

# 循环加卸载下饱和岩石变形破坏的损伤与能量分析

夏冬<sup>1,2</sup>, 杨天鸿<sup>1,2</sup>, 王培涛<sup>1,2</sup>, 张鹏海<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 以中关铁矿深部饱水闪长岩单轴循环加卸载的室内力学试验结果为基础, 结合线弹性损伤力学理论, 针对饱和岩石在单轴循环加卸载作用下的变形、损伤及能耗特性进行了研究. 结果表明: 每一级加载与卸载过程的应力-应变曲线均呈内凹形, 随着循环次数及应力水平的增加, 塑性滞回曲线向应变增大的方向移动, 且应变中不可恢复的变形逐渐减小; 轴向应变、横向应变和体应变的绝对损伤参数与累积损伤参数均随循环次数及应力水平的增大而增大, 且三者的变化趋势基本一致; 能量耗散值与循环的次数近似呈线性关系, 后一循环的能耗不等于前几次循环能耗之和.

**关 键 词:** 单轴压缩; 循环加卸载; 饱和岩石; 损伤; 能量耗散

中图分类号: TD 458

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)06-0867-04

## Analysis on Damage and Energy in Deformation and Fracture of Saturated Rock Subjected to Cyclic Loading and Unloading

XIA Dong<sup>1,2</sup>, YANG Tian-hong<sup>1,2</sup>, WANG Pei-tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng-hai<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XIA Dong, E-mail: dianjiahan@163.com)

**Abstract:** The deformation, damage and energy consumption were investigated based on the experiment of water-saturated diorite samples from Zhongguan iron mine, under the uniaxial cyclic loading and unloading. The results show that the stress-strain curves display internally sunken at each loading and unloading cycle. With the increasing of the cycle times and the stress level, the plastic hysteresis curve moves towards the larger and the non-recoverable deformation declines. The absolute and total damage parameters of the axial, lateral and volumetric strains increase with the stress. Moreover, a same trend is found for the three parameters. The value of energy dissipation shows approximately liner relationship with the cycle times, and the later energy dissipation is not equal to the sum of previous energy dissipations.

**Key words:** uniaxial compression; cyclic loading and unloading; saturated rock; damage; energy dissipation

岩土工程在施工及运营期间, 经常会遇到地下水和循环载荷的共同作用, 大量工程实践表明这种作用会引起岩体力学性能的劣化, 因此岩体在地下水和循环载荷作用下的力学性能是影响岩土工程长期稳定性的重要因素之一<sup>[1-2]</sup>. 国内外许多学者对水-岩耦合作用及循环载荷破坏

过程中岩石的力学特性、变形特性、能量变化规律及断裂损伤力学特性进行了相关的研究. Jing等<sup>[3]</sup>通过花岗岩剪切试验及电磁辐射和声发射同步监测, 表明水降低了岩石的弹性模量、泊松比和抗剪强度; Chang等<sup>[4]</sup>通过三轴试验研究发现“湿”岩块的极限强度为“干”岩块极限强度

收稿日期: 2013-08-21

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB227902); 国家自然科学基金资助项目(50904013, 51174045); 国家自然科学基金重点资助项目(51034001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N090101001, N120601002); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120042120053).

**作者简介:** 夏冬(1981-), 男, 河北隆化人, 东北大学博士研究生; 杨天鸿(1968-), 男, 辽宁抚顺人, 东北大学教授, 博士生导师.

的 60% ~ 85% . Eberhardt 等<sup>[5-6]</sup>对脆性岩石单轴循环加卸载过程中的断裂损伤力学特性进行了探索研究;谢和平等<sup>[7]</sup>研究了岩石强度及其整体破坏与岩石变形过程中能量释放、能量耗散的内在联系,指出导致岩性劣化和强度丧失的原因是能量耗散使岩石产生的损伤;赵闯等<sup>[8]</sup>对不同围压作用下岩石损伤变形与能量特征开展了循环加卸载试验研究,建立了基于循环能耗值与损伤变量的破坏方程;Song 等<sup>[9]</sup>研究了煤岩在损伤破坏过程中耗散能与电磁辐射之间的关系;Xiao 等<sup>[10]</sup>用不同的方法定义了疲劳损伤变量,研究了其演变过程中的影响因素.

考虑到矿山、水利等领域中涉及到岩土体在地下水和循环载荷作用下的强度及稳定性问题,本文基于河北钢铁集团矿业公司中关铁矿的蚀变闪长岩,研究其饱水状态下的单轴加卸载的力学特性,分析了饱水岩石在单轴循环载荷作用下的能耗值、损伤变量与循环次数之间的关系,探讨了饱水岩石损伤破坏过程中能量转化规律.

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试件均为灰绿色闪长岩,取自河北钢铁集团矿业公司中关铁矿的施工现场.加工工艺:首先在施工现场采用钻爆法获得不规则的立方体岩块,再在实验室用水钻法钻取岩芯,按国际岩石力学试验建议方法,加工成直径为 50 mm,高为 100 mm 的圆柱体标准试件(见图 1),其精度满足《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)的要求.试验前采用真空抽气法对试件进行饱水处理.



图 1 典型岩石试件  
Fig. 1 Typical rock samples

1.2 试验设备及试验方法

试验采用杭州邦威机电控制工程有限公司生产的 YAG - 3000 微机控制岩石刚性试验机;数

据采集系统采用应力传感器、位移传感器和静态应变仪对岩石所加荷载和纵向及横向变形进行量测.

试验采用单轴循环加卸载方式,加卸载速率均为 10 kN/min,单轴循环加卸载采用的加载方式为:首先以上述加载速率加载至饱和岩样单轴抗压强度的 20% ,然后卸载至其单轴抗压强度的 5% ,此后,每次按 10 kN 的增量增加荷载直至试件破坏,循环加载方式见图 2.

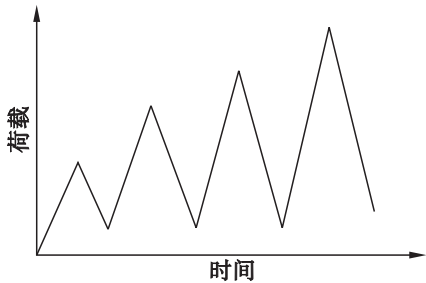


图 2 循环加载方式  
Fig. 2 Cyclic loading scheme

2 试验结果及分析

2.1 变形分析

试验测得饱水闪长岩单轴循环加卸载作用下的应力 - 应变曲线如图 3 所示.

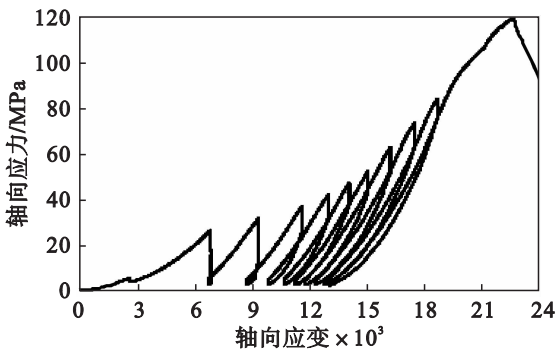


图 3 饱水闪长岩应力 - 应变曲线  
Fig. 3 Stress-strain curve of saturated diorite

从图 3 可以看出,循环加卸载初期,饱水岩样在加载方向产生了较大的塑性变形,即出现了明显的压密阶段.这是因为在循环加卸载的初期,岩样内部原始裂隙逐渐闭合,且水分子进入岩样内部,削弱了岩样内部颗粒间的粒间联系,使得岩石内部的裂隙处于调整阶段,即便在较低的应力水平下,岩石试件在加载方向也产生较大的塑性变形.进入弹性阶段后,随循环次数及应力水平的增加,饱水岩样进入稳定变形阶段,卸载曲线的斜率也逐次略有增加,表明卸载应力下饱水岩石材料的弹性有所增强;随循环次数及应力水平的进一

步增加,饱水岩样进入加速变形阶段,在该阶段随变形的累积将导致岩石试件的最终破坏.每一级加载与卸载过程的应力-应变曲线均呈内凹形,循环加卸载作用下饱水岩石的加载和卸载路径不重合,每次加载与卸载过程都会形成一个塑性滞回环,随着循环次数及应力水平的增加,塑性滞回环向应变增大的方向移动,且应变中不可恢复变形量的增长速度逐渐减小,累积变形量逐渐增大,滞回环也越来越密集,这意味着不可逆变形随着循环加卸载周期及应力水平增大而不断增大.

2.2 损伤分析

基于中关铁矿饱水闪长岩单轴加卸载试验数据,根据线弹性损伤力学理论,采用损伤等效的方法对循环加卸载过程中饱水岩石损伤变化情况进行分析.由上述饱水闪长岩的力学分析可知,饱水岩石的循环加卸载过程是损伤逐渐累积的过程.参照 Eberhardt 等<sup>[5-6]</sup>关于岩石循环加卸载过程中损伤参数的计算公式:

$$w_{ax} = \varepsilon_{ax}^{per}(i) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ax}^{per}(i), \quad (1)$$

$$w_{lat} = \varepsilon_{lat}^{per}(i) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_{lat}^{per}(i), \quad (2)$$

$$w_{vol} = \varepsilon_{vol}^{per}(i) / \sum_{i=1}^n \varepsilon_{vol}^{per}(i). \quad (3)$$

式中: $w_{ax}$ 为轴向应变损伤参数; $w_{lat}$ 为侧向应变损伤参数; $w_{vol}$ 为体积应变损伤参数; $\varepsilon_{ax}^{per}(i)$ 为轴向不可逆应变; $\varepsilon_{lat}^{per}(i)$ 为侧向不可逆应变; $\varepsilon_{vol}^{per}(i)$ 为体积不可逆应变; $n$ 为循环加卸载周期数.利用式(1)~(3)计算的饱水闪长岩循环加卸载过程中的损伤变化结果如图 4 所示,循环加卸载累计损伤参数归一化处理后的结果如图 5 所示.

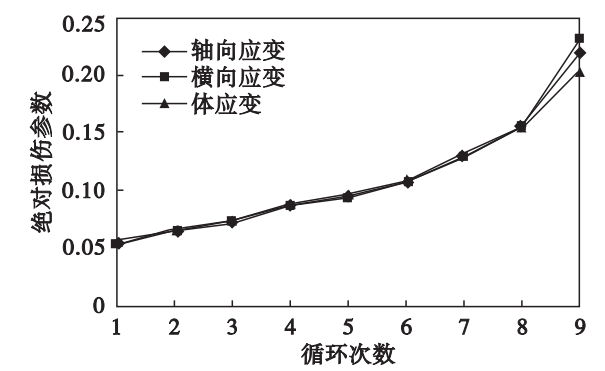


图 4 绝对损伤参数  
Fig. 4 Absolute damage parameters

从图 4 和图 5 可以看出,第一轮循环后,饱水岩石内部产生了损伤,但绝对损伤参数和累积损伤参数均较小.随着循环加卸载周期数及应力的逐级增大,轴向应变、横向应变和体应变的绝对损

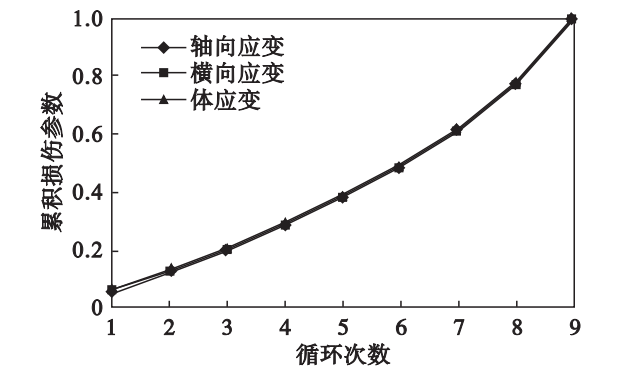


图 5 累积损伤参数  
Fig. 5 Cumulative damage parameters

伤参数与累积损伤参数均增大.轴向应变、横向应变和体应变的绝对损伤参数经历了稳定发展阶段和加速发展阶段,且三者的变化趋势基本一致.这说明轴向和侧向不可逆变形随着循环加卸载周期数的增加及应力水平的提高而不断增大,也反映了随循环荷载及应力水平的逐级增大,饱和岩石内部新微裂纹不断产生、扩展、汇集的损伤演化过程及损伤累积过程.

2.3 能量分析

能量耗散反映了岩石材料内部微裂纹的不断闭合、新生裂隙的不断发展演化、岩石材料强度不断弱化并最终丧失承载能力的过程,其实质是岩石材料变形破坏的本质属性.饱和岩石试件在循环加卸载作用下产生的能量,一部分耗散于损伤的产生和裂隙的扩展,一部分则以弹性能的形式储存在岩石中.假设饱水岩样在加卸载过程与外界没有热交换,由热力学第一定律可得

$$U = U^d + U^e. \quad (4)$$

式中: $U$ 为试验机对岩样轴向压缩所做的功; $U^d$ 为耗散能; $U^e$ 为可释放的弹性能,其表达式为

$$U^e = \frac{1}{2\bar{E}}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\bar{\nu}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]. \quad (5)$$

式中: $\bar{E}$ 、 $\bar{\nu}$ 分别为一个加卸载循环中弹性模量与泊松比的平均值.在单轴压缩循环加卸载条件下上述公式可以简化为

$$U^e = \frac{\sigma_1^2}{2\bar{E}}. \quad (6)$$

耗散能  $U^d$  可由每次循环加卸载过程中塑性滞回环所围成的面积进行积分求得.本文主要研究循环加卸载过程中每个滞回环能量耗散值的演化规律.

从图 6 可以看出,循环加卸载的第一个周期和第二个周期岩石试件的能量耗散值较小,产生这种现象的原因是在加卸载初期应力水平较低,岩石内部的微孔隙、微裂隙处于压密阶段且由于

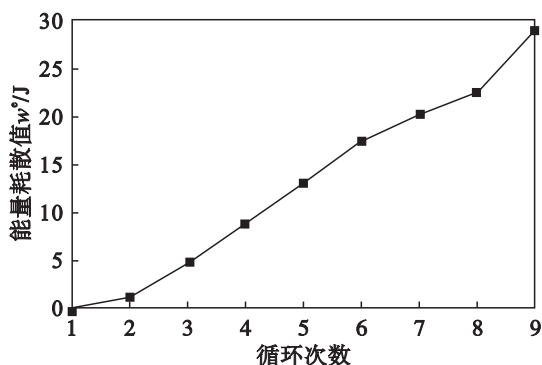


图 6 能量耗散值 - 循环次数

Fig. 6 Values of energy dissipation vs. loading cycles

水分子进入岩样内部,削弱了岩样内部颗粒间的粒间联系,使得在该阶段饱水岩石试件即便产生较大的塑性变形,也只消耗较少的能量;随着循环次数及应力水平的逐级增加,饱和岩石试件进入弹性变形阶段,该阶段能量耗散值与循环次数基本呈线性关系,产生这种现象的主要原因是组成岩石的矿物颗粒在加载过程中产生弹性变形,在卸载过程中弹性能释放,因此该阶段消耗的能量相对较多,后一循环消耗的能量不等于前几次循环的能耗之和;随着循环次数及应力水平的进一步提高,饱和岩样内部的微裂隙进一步发育、扩展、汇合,损伤进一步累积,使得饱和岩样内部储存的可释放的应变能减少,裂纹尖端塑性区的形成需要消耗较多的能量,微裂隙分支、扩展所需的表面能增大,同时岩样内部孔隙相互摩擦也要消耗一定的能量,这一阶段能量耗散达最大值。

### 3 结 论

1) 循环加卸载作用下饱水岩石的应力 - 应变曲线呈内凹形,每次加载与卸载过程都会形成一个塑性滞回环,随着循环次数及应力水平的增加,塑性滞回曲线向应变增大的方向移动,且应变中不可恢复的变形逐渐减小,在循环加卸载作用下,饱水岩石不可逆变形发展可分为初始变形阶段、等速变形阶段和加速变形阶段。

2) 加载初期饱水岩样的绝对损伤参数和累积损伤参数均较小,随循环加卸载周期数的逐级增加及应力水平的不断提高,轴向和侧向不可逆变形均增大,这反映了随循环荷载及应力水平的逐级增大,饱和岩石内部新微裂纹的不断产生、扩展、汇集的损伤演化过程及损伤累积过程。

3) 随着循环应力的逐级增加,饱和岩样内部耗散的能量也逐渐增加。加载初期饱和岩样的能量耗散值较小,在弹性变形阶段,能量耗散值与循环次数近似呈线性关系,在试件临近破坏时,能量耗散值出现了加速阶段。

### 参考文献:

- [1] Lu Y F, Shao J F. Modeling of anisotropic damage in brittle rocks under compression dominated stress [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26(10): 945 - 961.
- [2] Shao J F, Lu Y F, Dariusz L. Damage modeling of saturated rocks in drained and undrained condition [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(6): 733 - 740.
- [3] Jing H W, Zhang Z Y, Xu G A. Study of electromagnetic and acoustic emission in creep experiments of waste-containing rock samples [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 18(1): 42 - 45.
- [4] Chang C D, Haimson B. Effect of fluid pressure on rock compressive failure in a nearly impermeable crystalline rock: implication on mechanism of borehole breakouts [J]. *Engineering Geology*, 2007, 89: 230 - 242.
- [5] Eberhardt E, Stead D, Stimpson B. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1999, 36: 361 - 380.
- [6] Eberhardt E, Stead D, Stimpson B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(2): 222 - 233.
- [7] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(7): 3003 - 3010.  
(Xie He-ping, Ju Yang, Li Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(7): 3003 - 3010.)
- [8] 赵闯, 武科, 李术才, 等. 循环荷载作用下岩石损伤变形与能量特征分析 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 890 - 896.  
(Zhao Chuang, Wu Ke, Li Shu-cai, et al. Energy characteristics and damage deformation of rock subjected to cyclic loading [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 890 - 896.)
- [9] Song D Z, Wang E Y, Liu J. Relationship between EMR and dissipated energy of coal rock mass during cyclic loading process [J]. *Safety Science*, 2012, 50: 751 - 760.
- [10] Xiao J Q, Ding D X, Jiang F L, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2010, 47: 461 - 468.