

# 镍基单晶合金多轴非比例加载低周疲劳研究<sup>1)</sup>

丁智平<sup>\*,2)</sup> 陈吉平<sup>\*</sup> 王腾飞<sup>\*</sup> 赵 萍<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(湖南工业大学机械工程学院, 株洲 412007) <sup>†</sup>(中航工业航空动力机械研究所, 株洲 412002)

**摘要** 基于正交设计, 分别在 680 °C 和 850 °C 下进行 DD3 镍基单晶合金薄壁圆管试样 ([001] 取向) 拉/扭非比例加载低周疲劳试验, 研究等效应变范围、应变路径角、拉/扭载荷相位角、循环特性和温度诸因素对镍基单晶合金多轴低周疲劳寿命的影响作用. 疲劳试验数据的极差分析表明, 应变路径角、拉/扭载荷相位角和等效应变范围是影响疲劳寿命的主要因素. 将菱形应变加载路径区分为比例加载段和非比例加载段, 提出了表征非比例加载效应的等效应变参量, 并通过引入单晶应变三轴性因子反映拉/扭应变路径角对多轴疲劳寿命的影响. 用考虑非比例加载效应的等效应变范围和单晶应变三轴性因子构造循环塑性应变能损伤参量, 进行多元线性回归分析, 疲劳寿命回归模型与试验寿命具有很好的相关性, 所有试验数据都落在 2.0 倍的偏差分布带之内.

**关键词** 镍基单晶合金, 低周疲劳, 正交各向异性, 多轴非比例加载, 正交设计

中图分类号: V231.95, O346.2 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2012)02-0326-08

## 引 言

镍基单晶高温合金具有优越的高温强度性能, 被广泛用作先进涡轮航空发动机的叶片材料. 单晶涡轮叶片工作时不仅受到蠕变损伤, 同时还因发动机启动、停机形成的交变载荷与温度变化产生的热应力的联合作用, 使涡轮叶片根部的受力处于复杂应力状态, 从而产生多轴低循环 (LCF) 疲劳破坏. 多轴低周疲劳损伤是疲劳研究领域较为复杂、且非常困难的研究课题, 特别是关于镍基单晶各向异性材料多轴低周疲劳特性及其寿命预测的研究, 目前在国际上亦是前沿性的研究工作.

Okazaki 等<sup>[1]</sup>和 Egly 等<sup>[2]</sup>分别对 [001] 取向的 CMSX-4 镍基单晶合金进行了单轴低周疲劳试验和非比例加载热机械疲劳试验研究, 试验结果表明机械应变载荷与温度载荷存在相位差会强烈地影响材料的热机械疲劳寿命, 并考虑单晶合金的  $\gamma/\gamma'$  混合微观结构, 提出了预测单晶合金低周疲劳和热机械疲劳的微观力学模型. Mitsuru 等<sup>[3]</sup>用比例加载方式对 [001] 取向 CMSX-2 镍基单晶合金薄壁圆管试样在 900 °C 温度下进行应力控制对称循环拉/扭低周疲劳试验研究, 提出了考虑拉伸弹性模量各向异性的多轴应变参量. 陈旭等<sup>[4]</sup>, 尚德广等<sup>[5]</sup>分别在室

温和 650 °C 温度下对 304 不锈钢和 GH 4169 高温合金进行了拉/扭非比例加载低周疲劳试验研究, 结果表明在非比例加载下, 随着拉/扭载荷相位角的增加, 疲劳寿命明显降低. 国内关于单晶合金高温低周疲劳试验的文献迄今为止还仅限于单轴疲劳. 陈吉平等<sup>[6]</sup>分别对 3 种不同晶体取向的 DD3 单晶合金光滑试样和缺口试样, 在 680 °C 温度下进行了对称和非对称循环载荷高温单轴低周疲劳试验研究, 建立了由循环塑性应变能作为疲劳损伤参量的单晶合金低周疲劳寿命预测模型. 岳珠峰等<sup>[7-8]</sup>对 [001] 晶体取向的 DD3 单晶合金缺口试样在 620 °C 温度进行了单轴低周疲劳试验, 建立了基于晶体滑移理论的疲劳寿命模型.

已有的研究表明非比例加载的应变路径对材料的循环变形行为有重要的影响, 所以应变路径的研究也是低周疲劳寿命研究的热点之一. 在拉/扭非比例加载下, 由于施加的轴向应变和剪切应变存在相位差, 因此无法直接用 von Mises 准则将轴向应变和剪切应变合成一个等效应变. 非比例加载导致材料主轴发生旋转, 不仅使应力应变分析困难, 还产生附加强化, 降低疲劳寿命. Benallal 等<sup>[9-12]</sup>首先进行了这方面的研究, 他们以应力、应变或它们变化率的夹角正弦定义非比例度; Ellyin 等<sup>[13]</sup>将应变

2011-04-13收到第1稿, 2011-11-27收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (50875080) 和湖南省重点学科建设经费资助项目.

2) E-mail: dzp0733@yahoo.com.cn

路径在应变空间  $\pi$  平面上扫掠过的面积比值定义为非比例度; McDowell 等<sup>[14-15]</sup>将塑性应变在最大塑性应变方向上的投影定义为非比例度; Doong, 陈旭等<sup>[16-17]</sup>基于宏观力学参量给出了非比例度的定义; 何国求等<sup>[18]</sup>基于对 316L 不锈钢非比例加载低周疲劳试验微观结构分析结果, 利用位错自由运动间距统计平均值给出了应变路径非比例度的定义, 从而使非比例效应具有明确的微观物理背景。

影响镍基单晶合金多轴低周疲劳损伤的因素较多, 确定合理的疲劳损伤参量是进行寿命分析的关键。基于正交试验理论, 本文进行了 DD3 镍基单晶合金拉/扭非比例加载低周疲劳试验, 研究分析不同因素对镍基单晶合金多轴低周疲劳损伤的影响, 提出考虑非比例加载效应和拉/扭应变路径影响的循环塑性应变能作为疲劳损伤参量, 建立疲劳寿命回归模型, 并用疲劳试验数据进行验证。

1 多轴疲劳试验设计

1.1 疲劳影响因素及试验水平

在材料组织状态一定的情况下, 对于拉/扭非比例低循环加载过程, 等效应变范围  $\Delta\epsilon_e$ 、拉/扭载荷相位角  $\omega$ 、应变路径角  $\Phi$  (见图 1)、载荷循环特性  $R$  (最小与最大应变幅之比) 和温度等因素均与镍基单晶合金多轴低周疲劳损伤有关。研究分析这些因素的不同水平对单晶合金多轴疲劳损伤的影响, 是一个多因素、多水平的实验问题, 采用正交设计方法进行处理可大大减少所需的工作量。实验因素和水平的设计方案见表 1, 表中切向应变率  $R_{\text{shear}} = -1$ 。

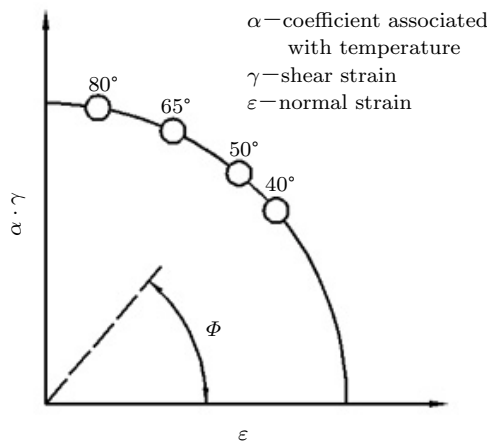


图 1 应变路径角  $\Phi$   
Fig. 1 Strain path angle  $\Phi$

表 1 实验因素和水平  
Table 1 Experimental factors and levels

| Factor                                         | Level |      |     |      |
|------------------------------------------------|-------|------|-----|------|
|                                                | 1     | 2    | 3   | 4    |
| A tension/torsion loading phase angle $\omega$ | 0     | 30°  | 60° | 90°  |
| B axial strain ratio $R$                       | -1    | -0.1 | 0   | 0.05 |
| C strain path angle $\Phi$                     | 40°   | 50°  | 65° | 80°  |
| D equivalent strain range/%                    | 1.4   | 1.5  | 1.6 | 1.7  |
| E test temperature/°C                          | 680   | 850  | -   | -    |

1.2 加载路径

镍基单晶合金属于正交各向异性材料, 采用 Hill 屈服准则<sup>[19]</sup>的等效应变范围作为控制总应变, 轴向应变范围与切向应变范围值随应变路径角而变化, 轴向载荷与扭转载荷之间的相位角分别取 0°, 30°, 60° 和 90°, 采用菱形加载路径, 其中对称循环加载的应变路径如图 2 所示。根据影响因素和实验水平, 为简化起见, 假设各因素之间没有多重交互作用, 选用  $L_{16}(4^4 \times 2^3)$  正交表设计实验, 见表 2。

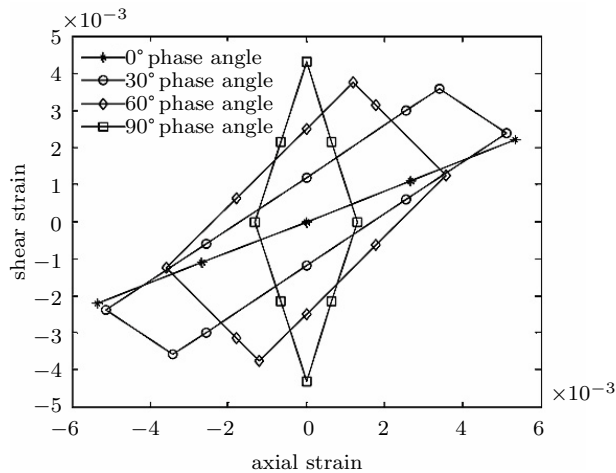


图 2 应变加载路径  
Fig. 2 Strain loading path

1.3 轴向和切向应变范围的计算

进行双轴拉/扭低周疲劳试验, 需要由等效应变范围确定轴向应变和切向应变的取值。由 Hill 屈服准则可得镍基单晶合金等效应变计算公式<sup>[20]</sup>为

$$\epsilon_{\text{Heq}} = \left[ \frac{(\epsilon_{11} - \epsilon_{22})^2 + (\epsilon_{22} - \epsilon_{33})^2 + (\epsilon_{33} - \epsilon_{11})^2}{2(\mu + 1)^2} + K \left( \frac{G}{E} \right)^2 (\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2) \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $K = L/F$  为各向异性参数, 与温度相关;  $E$  和

表2 正交设计实验方案  
Table 2 Experiments of orthogonal design

| Specimen | Factor |      |     |     |     |
|----------|--------|------|-----|-----|-----|
|          | No.    | A    | B   | C   | D/% |
| 1        | 0      | -1   | 40° | 1.4 | 680 |
| 2        | 0      | -0.1 | 50° | 1.5 | 680 |
| 3        | 0      | 0    | 65° | 1.6 | 850 |
| 4        | 0      | 0.05 | 80° | 1.7 | 850 |
| 5        | 30°    | -1   | 50° | 1.6 | 850 |
| 6        | 30°    | -0.1 | 40° | 1.7 | 850 |
| 7        | 30°    | 0    | 80° | 1.4 | 680 |
| 8        | 30°    | 0.05 | 65° | 1.5 | 680 |
| 9        | 60°    | -1   | 65° | 1.7 | 680 |
| 10       | 60°    | -0.1 | 80° | 1.6 | 680 |
| 11       | 60°    | 0    | 40° | 1.5 | 850 |
| 12       | 60°    | 0.05 | 50° | 1.4 | 850 |
| 13       | 90°    | -1   | 80° | 1.5 | 850 |
| 14       | 90°    | -0.1 | 65° | 1.4 | 850 |
| 15       | 90°    | 0    | 50° | 1.7 | 680 |
| 16       | 90°    | 0.05 | 40° | 1.6 | 680 |

$G$  分别为弹性模量和剪切模量. 将  $G = E/2(\mu + 1)$ ,  $K = 3$  代入式 (1), 就得到各向同性材料的 von Mises 等效应变公式

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}(\mu + 1)} [(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2)]^{1/2} \quad (2)$$

对于双轴拉/扭应变载荷, 式 (1) 可简化为

$$\varepsilon_{Heq} = \left[ \varepsilon_{33}^2 + \left( \frac{\sqrt{K}G}{E} \gamma_{23} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon_{33}$  和  $\frac{\sqrt{K}G}{E} \gamma_{23}$  分别为图 1 所示应变路径的横坐标值和纵坐标值; 各向异性参数  $K$  的取值为<sup>[21]</sup>  $K=3.9715$  (680 °C),  $K=2.7305$  (850 °C).

## 2 试验及结果分析

### 2.1 试样的制备与试验结果

试验材料为 DD3 镍基单晶合金, 材料成分见表 3, 材料弹性常数<sup>[22]</sup>见表 4.

表3 DD3单晶合金成分(重量百分比)

Table 3 Chemical composition of DD3 superalloy (weight percent ratio)

| Cr  | Co  | W   | Mo  | Al  | Ti  | C      | Ni     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|--------|
| 9.5 | 6.0 | 5.2 | 5.0 | 5.8 | 2.3 | < 0.01 | others |

表4 DD3单晶高温合金材料常数

Table 4 Material constants of DD3 superalloy

| Temperatrue/°C | $E$ /GPa | $G$ /GPa | $\mu$ |
|----------------|----------|----------|-------|
| 680            | 109.1    | 112.5    | 0.322 |
| 850            | 100.5    | 104      | 0.328 |

低周疲劳试样为光滑薄壁圆管试样, 具体形状和尺寸如图 3 所示, 试样标距部分长 25 mm, 内径  $\phi_i = 11$  mm, 外径  $\phi_o = 14$  mm. 所有试样轴线偏离 [001] 取向的角度均在 9° 以内. 试样热处理为 1 250 °C × 4 h 固溶化处理 and 870 °C × 32 h 时效处理.

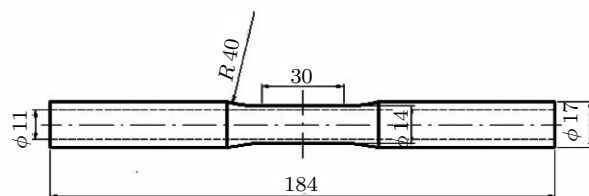


图3 拉/扭低周疲劳试样

Fig. 3 Tension/torsion specimen for low cycle fatigue test

试验设备为 MTS 809 电液伺服拉/扭高温疲劳试验机, 使用 MTS 632-68c 型高温拉扭组合引伸计测量拉伸和扭转应变. 试验温度分别为 680 °C 和 850 °C, 温度变动范围小于 ±3 °C; 试验采用应变控制, 波形为三角波, 无保载时间, 整个试验过程中应变速率为 7 200 μm/s, 恒定不变. 轴向载荷与扭转载荷之间的相位角由试验机系统程序设定并实时控制, 需要测试采集的试验数据包括: 试样标距长度的轴向线位移和扭转角位移、施加的轴向力和扭矩以及循环次数. 全部试验数据的记录均由计算机自动完成.

### 2.2 试验结果

表 5 和图 4 所示为 DD3 单晶合金双轴拉/扭非比例加载低周疲劳试验结果.

表 5 试验结果  
Table 5 Results of experiment

| Specimen No. | Axial strain range/% | Shear strain range/% | Mises strain range/% |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1            | 1.07                 | 0.43                 | 1.11                 |
| 2            | 0.96                 | 0.58                 | 1.03                 |
| 3            | 0.68                 | 0.85                 | 0.88                 |
| 4            | 0.30                 | 0.90                 | 0.71                 |
| 5            | 1.03                 | 0.72                 | 1.13                 |
| 6            | 1.30                 | 0.64                 | 1.37                 |
| 7            | 0.24                 | 0.67                 | 0.50                 |
| 8            | 0.63                 | 0.66                 | 0.76                 |
| 9            | 0.72                 | 0.75                 | 0.87                 |
| 10           | 0.27                 | 0.78                 | 0.58                 |
| 11           | 1.15                 | 0.56                 | 1.21                 |
| 12           | 0.90                 | 0.63                 | 0.99                 |
| 13           | 0.26                 | 0.86                 | 0.62                 |
| 14           | 0.59                 | 0.74                 | 0.76                 |
| 15           | 1.08                 | 0.65                 | 1.16                 |
| 16           | 1.23                 | 0.50                 | 1.27                 |

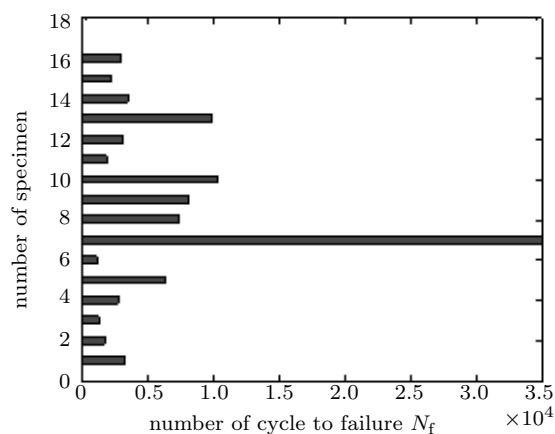


图 4 试样循环寿命  $N_f$  (周)

Fig. 4 Number of cycle to failure  $N_f$  (cycle)

试验中的绝大部分试样都达到了屈服, 产生了不同程度的塑性变形. 图 5 所示为 2 号试样初始前 10 次循环的应力应变曲线, 从图中可以看出试样经过第 1 次循环进入屈服后, 轴向应力应变曲线呈现直线往复运动轨迹, 没有形成迟滞回线, 而切向应力应变曲线则形成了较窄的迟滞回线. 图 6 显示前 50 次循环的切向应力、切向应变随循环次数变化的情况, 切向应力出现了循环强化, 切向应变幅值经过 5 次循环后趋于稳定.

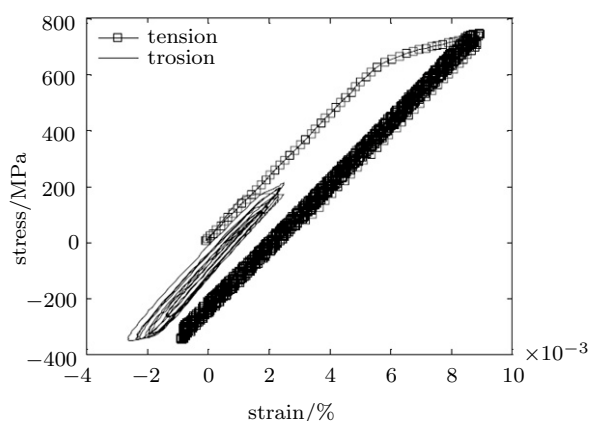
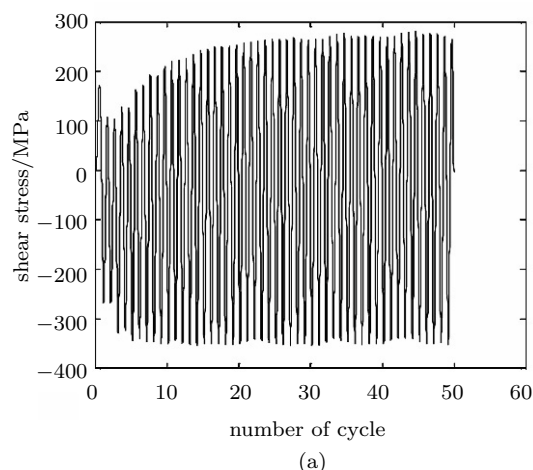
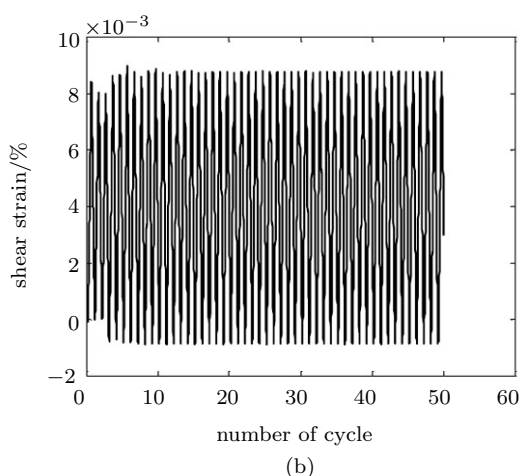


图 5 2 号试样的初始循环应力应变曲线

Fig. 5 Initial cyclic stress-strain curve of specimen No.2



(a)



(b)

图 6 2 号试样的初始循环的应力 (a) 和应变 (b)

Fig. 6 Initial cyclic stress (a) and strain (b) of specimen No.2

## 2.3 各影响因素与循环寿命的关系

为了构造疲劳损伤参量, 需要定性了解各因素对循环寿命的影响程度, 本文采用简单易行的直观法<sup>[23]</sup> (极差法) 进行分析, 分析结果见表 6.

表 6 试验结果极差分析  
Table 6 Test results of range analysis

| Mean value<br>of level            | Factor   |         |          |         |         |
|-----------------------------------|----------|---------|----------|---------|---------|
|                                   | A        | B       | C        | D       | E       |
| I <sub>j</sub>                    | 2 163.6  | 6 953.4 | 2 357.4  | 11 235  | 8 904.8 |
| II <sub>j</sub>                   | 11 249.5 | 4 202   | 3 363.9  | 5 256.5 | 3 729.6 |
| III <sub>j</sub>                  | 5 927.1  | 10 023  | 5 014.1  | 5 181.4 | —       |
| IV <sub>j</sub>                   | 4 683    | 4 090.3 | 14 533   | 3 595.9 | —       |
| Range of<br>factor R <sub>j</sub> | 9 085.9  | 5 932.7 | 12 175.6 | 7 639.1 | 5 175.2 |

表中, I<sub>j</sub>, II<sub>j</sub>, III<sub>j</sub>, IV<sub>j</sub> 分别表示各影响因素不同水平试验值(即循环次数)的平均值, R<sub>j</sub>表示平均值极差,即上述各平均值之间的最大差值,它反映了各影响因素对循环寿命影响的大小。

## 2.4 各因素对疲劳寿命的影响分析

从图 7 中可以看出:

(1) 拉/扭载荷相位角从 30°, 60° 到 90° 变化时, 循环寿命依次减少; 相位角为 0° 时, 相应的循环寿命最短。

(2) 应变路径角、应变范围和温度(C, D, E 因素)对疲劳寿命的影响趋势呈单调性变化。应变路径角增大, 循环寿命随之增加, 反之则减少, 这表明在等效应变范围一定的情况下, 轴向应变增大, 循环寿命减少。应变范围增大, 循环寿命随之降低。850 °C 的循环寿命小于 680 °C 的循环寿命, 温度升高, 循环寿命随之减少。

(3) 轴向应变比从 -1, -0.1, 0.05 依次变化, 循环寿命单调减少; 而轴向应变比为 0 时循环寿命较长。

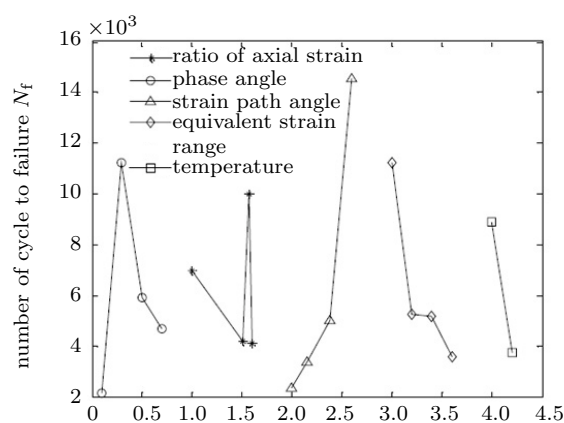


图 7 循环次数随影响因素的变化趋势

Fig. 7 Variation of failure cycle with the factors

(4) 表 6 中的极差分析结果显示, A, C, D 3 种因素的极差值较大, 因此可以认为影响循环寿命的主要因素是拉/扭载荷相位角、应变路径角和应变范围。

## 3 疲劳损伤参量及寿命模型

### 3.1 多轴非比例加载疲劳损伤参量

低周疲劳过程中, 每一次循环载荷产生塑性变形所消耗的能量等于它所对应的滞回环的面积, 称为循环塑性应变能  $\Delta W_p$ 。基于能量耗散理论, 可用循环塑性应变能作为损伤参量, 建立疲劳寿命预测模型。不同的文献, 给出的  $\Delta W_p$  的表达式不尽相同。根据上述各因素对单晶合金多轴低周疲劳寿命影响程度的分析, 为简化起见, 考虑等温情况, 循环塑性应变能  $\Delta W_p$  主要与等效应变范围  $\Delta \epsilon_{eq}$ , 应变路径角和非比例加载效应相关。

分别对 680 °C 和 850 °C 两种温度的疲劳试验数据, 应用线性回归分析方法, 分析 Mises 等效应变与循环寿命的相关性如表 7 所示。

表 7 Mises 应变范围与循环寿命的相关性

Table 7 Correlation of failure cycle with Mises strain range

| Temperature/°C | Parameter              | Power law curve fit                              | R <sup>2</sup> |
|----------------|------------------------|--------------------------------------------------|----------------|
| 680            | $\Delta \epsilon_{eq}$ | $N_{fc} = 0.0187(\Delta \epsilon_{eq})^{-2.653}$ | 0.8216         |
| 850            | $\Delta \epsilon_{eq}$ | $N_{fc} = 4.2759(\Delta \epsilon_{eq})^{-1.398}$ | 0.2839         |

从表 7 可知, 用 Mises 应变范围拟合 850 °C 的疲劳试验数据, 相关系数很低, 这说明在较高温度时, 必须考虑多轴载荷和非比例加载效应对疲劳寿命的影响。

已有的研究表明在非比例循环载荷作用下的损伤参量明显大于比例循环载荷作用下的损伤参量, 与比例加载相比, 在非比例加载情况下, 构件的疲劳寿命大大降低<sup>[24]</sup>, 并随着加载相位差的增加, 疲劳寿命降低明显<sup>[5]</sup>。

考察图 8 所示的菱形拉/扭循环应变加载路径。图中轴向应变和切向应变同时达到最大值  $f$  点和最小值  $e$  点之间的直线往返路径对应于比例加载路径, 两点间直线路径的等效应变范围可用 Mises 应变范围  $\Delta \epsilon_{eq}$  表示。本文假设平行于  $e-f$  直线的  $b-c$  段路径和  $d-a$  段路径为比例加载, 而  $a-b$  段路径和  $c-d$  段路径为非比例加载, 引入参量  $m$  表征菱形循环应变路径



的非比例加载效应

$$m = (\Delta\epsilon_{ab} + \Delta\epsilon_{cd})/\Delta\epsilon_{eq} \quad (4)$$

式中,  $\Delta\epsilon_{ab}$  和  $\Delta\epsilon_{cd}$  分别为  $a-b$  段和  $c-d$  段应变加载路径的 Mises 应变范围. 构造如下非比例加载等效应变范围作为损伤参量

$$\Delta\bar{\epsilon}_{eq} = \Delta\epsilon_{eq}(1 + m) \quad (5)$$

式中,  $\Delta\epsilon_{eq}$  为菱形循环应变加载路径所对应的比例加载路径的 Mises 应变范围. 用 850 °C 的疲劳试验数据拟合  $\Delta\bar{\epsilon}_{eq}$ , 得出幂律回归模型如表 8 所示.

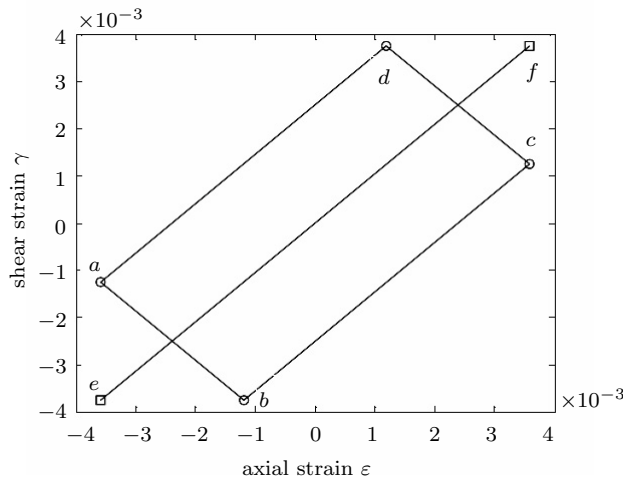


图 8 非比例加载应变路径图

Fig. 8 Non-proportional loading path

表 8 非比例加载等效应变范围与 850 °C 疲劳寿命的相关性  
Table 8 Correlation of failure cycle with non-proportional loading equivalent strain range

| Parameter                   | Power law curve fit                                                    | $R^2$  |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------|
| $\Delta\bar{\epsilon}_{eq}$ | $N_{fc} = 3.4221 \times 10^{-4} (\Delta\bar{\epsilon}_{eq})^{-3.8634}$ | 0.6590 |

与表 7 中的 Mises 应变范围相比,  $\Delta\bar{\epsilon}_{eq}$  与循环寿命的相关系数大大提高. 为了考虑拉/扭应变路径角对疲劳寿命的影响, 引入单晶合金应变三轴性因子 [25]

$$T_{sc} = \frac{2(\mu + 1)}{3} + \frac{3}{(1 - 2\mu)} \cdot \frac{(\Delta\epsilon_m)^2}{(\Delta\epsilon_{eq})^2} + \left[ \frac{G}{E} - \frac{1}{2(\mu + 1)} \right] \frac{(\Delta\gamma_{23})^2 + (\Delta\gamma_{31})^2 + (\Delta\gamma_{12})^2}{(\Delta\epsilon_{eq})^2} \quad (6)$$

式中,  $\Delta\epsilon_{eq}$  为 Mises 应变范围,  $\Delta\epsilon_m$  为平均正应变范围,  $\Delta\gamma_{23}$ ,  $\Delta\gamma_{31}$ ,  $\Delta\gamma_{12}$  分别为切向应变范围. 因为单晶合金是正交异性材料, 故  $T_{sc}$  中含有 3 个相互独立

的弹性常数. 从式 (6) 可知, 沿材料主轴方向的单轴拉伸,  $T_{sc} = 1$ , 而沿其他方向进行单轴拉伸或者在剪应变不为零的情况下,  $T_{sc} \neq 1$ . 因此,  $T_{sc}$  既反映了晶体取向相关性, 又反映了正应力和剪应力的相互作用. 若考虑关系式  $G = E/2(\mu + 1)$ , 式 (6) 可退化为各向同性材料应变三轴性因子.

### 3.2 疲劳寿命模型

考虑非比例加载等效应变范围  $\Delta\bar{\epsilon}_{eq}$  和单晶合金应变三轴性因子  $T_{sc}$ , 可得到以循环塑性应变能为损伤参量的幂函数形式的疲劳寿命模型

$$N_f = A \Delta\bar{\epsilon}_{eq}^\alpha T_{sc}^\beta \quad (7)$$

式中,  $N_f$  为疲劳寿命;  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  为材料常数. 分别将 680 °C 和 850 °C 两种温度的疲劳试验数据拟合式 (7), 得出疲劳寿命回归方程如表 9 所示.

表 9 循环塑性应变能参量与疲劳寿命的相关性

Table 9 Correlation of LCF life with cyclic plastic strain energy

| Temperature/°C | Power law curve fit                                                                              | $R^2$  |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 680            | $N_{fc} = 4.7011 (\Delta\bar{\epsilon}_{eq})^{-1.6495} (T_{sc})^{0.4024}$                        | 0.8599 |
| 850            | $N_{fc} = 1.8974 \times 10^{-8} \times (\Delta\bar{\epsilon}_{eq})^{-6.4018} (T_{sc})^{-1.7755}$ | 0.8019 |

图 9 表示用  $\Delta\bar{\epsilon}_{eq}$  和  $T_{sc}$  两参数循环塑性应变能损伤参量预测疲劳寿命的结果, 疲劳试验寿命与模型预测寿命吻合相当好, 所有的试验数据均落在 2.0 倍的偏差范围之内.

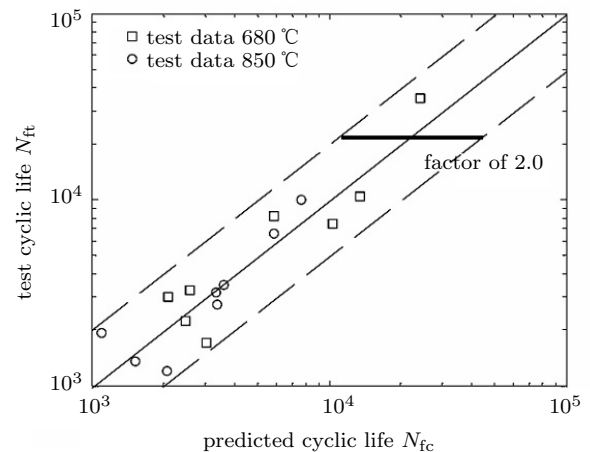


图 9 试验寿命与循环塑性应变能参量的相关性

Fig. 9 Correlation of LCF life with cyclic plastic strain energy

## 4 结 论

(1) 基于正交实验设计, 分别在 680 °C 和 850 °C 温度下进行了 DD3 镍基单晶合金双轴拉/扭非比例循环加载低周疲劳试验, 研究应变范围、应变路径角、拉/扭载荷相位角、循环特性和温度诸因素对镍基单晶合金多轴低周疲劳寿命的影响趋势和影响程度, 试验数据的极差分析结果表明: 应变路径角、拉/扭载荷相位角和等效应变范围是影响疲劳寿命的主要因素。

(2) 将菱形应变加载路径分为比例加载段和非比例加载段, 提出了考虑非比例加载效应的等效应变损伤参数的计算方法, 并利用疲劳试验数据进行了验证。

(3) 通过引入单晶应变三轴性因子  $T_{sc}$ , 能够较好地反映拉/扭应变路径角对多轴疲劳寿命的影响。

(4) 用  $\Delta\bar{\varepsilon}_{eq}$  和  $T_{sc}$  构造循环塑性应变能损伤参量, 进行多元线性回归分析, 疲劳寿命回归模型与试验寿命具有很好的相关性, 所有的试验数据均落在 2.0 倍的偏差分布带之内, 表明该模型具有较好的预测能力。

## 参 考 文 献

- Okazaki M, Sakaguchi M. Thermo-mechanical fatigue failure of a single crystal Ni-based superalloy. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30: 318-323
- Egly TA, Lang KH, Lohe D. Influence of phase shift and strain path on the thermomechanical fatigue behavior of CMSX-4 specimens. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30: 249-256
- Mitsuru K, Masao S, Masateru O. *Journal of Engineering Materials and Technology*, High temperature multiaxial low cycle fatigue of CMSX-2 Ni-Base single crystal superalloy. *ASME*, 1997, 119: 153-160
- 陈旭, 安柯, 齐荣等. 非比例载荷下 304 不锈钢低周疲劳寿命预测. *机械强度*, 2001, 23(3): 316-318 (Chen Xu, An Ke, Qi Rong, et al. Low cycle fatigue life prediction for 304 stainless steel under non-proportional loadings. *Mechanical Strength*, 2001, 23(3): 316-318 (in Chinese))
- 尚德广, 孙国芹, 蔡能. 非比例加载下 GH4169 高温多轴疲劳行为研究. *航空材料学报*, 2006, 26(6): 6-11 (Shang Deguang, Sun Guoqin, Cai Neng. Multiaxial fatigue behavior of GH4169 superalloy under non-proportional loadings at high temperature. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(6): 6-11 (in Chinese))
- 陈吉平, 丁智平, 尹泽勇等. 镍基单晶合金非对称循环载荷低周疲劳试验研究与寿命预测. *固体力学学报*, 2007, 28(2): 115-120 (Chen Jiping, Ding Zhiping, Yin Zeyong, et al. Study on low-cycle fatigue experiments and life prediction of single crystal nickel-based superalloys under asymmetrical cyclic load. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2007, 28(2): 115-120 (in Chinese))
- 岳珠峰, 吕震宙. 复杂应力状态下镍基单晶合金低周疲劳寿命预测模型. *稀有金属材料工程*, 2000, 29(1): 28-31 (Yue Zhufeng, Lü Zhengzhou. Low cycle fatigue prediction model of single crystal nickel-based superalloy under multiaxial stress state. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, 29(1): 28-31 (in Chinese))
- 岳珠峰, 于庆民, 温志勋等. 镍基单晶涡轮叶片结构强度设计. 北京: 科学出版社, 2008 (Yue Zhufeng, Yu Qingmin, Wen Zhixun, Hou Naixian. *Strength Design for Turbine Blade of Single Crystal Nickel-Based Superalloy*. Beijing: Publishing Company of Science, 2008 (in Chinese))
- Benellal A, Marquis D. Constitutive equations for non-proportional cyclic elasto-viscoplasticity. *ASME Engng Mater Tech*, 1987, 109(1): 326-336
- Benellal A, Marquis D. Constitutive equations describing non-proportional effects in cyclic plasticity. In: *Proc of the 2nd Inter Confer on Constitutive Laws for Engineering Materials, Theory and Application*. New York: Tucson AZ, 1987. 505-512
- Benallal A, Legallo P, Marquis D. Cyclic hardening of metals under complex loadings. In: *Proc of MECAMAT, Inter Seminar on the Inelastic Behavior of Solids, Models and Utilization*. France, 1988. 361-371
- Beballal A, Legallo P, Marquis D. An experimental investigation of cyclic hardening of 316 stainless steel and of 2024 aluminium alloy under multiaxial loading. *Nuel Engng*, 1989, 114: 345-353
- Ellyin F, Xia Z. A rate - in dependent constitutive model for transient nonproportional loading. *J Mech Phys Solids*, 1989, 37: 71-91
- McDowell DL. An evaluation of recent development in hardening and flow rules for rule-independent, non-proportional cyclic plasticity. *ASME J Appl Mech*, 1987, 54: 323-334
- McDowell DL, Socie DF. Transient and stable deformation behavior under nonproportional loading. *Mutiaxial Fatigue*, 1985(1): 64-87
- Doong SH, Socie DF. Constitutive modeling of metals under nonproportional cyclic loading. *Engng Mater Tech*, 1991, 113: 23-30
- 陈旭. 多轴非比例加载低周疲劳研究. [博士论文]. 成都: 西南交通大学, 1992 (Chen Xu, Study on multiaxial low cycle fatigue under non-proportional loading. [PhD Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1992 (in Chinese))
- 何国秋, 陈成澍, 严彪等. 新的多轴循环应变路径非比例度的定义. *同济大学学报*, 2002, 30(12): 1498-1502 (He Guoqiu, Chen Chengshu, Yan Biao, et al. Definition of non-proportionality of strain path under multiaxial cyclic loading. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(12): 1498-1502 (in Chinese))

- 19 Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. London: Oxford University Press, 1950
- 20 Ding ZP, Chen JP, Wang TF, et al. Influence analysis of multi-factor on LCF damage of single crystal Nickel-based superalloy. In: Proc of International Conference on Manufacturing Engineering and Automation, Gangzhou, 2010. Advanced Materials Research, 2010. 139-141, 198-204
- 21 丁智平, 刘义伦, 尹泽勇等. 立方晶体单晶材料屈服面的研究. 力学与实践, 2004, 26(4): 14-18 (Ding Zhiping, Liu Yilun, Yin Zeyun, et al. Study on the yield surface of cubic crystalloid single crystal material. *Mechanics in Engineering*, 2004, 26(4): 14-18 (in Chinese))
- 22 丁智平. 复杂应力状态镍基单晶高温合金低周疲劳损伤研究. [博士论文]. 长沙: 中南大学, 2005 (Ding Zhiping, Study on multi-axial low cycle fatigue damage of single crystal nickel-based superalloy. [PhD Thesis]. Changsha: Center South University, 2005 (in Chinese))
- 23 刘振学, 黄仁和, 田爱民. 实验设计与数据处理. 北京: 化学工业出版社, 2005.4 (Liu Zhenxue, Huang Renhe, Tian Aimin. *Experiment Design and Data Processing*. Beijing: Publishing Company of chemical industry, 2005.4 (in Chinese))
- 24 张莉, 王刚, 程靳. 多轴非比例加载条件下疲劳损伤参数的研究. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(5): 606-609 (Zhang Li, Wang Gang, Cheng Jin. Investigation of fatigue damage parameters under multi-axial non-proportional loading. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(5): 606-609 (in Chinese))
- 25 丁智平, 陈吉平, 尹泽勇. 复杂应力状态镍基单晶合金低周疲劳损伤模型. 应用力学学报, 2005, 22(2): 310-314 (Ding Zhiping, Chen Jiping, Yin Zeyong. Multiaxial low cyclic fatigue damage model for single crystal nickel-based superalloy. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2005, 22(2): 310-314 (in Chinese))

CNKI 优先出版编码: 1xxb2011-086-20111219

(责任编辑: 周冬冬)

## STUDY ON LOW CYCLE FATIGUE OF SINGLE CRYSTAL NI-BASED SUPERALLOY UNDER MULTIAXIAL NON-PROPORTIONAL LOADING<sup>1)</sup>

Ding Zhiping<sup>\*,2)</sup> Chen Jiping<sup>\*</sup> Wang Tengfei<sup>\*</sup> Zhao Ping<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

<sup>†</sup>(China Aviation Power Plant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

**Abstract** Strain-controlled tension/torsion low cycle fatigue (LCF) tests of single crystal Ni-based superalloy, DD3, were carried out under non-proportional loadings based on orthogonal design at elevated temperatures, using thin-walled tube specimens with [001] orientation. Experimental variable factors were chosen to be strain range, strain path angle, tension/torsion phase angle, strain ratio and temperature. Results show that strain path angle, tension/torsion phase angle and equivalent strain range, are the main affected factors on multi-axial LCF life. Dividing diamond strain loading path into proportional loading and non-proportional loading segments, the equivalent strain range parameter to characterize the effects of non-proportional loading was proposed, and a strain triaxiality factor for single crystal superalloy was introduced to reflect the tension/torsion strain path angle on multi-axial fatigue life. A formula of cyclic plastic strain energy, which is composed of the equivalent strain range taking account of the effects of non-proportional loading path and the strain triaxiality factor, is put forward as failure parameter. Multiple linear regression analysis show that a power law of the failure parameter has a good correlation with the failure cycle, and all test data fall into a scatter band of the factor of 2.0.

**Key words** single crystal Ni-based superalloy, low cycle fatigue, orthotropic, multi-axial non-proportional loading, orthogonal design

Received 13 April 2011, revised 27 November 2011.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (50875080) and the Construct Program of the Key Discipline Hunan Province.

2) E-mail: dzp0733@yahoo.com.cn