

一种新的随机疲劳寿命预测方法

尚德广, 王大康

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

摘要: 根据疲劳损伤具有局部性的特点,在应力场强法的基础上,提出了缺口疲劳损伤局部应力应变场理论;该理论可同时考虑缺口根部局部应力应变梯度对疲劳损伤的影响.通过对缺口件进行随机交变加载下的弹塑性有限元分析,提出一种随机加载疲劳寿命预测的局部应力应变场强法;由该法来预测缺口件疲劳裂纹形成寿命,其精度要好于传统的局部应力应变法.

关键词: 随机加载; 弹塑性有限元分析; 局部应力应变场强; 疲劳损伤; 寿命预测

中图分类号: TH 114

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2001)04-0433-04

机械结构关键零部件大多存在缺口,目前国内外多采用局部应力应变法对其进行疲劳寿命预测.局部应力应变法尽管被认为是一种比较好的缺口疲劳裂纹形成寿命的预测方法,但由于该法未考虑缺口局部应力应变场梯度和缺口根部应力应变多轴性的影响,用其方法预测缺口件疲劳寿命时常常发生结果不够稳定的现象.研究缺口疲劳问题,必须从其疲劳破坏的机制出发,综合考虑各种因素的影响,才能给出较为准确的疲劳寿命预测结果.

本文在文献[1-3]所提出的应力场强法的基础上,进一步发展了能够用于随机循环加载下的局部应力应变场强法,经验证所提出的方法在预测精度上好于传统的基于点应力和应变理论的局部应力应变法.

1 缺口局部应力应变场强原理

由于实际材料的疲劳损伤是在某一范围(通常为数个晶粒尺寸)内累积,所以使用“点”理论(“点应力”、“点应变”、“点能量”等)的“疲劳设计”理论难以解释一些疲劳现象,同时又引入了一些经验参数.在缺口疲劳研究过程中,一些研究者注意到了缺口应力峰值点周围应力梯度的影响,提出高周疲劳寿命预测的应力场强法^[2,4,5].该法认为缺口件的疲劳强度取决于材料危险部位局部小区域内的损伤累积,并给出了一个描述这一区域受载严重程度的应力场强参数 σ_{FI} ;然后利用 $\sigma-N$ 曲线来预测疲劳寿命.

本文根据缺口场强特性,在原有应力场强法的基础上,进一步研究缺口应力与应变场强的综合特性,提出局部应力应变场强理论.该理论认为缺口件的疲劳强度取决于材料危险部位局部小区域内的损伤累积,其损伤累积不仅与局部小区域内的应力场强有关,而且也与其应变场强有关,并给出一个描述这一区域受载严重程度的两个场强参数 σ_{FI} 和 ϵ_{FI} .如果缺口局部应力应变场强 σ_{FI} 和 ϵ_{FI} 的历程与光滑试件所受的应力应变历程相同,则二者具有相同的疲劳寿命.其原理模型如图1.

具体实施时,由随机循环加载下的弹塑性有限元法计算复杂加载历程下的这两个参数值,确定出局部应力应变场强谱,

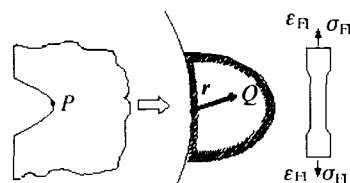


图1 缺口应力应变场强原理模型示意图

收稿日期: 2000-12-27.

基金项目: 教育部骨干教师基金资助项目(M01020002).

作者简介: 尚德广(1963-),男,教授,博士后;王大康(1942-),男,教授.

由此预测随机加载下缺口件的疲劳寿命. 两参数 σ_{FI} 、 ε_{FI} 的数学表达式及物理意义如下:

应力场强度参数

$$\sigma_{\text{FI}} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} f(\sigma_{ij}) \varphi(r) dv \quad (1)$$

应变场强度参数

$$\varepsilon_{\text{FI}} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} f(\varepsilon_{ij}) \varphi(r) dv \quad (2)$$

式中: Ω 为局部损伤区; V 是 Ω 的体积; $f(\cdot)$ 是等效应力或应变函数; $\varphi(r)$ 为权函数.

各参数或函数的意义如下:

1. 损伤区 Ω

其大小与形状与材料的性能有关. 裂纹的萌生总是源于试件缺口根部表面的高应力区, 对于疲劳问题, Ω 一般为数个晶粒的尺寸. 从宏观角度出发, 可以认为破坏区是以缺口根部最高应力集中处为圆心的一个圆, 其大小可根据缺口几何尺寸及疲劳极限来确定.

2. 等效应力或应变函数

$f(\sigma_{ij})$ 和 $f(\varepsilon_{ij})$ 反映了材料、应力与应变对缺口强度的影响. 在宏观力学中通常采用 von Mises 等效应力(对韧性材料)和最大剪切应力(对脆性材料). 由于等效应力和应变函数包含了不同应力状态的影响, 这样克服了点应力应变准则难以处理的局部多轴应力应变状态问题.

3. 权函数

裂纹起始点附近的材料对裂纹起始点的材料有约束作用, 应力梯度不同, 约束作用也不同. $\varphi(r)$ 在物理意义上表征 Q 点处的等效应力(σ_i)和应变(ε_i)对 $|r|$ 处峰值应力(σ_{peak})或应变($\varepsilon_{\text{peak}}$)的贡献. 一般情况下, 缺口根部的应力应变集中最严重, 则有

1) $0 \leq \varphi(r) \leq 1$, 且 $\varphi(r)$ 为 $|r|$ 的广义单调降函数;

2) $\varphi(0) \equiv 1$, 缺口根部最大应力处对疲劳裂纹萌生的作用最大;

3) 当应力梯度 $G = 0$ 时, $\varphi(0) \equiv 1$, 即光滑试件或全屈服试件在破坏区域内各点对疲劳裂纹萌生作用相同.

对于各向同性材料, 因为应力应变分布与缺口形状有关, 所以权函数 $\varphi(r)$ 应与距离 $|r|$ 和方向 θ 有关. 为了简单起见, 本文取 $\varphi(r)$ 与距离 $|r|$ 成一阶的线性函数, 其具体形式如下:

对应应力场强参数

$$\varphi(r) = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_{\text{peak}}}\right) r (1 + \sin \theta) \quad (3)$$

对应应变场强参数

$$\varphi(r) = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\text{peak}}}\right) r (1 + \sin \theta) \quad (4)$$

其中: $(1 - \sigma_i / \sigma_{\text{peak}})$ 和 $(1 - \varepsilon_i / \varepsilon_{\text{peak}})$ 项反映了应力或应变梯度的影响.

4. 破坏准则

对于光滑件, 由于无应力集中, 则 $\varphi(0) = 1$. 在光滑试件内可认为应力或应变处处大小相等, 因此等效应力应变函数值不随点的位置而变化. 按应力应变场强法的定义, 应力场强参数, $\sigma_{\text{FI}} = f(\sigma_{ij})$, 当 $\sigma_{\text{FI}} = f(\sigma_{ij}) > \sigma_f$ 时光滑件发生疲劳破坏; 对应应变场强参数, 当 $\varepsilon_{\text{FI}} = f(\varepsilon_{ij}) > \varepsilon_f$ 时, 光滑件发生疲劳破坏. 对缺口件疲劳破坏准则为

$$\sigma_{\text{FI}}(\varepsilon_{\text{FI}}) \geq \sigma_f(\varepsilon_f) \quad (5)$$

即当缺口应力应变场强大于或等于同种材料的光滑试件的场强时, 缺口试件发生疲劳破坏.

从局部应力应变场强法原理可以看出, 该方法可同时适用于缺口件和光滑件, 且能够考虑缺口根部局

部多轴应力应变特性和应力应变梯度的影响。用 σ_{H} 和 ε_{H} 这两个场强参数构造疲劳损伤参量时,与传统局部应力应变法所需要的材料常数相同,不需做任何附加疲劳试验。本文利用有限元技术计算局部应力应变场强法的场强参数,无需对缺口根部进行假设,可用于任何复杂几何形状的缺口性的疲劳损伤分析与寿命预测。由于增量法是以分段折线的线性化来逼近其非线性的应力应变关系曲线,这样不受加载条件的限制,理论上比较完备,适用性比较强,因而本文采用增量弹塑性有限元法计算随机加载下的局部应力应变场强参数。

2 基于场强原理的随机疲劳寿命预测结果

所选用的载荷谱为某车架在某种路面上行驶时测得的999个峰谷值的随机谱。疲劳试验数据是在MTS810伺服式疲劳试验机上对正火45号钢进行随机疲劳试验得到的,加载条件为室温载荷控制,具体的疲劳试样几何尺寸以及疲劳试验数据结果详见文献[6]。疲劳试验使用了8个具有不同最大峰值的随机谱,试验频率在1.0~2.0 Hz之间。利用光学显微镜观测缺口根部表面萌生的疲劳裂纹。选裂纹长度达到0.5 mm所记录的试验载荷块数即为疲劳裂纹萌生寿命。

疲劳损伤公式分别采用了由Morrow修正的Manson-Coffin方程和SWT损伤,这两个损伤公式均能考虑平均应力的影响。其形式分别如下:

Manson-Coffin方程

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (6)$$

SWT损伤公式:

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (7)$$

疲劳损伤累积计算采用非线性疲劳损伤累积理论,其寿命预测结果如图2和图3所示。局部应力应变法的寿命预测结果如图4,可以看出,随着载荷水平降低,局部应力应变法的预测结果的误差趋于增大,而本文的局部应力应变场强法的预测精度相对比较稳定。这表明本文的理论预测结果是令人满意的,要好于局部应力应变法的预测结果。

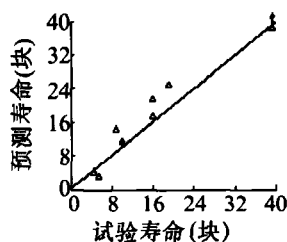


图2 由Manson-Coffin方程与非线性累积理论所预测的寿命与试验寿命的比较

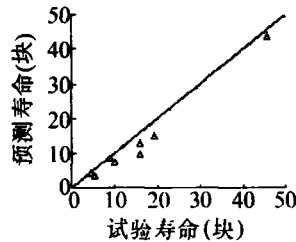


图3 由SWT损伤公式与非线性累积理论所预测的寿命与试验寿命的比较

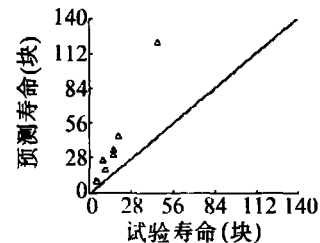


图4 局部应力应变法(SWT公式与线性累积)所预测的寿命与试验寿命的比较

3 结 论

1) 根据疲劳损伤具有局部性的特性,在原有应力场强法的基础上,发展了一种局部应力应变场强理论。该理论不仅考虑了缺口根部应力梯度,而且考虑了局部应变梯度。

2) 根据本文所提出的局部应力应变场强法,分别利用两种损伤公式(即线性与非线性疲劳损伤累积公式)预测了随机加载下的缺口件疲劳寿命。与传统的局部应力应变法的寿命预测结果对比表明,本文所给出的方法具有较高的预测精度。

参考文献:

- [1] YAO W X. Stress field intensity approach for predicting fatigue life[J]. International Journal of Fatigue, 1989, 15(3): 243-245.
- [2] YAO W X, XIA K Q, GU Y. On the fatigue notch factor[J]. International Journal of Fatigue, 1995, 17(4): 245-251.
- [3] YAO W X. The prediction of fatigue behavior by stress field intensity approach[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1996, 9(4): 337-349.
- [4] 郑楚鸿. 高周疲劳设计方法—应力场强法的研究[D]. 北京: 清华大学, 1984.
- [5] YAO W X. The prediction of fatigue behavior under stress field intensity approach[A]. The Fourth Russian-Chinese Scientific Conference on the Problems of Aircraft Structures Strength[C]. Novosibirsk, Russian, 1995. 262-274.
- [6] 叶笃毅. 随机载荷下结构件疲劳寿命估算研究[D]. 沈阳: 东北工学院机械学院, 1988.

New Prediction Method of Fatigue Life Under Random Loading

SHANG De-guang, WANG Da-kang

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

Abstract: According to the characteristic that fatigue damage is partial, on the basis of the stress field intensity method, a theory of local stress-strain field for fatigue damage at notch is presented in this paper, which considers the effects of the local stress-strain's gradient on fatigue damage. Through the finite element analysis on the elastoplasticity of notched specimen under the random alternate loading, a local stress-strain field intensity method is proposed for prediction of fatigue life under random loading. Using this method to predict the life of fatigue crack initiation has obtained better precision than the traditional local stress-strain method.

Key words: random loading; elastoplasticity finite element analysis; local stress-strain field intensity; fatigue damage; life prediction