

# 高温对核电工程材料低循环行为的影响研究

Effects of Elevated Temperature on Low Cycle Fatigue

Behavior of Nuclear Power Engineering Materials

蔡力勋, 罗海峰, 孙亚芳 (西南交通大学力学所, 成都 610031)

(CAI Li-xun, LUO Hai-feng, SUN Ya-fang)

(Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031, China)

**摘要:** 对核电工程材料 (钛合金 T42NG 与 T225NG 和主螺栓材料 18Cr2NiWA) 开展了室温与 350 °C 高温下的低周疲劳性能试验研究, 获得了各材料单调 R-O 本构模型和 M-C 寿命估算模型。基于这些模型, 研究了材料的循环强化与软化规律, 研究了温度系数  $\lambda_s$ ,  $\lambda_w$  和  $\lambda_{Nf}$  对钛合金静强度、循环强度和低周疲劳规律的影响效应; 根据温度对寿命的影响系数  $\lambda_{Nf}$  与应变幅  $\Delta\epsilon/2$  呈线性规律的重要发现, 提出了考虑温度效应的用于高温低周疲劳寿命估算的  $\lambda$ -M-C 模型, 进而总结出一种较现行方法更简便的高温疲劳试验方法。

**关键词:** 低周疲劳; 疲劳性能; 寿命估算方法; 钛合金; 高温

**中图分类号:** TB302.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2001) 05-0015-05

**Abstract:** A series of tensional and low cycle fatigue tests for two kinds of titanium alloy : T42NG and T225NG and for 18Cr2NiWA steel at room temperature and 350 °C are carried out. Based on the test results, six monotonic constitutive relationships between stress and strain and six relationships between life  $N_f$  and strain amplitude controlled are given. By three ratio  $\lambda_s$ ,  $\lambda_w$  and  $\lambda_{Nf}$  of the materials related to the elevated temperature, The influence of the elevated temperature on both monotonic tensional intensity and cyclic intensity of the titanium alloys and on fatigue life of each material is systematically investigated. According to the important finding about a linearity relationship between the ratio  $\lambda_{Nf}$  and strain amplitude  $\Delta\epsilon/2$ , a new model, or  $\lambda$ -M-C model for predicting the fatigue life of a exponential material under  $R = -1$  and at an elevated temperature is presented. To get the  $\lambda$ -M-C model, the method that may simplify test and regression is discussed.

**Key words:** low cycle fatigue; fatigue property; life prediction; titanium alloy; elevated temperature

工程金属构件大多在循环载荷作用下工作, 疲劳是构件失效的主要形式。疲劳研究领域包括高周疲劳和低周疲劳。一般认为, 高周疲劳研究涉及在循环载荷作用下变形与应力为比例关系的疲劳破坏问题, 低周疲劳领域则关心变形与应力之间不成比例关系的疲劳破坏问题, 即在循环载荷作用下, 材料危险点的循环应力-应变关系因塑性应变较大而产生明显的迟滞回环, 在这种情况下应变幅值作为控制参数将按一定规律制约疲劳损伤的进程。疲劳破坏的过程事实上是材料组织结构损伤劣化的累积过程, 温度是加速材料疲劳劣化的重要影响因素。在定常温度下, 金属材料单轴应变幅与疲劳寿命关系存在形式统一、常数因材料而非线性的 Manson-Coffin 模型<sup>[1]</sup>, 但是该模型还难以反映导致材料损伤裂化的温度影响规律。本工作基于室温与 350 °C 高温下国产新材料 T42NG 和 T225NG 钛合金和 18Cr2NiWA 反应堆主螺栓材料的系列试验成果, 一方面研究了材料的疲劳特性,

一方面系统地研究了温度因素对材料静强度和低周疲劳规律的影响效应, 提出了考虑温度效应的低周疲劳统一模型, 即  $\lambda$ -M-C 模型。根据这一模型, 可以大大缩短高温疲劳试验时间和减少试样数量。

## 1 试验条件

拉伸和疲劳试样采用等直型结构, 中部等直段直径为 8mm, 长度为 28mm; 过度段半径为 32mm; 两端螺纹夹持段长为 40mm, 螺纹尺寸为 M16 × 2。试样车制后用匹配试件过渡半径的砂轮进行精细磨制, 最后用金相砂纸对试件表面作抛光处理。

试验设备为 MTS809 材料试验机。常温疲劳与常温拉伸试验采用常温轴向引伸计 MTS632.11c-21 (标距: 25mm)、高温疲劳与高温拉伸试验采用高温拉扭引伸计 MTS632.68-08F (标距: 25mm), 高温试验采用热发生器 MTS Lepel 以及温控器 SHIMADEN

SR53。高温引伸计和载荷传感器精度为5‰。试验控制方式为应变幅值控制,应变幅值控制的绝对误差小于0.03‰ mm/mm。Lepel温度控制精度为±1,试样标距范围内的温度梯度低于±5。采用三个热电偶测温。热电偶通过MTS点焊机焊在试样标距段的上中下三点,中点热电偶用作温度控制,其余两个热电偶用于监测温度梯度。

拉伸与疲劳应变控制波形为三角波,控制拉伸轴向变形的应变速率为0.05%/s,低周疲劳应变加载速率为0.4%/s(轴向应变/s)。采用载荷下降15%作为试样的失效判据。试验温度分别为室温和350。高温试验时,试样加载前温度升至规定温度后保温10min,然后将应变引伸计信号进行初始化调零以在测量应变中消除温度应变。

## 2 研究方法

### 2.1 R-O 单调拉伸本构模型

对于幂率钛合金和钢,Ramberg-Osgood本构模型(简称单调R-O模型)可用以拟合材料的单调拉伸应力应变关系:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

在较小的应变范围内,工程应力应变可近似取作为真应力应变,故式中 $\epsilon, \sigma$ 分别取为工程应变和工程应力,流动应力 $\alpha$ 取为 $(\sigma_b + \sigma_{0.2})/2$ 。这里, $\sigma_b$ 为抗拉强度(试样的最大抗力/试样原始截面积), $\sigma_{0.2}$ 为工程屈服应力;流动应变 $\epsilon_0 = \alpha/E$ , $E$ 为弹性模量; $n$ 和 $\alpha$ 分别为强化指数和强化系数。

### 2.2 M-C 疲劳寿命估算模型

轴向循环应变幅 $\Delta\epsilon/2$ 可取为弹性部分 $\Delta\epsilon_f/2$ 与塑性部分 $\Delta\epsilon_p/2$ 之和。当循环比R为-1时,Manson-Coffin疲劳寿命估算模型,即M-C模型,可表为<sup>[1~3]</sup>:

$$\Delta\epsilon/2 = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f (2N_f)^c \quad (2)$$

式中, $\frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b$ 即为弹性应变分量 $\Delta\sigma/2/E$ ,而 $\epsilon_f (2N_f)^c$ 为塑性应变分量 $\Delta\epsilon_p/2$ ;  $N_f$ 为试样的疲劳寿命; $\sigma_f$ 和 $\epsilon_f$ 分别为疲劳强度系数和疲劳延性系数; $b$ 和 $c$ 分别为疲劳强度指数和疲劳延性指数。

M-C模型的建立方法为,将实验数据组 $\{\Delta\sigma/2, 2N_f\}_{i=1 \dots N}$ 取对数后作线性回归,可得参数 $b$ 和 $\sigma_f$ , $N$ 为同组有效试样的数量;将实验数据组 $\{\Delta\epsilon_p/2, 2N_f\}_{i=1 \dots N}$ 取对数后进行线性回归,可得参数 $c$ 和 $\sigma_f$ 。实验数据组 $\{\Delta\epsilon_p/2, \Delta\sigma/2\}_{i=1 \dots N}$ 取为试样半寿命对应的稳定应变幅与应力幅。

### 2.3 R-O 循环本构模型

材料的循环应力应变关系可由式 $\Delta\sigma/2 = \sigma_f (2N_f)^b$ 和 $\Delta\epsilon/2 = \Delta\sigma/2/E + \epsilon_f (2N_f)^c$ 得出:

$$\Delta\epsilon/2 = \frac{\Delta\sigma/2}{E} + \epsilon_f \left( \frac{\Delta\sigma/2}{\sigma_f} \right)^{\frac{c}{b}} \quad (3)$$

该模型本质上是用同组疲劳试样的半寿命应力应变幅实验数据 $\{\Delta\sigma/2, \epsilon_p/2\}_{i=1 \dots N}$ 进行双对数线性回归的结果,因形式与单调R-O模型相似,故称为循环R-O模型。

### 2.4 温度影响系数 $\lambda_\sigma, \lambda_{\Delta\sigma}$ 和 $\lambda_{N_f}$

为了研究温度对一种材料的静强度、循环强化以及疲劳寿命的影响,定义三种温度影响系数:

$$\text{静强度温度影响系数 } \lambda_\sigma = \frac{\sigma_{HT}}{\sigma_{RT}} \quad (4)$$

$$\text{循环强化温度影响系数 } \lambda_{\Delta\sigma} = \frac{\Delta\sigma_{HT}}{\Delta\sigma_{RT}} \quad (5)$$

$$\text{疲劳寿命温度影响系数 } \lambda_{N_f} = \frac{N_{f,HT}}{N_{f,RT}} \quad (6)$$

式中,RT表示室温,HT表示350高温。则可以得到材料的 $\lambda_{\Delta\sigma}$ (或 $\Delta\epsilon/2$ )变化规律,从而获知高温在不同应变区域的影响程度。

## 3 试验结果

### 3.1 单轴单调拉伸试验与结果

完成了T42NG, T225NG钛合金和18Cr2NiWA在两种温度下各3个(共计18个)试样的拉伸试验。根据最小二乘法对拉伸实验数据进行拟合得到材料在常温和高温下的平均弹性模量 $E$ ,屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 以及单调R-O模型(1)所需的强化指数 $n$ 与强化系数 $\alpha$ 。表1给出了单调拉伸相关特性参数的均值分析结果和R-O模型参数的回归结果,其中R为单调R-O模型双对数线性拟合的相关系数。

### 3.2 低周疲劳试验与回归分析结果

对三种材料,各完成了12个试样的常温低周疲劳寿命有效试验组,以及各完成了12,10和10个试样的350高温低周疲劳寿命有效试验组。基于各组疲劳实验寿命数据<sup>[4~6]</sup>,采用M-C模型的回归方法,得到表2所示六个M-C模型的参数。表中 $R_\sigma$ 和 $R_p$ 为回归参数 $\{\sigma_f, b\}$ 和 $\{\epsilon_f, c\}$ 的双对数线性相关系数。

图1示出了两种钛合金和18Cr2NiWA钢在不同温度下的M-C模型对相应试验组光滑试样的疲劳寿命预测情况。图中的精确解线是指预测寿命与实验寿命完全重合的直线,由于试样受到加工精度、材料冶炼造成的夹杂和微孔穴、试样材料的取向带来的材质差异、试验机力学量测试精度、温度量精度等相关条件的限制,这条精确解线是永远达不到的。鉴于此,工程上通常取二倍的安全因子,只要模型对寿命的预测值落在二倍的安全因子规定的分散带内则可用于工

表 1 钛合金和钢的单轴拉伸性能参数分析结果

Table. 1 Analysis results of uniaxial tensile properfies of the Ti alloy and steel

材料	温度	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\sigma_s/\text{MPa}$	$\epsilon_f/\mu\epsilon$	单调 R-O 模型参数	
							$\alpha$	n
T 42NG	室温	644	109	739	692	6354	2.512	24.37
	350	430	98	486	458	4660	1.478	16.45
T 225NG	室温	421	107	554	488	4573	6.000	16.67
	350	206	80	290	248	3100	5.282	6.788
18Cr2NiWA	室温	875	208.9	1296	1085	5200	1.84	7.267
	350	796	187	1103	950	5080	2.116	9.510

表 2 M-C 模型参数的回归结果

Table 2. Regression results of M-C modle parameter

材料	温度	$\sigma_f/\text{MPa}$	$b$	$R_e$	$\epsilon_f$	C	$R_p$
T 42NG	室温	687.2	- 0.0324	0.953	0.2646	- 0.5975	0.985
	350	750	- 0.0757	0.939	5.087	- 0.931	0.970
T 225NG	室温	750	- 0.0811	0.953	0.1824	- 0.4994	0.987
	350	345.6	- 0.0485	0.922	0.6296	- 0.6671	0.987
18Cr2NiWA	室温	1338	-0.06124	0.982	0.275	- 0.561	0.973
	350	2219	- 0.1156	0.959	1.733	- 0.913	0.969

程材料与结构的设计和评定。图 1 表明高温和常温下钛合金和 18Cr2NiWA 的 M-C 模型对相应光滑试样的实验寿命预测点均落在二倍安全因子规定的分散带内，且紧靠精确解线，因而模型有较好的预测精度。

据式 (1) 和表 1 结果可以得到钛合金钢对应常温与高温的 4 个单调 R-O 模型。将常温与高温下 T 42NG 和 T 225NG 的循环 R-O 本构关系同相应的单调 R-O 本构关系放在一起比较 (如图 2, 3 所示)，可知：钛合

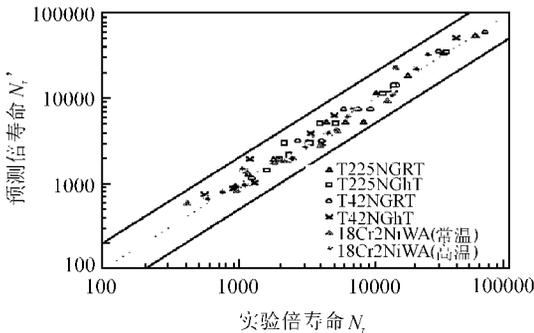


图 1 各 M-C 模型对光滑试样的寿命预测

Fig. 1 Comparison between life predicted by M-C models and experimental life of specimens

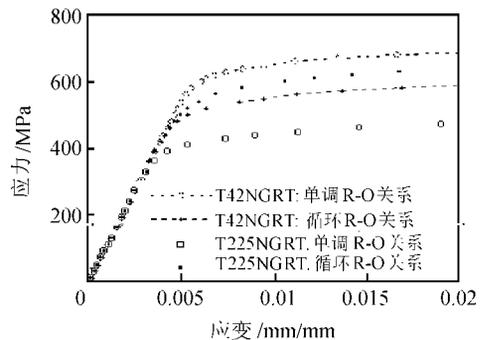


图 2 常温下钛合金的循环特性

Fig. 2 Cyclic constitutive relationships of titanium alloys at room temperature

#### 4 温度影响下钛合金的单调与循环特性

##### 4.1 循环强 (软) 化特性

由式 (3) 和表 2，可以得到，材料 T 42NG 和 T 225NG 对应常温与高温的 4 个循环 R-O 模型。而根

金 T 42NG 在常温和 350 高温下，均表现为循环软化，但在常温下该材料的循环软化较为显著；T 225NG 在两种温度条件下均表现为循环强化，在 350 高温下 T 225NG 的循环强化明显不如常温情形；在常温下 T 42NG 的循环强度不如 T 225NG，而在 350 高温下，尽管存在循环软化但循环强度却要比 T 225NG 的

高出近1倍。

### 4.2 温度对强度特性的影响

在高温条件下,材料弹性模量  $E$ , 屈服强度  $\sigma_{0.2}$  相对常温结果必然减少。减少程度因材料和温度不同而

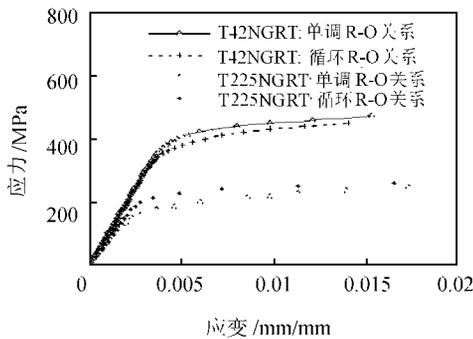


图3 350 高温下钛合金的循环特性

Fig. 3 Cyclic constitutive relationships of titanium alloys at 350 temperature

异。表3给出了T42NG和T225NG的  $E$ ,  $\sigma_{0.2}$  的温度影响系数,可见温度对T225NG的常规强度特性影响比对T42NG的影响严重。根据式(4)的定义,图4

表3 350 对  $E$ 、 $\sigma_{0.2}$  的影响

Table 3  $E$  and  $\sigma_{0.2}$  at 350

材料	$\lambda_E$ ( $E_{\text{高温}}/E_{\text{常温}}$ )	$\lambda_{\sigma^{0.2}}$ ( $\sigma_{0.2\text{高温}}/\sigma_{0.2\text{常温}}$ )
T42NG	0.9	0.66
T225NG	0.75	0.51

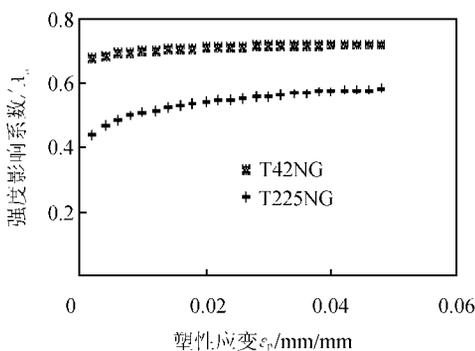


图4 两种钛合金的  $\lambda_{\sigma}-\epsilon_p$  规律

Fig. 4  $\lambda_{\sigma}-\epsilon_p$  curves of two titanium alloys

给出了钛合金T42NG和T225NG的  $\lambda_{\sigma}-\epsilon_p$  变化规律。进而看出:对T42NG材料,  $\lambda_{\sigma}$  随塑性变形的发展从66%~70%变化比较平缓,说明温度给强度带来的劣化影响比较一致;对T225NG,  $\lambda_{\sigma}$  随塑性变形发展由低到高变化,塑性变形越大越平缓,在  $\epsilon_p < 1\%$  范围内,塑性变形较小时温度的劣化影响大,说明在通常弹塑性范

围内 ( $\epsilon_p < 1\%$ ), 温度对强度的劣化影响程度较严重。

### 4.3 温度对循环特性的影响

根据式(5)的定义,图5给出了T42NG和T225NG的  $\lambda_{\Delta\sigma}-\epsilon_p$  变化规律。由图可见,温度对T225NG的循环强度影响仍然比对T42NG的影响严重。对T42NG,  $\lambda_{\Delta\sigma}$  随塑性变形的发展从75%~82%由低到高变化比较平缓,说明温度给循环强度带来的劣化影响比较一致;对T225NG,  $\lambda_{\Delta\sigma}$  随塑性变形发展由高到低变化,这与  $\lambda_{\Delta\sigma}-\epsilon_p$  规律恰好相反。塑性变形越大温度的劣化影响效应越严重。

### 5 温度对材料寿命的影响

根据式(6)的定义,图6给出了T42NG和T225NG的  $\lambda_{Nf}-\Delta\epsilon/2B$  变化规律。由图示结果,我

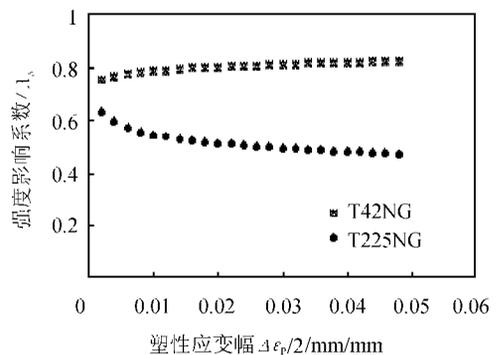


图5 两种钛合金的  $\lambda_{\sigma}-\epsilon_p$  规律

Fig. 5  $\lambda_{\sigma}-\epsilon_p$  curves of two titanium alloys

们发现如下重要规律:两种钛合金材料的  $\lambda_{Nf}-\Delta\epsilon/2$  曲线均表现为线性规律,线性相关系数  $R$  均超过0.998,这与图7所示的18Cr2NiWA主螺栓材料寿命受温度影响的线性规律相似,因而这一线性规律具有

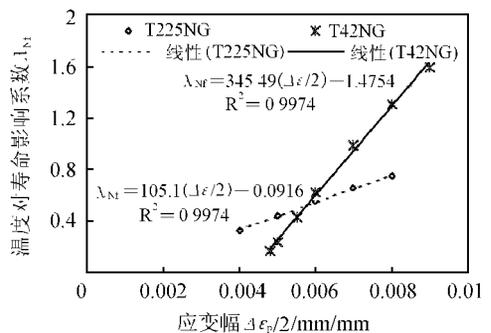


图6 两种钛合金的  $\lambda_{Nf}-\epsilon_p$  规律

Fig. 6  $\lambda_{Nf}-\epsilon_p$  curves of two titanium alloys

普适意义,适合不同的幂律材料;T42NG材料的  $\lambda_{Nf}-\Delta\epsilon/2$  直线比T225NG材料的  $\lambda_{Nf}-\Delta\epsilon/2$  直线较陡,说

明当应变幅从大到小变化时, 温度对 T42NG 材料有较为迅速的劣化影响; 应变幅  $\Delta\epsilon/2$  越小影响系数  $\lambda_{Nf}$  越小, 说明高温对小应变幅循环加载下钛合金钢劣化影响较严重。值得重视的是, 当应变幅高于 0.7% 时 T42NG 的寿命会比常温情形得到延长。尽管随应变幅减小温度对 T42NG 材料寿命的影响较大, 但常温下应变幅甚至在 0.3% 时 T42NG 寿命就超过  $10^5$ <sup>[5]</sup>, 因此并不意味着在低应变幅下 T42NG 的抗低周疲劳能力比 T225NG 差。

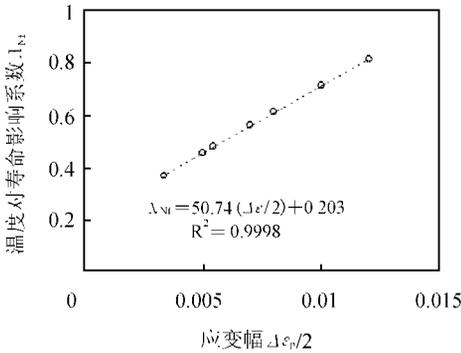


图7 18Cr2NiWA 钢的  $\lambda_{Nf}-\epsilon$  规律  
Fig.7  $\lambda_{Nf}-\epsilon_p$  curves of 18Cr2NiWA steel

## 6 $\lambda-M-C$ 模型及其应用方法

鉴于  $\lambda_{Nf}$  具有图 6 所示的线性规律, 则对于任何幂律材料, 高温下等幅低周疲劳寿命估算可采用如下简化模型:

$$\Delta\epsilon/2 = \frac{\sigma_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f(2N_f)^c \quad (\text{常温})$$

$$N_{f\text{高温}} = \lambda_{Nf} N_f (\lambda_{Nf} = C_1 \Delta\epsilon/2 + C_2) \quad (350 \text{ 高温})$$

我们称之为  $\lambda-M-C$  模型。对于 T42NG,  $C_1=345.49$ ,  $C_2=-1.4754$ ; 对于 T225NG,  $C_1=105.1$ ,  $C_2=-0.0916$ ; 对于 18Cr2NiWA,  $C_1=50.74$ ,  $C_2=0.203$ ; 参数  $E$ ,  $\sigma_f$ ,  $\epsilon_f$ ,  $b$ ,  $c$  已由表 1 和表 2 给出。

采用  $\lambda-M-C$  模型有如下意义: (1) 该模型与常温和高温下的两个独立  $M-C$  模型等效; (2) 新模型中已不包含高温弹性摸量和相应高温  $M-C$  模型的  $\sigma_f$ ,  $\epsilon_f$ ,  $b$ ,  $c$  等参量。鉴于常温疲劳实验比较容易且精度较高, 并考虑到高温实验难度较大, 因此采用  $\lambda-M-C$  模型的重要意义还在于简化实验, 提高精度。具体做法是, 首先完成易于实现、精度较高的常温  $M-C$  模型; 其次, 只需在两个选定的高应变幅 (如  $\Delta\epsilon/2$  取为 0.6% 和 0.9%) 下各完成 2~3 个试样的疲劳短寿命实验 (共计 4~6 个实验点), 将实验寿命记为  $N_{if}$ ; 再其次, 通过常温  $M-C$  模型计算出两个选定应变幅下的寿命预测值, 然后通过  $\lambda$  的定义求出  $\lambda_{Nf}$ ; 最后, 将数据  $\{\Delta\epsilon/$

2,  $\lambda_{Nf}\}$  线性回归, 求出  $C_1$ ,  $C_2$ 。这一方法, 可以明显节省高温试验时间和减少试验费用, 避免长时高温试验中温度设备可能引起的温度波动, 并可大大减轻试验与数据处理工作量。

需要强调的是,  $\lambda-M-C$  模型的适用寿命预测范围为  $10^2 \sim 10^5$ , 因此  $\lambda_{Nf}-\Delta\epsilon/2$  线性关系中的应变幅  $\Delta\epsilon/2$  取值必然存在下限。因此图 6 和图 7 中的拟合直线将不可能与应变幅轴线相交。

## 7 结论

(1) 尽管在常温和 350 °C 下 T42NG 钛合金表现出循环软化, T225NG 表现出循环强化, 但 T42NG 的疲劳性能, 特别是高温疲劳性能优于 T225NG。

(2) 350 °C 高温使 T42NG 和 T225NG 的单调和循环强度性能降低; T225NG 的性能降低程度较 T42NG 更为显著。

(3) 当应变幅从高到低变化时, 350 °C 高温导致材料寿命降低, 降低程度随应变幅呈线性规律。应变幅越小寿命降低程度越显著。

(4) 在等应变幅和 350 °C 高温条件下, T42NG 的抗疲劳性比 T225NG 好。

(5) 用于高温疲劳寿命估算的  $\lambda-M-C$  模型对传统  $M-C$  模型具有继承性, 适合各种幂律材料。

(6) 建立考虑高温效应的新模型所需高温试样比传统方法大为减少, 并可大大缩短高温疲劳试验时间和提高试验精度。

### 参考文献

[1] S S Manson, J. of Experiment Mechanics, 1965, 15(7), 193-226.  
[2] 中国国家标准局, 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法 [S]. GB/T 15248-94, 1994.  
[3] ASTM, Standard Recommended Practice for Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue Testing [R]. ASTM designation: E606-80.  
[4] 蔡力勋等. 钛合金 T42NG 高温低周疲劳特性研究, 西南交通大学力学所研究报告, 1997.  
[5] 蔡力勋等. 考虑温度效应的钛合金材料疲劳与循环特性研究, 西南交通大学力学所研究报告, 2000.  
[6] 蔡力勋等. 18Cr2NiWA 螺栓材料常温与高温低周疲劳特性研究, 西南交通大学力学所研究报告, 1998.

基金项目: 航空基金资助项目

收稿日期: 2000-06-20; 修订日期: 2001-02-25

作者简介: 蔡力勋 (1959-), 男, 汉族, 西南交通大学副教授, 硕士生导师, 研究方向: 材料本构与棘轮行为、疲劳力学、计算机辅助力学测试, 联系地址: 西南交通大学力学所 (610031)。

本文编辑: 李海霞