

一种多轴疲劳寿命预测的统一模型

张忠平¹, 李 静¹, 张春山², 刘京春³, 孙 强¹

(1. 空军工程大学 理学院, 陕西 西安 710051; 2. 空军驻西安飞机制造公司军代表室, 陕西 西安 710089; 3. 西安航空发动机集团(有限)公司, 陕西 西安 710062)

摘 要:基于SAE 1045中碳钢的单-多轴疲劳试验结果,在研究了扭转名义应力幅与拉伸名义应力幅不同比值时的多轴疲劳寿命预测模型之后,建立了统一的多轴疲劳寿命预测模型。发现:不同的扭转名义应力幅与拉伸名义应力幅之比导致不同的寿命预测模型,为寻求单轴模型与多轴统一模型的关系,假设单轴疲劳寿命预测模型中的疲劳强度指数和疲劳延性指数不变,而对疲劳强度系数乘以1.543 5、疲劳延性系数乘以0.671 3,以第一主应变幅取代单轴拉压应变幅,则修正后的单轴模型等价于多轴统一模型,利用修正后的单轴模型可以预测任意扭转名义应力幅与拉伸名义应力幅之比时的多轴疲劳寿命。

关键词:单轴疲劳;多轴疲劳;第一主应变幅;多轴统一模型;寿命预测

中图分类号:TH114 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2007)04-0012-03

工程实际中,大多数机械和工程结构承受多轴交变载荷的作用,因而,其失效类型也属于多轴疲劳失效,尽可能准确地预测材料的多轴疲劳寿命是研究多轴疲劳问题的主要目的。

目前,有多种预测多轴疲劳寿命的模型。郭成璧、张文孝等人^[1-2]直接拟合等效应变幅计算值与多轴疲劳寿命试验值的函数关系,得到了等效应变预测多轴疲劳寿命的模型,该模型虽然形式简单,但当缺乏多轴疲劳试验数据时,无法利用已有单轴拉压疲劳试验数据和规律估算材料的多轴疲劳寿命。于海生^[3]利用Makinde-Neale广义疲劳失效准则的变异方程对钛合金BT9进行了多轴应变条件下的寿命预测。蒲泽林、刘宗德等人^[4-5]以von Mises等效应变幅取代单轴应变——寿命关系中的应变幅,直接利用所得关系预测材料的纯剪切疲劳寿命。赵少汗^[6]对单轴应变——寿命关系中的疲劳强度系数进行了修正,并以等效应变幅取代了(单轴拉压)应变幅得到了多轴疲劳寿命预测模型。这3个模型的特点在于:建立了多轴模型与单轴模型的关系,当缺乏多轴疲劳试验数据时,可以利用已有的单轴疲劳试验数据估算材料的多轴疲劳寿命^[3-6]。文献[7]指出: von Mises等效应变幅和第一主应变幅都可以用来预测材料的多轴疲劳寿命,本文从SAE1045中碳钢单-多轴疲劳试验结果出发,以Manson-Coffin方程为基础,对单轴疲劳寿命预测模型的疲劳强度系数和疲劳延性系数同时进行修正,试图得到第一主应变幅预测多轴疲劳寿命的预测模型。

1 多轴疲劳寿命预测的统一模型

通常,多轴疲劳寿命预测模型是在对单轴模型修正的基础上得到的。在众多的单轴疲劳寿命预测模型中, Manson-Coffin方程是应用最多的一种,其表达式为^[8]

$$\Delta \varepsilon / 2 = \sigma'_{f'} (2N)^b / E + \varepsilon'_{f'} (2N)^c \quad (1)$$

式中: $\Delta \varepsilon$ 是应变范围, E 是 Young's 模量, N 是疲劳寿命, $\sigma'_{f'}$ 是疲劳强度系数, b 是疲劳强度指数, $\varepsilon'_{f'}$ 是疲劳延性系数, c 是疲劳延性指数。

文献[7]对SAE1045中碳钢进行了单轴与多轴疲劳试验,试验过程中,单轴疲劳采用光滑试件,多轴疲

收稿日期:2006-12-31

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2003E₁ × 15)和空军工程大学理学院学术基金资助项目

作者简介:张忠平(1962-),男,教授,主要从事航空材料及航空器件研究。

劳采用含横向中心圆孔的实心圆柱试件,多轴疲劳试验过程中,试件两端同步施加扭转和拉伸载荷,并以 λ 表示扭转名义应力幅与拉伸名义应力幅的比值,则在 λ 分别等于 0、0.5、2 和 ∞ 的情形下进行了试验,单、多轴疲劳试验结果分别见图 1 - 图 2^[7]。图 2 中的符号:○、□、△、× 分别对应于 λ 等于 0、0.5、2 和 ∞ ,图中的纵坐标—第一主应变幅是利用有限元方法计算得到的^[7]。现在,以 Manson - Coffin 方程(1)为基础,对图 1 中的单轴疲劳试验数据进行函数拟合,得到:

$$\Delta\varepsilon/2 = 0.0046(2N)^{-0.14} + 0.3897(2N)^{-0.5235} \quad (2)$$

式(2)就是 SAE1045 中碳钢的单轴疲劳应变 - 寿命方程,相应的应变 - 寿命曲线示于图 1 中,对于确定的应变幅,利用式(2)或图 1,就可以预测材料的单轴应变疲劳寿命。

进一步,如果假设多轴疲劳寿命预测模型的形式与式(1)相同,以第一主应变幅取代式(1)中的(单轴拉压)应变幅,并对图 2 中不同 λ 值对应的试验数据分别进行函数拟合,则有:

$$\Delta\varepsilon_1/2 = 0.0258(2N)^{-0.198} + 0.0956(2N)^{-0.887} \quad (\lambda = 0) \quad (3)$$

$$\Delta\varepsilon_1/2 = 0.0321(2N)^{-0.2192} + 0.0658(2N)^{-0.6239} \quad (\lambda = 0.5) \quad (4)$$

$$\Delta\varepsilon_1/2 = 0.0031(2N)^{-0.0836} + 0.1592(2N)^{-0.4528} \quad (\lambda = 2) \quad (5)$$

$$\Delta\varepsilon_1/2 = 0.0045(2N)^{-0.1904} + 0.9572(2N)^{-0.6451} \quad (\lambda = \infty) \quad (6)$$

与式(3) - 式(6)相应的曲线示于图 2 中。图 2 显示,曲线位置随扭转名义应力幅与拉伸名义应力幅比值 λ 的变化而变化,对应不同的 λ , $\Delta\varepsilon_1/2 - N$ 函数关系或曲线位置不同,因此,即使对于相同的第一主应变幅,疲劳寿命的预测结果也随 λ 的不同而不等。工程实际中,一方面, λ 可能取 $[0, \infty)$ 之间的任意值,对每一个可能的 λ 值都进行多轴疲劳试验是不现实的;另一方面,机械和工程构件的名义应力有时候很难确定,但危险部位的实际应力 - 应变却容易得到,因此,如果能够建立 $\Delta\varepsilon_1/2 - N$ 的统一的函数表达式,且该表达式能够兼顾不同 λ 值的疲劳试验结果,则利用该统一表达式可以近似估算任意 λ 值下的疲劳寿命。为此,假设多轴疲劳应变 - 寿命方程的形式与式(2)相同,而且,方程中的疲劳强度指数 b 和疲劳延性指数 c 仍然分别是 -0.14 和 -0.523 5,以第一主应变幅取代式(2)中的(单轴拉压)应变幅,对图 2 所示的所有试验点进行函数拟合,便有:

$$\Delta\varepsilon_1/2 = 0.0071(2N)^{-0.14} + 0.2616(2N)^{-0.5235} \quad (7)$$

式(7)就是 SAE1045 中碳钢的多轴疲劳应变 - 寿命方程,相应的应变 - 寿命曲线示于图 2 中,对于确定的第一主应变幅,无论扭转名义应力幅与拉伸名义应力幅的比值如何,利用式(7)或图 2,就可以预测材料的多轴应变疲劳寿命。当然,对于确定的 λ ,式(7)估算的疲劳寿命没有式(3) - 式(6)估算的精确,原因在于式(7)来源于不同 λ 的所有试验点,而式(3) - 式(6)来源于确定 λ 的确定试验点。

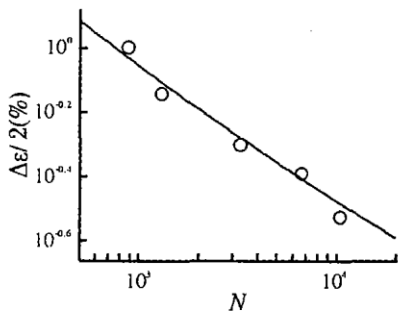


图 1 SAE1045 中碳钢的单轴疲劳试验结果

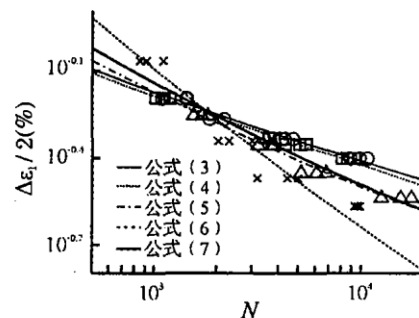


图 2 不同 λ 时的 $\Delta\varepsilon_1/2 - N$ 曲线

应用式(7)预测材料多轴应变疲劳寿命的前提条件是多轴疲劳试验,然而,正如前面已经指出的那样,多轴疲劳试验设备昂贵,试验过程复杂费时,国内目前现成的试验结果并不多见,相比之下,单轴疲劳试验简单,许多材料的试验结果已经汇集成册,如果能利用单轴疲劳试验结果预测多轴疲劳寿命,则会节约大量的物力、人力和财力。为此,比较式(2)、(7),可见,多 - 单轴的疲劳强度系数的比值是 1.543 5,疲劳延性系数的比值是 0.671 3,因此,式(7)可以变为

$$\Delta\varepsilon_1/2 = 1.5435\sigma'_f(2N)^b/E + 0.6713\varepsilon'_f(2N)^c \quad (8)$$

式(8)就是 SAE1045 中碳钢的多轴疲劳寿命预测统一模型,其中的 σ'_f 、 b 、 ε'_f 和 c 都是单轴疲劳常数。式(8)表明,只要知道了单轴疲劳的试验结果,就可以预测多轴应变疲劳寿命。甚至,如果没有单轴疲劳试

验结果,利用经验公式可以理论估算疲劳常数 σ_f' 、 b 、 ϵ_f' 和 c ,进而可以理论估算材料的多轴疲劳寿命。式(8)还表明,相较于单轴疲劳寿命的预测模型,多轴疲劳寿命预测统一模型中,弹性线向上平移了 0.5435 个单位,塑性线向下平移了 0.3287 个单位。多轴疲劳寿命预测统一模型中,弹性线上移塑性线下移的事实似乎表明:对于确定大小的应变幅,单轴疲劳中的弹性应变分量大于多轴疲劳中的弹性应变分量,而单轴疲劳中的塑性应变分量小于多轴疲劳中的塑性应变分量。

2 结论

多轴疲劳寿命预测的统一模型是 $\Delta\epsilon_1/2 = 1.5435\sigma_f'(2N)^b/E + 0.6713\epsilon_f'(2N)^c$ 。该模型表明,只要测量或利用有限元方法计算得到考察部位的第一主应变幅,无论扭转名义应力幅与拉伸名义应力幅的比值如何,借助该模型就可以预测材料的多轴应变疲劳寿命。

多轴疲劳寿命预测统一模型的特点在于:借助于单轴疲劳的试验结果就可以确定多轴疲劳寿命的预测模型,不仅避免了复杂的多轴疲劳试验,而且可以反过来利用预测结果检验多轴疲劳试验结果的精确性。

参考文献:

- [1] 郭成璧,何雪宏,梁莎莉,等. 中碳钢三维高温低周疲劳寿命评价[J]. 大连理工大学学报, 1992,32(2):193-200.
- [2] 张文孝,郭成璧. 应用当量应变法预测多维高温低周疲劳寿命[J]. 机械强度, 2002,24(4):591-593.
- [3] 于海生. 疲劳失效准则在钛合金 BT9 低周疲劳寿命估算中的应用[J]. 机械科学与技术, 2001,20(1):256-260.
- [4] 蒲泽林,刘宗德,杨 昆,等. 汽轮机联轴器螺栓剪切疲劳试验研究[J]. 机械强度,2002,24(4):588-590.
- [5] 蒲泽林,杨 昆,刘宗德,等. 汽轮机联轴器螺栓疲劳特性及寿命预测模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002,22(7):90-94.
- [6] 赵少汗. 多轴疲劳的应变-寿命曲线[J]. 机械强度. 1999,21(4):305-306.
- [7] Yip Ming - Chuen, Jen Yi - Ming . Baxial Fatigue Crack Initiation Life Prediction of Solid Cylindrical Specimens With Transverse Circular Holes[J]. International Journal Fatigue,1996, 18(2): 111-117.
- [8] Dowling N E, Brose W R and Wilson W K. Notched Member Fatigue Life Predictions by the Local Strain Approach [J]. Advances in Engineering, Fatigue Under Complex Loading,1977, 6: 55-84.

(编辑:姚树峰)

A Unified Model for Predication of Multi - Axial Fatigue Life

ZHANG Zhong - ping¹, LI Jing¹, ZHANG Chun - shan², LIU Jing - chun³, SUN Qiang¹

(1. The Institute of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Military Representative Office of PLA in Xi'an Airplane Company, Xi'an 710089, China; 3. Xi'an Aero - engine Company, Xi'an 710062, China)

Abstract: Based on the fatigue test results of SAE 1045 medium carbon steel, the multi - axial fatigue life predication models for different ratios of torsional nominal stress amplitude to the axial one are studied respectively. Then a unified multi - axial fatigue life predication model is founded. It is found that the different ratios induce different models. In order to get the relationship between the axial model and the unified multi - axial model, it is supposed that the fatigue strength exponent and the fatigue ductility exponent are constants, while the fatigue strength coefficient times 1.5435 and the fatigue ductility coefficient times 0.6713, the maximum principle strain amplitude replaces the axial push - pull strain amplitude, then the revised axial fatigue life predication model is equivalent to the unified multi - axial model. Therefore, the revised axial fatigue life predication model can be used to predict the multi - axial fatigue life for any ratio of torsional nominal stress amplitude to the axial one.

Key words: axial fatigue; multi - axial fatigue; maximum principle strain amplitude; unified multi - axial model; fatigue life predication