

单轴循环加卸载作用下红砂岩变形损伤及能量演化

李江腾[†], 肖峰, 马钰沛

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:利用 RYL-600 型微机控制剪切流变仪对红砂岩试件开展低频率单轴循环加卸载试验, 研究该条件下红砂岩的疲劳变形、损伤特性及能量演化规律. 研究表明: 1) 该红砂岩应力上限疲劳破坏门槛值在 75%~85% 之间, 且疲劳寿命随应力上限增加而急剧减少. 2) 低频单轴循环加卸载条件下红砂岩轴向变形呈现 3 个阶段, 开始阶段应变增量较小但增速很大, 稳定阶段应变逐步缓慢增长, 破坏阶段应变量和应变增速都快速增大; 3 个阶段中滞回环密集度呈现出典型的疏—密—疏特征, 单个滞回环形状表现出“胖—瘦—胖”的发展规律, 且其面积随应力上限增加而增大. 3) 损伤发展过程呈现起始阶段、稳定扩展阶段和加速破坏阶段的 3 阶段特征; 应力上限越高, 损伤发展越快; 3 个阶段中, 循环次数占据疲劳寿命最小部分的加速破坏阶段产生绝大部分的损伤增量. 4) 弹性能随循环次数增加先增大后保持稳定, 但临近破坏时因材料弹性减弱而减小; 耗散能在循环开始时较大, 然后随循环次数增加先减小而后趋于稳定, 临近破坏时又急剧增大至近 4 倍, 岩石破坏伴随耗散能的急剧增大. 5) 岩石内部应力调整反映在滞回环演化中, 滞回环面积越大, 单次塑性变形越大, 损伤程度越高, 能量耗散越严重.

关键词:红砂岩; 循环加卸载; 变形; 损伤; 能量演化

中图分类号:TU45

文献标志码:A

Deformation Damage and Energy Evolution of Red Sandstone under Uniaxial Cyclic Loading and Unloading

LI Jiangteng[†], XIAO Feng, MA Yupei

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Low frequency uniaxial cyclic loading and unloading experiments on red sandstone were carried out to study the fatigue deformation, damage characteristics and energy evolution of red sandstone by using RYL-600 micro-computer controlled shear rheometer. The experiment results are as follows. The threshold value of fatigue failure stress of the red sandstone is between 75% and 85% and the fatigue life decreases sharply with the increase of upper stress. Under the condition of low-frequency uniaxial cyclic loading and unloading, the axial deformation of red sandstone is divided into three stages. In the initial stage, strain is small but grows rapidly; in the stable stage, strain gradu-

* 收稿日期: 2019-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51979293), National Natural Science Foundation of China (51979293); 湖南省水利厅科技项目 (2015131-5), Science and Technology Project of Hunan Provincial Water Resources Department (2015131-5)

作者简介: 李江腾 (1964—), 女, 湖南株洲人, 中南大学教授, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: 1337408476@qq.com

ally increases slowly; in the near failure stage, strain and strain increment increases rapidly. In the three stages, the density of hysteresis loop presents the characteristics of sparsity – density – sparsity. The shape of a single hysteretic loop shows the development rule of "fat – thin – fat". The area of a single hysteretic loop increases with the increase of upper limit stress. The damage development process is divided into initial stage, steady expansion stage and accelerated damage stage. The higher the upper limit of stress is, the faster the damage develops. In the three stages, the accelerated failure stage, which occupies the smallest part of fatigue life, produces the majority of damage increment. The number of elastic energy cycles first increases and then remains stable. However, it decreases with the decrease of material elasticity in accelerated damage stage. The initial value of dissipated energy is large, and then it decreases with the increase of cycle number and then tends to be stable. When it is close to failure, it increases sharply by nearly 4 times, indicating that the rock failure must be accompanied by the sharply increase of dissipated energy. The internal stress adjustment of rock is reflected in the evolution of hysteretic loop. The larger the hysteretic loop area is, the larger the single plastic deformation is, the higher the damage degree is, and the more serious the energy dissipation is.

Key words: red sandstone; loading and unloading; deformation; damage; energy evolution

岩石是工程建设中的基本介质材料. 天然岩石本身构造各不相同, 在不同的外部环境作用下必然表现出不同的力学特性^[1]. 红砂岩广泛分布于湖南、四川、云南等我国南方地区, 这里是未来我国土木工程建设重点区域, 因此研究红砂岩相关性质尤为重要. 近年来, 有关学者对于红砂岩静力学特性^[2-5]、蠕变特性^[6-8]、声发射特性^[9-11]、渗透特性^[12]以及软质红砂岩崩解性^[13]及其填料缩尺料制作^[14]等方面做了很多研究. 在岩土工程施工及运营阶段岩石经常会受到循环荷载作用, 如: 隧道及边坡的反复开挖, 桥梁岩基及隧道围岩受到过往车辆的影响等. 因此研究在循环扰动环境下岩石的性质非常重要. 周子龙等^[15-16]发现在点载荷循环加载下红砂岩的疲劳寿命与加载频率和应力幅值紧密相关; 李志成等^[17]进行了盐岩三轴循环加卸载试验, 发现声发射信号随围压增大而减弱; 王友新等^[18]、付斌等^[19]、王大明等^[20]研究了大理岩单轴循环加卸载条件下的弹性模量、碎屑分形及声发射特征的演化规律; 谷中元等^[21]发现单向循环加卸载对花岗岩的强度起先加强后削弱的作用; 陈璐等^[22]研究了深部花岗岩循环加卸载条件下的强度包络线并分析了其破坏机理.

上述研究主要涉及常规状态下的红砂岩性质或循环加卸载条件下岩石的疲劳力学特性、声发射特征规律等, 对于循环扰动条件下岩石的疲劳变形损伤及能量演化规律的研究还很少见. 因此, 本文基于长沙地区红砂岩室内试验, 研究红砂岩在低频单轴循环加卸载条件下的变形损伤及能量演化特性, 为

相关工程建设提供参考.

1 试验条件及方案

1.1 试验方案

本次试验红砂岩试样均取自长沙某地同一岩层的相邻部位, 试件严格按照国际岩石力学学会建议标准加工. 试样为标准的圆柱体试件, 尺寸为: 50 mm×100 mm; 端面平整度误差小于 0.02 mm. 试验在中南大学岩石力学试验室 RYL-600 型微机控制剪切流变仪上进行.

1.2 试验参数

试验采用正弦波加载, 频率为 0.1 Hz, 应力上、下限皆以单轴试验得到的红砂岩抗压强度 $\sigma_c=41.08$ MPa 为基准, 按表 1 所列参数确定. 试件加载过程为: 首先以 100 N/s 线性荷载加载到应力下限, 然后以正弦波荷载循环加卸载, 直至试件破坏或轴向应变增量为 0.

表 1 循环加卸载试验参数

Tab.1 Cyclic loading and unloading test parameters					
上限应力 比/%	上限应力 值/MPa	下限应力 比/%	下限应力 值/MPa	应力幅值	试件数量
95	39.03	25	10.27	$0.7\sigma_c$	3
85	34.92	15	6.16	$0.7\sigma_c$	3
75	30.81	5	2.05	$0.7\sigma_c$	3

2 结果分析

2.1 红砂岩疲劳变形特性

2.1.1 轴向变形演化规律

根据试验结果,选取有效数据取其平均疲劳寿命.当循环应力水平为25%~95%时,试件3次循环后即破坏;当循环应力水平为15%~85%时,试件15次循环后破坏;循环应力水平为5%~75%时,试件循环5400次未破坏,且后期循环的应力-应变曲线与前期曲线高度重合,表明试件在该应力水平下不会破坏,其应力上限疲劳破坏门槛值在75%~85%应力比之间.可见一定应力幅值下,循环应力上限水平越高,岩石越容易发生疲劳破坏,疲劳寿命越低;并且当循环应力上限超过疲劳门槛值后,红砂岩疲劳寿命随应力上限增加而急剧降低.图1所示为不同应力水平循环加卸载应力-应变曲线,图2所示为循环加卸载条件下红砂岩试件破坏模式图.

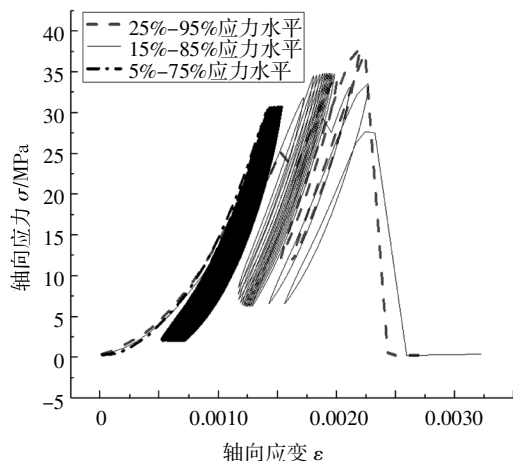


图1 不同应力水平下红砂岩循环加卸载应力-应变曲线
Fig.1 Cycle stress-strain curve of red sandstone under different stress level

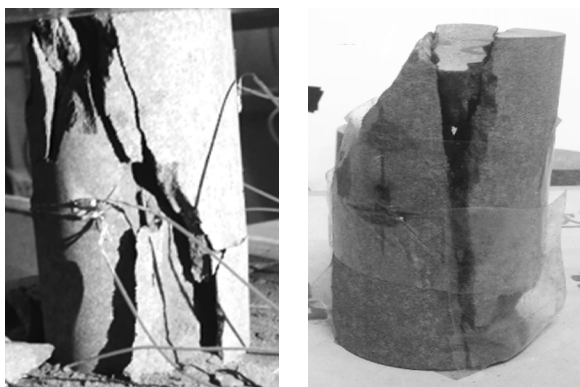


图2 循环加卸载条件下红砂岩试件破坏模式图
Fig.2 Failure modes of red sandstone specimens under cyclic loading and unloading conditions

由图1可知,应力上限越高,滞回环之间距离越大,非线性特征越强;试件单个循环产生的塑性变形越大,疲劳寿命越短.在循环加卸载过程中,曲线接近应力上限时呈上凸状,塑性变形量较大,其原因是应力上限附近应力变化速率最小,试件内部裂纹得以充分发育,产生较多塑性变形.

应力水平为15%~85%时试件疲劳破坏过程比较完整,滞回环发展具有典型的疏一密一疏特征.循环开始阶段,轴向应变发展较快,滞回环面积较大,塑性变形也较大;循环稳定阶段,轴向应变稳定发展,滞回环面积减小但逐渐稳定(应力水平为5%~75%试件循环过程绝大部分处于该阶段);循环破坏阶段,轴向应变迅速发展,滞回环总面积最大,同时试件内部微裂纹扩展、贯通形成宏观破裂面,最终导致试件破坏.循环加卸载过程中,其内部产生的不可逆塑性变形在应力-应变图中以滞回环的变化体现,破坏阶段滞回环最为稀疏,表明红砂岩在短时间内塑性变形快速发展直至破坏,符合红砂岩脆性岩石特征.图3、图4分别为不同应力水平条件下的上限轴向应变、上限轴向应变增量与循环次数关系图.

结合图3、图4可知,循环次数相同时试件上限轴向应变随应力上限的增大而增大.当应力水平为25%~95%时,试件迅速破坏;当应力水平为5%~75%时,试件在整个循环过程中上限轴向应变都很小,其增量近于0,试件未破坏;当应力水平在15%~85%时,试件上限轴向应变演化规律如下:开始阶段试件上限轴向应变相对较小,增量较大但其值逐步减小;稳定阶段循环次数占据疲劳寿命绝大部分,上限轴向应变继续增大,但增量很小并趋于恒定;破坏阶段,上限轴向应变和其增量都快速增长,变形迅速发展.

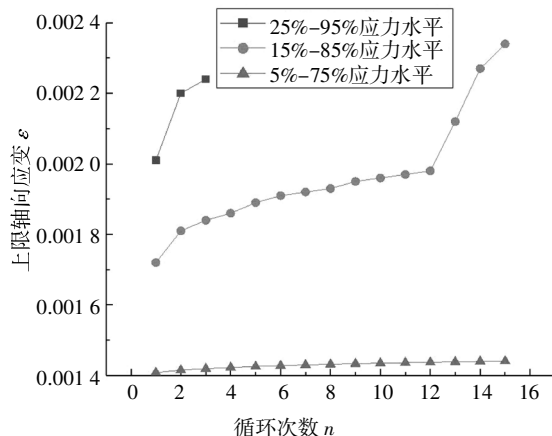


图3 不同应力水平上限轴向应变与循环次数关系
Fig.3 The relationship between the maximum axial strain of different stress levels and the number of cycles

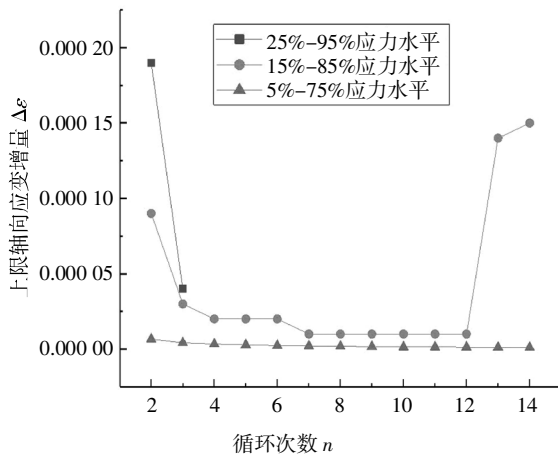


图4 不同应力水平上限轴向应变增量与循环次数关系

Fig.4 The relationship between the maximum axial strain increment of different stress levels and the number of cycles

展,在极少次数循环后试件破坏.其原因是岩石内部存在原生微裂隙,循环开始时这些微裂隙受循环荷载作用产生大量变形;循环稳定之后,脆弱部分被压密,变形稳定发展;临近破坏时内部裂纹贯通,随后试件破坏,应变陡增.当应力上限小于阈值时,试件压密后塑性变形停止增长,试件不会破坏.

2.1.2 滞回环发展规律

图5所示为应力水平为15%~85%的典型试件循环过程中不同阶段的滞回环.

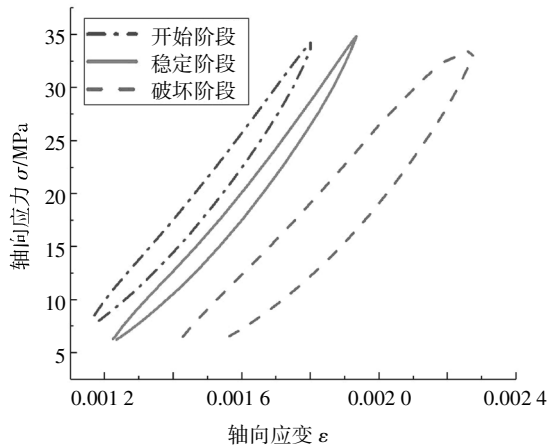


图5 典型试件15%~85%应力水平不同过程滞回环

Fig.5 The hysteresis loop of different processes at different stress levels of 15% to 85%

由图5可知,试件循环过程中开始阶段、稳定阶段和破坏阶段滞回环形态各不相同.滞回环演变总体趋势为“胖—瘦—胖”.开始阶段,滞回环呈带状,下端开口稍大而上部小,单次循环塑性变形较大;稳定阶段,滞回环呈“细叶”状,上端尖锐且下端闭合形

成完整滞回环,单次塑性变形很小;破坏阶段滞回环变得“丰满”,下部开口巨大,上端出现明显弧度,单次循环塑性变形非常大.可见破坏阶段红砂岩单次循环塑性变形量都较大且该阶段变形增量达到循环过程变形总增量的50%左右,表明了红砂岩的高脆特性.图6所示为不同应力水平循环过程中第二个滞回环.

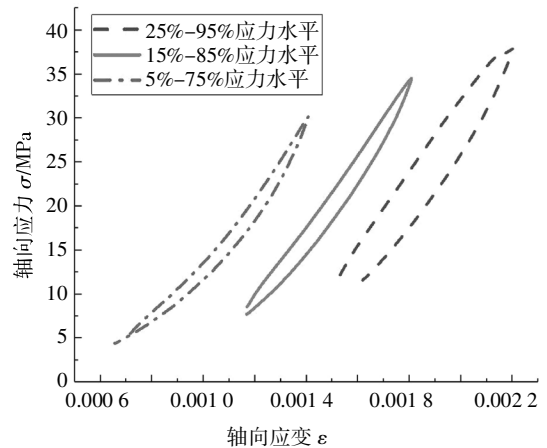


图6 不同应力水平第二循环滞回环

Fig.6 The second cyclic hysteresis loop with different stress levels

由图6可知,应力上限越高,相同循环次数产生的滞回环下部开口更大,形态更圆润,位置越靠后,面积越大,单次循环产生的塑性变形量就越大,试件疲劳寿命越低.应力上限越低,滞回环越细小甚至消失,试件不会破坏.滞回环演化规律的实质即试件内部裂纹随应力动态调整的过程.

2.2 疲劳损伤演化规律

岩石破坏实际上是岩石因循环荷载作用而内部损伤不断增长直至破坏的过程.岩石的轴向极限应变具有相对稳定的数值,因此可选择用上限轴向应变来定义岩石的损伤变量,即:

$$D = \frac{\varepsilon_{\max}^n - \varepsilon_{\max}^0}{\varepsilon_{\max}^f - \varepsilon_{\max}^0} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{\max}^n$ 为试件经过 n 次循环之后上限轴向应变的最大值; $\varepsilon_{\max}^0$ 为试件循环初期的最大应变; $\varepsilon_{\max}^f$ 为试件破坏之前的最大上限应变.其中,未破坏试件的 $\varepsilon_{\max}^f$ 值取静态全过程曲线破坏后区对应应力上限处的应变值,红砂岩典型试件的单轴压缩全应力-应变曲线如图7所示.

循环加卸载试验各应力水平下不同循环的上限轴向应变最大值见表2~表4.

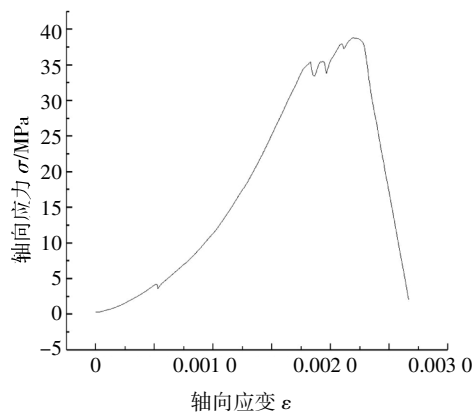


图 7 红砂岩单轴压缩应力-应变曲线
Fig.7 The uniaxial compression stress-strain curve of red sandstone

表 2 25%~95% 应力水平不同循环上限轴向应变最大值

Tab.2 The maximum axial strain of different cyclic under 25%~95% stress level

循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$	循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$	循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$
1	2.01	3	2.24	5	—
2	2.20	4	—		

该应力水平下 $\varepsilon_{\max}^0 = 9.2 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_{\max}^f = 2.24 \times 10^{-3}$.

表 3 15%~85% 应力水平不同循环上限轴向应变最大值

Tab.3 The maximum axial strain of different cyclic under 15%~85% stress level

循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$	循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$	循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$
1	1.72	6	1.91	11	1.97
2	1.81	7	1.92	12	1.98
3	1.84	8	1.93	13	2.12
4	1.86	9	1.95	14	2.27
5	1.89	10	1.96	15	2.34

该应力水平下 $\varepsilon_{\max}^0 = 7.8 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_{\max}^f = 2.34 \times 10^{-3}$.

表 4 5%~75% 应力水平不同循环上限轴向应变最大值

Tab.4 The maximum axial strain of different cyclics under 5%~75% stress level

循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$	循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$	循环次数 n	$\varepsilon_{\max}^n/(10^{-3})$
1	1.374 8	6	1.431 0	11	1.440 4
2	1.410 0	7	1.433 4	12	1.441 6
3	1.420 6	8	1.435 6	13	1.442 8
4	1.424 8	9	1.437 4	14	1.444 2
5	1.428 2	10	1.439 0	15	1.444 4

该应力水平下 $\varepsilon_{\max}^0$ 值为 3.5×10^{-4} , 试件未破坏, $\varepsilon_{\max}^f$ 值由全应力应变曲线得出, 其值为 2.35×10^{-3} . 计算三种应力水平下损伤变量值, 见表 5~表 7, 损伤变量与循环次数关系如图 7 所示.

表 5 25%~95% 应力水平损伤变量发展规律

Tab.5 The evolution law of damage variables under 25%~95% stress level

循环次数 n	损伤变量 $D/(10^{-1})$	循环次数 n	损伤变量 $D/(10^{-1})$
1	8.257	4	—
2	9.697	5	—
3	10.000		

表 6 15%~85% 应力水平损伤变量发展规律

Tab.6 The evolution law of damage variables under 15%~85% stress level

循环次数 n	损伤变量 $D/(10^{-1})$	循环次数 n	损伤变量 $D/(10^{-1})$
1	6.026	9	7.500
2	6.603	10	7.564
3	6.795	11	7.628
4	6.923	12	7.692
5	7.115	13	8.590
6	7.244	14	9.551
7	7.308	15	10.000
8	7.372		

表 7 5%~75% 应力水平损伤变量发展规律

Tab.7 The evolution law of damage variables under 5%~75% stress level

循环次数 n	损伤变量 $D/(10^{-1})$	循环次数 n	损伤变量 $D/(10^{-1})$
1	5.124	9	5.437
2	5.300	10	5.445
3	5.353	11	5.452
4	5.374	12	5.458
5	5.391	13	5.464
6	5.405	14	5.471
7	5.417	15	5.472
8	5.428		

由图 8 可知, 当应力上限高于门槛值时, 损伤变量随循环次数的增加而增大, 直至损伤变量为 1 时试件破坏; 应力上限越高, 相同循环次数的损伤变量越大, 损伤发展越迅速; 第一个循环的损伤增量较大

且远大于其他任何单个循环的损伤增量,说明红砂岩试件存在天然损伤且在第一个循环加载过程中原生微裂纹变形远大于新生裂纹的扩展.

当应力水平为 5%~75%时,应力上限未超过门槛值,试件未破坏,损伤变量趋于稳定,损伤停止发展;当应力水平为 25%~95%时,试件迅速破坏,损伤变量急速增大;应力水平为 15%~85%时,试件损伤变量演化呈现三个阶段:起始阶段、稳定扩展阶段和加速破坏阶段.起始阶段损伤发展较快,曲线斜率较大;稳定扩展阶段损伤增长速率减小并趋于稳定,损伤增量较小;加速破坏阶段曲线笔直上升,增长速率陡然增大,损伤增量再次变大.由表 6 可得,损伤增量在起始阶段(第 1~4 循环)数值为 8.97×10^{-2} ,稳定扩展阶段(第 4~12 循环)数值为 7.69×10^{-2} ,加速破坏阶段(第 12~15 循环)数值为 2.308×10^{-1} ,可知循环过程中的损伤增量绝大部分产生于加速破坏阶段且其循环次数只占据疲劳寿命的 1/5;红砂岩破坏模式表现为一定循环后损伤突然增大的突发性破坏.

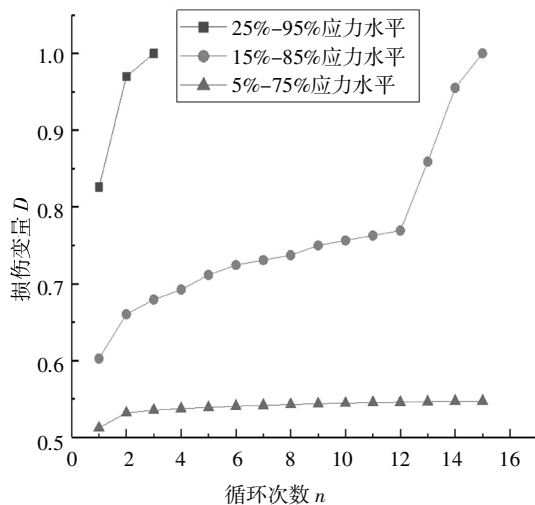


图 8 不同应力水平损伤变量-循环次数关系

Fig.8 The relationship between the number of cycles and the variable damage at different stress levels

2.3 能量演化规律

岩石破坏必然伴随着能量变化.外荷载对试件做功输入能量,经循环加卸载作用后能量一部分存储于试件内部用于弹性变形,一部分以裂隙表面能、声发射能、动能等形式耗散.

单轴循环加卸载过程中,试件只受轴向荷载作用,因此根据热力学和能量观点,循环过程中试件只需考虑由轴向荷载引起的能量变化,对于单个循环

来说,有:

$$W_i = \int F_i du_i = \pi r^2 h \int \sigma_i d\epsilon_i. \quad (2)$$

式中: r 为试件半径; h 为试件高度, W_i 、 F_i 、 u_i 、 σ_i 及 ϵ_i ($i=1,2,\dots$) 分别为第 i 个循环中轴向荷载所做的功、轴向压力、轴向位移、轴向应力及轴向应变.

记单个循环过程轴向荷载做功为体积能 U_+ ,则有 $U_+ = W_i$;记弹性变形能为 U_- ,耗散能为 U ; U_+ 可通过循环过程中加载段曲线积分求得, U_- 可通过循环过程中卸载段积分求得,有:

$$U = U_+ - U_- = \pi r^2 h \left(\int \sigma_i^+ d\epsilon_i^+ - \int \sigma_i^- d\epsilon_i^- \right). \quad (3)$$

式中: σ_i^+ 、 ϵ_i^+ 分别为第 i 个循环加载过程的应力和应变; σ_i^- 、 ϵ_i^- 分别为第 i 个循环卸载过程的应力和应变.记单位体积的耗散能为 U_1 ,试件体积为 V ,有:

$$U_1 = \frac{U}{V}. \quad (4)$$

选取典型试件,计算单位体积各类能量见表 8,单位体积能、单位弹性变形能和单位耗散能随循环次数关系如图 9 所示.

由图 9 可知,体积能随循环次数呈先减小,然后保持稳定再增大的趋势,最后一个循环体积能减小表明试件裂纹已经贯通,只需要较少能量即可使试件破坏.弹性变形能随循环次数增加逐渐增大直至稳定,临近破坏时有所减小.这是因为临近破坏时试件内部裂纹发育充分,试件弹性减弱.

表 8 15%~85% 应力水平单位体积各类能量演化规律

Tab.8 Various energy evolution laws per unit volume

循环次数 n	from 15% to 85% stress level $10^{-3} \text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$		
	体积能	弹性变形能	耗散能
1	17.16	10.03	7.13
2	13.61	11.95	1.66
3	13.89	12.13	1.76
4	14.04	12.19	1.85
5	14.07	12.33	1.74
6	14.07	12.45	1.63
7	14.04	12.50	1.54
8	14.04	12.52	1.51
9	14.04	12.53	1.51
10	14.06	12.54	1.51
11	14.09	12.54	1.55
12	14.16	12.48	1.67
13	17.33	11.82	5.51
14	17.65	12.19	5.46
15	14.15	—	—

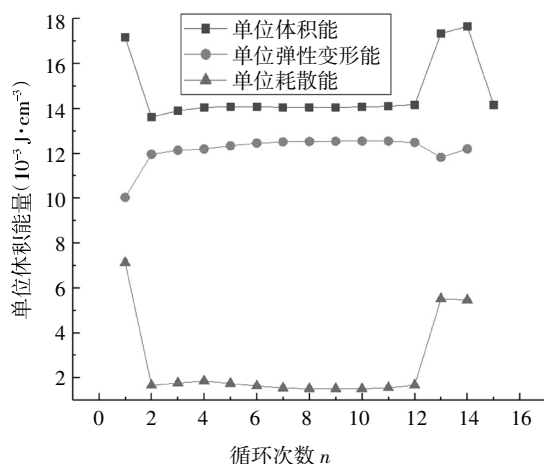


图9 典型试件单位体积各类能量与循环次数关系

Fig.9 The energy per unit volume depends on the number of cycles

耗散能呈现在开始阶段较大但随循环次数增多而减小,在稳定阶段相对恒定,临近破坏时又急剧增大的规律.其原因在于循环开始阶段原生裂纹的挤压、摩擦产生大量塑性变形需要消耗大量能量;试件压密后性质均匀,耗散能主要用于已有塑性区的二次变形;临近破坏时裂纹贯通,不可逆变形急剧增长,耗散能随之突然增大.从数值上来看,耗散能在大部分循环过程中为 $1.51 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^3$ 左右,破坏时耗散能达到 $5.46 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^3$;耗散能增大到接近4倍,说明红砂岩破坏必然伴随着耗散能的急剧增大.

3 结论

1)红砂岩在低频单轴循环加卸载条件下表现出明显的高脆性特性,其应力上限疲劳破坏门槛值在75%~85%应力比之间.循环加卸载应力幅值不变的情况下,随着应力上限提高,其疲劳寿命急剧减少;应力上限低于门槛值时,红砂岩不会破坏.

2)红砂岩在低频单轴循环加卸载条件下轴向应变发展规律具有先快、后慢、再加速破坏的三阶段特征;滞回环演变呈现“疏—密—疏”特征,滞回环形状也体现出“胖—瘦—胖”的发展规律.其本质原因在于循环开始阶段岩石内部原生脆弱部分先产生形变,随循环进行脆弱部分被压密;稳定阶段岩石性质较为均匀,微裂纹稳定扩展;破坏阶段微裂纹贯通而产生大量变形直至试件宏观破裂.滞回环演化规律反映了试件内部应力、裂纹的动态调整,滞回环面积

越大,试件疲劳寿命越低.

3)红砂岩疲劳破坏实质是岩石内部损伤不断增长直至破坏的过程,其损伤过程分为起始阶段、稳定扩展阶段和加速破坏阶段.损伤增长速率呈现快—慢—迅速加快的规律;绝大部分的损伤增量(约占总量60%)产生于加速破坏阶段(其循环次数约占疲劳寿命的20%),表明红砂岩破坏模式属于突发性破坏.

4)研究了低频单轴循环加卸载条件下红砂岩的能量演化规律.弹性能先随循环次数增加而增大直至稳定,试件破坏前裂隙发育导致其弹性减弱,弹性能有所减小;耗散能在循环开始时较大,随循环次数增多先减小后保持相对稳定,临近破坏时突增至约4倍;表明耗散能急剧增大预示着岩石将要破坏.

参考文献

- [1] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. Mechanics of solid materials [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 29—33.
- [2] 王进, 宫凤强. 红砂岩单轴压缩试验的率效应研究[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(1): 56—63.
WANG J, GONG F Q. Study on rate effect of uniaxial compression test for red sandstone [J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(1): 56—63. (In Chinese)
- [3] 苏承东, 付义胜. 红砂岩三轴压缩变形与强度特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3164—3169.
SU C D, FU Y S. Experimental study of triaxial compression deformation and strength characteristics of red sandstone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3164—3169. (In Chinese)
- [4] 陈绍杰, 郭宇航, 黄万朋, 等. 粒度对红砂岩力学性质影响规律与机制试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 8—14.
CHEN S J, GUO Y H, HUNG W P, et al. Experimental study of influence regularity and mechanism of particle size on mechanical properties of red sandstone [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 36(6): 8—14. (In Chinese)
- [5] 邹乾胜. 酸性环境饱水时间对红砂岩力学参数劣化规律研究[J]. 能源与环保, 2017, 39(11): 170—174.
ZOU Q S. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of red sandstone with saturation time acid environment [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(11): 170—174. (In Chinese)
- [6] 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.
- XIN Y J, AN D C, LI M Y, *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. (In Chinese)
- [7] 谢文健, 龚函, 刘勇锋, 等. 分级加载条件下红砂岩蠕变特性试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(6): 34—39.
- XIE W J, GONG C, LIU Y F, *et al.* Experimental study on creep characteristics of red sandstone under step loading [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(6): 34—39. (In Chinese)
- [8] 赖荣辉, 陈亚南, 陈自海. 分级加卸载下红砂岩蠕变破坏能量耗散特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 200—204.
- LAI R H, CHEN Y N, CHEN Z H. Study on energy dissipation features of red sandstone creep failure under step loading and unloading tests [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 200—204. (In Chinese)
- [9] 宋义敏, 邢同振, 赵泽鑫, 等. 红砂岩变形演化及声发射主频特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 362—368.
- SONG Y M, XING T Z, ZHAO Z X, *et al.* Experimental study on deformation evolution and acoustic emission dominant-frequency characteristics of red sandstone [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 362—368. (In Chinese)
- [10] 戴聪聪, 程铁栋, 宗路, 等. 基于改进 EEMD 的红砂岩声发射信号的频谱特性研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(16): 118—123.
- DAI C C, CHENG T D, ZONG L, *et al.* A study on spectrum characteristics of red sandstone acoustic emission signals based on improved EEMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16): 118—123. (In Chinese)
- [11] 陈康. 红砂岩单轴压缩与短时蠕变破坏声发射试验[J]. 现代矿业, 2016, 32(3): 186—188.
- CHEN K. Acoustic emission tests of uniaxial compressive failure and short-term creep compressive failure of red sand-stone [J]. Modern Mining, 2016, 32(3): 186—188. (In Chinese)
- [12] 张振华, 孙钱程, 李德忠, 等. 周期性渗透压作用下红砂岩渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 937—943.
- ZHANG Z H, SUN Q C, LI D Z, *et al.* Experimental study on permeability characteristics of red sandstone under cyclic seepage pressures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 937—943. (In Chinese)
- [13] 刘晓明, 徐汉飞, 赵明华. 基于分形理论的红层软岩崩解性消除方法研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2013, 40(6): 27—32.
- LIU X M, XU H F, ZHAO M H. Research on methods of eliminating the slacking properties of red beds soft rock based on fractal theory [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(6): 27—32. (In Chinese)
- [14] 刘晓明, 刘凯, 梁新权, 等. 基于分形理论的红层软岩填料缩尺料制备方法 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2018, 45(11): 127—132.
- LIU X M, LIU K, LIANG X Q, *et al.* Scale sample preparation method of red bed weak rock filling material based on fractal theory [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11): 127—132. (In Chinese)
- [15] 周子龙, 吴志波, 赵云龙, 等. 点载荷循环加载下红砂岩疲劳破坏特性试验分析[J]. 科技导报, 2014, 32(23): 45—49.
- ZHOU Z L, WU Z B, ZHAO Y L, *et al.* Test and analysis on fatigue failure properties of red sandstone under cyclic point loading [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(23): 45—49. (In Chinese)
- [16] ZHOU Z L, WU Z B, LI X B, *et al.* Mechanical behavior of red sandstone under cyclic point loading [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(8): 2708—2717.
- [17] 李志成, 刘建锋, 边宇, 等. 三轴循环加卸载过程中盐岩声发射演化特征分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1566—1572.
- LI Z C, LIU J F, BIAN Y, *et al.* Characteristic analysis on rock salt account emission evaluation in the triaxial loading and unloading process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(6): 1566—1572. (In Chinese)
- [18] 王友新, 周宗红, 付斌, 等. 大理岩单轴循环加卸载力学特性研究[J]. 煤矿机械, 2016, 37(9): 26—29.
- WANG Y X, ZHOU Z H, FU B, *et al.* Mechanical properties of marble under uniaxial cyclic loading unloading [J]. Coal Mine Machinery, 2016, 37(9): 26—29. (In Chinese)
- [19] 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 B, ZHOU Z H, WANG H Q, *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. (In Chinese)
- [20] 王大明, 周宗红, 付斌, 等. 大理岩单轴循环加卸载碎屑分形研究[J]. 矿冶, 2018, 27(4): 25—29.
- WANG D M, ZHOU Z H, FU B, *et al.* Clastic fractal research of marble under uniaxial cyclic loading and un-loading [J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(4): 25—29. (In Chinese)
- [21] 谷中元, 周科平. 单向循环加载下花岗岩力学特性及红外分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(8): 146—151.
- GU Z Y, ZHOU K P. Mechanical properties and infrared analysis of granite under uniaxial cyclic loading [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(8): 146—151. (In Chinese)
- [22] 陈璐. 循环载荷下深部花岗岩的破坏机理研究 [J]. 中国矿业, 2015, 24(S2): 216—220.
- CHEN L. The study of failing mechanism of deep granite under cyclic loading [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(S2): 21. (In Chinese)