

锆合金薄壁细管的单调拉伸与 低周疲劳试验研究

贾琦¹, 蔡力勋¹, 包陈¹, 成亚辉²

(1. 西南交通大学 力学与工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西北锆管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721014)

摘要:利用自行研制的高温夹具完成了 Zr-1Nb 合金和 Zr-4 合金薄壁短管试样不同温度下的单调拉伸和 375 °C 下的等幅低周疲劳试验, 获得了两种锆合金的单调和循环本构关系及 Manson-Coffin 寿命估算模型。研究表明: Zr-1Nb 合金和 Zr-4 合金的弹性模量、屈服强度、抗拉强度以及应变硬化程度明显下降。随着温度的升高, 温度对 Zr-4 合金的应变硬化程度的影响逐渐减弱; 应变速率对 Zr-4 合金的拉伸性能的影响微弱。在等幅应变循环过程中, Zr-4 合金表现为循环硬化, 应变幅越低, 硬化现象越明显; Zr-1Nb 在较低应变幅下表现为循环硬化特性, 而在较高应变幅下表现为循环软化。相对于单调拉伸行为, Zr-4 合金在不同温度下的循环行为均表现出明显的强化特性。

关键词: Zr-1Nb 合金; Zr-4 合金; 低周疲劳; 薄壁管; 寿命估算

中图分类号: O368

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)06-0712-06

Uniaxial Tension and Low Cycle Fatigue Behavior of Thin-Walled Tubes for Zr-1Nb and Zr-4

JIA Qi¹, CAI Li-xun¹, BAO Chen¹, CHENG Ya-hui²

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Northwest Zircocladding Co., Ltd., Baoji 721014, China)

Abstract: By using a set of self-invented clamps and thin-walled tubular specimens with small diameter, a series of monotonic tension tests at different temperatures and low cycle fatigue tests at 375 °C for Zr-4 and Zr-1Nb alloys were carried out, then monotonic and cyclic constitutive relationships and Manson-Coffin life-estimating expressions for two alloys were given. The results show that the Young's modulus, yield stress, tensile strength, and strain hardening decrease significantly with increasing temperature, however, the higher temperature is, the less effect of temperature on the strain hardening for Zr-4 is. The uniaxial properties of Zr-4 were hardly affected by the strain rate at 375 °C. Under constant strain amplitude cycling, Zr-4 presents cyclic hardening especially at lower strain amplitude. Zr-1Nb shows cyclic hardening at lower strain ampli-

tude, however it exhibits cyclic soften at higher strain amplitude. Comparing to the monotonic tension behavior, Zr-4 presents cyclic strain hardening evidently at different temperatures.

Key words: Zr-1Nb alloy; Zr-4 alloy; low cycle fatigue; thin-walled tube; life estimation

锆合金是核燃料包壳的重要材料,该合金在服役条件下,由于反应堆功率的波动、裂变气体的压力及水冷却介质的压力等使管内、外承受交变应力和高温作用,从而产生周期性塑性变形。因此,锆合金包壳管的疲劳行为研究对核安全防护至关重要。到目前为止,有关锆合金薄壁管的高温低周疲劳行为研究较少^[1-5]。本工作作用自行研制的高温二次夹具,在不同温度下对 Zr-1Nb 合金以及 Zr-4 合金短管试样开展单轴和循环变形行为研究。

1 试验

1.1 试验材料与试样

试验材料为 Zr-4 合金和 Zr-1Nb 合金。其中, Zr-4 化学成分(质量分数,%)为: Sn, 1.2 ~ 1.5; Fe, 0.18 ~ 0.24; Cr, 0.07 ~ 0.13; O, 0.09 ~ 0.15; Zr, 余量。Zr-1Nb 合金的化学成分(质量分数,%)为: Nb, 1.0; O, 0.12; Fe, 0.05; Zr, 余量。

试样为等直薄壁短管,两种合金试样的外径均小于 10 mm,壁厚均小于 0.6 mm。

1.2 试验设备与试验夹具

试验设备为美国 MTS809(25 kN)电液伺服材料试验机,其控制系统为 TestStar II,应用软件为 TestWare/SX 和 MTS79020。采用高温引伸计 MTS632.54F-14(标距 12 mm,轴向测量范围 -10% ~ 20%)测量试样的轴向应变。试验机载荷传感器和应变引伸计精度为 0.5 级。高温控制系统为高温大气电阻炉与温度控制系统,高温炉膛高度为 200 mm,炉膛中心均温区长度为 50 mm。试验时,将两条热电偶点焊安装在试样中部两侧,试样中部标距范围内的最大温度梯度为 1 °C,温度控制精度为 ±1 °C。通过计算机对试验过程进行闭环控制和实时数据采集。高温试验时,试样加载前温度升至规定温度后保温 10 min,然后将应变引伸计信号进行初始化调零以消除温度应变。

试验中使用自行研制的高温二次夹具以实

现 Zr-4 合金和 Zr-1Nb 合金薄壁短管试样在高温环境下的紧密夹持(图 1),成功实现了高温低周疲劳应变控制和拉伸致断。图 2 示出 Zr-4 薄壁管试样经应变疲劳后的断裂情况,所有试样的疲劳裂纹均出现在中部,在较大应变幅下试样中部出现宏观裂纹并较快扩展导致试样断为两截,Zr-1Nb 试样的应变疲劳破坏情况也相同。

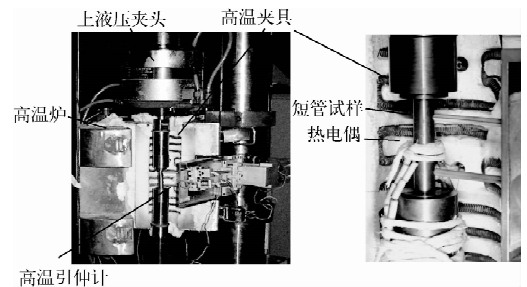


图 1 高温试验装置

Fig. 1 High temperature test device



图 2 Zr-4 试样疲劳断裂情况

Fig. 2 Fatigue fracture position of Zr-4

1.3 试验条件

在 375 °C 下完成了两种材料的等幅低周疲劳试验,试验采用轴向应变控制^[6],加载波形为三角波,应变速率均为 0.6%/s,各试样均在单

应变幅下循环至破坏。在 20 和 375 °C 下完成了 Zr-1Nb 合金的单调拉伸试验。分别在 20、175、275 和 375 °C 下对 Zr-4 合金试样进行了恒速率(0.01 mm/s)单调拉伸和多级应变循环试验,其中,多级应变循环的应变速率为 0.45%/s,每级循环50周。另外,还在 375 °C 下完成了 Zr-4 合金的低速率(0.000 5 mm/s)拉伸试验。

2 试验结果与分析

2.1 拉伸力学性能

图 3 示出 Zr-1Nb 和 Zr-4 合金在不同温度下单调拉伸真应力-真应变试验曲线。由图 3 可见,Zr-1Nb 合金和 Zr-4 合金的真应力-真应变曲线呈良好的幂律关系,故可用 Ramberg-Osgood(R-O)模型描述其本构关系。R-O 模型的表达式为:

$$\varepsilon/\varepsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + \alpha(\sigma/\sigma_0)^n \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$; $\sigma_0 = (\sigma_{0.2} + \sigma_b)/2$; $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度; σ_b 为抗拉强度。

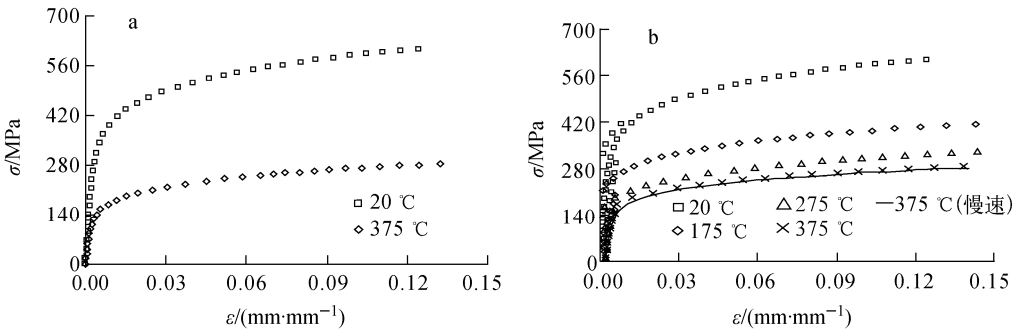


图 3 Zr-1Nb 合金(a)与 Zr-4 合金(b)的拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of Zr-1Nb (a) and Zr-4 (b) alloys

表 1 两种锆合金单轴力学性能及 R-O 模型参数

Table 1 Uniaxial tensile properties of zircalloys

材料	温度/°C	E/GPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	R-O 模型参数			
					σ_0 /MPa	$\varepsilon_0/(mm \cdot mm^{-1})$	α	n
Zr-1Nb	20	92.5	341	662	501	0.005 418	5.667	7.148
	375	77.0	145	312	228	0.002 972	9.968	5.731
Zr-4	20	100.3	378	658	518	0.005 163	6.608	8.155
	175	84.7	239	450	345	0.004 069	7.254	6.719
	275	82.1	176	372	274	0.003 335	9.870	5.925
	375	75.7	151	325	238	0.003 143	9.614	6.061
	375(慢速)	75.6	150	318	234	0.003 997	7.989	6.242

表 1 列出不同温度下两种锆合金的 R-O 本构模型参数,并给出了弹性模量 E 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 和抗拉强度 σ_b 等力学性能参数。结果表明,Zr-1Nb 和 Zr-4 合金的拉伸性能温度效应均较为显著,随着温度的升高,屈服强度、抗拉强度以及应变硬化程度明显下降;随着温度的升高,温度对 Zr-4 合金的应变硬化程度的影响逐渐减弱;应变速率对 Zr-4 合金的拉伸性能的影响微弱。

为研究温度对材料静强度的影响,定义静强度温度影响系数^[7]如下:

$$\lambda_\sigma = \sigma_{HT}/\sigma_{RT} \quad (2)$$

式中:RT 表示室温;HT 表示高温。

图 4 示出 Zr-1Nb 和 Zr-4 合金的 λ_σ - ε_p 变化规律。从图 4 不难看出,在塑性变形初期,Zr-1Nb 和 Zr-4 合金受温度的影响程度急剧减小,之后,随着塑性变形的增大,其温度的影响逐渐趋于平缓。对于 Zr-4 合金,温度越高,其对静强度的影响越显著。

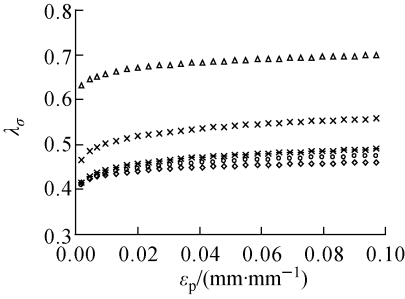


图4 锆合金的 λ_σ - ϵ_p 规律

Fig. 4 λ_σ - ϵ_p curves of Zr alloys

△——Zr-4, 175 °C; ×——Zr-4, 275 °C; *——Zr-4, 375 °C;
○——Zr-4, 375 °C (慢速); ◇——Zr-1Nb, 375 °C

2.2 低周疲劳行为

1) 疲劳滞回环的稳定性与对称性

图5示出两种锆合金不同应变幅下的等幅疲劳半寿命应力应变滞回环。各滞回环均表现出良好的加载对称性和曲线光滑性,说明自研制管试样二次高温夹具具有良好的循环试验夹持性能,也表明两种锆合金细管在成型过程中未产生显著影响应变疲劳滞回环对称性的轴向残余塑性。

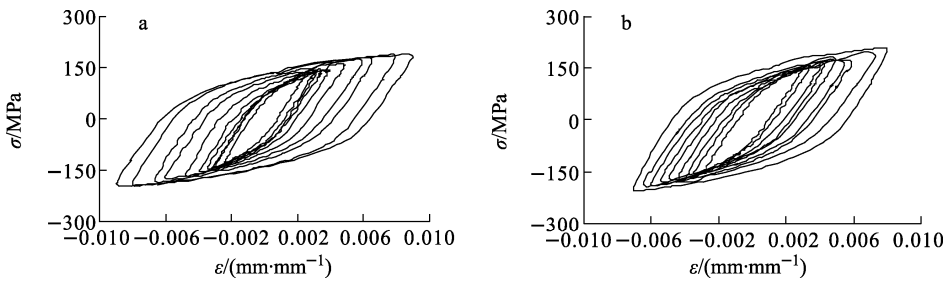


图5 Zr-1Nb(a)和Zr-4(b)等幅疲劳半寿命的滞回环线

Fig. 5 Cyclic stress-strain curves of Zr-1Nb (a) and Zr-4 (b)

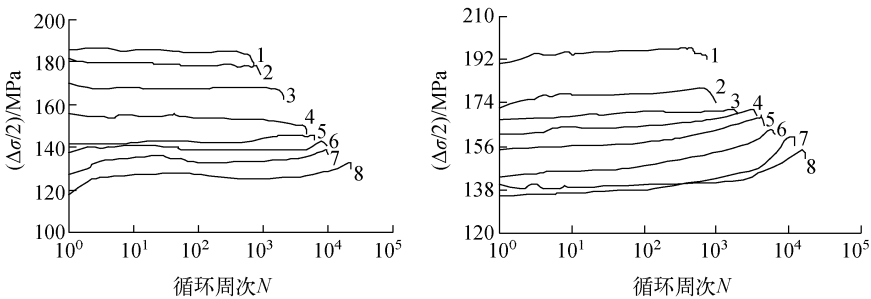


图6 Zr-1Nb(a)和Zr-4(b)疲劳试样 N - $\Delta\sigma/2$ 关系

Fig. 6 N - $\Delta\sigma/2$ curves of Zr-1Nb (a) and Zr-4 (b)

$\Delta\epsilon/2$ (mm/mm), a: 1——0.009, 2——0.007, 3——0.006, 4——0.005, 5——0.004, 6——0.003 5, 7——0.003, 8——0.002 5;
b: 1——0.008, 2——0.007, 3——0.006, 4——0.005, 5——0.004 5, 6——0.004, 7——0.003 5, 8——0.003

2) 材料在循环历程中的强化与软化

图6示出Zr-1Nb和Zr-4合金在375 °C下不同加载应变幅时的应力幅随循环次数的演化曲线。可见,当Zr-1Nb合金等幅应变不大于0.004, Zr-4合金应变幅不超过0.007时,随循环次数的增加,应力幅逐渐增加,试样产生了循环强化,应变幅越低,强化程度越高;当应变幅较高时,强化效应不显著。

3) 循环本构关系

根据稳定阶段的应力应变幅数据进行双对数线性回归,与单调R-O模型类似,可得如下循环本构关系:

$$\Delta\epsilon/2 = \frac{\Delta\sigma/2}{E} + \alpha_1 \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \right)^{\alpha_1} \quad (3)$$

为便于研究,等幅疲劳半寿命的循环本构关系也用上式表示,用半寿命($\Delta\epsilon/2, \Delta\sigma/2$)数据进行同样的回归分析即可得到上式的参数。一般情况下,多级应变循环本构关系和等幅疲劳半寿命循环本构关系差别不大,只有疲劳试验应力幅在半寿命区未出现平稳段时,略有差别。

375 °C下 Zr-1Nb 合金和各温度下 Zr-4 合金的疲劳半寿命循环本构参数列于表 2。375 °C下, Zr-4 合金较 Zr-1Nb 疲劳半寿命处的强度大, 应变幅越低差别越大, 而高应变幅差别不大, 再次证明了前述两种炉批的 Zr-1Nb 和 Zr-4 合金的循环强化和软化特性。

表 2 两种锆合金的循环本构关系参数

Table 2 Parameters of cyclic constitutive relationships

锆合金	温度/°C	循环本构模型参数	
		α_1	n_1
Zr-1Nb	375	4.69×10^{-15}	5.36
Zr-4	20	6.99×10^{-31}	10.67
	175	1.11×10^{-28}	10.58
	275	1.27×10^{-18}	6.67
	375	5.04×10^{-21}	7.97

图 7 示出 Zr-4 合金有循环历史效应的循环应力幅 $\Delta\sigma/2$ 与应变幅 $\Delta\varepsilon/2$ 试验关系曲线, 图中一并示出 Zr-4 合金的单调拉伸应力-应变曲线。由图 7 可看出, 循环应力-应变曲线所对应的应力幅值总比单轴拉伸曲线对应的应力值高, 因此, 相对于单调拉伸行为, Zr-4 合金在不同温度下的循环行为均表现出明显的强化特性。

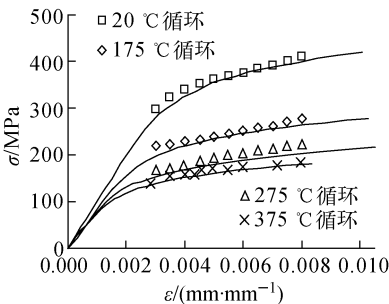


图 7 Zr-4 合金本构曲线

Fig. 7 Constitutive curves of Zr-4

4) 两种锆合金管材的应变疲劳寿命估算

两种锆合金的 $\Delta\varepsilon/2-2N_f$ 试验关系示于图 8。可见, Zr-1Nb 及 Zr-4 合金的 $\Delta\varepsilon/2-2N_f$ 试验关系十分接近。用于估算材料等福应变疲劳寿命的 Manson-Coffin (M-C) 模型^[3]为:

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

式中: $\Delta\varepsilon_e$ 为弹性应变幅; $\Delta\varepsilon_p$ 为塑性应变幅; σ'_f 为疲劳强度系数; ε'_f 为疲劳延性系数; b 为疲劳强度指数; c 为疲劳延性指数。

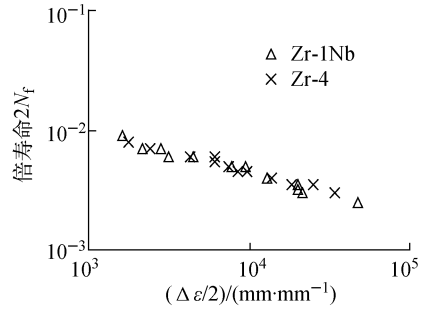


图 8 $\Delta\varepsilon/2-2N_f$ 试验关系

Fig. 8 Experimental relationships of $\Delta\varepsilon/2-2N_f$

两种材料的 M-C 模型参数列于表 3。图 9 示出两种锆合金在 375 °C 下的 M-C 模型的预测结果。图 9 表明, 375 °C 下 Zr-1Nb 和 Zr-4 合金的 M-C 模型预测结果均落在 2 倍安全因子规定的分散带内, 且紧靠精确线, 因而该模型有较好的预测精度, 可用于 Zr-1Nb 和 Zr-4 合金薄壁短管的等幅低周疲劳寿命预测。

表 3 M-C 模型参数

Table 3 Parameters of M-C model for materials

材料	σ'_f /MPa	E /MPa	b	ε'_f	c
Zr-1Nb	420.609	77 891	-0.112 1	0.413 4	-0.565 8
Zr-4	338.665	73 623	-0.079 6	0.419 1	-0.571 4

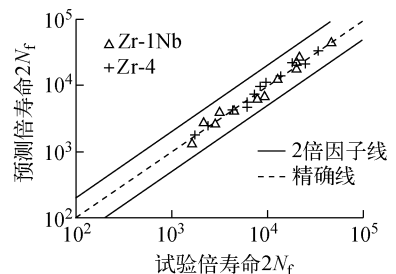


图 9 M-C 模型对锆合金试验的寿命预测

Fig. 9 Life predicting curves using M-C model

3 结论

1) Zr-1Nb 和 Zr-4 合金的拉伸性能受温度的影响显著,随着温度的升高,弹性模量、屈服强度、抗拉强度以及应变硬化程度明显下降。随着温度的升高,温度对 Zr-4 合金的应变硬化程度的影响逐渐减弱;应变速率对 Zr-4 合金的拉伸性能的影响微弱。

2) 在塑性变形初期,Zr-1Nb 合金和 Zr-4 合金受温度的影响程度急剧减小,其后随着塑性变形的增大,其温度的影响逐渐趋于平缓。Zr-1Nb 合金受温度的影响更为敏感。温度越高,其对 Zr-4 合金静强度的影响越显著。

3) 等幅低周疲劳下 Zr-4 合金短薄壁管表现为循环硬化,应变幅越低硬化现象越明显。Zr-1Nb 在较低应变幅下表现为循环硬化特性,而在较高应变幅下表现为循环软化。相对于单调拉伸行为,Zr-4 合金在不同温度下的循环行为均表现出明显的强化特性。

4) 获得了两种锆合金的 M-C 的半寿命估算模型,用于其疲劳寿命预测具有较高的精度。

参考文献:

- [1] 邓爱明,杨红亚,李远睿,等. 钛合金薄壁管构件高温应变疲劳[J]. 北京科技大学学报,2001,23: 71-72.
DENG Aiming, YANG Hongya, LI Yuanrui, et al. Low-cycle fatigue of thin-walled tube of Ti alloy in high temperature environment[J]. Journal

of University of Science and Technology Beijing, 2001, 23: 71-72(in Chinese).

- [2] BOUTROS M K. Cyclic behaviour of partly plastic pinned circular tubes; II. Testing and verification of the model[J]. Thin-Walled Structures, 1999, 33: 69-82.
[3] ARMAS AF, HERENU S, BOLMARO R, et al. Cyclic softening mechanisms of zircaloy-4[J]. J Nucl Mater, 2004, 326: 195-200.
[4] CREPIN J, BRETHERAU T, CALDEMAISON D, et al. Low cycle fatigue behaviour of β treated zirconium[J]. Acta Mater, 2000, 48: 505-516.
[5] 陈洪军,蔡力勋,李聪,等. N18 合金薄壁管高温应变循环与疲劳行为研究[J]. 原子能科学技术, 2007,41(4):438-443.
CHEN Hongjun, CAI Lixun, LI Cong, et al. Study on cyclic behaviour and strain fatigue of N18 alloy thin-walled tubes at elevated temperature[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(4): 438-443(in Chinese).
[6] 中国国家标准局. GB/T 15248—94 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
[7] 蔡力勋,罗海峰,孙亚芳. 高温对核电工程材料低循环行为的影响研究[J]. 材料工程学报, 2001,5:15-19.
CAI Lixun, LUO Haifeng, SUN Yafang. Effects of elevated temperature on low cycle fatigue behavior of nuclear power engineering materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2001, 5: 15-19(in Chinese).