

文章编号: 1004-0609(2003)03-0722-05

管材高温低周疲劳实验方法及数据处理^①

李远睿, 陈琳

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030)

摘 要: 采用径向应变控制法, 在 MTS880/810 试验机上用 $d\ 13\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ 的单相 $\alpha\text{-Ti}$ 合金管材, 在 $(350 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下进行了 5 个不同应变量的高温低周疲劳 (HTLCF) 实验; 记录了各自的循环应力—应变滞后环, 得出了试样的循环响应特征和各试样的高温低周疲劳寿命。对实验数据按 Coffin-Manson 公式拟合出疲劳曲线方程, 从而绘出了该试材的 $\Delta\epsilon-2N_f$ 倍寿命关系曲线。考虑到低周疲劳数据的离散性, 对其中的 $\Delta\epsilon = 1.0\%$ 和 $\Delta\epsilon = 1.5\%$ 两个应变量的各 6 个试验数据按双参数 Weibull 分布进行了统计分析。

关键词: 钛合金; 管材; 高温低周疲劳

中图分类号: TG 113.25

文献标识码: A

金属管材通常是在一定温度和应力下服役的结构材料。因而, 直接考核其高温低周疲劳性能, 拟出它的疲劳曲线, 并对其低周疲劳实验数据进行统计分析, 其结果对管材的抗疲劳设计和工程应用具有重要的意义。本研究探讨了尺寸为 $d\ 13\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ 的 $\alpha\text{-Ti}$ 单相钛合金管材的高温低周疲劳实验及实验数据的处理方法。

1 实验

1.1 实验用材

用含有一定量 Al 和 Zr 的 $d\ 13\ \text{mm} \times 1.5\ \text{mm}$ 规格的退火单相 $\alpha\text{-Ti}$ 合金管材作实验材料(具体成分略), 其室温和 350°C 下的力学性能见表 1。

表 1 实验材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of titanium alloy tube

Temperature/ $^\circ\text{C}$	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$
20	655	505	19
350	350	255	22

1.2 试样

考虑到加热炉高度、两端的夹持长度和露出加热炉两端的距离, 试样总长取 $420\ \text{mm}$, 其工作部分用 $d\ 13\ \text{mm}$ 的刚玉砂轮在万能工具磨床上磨出一弧形槽, 使试样最薄处外径为 $(12.5 \pm 0.05)\ \text{mm}$ (如图 1)。

试样两端约 $100\ \text{mm}$ 长用铣有 3 条互成 120° 角浅沟槽、且插入端部倒有光滑圆角的低碳钢圆柱条堵塞后, 用液压夹头垂直紧密夹持。

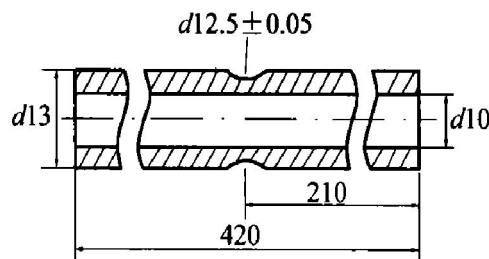


图 1 试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample

1.3 实验设备

实验在 MTS880/810 型试验设备上进行, 主要参数为: 载荷精度 $\pm 0.5\%$; 应变精度 $\leq 0.03\%$; 温度精度 $\pm 1^\circ\text{C}$; 非线性 0.3%; 最大载荷 $500\ \text{kN}$ 。

1.4 实验方法

采用轴向拉—压对称载荷, 以径向应变控制换算成轴向应变的方法, 取 $\Delta\epsilon = 0.5\%, 1\%, 1.5\%, 2.0\%$ 和 2.5% 5 个轴向应变变量进行实验。其中, $\Delta\epsilon = 1.0\%$ 和 1.5% 各作 6 件有效试样, 以对其疲劳寿命数据进行统计分析。实验中其余工作参照 GB/T15248—1994《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》进行。

① 基金项目: 核燃料及材料国家重点实验室基金资助项目(99JS85.6.1, JW2004)

收稿日期: 2002-10-08; 修订日期: 2003-02-10

作者简介: 李远睿(1946-), 男, 副教授。

通讯联系人: 李远睿, 副教授; 电话: 023-65103625

2 结果与分析

2.1 应变控制参数

因实验前后试样体积不变, 设原始外径为 d_0 , 内径为 d_1 , 加载时外径变化量为 μ , 则断面收缩率 ψ 可以表示为

$$\begin{aligned}\psi &= \frac{\Delta F}{F_0} = \frac{F - F_0}{F_0} \\ &= \frac{\frac{\pi}{4} \{[(d_0 - \mu_r)^2 - d_1^2] - (d_0^2 - d_1^2)\}}{\frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_1^2)} \\ &= \frac{(d_0 - \mu_r)^2 - d_0^2}{(d_0^2 - d_1^2)}\end{aligned}\quad (1)$$

式中 F —实验后试样最小直径处截面积; F_0 —实验前试样最小直径处截面积。

又设轴向应变为 ε , 则

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}FL &= [F_0 + (F - F_0)](L_0 + \Delta L) \\ &= (F_0 + \Delta F)(L_0 + \Delta L) \\ &= F_0 L_0 (1 + \psi)(1 + \varepsilon) \\ &= F_0 L_0 (\text{体积不变})\end{aligned}\quad (3)$$

$$(1 + \psi)(1 + \varepsilon) = 1 \quad (4)$$

$$\varepsilon = -\frac{\psi}{1 + \psi} = \frac{d_0^2 - (d_0 - \mu_r)^2}{(d_0 - \mu_r)^2 - d_1^2} \quad (5)$$

整理后得

$$\mu_r = d_0 - \sqrt{\frac{d_0^2 + \varepsilon d_1^2}{1 + \varepsilon}} \quad (6)$$

将 $d_0 = 12.5 \text{ mm}$, $d_1 = 10 \text{ mm}$ 代入(6)式, 有

$$\mu_r = 12.5 - \sqrt{\frac{156.25 + 100\varepsilon}{1 + \varepsilon}} \quad (7)$$

于是, 给定一个轴向应变变量, 用(7)式算出对应的 μ_r , 可得到各对应的径向应变控制参数 μ_r 。

2.2 循环应力—应变滞后环

图 2 和图 3 所示分别是 $\Delta \varepsilon = 1.0\%$ 和 1.5% 时, 在 $(350 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下进行 LCF 疲劳试验时记录下的稳定后的循环应力—应变滞后环。可以看出, 应变量大者, 其滞后环回线变宽, 面积增大。表明每次循环所做的塑性功或能量损失随应变变量增加而增大^[1]。

2.3 HTLCF 寿命

实验获得的有效高温低周疲劳 (HTLCF) 寿命数据列于表 2。实验时, 每件样品的实际轴向应变

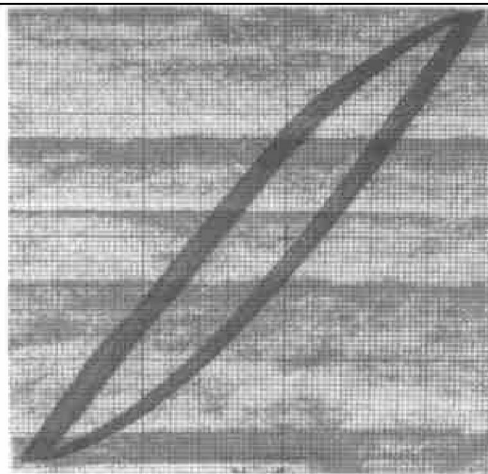


图 2 $\Delta \varepsilon = 1.0\%$ 时的循环应力—应变滞后环

Fig. 2 Stress—strain hysteresis loop at $\Delta \varepsilon = 1.0\%$

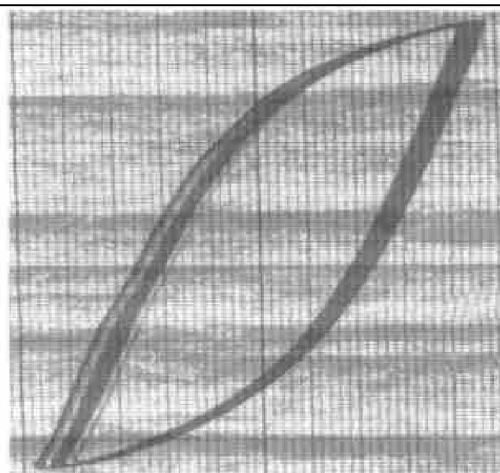


图 3 $\Delta \varepsilon = 1.5\%$ 时的循环应力—应变滞后环

Fig. 3 Stress—strain hysteresis loop at $\Delta \varepsilon = 1.5\%$

量 ε 较表中轴向应变变量均有微小差异, 其差值控制在 $\leq 0.02\%$ 范围之内。因为, 每一试样的径向变量 μ_r 在实验时不可能与表中的计算值完全一致。

2.4 循环应力—应变曲线

实验中控制的总应变幅由塑性应变幅 $\Delta \varepsilon_{pa}/2$ 和弹性应变幅 $\Delta \varepsilon_{ea}/2$ 两部分组成^[2], 即

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = (\Delta \varepsilon_{pa} + \Delta \varepsilon_{ea})/2 \quad (8)$$

对有效试样的应力—应变滞后环进行处理 (取两者算术平均值), 分离出其中的塑性应变幅作为横坐标, 以半寿命为标准得到的应力幅为纵坐标, 绘制出该种管材的循环应力—应变曲线 (即 CSS 曲线) 如图 4 所示, 该图表明试材有循环硬化作用。

对此曲线按 $\sigma_a = k' \varepsilon_{pa}^{1/3}$ 关系进行拟合, 得到该管材 HTLCF 的循环硬化系数和指数分别为: $k' =$

表 2 α-Ti 合金管材的 HTLCF 寿命

Table 2 HTLCF life of d 13 mm × 1.5 mm α-Ti alloy tube

No.	μ_r	$\epsilon/\%$	Cycle times
3	$\pm 0.005\ 6$	0.50	16 100
4			10 899
7			4 933
10			7 540
12			4 958
16	[0.011 2, - 0.011 3]	1.00	5 104
19			5 215
21			1 054
24			3 733
25			1 090
28	[0.016 8, - 0.017 0]	1.50	2 320
31			1 145
34			2 979
36			900
39			507
	[0.022 3, - 0.022 7]	2.00	
	[0.027 8, - 0.028 4]	2.50	

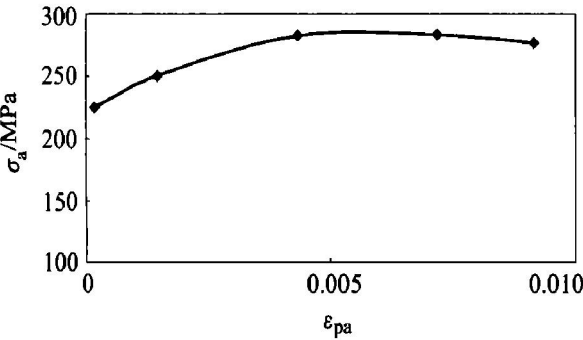


图 4 循环应力—应变曲线

Fig. 4 Cycle stress—strain curve

376.53, $n' = 0.059\ 4$ 。试样在 350 ℃下 $\sigma_b/\sigma_{0.2}$ 为 1.37(接近 1.4), 介于循环稳定与循环硬化之间, 这与实验中呈现出的循环稳定但有轻微循环硬化现象一致, 也与图 2 及图 3 反映出的情况完全吻合^[4]。它们反映了材料在承受低周疲劳时的稳定应力和应变的响应特征^[5]。

2.5 拟合 HTLCF 曲线

由(8)式可得: $\Delta\epsilon/2 = (\Delta\epsilon_{pa} + \Delta\epsilon_{ea})/2$, 而总应变幅 $\Delta\epsilon/2$ 与断裂寿命 N_f 之间应符合 Coffin-Manson^[6]关系:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E_{350\text{ }^{\circ}\text{C}}} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \tag{9}$$

式中 σ'_f —断裂时的真应力; $E_{350\text{ }^{\circ}\text{C}}$ —350 ℃时的弹

性模量; ϵ'_f —断裂时的延伸率; b —疲劳强度指数; c —疲劳塑性指数。

式(9)右边第一项为 ϵ_{ea} , 第二项为 ϵ_{pa} 。将 5 个应变量下的弹性和塑性应变幅 (ϵ_{ea} 与 ϵ_{pa}) 与倍寿命 ($2N_f$) 在双对数坐标上绘制出图 5, 再用最小二乘法对数据进行线性回归(结果见表 3), 由此可拟合出直线方程。这样就得到了此种试材在 350 ℃下的 HTLCF 的拟合曲线方程:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 0.009\ 7(2N_f)^{-0.127\ 8} + 0.231\ 2(2N_f)^{-0.463\ 3} \tag{10}$$

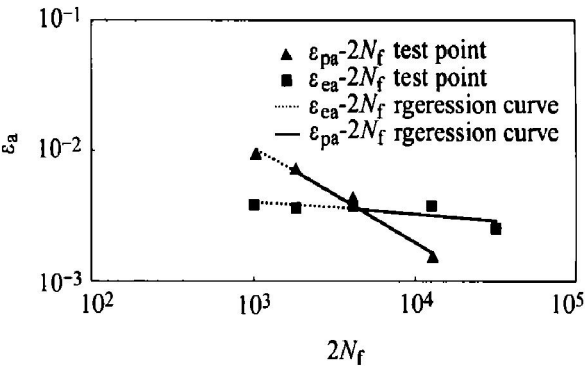


图 5 倍寿命与弹性及塑性应变幅的关系

Fig. 5 Relationship between double life and elastic strain (plastic strain) amplitude

表 3 高温低周疲劳曲线参数

Table 3 Curve parameters of high temperature low cycle fatigue

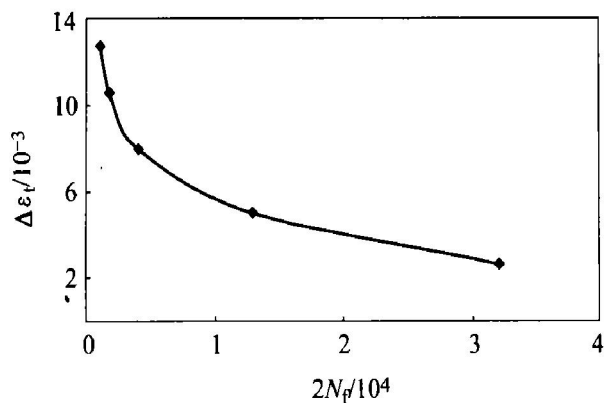
ϵ'_f	c	σ'_f	b
0.231 2	- 0.463 3	0.009 7	- 0.127 8

这表明, 图 5 的结果很好地满足了 Coffin-Manson 关系。

另外, 可以作出倍寿命 $2N_f$ 与总应变幅 ($\Delta\epsilon$) 的关系曲线如图 6 所示, 它是由 $\Delta\epsilon_{ea}-N$ 和 $\Delta\epsilon_{pa}-N$ 两者合成的。当应变较小时, 以弹性应变为主; 而应变较大时, 以塑性应变为主。而塑性应变量的大小决定了材料的低周疲劳寿命^[7]。

2.6 统计分析

考虑到低周疲劳寿命本身离散度较大, 而管材长度与直径的比值为 17 左右, 远大于 2; 漏斗形试样在试验时的平面应力状态等原因, 会使低周疲劳寿命数据的离散性相对标准试样增大^[8]。通常寿命分布曲线不符合正态分布, 但在很多情况下寿命分布对数曲线非常接近正态分布^[9]。Weibull^[10]提出了一种寿命分布函数, 它与实验数据的一致性可能

图 6 $\Delta \varepsilon_f - 2N_f$ 关系曲线Fig. 6 $\Delta \varepsilon_f - 2N_f$ curve

要比对数正态分布好^[11]。采用双参数 Weibull 分布函数进行统计分析, 为准确反映该种试材的低周疲劳寿命, 将疲劳寿命作为随机变量, 其中参数估计用最佳线形不变估计法。双参数 Weibull 分布函数为

$$P(N)_s = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{V_s}\right)^b\right] \quad (11)$$

式中 $P(N)_s$ — 在某一应变变量下, 低周疲劳循环数为 N 时的失效概率, %; N — 低周疲劳寿命, 次; V_s — Weibull 分布函数的尺寸参数, 代表失效概率为 63.2% 时母体的特征寿命, 次; b — Weibull 分布数的斜率参数, 表示低周疲劳寿命的离散程度。

式(11)的对数形式为

$$\lg \lg \{1/[1 - P(N)_s]\} = b(\lg N - \lg V_s) - 0.3622 \quad (12)$$

由数据处理, 对 Weibull 分布的两个参数 V_s 和 b 进行估计, 据此确定母体的 LCF 寿命。母体的子容量为 6, 经完全失效实验后得到的实际寿命为

$$N_1 \leq N_2 \leq N_3 \leq N_4 \leq N_5 \leq N_6$$

采用最佳线形不变估计法对 V_s 和 b 进行估计:

$$b = \left[\sum_{i=1}^6 C_1(6, 6, i) \ln N_i \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\ln V_s = \sum_{i=1}^6 D_1(6, 6, i) \ln N_i \quad (14)$$

式中 $C_1(6, 6, i)$ 和 $D_1(6, 6, i)$ 为最佳线形不变估计法的参数, 由文献[12]中的附表查出。

据 V_s 和 b 值, 按下式计算 LCF 寿命:

$$\begin{aligned} N_{10} &= V_s (0.10536)^{1/b}; \\ N_{50} &= V_s (0.69315)^{1/b} \end{aligned} \quad (15)$$

式中 N_{10} 为母体的额定寿命, 即失效概率为 10% 的低周疲劳寿命; N_{50} 为母体的中值寿命, 即失效概率为 50% 的低周疲劳寿命。

这样, 将 LCF 寿命与失效概率联系起来, 对克

服数据的分散性和材料的工程应用均具有重要意义。

选取 $\Delta \varepsilon_f = 1.0\%$ 和 $\Delta \varepsilon_f = 1.5\%$ 两个应变量的各 6 个实验数据进行统计分析(情况如表 4), 结果如表 5 所列。

表 4 $\Delta \varepsilon_f = 1.0\%$ 和 1.5% 试样的
高温低周疲劳寿命的统计分析

Table 4 Statistical analysis of high temperature
low cycle fatigue life at $\Delta \varepsilon_f = 1.0\%$ and 1.5%

No.	$\Delta \varepsilon_f = 1.0\%$		No.	$\Delta \varepsilon_f = 1.5\%$	
	N_f	$P(N)_s$		N_f	$P(N)_s$
7	4 933	0.257 075	21	1 054	0.160 677 5
12	4 958	0.260 506	25	1 090	0.171 233 3
16	5 104	0.280 928	31	1 145	0.187 824 2
19	5 215	0.296 874	28	2 320	0.594 237
10	7 540	0.662 915	34	2 979	0.780 452 6
4	10 899	0.965 058	24	3 733	0.911 370

表 5 HTLCF 寿命统计分析结果

Table 5 Result of statistical analysis on high
temperature low cycle fatigue life

$\Delta \varepsilon_f / \%$	N_{10}	N_{50}	V_s	b
1.0	3 514	6 507	7 336	3.057 67
1.5	825	2 043	2 438	2.077 25

再作出此两个应变变量下的 LCF 失效概率曲线如图 7 所示, 表明实验结果符合 Weibull 分布。

据图 7 可得到在任意失效概率下该种试材的低周疲劳寿命, 从而为其抗疲劳设计和工程应用提供依据。

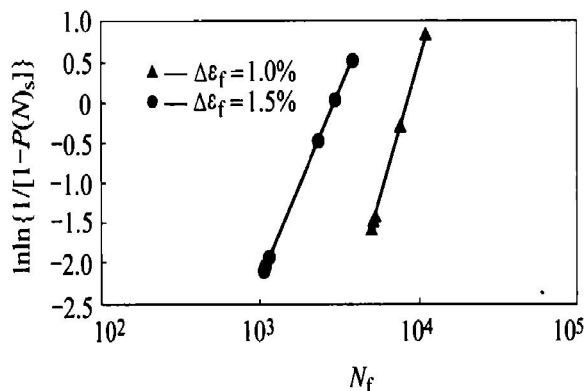


图 7 $\Delta \varepsilon_f = 1.0\%$ 和 1.5% 下的 LCF 失效概率

Fig. 7 Low cycle fatigue failure probability
distribution of $\Delta \varepsilon_f = 1.0\%$ and 1.5%

REFERENCES

- [1] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社,

1995. 150 - 152.
- SHU De-lin. Mechanical Properties of Metals [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995. 150 - 152.
- [2] Lin C K, Chu C C. Mean stress effects on low-cycle fatigue for a precipitation-hardening martensitic stainless steel in different tempers[J]. Fatigue Fract Mater Struct, 2000, 23(7): 545 - 554.
- [3] Li D M, Nam W J, Lee C S. A strain energy-based approach to the low-cycle fatigue damage mechanism in a high-strength spring steel[J]. Metall Mater Trans A, 1998, A29: 1431 - 1440.
- [4] 胡耀君, 马红征, 刘梁宗, 等. Ti-31 合金循环变形特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 1998(6): 139 - 140.
- HU Yao-jun, MA Hong-zhen, LIU Liang-zhong, et al. Cyclic deformation characteristic of Ti-31 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1998(6): 139 - 140.
- [5] Tan X, Gu H, Laird C, et al. Cyclic deformation behavior of high-purity titanium single crystals: part I. Orientation dependence of stress-strain response[J]. Metall Mater Trans A, 1998, A29: 507 - 512.
- [6] Lee B H, Lee S B. Stochastic modelling of low-cycle fatigue damage in 316L stainless steel under variable multiaxial loading[J]. Fatigue Fract Mater Struct, 2000, 23(12): 1007 - 1018.
- [7] Mughrabi H. On the life-controlling microstructural fatigue mechanisms in ductile metals and alloys in the gigacycle regime[J]. Fatigue Fract Mater Struct, 1999, 22(7): 634 - 635.
- [8] 王栓柱. 金属疲劳[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1986. 451 - 453.
- WANG Quan-zhu. Fatigue of Metals[M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1986. 451 - 453.
- [9] 高镇同, 熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000. 51 - 74.
- GAO Zhen-tong, XIONG Jun-jiang. Fatigue Reliability[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2000. 51 - 74.
- [10] 居滋培. 可靠性工程[M]. 北京: 原子能出版社, 2000. 114 - 115.
- JU Zi-pei. Reliability Engineering [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000. 114 - 115.
- [11] 弗罗斯特 N E, 马什 K J, 普克 L P. 金属疲劳[M]. 汪一麟, 邵本逮译. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 472 - 474.
- Floste N E, Math K J, Puok L P. Fatigue of Metals [M]. WANG Yi-lin, SHA Ben-qiu transl. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984. 472 - 474.
- [12] 林少宫. 基础概率与数理统计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1964. 212.
- LIN Shao-gong. Fundamental Probability and Mathematical Statistics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1964. 212.

Experimental procedure and data processing of pipe material for high temperature low cycle fatigue

LI Yuan-rui, CHEN Lin

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The high temperature low cycle fatigue (HTLCF) of $d = 13 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ single phase α -Ti alloy pipe materials was tested with five different strain parameters at $(350 \pm 1)^\circ\text{C}$ on the test equipment of MTS 880/810, by the method of radial strain control. The individual cycle-strain hysteresis loops were recorded, and the cycling response and high temperature low cycle fatigue life were obtained. The experimental data were treated as fatigue curve formula according to Coffin-Manson formula, then the fatigue life curve $\Delta\epsilon_f - 2N_f$ of tested materials was drawn. In consideration of the scatter of low cycle fatigue data, statistical analysis was applied to the six experimental data of two strain parameters $\Delta\epsilon_f = 1.0\%$ and $\Delta\epsilon_f = 1.5\%$ based on dual parameters Weibull distribution.

Key words: titanium alloy; pipe specimens; high temperature low cycle fatigue

(编辑 袁赛前)