

DOI: 10.11779/CJGE201510017

周期荷载作用下黄砂岩疲劳破坏变形特性试验研究

卢高明^{1, 2}, 李元辉^{1, 2}, 张希巍^{1, 2}, 刘建坡^{1, 2}

(1. 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: 为研究周期荷载对工程岩体长期稳定性的影响作用, 利用 Rockman207 岩石力学试验系统对黄砂岩试件进行了单轴条件下不同上限应力和应力幅值的周期荷载疲劳试验。试验结果表明: 黄砂岩的疲劳破坏受到静态应力-应变全过程曲线轴向、环向以及体积变形量的控制, 在控制曲线的峰值强度或峰值强度之后, 疲劳试验过程中会出现“初始破坏”; 黄砂岩疲劳破坏轴向和环形不可逆变形的 3 阶段发展规律的本质影响因素是产生的应变速率不同, 黄砂岩的疲劳破坏过程是轴向和环向不可逆变形不断累积的过程; 在一定条件下, 黄砂岩的循环次数-上限应力曲线 ($N-S$ 曲线) 可以用来预测岩石的疲劳寿命。

关键词: 岩石力学; 周期荷载; 疲劳特性; 不可逆变形; 疲劳寿命

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)10-1886-07

作者简介: 卢高明(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石力学等方面的研究。E-mail: gaoming_lu@foxmail.com。

Fatigue deformation characteristics of yellow sandstone under cyclic loading

LU Gao-ming^{1, 2}, LI Yuan-hui^{1, 2}, ZHANG Xi-wei^{1, 2}, LIU Jian-po^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Shenyang 110819, China; 2. College of Resources and

Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to study the long-term stability of engineering rock mass under cyclic loading, various uniaxial tests are conducted on yellow sandstone under different maximum stresses and stress amplitudes using the rock mechanics test system Rockman207. The laboratory investigation results show that the fatigue failure of yellow sandstone is controlled by the axial strain, lateral strain and volumetric strain of the complete stress-strain curve. There is an initial failure in the process of fatigue tests, and the initial failure occurs at peak strength or behind peak strength of the control curve. The difference of strain rate is the essential factor of 3 stages of the axial and lateral irreversible deformation development laws, and the fatigue failure process of yellow sandstone is the accumulating process of axial and lateral irreversible deformations. The fatigue life of yellow sandstone can be predicted by using the cycles-maximum stress curve ($N-S$ curve) under certain conditions.

Key words: rock mechanics; cyclic loading; fatigue property; irreversible deformation; fatigue life

0 引言

处于低频震源的工程岩体通常处于反复加卸载过程, 周期荷载下岩石的力学特性对工程岩体的长期稳定性具有重要的影响作用^[1-3]。已有研究成果表明, 周期荷载下岩石的变形破坏机制与静荷载下岩石的力学特性具有密切联系, 但也有明显的不同。因此研究周期荷载下岩石的疲劳特性及其破坏机制对于评价工程岩体的长期稳定性具有重要的理论意义和工程价值, 这也是目前岩石力学领域备受关注的前沿课题之一^[4-7]。葛修润等^[8]、章清叙等^[9]对不同岩石试件单轴和三轴状态下的疲劳破坏变形特性进行了较为系统的试验研究。冯春林等^[10]研究了不同上限应力和振幅条件下白砂岩的单轴疲劳特性。郭印同等^[11]进行了盐岩单轴循环荷载作用下的疲劳试验, 研究了盐岩的疲劳强度、

变形及损伤特性。文献[8~11]均从轴向变形角度出发研究了周期荷载下岩石的普遍疲劳特性: 岩石疲劳破坏时的变形量受到静态应力-应变全过程曲线的控制; 岩石轴向不可逆变形发展划分为初始变形、等速变形和加速变形 3 个阶段, 3 个阶段不可逆变形的累积导致了岩石的破坏。Erarslan 等^[12]对 Brisbane 凝灰岩圆盘试件进行了不同应力幅值的疲劳试验, 借助于扫描电镜等手段研究了岩石的疲劳损伤机制及其与断裂韧性的关系。Song 等^[13]研究了不同加载频率对岩石

基金项目: 教育部基本科研业务费项目 (N120701001); 教育部基本科研业务费项目 (N120801002); 教育部博士点基金项目 (20130042110010); “十二五”国家科技攻关计划项目 (2013BAB02B01)

收稿日期: 2015-03-16

单轴和三轴疲劳特性的影响, 并通过岩石的应力-寿命曲线来预测岩石疲劳破坏的上限应力。

本文利用东北大学岩石力学实验室和长春朝阳试验机厂联合研制的 Rockman 207 岩石力学试验系统^[14], 从轴向变形和环形变形对比分析的角度, 对周期荷载下黄砂岩的疲劳变形特性进行了研究和分析, 得出了周期荷载作用下黄砂岩轴向变形和环向变形的疲劳破坏控制量及疲劳破坏过程中不可逆变形的发展规律。

1 试验试件、设备及试验方法

1.1 试件的制备与选择

试验采用的黄砂岩试样取自云南昆明。为了保证试验结果的一致性和可比性, 避免不同的采样地点和采样深度给试验结果带来的差异性, 试验采用的试件均从同一块岩样上钻孔取得, 钻孔取芯结果如图 1 所示。按照国际岩石力学学会 ISRM 建议的实验室规范要求, 把取得的岩芯加工成直径为 50 mm, 高为 100 mm 的圆柱型标准试件, 试件两个端面的平整度误差小于 0.02 mm。在自然风干状态下对加工制得的试件进行 P 波波速和密度测试, 剔除破损和波速、密度异常的试件。



图 1 黄砂岩钻孔取芯结果

Fig. 1 Coring results of yellow sandstone

1.2 矿物成分与基本物理特性

扫描电镜分析表明, 该黄砂岩呈细粒结构。X 射线分析结果表明, 该黄砂岩的主要成分为: 石英 (66.7%)、长石 (25.7%)、方解石 (3.4%)、黏土矿物总量 (4.2%)。该黄砂岩试件密度为 2.28~2.30 g/cm³, 测得的 P 波波速为 2150~2300 m/s, 平均单轴抗压强度为 87 MPa。

1.3 仪器介绍及试验方法

试验所采用的仪器是东北大学和长春朝阳试验机厂联合研制的 Rockman 207 硬岩三轴试验系统^[14]。该试验系统是在高刚度岩石三轴系统 TAW2000 和岩石

流变系统 TLW2000 的基础上, 结合东北大学的具体研发要求而制造。测量变形采用由美国 Macro Sensors 公司生产耐高温、高压内置超小型 LVDT 传感器, 该位移传感器能够较好地捕捉岩石试件破坏后的峰后应变。试验系统具有 3 个独立的 LVDT 测量和反馈通道, 由 Moog 伺服阀和 Doli 控制器联合工作控制轴向加载, 以轴向或径向 LVDT 信号作为反馈控制, 为获得硬岩的破坏全过程应力-应变曲线提供了条件。

本文制定试验方案主要包括静态全过程试验和疲劳试验。静态全过程试验为疲劳试验控制指标的选择和门槛值的确定提供了重要依据, 静态试验采用环向变形控制, 加载速率为 0.1 mm/min。周期荷载下的疲劳试验采用载荷控制, 试验过程有两部分组成: 第一部分为静态加载过程, 由应力为零加载至上限应力, 速率为 1 kN/s; 第二部分为周期荷载加载, 从上限应力加载到试件破坏, 加载波形为余弦波, 频率为 0.2 Hz, 加载波形特征参数如图 2 所示。图中各参数意义分别为: σ_{\max} 为周期荷载的上限应力; σ_{\min} 为周期荷载的下限应力; $\Delta\sigma$ 为幅值荷载, T 为周期, f 为频率, $f=1/T$ 。

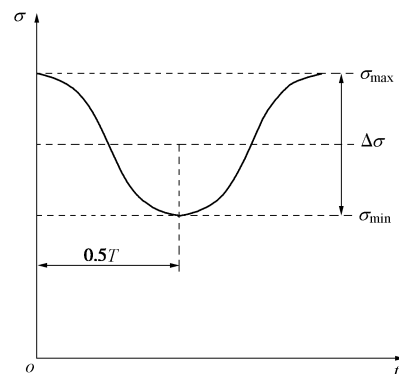


图 2 余弦波周期荷载示意图

Fig. 2 Sketch of cosine wave cyclic loading

本文试验根据黄砂岩疲劳破坏的门槛值^[15], 通过固定下限应力比 0.30, 上限应力比分别为 0.85, 0.90 和 0.95; 固定上限应力比 0.90, 下限应力比分别为 0.20, 0.30 和 0.40, 采用一种加载波形和频率, 主要研究不同上限应力和振幅对黄砂岩疲劳特性的影响。

2 试验结果及分析

2.1 黄砂岩试件的破坏形式

岩石试件的单轴压缩破坏模式是较为复杂的。该黄砂岩试件 (图 3 (a)) 有一个沿近似对角贯穿整个试件的主剪切破坏面, 除此之外, 还存在少量的局部剪切破坏面和拉张破坏面。尤明庆等^[16]认为岩样内拉

张破坏根源在于剪切滑移, 岩石内材料的最初破坏是剪切滑移, 剪切滑移产生垂直于轴向的拉力, 使试件产生沿轴向的局部张拉破坏, 随着剪切面的不断增大, 局部的拉张破坏逐个发生, 直至剪切破坏面贯穿整个试件。由于试验机压头的端部效应, 局部的剪切破坏面和拉张破坏面多发生在试件端部沿对角的外侧。该黄砂岩试件的主剪切破坏面并非 Coulomb 准则^[17]所预示的平面, 而在试件的端部为部分圆锥面, 显然尤明庆的研究更为详尽。



图3 黄砂岩试件破坏模式

Fig. 3 Failure modes of yellow sandstone specimens

周期荷载下的疲劳破坏模式 (见图 3 (b)) 是与轴向近乎平行的拉伸劈裂破坏。在周期轴向压应力的作用下, 试件将产生横向拉应力, 在横向拉应力的作用下, 试件首先在缺陷位置出现应力集中, 产生近似平行于轴向方向的微裂纹, 随着循环次数的增加, 损伤逐渐积累, 微裂纹沿平行于试件轴线的方向逐渐发展成宏观裂纹。随着损伤和宏观裂纹的进一步发展, 导致试件承载能力的降低, 直至不能达到其上限应力。

2.2 疲劳破坏全过程应力 - 应变曲线

为了确定黄砂岩疲劳试验的控制指标和进行对比分析, 对黄砂岩试件进行了静态单轴压缩试验, 得到的静态全过程应力 - 应变曲线如图 4 所示, 由于前期试件选取严格, 试验结果的离散性得到了有效控制, 静态曲线平均值与疲劳破坏试验曲线的对比结果如图 5 所示。

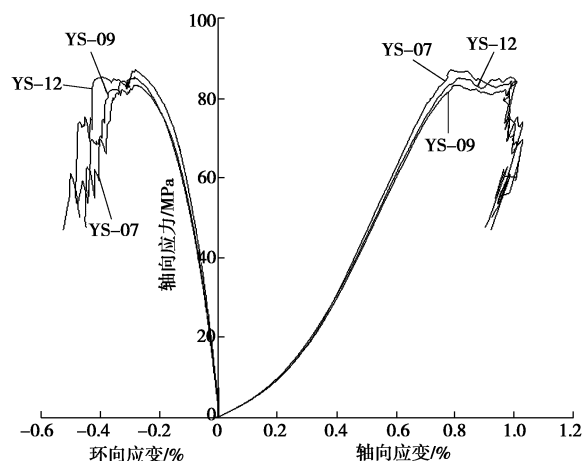


图4 静态单轴压缩全过程应力 - 应变曲线

Fig. 4 Whole process of stress-strain curve under static uniaxial compression

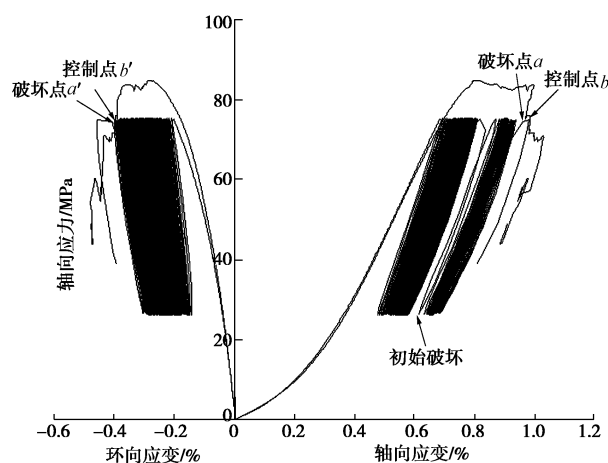


图5 黄砂岩试件 YS-13 疲劳试验应力 - 应变曲线

Fig. 5 Fatigue stress-strain curves of yellow sandstone specimen YS-13

从图 5 中的轴向应变看出, 在周期荷载加载的过程中, 该黄砂岩试件在最终的疲劳破坏之前发生了“初始破坏”, 此现象发生在静态曲线峰值强度或峰值强度对应的应变之后, 产生了较大的变形量。由于“初始破坏”后的残余承载能力大于其上限应力, 试件在“初始破坏”后依旧能够进行周期荷载下的疲劳试验。该黄砂岩的疲劳试验过程中, 每个试件的“初始破坏”现象会发生一或两次, 这可能与岩石的脆性条件相关。从试件 YS-13 的应力应变曲线来看, 环向应变的“初始破坏”现象没有轴向应变表现的明显。

2.3 疲劳破坏变形控制量

葛修润等在文献[3]中提出岩石在循环荷载作用下发生疲劳破坏的控制量为变形总量, 在轴向变形、环向变形和体积变形三者中, 尤以体积变形作为控制量为最佳, 之后在文献[8, 9]中通过大量试验对单轴和三轴条件下岩石疲劳破坏的轴向变形控制量进行了

表 1 黄砂岩单轴疲劳破坏试验结果

Table 1 Test results of uniaxial fatigue failure of yellow sandstone

试件 编号	上限 应力 /MPa	下限 应力 /MPa	应力 幅值 /MPa	疲劳 寿命 /次	轴向破 坏点应 变/%	轴向控 制点应 变/%	轴向 误差 /%	环向破 坏点应 变/%	环向控 制点应 变/%	环向 误差 /%
YS-18	82.7	27.2	55.5	38	1.013	0.991	0.022	-0.366	-0.380	0.014
YS-14	78.5	27.2	51.3	181	0.951	0.979	-0.028	-0.402	-0.391	-0.011
YS-21	76.4	27.2	49.2	507	0.968	0.981	-0.013	-0.411	-0.395	-0.016
YS-13	74.3	27.2	47.1	1131	0.959	0.983	-0.024	-0.415	-0.398	-0.017
YS-25	78.5	34.8	43.7	422	0.984	0.979	0.005	-0.357	-0.391	0.034
YS-26	78.5	17.4	61.1	138	0.964	0.979	-0.015	-0.367	-0.391	0.024

研究。本文试验得到的不同上限应力和幅值条件下黄砂岩轴向应变和环向应变的疲劳破坏控制量情况如表 1 所示。以试件 YS-13 为例（见图 5），上限应力比为 0.85，应力幅值为 $0.55\sigma_c$ ，轴向应变的破坏点 a 和控制点 b ，破坏点误差为 -0.024% ；环向应变破坏点 a' ，控制点 b' ，破坏点误差为 -0.017% 。通过疲劳曲线和静态全过程曲线的对比，以及表 1 中的数据，可知黄砂岩疲劳破坏时轴向应变量和环向应变与周期荷载上限应力所对应的静态全过程曲线峰后部分应变相当，并且这种现象具有普遍性。

在保持下限应力不变时，黄砂岩的疲劳寿命随着上限应力的升高而降低；在保持上限应力不变时，黄砂岩的的疲劳寿命随着下限应力的降低而降低。可见上限应力和应力幅值对岩石的疲劳寿命有明显的影响作用。黄砂岩试件在疲劳破坏时的轴向或环向控制点的误差并不随着上限应力和应力幅值等试验参数的改变而有显著变化，这都说明岩石的疲劳破坏受到静态应力应变曲线轴向和环向变形量的控制。

根据体应变与轴向应变和环向应变的关系，得到的体应变疲劳曲线（见图 6）同样受到静态应力 - 应变曲线变形量的控制。选择体积变形作为疲劳破坏控制量，还避免了岩石静态破坏以第二类形式发生时轴向变形不能作为岩石疲劳破坏控制量的缺点^[3]。

综上所述，黄砂岩疲劳破坏受到静态应力 - 应变曲线轴向应变、环形应变和体应变的控制，疲劳破坏的变形量与周期荷载上限应力在静态全过程曲线后区对应的变形量相当。可通过静态全过程曲线的变形量来预测岩石的疲劳破坏，从而节省大量人力、物力，这对工程实际具有重要指导意义。

2.4 疲劳破坏变形分析

图 7 和图 8 分别为黄砂岩试件 YS-13 疲劳破坏的轴向应变和环向应变与疲劳寿命的发展关系曲线，为了便于和轴向应变曲线对比分析，将环向应变转换成了正值。图中椭圆形标记的地方为上文提到的“初始

破坏”。周期荷载下，轴向应变和环向应变与循环次数（或时间）的关系也呈现和加载波形相应的周期性变化，为了区分各部分应变，把周期荷载下每次循环中的上限应力对应的应变定义为上限应变，下限应力对应的应变定义为下限应变，疲劳曲线中各种应变关系的示意图如图 9 所示。由图 9 可知，每次循环中的总应变 ε_{\max} 可以分为弹性应变 ε^e 和不可逆应变 ε^p ，上限应变即为总应变 ε_{\max} ，下限应变为不可逆应变 ε^p ，它们的关系如下式所示：

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad , \quad (1)$$

$$\Delta \varepsilon^p = \varepsilon_{i+1}^p - \varepsilon_i^p \quad . \quad (2)$$

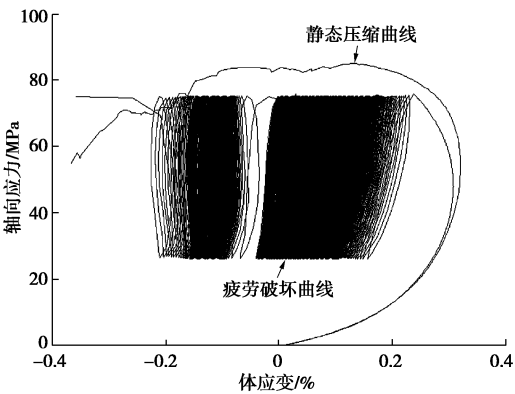


图 6 黄砂岩试件 YS-13 体应变控制曲线

Fig. 6 Volumetric strain control curve of yellow sandstone specimen YS-13

每次循环中的下限应变即为不可逆应变，把应变 - 循环次数关系曲线中的每个下限应变点连接起来，即为不可逆应变与循环次数（或时间）的发展趋势曲线，如图 8 中的倒“S”形红线所示。葛修润等^[8]指出岩石疲劳过程的轴向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 3 个阶段，从图 8 中的红色倒“S”曲线来看，黄砂岩疲劳破坏变形的 3 阶段发展规律对于环向变形也同样适用。根据图 7 和图 8 的对比结果，该黄砂岩环向不可逆变形的第 1、

第 3 变形阶段比轴向不可逆变形相应的阶段要长, 第 2 变形阶段相应较短, 曲线表现出来的倒“S”形也比轴向不可逆变形更明显, 在该黄砂岩的疲劳试验中, 这种现象具有普遍性。笔者在试验的过程中根据环向变形来预测试件的疲劳破坏情况, 其对试验过程具有一定指导意义。

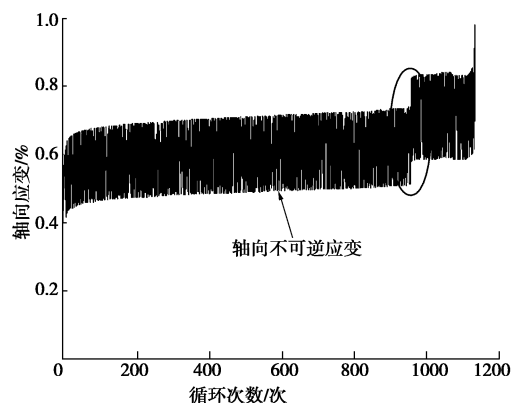


图 7 试件 YS-13 疲劳破坏轴向应变发展规律

Fig. 7 Axial strain fatigue damage development law of specimen

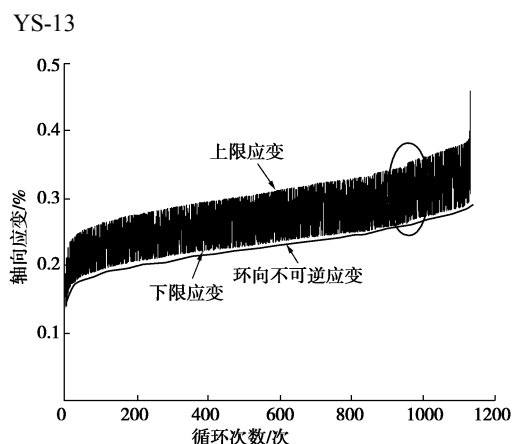


图 8 试件 YS-13 疲劳破坏环向应变发展规律

Fig. 8 Lateral strain fatigue damage development law of specimen

YS-13

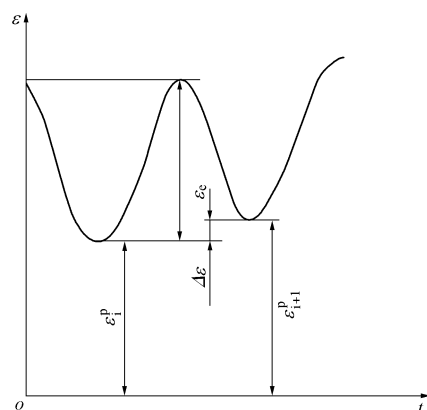


图 9 疲劳曲线各应变关系示意图

Fig. 9 Sketch of fatigue curves for various strain relations

周期荷载作用下, 黄砂岩不可逆变形的 3 个阶段具有不同的发展演化规律。体现在应力-应变曲线上, 3 个阶段滞回环的密度相应地呈现疏-密-疏发展趋势, 滞回环的宽度呈现宽-窄-宽发展趋势; 体现在应变-循环次数(或时间)曲线上, 3 个阶段的 $\Delta\epsilon^p$ 值表现为先减小后增大的发展趋势。滞回环的疏密程度、宽窄程度以及 $\Delta\epsilon^p$ 值的变化, 这 3 种发展规律产生的本质影响是不可逆变形 3 个阶段应变速率的变化规律: 在初始变形阶段应变速率发展较快, 不可逆变形快速增长; 等速变形阶段应变速率较小, 不可逆变形趋于稳定增长趋势; 加速变形阶段应变速率急剧增加, 此阶段岩石破坏, 产生大量塑性变形。3 个阶段不可逆变形的累积, 达到其上限应力与静态曲线所对应的变形量相当时, 岩石试件最终发生疲劳破坏。

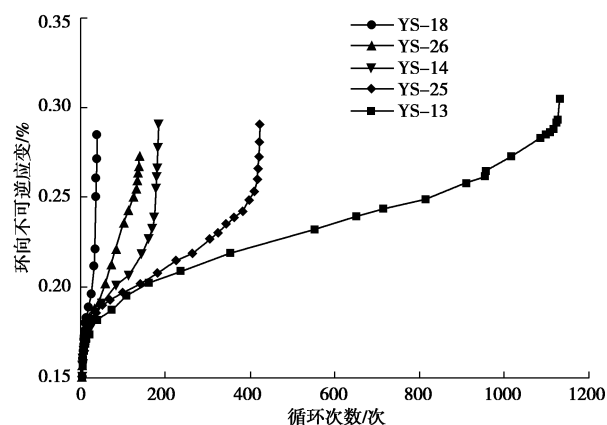


图 10 环向不可逆变变与循环次数关系

Fig. 10 Relationship between lateral irreversible strain and cycles

图 10 给出了不同上限应力和应力幅值条件下各试件环向不可逆变形与循环次数的发展规律曲线, 为了便于观察, 将环向应变转换成了正值。上限应力和应力幅值对岩石的疲劳寿命有显著的影响作用, 不同的上限应力和幅值条件下不可逆变形的 3 个阶段的比例发生了明显变化。下限应力不变时提高上限应力, 或者上限应力不变时降低下限应力, 初始变形和加速变形阶段所占的比例增加, 等速变形阶段所占的比例相应减小, 同时等速变形阶段的应变速率也将增大, 这就使得试件不可逆变形的平均应变速率明显增大, 从而加快了试件破坏的步伐, 使其疲劳寿命降低。

事实上, 根据黄砂岩疲劳破坏的体变形与轴向变形和环向变形的函数关系, 黄砂岩疲劳破坏的体变形同样符合倒“S”型曲线的 3 阶段发展演化规律。

2.5 疲劳寿命的预测

岩石材料在疲劳破坏前所经历的应力循环次数称为该岩石材料的疲劳寿命^[13], 岩石材料的疲劳强度与疲劳寿命的关系可用应力-寿命曲线 ($S-N$ 曲线) 来表示, 对于不同的循环特征有不同的 $S-N$ 曲线, 当

寿命 N 趋于无穷大时对应的应力值 S 为疲劳极限。在周期荷载作用下, 当岩石试件所受上限应力高于疲劳极限时, 每一次循环都会对岩石试件造成一定量的损伤, 并且这种损伤是可以积累的, 当损伤积累到一定程度时, 岩石试件就会发生疲劳破坏。

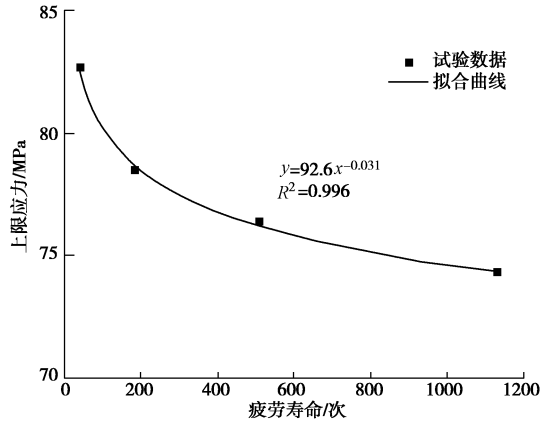


图 11 黄砂岩不同上限应力与疲劳寿命的关系

Fig. 11 Fatigue life of yellow sandstone under different maximum stresses

在下限应力为 27.2 MPa, 加载频率为 0.2 Hz 时, 该黄砂岩试件的应力 - 寿命曲线 ($S-N$ 曲线) 为图 11 中所示的不同上限应力与循环次数的拟合曲线。将应力 - 寿命曲线 ($S-N$ 曲线) 求反函数得到寿命 - 应力曲线 ($N-S$ 曲线), 如下式所示:

$$N = aS^b, \quad (3)$$

式中, N 为疲劳寿命, S 为周期荷载的上限应力 (疲劳强度), a 和 b 为拟合常数。根据式 (3) 可以预测在一定条件下岩石的疲劳寿命, 并且对于岩石疲劳破坏门槛值的确定也有一定指导作用。当该黄砂岩试件周期荷载上限应力小于 70 MPa 时, 需要加载超过 10000 次才能发生疲劳破坏。

3 结 论

(1) 黄砂岩疲劳破坏与单轴压缩破坏具有不同的破坏形式, 在最终的疲劳破坏之前发生了“初始破坏”, “初始破坏”发生在静态曲线峰值强度或峰值强度对应的应变之后, “初始破坏”后的残余强度大于其上限应力, 试件在初始破坏后依旧能够进行周期荷载下的疲劳试验。

(2) 黄砂岩疲劳破坏受到静态应力 - 应变曲线轴向变形、环向变形以及体变形的控制, 疲劳破坏时轴向变形、环向变形以及体变形的极限变形量与其上限应力在静态全过程应力 - 应变曲线所对应的变形量相当; “初始破坏”引起了循环加载过程中变形量的突变, 轴向应变的突变大于环向应变, 然而这并未影响

“岩石疲劳破坏受到静态应力 - 应变曲线的控制”这一结论。

(3) 黄砂岩疲劳破坏的轴向变形、环向变形以及体变形都符合倒“S”型曲线的 3 阶段发展演化规律; 黄砂岩不可逆变形的 3 阶段发展规律对黄砂岩疲劳破坏的本质影响是产生的应变速率的不同, 不同的上限应力和应力幅值条件改变了疲劳破坏过程的应变速率, 显著影响了黄砂岩的疲劳寿命。

(4) 在一定条件下, 根据黄砂岩疲劳寿命 (循环次数) 与上限应力的拟合关系 $N-S$ 曲线, 可以用来预测黄砂岩在不同上限应力时的疲劳寿命及确定黄砂岩疲劳破坏的门槛值, 并对工程也具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] BAGDE M N, PETROŠ V. Fatigue and dynamic energy behaviour of rock subjected to cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(1): 200 - 209.
- [2] 林卓英, 吴玉山. 岩石在循环荷载作用下的强度及变形特征[J]. 岩土力学, 1987, 8(3): 31 - 37. (LIN Zhuo-ying, WU Yu-shan. Deformation characteristics and strength of rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 1987, 8(3): 31 - 37. (in Chinese))
- [3] 葛修润, 卢应发. 循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 56 - 60. (GE Xiu-run, LU Ying-fa. Study on fatigue damage and irreversible deformation law of rock under cyclic load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(3): 56 - 60. (in Chinese))
- [4] 任建喜, 蒋 宇, 葛修润. 单轴压缩岩石疲劳寿命影响因素试验分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 47 - 50. (REN Jian-xi, JIANG Yu, GE Xiu-run. Test and analysis on rock fatigue life due to affecting factors under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 47 - 50. (in Chinese))
- [5] JIANG X, SHU-CHUN L, YUN-QI T, et al. Acoustic emission characteristic during rock fatigue damage and failure[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 556 - 559.
- [6] 张世殊, 刘恩龙, 张建海. 砂岩在低频循环荷载作用下的疲劳和损伤特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3212 - 3218. (ZHANG Shi-shu, LIU En-long, ZHANG Jian-hai. Experimental study of fatigue damage properties of sandstone samples under cyclic loading with low frequencies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2014, **33**(S1): 3212 – 3218. (in Chinese))
- [7] BAGDE M, PETROŠ V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, **42**(2): 237 – 250.
- [8] 葛修润, 蒋宇, 卢允德, 等. 周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(10): 1581 – 1585. (GE Xiu-run, JIANG Yu, LU Yun-de, et al. Testing study on fatigue deformation law of rock under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(10): 1581 – 1585. (in Chinese))
- [9] 章清叙, 葛修润, 黄铭, 等. 周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(3): 473 – 478. (ZHANG Qing-xu, GE Xiu-run, HUANG Ming, et al. Testing study on fatigue deformation law of red-sandstone under triaxial compression with cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 473 – 478. (in Chinese))
- [10] 冯春林, 吴献强, 丁德馨, 等. 周期荷载作用下白砂岩的疲劳特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 2749 – 2754. (FENG Chun-lin, WU Xian-qiang, DING De-xin, et al. Investigation on fatigue characteristics of white sandstone under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 2749 – 2754. (in Chinese))
- [11] 郭印同, 赵克烈, 孙冠华, 等. 周期荷载下盐岩的疲劳变形及损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(5): 1353 – 1359. (GUO Yin-tong, ZHAO Ke-lie, SUN Guan-hua, et al. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(5): 1353 – 1359. (in Chinese))
- [12] ERARSLAN N, WILLIAMS D. The damage mechanism of rock fatigue and its relationship to the fracture toughness of rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, **56**: 15 – 26.
- [13] SONG R, YUE-MING B, JING-PENG Z, et al. Experimental investigation of the fatigue properties of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, **64**: 68 – 72.
- [14] 张希巍, 杨成祥, 张东, 等. 红透山铜矿深部片麻岩力学行为试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 2): 3228 – 3237. (ZHANG Xi-wei, YANG Cheng-xiang, ZHANG Jian, et al. Experimental study of mechanical behaviour of deep gneiss in Hongtoushan copper mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3228 – 3237. (in Chinese))
- [15] 冯春林, 吴永丰, 冯福贤. 岩石的疲劳特性和临界应力测定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 2734 – 2740. (FENG Chun-lin, WU Yong-feng, FENG Fu-xian. Study of fatigue properties and critical stress measurement method of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 2734 – 2740. (in Chinese))
- [16] 尤明庆, 华安增. 岩石试样单轴压缩的破坏形式与承载能力的降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(3): 292 – 296. (YOU Ming-qing, HUA An-zeng. The fracture mode of rock specimen under uniaxial compression and the decrease of carrying capacity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(3): 292 – 296. (in Chinese))
- [17] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 31 – 35. (CAI Mei-feng, HE Man-chao, LIU Dong-yan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 31 – 35. (in Chinese))