

doi: 10.11799/ce201902025

冻融后循环荷载作用下红砂岩力学特性试验研究

宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 张 琨

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了研究寒区岩石在往复荷载作用下的力学性质, 采用 TAW-100 微机控制岩石力学试验机及冻融循环试验箱对经历不同冻融循环次数的红砂岩进行常规单轴压缩试验和单轴循环加载卸载试验。结果表明, 随着冻融循环次数的增加, 岩石的峰值强度、弹性模量逐渐减小, 而峰值应变和泊松比逐渐增大, 岩石的破坏则呈现出由脆性向延性转变的趋势; 循环加载卸载平均模量随冻融次数的增加迅速降低, 单位体积耗散能则随加载应力水平的增加逐渐增大, 但这一趋势随冻融循环次数的增加逐渐降低。

关键词: 冻融循环; 循环荷载; 红砂岩; 力学特性; 单位体积耗散能

中图分类号: TD265.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2019)02-0112-06

Experimental Study on Mechanical Properties of Red Sandstone under Cyclic Loading after Freezing-thawing Cycles

SONG Yong-jun, ZHANG Lei-tao, REN Jian-xi, ZHANG Kun

(College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to investigate the mechanical properties of rock in cold region under cyclic loading, red sandstone subjected to different freezing-thawing cycles is taken to carry out uniaxial compression test and uniaxial cyclic loading-unloading test using TAW-100 rock mechanics testing machine and freeze-thaw cycle testing chamber. The results show that the peak strength and elastic modulus of rock decreases gradually with the increase of the number of freeze-thaw cycles, while the peak strain and Poisson's ratio increases gradually, and the failure of rock presents a tendency that transition from brittleness to ductility. The average modulus of cyclic loading and unloading decreases rapidly with the increase of the number of freezing-thawing cycles, and the unit volumetric dissipation energy tends to increase with the increase of stress level, but the tendency becomes less insignificant with the increase of the number of freezing-thawing cycles.

Keywords: freezing-thawing cycle; cyclic loading; red sandstone; mechanical properties; unit volumetric dissipation energy

随着我国西部大开发的继续进行, “一带一路”等重大战略的实施, 高寒地区涌现出的地下工程越来越多, 而在地下工程实际中又经常遇到循环加载、卸载作用, 如地下硐室的开挖与支护等。因此研究冻融后岩石在加载作用下的力学特性对工程实际具有一定的参考价值。目前对冻融循环作用下岩石的物理及力学性质的研究国内外已有较多成果, Huseyin Yavuz^[1]研究了安山岩抗压强度、纵波波速与冻融循环次数的关系; DT Nicholson 等^[2]通过对

不同种类的岩石进行冻融试验, 研究了冻融损伤与岩性的关系; L. M. del Roa 等^[3]对花岗岩进行了冻融试验, 结果表明冻融使岩石内部孔隙增大从而使纵波波速降低; 傅鹤林等^[4]对不同冻融循环次数的板岩弹性参数进行了研究, 结果表明岩石的弹性模量、剪切模量及单轴抗压强度随冻融次数的增加而降低; 张慧梅等^[5]对红砂岩进行了冻融试验, 结果表明随着冻融次数的增加, 岩石的质量、密度及波速减小, 弹性模量及强度呈下降趋势; 唐江涛等^[6]

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11402195); 陕西省自然科学基金项目(2017JM1039); 陕西省教育厅专项科学研究计划项目(14JK1480)

作者简介: 宋勇军(1979—), 男, 陕西汉中, 博士, 副教授、硕士生导师, 主要从事岩石力学与地下工程方面的教学与研究工作, E-mail: songyj79@xust.edu.cn。

引用格式: 宋勇军, 张磊涛, 任建喜, 等. 冻融后循环荷载作用下红砂岩力学特性试验研究 [J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 112-117.

对不同类别的岩石进行了冻融试验,得到随着冻融时间的增加,岩石的力学性质逐渐降低的试验结果;吴安杰等^[7]对不同冻融条件下的白云岩进行了单轴压缩试验,并分析了其弹性参数的变化规律。

在循环加卸载条件下岩石力学性质的研究方面,苏承东等^[8]进行了煤样的三轴加卸载试验,结果表明加卸载过程中煤样的变形有明显的记忆性,循环加卸载的应力-应变外包络线与单轴压缩试验应力-应变曲线基本一致;许国安等^[9]对砂岩在加卸载条件下的能耗特征进行了分析研究;许江等^[10]对循环加卸载条件下形成的滞回环进行了分析研究;肖福坤等^[11]进行了煤样的循环加卸载试验,对试验结果的滞回环进行了研究分析;张媛^[12]等研究了围压对循环加卸载中滞回环的影响。目前对冻融循环作用下和循环加卸载作用下岩石物理及力学性质的研究较多,但对岩石在冻融后加卸载作用下的研究相对还较少。基于此,本文对采自陕西彬县大佛寺煤矿的红砂岩进行不同冻融条件下的单轴压缩试验和单

轴循环加卸载试验,研究在不同试验条件下冻融循环次数对红砂岩力学特性的影响,为寒区岩石工程提供参考。

1 岩样制备及试验方案

1.1 岩样制备

现场采集红砂岩岩块并沿岩石堆积方向进行钻孔取芯。根据国际岩石力学学会(ISRM)试验规程对岩芯进行加工。加工成 $\varphi \times h = 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆柱体,误差不大于0.3mm,两端面的不平行度不大于0.05mm。加工完成后选取完整性较好的岩样放入烘箱中在105℃的恒温下烘烤24h,待岩样冷却后测量岩样的干密度和纵波波速。根据纵波波速和干密度相近原则挑选出岩样24个,分4组,每组6个;用真空抽气法对所有试样进行强制饱和,称取饱和后岩样的质量,得到岩样的饱和含水率和孔隙度。红砂岩的物理参数平均值见表1。

表1 岩样物理性质指标

岩性	纵波波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率/%	孔隙度/%
红砂岩	1278	2.21	2.33	5.43	9.71

1.2 试验方案

试验采用由长春市朝阳试验仪器有限公司生产的TAW-100微机控制岩石力学试验机及冻融循环试验箱。岩石力学试验机可进行三轴压缩、循环加载、蠕变等试验,其轴向力最大可加载至1000kN,围压最大可加载至100MPa;冻融循环箱可进行高低温之间的冻融循环并保持长时间恒温,其最低温度可达-40℃,最高温度可达60℃。

1) 冻融循环。将饱和后的岩样用冻融循环试验箱进行冻融试验。对不同分组分别进行0、5、10、15次的冻融循环,试验时,将冻融循环的温度设定为:低温-25℃,高温25℃。温度转换时间间隔为12h,即先在-25℃条件下冷冻12h,然后在25℃融解12h,之后再下一个循环。每24h为一个冻融循环周期。

2) 单轴压缩试验。将经历不同冻融循环次数的岩样用TAW-1000微机控制岩石力学试验机进行单轴压缩全过程试验,加载速率为0.002mm/s,得到不同冻融循环次数下岩样的应力-应变曲线及其单轴抗压强度。

3) 循环加卸载试验。将经历不同冻融循环次数

的岩样用TAW-1000微机控制岩石力学试验机进行循环加卸载试验。试验前,先根据得到的单轴抗压强度值,计算每级加载应力为相应单轴抗压强度的20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%的应力值。待试验开始时,将应力加载至第一级之后,再卸载至0MPa,而后进行下一级加载,依次重复直至岩样破坏。加载速率为0.002mm/s,卸载速率为0.003mm/s。

2 试验结果分析

2.1 冻融后单轴压缩试验

将单轴压缩的试验结果进行整理,得到不同冻融循环次数下应力-应变曲线,其代表性的曲线如图1、图2所示,图中数字为冻融循环次数。岩样在不同冻融循环次数下的单轴压缩试验参数见表2,其中,弹性模量为应力-应变曲线上弹性阶段的平均斜率。

1) 通过图1和图2可以看出,岩石的整个压缩过程可分为压密阶段、弹性阶段、塑性屈服阶段、应变软化阶段和残余变形阶段。

2) 由图1中应力-应变曲线可以看出,未经冻

融的岩石在经过峰值强度后岩石强度下降很快，且无残余强度出现，岩石呈脆性破坏。随着冻融次数的增加岩石在到达峰值强度后出现了一定的残余强度。冻融15次之后，岩石经过峰值强度后应变继续增大，没有发生脆性破坏而是表现出了一定的延性。

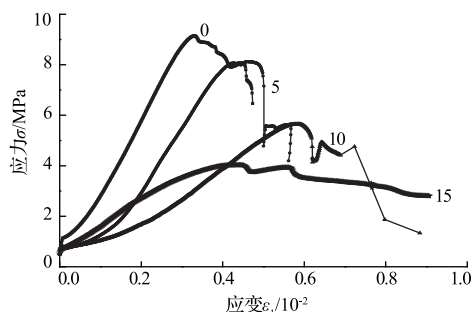


图1 单轴压缩轴向应力-应变曲线

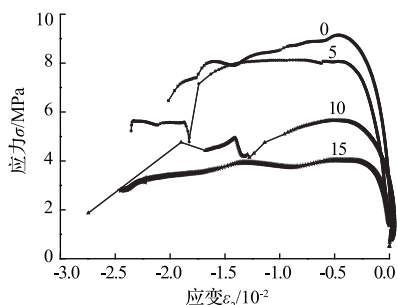


图2 单轴压缩径向应力-应变曲线

表2 单轴压缩岩样试验参数

冻融循环次数	试样编号	峰值强度/MPa	峰值应变/10 ⁻²	弹性模量/GPa	泊松比
0	11-2	11.25	0.356	3.29	0.2614
	11-3	9.35	0.331	3.11	0.2653
	11-5	10.15	0.316	3.05	0.2638
	平均值	10.25	0.334	3.15	0.2635
5	11-7	7.05	0.378	2.64	0.2689
	11-8	8.13	0.463	2.51	0.2673
	11-13	7.24	0.405	2.43	0.2654
	平均值	7.47	0.415	2.53	0.2672
10	11-15	6.47	0.619	1.17	0.2701
	11-9	5.75	0.587	1.11	0.2714
	11-10	5.87	0.635	1.16	0.2731
	平均值	6.03	0.614	1.15	0.2715
15	11-12	4.04	0.483	1.03	0.2789
	11-1	3.62	0.729	1.01	0.2727
	11-4	3.78	0.693	0.99	0.2751
	平均值	3.81	0.635	1.01	0.2756

3) 通过表2可以发现，岩样的峰值应变和泊松比随冻融循环次数的增加逐渐增大，而峰值强度和弹性模量则逐渐降低，这也进一步表明随着冻融次数的增加岩样破坏由脆性向延性转化的事实。比如

岩样冻融5次的弹性模量为2.53GPa，相比未冻融的3.15GPa降低了19.68%，岩石在冻融10、15次后，弹性模量分别降低了63.49%、67.93%。这可以理解为随着冻融循环次数的增加，冻融对岩石内部产生的损伤积累越来越大，从而导致岩石抵抗变形的能力降低，弹性模量减小。

2.2 冻融后单轴循环加卸载试验

2.2.1 强度及变形特征分析

岩石冻融后单轴循环加卸载的试验结果如图3所示。通过分析岩样经历不同冻融次数的应力-应变曲线可以发现，循环加卸载的应力-应变外包络线与单轴压缩试验应力-应变曲线基本一致。随着冻融循环次数的增加应力-应变曲线外包络线的斜率逐渐降低，这与上文提到的观点一致，进一步证明了弹性模量随着冻融循环次数的增加逐渐减小的结论。

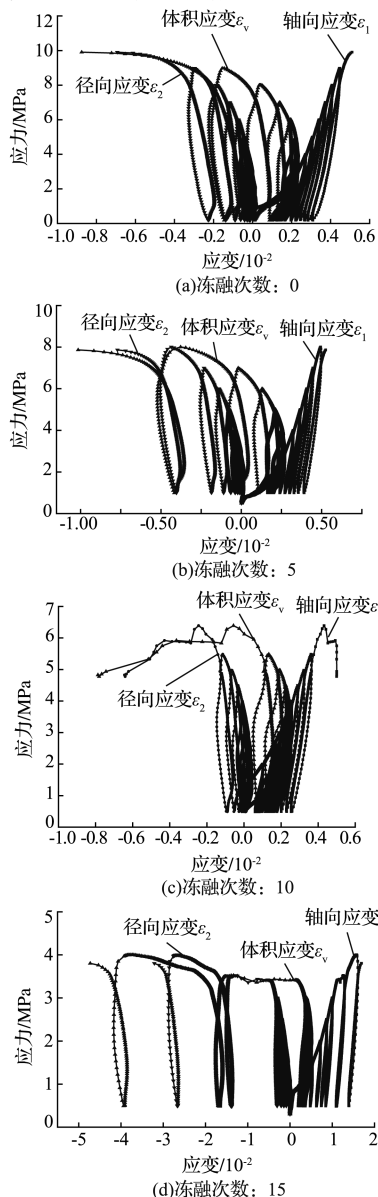


图3 不同冻融条件下单轴循环加卸载曲线

将峰值强度与冻融循环次数的关系进行多项式拟合,如图4所示。

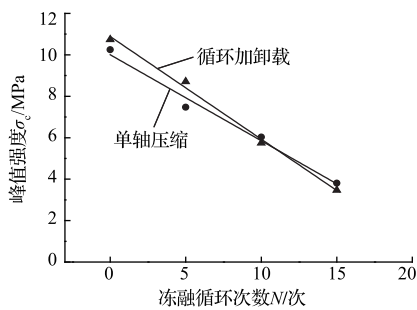


图4 峰值强度与冻融循环次数的关系

单轴压缩试验拟合结果为:

$$\sigma_c = 10.004 - 0.415N \quad (1)$$

循环加卸载试验拟合结果为:

$$\sigma_c = 10.883 - 0.495N \quad (2)$$

式中, σ_c 为岩石的峰值强度, MPa; N 为冻融循环次数。

从拟合结果可以看出, 峰值强度与冻融循环次数呈线性关系, 与已有文献所描述的非线性关系^[5]有所差别, 其原因: 一方面可能是因为岩样本强度较低, 本次试验测试次数为4次, 不足以反映冻融损伤的非线性特征; 另一方面可能是由于循环加卸载对岩样有加工硬化作用, 这一作用与冻融对强度的影响叠加后导致曲线的非线性不明显。

从图4可以看出, 无论是单轴压缩还是循环加卸载, 岩石的峰值强度均随冻融循环次数的增加而逐渐降低, 且循环加卸载试验的降低速率高于单轴压缩试验。在单轴压缩试验中, 冻融循环5次后, 岩样的峰值强度由10.25MPa降到7.47MPa, 降低了27.12%; 随着冻融次数的继续增加, 峰值强度继续降低, 在冻融10次和15次后分别降低了41.17%、62.83%。而在循环加卸载试验中, 岩样在冻融循环5、10、15次后峰值强度分别降低了18.90%、46.46%及67.69%。可见, 在未冻融或冻融次数较少时, 循环加载的峰值强度还略高于单轴压缩的峰值强度, 但冻融循环次数较多时, 循环加卸载的峰值强度低于单轴压缩的峰值强度。这可以解释为: 冻融使岩石内部产生新的裂隙或使原有裂隙进行扩展, 而循环加卸载可以使岩石内部裂隙压密。当冻融次数较少时, 冻融产生的裂隙可以通过循环加卸载来压密; 但冻融次数较多时, 冻融对岩石内部造成的损伤过大, 循环加卸载已经不能将冻融产生的裂隙压密, 相反, 岩石内部裂隙会因荷载

的反复施加进一步扩展从而导致峰值强度降低。

在循环加卸载试验中, 由于滞回环的存在, 每次加卸载阶段的弹性模量并不相同, 取每一滞回环的平均斜率作为每个加卸载过程的弹性模量^[13]。得到了不同冻融循环条件下岩石的加卸载平均弹性模量, 如图5所示, 并对循环加卸载次数与加卸载平均模量进行了多项式拟合。

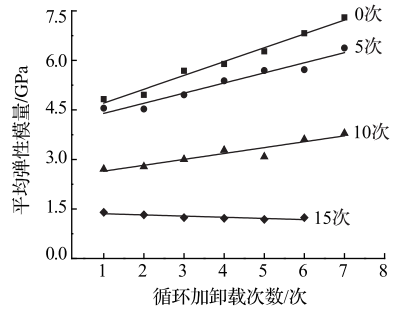


图5 平均模量与循环加卸载次数的关系

冻融0次时拟合结果:

$$E_{av} = 0.419n + 4.289 \quad (3)$$

冻融5次时拟合结果:

$$E_{av} = 0.307n + 4.089 \quad (4)$$

冻融10次时拟合结果:

$$E_{av} = 0.178n + 2.467 \quad (5)$$

冻融15次时拟合结果:

$$E_{av} = -0.036n + 1.390 \quad (6)$$

式中, E_{av} 为加卸载平均模量, GPa; n 为循环加卸载次数。

当冻融次数较少时, 随着循环加卸载应力水平的增加, 加卸载平均模量呈增大趋势; 而在冻融次数较大时, 这一趋势逐渐降低, 冻融15次后加卸载平均模量趋于平稳, 且有微小的下降趋势。这是由于冻融循环次数较少时, 岩石中的裂隙随加卸载应力水平的增加逐渐被压密, 岩石抵抗变形的能力增强, 加卸载平均模量逐渐增大; 而随着冻融循环次数的增加, 岩石内部由冻融造成的裂隙扩展逐渐增大, 冻融使岩石产生的裂隙已经不能由循环加载来压密, 甚至当冻融循环次数较多时, 应力水平的增加会加快裂隙的发展从而导致岩石的弹性模量降低。

对不同冻融条件下的应力-应变曲线进行对比分析可以发现, 随着冻融次数的增加, 岩石的峰值应变有增大趋势, 岩石在未经冻融时, 峰值应变只有0.334%, 而在冻融15次之后, 岩石的峰值应变可达0.635%, 是未冻融岩样的近2倍。这可以理解为岩石在冻结过程中产生冻胀力, 岩石内部产生新的

裂隙或原有裂隙扩展,导致冻融后的岩石内部孔隙变大,加载时压密阶段变长从而导致在加载过程中岩石的变形增大。

2.2.2 滞回环形状及能量分析

由于岩石在加卸载过程中的记忆性及其本身的非线性特性,加卸载过程中岩石的加卸载路径不能完全重复,在整个循环加载过程中一直有滞回环存在。未冻融岩石在循环加卸载过程中形成的滞回环如图6所示。通过对滞回环进行对比分析可以发现,随着加载应力水平的增大,滞回环的宽度呈不断增大的趋势,但其增量随应力水平的增加而逐渐减小。分析滞回环形状可以发现,当加载应力逐渐增大时,滞回环中的加载曲线和卸载曲线都呈现出了上凹型,且这一现象随着循环加载应力水平的增加更加明显。

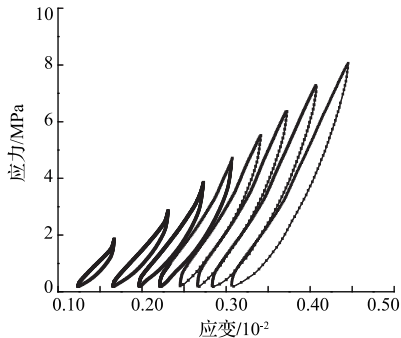


图6 未冻融岩样滞回曲线

随着加卸载应力水平的增加,滞回环的面积在逐渐增加,而滞回环的面积即每次加卸载过程中岩石的单位体积耗散能^[12]。不同冻融循环次数下循环加卸载单位体积耗散能(滞回环面积)如图7所示,现对单位体积耗散能与循环加卸载次数的关系进行多项式拟合。

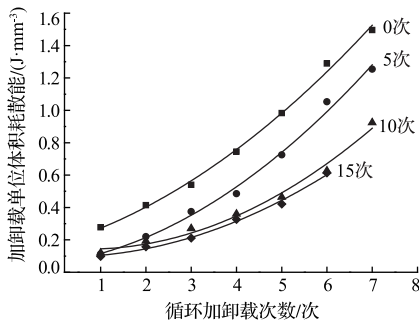


图7 单位体积耗散能与加卸载次数的关系

冻融0次时拟合结果:

$$S = 0.1518 + 0.0425n + 0.0190n^2 \quad (7)$$

冻融5次时拟合结果:

$$S = 0.0540 - 0.0262n + 0.0188n^2 \quad (8)$$

冻融10次时拟合结果:

$$S = 0.1731 + 0.0835n + 0.0157n^2 \quad (9)$$

冻融15次时拟合结果:

$$S = 0.0939 + 0.0039n + 0.0148n^2 \quad (10)$$

式中, S 为滞回环面积, m^2 ; n 为冻融循环次数。

由图7可以看出,在相同冻融条件下,随着循环加卸载应力水平的增加,每次加卸载完成后岩样的单位体积耗散能逐渐增大。这可以理解为,随着加卸载应力水平的增加,岩石内部裂隙的不可逆扩展逐渐增多,裂隙扩展所需的能量增大,因而耗散能逐渐增加。随着冻融次数的增加,单位体积耗散能的增量逐渐降低。

由拟合结果可知,曲线开口逐渐增大并趋于稳定。岩样在冻融5次后,拟合曲线的二次项系数为0.0188,相比冻融0次时的0.0190降低了1.05%;冻融10次、15次后,其二次项系数分别为0.0157、0.0148,相比冻融0次的速率降低了17.37%、22.11%。这可以解释为:每次冻融都会使岩石内部产生新的裂隙或使原有裂隙发生不可逆扩展,而这些不可逆变形在产生过程中都会造成能量的耗散。由于每块岩石自身所储备的能量是一定的,即岩石从开始到破坏所能释放的能量是一定的,因此,随着冻融循环次数的增加,岩石因冻融而耗散的能量逐渐增加,由循环加卸载造成能量耗散逐渐减小。

3 结论

1) 对不同冻融条件下的红砂岩进行单轴压缩及循环加卸载试验,结果表明,随冻融循环次数的增加,无论单轴压缩还是循环加卸载,岩石的峰值强度均逐渐降低;且循环加卸载试验的峰值强度降低速率高于单轴压缩试验。

2) 随着冻融次数的增加,岩石的单位体积耗散能(滞回环面积)随加卸载应力水平的增大逐渐增加,且每次加卸载完成后岩石单位体积耗散能的增量随冻融循环次数的增加逐渐降低。

3) 循环加卸载试验中,岩石的平均弹性模量随冻融循环次数的增加逐渐减小;随着冻融次数的增加,加卸载平均模量的增量逐渐减小并趋于稳定。

参考文献:

- [1] Huseyin Yavuz. Effect of freeze-thaw and thermal shock weathering

- on the physical and mechanical properties of an andesite stone [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70(2): 187-192.
- [2] DT Nicholson, FH Nicholson. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(12): 1295-1307.
- [3] L. M. del Roa, F. Lopez, F. J. Esteban, et al. Ultrasonic study of alteration processes in granites caused by freezing and thawing [J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2005, 1(23): 415-418.
- [4] 傅鹤林, 张家兵, 黄震, 等. 冻融循环作用下板岩弹性参数及单轴抗压强度研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2203-2212.
- [5] 张慧梅, 张蒙军, 谢祥妙, 等. 冻融循环条件下红砂岩物理力学特性试验研究 [J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(1): 69-74.
- [6] 唐江涛, 裴向军, 裴钻, 等. 冻融循环作用下岩石的损伤研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(27): 101-105.
- [7] 吴安杰, 邓建华, 顾乡, 等. 冻融循环作用下泥质白云岩力学特性及损伤演化规律研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3064-3072.
- [8] 苏承东, 熊祖强, 翟新献, 等. 三轴循环加卸载作用下煤样变形及强度特征分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 456-461.
- [9] 许国安, 牛双建, 靖洪文, 等. 砂岩加卸载条件下能耗特征试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 3611-3617.
- [10] 许江, 鲜学福, 王鸿, 等. 循环加、卸载条件下岩石类材料变形特性的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3040-3045.
- [11] 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): 1971-1797.
- [12] 张媛, 许江, 杨红伟, 等. 循环荷载作用下围压对砂岩滞回环演化规律的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 320-326.
- [13] 尤明庆, 苏承东. 大理岩试样循环加载强化作用的试验研究 [J]. 固体力学学报, 2008, 29(1): 66-72.
- [14] 宋勇军, 雷胜友, 邹翀, 等. 干燥与饱水状态下炭质板岩变形特性分析 [J]. 煤炭工程, 2015, 47(4): 124-127.
- [15] 田应国, 杨更社, 李博融, 等. 冻结白垩系砂岩强度特性试验研究 [J]. 煤炭工程, 2015, 47(12): 78-81.

(责任编辑 张宝优)