

文章编号: 1000-7598-(2009) 增 1-0058-05

# 循环荷载下砂岩疲劳损伤过程的声学特性分析

樊秀峰, 吴振祥, 简文彬

(福州大学 环境与资源学院, 福州 350002)

**摘 要:** 利用电液伺服疲劳试验机系统研究了砂岩在单轴受压循环荷载作用下的疲劳损伤特性, 配合智能型超声波检测设备 & 损伤在线实时监测系统, 对砂岩试件在疲劳损伤过程中的声学参数 (超声波速、时域波幅、波形) 进行了实时的测量及详细地分析研究。结果表明, 在循环加载过程中横向超声波速随损伤的发展变化比较敏感, 呈现有规律的倒 S 型三阶段衰减现象, 可以客观地描述砂岩的疲劳损伤特性及直观地反映疲劳损伤的各个阶段; 超声波时域幅值在砂岩疲劳损伤过程中变化不稳定; 波形在砂岩损伤过程中从有规则的纺锤形逐渐发生畸变, 波形相关系数随循环次数的增长呈现整体下降趋势。研究成果进一步丰富了声学数据在疲劳损伤过程中的应用, 从声学角度探讨了岩石疲劳损伤过程的微观机制, 为进一步选择声学参数进行岩石疲劳损伤过程的跟踪识别提供试验依据。

**关 键 词:** 循环荷载; 砂岩; 疲劳损伤; 声学参数

**中图分类号:** TU 459

**文献标识码:** A

## Analysis of acoustic property of sandstone fatigue damage under cyclic loading

FAN Xiu-feng, WU Zhen-xiang, JIAN Wen-bin

(College of Enviroment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** By means of uniaxial closed-loop system and real-time observation system, with the measurement of ultrasonic wave velocity and strain at the same time; the experiments on sandstones fatigue damage are performed under constant amplitude cyclic loading. The acoustic parameters during sandstone fatigue damage including ultrasonic wave velocity, amplitude and waveform are real-time measured and analyzed in detail. Results show that the ultrasonic wave velocity varies temperamentally and reduces following inversed S-shaped line, which can be divided into three phases during fatigue damage of sandstones. The amplitude of ultrasonic wave fluctuates with damage. The waveform alters from regular fusiform to malformation; and its correlation coefficient is descending as a whole with the damage development. The micro destructive mechanism of the sandstones under cyclic loading is analyzed according to the variance of acoustic parameters. The testing results offer a choice of choosing acoustic parameters identifying rock fatigue damage process.

**Key words:** cyclic loading; sandstone; fatigue damage; acoustic parameters

## 1 引 言

岩土介质超声波测试技术是近年来发展起来的一种新技术, 主要通过测定超声波穿透岩土体后的声波波速和衰减系数了解岩土体的物理力学特性及结构特征<sup>[1]</sup>。与静力学方法相比, 超声波测试技术具有简便、快捷、可靠、经济及无破损等特点, 目前已经较成功地用于岩土体动弹性参数测试、简单岩体结构模型参数和岩体质量评价等问题。但由于

岩石材料本身的复杂性, 对于岩石的声学特性与应力状态的相关性研究, 对于声波信号中丰富的信息如何应用等, 还是尚未解决的问题。有关学者曾对岩石的超声波与应力的相关性<sup>[2-3]</sup>进行过相应的研究, 但在循环荷载作用下的疲劳损伤过程中岩石的劣化效应与超声波声学参数之间的关系的系统研究却鲜有文献报导。因此, 本文以试验为基础, 对岩石在疲劳损伤过程中的声学参数 (超声波速、时域幅值及波形) 特征进行了详细的分析研究, 充分利

收稿日期: 2009-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.40672176) 资助; 福建省自然科学基金项目 (No.2008J0243) 资助; 福州大学科技发展基金项目 (No.2007-XY-06) 资助。

第一作者简介: 樊秀峰, 女, 1975 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程与工程地质专业的教学与科研工作。E-mail: fdfxf@126.com

用丰富的声学数据,研究各种参数在疲劳损伤过程中的变化规律,寻找疲劳损伤过程中敏感变化的声学参数,可以用来跟踪描述砂岩整个疲劳损伤劣化过程。

## 2 超声波进行岩石损伤探测基本理论

岩石是一种结构复杂的介质,内部存在大量的裂隙,超声波在裂隙处将产生反射、折射、散射和绕射等二次波,给传播理论的分析带来相当大的困难。因此,利用超声脉冲波透过岩石的声学参量和相对变化情况综合分析来判别损伤程度就成为一种比较有效的方法。

### 2.1 利用超声波波速变化进行损伤识别

岩石的声速与岩石的弹性性质有关,与岩石的内部结构(是否存在缺陷及缺陷程度)有关,这是利用声速进行岩石损伤测定的理论依据,对组成材料相同的构件(岩石试件),其内部越密实,孔隙率越低,其声波波速越高,强度也越高。

声波在岩石试件中传播时,由于岩石试件完整部位与损伤部位的特性阻抗相差悬殊,界面的声反射系数近于1,因此,声波很难穿透损伤区域界面。由于低频超声波漫射的特点,声波又将沿损伤区域边缘传播,声波在损伤区域边缘处会产生折射、绕射、反射,使声测线(声波路径)拉长,所测得的声时比完整岩石试件声时要大,在计算岩石试件声速时,总是以换能器之间的直线距离 $L$ 作为声传播距离,结果有损伤处的计算声速(视声速)就会降低。

### 2.2 利用超声波波幅变化进行损伤识别

接收波波幅是表征声波穿过岩石后能量衰减程度的重要指标,接收波幅的强弱与岩石粘塑性有关,接收波幅值越低,表明岩石对声波的衰减就越大。根据岩石声波衰减的原因可知,在岩石中存在低强度区、损伤等缺陷时,吸收衰减和散射衰减增大,使得接收波波幅明显下降。波幅值通常以首波(接收信号前半个周期)的波幅为准,后续波往往受其它叠加波的干扰,影响测量结果,幅值的测量受换能器与被测构件的耦合条件影响较大。

### 2.3 利用超声波波形变化进行损伤识别

在声波传播过程中遇到岩石内部存在损伤、裂缝时会使接收波形发生畸变,因此,对接收波形的分析与研究有助于对岩石内部质量即损伤缺陷的判断,由于声波在缺陷损伤界面的反射和折射,形成

波线不同的波束,这些波束由于传播路径不同,或由于界面上产生波形转换而形成横波等原因,使得到达接收换能器的时间不同,因而使接收波形成为许多同相位和不同相位的叠加波,导致波形畸变。实践证明,凡超声脉冲在传播过程中遇到损伤缺陷,其接收波形往往发生畸变,所以波形畸变程度可以作为判断缺陷程度的参考依据。由于后续波是各种不同类型波形的叠加,同样会导致波形的畸变,因此,观察波形畸变程度应以初至波(接收的第1、第2周期的波形)为主。

## 3 砂岩疲劳损伤过程中声学参数的测量

### 3.1 试验系统

本试验所用设备为 INSTRON 公司制造的 INSTRON1304 电液伺服疲劳试验机,循环加载过程中的声波测量使用武汉岩土力学研究所研制的 RSM-SY5 智能型超声波检测仪,同时应用 INVSA-8 动态应变仪及 306DF 智能信号采集处理分析仪进行应变数据的采集(见图1)。

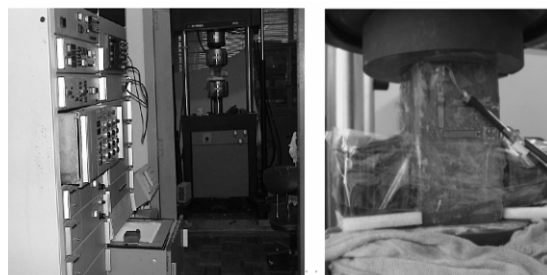


图1 试样疲劳加载及声波与应变的测量  
Fig.1 Instruments for sample fatigue loading and wave velocity vs. strain measurement

### 3.2 试样选取与加工

试验砂岩采自福建三明的沙县,位于地表较浅处,中风化,呈灰白色,块状结构。为了尽可能减小试样的离散性,试样是从同一块大的岩石上切割、加工得来,试样尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的长方体,两个端面的平整度误差小于 $0.02\text{ mm}$ 。

### 3.3 试验方法

本次试验在疲劳加载的同时,同步进行超声波速与应变的测量。在试验中为了测得有效的超声波敏感的变化点,配合使用了疲劳损伤实时监测系统<sup>[4]</sup>。同时,在试样的侧面粘贴两组 $2\text{ mm}$ 胶基电

阻应变片,测量纵向及横向应变,岩样的单轴抗压强度  $f_c = 20.02 \text{ MPa}$ , 疲劳荷载上限应力比为  $0.8 \sim 0.9$ , 下限应力比保持在  $0.1$  不变。为了消除加载频率对砂岩疲劳性能的影响, 疲劳试验加载频率均为  $5 \text{ Hz}$ , 加载波形选用正弦波。

## 4 砂岩疲劳损伤过程中声学参数变化规律分析

### 4.1 砂岩疲劳损伤过程中超声波速的变化规律

试验中超声波测试采取实时测试的方法, 无需进行卸载再测。在初始无损状态下测量砂岩的横向超声波速为  $V_0$ , 经过一定的循环次数后再测, 发现波速会发生明显的衰减, 即横向超声波速随循环次数的增长变化较为敏感。表明在循环荷载的作用下, 岩石试件内部已有的微小裂纹带开裂, 夹杂物与基体相界面错位以及裂纹不断的萌生和扩展。当超声波在传播过程中遇到这些缺陷或裂缝时, 由于超声波的绕射、反射、散射使传播路径的复杂化, 超声波的频率、相位会发生变化, 超声波波速也随着疲劳损伤的累积而逐渐降低<sup>[5]</sup>。

通过对所测试件超声波速的进一步分析发现, 砂岩试件在整个疲劳损伤过程中横向超声波速衰减的规律大致都呈倒 S 形 3 阶段发展变化, 典型试件的测试结果如图 2 所示。

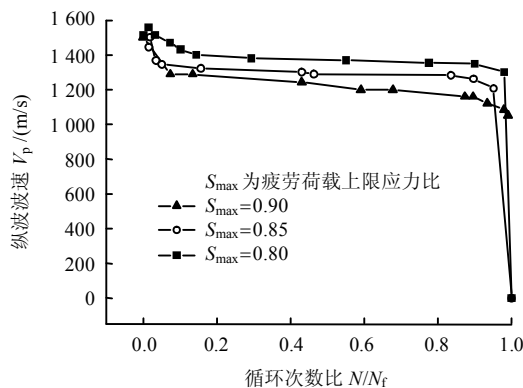


图 2 疲劳荷载下砂岩超声波速衰减规律  
Fig.2 Attenuation law of ultrasonic velocity of sandstone under fatigue load

由图可知, 在疲劳寿命的  $0.05$  倍左右时, 探测到的超声波速较初始时有不同程度的增长, 这可能归因于这个阶段砂岩被压密了。横向超声波速变化的 3 阶段的第 1 阶段占疲劳寿命的  $10\%$  左右, 是波速衰减较快的阶段; 第 2 阶段占疲劳寿命的  $85\%$  左

右, 是波速衰减相对趋于稳定的阶段; 第 3 阶段占疲劳寿命的  $5\%$  左右, 是波速急速衰减到破坏的阶段。

### 4.2 砂岩疲劳损伤过程中波幅的变化特征

此次岩石疲劳损伤试验中, 发现岩石试件的声波波幅在整个损伤过程中变化不是很稳定, 在图 3 (a) 中间阶段疲劳寿命的  $80\%$  左右期间波幅值发生波动, 但随疲劳损伤的进行呈现总体下降趋势; 图 3 (b) 中波幅波动不明显, 变化不显著, 临近破坏时突然大幅下降; 图 3 (c)、(d) 中, 波幅出现了趋势增长的现象, 而在疲劳寿命处出现急剧的下降, 也就是说, 波幅要在岩石试件已经出现宏观裂纹的情况下才会发生明显的衰减。

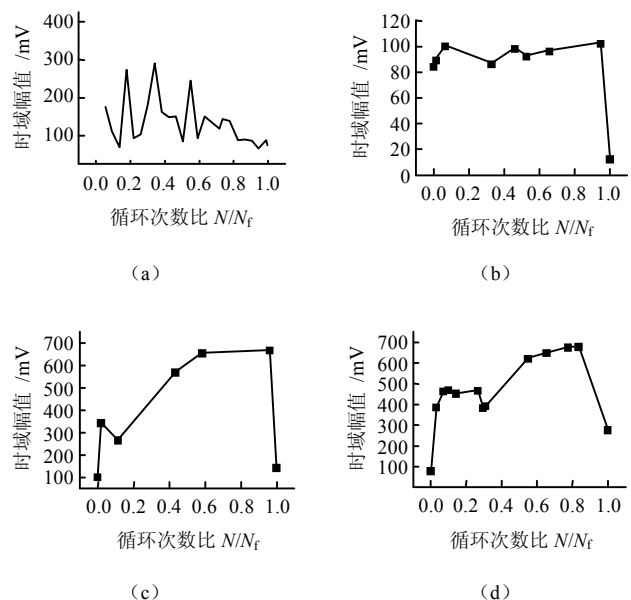


图 3 典型试件时域幅值随循环次数的变化曲线图  
Fig.3 Variation curves of the amplitude of ultrasonic wave fluctuating in terms of cycle number

### 4.3 砂岩疲劳损伤过程中波形的变化特征

#### 4.3.1 波形随损伤的变化

取典型试件疲劳循环荷载下超声波信号的波形发展过程如图 4 所示。

从图中可以看到, 接收波形也是反映岩石试件损伤状态的一个重要信息, 它对岩石试件内部的缺陷也很敏感。伴随疲劳荷载次数的增加, 岩石试件内部结构发生变化, 超声波波形跟着变化, 试件未加载之前, 即原岩试件波形显示首波陡峭, 振幅较大, 首波的后半周即达到较高振幅 (见图 4 (a)), 包络线为半圆形; 首波 (第 1 个周期的波) 波形无畸变。

超声波透过损伤岩石试件后的波形特征显示首波平缓, 振幅随着循环比的增加而减小, 反映出损伤的不断积累; 首波的后半周振幅增大不明显 (见图 4 (c)、(d)); 包络线呈喇叭形; 第 1、2 周期的波形有畸变; 到临近破坏的瞬时, 波形已完全变形 (见图 4 (e)), 当缺陷严重且范围大时, 无法接收到波形。

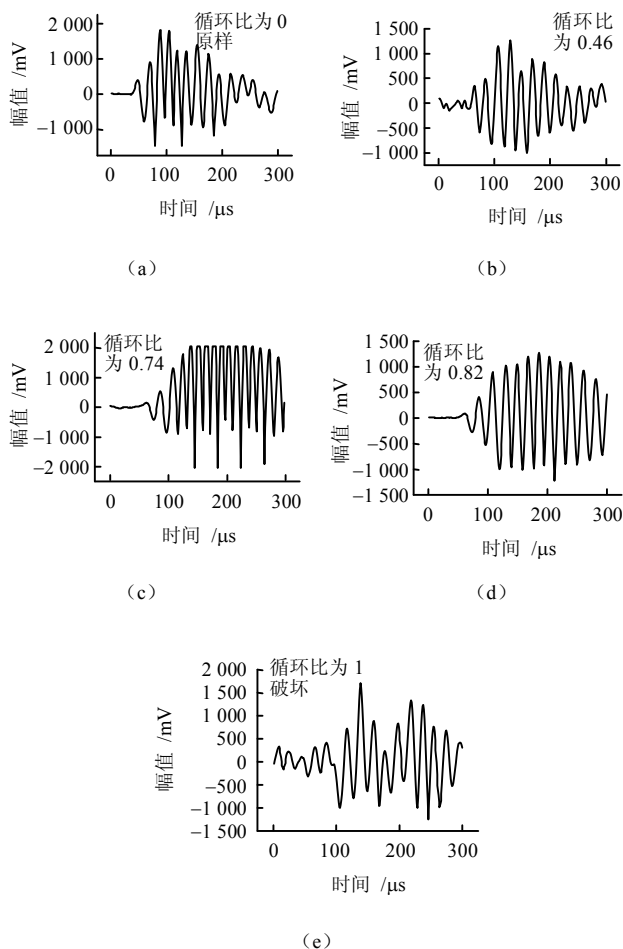


图 4 典型岩石试件损伤过程中波形变化图

Fig.4 The waveforms of ultrasonic wave varying during sandstone fatigue damage

#### 4.3.2 波形相关性分析

岩石试件损伤的超声波波形随着循环次数的增加发生渐变, 从初始岩石试件比较规则的纺锤形到最后破坏时的波形已没有什么规则, 与原始的超声波波形相差较大, 甚至相位相反。为此, 下面对波形在岩石损伤过程中变化的程度用相关系数进行衡量, 即对不同循环次数下所测得的波形与初始岩石试件波形进行相关性分析。

相关系数的定义式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中:  $r$  为相关系数, 表示  $x, y$  间关系的密切程度。

通过对试件疲劳损伤过程中超声波形进行相关性分析, 结果如图 5 所示。

从波形相关性分析图可知, 在循环荷载作用下, 随着岩石试件疲劳累积损伤不断增加, 损伤过程中超声波形的变化呈现一定程度的复杂性, 岩石试件超声波形相关系数有的单调下降 (见图 5 (b)), 有的则波动下降 (见图 5 (a)、(d)), 有的下降速度很小, 临近破坏时突然大幅下降 (见图 5 (c)); 其中在图 5 (d) 中的波形相关系数总体趋势下降, 达最低点后又发生小幅反弹, 但试件迅速破坏; 在图 5 (b) 中的波形相关系数出现了负值, 这是由于在循环荷载的作用下, 内部结构出现大幅度的塌陷, 造成波形相位完全相反所导致。

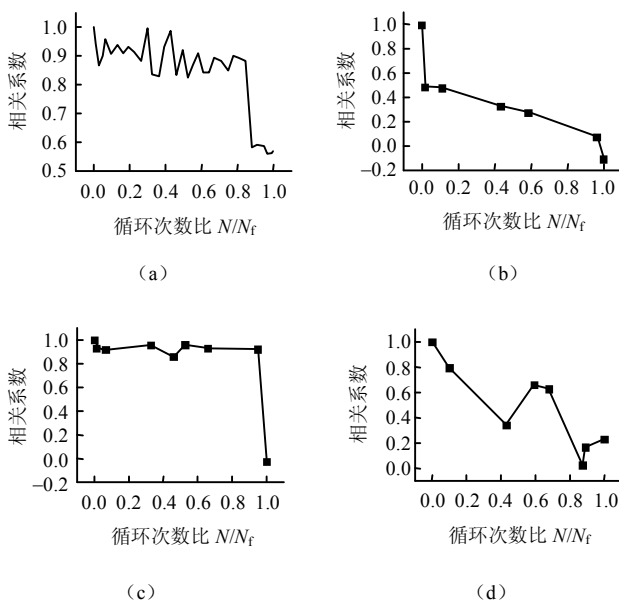


图 5 典型试件波形相关系数变化曲线图

Fig.5 Variation curves of waveform correlation coefficient

总之, 由于岩石试件本身的离散性, 波形变化本身的复杂性, 导致波形相关系数变化的多样性, 但不论哪种, 超声波波形相关系数随着循环周数的增加在整体上呈下降趋势。当试件破坏时, 其波形已经发生了实质性的变化, 不再有规则形状, 破坏时的波形与初始波形的相关性基本上都在 0.1 左右, 个别会出现负相关。

## 5 结 论

(1) 砂岩在疲劳加载过程中横向超声波速随损伤的发展变化比较敏感, 呈现有规律的 3 阶段衰减现象。

(2) 声波时域幅值随损伤变化不稳定。

(3) 声波波形在损伤过程中从有规则的纺锤形逐渐发生畸变, 波形相关系数随循环次数的增长呈现整体下降趋势。

(4) 从声学角度探讨了岩石疲劳损伤过程的微观机制, 为进一步选择声学参数进行岩石疲劳损伤过程的跟踪识别提供试验依据。

## 参 考 文 献

- [1] 伍向阳, 陈祖, 魏建新. 一种测量岩石声波速度和衰减谱的技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 895—898.
- [2] 赵明阶, 吴德伦. 单轴加载条件下岩石声学参数与应力的关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 50—54.
- [3] 赵明阶, 徐蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 720—722.
- [4] 樊秀峰, 简文彬. 岩土材料疲劳损伤过程的数值跟踪分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增 1): 85—88.
- [5] 樊秀峰, 简文彬. 砂岩疲劳特性的超声波速法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 557—563.