

锆-4 合金的时间相关低周疲劳^①

肖 林

(西安交通大学工程力学研究所, 西安 710049)

顾海澄

(西安交通大学金属材料强度所, 西安 710049)

摘 要 研究了锆-4 合金在不同应变速率下的低周疲劳和带应变保持时间相关低周疲劳行为。结果表明: 在不同加载方式下, 锆-4 合金均表现为循环硬化, 应变保持和应变速率降低均进一步提高循环饱和应力。应变保持降低材料的疲劳寿命, 特别是在高应变幅区域。随着应变速率降低, 材料疲劳寿命降低。疲劳变形亚结构观察表明: 锆-4 合金时间相关疲劳过程中以 {10 $\bar{1}$ 0} 柱面滑移和晶界滑移方式变形。

关键词 锆合金 时间相关疲劳 循环硬化 寿命预测

原子能反应堆在运行过程中, 锆合金燃料元件包壳经常承受蠕变-疲劳交互作用^[1], 即反应堆启动-停止操作或功率波动时, 一般使包壳承受循环塑性变形的低周疲劳损伤; 而运行过程中无功率变化时, 由于持续峰值载荷(或最大应变)的作用, 使材料产生稳态变形而引起蠕变损伤。这种损伤又称为时间相关低周疲劳^[2], 它受频率、保持时间、平均应力、环境介质等因素影响。本文着重研究锆-4 合金在蠕变-疲劳交互作用下的低周疲劳行为, 分析加载速率、峰值应变保持等对材料高温疲劳性能的影响。

1 材料及试验方法

试验选用西北有色金属加工厂提供的直径为 12 mm 旋锻后的原子能级锆-4 合金棒材, 其化学成分如表 1 所示。所有棒材均在 10⁻³ Pa 真空度下经 620 ℃, 1 h 再结晶退火处理后, 加工成标距为 d 5 mm×10 mm 的疲劳试样。时间相关疲劳试验在带有辐射式电阻炉加热的电液伺服 Mayes 试验机上进行。试验过程中保持

温度在 400±3 ℃, 选用图 1 所示的三种加载波形。通过在 X-Y 函数记录仪上周期性绘制滞后环, 记录疲劳过程载荷-变形之间的关系。循环变形断裂后, 垂直于轴向切取透射电镜薄膜试样, 经机械、化学减薄以后, 在 JEM-200 CX 透射电镜上观察。

表 1 锆-4 合金化学成分(%)

Sn	Fe	Cr	Al	Ti
1.4	0.23	0.1	<0.001 4	<0.001 4
Co	Mn	Mg	Pb	W
<0.001 4	<0.001 4	<0.001 4	<0.001 4	<0.001
Mo	Cu	Si	Cl	V
<0.002	<0.002	<0.005	<0.002	<0.001 4
Nb	Hf	B	C	N
<0.01	<0.01	0.000 05	<0.01	0.003
H	O			
0.001	0.09			

其中 Sn、Fe、Cr、O 为合金元素, 其余为杂质元素。

I: 常规三角形波加载并且保持应变速率 $\dot{\epsilon}=4\times10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 应变比 $R=-1$ 。

II: 带应变保持的疲劳加载, 疲劳过程中保持 $\dot{\epsilon}=3\times10^{-3}\text{ s}^{-1}$, 但每周次循环峰值拉伸

① 国家教委博士点和博士后科学基金资助项目 收稿日期: 1994-06-27; 修回日期: 1994-09-15

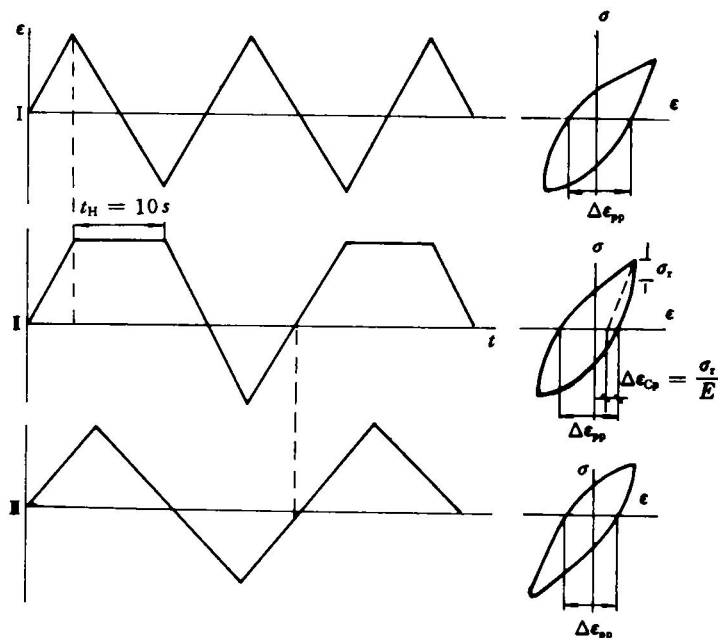


图1 疲劳试验加载波形

应变保持 $t_H = 10\text{ s}$ 。

Ⅲ：加载方式同Ⅰ，但应变速率降低，并保持不同循环应变幅下Ⅰ、Ⅲ两种加载方式下的试验频率相同，这样循环应变幅越低，相应的Ⅲ式加载速率越低。

不同加载方式下应力-应变曲线和非弹性应变范围划分法如图1所示。

2 实验结果

2.1 锆-4合金的单调和循环应力-应变曲线

锆-4合金400℃时不同加载方式下单调和循环应力-应变曲线如图2所示，可见循环应力-应变曲线均位于单调应力-应变曲线上方，表现为循环硬化。进一步分析还发现，带应变保持疲劳加载时的循环应力-应变曲线又位于常规疲劳曲线上方，就是说相同循环应变幅下，峰值拉伸应变保持提高了锆-4合金的循环饱和应力。随着循环应变速率的降低，相应的饱和应力则升高，而且循环应变幅越低，相同应变幅下Ⅰ、Ⅲ两种加载方式下，应变速率相差越大，对应的循环饱和应力差值越大；高应

变幅时，应变速率相近，相应的应力-应变曲线则趋于一致。

2.2 疲劳寿命曲线

锆-4合金在不同加载方式下的疲劳寿命 ($\Delta\epsilon_f - N_f$) 曲线如图3所示，可见常规三角形波加载时，低循环应变速率(Ⅲ式加载)时锆-4合金的疲劳寿命比高应变速率(Ⅰ式加载)时低。按Ⅲ式加载时，应变幅越小，相应的应变速率越低，相同循环应变幅下Ⅲ与Ⅰ式加载时疲劳寿

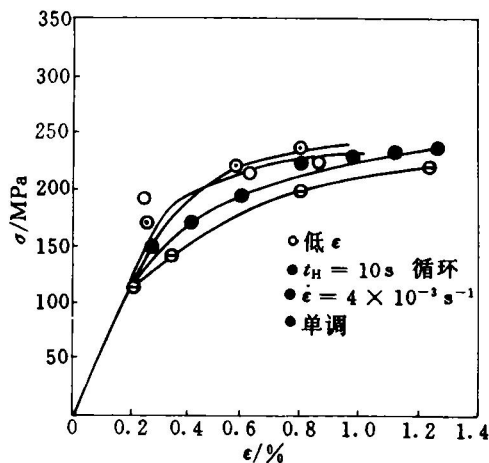


图2 锆-4循环应力-应变曲线

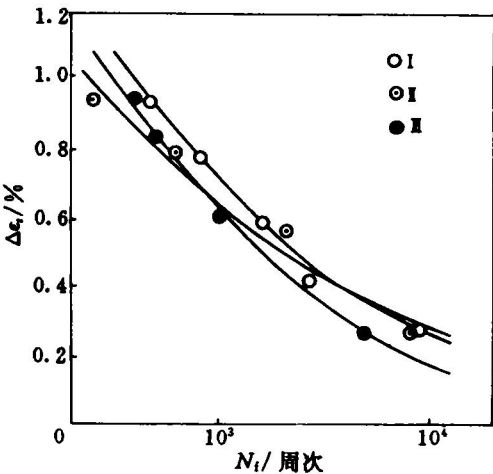


图 3 锆-4 疲劳寿命曲线

命相差越大。这就说明循环应变速率越小，相应的疲劳寿命越低。显然，这是因为锆-4 合金在高温低周疲劳过程中，应变速率降低，蠕变作用加强，引起疲劳寿命降低。峰值拉伸应变保持对锆-4 合金高温低周疲劳寿命的影响与循环应变幅的大小有关，随着应变幅从小到大变化，应变保持(Ⅱ式加载)的疲劳寿命曲线分别与 I、Ⅲ加载曲线相交；在高应变幅下，峰值拉伸应变保持明显降低锆-4 合金的疲劳寿命，随着应变幅降低，其影响逐渐减弱，当应变幅小于 0.7% 以后，应变保持降低疲劳寿命还不如应变速率降低的影响明显。低应变幅时，应变保持对材料寿命几乎没有影响，而应变速率降低的影响则比较明显。所以，当峰值

拉伸应变保持时间($t_H = 10\text{s}$)一定时，循环应变幅值越大，应变保持降低疲劳寿命的影响越明显。

2.3 锆-4 合金的时间相关疲劳寿命估算

本文分别采用应变范围区分法(SRP)^[3]和应变能区分法(SEP)^[2]估算锆-4 合金 400℃下与时间相关低周疲劳寿命，结果如表 2 所示。可见两种疲劳寿命估算方法均获得了较满意的结果。也可以认为这两种方法在本实验范围内均能应用，但如果要外推到更长时间和其它试验环境下，则预测的置信度将会大为降低。

2.4 时间相关疲劳变形机理

为了研究锆-4 合金时间相关疲劳变形机理，本文还采用透射电镜分别观察了常规疲劳加载和带应变保持疲劳加载以后的变形亚结构。400℃疲劳断裂后典型的位错亚结构如图 4 所示，主要是一些拉长的胞状亚结构，迹线分析表明，这些位错胞优先沿着 $\{10\bar{1}0\}$ 柱面迹线方向分布^[4]。胞内还可观察到一些垂直于胞界分布的位错偶，如图 4(b)所示，电子衍射分析可知这些位错线是由锥面滑移产生的。就是说锆-4 合金在 400℃疲劳过程中主要是柱面和锥面滑移。在时间相关疲劳试样内部， $\{10\bar{1}0\}$ 柱面滑移同样是最主要的变形方式，如图 5(a)所示，典型的位错组态也是拉长的位错胞。试样内部还经常观察到晶界滑移特征，如图 5(b)。显然这一结果意味着时间相关疲劳过程中产生了蠕变变形。与单纯疲劳过程相比，试样内部很少观察到锥面滑移。就是说锆-4 合金

表 2 锆-4 合金时间相关疲劳寿命估算结果

加载方式	预测模型	预测结果	相关系数	标准方差
I	SRP	$N_{pp} = 342.5 \Delta\epsilon_{pp}^{-1.454}$	0.996 0	0.079 1
	SEP	$N_{pp} = 227\,508(\sigma_a \Delta\epsilon_{pp})^{-1.188}$	0.995 0	0.108 2
Ⅱ	SRP	$N_{pp} = 294.4 \Delta\epsilon_{pp}^{-1.385}$	0.960 2	0.511 1
		$N_{cp} = 1.42 \times 10^{-7} \Delta\epsilon_{cp}^{-5.471}$	0.920 9	0.713 7
	SEP	$N_{pp} = 218\,625(\sigma_a \Delta\epsilon_{pp})^{-1.2021}$	0.952 7	0.556 3
		$N_{cp} = 104\,306(\sigma_a \Delta\epsilon_{cp})^{-3.835}$	0.968 1	0.458 7
Ⅲ	SRP	$N_{pp} = 345.9(\Delta\epsilon_{pp})^{-1.262}$	0.994 2	0.144 5
	SEP	$N_{pp} = 186\,508(\sigma_a \Delta\epsilon_{pp})^{-1.161}$	0.995 6	0.125 0

注：其中 pp 表示拉-压对称连续循环，cp 表示拉伸保持、压缩不保持连续循环。

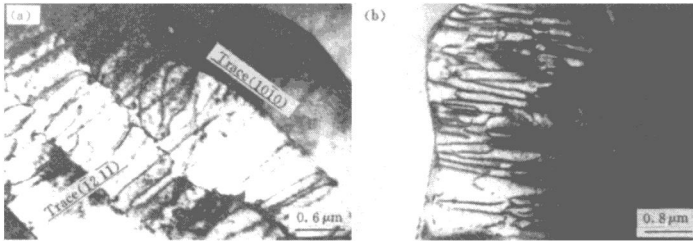


图 4 钛-4 合金 400 °C 低周疲劳亚结构
(a)—位错胞；(b)—胞内位错偶

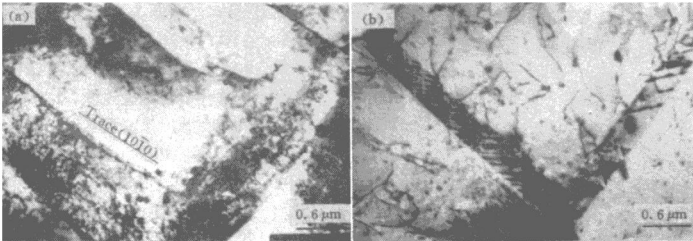


图 5 钛-4 合金 400 °C 时间相关疲劳亚结构
(a)—位错胞；(b)—晶界滑移

在 400 °C 下时间相关疲劳变形过程中，则是以柱面滑移和晶界滑移方式进行。由滑移产生的循环相关塑性变形分量比常规疲劳减少；而和时间相关的蠕变塑性变形分量增加。

3 讨论

从高温构件的实际服役条件来看，它们大多数承受蠕变与疲劳复合载荷。在蠕变-疲劳交互作用下，总变形是由时间无关的瞬时弹性、塑性变形和时间相关的蠕变变形所组成。瞬时弹性、塑性变形与最大应力有关，而蠕变变形与最大、最小应力都有关系。高温下材料的疲劳寿命主要取决于循环变形过程中非

弹性应变分量的累积损伤，即与循环相关的疲劳塑性累积损伤 $\Delta E_p = \sum \Delta \epsilon_{pp}$ ，和与时间相关的蠕变塑性累积损伤 $\Delta E_c = \sum \Delta \epsilon_c$ 。而试样累积疲劳塑性变形引起的损伤程度和累积蠕变塑性变形造成的损伤程度，则取决于试验温度、频率和保持时间等等。

材料蠕变-疲劳交互作用过程中，峰值拉伸应变保持产生的松弛应变分量 $\Delta \epsilon_r$ 与松弛应力 (σ_r) 之间的关系可表示成

$$\Delta \epsilon_r = \frac{\Delta \sigma_r}{E} \tag{1}$$

而松弛应力分量 (σ_r) 与初始应力 ($\Delta \sigma_i$) 之间可以认为有简单的线性关系^[5]：

$$\Delta \sigma_r \propto \Delta \sigma_i \tag{2}$$

$\Delta\sigma_i$ 对应每周次循环的峰值拉伸应力, 它与循环应变幅的关系可用幂函数来表示, 即

$$\Delta\sigma_i = k(\Delta\epsilon_p)^n \quad (3)$$

式中 n 为循环应变硬化指数, 联合(1)、(2)、(3)式得:

$$\Delta\epsilon_c = C\Delta\epsilon_p^m \quad (4)$$

式中 C 为与材料本身性能有关的常数, (4)式结果表明材料每周次循环拉伸应变保持产生的蠕变损伤变量($\Delta\epsilon_c$)与循环应变幅大小有关, 应变幅 $\Delta\epsilon_p$ 越大, 蠕变应变分量越大, 因而由于应变保持引起的材料蠕变损伤程度 $\Delta E_c = \sum \Delta\epsilon_c$ 相应加剧, 疲劳寿命降低明显。因而铅-4 合金 400 °C 疲劳寿命曲线上则表现为峰值拉伸应变保持在高循环应变幅范围内明显降低材料的疲劳寿命, 在低循环应变幅范围内这种作用不太明显。另外应变保持对疲劳寿命的影响还与试验频率有关, 试验频率越高, 应变保持的影响越明显。同样, 保持时间较长时, 频率的影响就减弱。

4 结论

(1) 铅-4 合金 400 °C 下循环应力-应变曲线测试结果表明, 高温低周疲劳过程中, 峰值拉伸应变保持将会提高相同循环应变幅下材料的循环饱和应力; 应变速率降低, 循环饱和应力也有所提高。

(2) 降低应变速率将明显降低铅-4 合金 400 °C 下的疲劳寿命。而峰值拉伸应变保持对寿命的影响则和循环应变幅大小有关。高应变幅范围内, 应变保持明显降低材料的寿命, 随着应变幅减小, 其影响逐渐减弱。

(3) 分别采用应变范围区分法和应变能区分法估算了铅-4 合金 400 °C 下常规疲劳和时间相关疲劳寿命。

(4) 铅-4 合金疲劳亚结构观察表明, 时间相关疲劳后的位错组态与常规疲劳类似, 均为拉长的位错胞, 但时间相关疲劳后出现了晶界滑移特征而未观察到常规疲劳后的锥面滑移。就是说, 时间相关疲劳过程中由于蠕变产生的时间相关塑性变形增加, 而与循环相关的疲劳塑性变形略有减小。迹线分析表明, 400 °C 下铅-4 合金时间相关低周疲劳过程中以 $\{10\bar{1}0\}$ 柱面滑移为主。

参考文献

- 1 Jaske C E, Mindlin H, Perrin J S. In: Fatigue at Elevated Temperature ASTM STP 520, 1973: 365.
- 2 何晋瑞. 金属高温疲劳. 北京: 科学出版社, 1988.
- 3 Manson S S. NASA TMS-67838, 1971.
- 4 Xiao Lin, Gu Haicheng. Scripta Metall, 1994, 30(2): 175.
- 5 奥金格 NA 等(著), 曹用涛等(译). 金属持久强度理论. 北京: 中国工业出版社, 1966.