

过载循环对GH37合金持久寿命的影响

阎 莉 周洪范

摘 要

本文研究了GH37合金在700℃下经过100小时超载循环后的寿命,通过与此合金在相同状态下的纯持久寿命对比发现,当循环超载量控制在12%以内,材料呈现循环强化效应,超载量大于14%,呈现循环软化效应。由试验结果得到寿命与超载量的函数关系。微观特征与观察结果很好相符。

一、引 言

实际使用中的高温部件,很少是单纯受静载荷及恒定温度作用的,常规的持久强度极限和蠕变极限,由于不能反映高温部件的实际工作条件,因而是很不完善的。目前,在航空发动机涡轮叶片强度计算中,仍按常规持久强度和蠕变极限进行设计。而叶片在实际工作中所受到的载荷与发动机运转情况有关。发动机在不同的工作状态下,其转速变化直接引起叶片载荷的变化。在发动机完整的工作循环中,实际有多次过载循环产生。这种过载效应对叶片材料的循环损伤和持久寿命是有影响的。目前,关于循环过载对疲劳寿命的影响已进行了大量研究。但关于循环过载对持久寿命影响的研究却尚未得到工程界的足够重视,这对于主要承受高温持久应力的涡轮叶片材料来说尤感不足。

为了查明过载循环对叶片材料持久寿命的影响,本试验对涡轮叶片材料GH37合金在700℃下先经过100小时超载循环,然后进行纯持久试验直至断裂,并将此结果与未经循环的持久寿命进行比较,从而得到超载循环对GH37合金持久寿命影响的规律。

二、试验条件及试验方法

试验用料: GH37合金(一种 γ' 强化的镍基高温合金)

热处理制度: $1180 \pm 10^\circ\text{C} \times 2$ 小时空冷, $1050 \pm 10^\circ\text{C} \times 4$ 小时空冷, $800 \pm 10^\circ\text{C} \times 16$ 小时空冷

试验温度: 700℃

加载循环方式如图1所示。

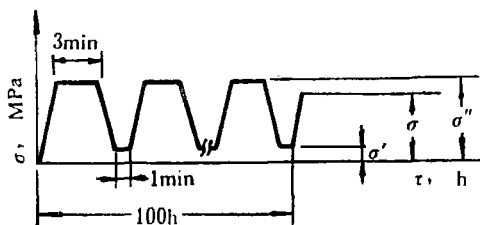


图1 循环载荷谱

图中: σ' —循环初应力为 1kg/mm^2 ;

σ —纯持久应力为 51kg/mm^2 ;

σ'' —循环峰值应力。

* $1\text{kg/mm}^2 = 9.80665\text{MPa}$, 下同。

循环超载量用 δ 表示, 即

$$\delta = \frac{\sigma'' - \sigma}{\sigma} \times 100\%$$

试验方法是在700℃, 试样在10%、15%、20%的超载量下, 循环加载100小时后, 将应力恢复到 51kg/mm^2 静拉伸直至断裂。在循环峰值应力下保载3分钟, 在初始应力下保载1分钟。

本试验采用 $\phi 5 \times 25\text{mm}$ 光滑圆形试样, 在改装的DST-5型试验机上进行。加载精度 $\pm 0.5\%$, 温度用双向可控硅精密温度控制器控制, 精度为 $\pm 1 \sim 2^\circ\text{C}$ 。

三、试验结果及讨论

将试验结果绘入纵坐标为峰值拉伸负荷下累计保持时间 t_r ,横坐标为超载量 δ 的坐标内,得到图2所示曲线(数据点为多个试样均值)。本试验采用的循环加载方式,循环100小时,相当于在峰值载荷下累计保持时间为61.2小时。图2中虚线表示经100小时循环而断裂的数据点轨迹。虚线以上表明材料经100小时循环后仍有一定的持久剩余寿命,虚线以下表明试样在循环加载过程中断裂。

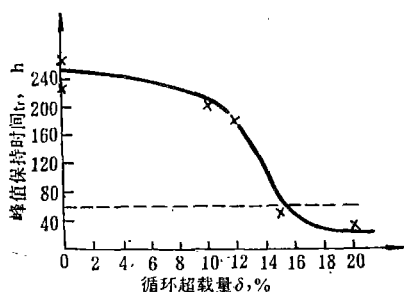


图2 循环超载量与持久寿命关系曲线

为了明确看出循环超载对持久寿命的影响,我们做了GH37合金纯持久寿命试验。以寿命比 $\gamma = t_r/t$ (t 为纯持久寿命)为纵坐标,以循环超载量 δ 为横坐标,得到图3的曲线。 $\gamma = 1$ 表示在峰值拉伸负荷下保持时间等于纯持久寿命。图中虚线表示 $\gamma = 1$ 的试验点轨迹。虚线以上表示经100小时循环加载后的剩余持久寿命大于纯持久寿命,虚线以下表示剩余持久寿命小于纯持久寿命。由图3可见,当 δ 小于12%时,材料显示循环强化,当 δ 大于14%时,材料显示循

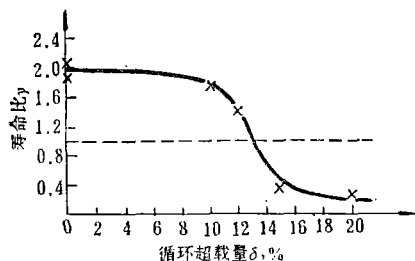


图3 GH37合金循环强化与弱化曲线

环软化, $\delta = 12\% \sim 14\%$ 为过渡阶段。由图2及图3可以看出 $\gamma = f(\delta)$ 曲线类似立方抛物线移轴形式, 设有如下多项式

$$\gamma = a_0 + a_1\delta + a_2\delta^2 + a_3\delta^3 \quad (1)$$

通过程序进行最小二乘法处理得到

$$\gamma = 17.16 - 6.92\delta + 8.97\delta^2 - 4.74\delta^3 \quad (2)$$

将 $t_r = \gamma t$ 代入方程(2), 得到持久寿命与循环超载量的关系为:

$$t_r = 2179.32 - 878.84\delta + 1139.19\delta^2 - 601.98\delta^3 \quad (3)$$

按照方程(2)绘出 δ 与 γ 的关系如图4。由图可见, 在 δ 大于15%后, 曲线拟合数据才与试验数据有偏离, 说明按方程(2)拟合的曲线已在适用范围之内。

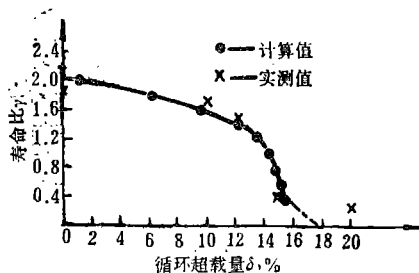


图4 最小二乘法拟合曲线

为了查明超载循环对持久寿命影响的微观特征, 选取纯持久试样及循环超载量 δ 分别为10%及20%的一组试样在JSM-35型扫描电镜上观察其断裂特征。从图5a可见, GH37合金700℃时静持久断裂特征是裂纹由穿晶起始的。在穿晶开裂区形成塑性变形韧窝(图5b), 当最终有效截面不足以承受外加应力 51 kg/cm^2 时, 造成沿晶断裂。

经非超载循环加载100小时后, 静拉伸持久寿命较长的原因是由于合金呈现高温循环强化效应。从图6可见, 循环加载在断口上有疲劳条带特征, 在晶内形成疲劳损伤。由于蠕变/疲劳交互作用, 断裂特征出现韧窝中含有少量疲劳条带, 因而延长了静持久寿命。

当循环超载10%时, 裂纹由穿晶起始, 并开始出现沿晶与穿晶型混合特征(图7)。这说明晶内变形和晶界滑移两种变形机制同时起

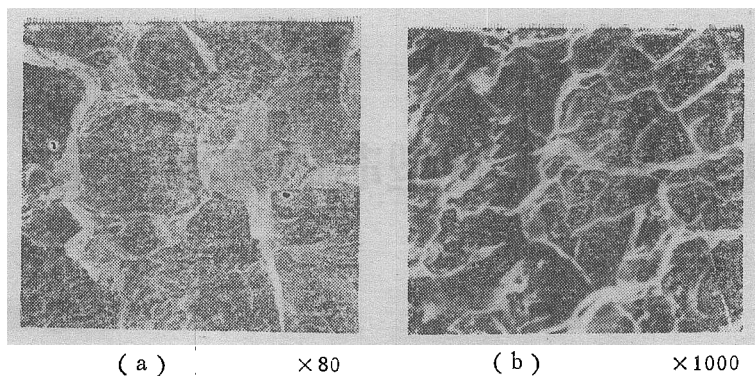


图 5 纯持久拉伸裂纹源区
(a) 穿晶起始;
(b) 穿晶开裂形成的韧窝

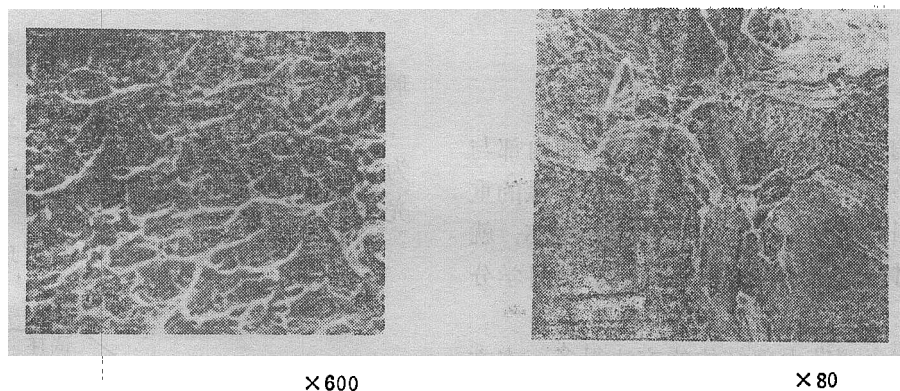


图 6 未超载静持久断裂疲劳条带

图 7 超载10%静持久拉伸，中心区呈混合型断裂特征

作用，从而减缓了晶界滑移量，故经循环加载后的剩余持久寿命比纯持久寿命要长。

当循环超载20%时，开裂源区已由穿晶型过渡为混合型，见图8a。沿晶开裂的趋势增大，且在试样中心处的晶界上出现二次裂纹，提供了裂纹开裂的支路，见图8b。

由以上观察不难看出，经100小时超载12%循环加载后的持久断裂断口具有韧窝和条带的复合特征，试样为混合型断裂。经超载20%以上，则晶界损伤大于晶内损伤，疲劳与蠕变两类损伤在晶界上叠加，使晶界大大弱化，形成

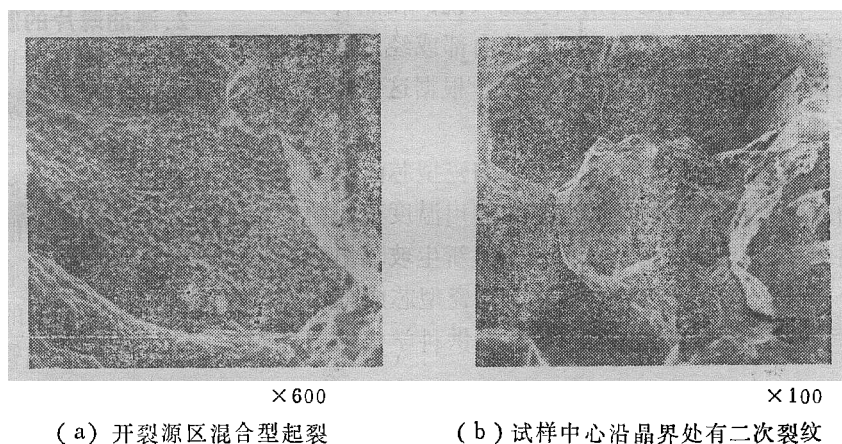


图 8 超载20%静持久拉伸

沿晶型断裂。

本文在金相观察及试验中得到马宏海同志及持久组同志们的帮助，特致谢意。

(参考文献略)