

DD6 单晶高温合金的低周疲劳寿命估算

李 影, 苏 彬, 吴学仁

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 建立了 DD6 单晶高温合金杨氏模量、屈服强度和强化指数与取向定量关系。并用这三个力学参数对滞后能 W 进行表达。进而用 $N_f = C(W)^\beta$ 模型疲劳寿命进行预测, 对 [001]、[011] 和 [111] 取向附近的多个取向进行的恒应力速率的低周疲劳试验表明: 实际寿命与该模型的预测寿命吻合得相当好。

关键词: 单晶高温合金; 低周疲劳; 寿命预测

中图分类号: TG132.3⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2001)03-0043-03

单晶高温合金是 80 年代发展起来的一类高温结构工程材料, 主要用作航空发动机涡轮零部件, 特别是涡轮叶片材料。但相对于传统多晶及定向合金, 单晶合金表现出很高的各向异性。用单晶高温合金制成的叶片根部所受的力为多轴应力, 所以建立需要测定各种取向下单晶高温合金低周疲劳寿命。但是由于单晶的生长制备十分复杂, 长成的单晶很难严格控制其精确取向, 所以得到的单晶均为一定范围内与理想取向存在偏差的晶体。而单晶高温合金的低周疲劳寿命又强烈依赖于取向^[1], 所以用无损方法对各种取向下的单晶合金的低周疲劳寿命进行预测是十分必要的。

1 实验材料与方法

本实验所用的 DD6 铸造坯料棒尺寸为 $\phi 5\text{mm} \times 100\text{mm}$, 使用 X 射线衍射仪对各坯料进行取向测定。根据衍射花样, 得到晶体实际取向与至少两个晶向的夹角。将标准三角极中所有的取向指数化 [0 0 50] ~ [50 50 50], 然后和所得到的 X 衍射结果相比较, 就可以得到每个试样的具体指数。其精度在 1° 之内。

然后对坯料进行如下步骤的热处理: 在 1315 下保温 4h 的固溶处理, 在 1120 下保温 4h 的一次时效处理, 在 870 下保温 32h 的二次时效处理。将热处理后的坯料加工为低周轴向疲劳试样, 其中, 760 试样标距部分尺寸为 $\phi 6\text{mm} \times 14\text{mm}$, 980 试样标距部分尺寸为 $\phi 6\text{mm} \times 19\text{mm}$ 。

低周疲劳试验在 MTS 液压伺服试验机上进

行, 760 试验采用炉温加热, 980 试验采用高频感应加热。试验均采用总应变幅控制, 应变比 R_ϵ 最小应变与最大应变之比为 -1, 应变速度保持恒定为 5×10^{-3} , 波形为三角波。

2 试验结果与讨论

虽然各试样的取向不同, 从而会导致杨氏模量屈服强度等参量各有不同。但由于低循环疲劳损伤是由于试样吸收的拉伸滞后能来控制的, 所以可以用循环滞后回线的面积来描述单晶合金的疲劳损伤。第一周的典型滞后环如图 1 所示。为计算滞后回线的面积, 下面对影响循环载荷下滞后环的几个力学参量进行讨论。

2.1 杨氏模量

文献[2]对镍基单晶高温合金的杨氏模量作了研究, 表明晶体取向对其有显著的影响。任意方向 [hkl] 的杨氏模量与在 [001] 方向的杨氏模量有如下关系:

$$E_{[hkl]} = \frac{E_{[001]}}{1 - \alpha A_{[hkl]}} \quad (1)$$

其中 $E_{[hkl]}$ 为 [hkl] 取向的杨氏模量, $E_{[001]}$ 为 [001] 方向的杨氏模量, α 是与 [001] 取向的弹性常数相关的常数, 其表达式可写作:

$$\alpha = 2 + 2u_{[001]} - \frac{E_{[001]}}{G_{[001]}}$$

它反映了晶体各向异性的程度, α 值越大, 各向异性越强烈, 通过计算可得到 DD6 单晶的 α 值为 1.84。而 $A_{[hkl]}$ 是晶向参数, 反映了晶向偏离 [001] 的程度, 其表达式为:

$$A_{[hkl]} = \frac{h^2k^2 + h^2l^2 + k^2l^2}{(h^2 + k^2 + l^2)} \quad (2)$$

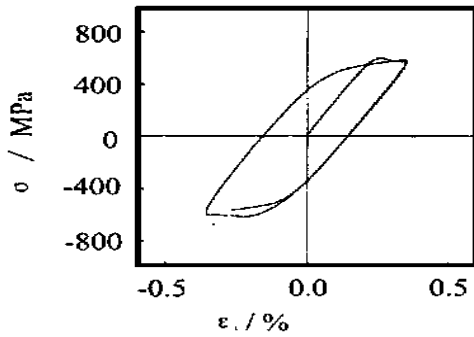


图 1 低周疲劳第一循环周次的典型滞后环

Fig.1 Typical hysteresis loop of first cycle

2.2 屈服强度

镍基单晶高温合金在高温下表现出反常的屈服现象,即临界切应力无法通过主滑移系的 Schmid 因子进行统一,这是由于交滑移作用的结果,所以对于一定的晶向需要两个晶向进行描述。并且,在循环变形的过程中会表现出一定的拉压不对称。而在本模型中,考虑的是滞后环内的能量损失,而根据 LCP 模型^[3],

$$\sigma_y = \frac{1}{b_1 S_1 + b_2 S_2 + \delta b_3 S_3}$$

这里 S_1 、 S_2 和 S_3 分别为 $(111) \langle 101 \rangle$ 、 $(001) \langle 101 \rangle$ 和 $(111) \langle 112 \rangle$ 主滑移系的 Schmid 因子,主滑移系为各同族滑移系中 Schmid 因子最大的滑移系。(拉伸时为 +1, 压缩时为 -1, 从而引起拉伸和压缩应力的不对称性。但由于对于拉伸和压缩的效果作用相反,而这种作用对于滞后能刚好抵消,故可以略去,这样,

$$\sigma_y = 1 / (b_1 S_1 + b_2 S_2) \quad (3)$$

在 $[111]$ 取向附近,试样的滑称通过 $(001) \langle 112 \rangle$ 产生,此时的屈服应力应由滑移系 $(001) \langle 112 \rangle$ 决定

$$\sigma_y = \tau / S_2 \quad (4)$$

究竟选公式 1 还 2 取决于两值大小的比较。

2.3 非弹性应变变量

屈服过程中的应力应变曲线的方程可写为:

$$\sigma(\epsilon) - b = A(\epsilon - c)^n \quad (5)$$

而线弹性范围内的应力应变曲线方程为

$$\sigma = E\epsilon \quad (6)$$

两条曲线相切,切点即为屈服点 (ϵ_y, σ_y) 。为方便求解,将坐标原点平移至 (b, c) ,则两方程变为

$$\sigma(\epsilon) = A\epsilon^n \quad (7)$$

$$\sigma_1 = E\epsilon + a \quad (8)$$

切点为 (ω, θ)

$$E n \omega^{n-1} = E$$

$$\omega = \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

$$\sigma_0 = E \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

带入(6)式

$$b = E \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} - E \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}}$$

设最大应力点和屈服应力点的差值为 p , 即

$$\epsilon / 2 - 1 / (b_1 S_1 + b_2 S_2) / E = p$$

峰值应力点为 $(\epsilon_{max}, \sigma_{max})$, 即为 $\left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} + p$,

$E \left[\left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} + p \right]^n$ 可以算得,

$$\epsilon_n = p - (\sigma_{max} - \sigma_y) / E$$

$$= p - \left\{ E \left[\left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} + p \right]^n + E \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{n}{n-1}} E \right\} / E$$

$$= p - \left[\left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} + p \right]^n + \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{n}{n-1}} E \right] / E$$

形变强化指数 n 反映了单晶合金抵抗连续塑性变形的能力,是表征合金材料形变强化的性能。 n 与取向有关,大致为线性关系。通过计算,可以得到

$$n = 0.64 - 1.29A_{[hkl]}$$

2.4 疲劳寿命

从以上分析,可以看出单晶低周疲劳取决于单晶的晶体取向、弹性和塑性的各向异性,滞后回线中吸收的滞后能可以用下式近似表达:

$$W = \epsilon_n \sigma_{max}$$

$$= \left\{ p - \left[\left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} + p \right]^n + \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \right\} \{ \sigma_y + E \left[\left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n-1}} + p \right]^n - E \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{n}{n-1}} \}$$

上式中 p 、 n 、 E 和 σ_y 均为取向 $A_{[hkl]}$ 的单值函数。对于即定的取向可以求出一个循环周次的 W 值。而 N_f 和 W 为幂指数关系 A [4]:

$$N_f = C(W)^\beta \quad (9)$$

其中 C 和 β 为模型参量,通过计算可求得 C 和 β 分别为 1569.6 和 (-0.55) 。从图 1 可以看出,实际寿命与本模型的预测寿命吻合得相当好。试验得到的所有数据均落于因子为 2 的分散带内。

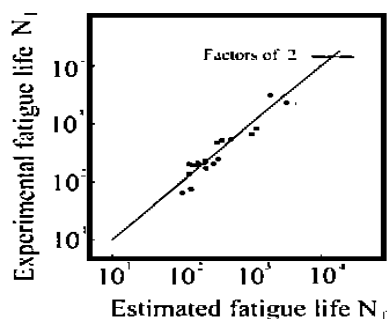


图2 模型疲劳寿命与实验疲劳寿命的比较

Fig. 2 Comparison between the experimental fatigue life and the estimated fatigue life from the model

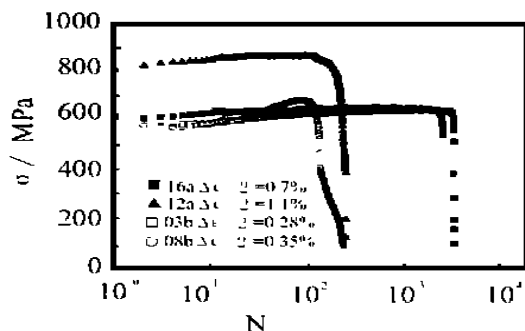


图3 不同取向的典型硬化曲线

Fig. 3 Typical cyclic stress response of different orientation specimens

低周疲劳过程中的损伤应为循环过程中各个周次滞后回线所包含的滞后能的累积,而本模型所用的是第一周次的滞后回线来表征整个疲劳过程,这是因为DD6单晶材料在980 °C时的循环应力幅值为基本稳定的。这也是本模型得以较好应用的基础,图2为几种取向的应力幅的典型硬化曲线,试样16a和12a为[001]取向,可以看出,从循环的第一周到断裂前的迅速软化,应力幅值基本保持不变,在弹性模量不变的情况下,应力幅值不变也即保证了非弹性模应变幅的稳定性。而对于取向接近于[111]的各试样,如图2中的试样03b和08b,虽然在循环过程中出现了应力幅的变化,就在循环的初始阶段表现为循环软化,继而又表现为循环硬化,不过可以看出循环第一周的应力幅值基本和断裂前的各周次的应力幅大致相当。所以第一周的循环滞后回线可以用来说明整个疲劳过程的损伤累积。

3 结论

用滞后能的方法建立描述低周疲劳循环过程中的损伤累积,建立单晶合金杨氏模量、屈服强度和强化指数与滞后能的定量关系。试样的取向和试验过程中所加载的总应变幅对于低周疲劳寿命的影响可以较好的通过该模型进行预测。

参考文献

- [1] CHERAGATTI R, REMY L. Mater Sci Eng, 1991, A141, 1—9.
- [2] LI S X, FLLISON E G, SMITH D J, J Strain Analysis, 1994, 29(2), 147.
- [3] LALL C, CHIN S, POPE D P. Metall Trans, 1979, 10A, 1323.
- [4] OSTERGREN W J, J of Testing Evaluation, 1976, 4, 327—329.

Low cycle fatigue behavior of DD6 single crystal

LI Ying, SU Bin, WU Xue-ten

(Beijing institute of aeronautical materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The low cycle fatigue tests on nickel-base single-crystal superalloy DD6 were conducted at 980 °C under total axial strain control. Specimens having crystallographic orientations near [001], [011] and [111] were tested under fully reversed strain. The experimental result shows that the fatigue behavior depends on the crystallographic orientation and total strain amplitude. A model with hysteretic energy was established to predict the low cycle fatigue life.

Key words: single crystal superalloy; low cycle fatigue; life prediction