

电阻法检测金属构件损伤及预测疲劳寿命

黄 丹¹, 章 青¹, 郭乙木²

(1. 河海大学 工程力学系, 南京 210098; 2. 浙江大学 固体力学研究所, 杭州 310027)

摘 要:基于非线性连续疲劳损伤理论, 考虑应力幅带来的非线性累积效应, 以电阻值定义金属构件损伤参量, 提出基于电阻变化的金属高周疲劳损伤累积模型及疲劳载荷应力幅对损伤参量的影响函数, 给出通过测量电阻来检测金属构件疲劳损伤状态的方法及预测高周疲劳剩余寿命的理论公式, 并通过 45 号钢高周疲劳试验进行验证。

关键词:金属构件; 疲劳损伤; 电阻法; 寿命预测

中图分类号: TG115. 28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)04-0213-03

Damage Measurement and Fatigue Life Prediction for Metallic Components by Electrical Resistance Method

HUANG Dan¹, ZHANG Qing¹, GUO Yi-Mu²

(1. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098;

2. Insititute of Solid Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Presented is a life prediction model based on the variation of electrical resistance for metallic components experiencing high cycle fatigue load. Combining nonlinear continual fatigue damage accumulation theories with calculation formula for electrical resistance of metals, and taking into account the nonlinear effects of cycle stress on damage accumulation, a promising damage measuring method and a fatigue life prediction model concerned only with variation of electrical resistance are then proposed. The effect of cycle stress on nonlinear damage factor is analyzed as well. Experimental data from 45 # steel agree well with the theoretical results adopting the proposed model in this paper.

Keywords: Metallic components; Fatigue damage; Electrical resistance method; Life prediction

疲劳破坏是飞机、船舶、车辆和建筑结构等最重要的失效形式之一, 但至今尚缺乏明确的理论模型来描述固体材料的损伤累积与疲劳断裂行为之间的定量关系。

随着疲劳损伤理论的发展及实验测量手段的改善, 先后采用射线法、超声法等不同方式进行损伤检测, 进而建立疲劳损伤模型^[1-3], 取得一定成果^[4]。其中金属构件的电阻因为具有组织结构敏感和易于无损精确测定的特性而颇受关注^[5], 但一些基于电阻变化的高周疲劳损伤累积模型^[6-8]均对疲劳损伤

累积的非线性效应及疲劳载荷应力幅对损伤变量的影响采用了简化处理。在此基础上, 笔者基于连续非线性疲劳损伤累积理论并考虑疲劳应力幅的影响, 提出以电阻变化描述金属构件高周疲劳损伤演化的理论模型及疲劳载荷应力幅对损伤参量的影响公式, 以此来检测金属构件疲劳损伤状态及预测剩余寿命, 并通过 45 号钢高周疲劳试验进行验证。

1 测试原理

在试件损伤分析时, 往往在整个截面上定义损伤变量。设其无损时的横截面积为 A_0 , 受损后的表征横截面积为 A , 空隙总面积为 A_d , 有效承载横截面积 $\bar{A} = A - A_d$ 。如果横截面变化纯粹由损伤所致, 则受损后的表征横截面积可用初始横截面积代

收稿日期: 2007-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50539090); 引进人才科研启动基金资助项目; 河海大学自然科学基金资助项目(2007418311)

作者简介: 黄 丹(1979—), 男, 博士, 讲师, 从事破坏力学研究。

替,即损伤变量

$$D = \frac{A_d}{A} = \frac{A_d}{A_0} = 1 - \frac{\tilde{A}}{A_0} \quad (1)$$

此处损伤变量反映了构件横截面有效承载面积的损失。对于金属构件,设其无损承载面积为 A_0 ,测试长度为 L ,电阻率为 ρ ,则无损时测试段电阻为:

$$R_0 = \rho \frac{L}{A_0}$$

已有研究和工程实践表明,在高周疲劳破坏中塑性变形较小^[6],且考虑电阻率变化时的电阻变化值与不考虑电阻率变化时相差很小^[8]。在工程误差许可范围内,假设试样长度不变、电阻率不变且损伤各向同性,因此得到受损后的电阻值为:

$$R = \rho \frac{L}{\tilde{A}} = \rho \frac{L}{A_0(1-D)}$$

受损后电阻值变化为:

$$\Delta R = R - R_0 = \rho \frac{L}{A_0} \frac{D}{1-D}$$

即电阻变化率:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{D}{1-D} \quad (2)$$

这样,就可以通过测量电阻变化率来确定构件中的损伤累积状况。

在高周疲劳损伤累积过程中,考虑应力幅和平均应力引起的非线性效应,损伤演化方程可表示为^[9]:

$$D = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_f}\right)^{\frac{1}{\beta+2}} \quad (3)$$

式中 N 为循环次数, β 为非线性损伤因子,与材料及应力幅有关; N_f 为疲劳寿命。

结合式(2)和(3)可得:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \left(1 - \frac{N}{N_f}\right)^{-\frac{1}{\beta+2}} - 1 \quad (4)$$

根据式(4)就可以通过试验测量构件的电阻变化值 ΔR 与循环次数 N 的关系以及构件的疲劳极限次数 N_f ,从而得出非线性损伤因子 β ;此外,通过改变疲劳应力幅 σ ,可以确定损伤因子 β 与应力幅的关系。最后,可以据此在工程实践中通过测量构件的电阻变化来预测其疲劳剩余寿命:

$$N_r = N_f - N = \frac{N}{\left(\frac{\Delta R}{R_0} + 1\right)^{\beta+2}} - 1 \quad (5)$$

2 试验验证

试验采用纯弯旋转高频疲劳试验机,疲劳试样为光滑圆柱形 45 号结构钢,标距段直径 $d=5$ mm,

$L=10$ mm,5 组试样(编号 1~5)分别在应力幅 $\sigma=258.7, 276, 296, 316.6$ 和 336 MPa 下进行高周疲劳试验,每隔一定循环数对试样进行电阻测定,每个电阻值取同组多个测点的平均值。电阻测定采用高精度双臂电桥 QJ-57 型电阻应变仪。试验测定不同应力幅下的疲劳寿命及拟合所得的非线性损伤因子(表 1)。

表 1 不同应力幅下的试验结果

疲劳应力 幅 σ /MPa	疲劳寿命 N_f / $\times 10^5$ 次	非线性损 伤因子 β	疲劳应力 幅 σ /MPa	疲劳寿命 N_f / $\times 10^5$ 次	非线性损 伤因子 β
258.7	13.75	3.7	316.6	6.68	1.43
276	12.0	2.42	336	5.0	1.19
296	10.35	1.78			

图 1 所示为不同疲劳应力幅 σ 时试验结果与由式(4)得出的预测曲线的比较,由图可见两者吻合较好。图 1 表明基于电阻变化的疲劳预测模型能较准确地反映金属构件高周疲劳损伤的非线性累积过程。曲线中初始加载阶段电阻上升较缓慢,而加载后期电阻上升速度加快,两者分别对应于构件疲劳演化过程中微缺陷形成与连接并萌生宏观裂纹的初始变形阶段和宏观裂纹迅速扩展导致断裂的后期变形阶段,与工程实际现象吻合。

图 2 为考虑应力幅的非线性效应时,损伤因子 β 与疲劳应力幅 σ 之间关系的拟合,拟合曲线与试

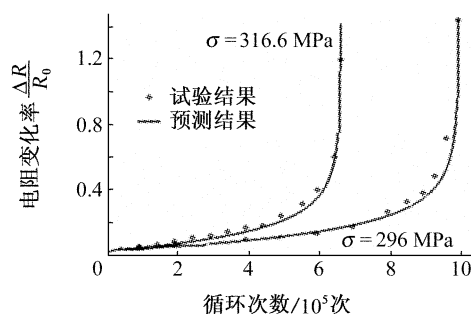


图 1 预测公式与试验结果比较

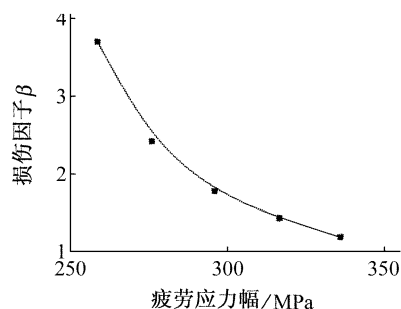


图 2 非线性损伤因子拟合

验结果吻合,其拟合公式为:

$$\ln \beta = a\sigma + b \quad (6)$$

式中 a 和 b 为仅与材料性质有关的常数,根据表 1 的实验数据拟合,可得 45 号结构钢 $a = -0.1034$, $b = 5.906$ 。至此,基于电阻变化检测 45 号钢构件损伤状态及预测高周疲劳剩余寿命的公式可归纳为:

$$D = \frac{\Delta R}{\Delta R + R_0}$$

$$N_r = \frac{N}{\left(\frac{\Delta R}{R} + 1\right)^{\frac{2+e^{5.906-0.1034\sigma}}{2}} - 1} \quad (7)$$

需要说明的是,由于受试验周期和实验条件等限制,对 45 号结构钢的高周疲劳试验仅进行了五组不同应力幅的情况,拟合公式的普遍适用性尚待进一步验证。

3 结论

(1) 在外载荷作用下,随着材料内部损伤积累,导电性能下降,金属构件的电阻变化能敏感而且较精确地反映构件内部的损伤演化过程,特别是非线性累积规律。电阻法因其简单易行、敏感精确,可以用于高周疲劳损伤非线性累积检测,也可以推广用于金属构件其它形式的损伤累积研究。

(2) 试验和理论公式都表明:在构件高周疲劳损伤累积过程中,前期较长时间内的电阻值增长缓慢;损伤后期电阻上升速度迅速加快,直至材料断裂时迅速增至最大值。两个阶段正好对应于疲劳损伤演化过程中的微缺陷形成与连接并萌生宏观裂纹和宏观裂纹扩展导致断裂两个阶段,因此电阻变化能形象地反映微观疲劳损伤演化全过程。

(3) 文章结合非线性连续疲劳损伤理论并考虑应力幅的影响,给出了结构钢高周疲劳损伤检测思路和剩余寿命预测模型,提出了模型中待定参数与

材料特性有关的函数表达式以及试验测定方法。理论曲线与 45 号钢试验结果相当吻合,且提出的探测方法简单易行,可供工程实践参考。

(4) 由于理论推导中的假设条件,导致理论模型结果与试验结果相比较有少量偏差,但在工程误差允许范围之内。若考虑到损伤的各向异性、不均匀性、塑性变形、电阻率的变化以及电阻率的各向异性,将会使模型更加精确。

参考文献:

- [1] 吴彦,沈功田,葛森. 起重机无损检测技术[J]. 无损检测, 2006, 28(7): 367—372.
- [2] XiaoYC, Li S, Gao Z. A continuum damage mechanics model for high cycle fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20(7): 503—508.
- [3] Alves M, Yu JL, Jones N. On the elastic modulus degradation in continuum damage mechanics[J]. Computer and Structure, 2000, 76(6): 703—712.
- [4] 马宝钿,杜百平,朱维斗,等. 电阻法检测疲劳损伤及预测修复效果探讨[J]. 理化检验(物理分册), 2002, 38(11): 493—495.
- [5] Chen Q, Kawagoishi N, Nisitani H. Evaluation of fatigue crack growth rate and life prediction of Inconel 718 at room and elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 277(2): 250—257.
- [6] 周洪刚. 金属材料高周疲劳损伤研究和寿命预测探索[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [7] 黄丹,许平聪,郭乙木. 金属疲劳剩余寿命预测模型的一种探索[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 113—117.
- [8] 孙斌祥,郭乙木. 考虑电阻率变化的电阻法预测金属材料剩余寿命[J]. 工程设计, 2001, 8(2): 81—84.
- [9] Fatemi A, Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials[J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20(1): 9—34.

(上接第 212 页)

仿真和实际应用验证了该方法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] Otsu N A. Threshold selection method form gray level histogram[J]. IEEE Trans on Syst Man Cybern, 1979, 9(1): 61—66.
- [2] Kittler J Illingworth J. Minimum error threshold[J]. Pattern Recognition, 1986, 19(1): 41—47.
- [3] 岳贤军. 产品表面图像中的缺陷自动检测方法研究

[J]. 微计算机信息, 2007, 23(6): 297—299.

- [4] 杨治明,王晓蓉,陈应祖. 基于 BP 人工神经网络图像分割技术[J]. 计算机应用, 2006, 26(12): 145—146.
- [5] Jia H B, Yi L M, Shi J J. An intelligent real-time vision system for surface defect detection[C]. Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, 2004: 239—242.
- [6] 陆懿,陈光梦,程松. 一种基于模糊集的灰度图像阈值分割算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(20): 75—77.