

高温对 Zr-4 合金低循环行为的影响

蔡力勋^{1,3}, 范宣华², 李 聪³, 邱绍宇³

(1. 西南交通大学 应用力学与工程系, 四川 成都 610031; 2. 中国工程物理研究院 结构力学所, 四川 绵阳 621900; 3. 中国核动力院 核燃料与材料国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 对 Zr-4 合金开展了常温与 400℃ 高温下的低周疲劳试验研究, 获得了两种温度下材料的单调 R-O (Ramberg-Osgood) 本构模型和 M-C (Manson-Coffin) 寿命估算模型。基于这些模型, 研究了材料的循环硬化与软化特性, 研究了静强度、循环强度、寿命的温度因子对 Zr-4 合金静强度、循环强度和低周疲劳寿命规律的影响效应; 根据温度对寿命的影响因子与总应变幅呈线性规律的重要发现, 修正了用于高温低周疲劳寿命估算的模型, 进而总结出较现行方法更简便的高温疲劳试验方法。还研究了恒幅应变下幅值应力的温度效应。

关键词: 低周疲劳; 疲劳性能; 寿命估算; Zr-4 合金; 高温

中图分类号: TG146.4^{*}16

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2004)05-001-06

Zr-4 合金具有优异的耐高温水腐蚀性能和综合力学性能。由于 Zr-4 合金在工作环境中承受循环载荷, 使得疲劳成为锆合金结构失效的主要形式。疲劳破坏的过程实质上是局部塑性应变引起的材料组织结构损伤劣化的过程, 温度是加速材料疲劳劣化的重要影响因素^[1]。到目前为止, 有关锆合金薄板在高温下的低周疲劳行为研究在国内很少开展, 在国际上相关成果也较少报道。本工作系统研究了高温对 Zr-4 合金板材的低周疲劳特性影响规律, 提出了考虑温度效应的 Zr-4 合金低周疲劳统一模型。

1 试验材料、设备及试验条件

试验材料为国产 Zr-4 合金, 原材料是 1~2mm 冷轧 Zr-4 合金板材。统一按照冷轧方向 (Rolling, 简称 R 向) 线切割取样, 试样化学成分 (wt%) 为 Sn 1.5, Fe 0.2, Cr 0.1, O 0.1, Zr Balnce。样品形状及尺寸为图 1 所示的漏斗型结构, 取样后进行酸洗 (体积比 HF: HNO₃: H₂O = 10: 45: 45)。接下来进行真空再结晶退火处理, 最后再酸洗一次, 去除试样表面产生的一薄层氧化膜。正式试验之前, 对试样圆弧部分进行倒角处理与抛光处理, 消除薄板边缘几何不连续产生的附加应力集中带来的试样提前破坏。

设备为美国 MTS809/25 kN/200 Nm 拉扭试验机。常温和高温疲劳均采用高温径向引伸计

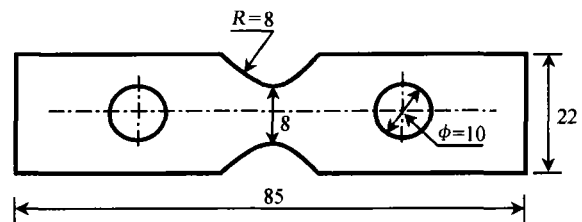


图 1 试样的形状及尺寸

Fig. 1 Structure and dimension of bugle-specimen

MTS632.61c-02。高温引伸计和载荷传感器精度为 0.5 级。采用 MTS653 高温炉, 高温炉内膛轴向均温区范围为 50mm, 高温炉的控温精度为 ±1℃, 在炉膛均温范围内温度梯度为 ±5℃。测温热电偶通过 MTS 点焊机焊在试样圆弧根部一侧中心位置。

疲劳试样热电偶控制温度为 400℃, 试验采用径向应变幅控制, 循环控制波形为三角波。应变幅控制的绝对误差小于 3.0×10^{-5} 。低周疲劳和循环应变加载速率为 2.0×10^{-3} /s (轴向应变/s)。以载荷下降 15% 作为试样失效判据。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

对于幂率材料, Ramberg-Osgood 本构模型可以很好描述材料的单调拉伸应力-应变关系:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

收稿日期: 2003-08-10; 修订日期: 2004-04-28

作者简介: 蔡力勋 (1959 -), 男, 教授

E-mail: lix_cai@263.net

式中, ε, σ 分别为轴向工程应变和工程应力; 流动应力 ($\sigma_0 = \sigma_b + \sigma_{p0.2}$)/2, σ_b 为抗拉强度 (试样的最大抗力/试样原始截面积), $\sigma_{p0.2}$ 为工程屈服应力 (方程 $\varepsilon = 0.002 + \sigma/E$ 与上述试验本构曲线的交点); 流动应变 $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$, E 为材料的弹性模量; n 和 α 分别为强化指数和强化系数。

2.2 横向应变与纵向应变的相互转化

根据国标 GB/T15248-94 附录 B^[3], 纵向到横向的应变转换关系

$$\varepsilon_d = -\nu_p \varepsilon + (\nu_p - \nu_e) \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

反算, 可以得到横向到纵向的转换关系

$$\varepsilon = (1 - \frac{\nu_e}{\nu_p}) \frac{\sigma}{E} - \frac{\varepsilon_d}{\nu_p} \quad (3)$$

其中, ν_e 为弹性泊松比, ν_p 为塑性泊松比, ε 为纵向总应变, σ 为纵向应力, E 为弹性模量, $\varepsilon, \varepsilon_d$ 本身含有正负号。通过(3)式将本试验的横向控制应变转化为纵向应变。文献[2]中对弹性泊松比与塑性泊松比的数值取值进行了详尽研究, 通过引入等效泊松比与形状因子综合考虑薄壁试样漏斗形状以及引伸计测量特性的影响效应, 得到等效泊松比结果如表1所示。

表1 两种温度下的泊松比取值

Table 1 Poisson's ratio at room temperature and 400°C

Conditions	Room temperature		400°C	
	Elasticity	Plasticity	Elasticity	Plasticity
Effective Poisson's ratio	0.240	0.520	0.278	0.520

2.3 M-C 寿命估算模型

轴向循环应变幅 $\Delta\varepsilon/2$ 可以分为弹性部分和塑性部分之和。当循环比 $R = -1$ 时, Manson-Coffin 疲劳寿命估算模型, 即 M-C 模型, 可表为^[1]:

$$\Delta\varepsilon/2 = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (4)$$

式中, $\frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b$ 即为弹性应变分量 ($\Delta\sigma/2$)/ E , 而 $\varepsilon'_f (2N_f)^c$ 为塑性应变分量 $\Delta\varepsilon_p/2$; N_f 为试样的疲劳寿命; σ'_f 和 ε'_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 $\{(\Delta\sigma/2)_i, (2N_f)_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ 取对数后作线性回归, 可得参数 b 和 σ'_f , N 为同组有效试样的数量; 将实验数据组 $\{(\Delta\varepsilon_p/2)_i, (2N_f)_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ 取对数后进行线性回归, 可得参数 c 和 ε'_f 。实验数据组 $\{(\Delta\varepsilon_p/2)_i, (\Delta\sigma/2)_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ 取为试样半寿命对应的稳定塑性应变幅与应力幅。

2.4 R-O 循环本构模型

当单轴试样承受对称循环应变的低周疲劳载荷时, 循环本构关系可表示为^[1]:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma/2}{E} + \varepsilon'_f \left(\frac{\Delta\sigma/2}{\sigma'_f} \right)^b \quad (5)$$

式中, $\Delta\sigma/2$ 和 $\Delta\varepsilon/2$ 为同组疲劳试样的半寿命应力幅和应变幅, 模型参数 $b, c, \varepsilon'_f, \sigma'_f$ 为(4)式所示

材料常数, 通过双对数线性回归方法对实验数据 $\{(\Delta\sigma/2)_i, (\Delta\varepsilon_p/2)_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ 进行数据处理获得。该模型称为 R-O 循环本构模型。

2.5 温度影响因子 $\lambda_\sigma, \lambda_{\Delta\sigma}$ 和 λ_{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, 定义三种温度影响因子:

$$\text{静强度温度影响因子: } \lambda_\sigma = \sigma_{hT} / \sigma_{RT} \quad (6)$$

循环强化温度影响因子:

$$\lambda_{\Delta\sigma} = \Delta\sigma_{hT} / \Delta\sigma_{RT} \quad (7)$$

$$\text{疲劳寿命温度影响因子: } \lambda_{N_f} = N_{f,hT} / N_{f,RT} \quad (8)$$

式中, RT 表示室温, hT 表示 400°C 高温。则可以得到材料的 $\lambda \sim \varepsilon$ (或 $\Delta\varepsilon/2$) 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 单调拉伸试验结果

通过对 Zr-4 合金进行常温和 400°C 高温条件下的拉伸试验并对试验数据进行最小二乘拟合得到材料在两种情况下的弹性模量 E , 屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ 以及单调 R-O 模型(1)所需的强化指数 n 和强化系数 α 。表2给出了单调拉伸相关特性参数结果和 R-O 模型参数的回归结果。

3.2 低周疲劳试验与回归分析结果

完成了 12 个试样的常温低周疲劳和 7 个试样的 400°C 高温低周疲劳有效试验组。基于各组疲劳

试验寿命数据^[2],采用 M-C 模型的回归方法,得到表 3 所示的 6 个 M-C 模型参数。其中 R_e 和 R_p 为

回归参数 $\{\sigma'_f, b\}$ 和 $\{\varepsilon'_f, c\}$ 的双对数线性相关系数。

表 2 Zr-4 合金单调拉伸性能试验结果
Table 2 Test results of normal properties of Zr-4 alloy

Temperature/°C	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	E/GPa	σ_b /MPa	σ_0 /MPa	$\varepsilon_0/10^{-6}$	α	n
Room	343	92	510	427	4636	3.596	8.290
400	114	70	202	158	2257	6.061	5.730

表 3 M-C 模型参数的回归结果
Table 3 Parameters in M-C models at room temperature and 400°C

Temperature/°C	σ'_f /MPa	b	R_e	ε'_f	c	R_p
20(Room)	1122.4	-0.1214	0.9773	0.5019	-0.5701	0.9656
400	553.8	-0.1525	0.9553	0.6393	-0.6088	0.9958

图 2 给出了两种温度下的 M-C 模型对相应试验组光滑试样的寿命预测情况。其中的“精确解线”是指预测寿命与试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织构差异、试验机力学量测试精度、温度控制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安全因子规定的分散带内则可用于工程材料与结构的设计和安全评定。图 2 表明常温和高温条件下对相应光滑试样组的试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”,一方面说明 Zr-4 合金具有良好的力学性能,另一方面也说明试验控制精度较高,模型具有较好的预测精度。

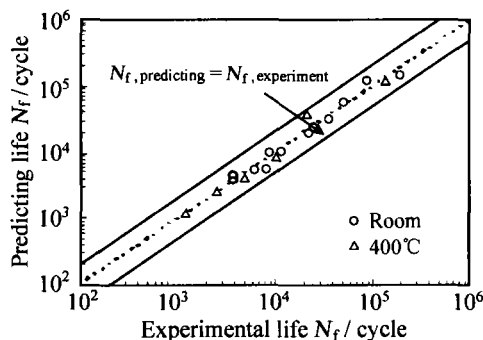


图 2 常温和 400°C 下试样预测寿命与实验寿命之间的比较

Fig. 2 comparing the predicting life with the experimental results of the specimens at room temperature and 400°C

4 温度影响下 Zr-4 合金的单调与循环特性

4.1 温度对于幅值应力的影响

取 4 个试样分别在控制应变幅 $\Delta\varepsilon/2$ 为 25×10^{-4} , 30×10^{-4} , 50×10^{-4} 和 80×10^{-4} 时进行循环试验。方法是:各试样在自低至高的 5 级温度:200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C 下分别循环 20 周。不同应变幅下各试样在不同温度下的稳定滞回环示于图 3 中。

在同一坐标系内做出四个试样情况下温度对幅值应力的影响曲线,如图 4 所示。可见,在相同的控制应变幅下温度对于幅值应力的影响非常显著,从 200°C 到 400°C 幅值应力下降接近一半;对不同试样,在固定应变幅的前提下,随温度升高,应力幅下降的趋势基本一致, $T - \Delta\sigma/2$ 关系可归纳为幂律关系: $\Delta\sigma/2 = \beta T^m$ 。对四级应变幅对应的 $T - \Delta\sigma/2$ 试验结果进行幂律回归(回归系数列于表 4),可见相关系数均在 0.99 以上。利用表 4 中对应的 4 个 $T - \Delta\sigma/2$ 幂律模型,可以通过线性插值的方式估计某一温度下给定应变幅下的应力幅响应。

根据不同温度下应力幅和相应的控制应变幅,得到不同温度下大致的循环应力应变曲线,如图 5 所示。结果表明,随温度升高,循环应力应变关系曲线逐渐下降,即 Zr-4 合金相应的承载能力下降。在 200°C ~ 300°C 之间,曲线下降最快,即力学性能下降最快,超过 300°C,下降速度相对变慢。

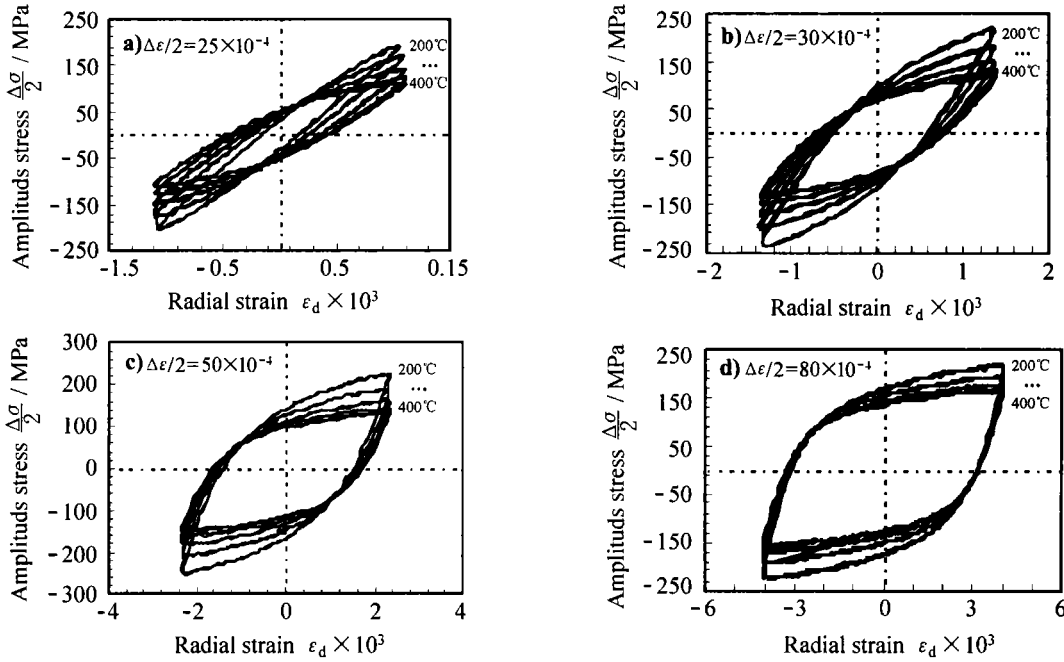


图 3 不同温度 (200℃, 250℃, 300℃, 350℃, 400℃) 下的稳定滞回曲线

Fig. 3 Saturated hysteresis curves at 200℃, 250℃, 300℃, 350℃, 400℃

表 4 T-Δσ/2 关系的幂律参数 β 和 m

Table 4 Parameter β and m of T-Δσ/2 in power law

Strain amplitude $\Delta \varepsilon / 2 / 10^{-6}$	2500	3000	5000	8000
Coefficient β	20665	21951	14472	8139.3
Power m	-0.8749	-0.8659	-0.7795	-0.6621

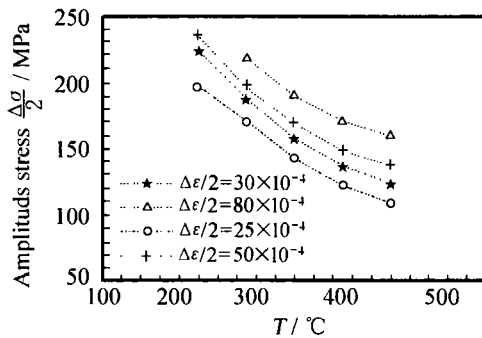


图 4 T-Δε/2 实验关系

Fig. 4 Experimental relationships of T-Δε/2

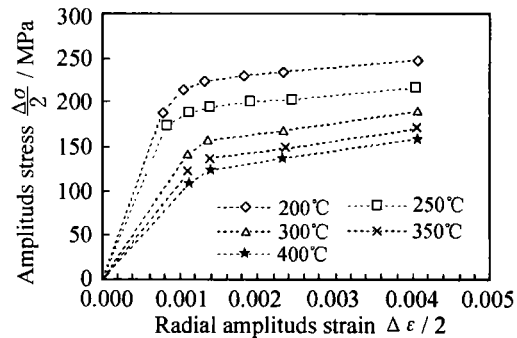


图 5 不同温度下的 Δσ/2-Δεd/2 实验关系

Fig. 5 Experimental relationships of Δσ/2-Δεd/2

4.2 循环硬(软)化特性

图 6 给出了单拉与循环加载时的真应力-真应变试验关系曲线。由图可见,在常温下,Zr-4 合金在应变幅低于 80×10^{-4} 表现为循环软化,而高于 80×10^{-4} 则表现为循环硬化;400℃ 高温条件下,该合金表现出些微循环硬化。此外,常温的应力-应变曲线远高于 400℃ 高温的应力-应变曲线,常温时的循环

强度比 400℃ 高温时的循环强度高出两倍左右,说明温度对于 Zr-4 合金的承载能力影响严重。

4.3 温度对于静强度和循环强度的影响

在高温条件下,一般材料较常温变软,其弹性模量 E、屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ 相对常温结果必然减少,减少程度因材料和温度不同而异。按照温度影响因子的定义方法,可以得到 Zr-4 合金 E 和 $\sigma_{p0.2}$ 的温度影响

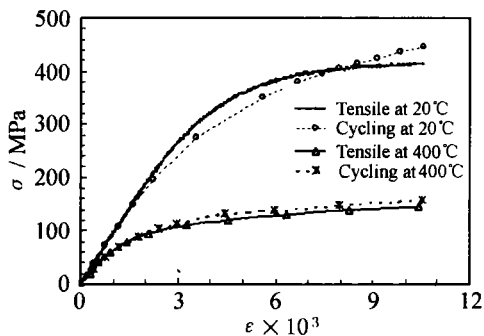


图 6 两种温度下的循环特性
Fig.6 $\epsilon - \sigma$ and $\Delta\epsilon/2 - \Delta\sigma/2$ at 20°C and 400°C

因子分别为 0.77 和 0.33。可见,温度对该 Zr-4 合金的常规强度特性影响非常严重,尤其是对屈服强度 $\sigma_{p0.2}$ 的影响,屈服强度下降到常温的 1/3 左右。

根据定义式(6,7)以及常温和高温相应的单调与循环 R-O 模型,通过迭代计算,可得如图 7 所示的 $\lambda - \epsilon$ 和 $\lambda - \Delta\epsilon/2$ 变化规律。由图 7 可见,随应变幅的增加,400°C 对于 Zr-4 合金的循环强度影响趋势与对于静强度的影响趋势是一致的,都经历了先急剧下降而后有缓慢上升至平稳的过程,这说明随着变形的增加,400°C 高温对于静强度和循环强度的影响首先急剧劣化至一定程度然后又慢慢有所缓和;另外,从图 7 可以看出,在小应变范围内温度对于静强度的劣化程度比对循环强度的劣化程度严重,但随着应变幅的增长,曲线 $\lambda - \epsilon$ 和 $\lambda - \Delta\epsilon/2$ 趋于平缓、重合,此时 400°C 对两种强度的劣化程度接近,使得两种强度降低约 40% 左右。因此,温度对静强度和循环强度的劣化影响均较突出。

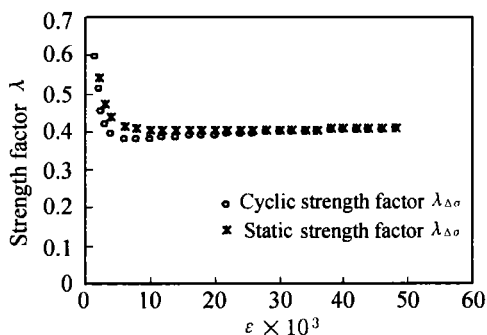


图 7 $\epsilon - \lambda_{\sigma}$ 与 $\Delta\epsilon/2 - \lambda_{\Delta\sigma}$ 关系曲线
Fig.7 Curves of $\epsilon - \lambda_{\sigma}$ and $\Delta\epsilon/2 - \lambda_{\Delta\sigma}$

5 温度对于材料寿命的影响

根据定义式(8)以及室温与 400°C 下的 M-C 模型回归结果,通过迭代计算得到图 8 所示 Zr-4 合金的 $\lambda_{N_f} - \Delta\epsilon/2$ 变化规律。图 8 揭示了一个重要规

律,即:该锆合金的 $\lambda_{N_f} - \Delta\epsilon/2$ 曲线表现为线性规律,线性相关系数超过 0.99。蔡力勋等^[1]曾对 T42NG、T225NG 钛合金和 18Cr2NiWA 等幂率材料的 $\lambda_{N_f} - \Delta\epsilon/2$ 特性的研究表明三种材料均符合线性规律,因而寿命影响因子与应变幅之间的线性规律对包括锆合金的幂率材料具有普适意义。从图 8 中还可以看出,Zr-4 合金的寿命受温度影响比较严重,尤其是在应变幅比较小的时候,疲劳寿命相差超过一个数量级,在应变幅比较大时,这种影响程度随之减小。

6 λ -M-C 模型及其应用方法

鉴于 λ_{N_f} 具有图 8 所示的线形规律,对于幂率材料,高温下的等幅低周疲劳寿命估算可以采用如下简化模型:

$$\begin{cases} \Delta\epsilon/2 = \frac{\sigma_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c & (\text{Room temperature}) \\ N_{mT} = \lambda_{N_f} N_{mRT} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\lambda_{N_f} = C_1 \Delta\epsilon/2 + C_2$, 对于 Zr-4 合金,由图 8 可以得到, $C_1 = 82.456$, $C_2 = -0.1454$ 。鉴于上式是在 M-C 模型基础上考虑温度效应修正得到,故可称为 λ -M-C 模型。

采用 λ -M-C 模型具有以下意义:(1)该模型与常温和高温下的两个独立的 M-C 模型等效;(2)新模型中不包含高温弹性模量和相应高温 M-C 模型的 $\sigma_f, \epsilon_f, b, c$ 等参量,对于高温情况,只需要求出 λ_{N_f} 即可,而 λ_{N_f} 与应变幅之间的线性关系简化了试验难度。(3)鉴于常温疲劳实验比较容易而且精度较高,并考虑到高温试验难度较大,因此采用 λ -M-C 模型的重要意义还在于简化试验,提高精度。

λ -M-C 模型具体使用方法是:首先完成易于实现、精度较高的常温低周疲劳试验,得到常温 M-C 模型;其次,只需要选择两个高应变幅(高应变寿命较低,试验时间短,而且受温度波动影响小),如取为 0.6% 和 0.9%,在这两个应变幅下完成 1~2 个试样的疲劳寿命实验,将试验寿命记为 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,然后通过影响因子的定义求出 λ_{N_f} ;最后,将数据 $\{\Delta\epsilon/2, \lambda_{N_f}\}$ 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,减少锆合金材料并减少试验费用,避免长时间高温试验温度设备可能引起的温度波动,并可以大大减轻试验和数据处理工作量。

需要注意的是, λ -M-C 模型的使用寿命预测范围是 102 ~ 105, 因此, $\lambda_{N_f} - \Delta \varepsilon / 2$ 线性关系中应变幅 $\Delta \varepsilon / 2$ 取值必然存在下限。因此, 图 8 中的拟合直线将不可能与应变幅轴线相交。

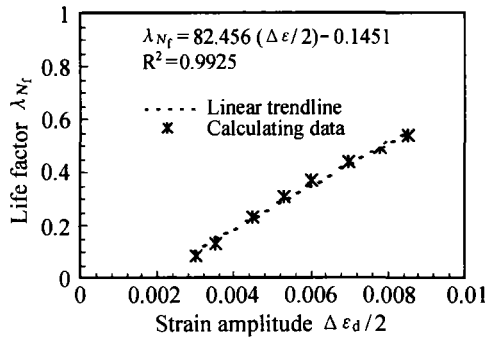


图 8 $\lambda_{N_f} - \Delta \varepsilon / 2$ 关系曲线

Fig. 8 Curves of $\lambda_{N_f} - \Delta \varepsilon / 2$

7 结论

(1) 常温条件下, Zr-4 合金在较低应变幅下表现为循环软化, 在高应变幅下表现为循环硬化, 400℃ 高温条件下表现为循环硬化, 硬化程度轻微;

(2) 400℃ 的单调和循环性能较常温均大大降低, 温度对于其力学性能影响严重;

(3) 在恒定应变幅下, 温度对于幅值应力的影响呈现幂函数规律, 随温度升高, 幅值应力下降, 在 200 ~ 300℃ 之间下降最快;

(4) 当应变幅由高至低变化时, 400℃ 高温导致材料寿命降低, 降低程度随应变幅的变化呈线形规律, 应变幅越小, 寿命降低的程度越显著;

(5) 基于文献[1]基础上的 λ -M-C 模型更具合理性, 可用于各种金属材料的高温寿命估算;

(6) 建立新 λ -M-C 模型所需高温试样比传统方法大为减少, 并可以大大缩短高温疲劳试验时间和提高试验精度。

参考文献:

- [1] 蔡力勋, 罗海峰, 孙亚芳, 等. 高温对核电工程材料低循环行为的影响研究[J]. 材料工程, 2001(5): 15-19.
- [2] 范宣华. 考虑温度效应的 Zr-4 合金低周疲劳行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [3] GB/T 15248-94, 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法[S].

Effects of the elevated temperatures on the low cycle behavior of zircaloy-4

CAI Li-xun¹, FAN Xuan-hua², LI Cong³, QIU Shao-yu³

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Institute of Structure Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 62190, China; 3. National Key Laboratory for Nuclear Fuel and Material, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610031, China)

Abstract: A series of tests of bugle-flat specimens on the LCF (Low Cycle Fatigue) behavior of Zircaloy-4 at room and 400℃ were investigated. Manson-Coffin (M-C) life estimation models and Ramberg-Osgood (R-O) monotonic constitutive models at room and 400℃ temperatures are given respectively. Systematical investigations about the influences of the elevated temperature on monotonic tensional intensity, cyclic intensity and fatigue life of Zircaloy-4 were performed by three temperature factors of the alloy related to the elevated temperature. According to acknowledge that it exists a linearity relationship between life temperature factor and strain amplitude, a modified M-C model for predicting the fatigue life at elevated temperature was proposed. In addition, the temperature effects of Zircaloy-4 on stress amplitude at 200 ~ 400℃ were discussed.

Key words: low cycle fatigue; fatigue behavior; zircaloy-4; life estimation; elevated temperature