 循环加、卸载条件下北山深部花岗岩损伤与扩容特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(009): 1740-1748.
- [10] 李鹏飞, 赵星光, 郭政, 等. 北山花岗岩在三轴压缩条件下的强度参数演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 12.
- [11] 李化敏, 李振华, 苏承东. 大理岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(22): 3745-3749.
- [12] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(01): 132-140.
- [13] 徐平, 杨挺青. 岩石流变试验与本构模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2001(S1): 1739-1744.
- [14] WANG J, CHEN L, SU R, et al. The Beishan Underground Research Laboratory for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste in China: Planning, Site Selection, Site Characterization and in Situ Tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411-435.
- [15] YANG S, ZHENG Y, DUAN Y, et al. Creep Characteristics and Deformation Analysis of Service-exposed Material Using Small Punch Creep Test[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 195: 242-252.
- [16] CANO J A, STEWART C M. Accelerated Creep Test Qualification of Creep-Resistance Using the Wilshire-Cano-Stewart Constitutive Model and Stepped Isostress Method[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2022, 144(1): 011016.

(责任编辑 周雪梅)