

发动机涡轮盘的应变疲劳行为

The Low Cycle Fatigue Behavior of Engine Turbine Disk

贺株莉 (南方动力机械公司)

He Zhuli (South Power Machine Corporation)

[摘要] 研究了发动机涡轮盘材料 (GH33A) 在 3000h 应力时效后和未经长时效状态下的低周疲劳行为。测定了循环稳定和单调拉伸应力-应变曲线, 给出了应变-寿命关系。讨论了该材料的循环硬化 (软化) 特征。

关键词 涡轮盘 低周疲劳

[Abstract] The engine turbine disk material GH33A was tested for low cycle fatigue behavior before stress ageing and after 3000 hours stress ageing, respectively. The cyclic hardening characterization were analyzed by the recorded cyclic and monotone stress-strain curve. With strain-life relation data, static and low cycle fatigue parameters of GH33A were generated for application to the design, materials selecting, and life estimation.

Keywords turbine disk low cycle fatigue

1 引言

研究涡轮盘材料的应变疲劳行为对设计和使用有着重要意义。为此, 采用多试样法对涡轮盘材料 GH33A 在时效和未时效状态下的低周疲劳行为进行了测定, 并绘制应力-寿命曲线, 以供实际设计使用。

2 试样制备与试验方法

2.1 试样制备

材料: GH33A, 由上钢五厂生产, 双真空冶炼。主要化学成分示于表 1。供应状态: 固溶+时效处理, 具体规范为 $1080 \pm 10^\circ\text{C}$, 8h, 空冷+ $750 \pm 10^\circ\text{C}$, 16h, 空冷。

全部试样在 I 级和 II 级涡轮盘上弦向切取。材料的常规力学性能列于表 2。

表 1 主要化学成分 (%)

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr
0.043	0.012	<0.05	<0.007	<0.015	基	20
Al	Ti	Nb	Fb	Cu	B	Ce
0.082	≤2.80	1.56	0.18	<0.07	0.009	0.004

表 2 常规力学性能

温度	E/GPa	σ_b , MPa	$\sigma_{0.2}$, MPa	δ_5 , %	ψ , %
室温	215	1174	762	25.6	22
600℃	181	1050	680	24	25
600℃*		1136	765	16.8	16.6

注: * 试样在 650℃ 于 245MPa 持久应力作用下经 3000h 应力时效。

低周疲劳试样形状及各部尺寸见图 1。

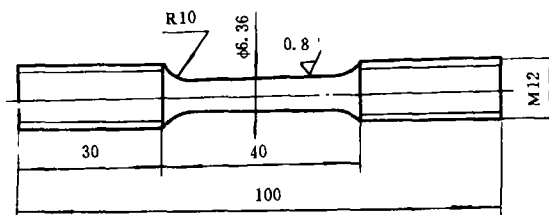


图 1 试样形状与尺寸

2.2 试验方法

试验在 MTS812.12 动/静态材料试验机上进行, 应变比 $R_\epsilon = -1$, 温度 600℃, 空气介质, 频率控制在 0.5Hz, 波形为三角波。

试样失效的确定采用完全断裂法, 并取二分之一疲劳寿命的迟滞回线为稳定迟滞回线, 用 N_f 表示疲劳寿

命。

3 试验结果和分析

3.1 应变-寿命曲线

不同应变水平下的应变疲劳试验结果绘于图 2。

对于恒应变低周疲劳试验下的应变-寿命曲线, 可用 Manson-coffin 公式表示, 即:

$$\Delta \epsilon_t / 2 = \Delta \epsilon_e / 2 + \Delta \epsilon_p / 2 = \sigma'_t / E (2N_f)^b + \epsilon'_t (2N_f)^c \quad (1)$$

$$\text{式中} \quad \Delta \epsilon_e / 2 = \sigma'_t / E (2N_f)^b \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon_p / 2 = \epsilon'_t (2N_f)^c \quad (3)$$

由图 2 可见, GH33A 合金在应变水平很高或寿命较短时, 其塑性分量 $\Delta \epsilon_p / 2$ 起主要作用; 当应变水平较小或寿命较长时, 弹性分量 $\Delta \epsilon_e / 2$ 起主要作用。

用塑性分量进行计算, 得

$$\Delta \sigma / 2 = k' (\Delta \epsilon_p / 2)^{n'} \quad (4)$$

按公式对应变疲劳试验数据进行最小二乘法处理, 可分别得到 GH33A 在未经长时效和经 3000h 长时效的应变疲劳参数, 见表 3 和表 4。

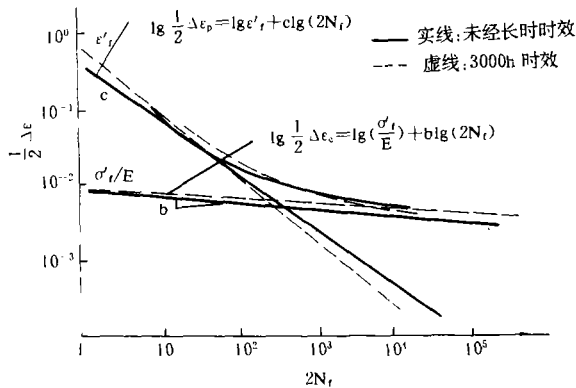


图 2 GH33A 的应变-寿命曲线

表 3 GH33A 未经长时效时的应变疲劳参数

σ'_t , MPa	b	ϵ'_t , %	c	K' , MPa	n'
1359.87	-0.0805	0.3315	-0.7506	1418.60	0.0962

表 4 GH33A 3000h 时效的应变疲劳参数

σ'_t , MPa	b	ϵ'_t , %	c	K' , MPa	n'
1430.90	-0.0796	0.5742	-0.8720	1400.10	0.07828

由此可得应变疲劳方程:

(1) 未经长时效的 GH33A 为

$$\Delta \epsilon_e / 2 = 0.0075 (2N_f)^{-0.0805}$$

$$\Delta \epsilon_p / 2 = 0.3315 (2N_f)^{-0.7506}$$

$$\Delta \sigma / 2 = 1418.116 (\epsilon_p / 2)^{0.0962}$$

$$\Delta \epsilon_t / 2 = 0.0075 (2N_f)^{-0.0805} + 0.3315 (2N_f)^{-0.7506}$$

过渡寿命 $N_T = 380$ 周

(2) 经 3000h 应力时效的 GH33A 为

$$\Delta \epsilon_e / 2 = 0.0079 (2N_f)^{-0.0796}$$

$$\Delta \epsilon_p / 2 = 0.5742 (2N_f)^{-0.8720}$$

$$\Delta \sigma / 2 = 1400.09 (\epsilon_p / 2)^{-0.0783}$$

$$\Delta \epsilon_t / 2 = 0.0079 (2N_f)^{0.0796} + 0.5742 (2N_f)^{-0.872}$$

过渡寿命 $N_T = 223$ 周

3.2 单调拉伸和循环稳定应力-应变曲线

单调应力-应变曲线由轴向静力拉伸试验测定, 图 3 给出的是真实应力-应变曲线。单调拉伸的真实应力-应变可由 Houoman 硬化律表示 $\sigma = K \epsilon^n$ 。表 5 给出了 GH33A 在不同时效与不同温度下的静力参数。

表 5 静力参数

温度	σ_t , MPa	ϵ_t , %	K, MPa	n
室温	1699.19	32.41	1308.2	0.0915
600℃			1065	0.064
600℃*			1448	0.1135

注: * 表示经 3000h 应力时效后的材料。

循环应力-应变曲线的测定, 可用连接不同应变水平下循环稳定迟滞回线顶部的方法得出, 一并绘在图 3 中。

图 3 还给出了 GH33A 循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线。

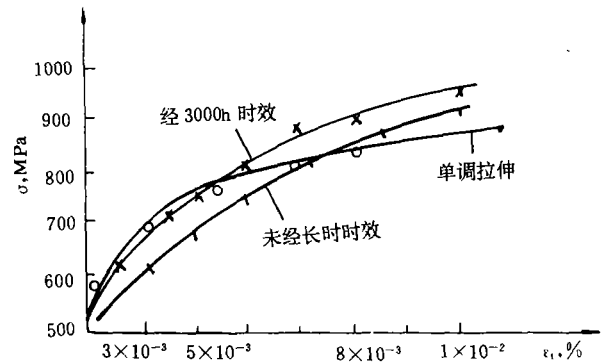


图 3 GH33A 循环稳定与单调拉伸应力-应变曲线

3.3 $\Delta \sigma / 2 - \Delta \epsilon_p / 2$, $\Delta \epsilon_t / 2 - \Delta \epsilon_p / 2$ 曲线

根据试验结果可以绘制出 $\Delta \sigma / 2 - \Delta \epsilon_p / 2$ 及 $\Delta \epsilon_t / 2$

— $\Delta\epsilon_p/2$ 曲线, 见图 4 和图 5。

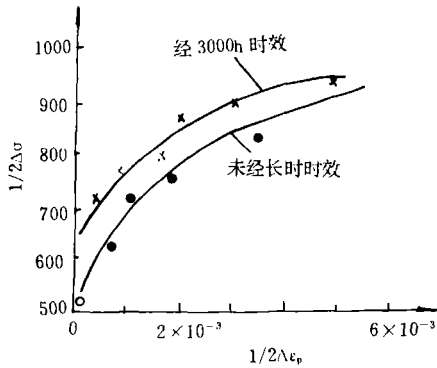


图 4 $\Delta\sigma/2-\Delta\epsilon_p/2$ 曲线

4 结论

(1) 从静强度参数试验结果来看, 在 600℃下, 3000h 时效后强度提高, 塑性下降。

(2) 在 600℃试验条件下, 比较一次拉伸应变硬化指数 n 和循环应变硬化指数 n' 的数据知道, 未经长时效的材料, 其硬化指数有所提高, 说明有循环软化现象;

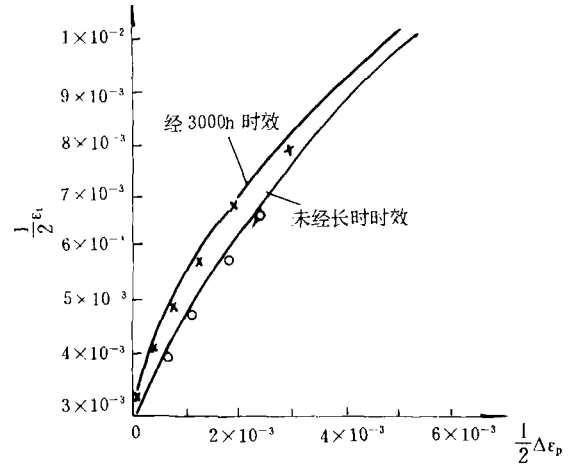


图 5 $\Delta\epsilon_t/2-\Delta\epsilon_p/2$ 曲线

象; 而经 3000h 时效后的材料, 其硬化指数大大降低, 说明循环硬化很显著。

(3) 材料在经过 3000h 应力时效后, 在相同应变条件下, 其塑性与未经长时效的材料相比偏低; 而稳定应力偏高。

综上所述, 材料通过在 650℃, 245MPa 应力下经过 3000h 时效后, 材料硬化, 塑性降低, 即决定低周疲劳寿命的塑性也降低。

(上接第 42 页)

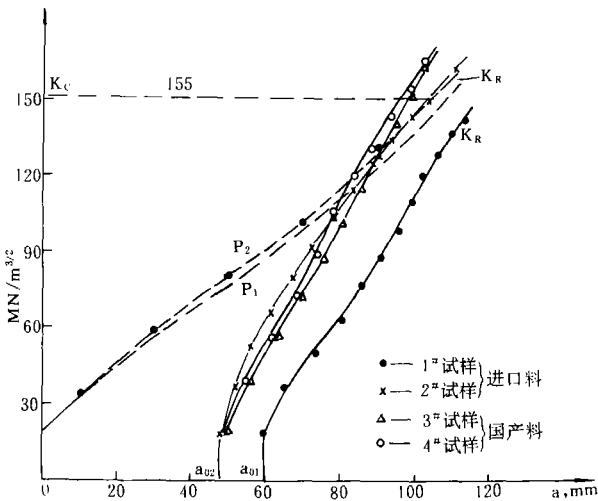


图 2 钛铝蒙皮板 K_R 曲线

3 结果分析及结论

(1) 按净截面应力 $\sigma_N = \left(\frac{P}{BW} \right) / \left(1 - \frac{2a}{W} \right) \leq \sigma_s$ 公式, 对 K_R 曲线上所取的各点进行有效性检验。虽因试件尺寸不足, 未能做出全部的 K_R 曲线的有效数据点, 但仍有可比性。

(2) 对比测得的力学性能和 K_R 曲线发现, 两种材料的性能十分接近, 国产料达到了进口料的性能要求。

(3) 测得的临界 $K_{IC} = 155 \sim 170 \text{ MN/m}^{3/2}$ 。由于该点的应力 σ_N 已经超过了屈服点 σ_s , 所以 K_{IC} 仅供参考。

(4) 试样宽度 W 加大, 使 $L/W \geq 1.5$ 倍, 方可测出更多的有效数据点。根据公式 $W_{\min} = 35\gamma_y = \frac{35}{2\pi} \left(\frac{K_C}{\sigma_s} \right)^2$ 的关系来估算试样尺寸, 其宽度 $\geq 950 \text{ mm}$ 才能测得有效的 K_C 值。为克服大试样给试验带来的困难, 测定材料的 K_R 曲线很有必要。