

多轴随机载荷下的疲劳寿命估算方法

吴志荣¹, 胡绪腾¹, 宋迎东^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 航空宇航学院 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 提出了一种多轴随机载荷下的疲劳寿命预测方法. 通过雨流计数法对各平面上的剪应变进行循环计数, 以统计出的剪应变循环作为多轴疲劳损伤的主要控制参数, 将各剪应变循环历程内对应的最大正应力和正应变变程作为多轴疲劳损伤的第二控制参数. 根据多轴疲劳寿命模型计算出各平面上的损伤, 以最大损伤平面作为多轴随机疲劳的临界平面, 通过该临界平面上的损伤计算出多轴随机载荷下的疲劳寿命. 采用 SNCM630 钢, 304 不锈钢和 S45C 钢 3 种金属材料的多轴随机疲劳试验数据对提出的寿命预测方法进行评估和验证. 结果表明: 疲劳寿命预测结果大都分布在试验结果的 2 倍分散带之内.

关 键 词: 寿命预测; 多轴疲劳; 随机载荷; 临界平面; 循环计数

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Estimation method for fatigue life under multi-axial random loading

WU Zhi-rong¹, HU Xu-teng¹, SONG Ying-dong^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: An estimation method for fatigue life under multi-axial random loading was proposed. Firstly the rain-flow counting method was used to identify shear strain cycles on each plane. The shear strain cycles were taken as a main control parameter of multi-axial fatigue damage. Then the maximum normal stress and normal strain range within each shear strain cycle were calculated as the second damage control parameter. The damage of each plane was calculated by multi-axial fatigue life model and the critical plane was identified as the plane with the maximum damage. The fatigue life was determined using the damage associated with the plane. The method for fatigue life under multi-axial random loading was evaluated and validated by the multi-axial random fatigue test datum of SNCM630 steel, 304 stainless steel and S45C steel. The multi-axial random fatigue life prediction results of these materials are almost within a factor of two scatter band of the test results.

Key words: life prediction; multi-axial fatigue; random loading; critical plan; cycle counting

工程中的许多结构或构件在服役过程中发生的疲劳失效大多为多轴疲劳失效。一方面,由于这些工程结构自身的几何形状复杂,其上常包含小孔、凸台、焊缝等,即使在单一疲劳载荷加载下,结构的局部应力应变状态实际上为多轴应力应变状态;另一方面,这些工程结构在服役过程中往往承受着多种载荷的作用(例如航空发动机工作时同时承受着机动载荷和气动载荷的复合作用),各类载荷之间可能为比例的,也可能为非比例的,甚至是随机载荷。目前多轴疲劳问题的研究主要集中在多轴常幅载荷下的寿命模型研究,根据疲劳损伤参数选择不同可将寿命模型分为 3 类:即等效应力应变法、能量法以及临界平面法。早期的多种疲劳寿命预测是基于单轴疲劳寿命预测的研究成果而提出来的,以应力的组合或应变的组合来等效为多轴疲劳的损伤控制参数,其中具有代表性的组合包括 Von Mises 准则和 Tresca 准则。能量法在多轴疲劳寿命预测领域具有十分重要的位置,许多研究学者提出材料的疲劳损伤与循环塑性变形及塑性应变能相关, Lee 等^[1]在 Garud 和 Jordan 等^[2-3]的研究基础上提出了以弹性应变能与塑性应变能之和作为多轴疲劳损伤的寿命模型。临界平面法被公认为是研究多轴疲劳寿命预测问题最有效的方法^[4-8], Brown 等^[9]和 Fatemi 等^[10]以最大剪应变幅值平面为临界平面,提出最大剪应变幅值与临界平面上应变或应力的组合作为多轴疲劳损伤的控制参数。国内学者赵勇铭等^[11],李静等^[12]也在这一领域作出了一些贡献。尽管在多轴常幅疲劳寿命估算方面取得了许多成就,但在多轴随机疲劳方面的研究却相对较少。由于多轴随机疲劳问题的复杂性(例如多轴随机载荷的处理、临界平面的确定、损伤参数的选择等),使得多轴随机载荷下的疲劳寿命预测鲜获满意的结果。本文针对多轴随机载荷下的疲劳寿命问题,以薄壁圆筒为研究对象,提出了一种多轴随机载荷下的疲劳寿命估算方法。

1 基于临界平面的多轴疲劳寿命模型

材料在循环载荷作用下,其内部稳定滑移带发生局部塑性变形,导致疲劳裂纹的萌生,而稳定滑移带的方向一般与最大剪应变的方向一致^[13-14],试验观察结果也表明,在不同的循环载荷路径作用下,疲劳裂纹往往萌生在最大剪切平面上^[9,13-16]。因此学者提出以最大剪应变幅值

$\Delta\gamma_{\max}/2$ 作为疲劳损伤的控制参数,得到基于最大剪应变幅值的寿命模型^[17]:

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} = f(N_f) \quad (1)$$

式中 N_f 为试验寿命。

但是许多学者研究发现单独以最大剪应变幅值进行寿命预测时,单轴拉压的疲劳数据往往处于纯剪切疲劳数据的下方^[9-10,15,18-19],如果单纯以最大剪应变幅值进行多轴疲劳寿命预测,必将降低疲劳寿命预测的精度,因此有必要引入第二参数对最大剪应变幅值进行修正。另外,已有的试验研究也表明^[10,20],裂纹往往先萌生于最大剪切平面上,然后沿着该平面上的最大法向应变方向进行扩展,因此在构造损伤参数的时候可以考法向应力和法向应变对裂纹扩展的影响。Brown 和 Miller^[9]认为临界平面上的正应变对裂纹的扩展具有促进作用,提出以最大剪应变幅值 $\Delta\gamma_{\max}/2$ 和临界平面上的正应变幅值 ϵ_n 作为多轴疲劳损伤的控制参数的 BM(Brown-Miller)模型, Kandile 等^[20]在 BM 模型的基础上,提出了一种应用方便的多轴疲劳寿命 KBM(Kandile-Brown-Miller)模型。另外一些学者的研究结果表明完全基于应变量的控制参数不能够有效地描述非比例循环硬化的影响^[10]。Fatemi 和 Socie^[10]提出以最大剪应变幅值及临界平面上的正应力作为多轴疲劳损伤控制参数。吴志荣等^[21]提出以最大剪应变幅值 $\Delta\gamma_{\max}/2$ 和最大剪应变幅值平面上修正的 SWT(Smith-Watson-Topper)参数作为多轴疲劳损伤控制参数,提出了如下模型:

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + k \left(\frac{\sigma_{n,\max} \Delta\epsilon_n}{E} \right)^{0.5} = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma'_f (2N_f)^{c_0} \quad (2)$$

其中 τ'_f 为剪切疲劳强度系数, G 为切变模量, γ'_f 为剪切疲劳延性系数, b_0 和 c_0 分别为剪切疲劳强度指数和剪切疲劳延性指数。上述 5 个参数由纯扭转疲劳试验数据拟合获得。 k 为单轴拉压疲劳修正参数,即将单轴拉压的疲劳数据修正到纯扭转疲劳数据的位置, k 的计算方法参考文献^[21]。经纯 Ti, BT9 钛合金, 304 不锈钢等多种材料的多轴常幅疲劳试验验证,该寿命模型可以同时适用于比例和非比例常幅加载,可以描述非比例附加循环硬化、平均应力等对多轴疲劳寿命的影响。但是对于多轴随机疲劳,上述模型的应用遇到了一些困难,多轴随机载荷下的各循环所对应的最

大剪切平面并不是一个同平面,因此以最大剪应变为临界平面的假设并不适用于多轴随机疲劳问题.在随机载荷作用下,疲劳损伤有

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_{fi}} \quad (3)$$

其中 n 为循环的数目, N_{fi} 为第 i 个循环所对应的疲劳寿命.疲劳损伤 D 作为疲劳失效的衡量,即当疲劳损伤 D 达到一定数值时就发生疲劳失效.在多轴随机载荷作用下,疲劳失效可理解为存在某个平面上的疲劳损伤 D 最先达到了临界值而发生失效.基于这样的假设将式(2)的模型修正为

$$\frac{\Delta\gamma}{2} + k \left(\frac{\sigma_{n,\max} \Delta\epsilon_n}{E} \right)^{0.5} = \frac{\tau'_i}{G} (2N_i)^{b_0} + \gamma'_i (2N_i)^{c_0} \quad (4)$$

其中 $\Delta\gamma/2$ 为某个平面上的剪应变幅值, $\sigma_{n,\max}$ 和 $\Delta\epsilon_n$ 分别为该平面上对应剪应变循环历程内的最大正应力和正应变历程.根据式(4)计算出第 i 个循环的疲劳损伤 $1/N_{fi}$, 然后根据式(3)计算出所有的循环的总疲劳损伤 D .对于多轴随机疲劳下的临界平面定义为具有最大疲劳损伤 D_{\max} 的平面.计算时取平面位置 θ , 以 0.1° 步长从 0° 变化到 180° , 计算出每个平面上的疲劳损伤 D , 取最大疲劳损伤 D_{\max} 的平面作为临界平面, 多轴随机载荷下的疲劳寿命以该平面上的疲劳损伤 D_{\max} 来估算, 疲劳寿命为 $1/D_{\max}$ 个载荷块.

2 多轴随机疲劳寿命计算

根据上述确定以最大疲劳损伤 D_{\max} 平面为临界平面, 多轴随机疲劳寿命估算的步骤如图 1 所示. 给定施加的应变历程, 根据试验测出应力历程, 也可以通过有限元计算或通过本构关系确定应力历程, 得到应变应力历程之后将应变应力旋转到某个平面上, 然后对该平面上的剪应变进行多轴循环计数, 统计出每个剪应变循环历程内的最大正应力和正应变历程. 最后进行疲劳损伤计算和疲劳寿命估算.

2.1 应力计算方法

由于外加应变和应力历程作为多轴随机疲劳估算的输入量, 对于应变控制的多轴随机试验如果没有记录应力历程, 则可以根据有限元计算或本构关系确定应力历程. 本文对于给定的应变历程, 采用 Ramberg-Osgood 方程来描述稳定的应力-应变关系^[22].

对于轴向载荷有

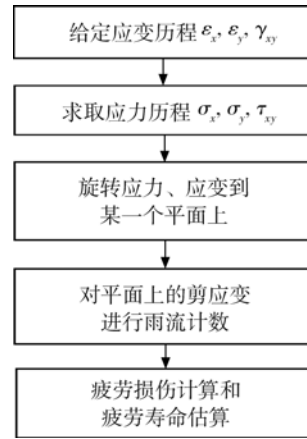


图 1 多轴随机疲劳寿命估算步骤

Fig. 1 Steps for estimation of fatiguelife under multi-axial random loading

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (5)$$

对于扭转载荷有

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = \frac{\Delta\tau}{2G} + \left(\frac{\Delta\tau}{2K'_0} \right)^{1/n'_0} \quad (6)$$

其中 K' 和 K'_0 分别为材料轴向和剪切硬化系数, n' 和 n'_0 分别为材料轴向和剪切硬化指数.

2.2 多轴循环计数

材料在循环载荷作用下, 其内部稳定滑移带发生局部塑性变形, 导致疲劳裂纹萌生, 而稳定滑移带的方向一般与最大剪应变的方向一致, 因此剪应变是控制疲劳损伤的重要参数. 同时疲劳裂纹的扩展是沿着裂纹尖端剪切带的聚合过程, 裂纹面上的正应变和正应力会加速这种聚合过程^[10]. Jordan 等^[3] 从试验结果中发现: 剪应变平面上的剪应变与正应变之间的相位差对疲劳寿命没有影响, 即在一个剪应变循环内, 正应变的位置不影响疲劳损伤. 基于这样的理论, 首先对平面上的剪应变历程进行雨流计算, 得到剪应变循环, 然后求取每个剪应变循环历程内的最大正应力和正应变历程. 举例说明多轴计数方法, 图 2 为针对某平面上一段剪应变 γ 、正应力 σ_n 、正应变 ϵ_n 历程的多轴循环计数方法, 首先对剪应变历程进行雨流计数, 得到循环, 2-3-2', 1-4-1'. 以循环 2-3-2' 为例, 得到剪应变循环 $\Delta\gamma_i$ 及循环起点 2 点和终点 2' 点, 根据 2 点和 2' 点得到该循环对应的正应力的起点 C 点和终点 G 点以及正应变的起点 c 点和 g 点, 然后统计正应力历程 C 点与 G 点之间的最大正应力 $\sigma_{n,\max i}$ 以及正应变历程 c 点与 g 点之间的应变历程 $\Delta\epsilon_{ni}$. 至此得到第 1 个循环的全部

信息 $(\Delta\gamma_1, \sigma_{n,max1}, \Delta\epsilon_{n1})$, 同理可得第 2 个循环的全部信息 $(\Delta\gamma_2, \sigma_{n,max2}, \Delta\epsilon_{n2})$.

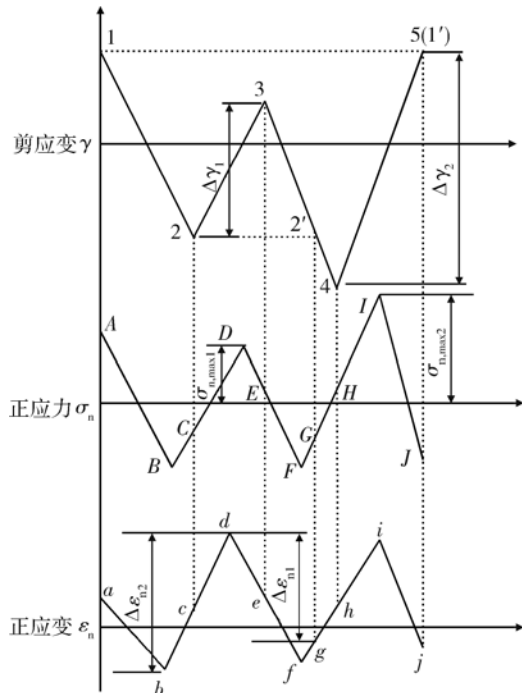


图 2 多轴循环计数方法

Fig. 2 Multi-axial cycle counting method

3 试验验证

为验证本文提出的多轴随机疲劳寿命估算方

法的有效性和可行性, 本文选用 3 种金属材料在随机多轴载荷谱块作用下的疲劳试验数据对本文提出的寿命预测方法进行验证. 3 种材料分别为: SNCM630 钢、304 不锈钢和 S45C 钢. 试验件为薄壁圆筒, 3 种材料的试验件尺寸如图 3 所示, 载荷形式为拉扭复合随机疲劳. 3 种材料的基本力学性能参数和疲劳性能参数见表 1 和表 2. 除疲劳性能参数外, 模型还包含单轴拉压疲劳修正参数 k .

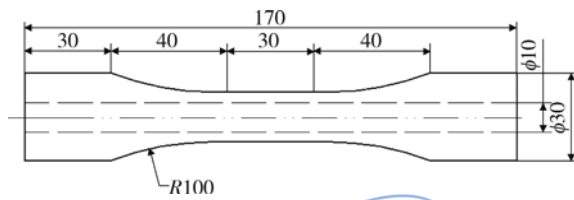


图 3 3 种材料的试验件尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Size of test piece of three materials (unit: mm)

SNCM630 钢疲劳试验数据取自文献 [1, 22], 试验包括 3 种随机载荷块, 其载荷历程如图 4~图 6 所示. 304 不锈钢疲劳试验数据取自文献 [23-24], 试验包括 3 种随机载荷块, 其载荷历程如图 7~图 9 所示. S45C 钢疲劳试验数据取自文献 [6, 25], 试验包括 3 种随机载荷块, 其载荷历程如图 10~图 11 所示.

表 1 3 种材料的力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of three kinds of materials

材料	弹性模量 E/GPa	切变模量 G/GPa	弹性泊松比 ν	轴向硬化系数 K'/MPa	轴向硬化 指数 n'	剪切硬化系数 K'₀/MPa	剪切硬化 指数 $n'₀$
SNCM630 钢 ^[1,22]	196	77.0	0.273	1056	0.054	592	0.05
304 不锈钢 ^{*[23-24]}	171	66.0	0.300	862	0.137	1281	0.306
S45C 钢 ^{*[6,25]}	186	72.7	0.280	1417	0.228	890	0.252

表 2 3 种材料疲劳参数及 k 值

Table 2 Fatigue property parameters and k of three kinds of materials

材料	疲劳强度 系数 σ'_f /MPa	疲劳延性 系数 ϵ'_f	疲劳强度 指数 b	疲劳延性 指数 c	剪切疲劳 强度系数 τ'_f /MPa	剪切疲劳 延性系数 γ'_f	剪切疲劳 强度指数 b_0	剪切疲劳 延性指数 c_0	k
SNCM630 钢	1272	1.54	-0.073	-0.823	858	1.51	-0.061	-0.706	1.6
304 不锈钢 [*]	760	0.076	-0.079	-0.36	831	0.14	-0.09	-0.33	3.3
S45C 钢 [*]	650	0.359	-0.096	-0.519	451	0.704	-0.058	-0.514	3.0

注: * 表示部分参数根据文献试验数据估算的结果.

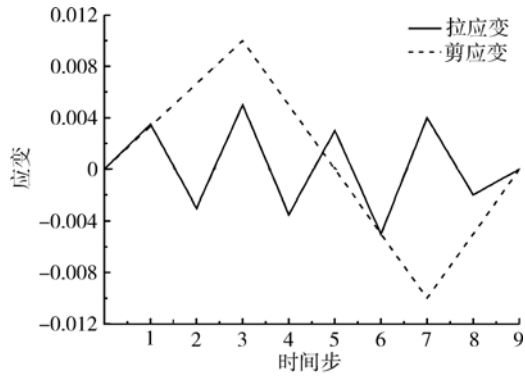


图 4 SNCM630 钢随机载荷块 R1 载荷历程
Fig. 4 Loading history of random loading block R1 of SNCM630 steel

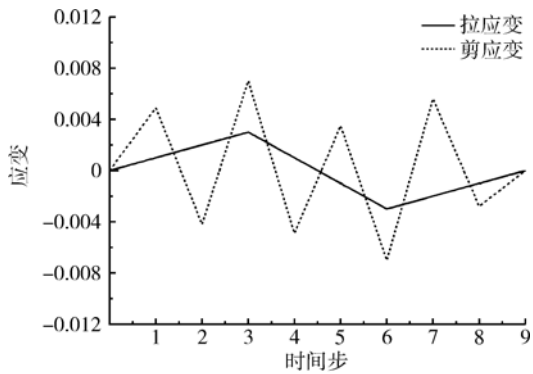


图 5 SNCM630 钢随机载荷块 R2 载荷历程
Fig. 5 Loading history of random loading block R2 of SNCM630 steel

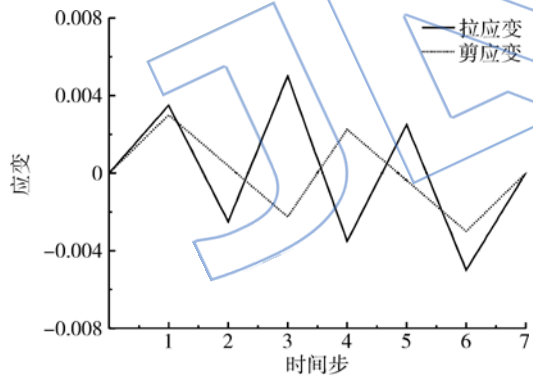


图 6 SNCM630 钢随机载荷块 R3 载荷历程
Fig. 6 Loading history of random loading block R3 of SNCM630 steel

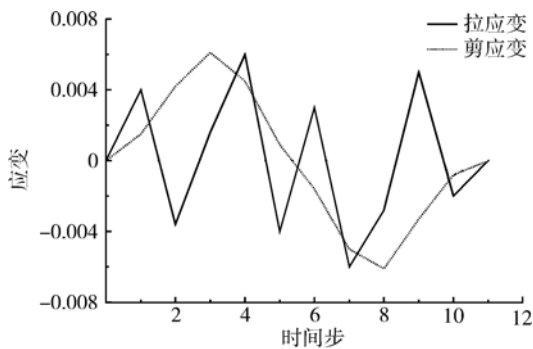


图 7 304 不锈钢随机载荷块 R1 载荷历程
Fig. 7 Loading history of random loading block R1 of 304 stainless steel

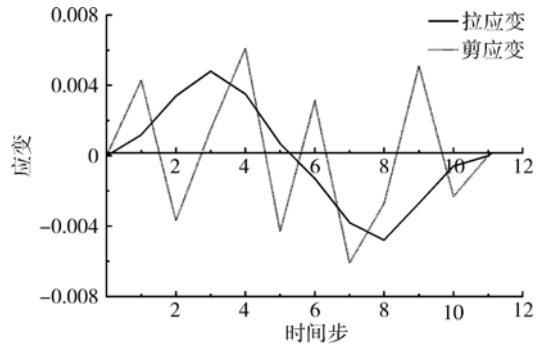


图 8 304 不锈钢随机载荷块 R2 载荷历程
Fig. 8 Loading history of random loading block R2 of 304 stainless steel

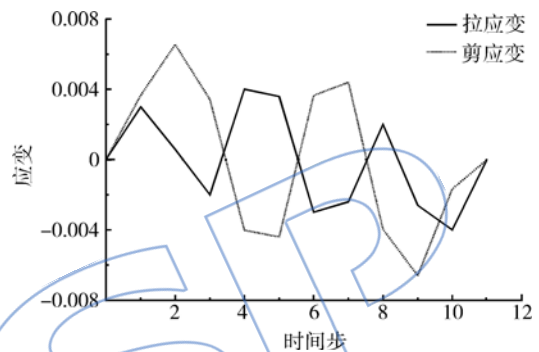


图 9 304 不锈钢随机载荷块 R3 载荷历程
Fig. 9 Loading history of random loading block R3 of 304 stainless steel

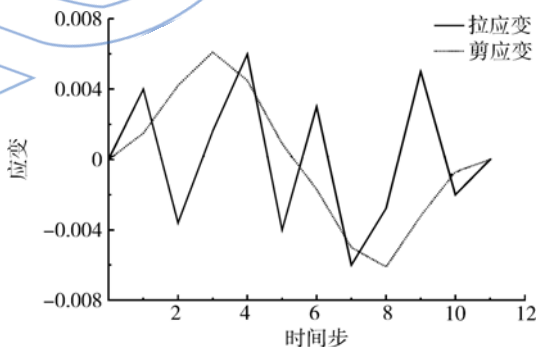


图 10 S45C 钢随机载荷块 R1 载荷历程
Fig. 10 Loading history of random loading block R1 of S45C steel

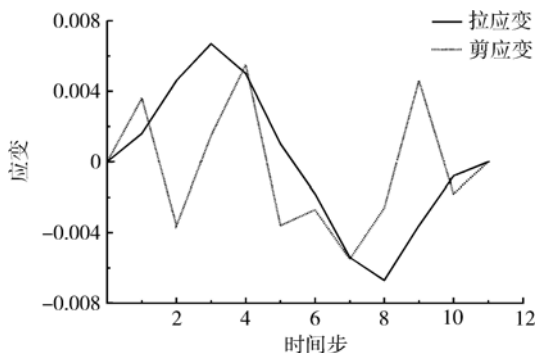


图 11 S45C 钢随机载荷块 R2 载荷历程
Fig. 11 Loading history of random loading block R2 of S45C steel

根据本文提出的随机多轴疲劳寿命预测方法,对 3 种金属材料的预测结果如图 12 所示. 图示 3 种材料的寿命预测结果全部分布在试验结果的 2 倍分散带之内. 由此表明本文提出的解决多轴随机疲劳的方法是可行的.

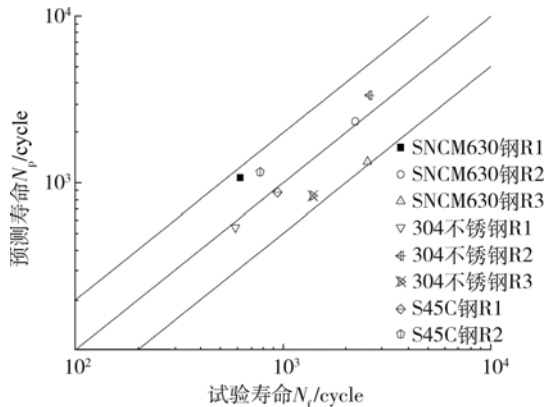


图 12 3 种材料的预测寿命与试验寿命对比

Fig. 12 Predicted versus experimental lives for three materials

4 讨论

多轴随机疲劳的一个关键问题是临界平面的选取,在多轴常幅载荷作用下,以最大剪应变幅平面为临界平面符合多轴疲劳损伤的物理机制,但是在解决多轴随机疲劳时,临界平面必须进行一定的修正. 如图 13 所示,结构在一个较大的扭转载荷之后作用很多相对较小的拉伸载荷直到最终失效,结构在这类载荷下的失效肯定是因为后面很多次的拉伸载荷作用,而此时的最大剪应变平面是由第一个扭转载荷所确定,如果以最大剪应变平面作为临界平面,这显然与实际情况不符合,因此必须对临界平面的定义进行修正. 本文以最先达到损伤临界值的平面(最大损伤平面)为临界平面符合疲劳失效机制.

多轴随机疲劳的另一个关键问题是精确的应力应变计算方法,针对几何规则的试验件可以通过试验直接测出应力应变历程. 但是对于带孔槽的试验件或者实际构件,试验很难测出应力应变历程,这时就需要通过有限元计算或者通过本构关系来确定应力应变历程. 由于构件可能承受几百甚至上千万个的循环载荷,在进行应力应变历程计算时,如果一个循环的应力应变计算存在一点误差,则会因循环的进行而导致误差的累积,最终会使应力应变历程呈现较大误差. 本文采用工

程中常用的稳定循环应力应变曲线方程 Ramberg-Osgood 方程来进行应力应变的计算,一方面是由于应力应变计算的简便;另一方面许多材料手册中给出的稳定循环应力应变曲线常采用 Ramberg-Osgood 模型进行描述. 本文的预测结果表明采用 Ramberg-Osgood 方程来计算的应力应变历程进行多轴随机疲劳寿命预测能够满足工程精度要求.

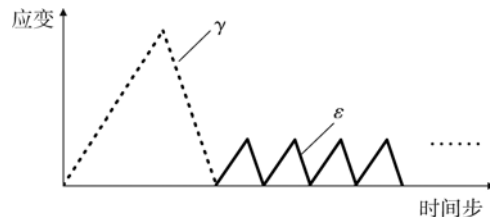


图 13 构件的载荷历程

Fig. 13 Loading history of component

5 结论

本文针对多轴随机疲劳问题,对多轴常幅疲劳下的寿命模型进行适当修正,提出了一种解决多轴随机疲劳问题的方法,采用 3 种材料的多轴随机疲劳数据对该方法进行评估和验证,得到如下结论:

- 1) 对剪应变进行循环计数,得到剪应变幅值 $\Delta\gamma/2$ 作为疲劳损伤的主要控制参数符合多轴疲劳的微观机制,提出的以最大损伤 D_{max} 平面作为随机多轴载荷下的临界平面符合疲劳失效机制.
- 2) 给出了本文多轴疲劳寿命模型对应的多轴雨流计数方法,该计数方法可以同时得到剪应变循环和剪应变循环内的最大正应力和正应变变量.
- 3) 经 SNCM630 钢,304 不锈钢和 S45C 钢 3 种材料的多轴随机疲劳试验数据验证,本文提出的多轴随机载荷下的疲劳寿命预测方法具有良好的预测效果和较广的适用性.

参考文献:

- [1] Lee B L, Kim K S, Nam K M. Fatigue analysis under variable amplitude loading using an energy parameter[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(7): 621-631.
- [2] Garud Y S. A new approach to the evaluation of fatigue under multiaxial loadings[J]. Journal of Engineering Material and Technology, 1981, 103(2): 118-125.
- [3] Jordan E H, Brown M W, Miller K J. Fatigue under severe nonproportional loading [C] // Multiaxial Fatigue. San Francisco, CA: American Society for Testing and Materi-

- als, 1985; 569-585.
- [4] Brown M W, Miller K J. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1973, 187(65): 745-755.
- [5] Varvani-Farahani A. A new energy-critical plane parameter for fatigue life assessment of various metallic materials subjected to in-phase and out-of-phase multiaxial fatigue loading conditions[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(4): 295-305.
- [6] Kim K S, Park J C, Lee J W. Multiaxial fatigue under variable amplitude loads[J]. Journal of Engineering Material and Technology, 1999, 121(3): 286-293.
- [7] 何国求, 陈成澍, 高庆, 等. 不锈钢多轴非比例加载低周疲劳的研究[J]. 机械工程学报, 1999, 35(1): 47-50.
HE Guoqi, CHEN Chengshu, GAO Qing, et al. Study on multiaxial low cycle fatigue under nonproportional loading of 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(1): 47-50. (in Chinese)
- [8] Zhang G Q, Pu G Q, Wang C T. Fatigue life prediction of crankshaft made of material 48MnV based on fatigue tests, dynamic simulation and FEA[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19(2): 307-311.
- [9] Brown M W, Miller K J. High temperature low cycle biaxial fatigue of two steels[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1979, 1(2): 217-229.
- [10] Fatemi A, Socie D F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1988, 11(3): 149-166.
- [11] 赵勇铭, 宋迎东. 椭圆方程式的多轴疲劳寿命预测模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 312-316.
ZHAO Yongming, SONG Yingdong. Multi-axial fatigue life prediction model in elliptic equation form[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 312-316. (in Chinese)
- [12] 李静, 孙强, 李春旺, 等. 一种新的多轴疲劳寿命预测方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 285-290.
LI Jing, SUN Qiang, LI Chunwang, et al. New prediction method for multiaxial fatigue life[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 285-290. (in Chinese)
- [13] Kanazawa K, Miller K J, Brown M W. Low cycle fatigue under out-of-phase loading conditions[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1977, 99(3): 222-228.
- [14] Taira S, Inoue T, Yoshida T. Low cycle fatigue under multiaxial stresses (in the case of combined cyclic tension-compression and cyclic torsion) at room temperature[R]. Kyoto, Japan: The 12th Japan Congress on Materials Research, 1969.
- [15] Socie D F, Wail L E, Kock J L. Biaxial fatigue of inconel 718 including mean stress effects[C]// Multiaxial Fatigue. San Francisco, CA: American Society for Testing and Materials, 1985: 463-481.
- [16] Pascoe K J, Devilliers J W R. Low cycle fatigue of steels under biaxial straining[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1967, 2(2): 117-126.
- [17] Socie D F, Marquis G B. Multiaxial fatigue[M]. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 2000.
- [18] Krempl E. The influence of state of stress on low-cycle fatigue of structural materials[R]. American Society for Testing and Materials, ASTM STP 549, 1974.
- [19] Shamsaei N, Gladskyi M, Panasovsky K, et al. Multiaxial fatigue of titanium including step loading and load path alteration and sequence effects[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(11): 1862-1874.
- [20] Kandile F A, Brown M W, Miller K J. Biaxial low cycle fatigue fracture of 316 stainless steel at elevated temperatures[M]. London: The Metal Society, 1982: 203-210.
- [21] 吴志荣, 胡绪腾, 宋迎东. 基于最大剪应变幅和修正 SWT 参数的多轴疲劳寿命预测模型[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 59-66.
WU Zhirong, HU Xuteng, SONG Yingdong. Multi-axial fatigue life prediction model based on maximum shear strain amplitude and modified SWT parameter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 59-66. (in Chinese)
- [22] Han C, Chen X, Kim K S. Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 913-922.
- [23] Kim K S, Lee B L, Park J C. Biaxial fatigue of stainless steel 304 under irregular loading[C]// Fatigue and Fracture Mechanics. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 2000: 79-93.
- [24] Chen X, Jin D, Kim K S. A weight function-critical plane approach for low-cycle fatigue under variable amplitude multiaxial loading[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2006, 29(4): 331-339.
- [25] Kim K S, Park J C. Shear strain based multiaxial fatigue parameters applied to variable amplitude loading[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(5): 475-483.