

基于临界面法的缺口件多轴疲劳寿命预测^X

MULTIAXIAL FATIGUE LIFE PREDICTION FOR NOTCHED SPECIMENS
BASED ON THE CRITICAL PLANE APPROACH

尚德广^{XX} 王大康 李 明

(北京工业大学 机电学院 ,北京 100022)

SHANG Deguang WANG Dakang LI Ming

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

摘要 基于多轴损伤临界面原理 ,根据多轴疲劳损伤和裂纹萌生与扩展的特点 ,在所建立的统一型多轴疲劳损伤模型的基础上 ,进一步推广应用到缺口件的多轴疲劳寿命预测中。经多轴疲劳试验验证表明 ,所建立的多轴疲劳损伤模型可以较好地预测比例与非比例加载下缺口件的多轴疲劳寿命。

关键词 多轴疲劳 临界面法 缺口件 寿命预测

中图分类号 TH114 O346.2

Abstract On the basis of the critical plane approach and the characteristics of multiaxial fatigue damage and the crack initiation and growth , a unify multiaxial fatigue damage parameter based on the shear form is proposed by combining the behavior of the multiaxial fatigue damage and the crack initiation and propagation. The proposed multiaxial fatigue damage parameter is developed to predict multiaxial fatigue life prediction for notched specimens. It is shown by multiaxial fatigue experimental verification that the proposed multiaxial fatigue damage parameter can be used for multiaxial fatigue life prediction of notched specimens.

Key words Multiaxial fatigue; Critical plane approach; Notched specimens; Life prediction

Correspondent : SHANG Deguang , E-mail : shangdg @bjpu. edu. cn , Fax : + 86 - 10 - 67391617

The project supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 10172010) , the Foundation for University Key Teacher by Ministry of Education of China (No. M01020002) , the Foundation of Key Science and Technology Personnel of Beijing City of China (No. J01020101) and Foundation of Science and Technology Development Project of Beijing City of China(No. P0102200201) .

Manuscript received 20010219 , in revised form 20010620.

1 引言

工程零部件常常存在应力集中(即缺口) ,且大多数在多轴循环应力应变载荷下作用 ,多轴疲劳断裂是其主要破坏形式。目前对单轴疲劳缺口研究已有很多较为成熟的研究方法 ,如局部应力应变法、能量法等。但对于承受两种或三种模式的缺口多轴疲劳研究 ,其结果远未达到单轴疲劳研究那样成熟 ,尤其是多轴非比例加载下的缺口疲劳研究至今尚无较为成熟的方法。对于多轴比例加载下的缺口疲劳问题 ,Williams^[1]等研究了带环形槽和带键槽的缺口件 ,其缺口应变由Neuber 分析得到 ,利用 von Mises 准则可较好地预测结果。但对于非比例加载下 ,如何给出较为合适的损伤参量来预测缺口多轴疲劳寿命 ,目前国际上还没有较为认可的方法。

根据临界面法的物理意义 ,在光滑薄壁管试件的剪切型多轴疲劳损伤参量^[2]的基础上 ,进一步推广到

缺口件情况下。预测缺口 SAE 阶梯轴试样在拉扭和弯扭多轴加载下的疲劳寿命 ,其结果是令人满意的 ,从而为缺口多轴随机疲劳寿命预测研究打下基础。

2 统一剪切型多轴疲劳损伤模型

临界面法大多数采用最大剪切平面作为临界损伤平面 ,并利用该面上的最大剪切应变参数 γ_{max} 和法向应变参数 ϵ_n 作为构造损伤参量的两个基本参数。文献[3]针对拉扭试件研究指出 ,在比例加载下 ,多轴临界面上的最大剪切应变 γ_{max} 的两个折返点之间的法向应变幅度 ϵ_n^3 是非常小的(ϵ_n^3 的详细计算方法见文献[2]) ,且等于其最大变化范围。非比例加载下 , ϵ_n^3 随着相角的增大而逐渐增大。在疲劳寿命最短的 90° 相角的非比例加载下 , ϵ_n^3 已达到该等效应变情况下的最大值 ,且等于 ϵ_n 变化的幅值。这说明 γ_{max} 与 ϵ_n 是控制多轴疲劳损伤的两个重要参数。如果利用 von Mises

X 20010219 收到初稿 ,20010620 收到修改稿。国家自然科学基金(10172010) ,国家教育部高校骨干教师基金资助项目(M01020002) ,北京市教委科技发展计划项目(90102200201)与北京市青年科技骨干培养基金资助项目(J01020101)。

XX 尚德广 ,男 ,1963 年 1 月生 ,辽宁省昌图县人 ,汉族。北京工业大学机电学院教授 ,博士生导师 ,研究方向为机械结构强度。

准则将临界面上 σ_{\max} 、 τ_n^3 两参数合成一个等效剪应变,并用其作为临界面上的损伤控制参量,那么就可以得到一种基于剪切形式的多轴疲劳损伤参量^[2],即

$$\frac{\tau_{eq}^c}{2} = [3 \frac{\tau_n^2}{\sigma_{\max}^2} + (\frac{\sigma_{\max}^2}{\tau_n^2})^2]^{1/2} \quad (1)$$

τ_n^3 可由下式计算

$$\tau_n^3 = \frac{1}{2} \sigma_n [1 + \cos(\phi + \theta)] \quad (2)$$

($\phi + \theta$) 为与试件轴线成任意角度的平面上的正应变 σ 与切应变 τ 之间的相位差。

比例加载下

$$\frac{\tau_{eq}^c}{2} = \tau_{eq} P_2 \quad (3)$$

即退化为等效剪应变的形式。

纯扭循环加载下

$$\frac{\tau_{eq}^c}{2} = P_2 \quad (4)$$

即退化为纯剪状态下的剪应变幅。

将式(1)与剪切形式的 Manson2Coffin 方程相联系,即可得出基于剪切形式的多轴疲劳寿命公式

$$\frac{\tau_{eq}^c}{2} = \frac{f}{G} (2N_f)^b + \tau_f (2N_f)^c \quad (5)$$

其中 τ_f 、 f 、 b 、 c 为纯扭循环加载下的疲劳材料常数, N_f 为疲劳寿命。

在比例加载下,该式可退化成等效剪切应变变的形式。在纯扭加载条件下,该式可化为纯扭形式的 Manson2Coffin 方程。

由此看出,该多轴疲劳损伤参量可作为统一的多轴疲劳损伤准则,既可描述非比例和比例加载下多轴疲劳损伤,也可描述单轴加载下的疲劳损伤,用其建立的多轴疲劳损伤模型,不需要任何附加的多轴疲劳性能常数,且便于工程应用。

3 多轴加载下缺口件疲劳寿命预测

上述建立的剪切统一型多轴疲劳损伤参量是以光滑件为研究对象而得出的,该损伤参量是否适用于缺口件,需要进一步研究验证。

现以 SAE1045 缺口轴试件^[4]为研究对象,该试件为一阶梯轴,其几何尺寸见图 1。在弯扭多轴加载下,裂纹多萌生在两轴肩(过渡半径为 5 mm)之间的区域(视为缺口),因而要对该部位进行应力应变分析。

试样的受拉自由表面可视为平面应力状态,则缺

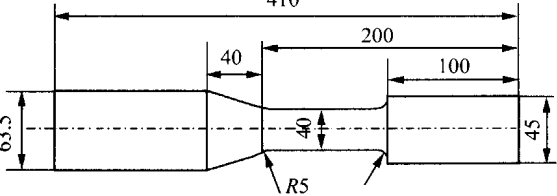


图 1 SAE1045 弯扭多轴缺口试样

Fig. 1 Bending-torsion multiaxial fatigue specimen with notch for SAE1045

口根部的应变张量由五个非零应变力分量组成,写成幅度形式

$$\epsilon_{ij}^a = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^a & \epsilon_{12}^a P_2 & 0 \\ \epsilon_{21}^a P_2 & \epsilon_{22}^a & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^a \end{bmatrix} \quad (6)$$

由连续介质力学原理可确定出三个主应变范围

ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 的值,即

$$(\epsilon - \epsilon_1)^3 - J_1(\epsilon - \epsilon_1)^2 + J_2(\epsilon - \epsilon_1) - J_3 = 0 \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} J_1 &= \epsilon_{11}^a + \epsilon_{22}^a + \epsilon_{33}^a \\ J_2 &= \frac{1}{2} [\epsilon_{11}^a \epsilon_{22}^a + \epsilon_{22}^a \epsilon_{33}^a + \epsilon_{11}^a \epsilon_{33}^a - (\epsilon_{12}^a)^2 - (\epsilon_{23}^a)^2 - (\epsilon_{31}^a)^2] \\ J_3 &= \frac{1}{6} [\epsilon_{11}^a \epsilon_{22}^a \epsilon_{33}^a + 2 \epsilon_{12}^a \epsilon_{23}^a \epsilon_{31}^a - (\epsilon_{12}^a)^2 \epsilon_{33}^a - (\epsilon_{23}^a)^2 \epsilon_{11}^a - (\epsilon_{31}^a)^2 \epsilon_{22}^a] \end{aligned}$$

临界面上的最大剪切应变范围为

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\epsilon_1 - \epsilon_3) \quad (8)$$

最大法向应变范围为

$$\epsilon_n = (\epsilon_1 + \epsilon_3) P_2 \quad (9)$$

如果已知缺口根部的表面应变张量分量的值(可通过有限元计算或由应变计实测出),则由式(8)、(9)可计算出临界面上的最大剪切应变和法向应变值。将其代入式(1)和(5)中即可预测该缺口轴试件的多轴疲劳寿命。

4 试验验证

选用 1045HR 钢光滑薄壁管和阶梯缺口轴两种试件进行试验验证,在室温空气介质条件下进行试验。所有试验为拉扭比例与非比例复合加载,其单轴疲劳材料常数见表 1。

表 1 单轴疲劳材料常数

Tab. 1 Material constants for uniaxial fatigue

材料	τ_f MPa	f	b	c	G MPa
1045HR	505	0.413	- 0.097	- 0.445	79 100

试验光滑件疲劳数据取自文献[5],加载路径为比例和 90°非比例路径。加载波形为正弦波,预测值与试验结果的比较见图 2,其误差分散带基本在 2 个因子之内。

可以看出,对于光滑件理论预测结果和试验寿命值的误差基本在两个因子之内,而且可以用于中长寿命预测。

为了验证本文所提出的理论对多轴缺口件的描述能力,选用美国 Illinois 大学对 SAE1045 钢缺口轴在弯扭比例与非比例加载下(相角为 90°)的多轴疲劳试验数据^[4],其中缺口根部表面应变张量的分量由应变片实测得出,本文理论预测值与试验值的比较见图 3。

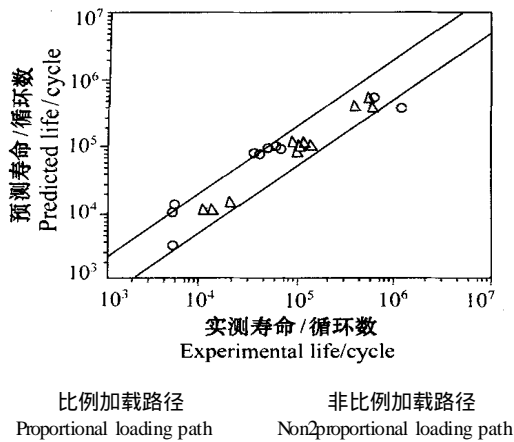


图2 1045HR 钢光滑件多轴疲劳寿命与预测值的比较
Fig.2 Comparison between experimental and theoretical results of multiaxial fatigue life for 1045 steel smooth specimens

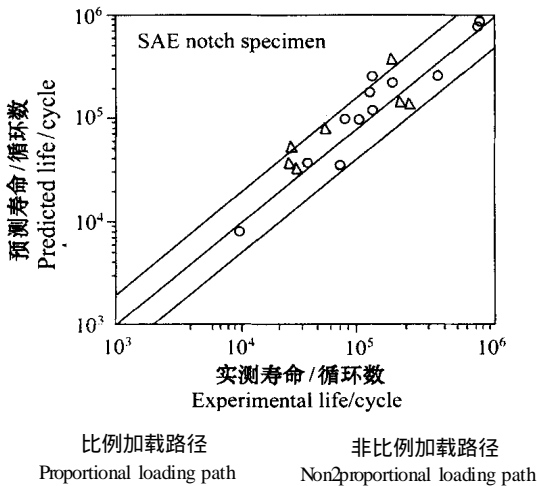


图3 SAE1045 钢缺口件多轴疲劳寿命试验值与预测值的比较
Fig.3 Comparison between experimental and theoretical results of multiaxial fatigue for 1045 steel notched specimens

可以看出,本文的理论预测结果基本可以达到光滑件的寿命预测精度;说明式(4)适用范围比较大,即可

用于光滑件的多轴疲劳损伤计算,又可以用来预测缺口件的多轴疲劳寿命,即可用在多轴比例加载条件下,又可用于多轴非比例加载情况下。

5 结论

1) 以临界面上的最大剪切应变和两个最大剪切应变折返点间的法向应变为疲劳损伤参量,建立剪切形式的多轴疲劳损伤参量,不仅适用于光滑件比例加载与非比例加载条件下,而且可适用于缺口件的多轴损伤的描述。

2) 所提出的损伤参量中不含有材料常数,便于工程应用。经由光滑和缺口多轴疲劳试件的比例与非比例加载试验验证表明,本文所提出的多轴疲劳损伤模型具有较大的应用范围。

References

- Williams R A, Placek R J, Klufas O, Adams S L, Gonyea D C. BiaxialPro2 sion fatigue of turbine generator rotor steels. Multiaxial Fatigue, ASTM STP 853, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985. 440 ~ 462.
- SHANG Deguang, YAO Weixing, WANG Dejun, et al. Multiaxial fatigue life prediction model based on shear form. Journal of Mechanical Strength, 1999, 21 (2) : 141 ~ 144 (In Chinese) (尚德广,姚卫星,王德俊,等,基于剪切形式的多轴疲劳寿命预测模型. 机械强度, 1999, 21 (2) : 141 ~ 144).
- SHANG Deguang, WANG Dejun. A new multiaxial fatigue damage model based on the critical plane approach. Int J Fatigue, 1998, 20 (3) : 241 ~ 245.
- Peter Kurath, Stephen D Downing, Dale R Galliard. Summary of non2hard2 ened notch shaft round robin program. Multiaxial Fatigue Analysis and Exper2 iments, Warrendale, PA 1509620001: Society of Automotive Engineers, Inc. 400 Commonwealth Drive, AE214, 1989.
- Fatemi A, Socie D F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out2of phase loading. Fatigue Engng Mater. Struct, 1988, 14 : 149 ~ 165.

References

- Davies B, Barron C, Montague S, Smith J, Murray J, Christenson T. High g MEMS integrated accelerometer. Proc. SPIE, 1997, 3 046 : 52.
- Ning Y, Loke Y, McKinnon. Fabrication and characterization of high g2 force silicon piezoresistive accelerometers. Sensors and Actuators, 1995, A 48 : 55.
- Chen H, Shen S, Bao M. Over2range capacity of a piezoresistive microaccel2 erometer. Sensors and Actuators, 1997, A 58 : 197.
- Partridge A, Reynolds J, Chui B, Chow E, Fitzgerald A, Zhang L, Maluf N, Kenny T. A high performance planar piezoresistive accelerometer. Jour2 nal of Microelectromechanical Systems, 2000, 9 (1) : 58.

(上接第 150 页 Continued from page 150)

曲面,此曲面轨迹为悬臂梁承受最大过载时梁的挠度曲面,当悬臂梁承受较大过载时,悬臂梁与保护曲面形成多点接触,相对于传统的采用平面保护方法的两点支承,悬臂梁上的应力分布更均匀,进一步改善了梁在过载情况下的受力情况,提高了悬臂梁在高过载情况下保护的可靠性。同时由于过载曲面的存在,使传感器在敏感方向上的阻尼比为 0.239,靠近临界阻尼,有效抑制了悬臂梁的自由振动模态,使传感器的测试精度更高。设计中在悬臂梁的根部设计了空槽,能够较好地屏蔽封装应力。