

文章编号: 1000-8055(2007)09-1544-06

损伤力学方法在材料低周疲劳试验中的应用研究

张国栋, 于慧臣, 何玉怀, 苏 彬

(中国航空工业第一集团公司 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 考察了低周疲劳过程中的弹性模量和应力随循环次数的变化. 研究表明: 可以用弹性模量和应力的变化来反映材料的低周疲劳损伤过程. 对没有明显循环稳定阶段并表现为循环软化响应行为的材料, 不适合用应力的变化来定量的反映材料低周疲劳的损伤过程. 用弹性模量随循环次数的演化关系得到了不同应变水平下材料的疲劳裂纹萌生寿命, 并用三参数幂函数方程对应变与疲劳裂纹萌生寿命进行了拟合处理, 得到了应变与疲劳裂纹萌生寿命方程.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 超声波; 弹性模量; 应力; 损伤; 低周疲劳

中图分类号: V231.9; O346.2

文献标识码: A

Application research of damage dynamics for low cycle fatigue test

ZHANG Guo dong, YU Hui chen, HE Yu huai, SU Bin

(Beijing Institute of Aeronautical Materials,

China Aviation Industry Corporation I, Beijing 100095, China)

Abstract: The change of elastic modulus and stress associated with fatigue cyclic number was investigated during low cycle fatigue. The research shows that, the low cycle fatigue damage can be determined by the change of elastic modulus and stress. For the materials, which have no cyclic steady stage but exhibit cyclic softening, this method isn't suitable to determine the low cycle fatigue damage with the change of stress. The fatigue crack initiation life was acquired by the change of elastic modulus under different strain levels, so the relationship between strain and fatigue crack initiation life was determined by three parameters power equation.

Key words: aerospace propulsion system; ultrasonic; elastic modulus; stress; damage; low cycle fatigue

如何解决关于初始先兆状态问题, 即在出现宏观可见裂纹之前材料内部损伤的演变问题是材料研究和结构强度设计以及事故预报工作者们都比较关心的问题. 解决该问题的一个成功的方法就是 Weibull 理论, 它是以统计的方法分析所研究材料内部的“最薄弱环节”. 这一理论用于研究复杂的部件或结构时遇到了非常难于解决的数学问题. 1958 年 Kachanov L M 提出了有关材料损伤的简单模型, 这一模型后来被推广应用于研究

脆性、弹性、塑性或粘性材料承受单轴或多轴、单调或循环等各种载荷情况, 研究表明损伤模型近乎普遍适用^[1].

从 1929 年 Sokolov 首先提出用超声波探测金属物体内部缺陷开始, 超声波无损检测已成为一种检测材料性能的技术手段并在工程实际中得到广泛的应用^[2]. 研究表明: 可以用超声波的方法通过对材料弹性常数变化过程的检测来反应材料的疲劳状态^[3]. 材料的损伤又可以通过材料的弹性系数

收稿日期: 2006-09-13; 修订日期: 2006-12-25

作者简介: 张国栋(1977), 男, 陕西富平人, 工程师, 硕士, 主要从事高温疲劳与断裂, 热机械疲劳方面研究.

的变化来反映出来, 从而可以用材料的弹性系数将无损检测方法和损伤建立起一定的联系, 这样就可以用无损检测方法来研究材料的损伤问题.

Buck, Alers 等^[45]的非线性声学试验结果表明: 对单晶和多晶金属材料来说, 它们所承受的疲劳循环次数与高频谐波之间存在紧密的关系. 高频谐波参量对材料的疲劳寿命^[6]、拉伸性能退化^[7]、蠕变损伤^[8]和界面粘接强度^[9]等较为敏感. 税国双等^[10]对材料力学性能退化的超声无损检测和评价技术进行了研究. 但国内在用超声波方法对材料力学性能退化的试验研究、定量关系和材料微细观组织方面研究开展较少.

本文在对航空发动机涡轮盘材料在低周疲劳过程中损伤测量方法进行研究的基础上, 用不同的损伤参量给出了材料的低周损伤过程、疲劳裂纹萌生寿命与应变的关系, 为无损超声检测方法研究材料损伤问题提供可靠的数据支持, 为无损检测信号与损伤之间的定量关系研究提供一定的技术支撑.

1 损伤的测量方法^[1]

损伤的测量方法有直接测量方法和非直接测量方法. 损伤的直接测量方法就是在微观尺度上计算表面上的总裂纹面积. 损伤的非直接测量方法可以通过弹性模量的变化、微硬度的变化、密度变化、电阻变化和循环塑性响应的变化等来间接测量. 本文主要用弹性模量的变化和循环塑性响应的变化(应力幅下降)来间接测量损伤.

1.1 弹性模量的变化来间接测量损伤

如果 $E = E(1 - D)$ 为损伤材料的有效弹性模量, 损伤值可由测量的 E 导出, 假如无损伤材料的弹性模量 E 已知, 则有

$$D = 1 - E/E$$

这种测量损伤的方法要求准确的测量应变, 通常用应变计在卸载时测量弹性模量 E .

另一种根据弹性模量的变化计算损伤的技术是测量超声波的传播速度.

对于频率高于 200 kHz 的超声波, 其在线弹性各向同性圆柱体中纵向波速 v_L 和横向波速 v_T 分别为

$$v_L^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \tag{2}$$

$$v_T^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \mu)} \tag{3}$$

式中 E 为弹性模量, ρ 为密度, μ 为泊松比. 对于损伤材料, 纵向波速为

$$v_L^2 = \frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \tag{4}$$

式中 E, ρ 分别为材料损伤状态的弹性模量和密度. 如果材料为线弹性各向同性, 损伤为一标量, 则泊松比不随损伤而变.

损伤由下式计算

$$D = 1 - E/E = 1 - (\rho \cdot v_L^2)/(\rho \cdot v_L^2) \tag{5}$$

如果损伤主要由微裂纹组成或只考虑小空洞的情况, $\rho/\rho \approx 1$, 则有

$$D = 1 - E/E = 1 - v_L^2/v_L^2 \tag{6}$$

1.2 应力幅下降来间接测量损伤

对于一个等塑性应变幅的试验, 如果假设 $\Delta\sigma^*$ 为稳态循环软化或硬化结束阶段且在损伤过程开始之前的应力幅值, 则材料在有损伤情况下的损伤可由下式计算

$$D = 1 - \Delta\sigma/\Delta\sigma^* \tag{7}$$

如果用最大拉伸应力的变化来测量损伤, 则有

$$D = 1 - \sigma_{\max}/\sigma_{\max}^* \tag{8}$$

2 超声波特征与材料低周疲劳性能的关系

2.1 损伤方法确定材料疲劳裂纹萌生寿命

根据损伤测量信号的变化关系, 确定信号的初始突变点所对应的疲劳寿命, 并将此时的疲劳寿命定义为疲劳裂纹萌生寿命 N_0 . 用三参数幂函数公式(9)确定应变与疲劳裂纹萌生寿命的关系.

$$N_0 = a(\epsilon/2 - \epsilon_0)^b \tag{9}$$

式中 a, b 和 ϵ_0 为材料常数, 通过拟合应变和疲劳裂纹萌生寿命来确定. ϵ_0 为应变表示的疲劳极限.

2.2 损伤方法确定材料疲劳裂纹扩展损伤演化与寿命的关系

假设低周疲劳过程中材料的损伤随弹性模量的演化关系为

$$D = 1 - E/E = 0 \tag{10}$$

$(N \leq N_0)$

$$D = 1 - E/E = a'(N - N_0)^b \tag{11}$$

$(N \geq N_0)$

式中 N_0 为疲劳裂纹萌生寿命.

根据弹性模量和超声波传播速度的关系可以得

到用超声波传播速度表示材料损伤的演化关系为

$$v_L = v_{L0}$$
$$(N \leq N_0)$$

(12)

$$v_L^2 = v_{L0}^2 [1 - a(N - N_0)]^b$$
$$(N \geq N_0)$$

(13)

从上式可知: 如果通过材料的低周疲劳试验得到了用弹性模量变化表示的损伤和循环次数的演化关系, 从而就可以得到用超声波传播速度变化和循环次数的演化关系, 最终用超声波无损检测的方法对材料的低周疲劳损伤过程进行检测.

3 低周疲劳试验结果

在 650 ℃ 下对涡轮盘材料 ZSGH4169 采用应变控制的应变速率为 5×10^{-3} / s、应变比为- 1 的低周疲劳试验, 试验结果如表 1. 在试验中, 采用的试样为工作段直径为 6 mm 的圆棒试样, 对应力- 应变的滞后回线进行全程采集. 典型的应力- 应变的滞后回线见图 1.

表 1 ZSGH4169 低周疲劳性能
Table 1 Fatigue property for ZSGH4169

最大应变 / %	疲劳寿命 / 周	最大应变 / %	疲劳寿命 / 周
1.0	200	0.6	1 451
0.9	260	0.5	4 151
0.8	725	0.4	23 174
0.7	1 000		

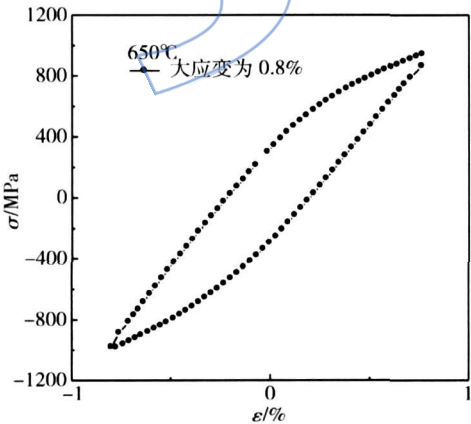


图 1 典型的应力- 应变的滞后回线
Fig. 1 Typical loop of strain stress

4 损伤方法的应用

4.1 弹性模量的变化测定损伤

采集到的应力- 应变的滞后回线数据, 取应

力- 应变的滞后回线中的卸载数据, 通过线性拟合应变与应力的关系, 得到了低周疲劳过程中材料的弹性模量随循环次数的演化关系如图 2 所示.

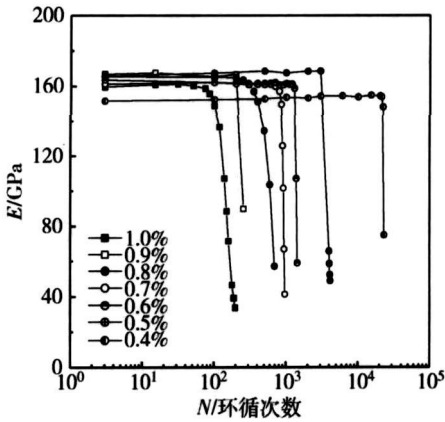


图 2 弹性模量随循环次数的变化
Fig. 2 Elastic modulus vs fatigue cycle

从图 2 可以看出: 在疲劳裂纹的萌生阶段, 弹性模量随循环次数不发生变化, 而当一旦萌生了疲劳裂纹, 弹性模量就随循环次数急剧降低, 将弹性模量随循环次数急剧降低的点作为疲劳裂纹萌生和疲劳裂纹扩展的分界点, 从而说明疲劳寿命由疲劳裂纹萌生寿命和疲劳裂纹扩展寿命组成, 而疲劳裂纹萌生寿命是占主要的. 图 3 给出了以弹性模量变化表示的损伤随循环次数的演化关系. 从图 3 可以看出: 材料在经历了多次循环载荷时才产生疲劳损伤, 而一旦产生损伤材料就会很快发生疲劳断裂.

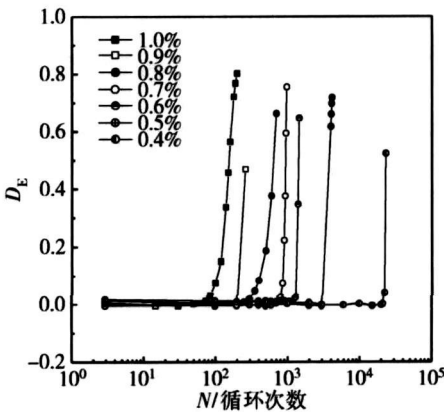


图 3 损伤随循环次数的变化
Fig. 3 Damage vs fatigue cycle

4.2 应力幅下降来测定损伤

图 4 给出了低周疲劳过程中最大循环应力随循环次数的演化关系. 从图中可以看出: 材料的循环应力响应行为与应变水平的大小有关, 当应变水平较高时, 材料表现出明显的循环软化行为, 且

没有循环稳定阶段; 而当应变水平较低时, 材料的循环应力响应行为不明显. 可以认为应力发生急剧下降的点为疲劳裂纹萌生和疲劳裂纹扩展的分界点, 在分界点之前的应力下降可以认为是由于循环软化造成的; 在分界点之后的应力急剧下降可以认为是由于萌生了疲劳裂纹而造成的.

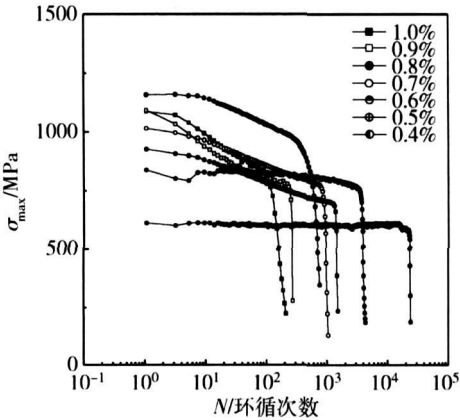


图 4 应力随循环次数的变化
Fig.4 Stress vs fatigue cycle

图 5 给出了以应力变化表示的损伤随循环次数的演化关系. 损伤速率较小的阶段可以认为是由于循环软化过程产生的, 损伤速率较大的阶段可以认为是由于疲劳裂纹的萌生而造成的疲劳裂纹扩展阶段.

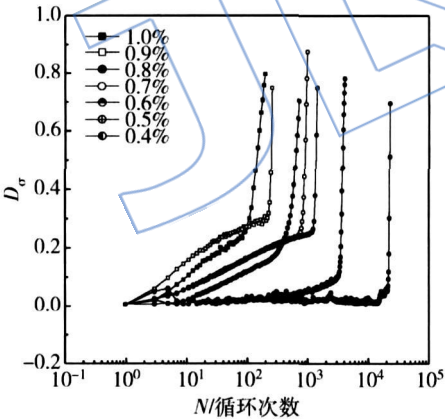


图 5 损伤随循环次数的变化
Fig.5 Damage vs fatigue cycle

4.3 损伤方法测定疲劳萌生寿命

用弹性模量的变化确定的疲劳裂纹萌生寿命见表 2.

通过表 1 和表 2 的数据对比可以发现: 在应变水平较高时, 材料的疲劳裂纹萌生寿命与疲劳断裂寿命相差较大. 随着应变水平的降低, 疲劳裂纹萌生寿命与疲劳断裂寿命的差异逐渐缩小, 如图 6 所示. 图 7 给出了材料疲劳裂纹萌生寿命在

疲劳断裂寿命中的比重与应变水平的关系. 从图可以看出: 随着应变水平的升高, 材料疲劳裂纹萌生寿命在疲劳断裂寿命中的比重有减小的趋势.

表 2 ZSGH4169 低周疲劳性能
Table 2 Fatigue property for ZSGH4169

最大应变 / %	裂纹萌生寿命 / 周	最大应变 / %	裂纹萌生寿命 / 周
1.0	81	0.6	1 289
0.9	199	0.5	2 999
0.8	296	0.4	20 792
0.7	781		

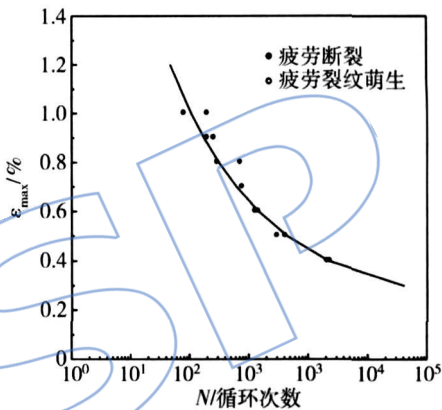


图 6 应变-疲劳裂纹萌生寿命的关系
Fig.6 Strain vs fatigue crack initiation life

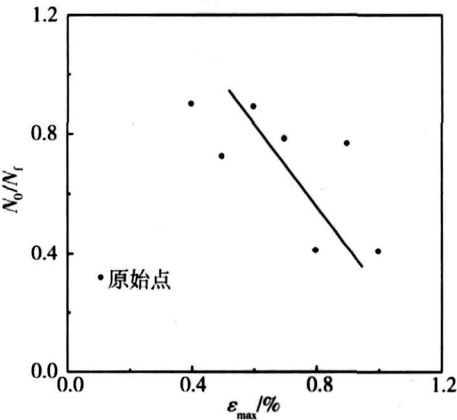


图 7 应变-寿命比的关系
Fig.7 Strain vs proportion of life

用三参数幂函数方程对疲劳裂纹萌生寿命与应变的关系进行拟合, 得到了材料的疲劳裂纹萌生寿命方程

$$N_0 = 2.4 \times 10^{-6} (\varepsilon/2 - 0.0022)^{-3.62665}$$

(14)

4.4 损伤方法测定疲劳裂纹扩展

用弹性模量的变化确定的疲劳裂纹扩展与损

伤的演化关系, 结果如图 8 所示. 从图中可以看出: 疲劳裂纹与损伤演化符合幂函数关系. 可以通过该关系确定材料在有损伤情况下的疲劳裂纹扩展寿命, 从而可以估算材料的剩余寿命.

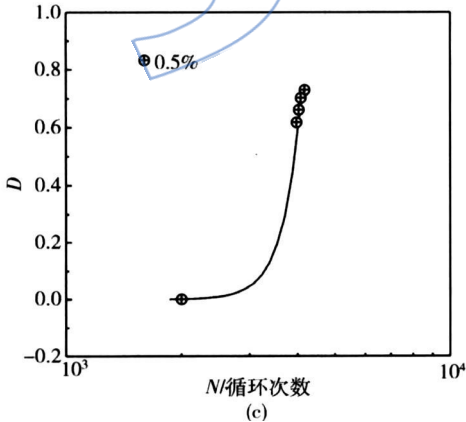
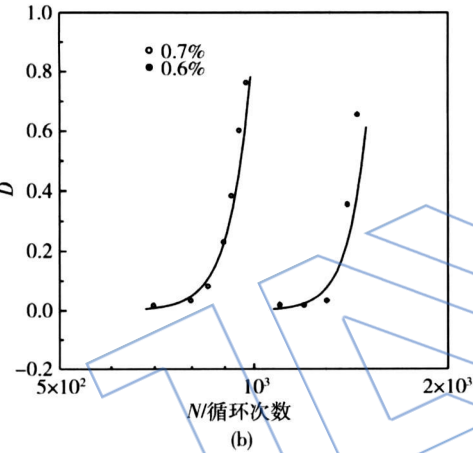
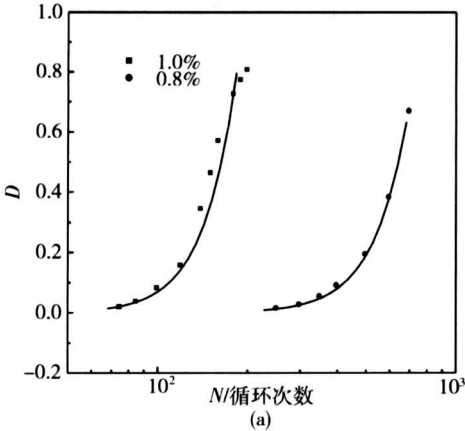


图 8 损伤-疲劳裂纹扩展寿命的关系
Fig. 8 Damage vs fatigue crack growth life

5 讨 论

用弹性模量的变化反映低周疲劳过程中的损伤明显直观, 疲劳裂纹萌生阶段和疲劳裂纹的扩

展阶段分界点清晰, 较容易区分材料的疲劳裂纹萌生寿命和疲劳裂纹扩展寿命. 用应力的变化反映低周疲劳过程中的损伤时, 对于表现为循环软化行为和没有明显的循环稳定阶段的材料, 无法区分损伤是由于循环软化还是由于疲劳裂纹的产生而导致的. 因此, 对于表现为循环软化行为和没有明显的循环稳定阶段的材料不应用应力的变化来表示材料的损伤; 对于表现为循环硬化行为和有明显的循环稳定阶段的材料可以用应力的变化来表示材料的损伤.

弹性模量的变化可以通过测量超声波的传播速度来得到监测. 通过低周疲劳过程中的弹性模量的演化关系可知, 当弹性模量发生了明显变化时可认为疲劳裂纹已经萌生, 这样通过超声波的传播速度的变化可以监测疲劳裂纹的萌生, 因而, 用超声波的传播速度的变化可以反映材料的损伤演化过程.

6 结 论

- (1) 用弹性模量和应力的变化定量的确定了低周疲劳的损伤演化过程. 研究表明: 可以用弹性模量的变化来反映材料的低周疲劳损伤过程.
- (2) 对没有明显循环稳定阶段并表现为循环软化响应行为的材料, 不适合用应力的变化来定量的反映材料低周疲劳的损伤过程.
- (3) 弹性模量的变化可以通过测量超声波的传播速度的方法得到检测, 因此, 可以用检测超声波传播速度变化的方法对材料的低周疲劳损伤过程进行检测.
- (4) 用弹性模量随循环次数的演化关系可以得到不同应变水平下材料的疲劳裂纹萌生寿命, 从而可以得到应变与疲劳裂纹萌生寿命的定量关系.

参考文献:

[1] 勒迈特 J 著. 损伤力学教程[M]. 陶春虎, 译. 北京: 科学出版社, 1996.

[2] 钟裴晖, 王寅观, 杨海涛, 等. 用超声波法测试 20 钢低周疲劳过程中弹性常数的变化[J]. 金属学报, 2002, 38(3): 334- 336.

ZHONG Peihui, WANG Yinguan, YANG Haitao, et al. The change of elastic constant of steel 20 in low-cycle fatigue procedure measured by ultrasonic [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(3): 334- 336.

[3] Szilard J. Ultrasonic testing: non conventional testing techniques[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd., 1982.

[4] Buck O. Harmonic generation for measurement of internal stress as produced by dislocations[J]. IEEE Trans Sonics

Ultrasonic, 1976, SU- 23: 346-350.

[5] Buck O, Alers G A. New techniques for detection and monitoring of fatigue damage[J]. Fatigue and Microstructure American Society for Metals, 1979, 10: 147.

[6] 徐从元, 姜文华. 疲劳金属材料非线性声学特性的实验研究[J]. 南京大学学报, 2000, 36(3) : 328-335.

XU Congyuan, JIANG Wenhua. Experimental investigation on acoustic nonlinearity of fatigued metals[J]. Journal of Nanjing University, 2000, 36(3) : 328-335.

[7] Jhang K Y, Kim K C. Evaluation of material degradation using nonlinear acoustic effect[J]. Ultrasonic, 1999, 37: 39-44.

[8] Kang J, Qu J, Saxena A, et al. On the detection of creep damage in a directionally solidified Nickel base superalloy using nonlinear ultrasound[C] // In: Thompson D O, Chimenti D E, eds. Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. New York: American Institute of Physics, 2004, 23: 1248-1255.

[9] Hirsekorn S. Nonlinear transfer of ultrasound by adhesive joints: a theoretical Description[J]. Ultrasonics, 2001, 39: 57-68.

[10] 税国双, 汪越胜, 曲建民. 材料力学性能退化的超声无损检测与评价[J]. 力学进展, 2005, 35(1) : 52-68.

SHUI Guoshuang, WANG Yuesheng, QU Jianmin. Advances in nondestructive test and evaluation of material degradation using nonlinear ultrasound[J]. Advances In Mechanics, 2005, 35(1) : 52-68.

