

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.11.018

分级循环加卸载作用下花岗岩变形破坏研究

包松¹, 郭连军², 王小孩³, 莫宏毅¹, 徐振洋¹

(1. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870;

3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:以地下深部花岗岩为试验材料,利用 GAW-2000 微机控制电液伺服岩石单轴试验机进行分级循环加卸载试验,研究在同一递增荷载幅度条件下,试件的抗压强度、变形、破坏特征、残余应变以及弹性模量的变化趋势。结果表明:在单轴分级循环加卸载试验作用下,岩样的峰值强度随着每级循环次数的增加呈现递减趋势,且单调荷载应力-应变曲线包络住循环荷载应力-应变曲线;岩样破坏特征主要以剪切破坏为主,随着循环次数增加,破坏裂纹更加分散;岩样在加载过程中,岩体内部的结构在不断地调整,导致结构面变得密集与裂隙间更加闭合,卸载时回弹变形存在滞后现象,加载起点与卸载终点不重合;轴向与环向的弹性、残余应变随循环次数变化的特征具有相似性,岩样弹性模量曲线呈“波浪形”的特征交替变化。研究成果可为地下工程在循环荷载作用下的岩石渐进破坏过程提供理论依据。

关键词:花岗岩;循环加卸载;残余应变;弹性模量;剪切破坏

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2022)11-0136-10

Research on Deformation and Failure of Granite under Staged Uniaxial Cyclic Loading and Unloading

BAO Song¹, GUO Lianjun², WANG Xiaohai³, MO Hongyi¹, XU Zhenyang¹

(1. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

3. School of Civil and Resource Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: The GAW-2000 microcomputer-controlled electro-hydraulic servo rock single-axis testing machine was used to carry out the classification cyclic loading and unloading test based on the underground deep granite as the test material. The changed of compressive strength, deformation, failure characteristics, residual strain and elastic modulus trend of the specimens were studied under the same increasing load amplitude. The results shown that the peak strength of the rock sample shown a decreasing trend with the increase of the number of cycles per stage under the action of the uniaxial hierarchical cycle plus unloading test, and the cyclic load stress-strain curve was enveloped by a monotonic load stress-strain curve. Rock sample failure characteristics were mainly shear failure, and the failure cracks were more dispersed with the number of cycles increases. During the loading process of the rock sample, the structure inside the rock mass was continuously adjusted so that the structural surface becomes dense and the fissure

收稿日期: 2022-3-01

基金项目: 辽宁省教育厅重点项目(LJKZ0282)

Fund: Supported by the Foundation of Liaoning Educational Committee(LJKZ0282)

作者简介: 包松(1997—),男,硕士研究生,主要从事岩石力学试验及工程爆破的研究工作。

通信作者: 徐振洋(1982—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事冲击动力学试验与爆破技术的研究工作。

引用格式: 包松,郭连军,王小孩,等. 分级循环加卸载作用下花岗岩变形破坏研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(11): 136-145.

BAO Song, GUO Lianjun, WANG Xiaohai, et al. Research on Deformation and Failure of Granite under Staged Uniaxial Cyclic Loading and Unloading[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11): 136-145.

is more closed. There was a lag phenomenon in the rebound deformation during unloading, and the load start point does not coincide with the unload end point. There were similar features of elastic strain and residual strain on axial and circumferential with the number of cycles changed. Elastic modulus curve of the rock sample changes alternately in a “wavy” pattern. The research results can provide theoretical basis for the gradual rock failure process of underground engineering under action of circulating loads.

Key words: granite; cyclic loading and unloading; residual strain; elastic modulus; shear damage

矿山开采、隧道开挖等工程中,岩体会受到钻进、爆破等扰动行为,由于采掘工程的长时间持续运作,工程岩体受到反复加载与卸载,导致岩体力学性质的变化,随着时间的积累由局部微观破裂至部分破坏,最终整体灾变失稳渐进演化,对矿山生产和安全施工带来很大隐患,所以开展花岗岩分级循环荷载试验研究对地下工程施工和运营具有重要意义^[1-3]。

在以往对岩石材料研究中,不同领域学者以循环加卸载试验方案对岩样的力学响应规律开展了相应的研究工作。肖福坤等^[4]研究了煤样在单轴循环加卸载作用下的循环次数和弹性应变能同滞回环面积的关系。付斌等^[5,6]研究了不同应力条件下单轴循环加卸载大理岩的损伤破坏特征及声发射演化规律。李西蒙等^[7,8]通过分级循环加卸载试验构建了轴向应变与循环数目的理论模型,并揭示了分级循环上限应力值的增加导致滞回环曲线面积增大和耗散能逐渐累积。缺陷结构的岩石单轴压缩^[9]和加卸载试验研究亦存在许多成果^[10,11],刘建锋等^[12-14]基于压缩试验研究了砂岩的动弹性模量、应力-应变滞回曲线、强度等特征。MENG 等^[15]研究了周期性荷载作用下岩石材料在变形和破坏过程中的声发射特性,得到加载和卸载阶段岩石应力-应变变化的循环 AE 演化规律。此外,张志镇等^[16,17]对岩石破坏过程中的能量演化及耗散进行研究,得出能量变化阶段及损伤能量释放率变化规律。辛亚军等^[18]通过单轴分级加载蠕变试验,揭示了加载水平(或循环次数)导致的岩石变形机制。综上可知分级循环加卸载作用下岩石变形、疲劳特性、声发射规律及能量演化的研究仍然是热点内容,分级不同循环加卸载次数对岩石变形破坏特征的影响有待深入剖析^[19-21]。

采掘活动中,爆破时炸药量会影响爆破次数,考虑减少对重要岩体部分的扰动,参考分级循环荷载的岩石变形破坏特征,可设计实际工程中的爆破作业。本研究通过地下深部花岗岩试样分级循环加卸载试验,分析了应力-应变曲线、峰值强度、弹性应变、残余应变与循环加卸载次数的关系,探索了分级

循环加卸载作用下岩样的变形破坏模式与试验全过程中弹性模量的变化趋势。

1 试验概况

1.1 试验样品

根据国际岩石力学学会的试验方法,原岩取自山东省莱州市三山岛金矿,在深部-915 m 处地应力钻孔,采用 JKS300 地勘钻机在确定好的位置用直径 130 mm 的钻头打孔钻进,截取完整度较好的岩芯,再加工成尺寸为 $\Phi 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 标准试件,试件的直径、高度误差满足精度要求,上下端面平行度和不垂直度均小于 0.02 mm,所得试件如图 1 所示。测得岩样 65~89 MPa 的单轴抗压强度,37.5~47.0 GPa 的弹性模量,0.20~0.26 的泊松比,试样中 XRF 测试各成分含量如图 2 所示。

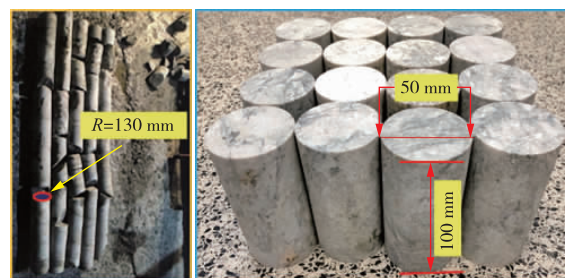


图 1 花岗岩标准试样

Fig. 1 Standard sample of granite

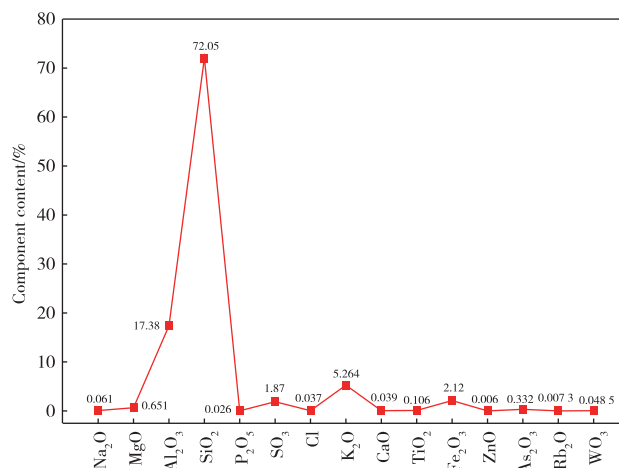


图 2 花岗岩 XRF 检测结果

Fig. 2 XRF test result of granite

1.2 试验设备与方案

采用电液伺服单轴刚性试验机 GAW-2000 对岩样进行单轴压缩试验,传感器采用马克罗推出的 CD375-100(直径 9.5 mm、交流供电)小型非接触式线性位移传感器。试验机及试件安装如图 3 所示。

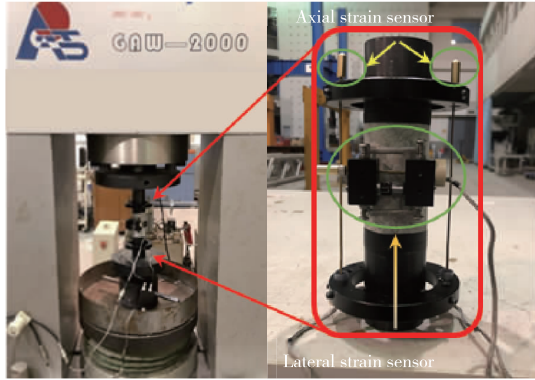


图 3 GAW-2000 型岩石单轴试验机

Fig. 3 GAW-2000 rock uniaxial testing machine

岩体在非扰动的静态时,虽然受到上覆岩层的力作用,但与受到爆破扰动时增加的应力相比,可等效视为此时扰动力为零。随着深度增加,且每次爆破量可能不同,因此受力大小不同,也即等效为分级荷载。

试验分两部分展开:1)对随机三个岩样进行单调加载试验,确定岩样峰值强度、弹性模量等物理力学参数;2)单个试样,循环荷载下限值为恒定 0 kN,每级荷载以 30 kN 的增幅逐级递增,循环加载、卸载速率设置为 1.5 kN/s,试验完成一级设计的循环次数前输入下一级预设荷载,受力路径区间分布为 0 → 30 kN → 0 → 60 kN → 0 → 90 kN → …… 试样破坏。进行同级不同循环次数(1、3、5、7 和 9 次)的加卸载试验,反复试验直至岩样破坏。试件单级循环加卸载次数为五次的荷载与时间关系如图 4 所示。

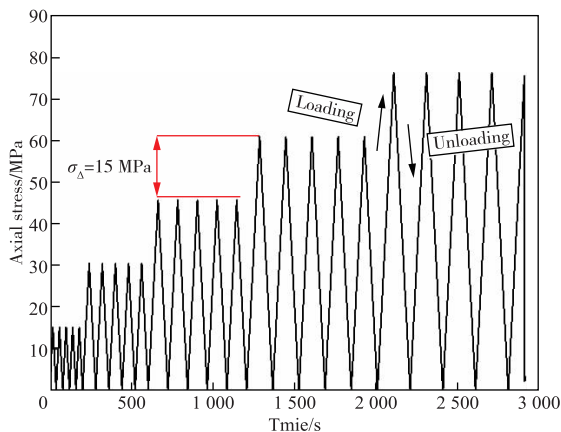


图 4 循环加卸载应力路径

Fig. 4 Stress path of cyclic loading

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线分析

单调加载与循环加卸载全过程的应力-应变曲线如图 5 所示。由图 5 可知,单调荷载下应力-应变曲线基本囊括了循环荷载下的应力-应变曲线,即岩样的单调荷载峰值强度大于循环加卸载,循环次数的增加导致岩样峰值强度呈减小趋势。导致该现象的原因是岩石内部结构的变化所致,每一级的循环荷载都会对岩样内部裂隙进一步压密损伤,不同循环级之间过渡时岩石受损影响加大,此阶段岩样内部会有新的裂隙产生,不同裂隙间发育贯通,经过多次循环后,岩样的整体强度被削弱。对于单个岩样的应力-应变曲线变化,其走势随着循环级数向应变增大的方向推进,虽同一级内单个循环加卸载曲线偏移量较小,但每次循环累积量导致单个循环级的不可逆变形增量比较明显,各级不可逆变形的叠加导致岩样的应变变化量加大,即累积损伤最终降低岩石强度。

岩样破坏形式为剪切破坏是试验后岩石的真实破坏形态,也与加载条件有一定的相关性。分级循环加卸载破坏特征如图 5 所示,单调加载与循环加卸载条件下的岩样破坏形式主要为剪切破坏,一条贯穿斜剪切破裂面由岩样上下面对角连通,上端面外围有少部分岩块弹射出去,为劈裂弹射破坏,破坏过程中能听到岩样明显的爆裂声,前期无肉眼可见的明显裂纹出现。循环荷载作用下,应力改变导致岩样微裂隙相互作用并扩展、贯通、形成破裂面,其形态通常表现为一条倾斜宏观贯通性较光滑的破裂面。

不同循环次数的实验参数如表 1 所示,表 1 中 ϵ^1 表示轴向峰值应变, ϵ^2 表示环向峰值应变。同一增幅下不同循环次数的应力-应变曲线对比,循环加卸载峰值强度稳定在第五级循环以内。脆性岩石在压缩过程中,在除去离散型的情况下,若样本数量足够大,轴向的变形量大致会落到一个稳定区间,即此时的应变相对集中,从试验数据处理后的图 5 中可发现其规律性,因此单调荷载和循环加卸载破坏时的轴向应变都集中在 0.25% 数值邻近领域。许多学者研究岩石力学特征发现,脆性岩石在测试其强度时会出现离散性,其主要原因是岩石的组成成分、加载方式所导致^[7]。整体对比,试样 D3 的峰值应变、峰值应力与其他试样差异较大,体现出对岩石试验结果的离散型。

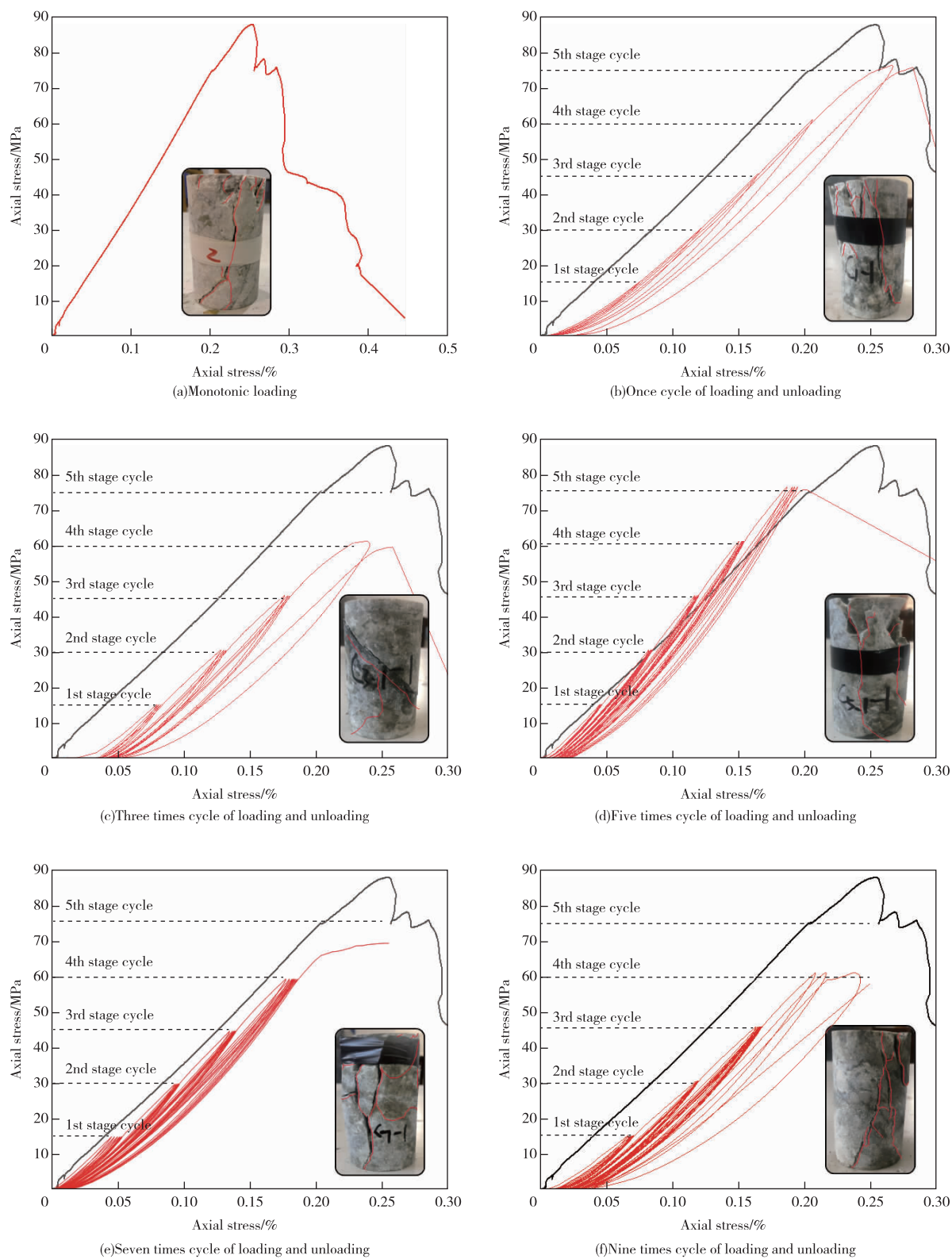


图 5 不同加卸载循环次数的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves for different number of loading and unloading cycles

表 1 岩样的单轴循环加卸载试验数据

Table 1 Uniaxial cyclic loading and unloading test data of specimens

Number	Loading rate/ ($\text{N} \cdot \text{s}^{-1}$)	Compressional wave velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Cycle index/times	Peak strain $\epsilon^1/\%$, $\epsilon^2/\%$	Compression strength/MPa
D1	1 500	4 610	6	0.282, 0.377	76
D2	1 500	4 590	10	0.258, 0.350	60
D3	1 500	4 620	24	0.201, 0.491	75
D4	1 500	4 740	28	0.251, 0.313	64
D5	1 500	4 640	30	0.250, 0.364	60

2.2 弹性应变与残余应变分析

由弹性后效伴生的弹性滞回环共同形成了岩石的滞后变形特性^[22]。弹性应变是指在加载阶段产生并在卸载阶段恢复的应变,而残余应变(塑性应变)是指在加载阶段由于裂纹和孔洞的压紧在卸载阶段而产生且无法恢复的应变。为分析岩样循环加卸载作用下弹性应变和残余应变演化规律,计算每一个岩样不同循环次数下的应变关系,计算方法如图 6 所示, ϵ^r 定义为残余应变, ϵ^e 定义为弹性应变。

为直观呈现岩样的弹性应变变化趋势,对弹性应变和残余应变归一化处理,即弹性应变、残余应变与总应变的比值^[23]。由于多个试样分级循环数据量极大,不同循环次数的应变归一化后走势差异波动较小,故选取循环 5 次的结果作为参考,计算结果见表 2。

图 7 是归一化处理不同循环次数的轴向弹性应变与环向弹性应变,通过观察曲线走势,轴向、环向弹性应变与总应变的比值总体上随循环次数增加逐渐增大,并且最终稳定趋近于比值 1。加卸载过程初期,轴向、环向弹性应变与总应变之比均表现为先增大现象,表明荷载作用下岩样内部孔隙被逐渐

压密,导致轴向、环向弹性应变占比增大。对于单个试样,不同循环级数在整个试验阶段表现出相似的规律,岩样每经过一级循环后向下一级循环进行时,轴向、环向弹性应变与总应变的比值降低,但在此一级循环中又会继续增大。主要原因是施加更高一级的荷载时,岩样内部会出现新的损伤,基于能量角度分析此处变化是能量的消耗作用效果,而在此一级循环中比重继续增加,与前期比重上升同样说明岩样中的原生裂纹及裂隙间界面受荷载作用被持续压密所致。

图 8 是归一化处理不同循环次数的轴向残余应变与环向残余应变。由图 8 可知,不同循环次数下岩样轴向、环向残余应变同弹性应变的变化趋势相似,即循环次数逐渐增加,占比比重表现为下降趋势,且总体走势亦不断降低,但不同级的变化呈现为波浪形,试样初期呈现比重陡降现象,主要为岩样内部裂纹闭合导致。

通过图 7 与图 8 对比分析发现,轴向弹性、残余应变与环向弹性、残余应变随循环次数的变化规律具有一致性,上下波动范围存在差异,但走势基本一致,轴向波动的范围幅度较环向波动略小,更加体现了岩体压密后轴向萎缩、径向扩张的规律。

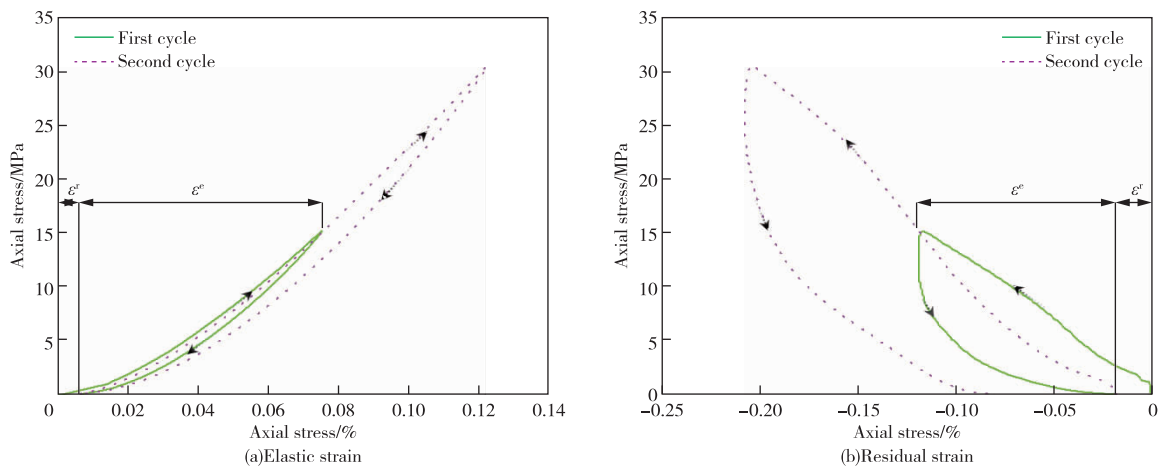


图 6 弹性应变与残余应变计算示意图

Fig. 6 Sketch diagram of the calculation of elastic strain and residual strain

表 2 弹性应变和残余应变的处理结果(以循环 5 次为例)

Table 2 Results of elastic strain and residual strain(taking 5 cycles as an example)

Cycle index	Axial strain/%			Lateral strain/%		
	Total strain	Residual strain	Elastic strain	Total strain	Residual strain	Elastic strain
1	4.56	0.50	4.06	-25.81	-13.99	-11.82
2	4.14	0.00	4.14	-12.56	-1.23	-11.33
3	4.18	0.00	4.17	-11.89	-1.13	-10.76
4	4.21	0.02	4.18	-11.09	-0.82	-10.27
5	4.20	0.00	4.20	-10.51	-0.65	-9.86
6	7.73	0.32	7.41	-18.09	-4.90	-13.20
7	7.52	0.03	7.49	-14.81	-0.25	-14.56
8	7.53	0.05	7.48	-14.90	-0.57	-14.33
9	7.54	0.04	7.50	-14.41	-0.08	-14.33
10	7.56	0.02	7.54	-14.33	-0.25	-14.08
11	7.73	0.32	7.41	-18.09	-4.90	-13.20
12	7.52	0.03	7.49	-14.81	-0.25	-14.56
13	7.53	0.05	7.48	-14.90	-0.57	-14.33
14	7.54	0.04	7.50	-14.41	-0.08	-14.33
15	7.56	0.02	7.54	-14.33	-0.25	-14.08
16	10.73	0.25	10.48	-15.79	-0.47	-15.32
17	10.60	0.05	10.55	-15.97	-0.25	-15.72
18	10.64	0.04	10.60	-15.89	-0.42	-15.47
19	10.65	0.03	10.62	-15.71	-0.24	-15.47
20	10.65	0.02	10.63	-15.56	-0.33	-15.23
21	10.73	0.25	10.48	-15.79	-0.47	-15.32
22	10.60	0.05	10.55	-15.97	-0.25	-15.72
23	10.64	0.04	10.60	-15.89	-0.42	-15.47

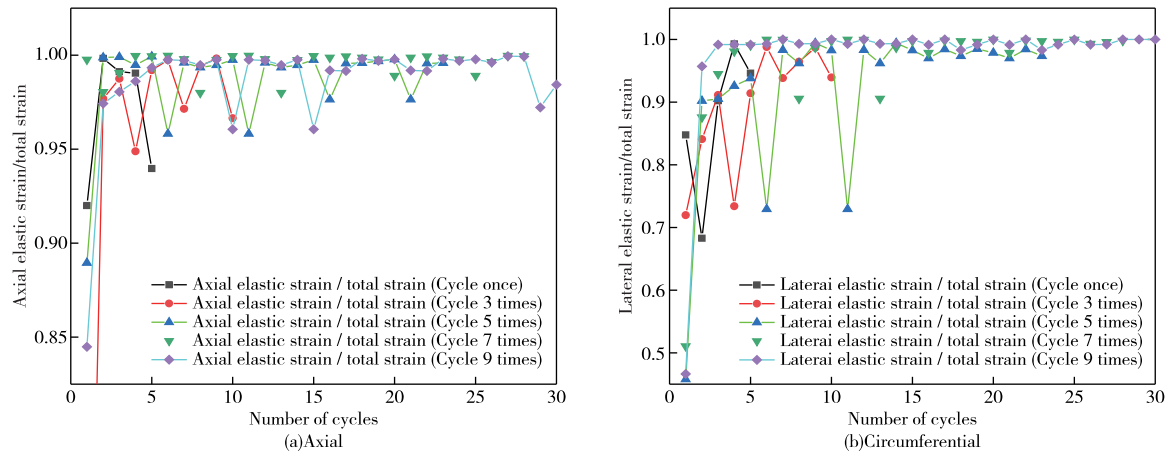


图 7 归一化后岩样轴向与环向弹性应变

Fig. 7 Axial and circumferential elastic strain of normalized rock sample

2.3 弹性模量演化规律

通过试验数据处理后的应力-应变曲线可以确定不同阶段滞回环的弹性模量,在分析不同循环次数岩样单个滞回环内弹性模量的变化规律时,通过

三次多项式拟合法^[24]拟合应力-应变曲线,确定各个循环阶段不同应力所对应的弹性模量。以每级循环为 5 次试样的第 12 次循环加卸载曲线为例,将其单独从应力-应变曲线中分离出来,如图 9(a)所示。

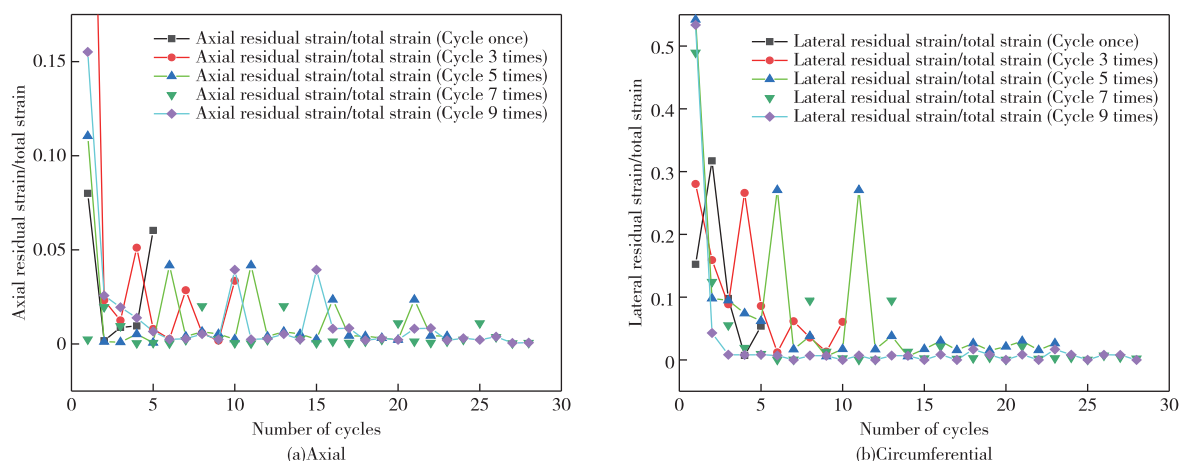


图8 归一化后岩样轴向与环向残余应变

Fig. 8 Axial and circumferential residual strain of normalized rock sample

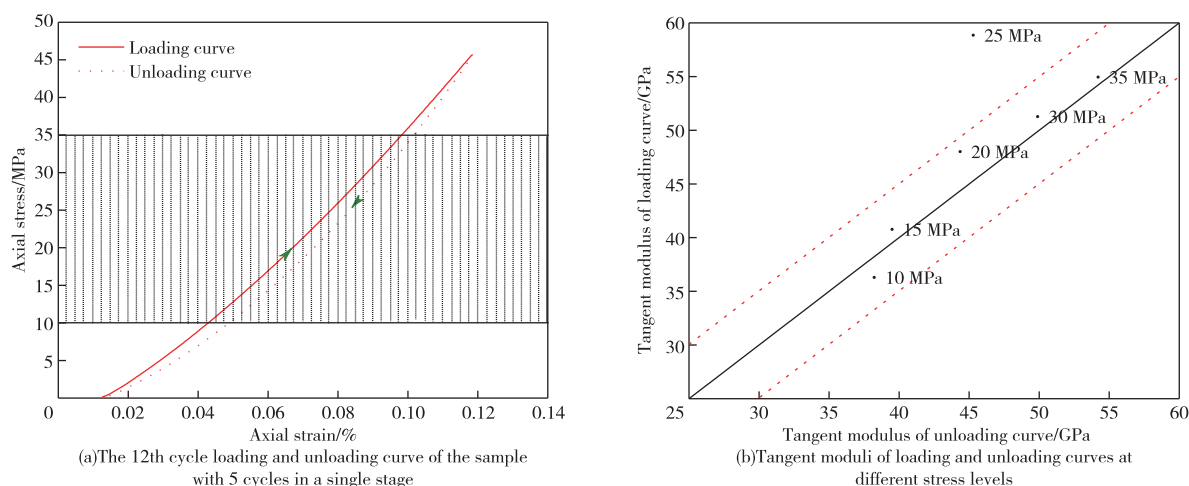


图9 弹性模量的计算方法

Fig. 9 Calculation method of elastic modulus

根据试验应力-应变曲线选择结果,以轴向应力 10 MPa 时加、卸载曲线的斜率为首次切线模量,计算后两个同应力大小应力点的切线模量相差小于 5 GPa 时,如图 9(b)中红色虚线之间的数据点,可以认定此点处左右领域内的应力-应变曲线属于弹性范围阶段,在一个完整滞回环中,取加载阶段某点处的切线,该切线模量定义为此应力所对应的弹性模量。然后,对应当前试验应力应变曲线,取 10~35 MPa 的应力区间,分别以 5 MPa 的递增梯度进行模量计算。其余各个循环弹性模量同上述方法计算。

计算每个岩样加载及卸载曲线直线部分的平均弹性模量。岩样在不同循环次数下的弹性模量变化曲线如图 10 所示。从图 10 的弹性模量变化趋势可

以看出:每级不同循环次数的岩样试验结果有着相似的一致性,在首次循环荷载下,不同岩样的弹性模量出现大幅度的上升,体现出应力对岩样有强化效果,主要原因为岩样内部存在的原生裂隙被首次压密。

纵向对比各条曲线发现,每级循环次数不同的岩样初始弹性模量数值上不同,但是除去每级循环一次的岩样外,其他岩样在每级循环次数递增的前提下,弹性模量也有分级递增现象,通过试验流程和数据选取过程判断,造成这种现象的原因有两种:一是每个滞回环选取数据离散性大,使得计算弹性模量结果大小有波动;二是由于每级循环次数不同,对岩样的连续压密程度呈现连续增加的态势,使得岩样原生裂隙面更加致密,导致弹性模量会有层次上的大小差异。

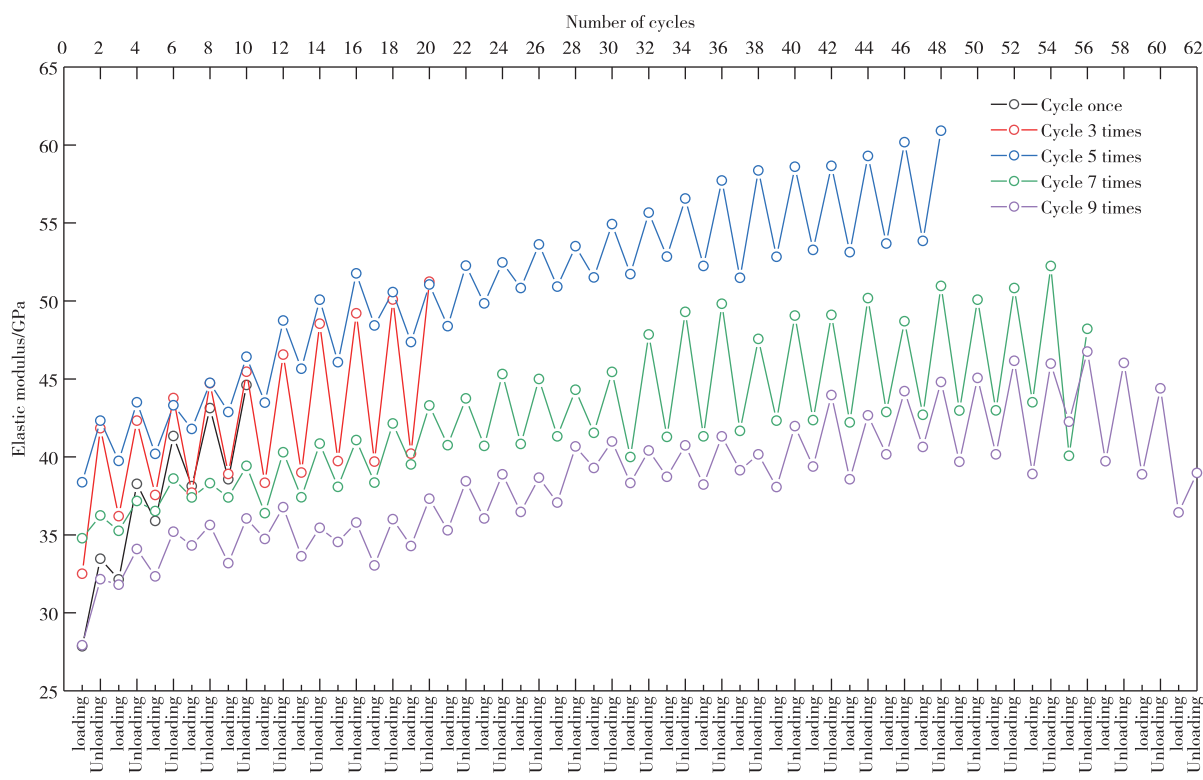


图 10 循环加卸载全过程弹性模量变化曲线

Fig. 10 Change curve of elastic modulus in the whole process of cyclic loading and unloading

循环加卸载前中后不同时期,每个岩样的弹性模量出现类似的规律,即前期加载与卸载的弹性模量差值比较小,弹性模量曲线离散,且数值上增加不大,中期加载与卸载存在稳定期,曲线基本上保持水平,差值上变化更小,在后期,加载与卸载的弹性模量数值上会继续增加,增大的趋势越来越显著,且加载与卸载上下的差值增大。

观察分析岩样加卸载曲线走势,滞回环不同时期分布总体趋势为“宽-窄-宽”:前期,滞回环的形态为中部宽大,两头细小,单次循环变形较大;中期,滞回环的形态呈“细叶”状,为上下两头尖锐完整的滞回环,加载与卸载曲线紧挨且路径几乎重合;后期,滞回环的形态变得“丰厚”,上部出现了明显的弧度,单次滞回环轴向明显增大,下部也有所变大,但较上部略小。

横向上对单个岩样的弹性模量进行比较,循环级数不同的岩样弹性模量分布不同,体现样品的离散性。每个岩样弹性模量曲线的趋势呈“波浪形”交替变化,并以上升的态势逐渐增加,后期也出现持平和回落的现象。其主要原因和岩样中的裂隙变化有关,前期同样在受力作用下压密,使得弹性模量增大,随着荷载增大,岩样中新裂隙产生,导致后期破

裂前有更多新裂纹扩展,循环加卸载累积的损伤致使弹性模量最终降低,基于破坏角度分析此为岩样发生最终破坏的前兆。

3 结论

以三山岛金矿深部地应力钻孔岩芯为工程背景,采用花岗岩岩样进行单轴分级循环加卸载的试验研究,获取结论如下:

1)单调加载下的应力-应变曲线基本包络住不同次数循环荷载下的应力-应变曲线,同一试样单调荷载和循环荷载的峰值强度对应的应变相似。

2)归一化后,岩样不同循环次数下轴向与环向的弹性应变、残余应变互相对应,且随循环次数变化的趋势表现一致,轴向波动的范围幅度较环向波动小,体现了岩体压密后轴向萎缩、径向扩张的现实规律。

3)不同循环次数岩样的弹性模量曲线以“波浪形”特征交替变化,初期上升态势逐渐增加,后期出现持平和回落的现象。循环加卸载累积的损伤导致岩石弹性模量逐渐降低,最终致使岩样破坏。

参考文献:

[1] 吴再海,宋朝阳,谭杰,等.不同分级循环加卸载模式下

- 岩石能量演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 836-844, 851.
- WU Zaihai, SONG Zhaoyang, TAN Jie, et al. The evolution law of rock energy under different graded cyclic loading and unloading modes [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 836-844, 851.
- [2] WANG Y, LIU D Q, HAN J Q, et al. Effect of fatigue loading-confining stress unloading rate on marble mechanical behaviors; an insight into fracture evolution analyses [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(6): 1249-1262.
- [3] 冯萧, 曹世荣, 卓毓龙, 等. 块石胶结充填体循环加卸载损伤特性研究[J]. 有色金属工程, 2016, 6(6): 82-86, 95.
- FENG Xiao, CAO Shirong, ZHUO Yulong, et al. Study on damage characteristics of cyclic loading and unloading of ballast cemented backfilling body [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(6): 82-86, 95.
- [4] 肖福坤, 申志亮, 刘刚, 等. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1791-1797.
- XIAO Fukun, SHEN Zhiliang, LIU Gang, et al. Relationship between hysteresis loop and elastoplastic strain energy during cyclic loading and unloading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1791-1797.
- [5] 付斌, 周宗红, 王海泉, 等. 大理岩单轴循环加卸载破坏声发射先兆信息研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1946-1953.
- FU Bin, ZHOU Zonghong, WANG Haiquan, et al. Precursor information study on acoustic emission characteristics of marble under uniaxial cyclic loading-unloading [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1946-1953.
- [6] 祝方才, 艾成才, 刘丙肖, 等. 不同应力路径下脆性岩石的加卸载响应比研究[J]. 金属矿山, 2016(4): 52-57.
- ZHU Fangcai, AI Chengcai, LIU Bingxiao, et al. Study on load/unload response ratio of brittle rocks under different stress paths [J]. Metal Mine, 2016(4): 52-57.
- [7] 李西蒙, 刘长友, Syd SPENG, 等. 单轴分级循环加载条件下砂岩疲劳变形特性与损伤模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 8-17.
- LI Ximeng, LIU Changyou, Syd SPENG, et al. Fatigue deformation characteristics and damage model of sandstone subjected to uniaxial step cyclic loading [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(1): 8-17.
- [8] 倪智伟, 吴小刚, 陈浩, 等. 分级循环加卸载试验下砂岩的力学特性研究[J]. 金属矿山, 2021(10): 21-27.
- NI Zhiwei, WU Xiaogang, CHEN Hao, et al. Study on mechanical properties of sandstone under grading cyclic loading and unloading test [J]. Metal Mine, 2021(10): 21-27.
- [9] 吴文渊, 贺桂成, 陈科旭, 等. 非共面断续裂隙类岩石试件破断试验与分析[J]. 有色金属工程, 2021, 11(3): 107-116.
- WU Wenyuan, HE Guicheng, CHEN Kexu, et al. Fracture test and analysis of rock specimen with non-coplanar intermittent fissures [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(3): 107-116.
- [10] 朱凌, 裴向军, 崔圣华, 等. 含脉状缺陷结构岩石循环加卸载损伤及强度特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(5): 900-911.
- ZHU Ling, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Experimental study on cycle loading and unloading damage and strength characteristics of rocks with vein defects [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 900-911.
- [11] 王宇, 高少华, 孟华君, 等. 不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩破裂演化声发射特性与裂纹形态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1976-1989.
- WANG Yu, GAO Shaohua, MENG Huajun, et al. Investigation on acoustic emission characteristics and fracture network patterns of pre-flawed granite subjected to increasing-amplitude fatigue loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 1976-1989.
- [12] 刘建锋, 谢和平, 徐进, 等. 循环荷载下岩石变形参数和阻尼参数探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 770-777.
- LIU Jianfeng, XIE Heping, XU Jin, et al. Discussion on deformation and damping parameters of rock under cyclic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 770-777.
- [13] 邓华锋, 胡玉, 李建林, 等. 循环荷载的频率和幅值对砂岩动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3402-3409, 3418.
- DENG Huafeng, HU Yu, LI Jianlin, et al. Effects of frequency and amplitude of cyclic loading on the dynamic characteristics of sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3402-3409, 3418.
- [14] 李涛, 马永君, 刘波, 等. 循环荷载作用下冻结灰砂岩强度特征与弹性模量演化规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2438-2443.
- LI Tao, MA Yongjun, LIU Bo, et al. Strength

- characteristics and elastic modulus evolution of frozen gray sandstone under cyclic loading [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2438-2443.
- [15] MENG Q B, ZHANG M W, HAN L J, et al. Acoustic emission characteristics of red sandstone specimens under uniaxial cyclic loading and unloading compression [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(4): 969-988.
- [16] 张志镇, 高峰. 单轴压缩下岩石能量演化的非线性特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1198-1207.
- ZHANG Zhizhen, GAO Feng. Research on nonlinear characteristics of rock energy evolution under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1198-1207.
- [17] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565-3570.
- XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565-3570.
- [18] 辛亚军, 李梦远. 岩石分级加载蠕变的能量耗散与变形机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 2883-2897.
- XIN Yajun, LI Mengyuan. Study on energy dissipation and deformation mechanism of rock creep under graded loading [J]. Chinese Journal of rock mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2883-2897.
- [19] 刘忠玉, 董旭, 张旭阳. 分级循环荷载下层理煤岩力学特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2593-2602.
- LIU Zhongyu, DONG Xu, ZHANG Xuyang. Experimental study on mechanical properties of bedding coal and rock under graded cyclic loading [J]. Chinese Journal of rock mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2593-2602.
- [20] 赵福堂, 张吾渝, 常立君. 分级循环动荷载作用下冻结粉土动剪切模量比与阻尼比分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 41(6): 1397-1405.
- ZHAO Futang, ZHANG Wuyu, CHANG Lijun. Analysis of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of frozen silt under hierarchical dynamic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 41(6): 1397-1405.
- [21] 朱卓惠, 冯涛, 宫凤强, 等. 煤岩组合体分级循环加卸载力学特性的实验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2469-2475.
- ZHU Zhuohui, FENG Tao, GONG Fengqiang, et al. Experimental research of mechanical properties on grading cycle loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(7): 2469-2475.
- [22] 陈运平, 席道瑛, 薛彦伟. 循环荷载下饱和岩石的应力-应变动态响应 [J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(4): 409-413.
- CHEN Yunping, XI Daoying, XUE Yanwei. Dynamic stress-strain response in saturated rocks under cycling load [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(4): 409-413.
- [23] 陈岩, 左建平, 宋洪强, 等. 煤岩组合体循环加卸载变形及裂纹演化规律研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 826-833.
- CHEN Yan, ZUO Jianping, SONG Hongqiang, et al. Deformation and crack evolution of coal-rock combined body under cyclic loading-unloading effects [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 826-833.
- [24] HEAP M J, FAULKNER D R. Quantifying the evolution of static elastic properties as crystalline rock approaches failure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(4): 564-573.

(编辑 郭文晶)