

基于固有频率变化的点焊接头疲劳寿命预测

王瑞杰, 尚德广, 李力森, 李承山, 阎楚良
(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

摘要: 为得到固有频率随疲劳裂纹扩展的变化规律, 在拉剪点焊试样有限元模型中, 使用逐渐由少到多断开单元节点的方法模拟裂纹扩展过程. 根据损伤力学原理和裂纹在横截面上的投影定义了损伤, 建立了基于载荷幅和平均应力的疲劳寿命预测模型. 利用此模型预测了实际试样的疲劳寿命. 寿命预测结果与实验寿命结果对比表明, 此疲劳寿命预测模型能较好地估算点焊结构的疲劳寿命.

关键词: 固有频率; 有限元分析; 点焊; 疲劳损伤; 寿命预测

中图分类号: TG 407; TH 114; O 346.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0254-0037(2007)12-1252-05

模态分析方法作为一种非破坏性的方法, 可从结构的整体响应来监测损伤, 而所有的模态参数中, 固有频率最容易得到, 且精度较高, 因而常使用结构损伤前后固有频率的变化来监测损伤^[1-2]. 对于点焊接头, 由于疲劳裂纹不在点焊结构的表面上萌生, 观测十分困难, 可利用固有频率的变化进行损伤研究. Shang 等研究发现, 在拉剪点焊试样疲劳破坏过程中, 固有频率逐渐下降, 在疲劳寿命接近结束时急剧下降, 固有频率变化率与循环比呈非线性关系^[3-5]. 基于此定义了裂纹萌生与扩展的 3 个阶段, 并确定了 3 个阶段所占总寿命的百分比. Wang 等研究发现, 可从固有频率与振型来研究疲劳裂纹的形状与位置, 建立了从固有频率与模态振型来估算裂纹长度的理论模型^[6-7].

在损伤力学中, 使用唯象的方法研究结构的损伤, 损伤常用有效承载面积的变化来表达. 对于点焊试样, 有效承载面积的变化表现为裂纹面积的变化, 由于其观测困难, 可利用宏观的固有频率进行研究. 作者对拉剪点焊试样模拟了裂纹扩展过程中的动态响应, 将裂纹在横截面上的投影面积作为损伤面积, 分析了固有频率随损伤的变化; 测量了实际试样疲劳破坏过程中的动态响应固有频率, 利用损伤演化关系确定了疲劳寿命预测模型, 预测了实际试样的疲劳寿命.

1 疲劳寿命过程中的动态响应测试及裂纹观测

拉剪点焊试样的结构如图 1 所示, 焊核直径 5.4 mm, 板厚 1.5 mm. 材料为汽车车身用镀锌低碳钢板, 弹性模量 $E = 198.4 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.29$, 密度为 $\rho = 7.800 \text{ t/m}^3$. 使用 MTS810 材料试验机, 施加循环拉剪载荷, 控制应力加载, 取试样破坏时的循环数为疲劳寿命. 试验所得的载荷幅疲劳寿命关系 F_a-N 如图 2 所示. 在疲劳寿命的不同阶段, 使用动态信号采集分析系统测试试样的动态响应, 得到此时的

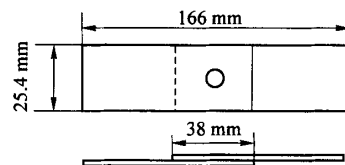


图 1 试样结构

Fig. 1 Specimen configuration

频率响应函数 (frequency response function, 简称 FRF) H 和各阶固有频率 f . 随着疲劳寿命的增加, 典型的频率响应函数变化如图 3 所示; 损伤前后一阶固有频率的频率比随循环比的变化如图 4 所示, 图中固有频

收稿日期: 2006-11-09.

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3042003); 北京市属市管高等学校人才强教计划资助项目.

作者简介: 王瑞杰(1972-), 男, 河南郾城人, 博士研究生.

率比为当前的固有频率 f_n 与初始固有频率 f_0 的比值；循环比为当前疲劳循环数 N 与疲劳寿命 N_f 的比值。图 4 中 S11~S44 为试样编号,S 代表单点试样。

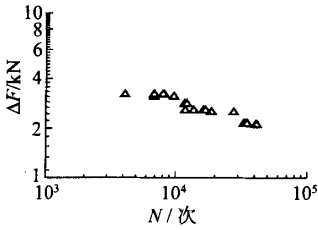


图 2 F_a-N 关系
Fig.2 F_a-N relation

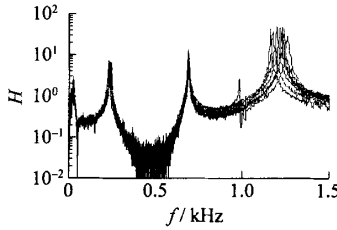


图 3 频率响应函数的变化
Fig.3 Changes of FRF

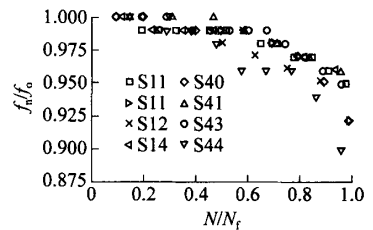
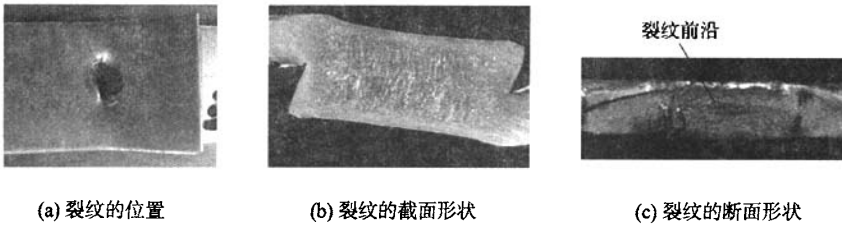


图 4 固有频率比随寿命比的变化
Fig.4 Changes of natural frequency ratio vs life ratio

裂纹在试样表面的典型位置与形状如图 5(a)所示。在试样疲劳断裂后,将试样沿受力方向剖开,观察到裂纹的位置如图 5(b)所示。为得到固有频率与疲劳寿命的对应关系,对其中部分试样在一段疲劳寿命后进行酸洗腐蚀再继续做实验。在试样断裂后,观察到腐蚀的裂纹断面形状如图 5(c)所示。实验观察到在中高周疲劳情况下,当试样表面上的裂纹长度达到约 8 mm 时,裂纹迅速扩展,试样急剧扭曲破坏,见图 5(a)。



(a) 裂纹的位置 (b) 裂纹的截面形状 (c) 裂纹的断面形状

图 5 裂纹的位置与形状

Fig.5 Crack location and shape

2 裂纹扩展过程中动态响应的有限元分析

试样的有限元模型如图 6 所示。图 7(a)~(f)为在焊核边缘处逐渐由少到多断开节点,形成椭圆形表面裂纹,并在板厚度和宽度方向扩展的过程。在此过程中,裂纹形状与位置及深长比与实际试样保持一致,并假设 2 条裂纹同步扩展,即形状大小始终保持一致。将图 7(f)的情形作为最终失效,此图中的裂纹长度为 8.8 mm。在裂纹扩展过程中,使用 ABAQUS 有限元软件计算频率响应函数。

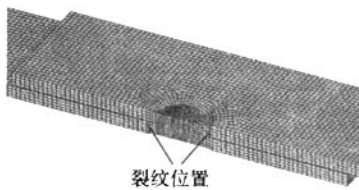


图 6 有限元模型中的裂纹
Fig.6 Crack in FE model

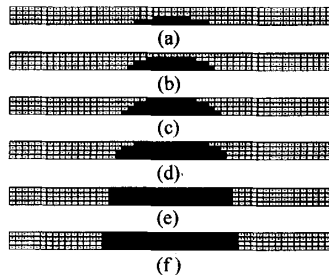


图 7 裂纹的扩展过程
Fig.7 Crack propagation process

对于原始无裂纹的试样,有限元计算与实验测量的频率响应函数如图8所示.由图8可以看出,在0~1 kHz范围内,有限元模拟结果与实测结果基本一致.对于图7(a)~(f)的模拟裂纹扩展的过程,有限元计算得到的频率响应函数的变化如图9所示.由图9可以看出,随着裂纹不断扩展,频响函数各尖峰代表的各阶固有频率均有下降趋势,其中一阶固有频率变化最大.

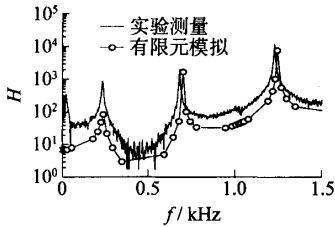


图8 实验频率响应函数与模拟频率响应函数
Fig. 8 Experimental FRF vs simulated FRF

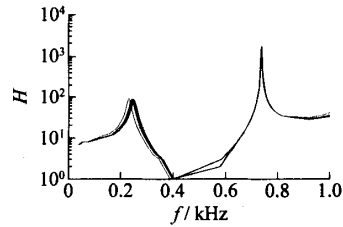


图9 模拟的频率响应函数的变化
Fig. 9 Changes of simulated FRF

3 损伤及损伤的演化

在损伤力学中,使用唯象的宏观的力学性质和结构参数的变化研究结构的损伤,但由于材料和结构损伤机理不同,到目前并没有一种通用的宏观损伤量的定义,常使用试样承载面积的变化量表示损伤,即

$$D = (A - \bar{A}) / A \quad (1)$$

式中, D 为损伤; \bar{A} 为损伤后的承载面积; A 为损伤前的承载面积.

对于点焊试样,试样的承载面积的变化表现为裂纹面积的变化.图7(f)为失效状态,因而式中 A 使用图7(f)中的阴影部分的面积代替,损伤面积使用裂纹面积 A_c 代替,即 $(A - \bar{A}) = A_c$,这样有

$$D = (A - \bar{A}) / A = A_c / A \quad (2)$$

当无损伤时, $A_c = 0, D = 0$;破坏时, $A_c = A, D = 1$,式(2)符合传统的损伤定义.

将由式(2)计算的疲劳损伤随一阶固有频率的变化表示在图10中.由图10可见,在疲劳破坏过程中,疲劳损伤 D 随固有频率变化率 λ 的增大而逐渐增加,但两者之间并不是简单的线性关系.将两者关系拟合成一条曲线,得到曲线方程形式为

$$D = 0.026 + 20.753\lambda - 108.723\lambda^2 \quad (3)$$

式中 λ 为固有频率变化率, $\lambda = (f_o - f_n) / f_o$.其中, f_n 为试样当前的固有频率; f_o 为原始试样的固有频率.

根据试样未加载时和不同寿命阶段时测得的一阶固有频率,可利用式(3)计算得到相应时刻的损伤.对于实测的几个试样,由式(3)计算的试样疲劳损伤如图11中空心符号所示.由图11可见,疲劳损伤与循环比并不呈线性关系,即每个循环的疲劳损伤并不能使用Miner公式线性累积,损伤的累积应是非线性的形式.

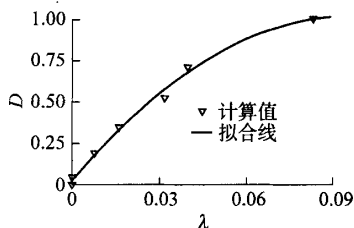


图10 损伤与固有频率变化率
Fig. 10 Damage vs λ

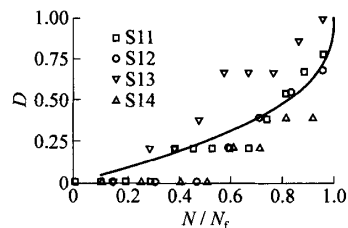


图11 计算与实测的损伤值
Fig. 11 Calculated vs experimental damage

考虑到应力幅的影响, 损伤力学中一种常用的损伤演化方程形式为^[8]

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \left[\frac{\Delta \sigma}{2B(1-D)} \right]^\beta (1-D)^{-\gamma} \tag{4}$$

其中 B 、 β 和 γ 是与温度相关的材料参数, B 还依赖于平均应力, 即 $B = B(\bar{\sigma})$.

对式(4)积分可导出

$$D = 1 - \left(1 - \frac{N}{N_f} \right)^{\frac{1}{\beta + \gamma + 1}} \tag{5}$$

式中疲劳寿命

$$N_f = \frac{1}{\beta + \gamma + 1} \left[\frac{\Delta \sigma}{2B} \right]^{-\beta} \tag{6}$$

由上述过程分析可知, 对于实际的疲劳试样, 可测出损伤前与疲劳寿命不同阶段的一阶固有频率, 分别利用式(3)计算出当前的实际损伤, 将计算得到的损伤和各时刻的循环寿命比分别代入式(5)中, 经数据拟合可得到 $\beta + \gamma$ 值, 再代入式(6)中. 代入在不同应力水平下的循环应力幅及寿命数据, 进一步拟合可得到 β 值及平均应力的函数 $B = B(\bar{\sigma})$. 这样, 由式(6)可知, 疲劳寿命可以表示为平均应力和应力幅的函数, 当试样所承受的应力幅与平均应力已知时, 可由式(6)估算其疲劳寿命.

4 疲劳寿命预测结果

在此疲劳实验中, 由于各试样结构尺寸一致, 可直接使用载荷代替应力, 平均载荷代替平均应力. 经拟合各参数的结果为: $\beta + \gamma = 2.504$, $\beta = 3.971$, $B = 22\,215 - 0.47\bar{\sigma}$. 在疲劳寿命不同阶段由式(5)计算的损伤如图 11 中曲线所示. 由图 11 可见, 式(5)计算的损伤值与式(3)计算的损伤值较为接近, 即式(5)能较好地描述点焊接头疲劳破坏过程中的损伤.

表 1 为试样所受的载荷及使用式(6)所估算的疲劳寿命. 将 N_f 的预测值 N_p 与实验值 N_e 进行对比, 如图 12 所示. 由图 12 可以看出, N_p 的误差在 2 个因子之内, 即疲劳寿命预测结果较为准确.

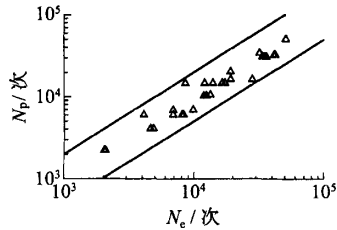


图 12 预测疲劳寿命与实验疲劳寿命

Fig. 12 Predicted fatigue life vs. experimental fatigue life

表 1 载荷水平及预测疲劳寿命 N_p

Table 1 Load level and predicted fatigue life N_p

平均载荷 F_m/kN	载荷幅 F_a/kN	实验寿命 $N_e/\text{次}$	预测寿命 $N_p/\text{次}$	平均载荷 F_m/kN	载荷幅 F_a/kN	实验寿命 $N_e/\text{次}$	预测寿命 $N_p/\text{次}$
2.135	3.200	33 334	30 107	3.200	3.200	8 200	6 029
3.200	3.200	4 107	6 029	2.560	3.200	16 530	14 619
2.560	3.200	12 009	14 619	2.500	3.200	28 001	16 088
2.500	3.200	19 033	16 088	2.100	3.200	41 785	32 150
2.100	3.200	41 093	32 150	3.100	3.200	9 791	6 847
3.100	3.200	6 893	6 847	2.800	3.200	12 352	10 258
2.800	3.200	11 850	10 258	3.675	3.825	4 866	4 057
2.000	2.700	50 525	50 295	4.200	4.550	2 049	2 233
2.200	3.000	31 925	33 536	2.135	3.200	35 369	30 107
2.700	3.400	13 235	10 606	3.200	3.200	8 081	6 029
2.900	3.600	8 567	14 344	2.560	3.200	17 114	14 619
3.675	3.825	4 633	4 057	2.135	3.200	33 546	30 107
4.200	4.550	2 072	2 233	3.200	3.200	6 903	6 029
2.500	3.000	19 033	20 186	2.560	3.200	13 937	14 619
2.135	3.200	34 516	30 107				

5 结论

- 1) 对于拉剪点焊试样,在疲劳裂纹扩展过程中,固有频率不随裂纹断开面积线性变化,固有频率变化率与疲劳寿命循环比呈非线性关系.
- 2) 利用固有频率变化与裂纹面积变化间的关系,可用固有频率的变化表示疲劳损伤.
- 3) 当试样所承受的载荷已知时,本文提出的疲劳寿命计算模型能较好地预测试样疲劳寿命.

参考文献:

- [1] MESSINA A, JONES I A, WILLIAMS E J. Damage detection and localisation using natural frequency changes[C]// Identification in Engineering Systems. Swansea: University Wales Swansea, 1996: 67-76.
- [2] HASSIOTIS S, JEONG G D. Assessment of structural damage from natural frequency measurements[J]. Computers and Structures, 1993, 49(4): 679-691.
- [3] SHANG D G, BARKEY M E, WANG Y, et al. Effect of fatigue damage on the dynamic response frequency of spot-welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(4): 311-316.
- [4] SHANG D G, BARKEY M E. Analysis of fatigue crack behaviour based on dynamic response simulations and experiments for tensile-shear spot-welded joints[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures, 2006, 29(1): 23-30.
- [5] 尚德广. 基于动态响应特性的点焊疲劳损伤参量[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(2): 144-147.
SHANG De-guang. Fatigue damage parameter of spot-welded joints based on dynamic response characteristics[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2004, 30(2): 144-147. (in Chinese)
- [6] WANG G, BARKEY M E. Fatigue cracking and its influence on dynamic response characteristics of spot welded specimens [J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(5): 512-521.
- [7] WANG G, BARKEY M E. Fatigue crack identification in tensile-shear spot welded joints by dynamic response characteristics [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2005, 127(3): 310-317.
- [8] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

Fatigue Life Prediction of Spot Welds Based on Change of Natural Frequency

WANG Rui-jie, SHANG De-guang, LI Li-sen, LI Cheng-shan, YAN Chu-liang

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The effect of crack propagation on the changes of natural frequency was studied through simulation of crack propagation process by dispatching element nodes one by one in a finite element model. Based on the damage mechanics principle, the projection area of crack on cross-section was used to define the damage, and to establish the fatigue life prediction model with stress amplitude and mean stress. The fatigue life prediction by this model showed good agreement with experimental results. The proposed life prediction model can effectively predict the fatigue life of spot welded joints.

Key words: natural frequency; finite element analysis; spot welding; fatigue damage; life prediction