

T225NG 钛合金的单轴棘轮行为研究 *

蔡力勋^{1,2)} 刘宇杰¹⁾ 叶裕明¹⁾ 邱绍宇²⁾ 陈洪军¹⁾

1) 西南交通大学应用力学与工程系, 成都 610031

2) 中国核动力院核燃料与材料国家级重点实验室, 成都 610041

摘 要 基于单轴常温与高温循环棘轮实验, 研究了 T225NG 钛合金棘轮饱和、演化和破坏的一些特性, 发展了一套描述高温棘轮循环的单轴饱和和棘轮本构关系的方法, 新方法克服了传统棘轮变形二元应力控制论带来的难题, 描述方程结构简洁, 建模简便、精度高, 适合工程应用. 研究表明: 在常温应力循环下, 当均值应力为半峰值应力时, T225NG 钛合金会伴随棘轮饱和和产生疲劳破坏, 而当均值应力低于半峰值应力时, 棘轮应变因局部损伤使材料较快达到疲劳破坏而不能达到饱和态. 此外, 常温应力循环下, 单轴试样的低周疲劳寿命与幅值应力之间的关系符合幂律.

关键词 T225NG 钛合金, 棘轮, 塑性, 本构方程, 疲劳

中图法分类号 TG146.23

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2004)11-1155-10

METHODOLOGICAL SYSTEM TO DESCRIBE UNIAXIAL RATCHETING BEHAVIOR OF T225NG TITANIUM ALLOY BY UNITARY PARAMETER

CAI Lixun^{1,2)}, LIU Yujie¹⁾, YE Yuming¹⁾, QIU Shaoyu²⁾, CHEN Hongjun¹⁾

1) Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

2) National Key Laboratory for Nuclear Fuel and Material, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041

Correspondent: CAI Lixun, professor, Tel: (028)87600851, E-mail: lix_cai@263.net.

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.19772041)

Manuscript received 2003-12-28, in revised form 2004-05-08

ABSTRACT Based on a series of uniaxial ratcheting tests carried out for T225NG titanium alloy under cyclic stress loading at room temperature and elevated temperature, the properties of the alloy on ratcheting and fatigue were investigated. A saturated-ratcheting constitutive model was developed to simulate SR(saturated ratcheting) strain of T225NG alloy at the temperature range of 20—450 °C, and another model was presented to predict the evolved law of long-cycle ratcheting strain of the alloy at room temperature. Overcoming the difficulty to describe ratcheting deformation from traditional dualistic stress control, the presented models have better precision to regress experimental data and are accessible to engineering application. The test results show that, under the stress cycling at room temperature, the fatigue failure of the alloy will happen after ratcheting saturation as the mean stress is equal to half of a peak stress, and local fatigue damage will restrict the ratcheting strain to reach saturation as the mean stress is less than half of peak stress. Moreover, it was found that the relationship between the fatigue life and amplitude stress under stress cycling at room temperature accords with power law.

KEY WORDS T225NG titanium alloy, ratcheting, plasticity, constitution, fatigue

材料因循环应力作用而产生渐增性循环塑性应变累积, 这种变形称为棘轮变形 (ratcheting deformation). 棘轮塑性变形累积可导致构件尺寸超标并可加速破坏失

效. 棘轮应变可以定义为

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_{\max}^T - \sigma_R^T/E + \varepsilon_{\min}^T - \sigma_L^T/E)/2 \quad (1)$$

式中上标记号“T”表示材料变形和应力的“真”实状态, 则真应变和真应力的表达式分别为 $\varepsilon^T = \ln(1+\varepsilon)$ 和 $\sigma^T = \sigma(1+\varepsilon)$, 其中 ε 和 σ 分别为单轴试样的工程应变和名义应力; ε_{\max}^T 和 ε_{\min}^T 表示一个循环周期中的最大和最小折返真应变, σ_R^T 和 σ_L^T 分别为与折返工程应变 ε_{\max} 和 ε_{\min} 对应的真应力. 当材料棘轮应变达到饱和时, 记

* 核燃料与材料国家级重点实验室基金项目 51481070101QT2201

和国家自然科学基金项目 19772041 资助

收到初稿日期: 2003-12-28, 收到修改稿日期: 2004-05-08

作者简介: 蔡力勋, 男, 1959 年生, 教授

ε_{sr} 为饱和棘轮应变, 简称为 SR(saturated ratcheting) 应变。

棘轮应变率可以定义为

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{d\varepsilon_r}{dN} \quad (2)$$

棘轮应力定义为^[1]

$$\sigma_r = \sigma_p^T - \sigma_{rth} \quad (3)$$

式中 σ_p^T 为峰值真应力, σ_{rth} 为棘轮变形门槛应力值。

近十几年来, 学术界普遍认为制约单轴棘轮行为的主要因素包括幅值应力 σ_a , 均值应力 σ_m , 循环次数 N , 应力率 $d\sigma/dN$, 温度 T , 应力历史 χ , 温度历史 ξ , 因此棘轮应变 ε_r 应满足 $\varepsilon_r = f(\sigma_a, \sigma_m, N, d\sigma/dN, T, \chi, \xi)$ 。由于制约因素的复杂性, 使得人们放弃了需要大量实验的系统单一材料研究。传统研究方法将注意力放在基于少量特殊棘轮实验建立应力循环材料本构关系上, 并用以得到棘轮应变的理论预测^[2-7]。基于屈服面理论的现有本构模型待定参数较多, 存在经验属性的模型调节参数, 模型构建方法比较复杂, 预测精度难以周全多种加载工况, 因此距工程应用有较大距离。文献[1, 8]完成了 304, 1Cr18Ni9Ti 不锈钢大量单轴棘轮实验, 从新角度全面研究了循环中 σ_a (幅应力)、 σ_m (均应力)、 σ_v (谷应力)、 σ_p (峰应力)以及 N, T, χ, ξ 对棘轮应变的影响, 提出了用于建立描述不锈钢在常温与高温饱和棘轮本构关系以及常温下棘轮应变演化关系的方法体系。新方法的提出给不锈钢棘轮变形工程控制与进一步开展复杂棘轮变形特性研究提供了现实有效的途径。文献[1-8]中所涉及材料棘轮变形无论是否达到循环饱和状态, 无论实验研究还是理论模型预测, 材料棘轮的循环次数均在数十、数百周次的循环范围内。现有研究属于短次循环的棘轮行为。

棘轮效应可以引起构件尺度超标、破坏和失稳, 目前一些棘轮效应问题已纳入到 ASME 规范中^[9]。但是现有规范并不完整, 因为一些棘轮问题以及与棘轮塑性累积并行的疲劳损伤问题并未得到认识或解决。实验已证明, 一些材料经过数百周应力循环依然可以达到塑性饱和^[1]; 一些材料实验循环次数较短, 在数十次或数百次应力循环下棘轮变形表现出非饱和的棘轮状态^[3,5,8], 倘若经历数千、数万或数十万长次循环, 这些材料是否存在棘轮饱和性, 何种条件下棘轮不能达到饱和, 是否可预测仍缺乏实验认识。

本文对 T225NG 钛合金进行了较系统的单轴棘轮循环实验研究, 表明 T225NG 合金在一定应力循环条件下经数万次的常温长周次循环可以达到塑性累积的棘轮饱和, 而高温可使得棘轮饱和过程大大缩短; 通过对 T225NG 合金的棘轮演化特性、高温棘轮效应、微幅效应、饱和棘轮行为以及棘轮疲劳特性的研究, 揭示了一些有意义的材料行为, 进而提出了符合不同温度的、基于一

元参量的 T225NG 合金棘轮饱和本构关系。此外还讨论了棘轮变形与疲劳损伤交互作用问题。

1 实验条件

1.1 实验设备

T225NG 合金材料常温棘轮实验用设备为 MTS809 (25 kN) 电液伺服材料试验机, 控制系统为 TestStarII, 操作系统为 WinNT Workstation 4.0。采用引伸计 MTS632.29F-30(标距 5 mm, 测量范围 -10%—30%) 测量常温试样应变, MTS632.68F (标距 25 mm, 测量范围 10%) 测量高温试样应变。MTS 载荷传感器和应变引伸计信号通道的测量相对误差为 $\pm 0.2\%$ 。借助 MTS 软件开发平台 TestWare-SX 设计实验应用程序, 并以此完成实验的闭环控制和数据采集。在加载过程中, 按时间同步采集连续的工程应变和轴向载荷数据和它们的峰/谷值数据。

1.2 实验材料与试样尺寸

实验材料为 T225NG 钛合金, 其化学成分(质量分数, %)为 C: 0.02, Si: <0.04, Al: 2.0, Zr: 2.45, N: 0.016, Fe: 0.03, H: 0.001, O: 0.08。

试样的几何结构与加工尺寸如图 1 所示。高温实验试样的尺寸比 $L_0 : L$ 为 25 mm : 90 mm, 常温实验试样的尺寸 $L_0 : L$ 为 10 mm : 65 mm。为使材料组织结构均匀, 力学性能稳定, 对加工后的试样进行了固溶处理(在管式真空炉中 750 °C 下保温 120 min+ 随炉冷却)。

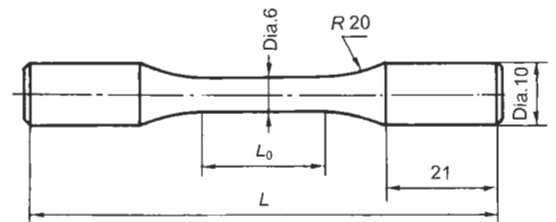


图 1 T225NG 合金试样尺寸

Fig.1 Specimen dimension of the Ti Alloy T225NG

1.3 应力循环试验实数

实验分为独立加载工况和多级加载工况: 若单试样只接受一个工况 $\sigma_m \pm \sigma_a$ 的循环加载, 则称该加载工况为无加载历史的独立加载工况; 在加载历程中不同应力水平的工况 $\sigma_m \pm \sigma_a$ 组合在一起依序对单试样加载, 则称该试样经受了多级加载工况。棘轮实验的应力加载指令波形为三角波: $0 \rightarrow \sigma_p \leftrightarrow \sigma_v (\sigma_v = \sigma_p - 2\sigma_a)$ 。可以将一个棘轮工况记为 $\sigma_p\text{-}\sigma_v$, 如 420_0 表示 σ_p 和 σ_v 分别为 420 MPa 和 0 MPa 的棘轮工况。

为模拟管道和容器的内压载荷特性, 设计 T225NG 棘轮实验单轴加载工况如表 1 所示, 其中独立工况和多级加载各级工况的循环次数以棘轮应变达到饱和为准。此

外, 微幅工况 ($\sigma_a=10$ MPa) 用以模拟管道经受“恒内压”的微幅波动工况, 半幅工况 ($\sigma_a = \sigma_p / 2$) 代表零内压至加压载荷状态。

2 T225NG 合金常规力学性能

T225NG 合金的弹性模量 E 、屈服应力 $\sigma_{p0.2}$ 和抗拉强度 σ_b 对设计和分析棘轮实验具有重要参考价值。在常温、200 °C、300 °C、350 °C、400 °C、450 °C 和 600 °C 温度下 T225NG 合金的单调拉伸曲线由图 2 给出, 而常规力学性能由表 2 和图 3 所示。图 2 表示, 在 20—450 °C 的不同温度下, 单调拉伸曲线进入屈服后有明显的平台区, 当温度为 600 °C, 拉伸曲线具有幂律曲线特性。图 3 表明, 随着温度提升, 材料强度、弹性模量均随温度发生线性递减, 在 450 °C 以内延伸率在 23%—29% 范围内有少许变化, 但进入 600 °C, 材料单轴拉伸延伸性能大大提

高, 延伸率达到 40%。

3 T225NG 合金单轴棘轮演化

3.1 常温棘轮演化特性

表 1 工况下 T225NG 的棘轮实验结果表明, 在峰值应力大于或等于 360 MPa 时, T225NG 合金均发生了塑性累积。图 4 给出了峰值应力为 420 和 390 MPa 时不同平均应力下的 T225NG 合金试样的 $N - \epsilon_r$ 常温实验曲线, 结果表明, 棘轮应变率在循环的初始阶段衰减很快, 随着循环发展到数万次, 棘轮应变率可从每循环大于 1.0×10^{-3} 逐渐衰减至每循环不足 1.0×10^{-5} 。如果以棘轮应变率低于 $1.0 \times 10^{-8}/\text{cycle}$ 为棘轮饱和的判定标准, 则在表 1 所列应力循环加载工况下 T225NG 均能达到棘轮饱和, σ_p 超过 430 MPa 将发生循环失稳。从图 4 还可以看出, 在 5 万次循环过程中, 峰值应力相同应力幅

表 1 T225NG 合金棘轮实验的加载工况
Table 1 Ratcheting loading conditions for T225NG alloy at different temperatures

Temp. °C	Amplitude σ_a , MPa	Peak stress σ_p , MPa										Freq. f , Hz
		345	360	375	390	397.5	405	412.5	420	27.5		
Room	$\sigma_p/2$	y	y	y	y	y	y	y	y	y	y	8
	$\sigma_p/3$		y	y	y		y		y			12
	$\sigma_p/6$		y	y	y		y		y			12
	10		y	y	y		y		y			16
Multi-grade loading condition												
Peak stress σ_p , MPa												
350	$\sigma_p/2$	200 → 210 → 220 → 230 → 240 → 250 → 260 → 270 → 280 → 290 (10 steps)										
		200 → 210 → 220 → 237.8 → 250 → 260 → 270 → 280 (8 steps)										
		240 → 260 → 270 → 280 (4 steps), 260 → 275 → 285 (3 steps)										
	$\sigma_p/3$	235 → 245 → 255 → 265 → 275 → 285 → 295 (7 steps)										
230 → 240 → 250 → 260 → 270 → 280 → 290 (7 steps),												
250 → 270 → 290 (3 steps), 270 → 285 → 290 (3 steps), 290 (y)												
$\sigma_p/6$	200 → 220 → 240 → 260 → 280 (5 steps)											
	200 → 210 → 220 → 230 → 240 → 250 → 260 → 270 → 280 → 290 (10 steps)											
200	$\sigma_p/2$	250 → 270 → 290 → 300 → 315 (5 steps)										
300	$\sigma_p/2$	200 → 210 → 220 → 230 → 240 → 255 → 270 → 285 → 300 (9 steps)										
450	$\sigma_p/2$	180 → 195 → 210 → 225 → 240 → 255 → 270 → 285 (8 steps)										

Note: y—single loading condition: $(\sigma_p - \sigma_a) \pm \sigma_a$

表 2 不同温度下 T225NG 合金常规机械性能
Table 2 General mechanical properties of T225NG alloy at different temperatures

Temperature °C	Young's modulus	Yielding strength	Tensile strength	Ratio of elongation
	E , GPa	$\sigma_{p0.2}$, MPa	σ_b , MPa	δ_5 , %
Room	107	390	540	24%
200	90.3	283	369	28.1
300	85.9	252	344	27.2
350	82.8	221	306	28.5
450	73.1	203	301	23.1
600	60.2	142	192	40.0

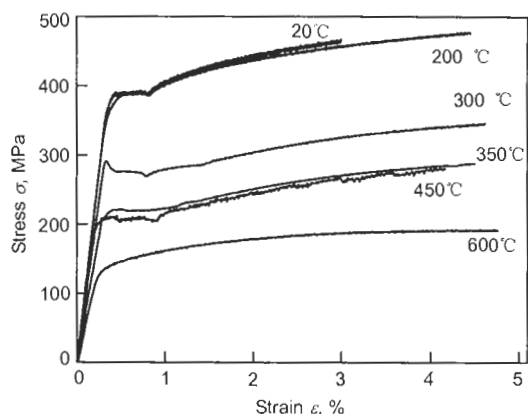


图2 在不同温度下 T225NG 合金的单调拉伸曲线

Fig.2 Monotonic tensile curves of T225NG alloy at different temperatures

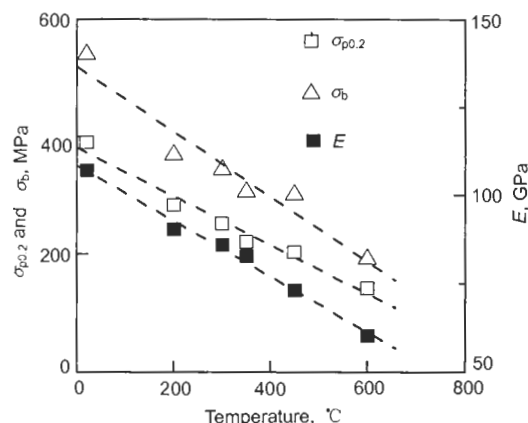


图3 在不同温度下 T225NG 合金的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of T225NG alloy at different temperatures

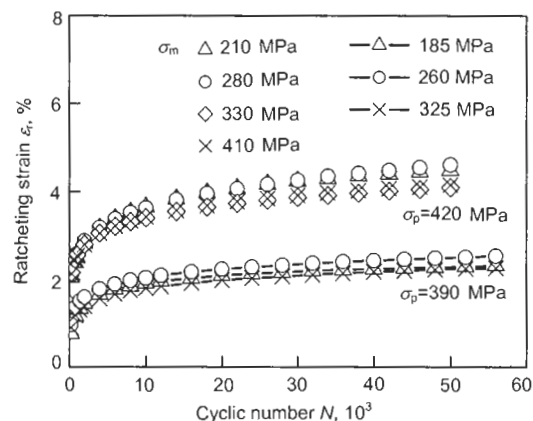


图4 常温下 N-εr 实验曲线

Fig.4 Experimental curves N-εr at room temperature

不同的试样, 它们的 $N-\epsilon_r$ 曲线非常接近, 换句话说, 不同平均应力的 $N-\epsilon_r$ 试验曲线因峰值应力不同而表现出

各自集中的曲线束, 因此峰值应力对棘轮应变演化起着制约作用, 而平均应力或应力幅导致的曲线束的分散性并不突出。

当 σ_p 为 360 MPa 时, 材料处于弹性变形, 但仍然产生了 1.62% 的棘轮应变 (如图 5), 而且初始棘轮应变率从零逐渐增大, 从 2 万次开始后的 1 万次应力循环中应变率增长相对较快接着又在后继 1 万次内相对加速下降 (如图 6). 此时棘轮应变率经历了缓慢递增 \rightarrow 快速递增与衰减 \rightarrow 衰减到零 (棘轮饱和) 的过程. 此类棘轮演化在初始阶段有较大随机性。

3.2 高温棘轮演化特性

图 7 给出了 350 °C 下的部分 $N-\epsilon_r$ 实验关系. 结果表明, 在 350 °C 高温条件下, (1) 高温使得棘轮应变率比常温有很大提高, 因而棘轮饱和大大提前: 多数工况的棘轮应变在几百循环周次内达到棘轮饱和, 甚至当峰值应力达到 270 MPa 时仅 30 周就达到饱和; (2) 峰值应力越高, SR 应变越大。

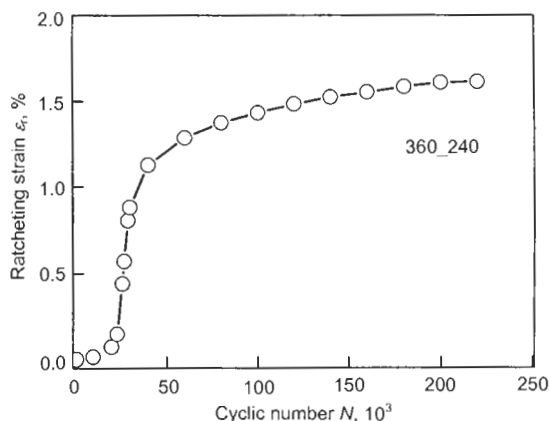


图5 低应力水平下的 N-εr 实验关系

Fig.5 Experimental relationship between N and εr with lower stress level

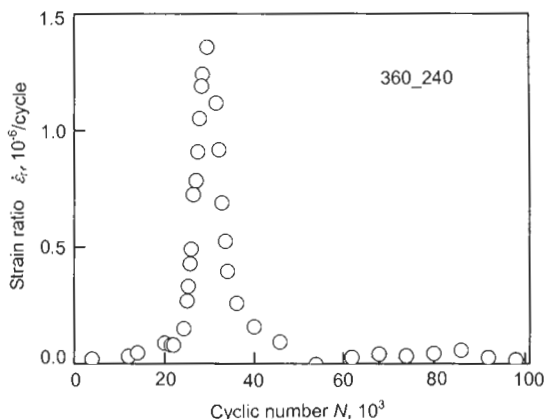


图6 低应力水平下的棘轮应变率 εr 的演化规律

Fig.6 Evolution law of ratcheting strain ratio with lower stress level

图 8, 9 给出了 200 °C 和 450 °C 下多级应力循环加载下棘轮应变演化曲线, 可见 200 °C 时需经过近万周次应力循环棘轮应变方可达到饱和; 当 450 °C 时, 棘轮应变在几周或几十周内迅速提高并达到饱和. 结合图 4, 8, 9, 不

难看出, 在常温至 450 °C 范围内, 温度越高, T225NG 合金达到棘轮饱和的循环次数越少.

4 T225NG 合金的常温棘轮饱和特性

4.1 常温峰值、幅值与均值应力效应

图 10, 11 分别给出了各独立棘轮工况下 T225NG 合金在不同恒定峰值应力下饱和棘轮应变分别随幅值应力和随均值应力变化的实验关系. 结果表明, 在峰值应力越高, 饱和棘轮变形越大, 但是在相同峰值应力下, 饱和棘轮应变因幅值应力不同或因均值应力不同相应变化均很小. 这说明, 当初始加载为正向加载的管道模拟内压载荷作用下, 饱和棘轮应变仅制约于峰值应力, 受均值、幅值应力的影响较小.

从图 10, 11 全局观察可以看出, 除峰值应力为 375 MPa 情况外, $\sigma_a - \epsilon_{sr}$ 实验关系有微弱下倾趋势, 以及 $\sigma_m - \epsilon_{sr}$ 实验关系有微弱上扬趋势. 这种微弱趋势变化是否反映了物理本质, 如果该微弱趋势变化规律可信, 可能意味着大幅值应力引起细观局部损伤使材料发生硬化

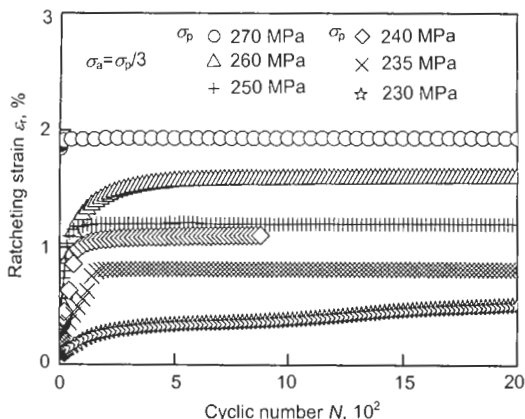


图 7 350 °C 高温下 $N - \epsilon_r$ 实验关系

Fig.7 Experimental relationships between N and ϵ_r at 350 °C

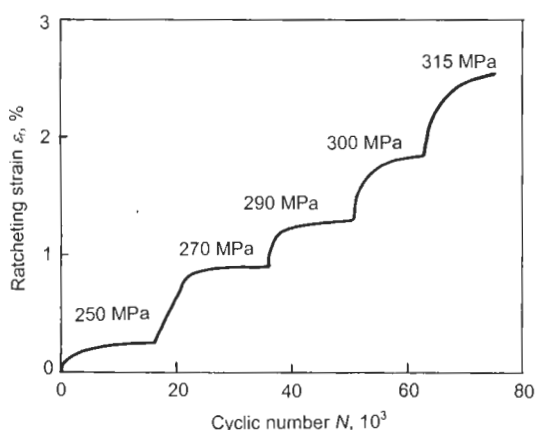


图 8 200 °C 下 $N - \epsilon_r$ 实验曲线

Fig.8 Experimental curve of $N - \epsilon_r$ at 200 °C

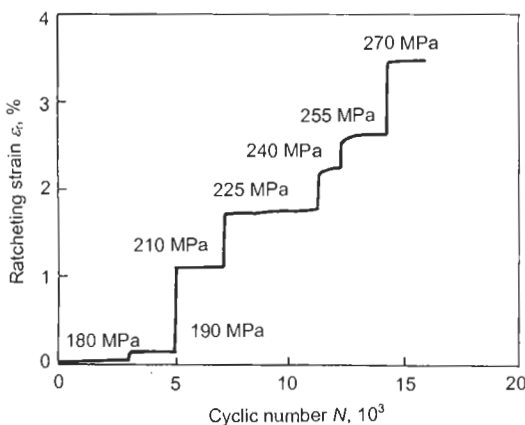


图 9 450 °C 下 $N - \epsilon_r$ 实验曲线

Fig.9 Experimental curve of $N - \epsilon_r$ at 450 °C

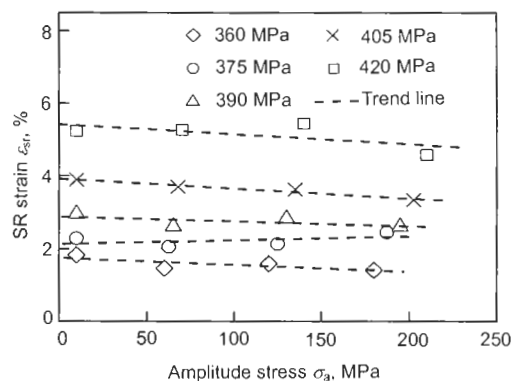


图 10 $\sigma_a - \epsilon_{sr}$ 实验关系

Fig.10 Experiment relationship of $\sigma_a - \epsilon_{sr}$ (SR-saturated ratcheting)

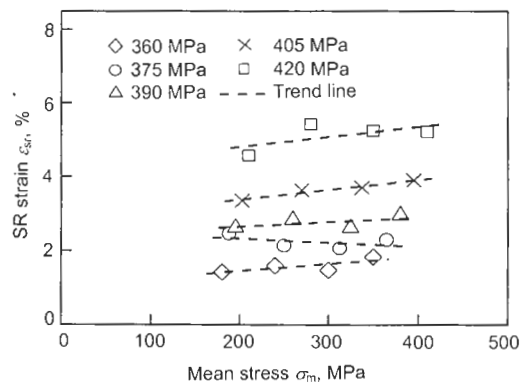


图 11 $\sigma_m - \epsilon_{sr}$ 实验关系

Fig.11 Experiment relationship $\sigma_m - \epsilon_{sr}$

从而抑制了宏观塑性累积。这些问题需要进一步实验和微观分析验证。

4.2 常温微幅应力循环的棘轮效应

通常结构在一定均值载荷作用下会受到幅值微小的脉动载荷作用,这种循环微幅载荷条件下,是否存在棘轮塑性累积并未引起工程界重视.按照表 1 微幅工况所完成的应力循环实验表明,微幅应力下依然会产生较大的塑性累积,且可以达到棘轮饱和.图 12 给出了微幅应力和大幅值应力下的 $\sigma_p^T - \epsilon_{sr}$ 实验关系,可见微幅应力棘轮的 SR 应变比大幅应力棘轮情形略高,略高的原因可能是微幅应力棘轮达到饱和的循环次数较大幅值应力下的棘轮饱和循环次数高 2—10 倍使塑性累积比较充分,也可能是大幅值应力引起材料细观硬化使饱和棘轮降低.由于图 12 中各幅值应力下 $\sigma_p - \epsilon_{sr}$ 实验关系的分散性并不大,表明在各级峰值应力作用下驱动材料塑性变形的能力是相对固定的,因此决定了在饱和状态下微幅应力棘轮中蠕变引起的附加效应不显著,也说明幅值应力对饱和态下塑性累积程度无显著影响.

另外,微幅应力循环的极至条件就是传统的蠕变条件,在材料经受蠕变载荷时 ($\sigma_a=0$),“峰值应力”一样可以引起相当程度的塑性累积.由微幅应力条件的实验结果可以推断:需要较长时间达到饱和和塑性累积的蠕变应变与循环时间相对较短的饱和棘轮应变程度相当.

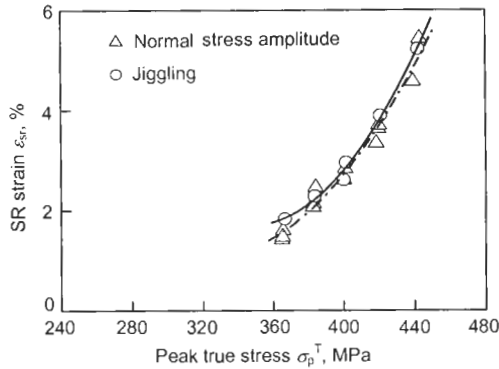


图 12 $\sigma_p^T - \epsilon_{sr}$ 关系中的微幅效应

Fig.12 Effect of stress jigging on relationship between peak stress σ_p^T and satuated ratcheting strain ϵ_{sr}

4.3 弹性循环的棘轮效应

图 13 给出了表 1 中所有常温工况下试样的 $\sigma_p - \epsilon_{sr}$ 实验关系,以及初始循环下的 $\sigma_p - \epsilon_{r0}$ 关系.值得注意的是当峰值应力低于屈服强度 390 MPa 时,虽然初始棘轮应变为零,但饱和和塑性累积应变却可达到 1.5%—3%;当峰值应力为 345 MPa(低于屈服强度 11.5%),仍然发生了近 1.5% 的棘轮应变.还应当看到,由于在 20—450 °C 内材料的单调拉伸曲线(图 2)存在明显屈服平台,因此当应力

低于屈服强度时材料本构关系接近典型的线弹性关系,在应力接近屈服强度时即使存在非线性,其程度也是十分微小的,因此可以认为,在弹性应力循环条件下也会发生较大的塑性变形累积.金属材料存在的这一现象应引起工程界重视.

5 T225NG 合金的高温棘轮饱和行为

5.1 350 °C 高温饱和棘轮效应

根据表 1 所示 350 °C 加载工况完成了棘轮实验, $\epsilon_{sr} - \sigma_p^T$ 实验结果如图 14 所示.多级加载工况中的第一级可以作为无加载历史的独立工况.结果表明,对于独立工况和不同幅值下的多级工况,所有 ($\sigma_p^T, \epsilon_{sr}$) 实验点均集中在很小分散带内,因此 350 °C 下饱和棘轮应变状态仅与峰值真应力水平有关,而与先前低峰值应力水平的循环历史以及应力幅值无关.因此单试样多级加载方法可以用来确定 T225NG 在不同温度下的 $\epsilon_{sr} - \sigma_p^T$ 关系.

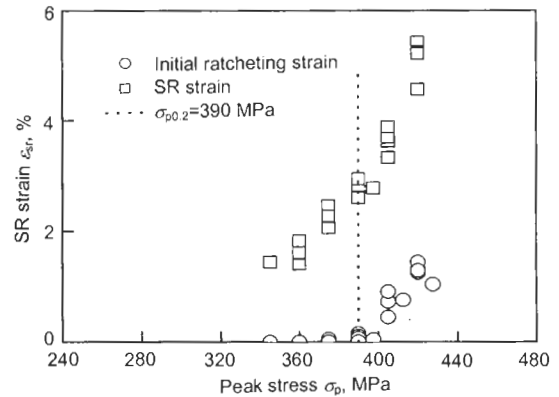


图 13 $\sigma_p - \epsilon_{sr}(\epsilon_{r0})$ 实验关系

Fig.13 Experimental relationships $\sigma_p - \epsilon_{sr}$ and $\sigma_p - \epsilon_{r0}$

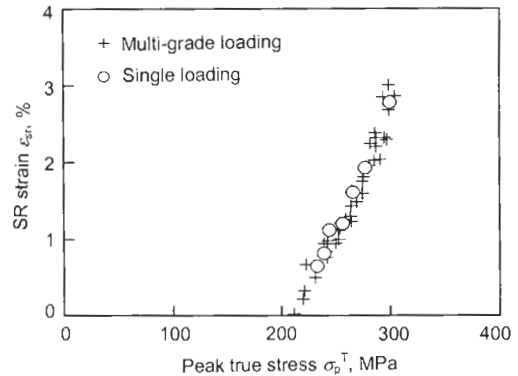


图 14 350 °C 下不同幅值的 $\sigma_p^T - \epsilon_{sr}$ 实验关系

Fig.14 Experimental relationships between σ_p^T and ϵ_{sr} under various loading conditions at 350 °C

5.2 T225NG 合金饱和棘轮的温度效应

图 15 给出了 200, 300, 350, 450 °C 温度下单试样多级加载工况的实验结果, 常温 (20 °C) 独立工况下的实验结果也一并示于图中. 图 15 表明: ①在相同峰值应力水平下, 温度越高, 棘轮变形越严重; ②各温度下单试样多级加载的 $\epsilon_{sr} - \sigma_p^T$ 曲线具有相似性, 即, 恒温下 $\epsilon_{sr} - \sigma_p^T$ 曲线经过沿峰值真应力 σ_p^T 坐标轴方向平移有重合趋势.

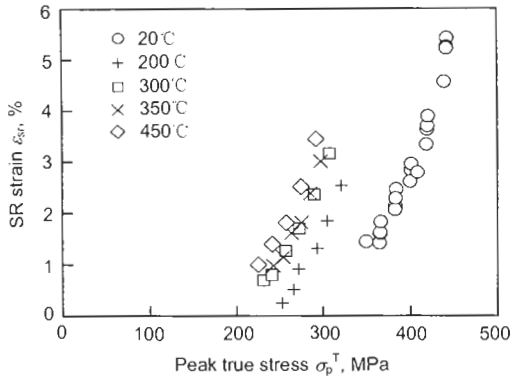


图 15 不同温度下的 $\sigma_p^T - \epsilon_{sr}$ 实验关系

Fig.15 Experimental relationships between σ_p^T and ϵ_{sr} at various temperatures

6 考虑温度效应的饱和棘轮本构模型

由于 T225NG 合金具有棘轮饱和特性, 并且 $\sigma_p^T - \epsilon_{sr}$ 关系具有图 15 所示的单调性, 因此作者在文献 [1] 中提出的棘轮应力 σ_r , 棘轮门槛应力值 σ_{rth} 的概念以及一元应力主控 SR 应变的抛物律依然适用. 将同温度 σ_p^T 扣除适当应力值 σ'_{rthT} , 即将不同温度的 $\epsilon_{sr} - \sigma_p^T$ 曲线适当平移, 可以发现各温度下的 $\epsilon_{sr} - (\sigma_p^T - \sigma'_{rthT})$ 曲线可以较好程度地重合并符合抛物律, 进一步对相对重合的 $\epsilon_{sr} - (\sigma_p^T - \sigma_{rthT})$ 实验关系进行抛物律回归表明该抛物律与应力轴有交点, 即其抛物律 SR 应变极值点大于零. 再次对所有 $\epsilon_{sr} - (\sigma_p^T - \sigma'_{rthT})$ 关系曲线同步平移一个常值 σ'_{rth} 使得 SR 应变极值点落在 SR 应变轴上, 新获得的抛物律关系如图 16 所示. 由此可假定 $\sigma_r - \epsilon_{sr}$ 本构模型满足如下方程

$$\begin{aligned} \epsilon_{sr} &= \alpha_r \sigma_r^2 + k_r \sigma_r \\ \sigma_r &= \sigma_p^T - \sigma_{rth} \quad (\sigma_r \geq 0) \\ \sigma_{rth} &= \alpha_T T + \beta^T \quad T \in [20^\circ\text{C}, 450^\circ\text{C}] \end{aligned} \quad (4)$$

其中 α_r 和 k_r 为材料常数, 计算可知 $\alpha_r = 1.64 \times 10^{-6}$, $k_r = 1.19 \times 10^{-4}$; σ_{rth} 为温度棘轮应力门槛值, T 为温度, $\alpha_T = -0.2845 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$, $\beta_T = 298 \text{ MPa}$. 式 (4) 式称为 SRMT 模型 (saturated ratcheting model with temperature effect). 式 (1) 中抛物律 $\sigma_r - \epsilon_{sr}$ 与线性关系 $\sigma_{rth} - T$ 的回归相关系数分别高达 0.985 和 0.98, 这

一结果说明温度对 $\sigma_r - \epsilon_{sr}$ 关系无显著影响, 仅对棘轮门槛应力值有影响.

对应 20, 200, 300, 350 和 450 °C, T225NG 的单轴棘轮门槛应力值分别为 301, 232, 206, 199 和 179 MPa, T225NG 合金常温和 200 °C 下 σ_{rth} 相较屈服强度分别降低了 24.4%, 16.1%, 18.4%, 9.8% 和 12.0%, 表明峰值应力在介于 σ_{rth} 和 σ_s 之间的弹性范围内会产生循环塑性累积, 在 300—450 °C 下 σ_{rth} 略低于相应温度屈服强度. 文献 [8] 根据 T225NG 合金的 200 周的短周次应力循环得到的棘轮门槛应力值为 384 MPa, 该结果偏高原因是忽视了长周次工况下存在的特殊棘轮演化 (图 5).

利用饱和棘轮本构模型式 (4)(SRMT) 可较方便地根据棘轮应力实现对 T225NG 合金的单轴 SR 应变预测. 图 17 给出了表 1 工况下 SRMT 模型的预测结果与实验结果的对比情况. 可见预测点紧靠 45° 精确解线并多数落在 1.2 倍安全因子线内, 全部预测点落在 2 倍安全因子线内. 这一较理想结果表明 SRMT 模型用于预测 SR

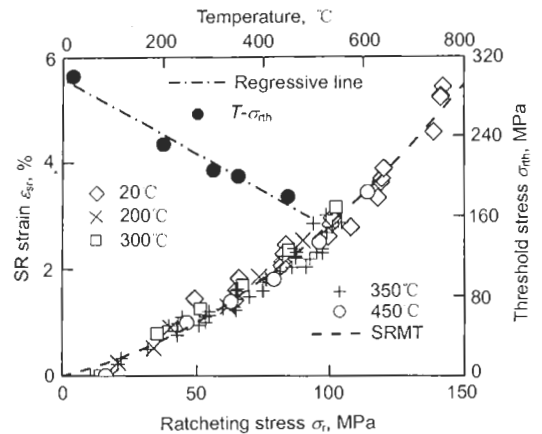


图 16 不同温度下的 $\sigma_r - \epsilon_{sr}$ 实验关系

Fig.16 Experimental relationships between σ_r and ϵ_{sr} and between σ_{rth} and T (SRMT-saturated ratcheting model with temperature effect, i.e. Eq.(4))

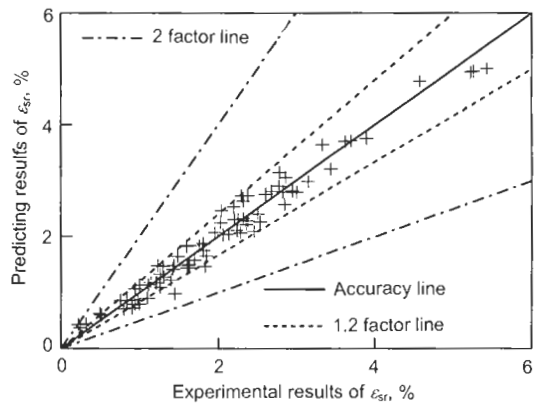


图 17 T225NG 合金棘轮应变 ϵ_{sr} 实验结果与预测值的比较
Fig.17 Comparison of SRMT predictions with experiments for T225NG alloy

应变有很好的精度. 根据前述, 常温下棘轮变形达饱和的循环次数将达到数十万次, 高温使得材料达棘轮饱和态的循环次数大大减少, 因此可以用单试样多级加载方法取不同高温完成棘轮试验来确定 SRMT 模型参数.

7 常温棘轮条件下棘轮变形与疲劳损伤交互作用

7.1 棘轮饱和与疲劳损伤

如图 18 所示, 当幅值应力 σ_a 取为 $\sigma_p/2$ 时, 表 1 工况中所有常温独立棘轮工况试样均在产生塑性累积同时伴随产生了疲劳损伤, 并在棘轮循环达到饱和后发生疲劳断裂. 图 19 给出了峰值应力为 420 MPa, 幅值应力 σ_a 分别为 $\sigma_p/2$ 和 $\sigma_p/6$ 的 $N-E$ (卸载弹性模量) 实验结果, 可以看出, $\sigma_a = \sigma_p/2$ 工况下循环卸载弹性模量 E 随着循环次数增加而逐渐下降, 表明疲劳损伤增加使材料刚度降低; 在 $\sigma_a = \sigma_p/6$ 工况下材料刚度几乎无变化, 表明幅值应力较小时材料循环损伤不明显. 因此如同应变疲劳中应变幅值的作用, 在棘轮循环下应力幅值是决定疲劳损伤程度的重要参量, 幅值越大损伤越严重. 另外需指

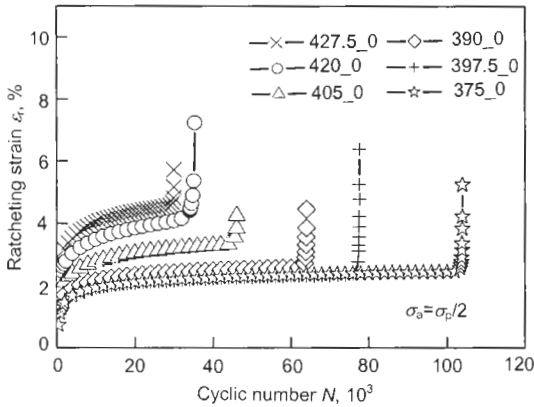


图 18 具有疲劳损伤的 $N-\epsilon_r$ 关系

Fig.18 Experimental relationships between N and ϵ_r with fatigue damage

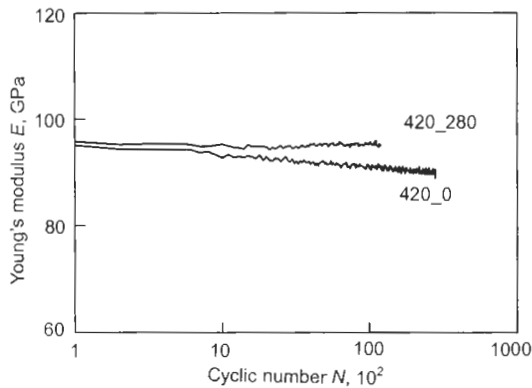


图 19 不同应力幅值下的 $N-E$ 关系

Fig.19 Evolution laws of unloading elastic modulus of the alloy with two different stress amplitudes

出, 图 19 中动态棘轮循环加载下 (应力率约 6 GPa/s) 的初始卸载弹性模量约为 98 GPa 比单调静拉伸结果下降了 8.4%.

图 20 给出了 $\sigma_a = \sigma_p/2$ 工况下的 $2N_f - \sigma_p$ 实验关系, 可见 $2N_f - \sigma_p$ 关系呈现良好的单调幂律趋势, 说明如果在棘轮变形达到饱和且发生后继疲劳断裂情形下, T225NG 材料的单轴棘轮循环疲劳寿命制约于峰值应力, T225NG 合金的 $2N_f - \sigma_p$ 关系符合幂律

$$\sigma_p = 1200.0(2N_f)^{-0.0943} \quad (8)$$

该式成立条件: $\sigma_a = \sigma_p/2, \sigma_p \in [375 \text{ MPa}, 430 \text{ MPa}]$, 其回归实验点的相关系数 R 为 0.936. 将 SR 应变 ϵ_{sr} 和倍寿命 $2N_f$ 实验关系也示于图 20 中, 则 $2N_f - \epsilon_{sr}$ 关系仍符合幂律

$$\sigma_{sr} = 1250.0(2N_f)^{-0.513} \quad (9)$$

该式成立条件同 (8) 式, 其回归实验点的相关系数 R 为 0.962. 由于塑性累积直接、全面地影响到材料疲劳损伤的程度, 使得 $2N_f - \epsilon_{sr}$ 关系具有更好的单调相关性.

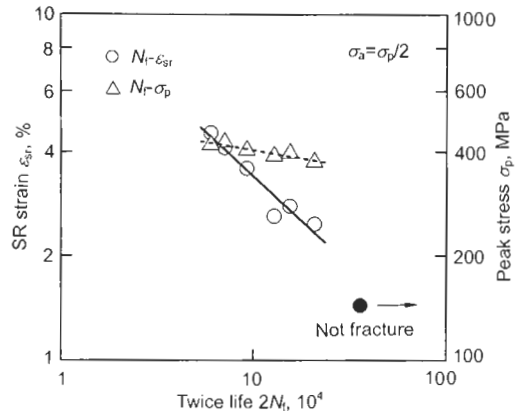


图 20 应力循环下的 $2N_f - \epsilon_{sr}, \sigma_p$ 关系

Fig.20 Variational curves of saturated ratcheting strain and peak stress with twice life

7.2 棘轮变形中的均值应力效应

前述所有实验结果表明, 当 $\sigma_a \leq \sigma_p/2$ ($\sigma_p < 430 \text{ MPa}$), 即 $\sigma_m \geq \sigma_p/2$ ($\sigma_p < 430 \text{ MPa}$) 时, 棘轮应变将达到饱和, 峰值应力 σ_p 是控制饱和棘轮应变的一元参量. 为研究 $\sigma_m < \sigma_p/2$ 范围内的均值应力效应, 特补充四个试样实验工况: $\{\sigma_p, \sigma_a\} = \{390, 0\}, \{390, 65\}, \{390, 90\}, \{390, 130\} \text{ MPa}$, 加载路径依然为 $0 \rightarrow \sigma_p \leftrightarrow \sigma_v$. 图 21 给出了这四个工况的临界棘轮应变 (ϵ_{cr} , 该应变为 $0.95N_f$ 对应的棘轮应变) 与均值应力的实验关系 $\sigma_m - \epsilon_{cr}$, 同时给出了表 1 中在 $\sigma_p = 390 \text{ MPa}$ 下的实验关系 $\sigma_m - \epsilon_{sr}$. 图 21 中, 四个补充试样均在棘轮应变达到饱和和前疲劳破坏, 图中结果表明, 当 $\sigma_m \geq \sigma_p/2$ 时均值应

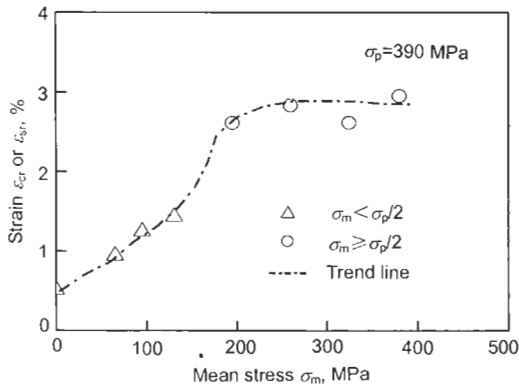


图 21 均值应力对棘轮变形的影响

Fig.21 Effect of mean stress on ratcheting strain (ϵ_{cr} -critical ratcheting strain)

力对饱和棘轮应变无影响, 说明在 $\sigma_m \geq \sigma_p/2$ 范围内峰值应力保持对饱和棘轮应变的单调控制作用. 但当 $\sigma_m < \sigma_p/2$ 时, 均值应力使材料产生一定棘轮应变同时产生疲劳损伤, 由于相对严重的局部损伤发展, 使得试样工作段截面各处材料的塑性循环累积不能同步发展, 在发生严重局部损伤区域外材料塑性变形难以发展其累积潜能, 因此反映平均塑性累积的棘轮应变难以达到饱和累积.

T225NG 合金与不锈钢不同之处在于, 不锈钢在数百循环周次下可以达到棘轮饱和, 且在均值应力较大范围内 ($\sigma_m > 20$ MPa), 疲劳寿命远大于棘轮饱和次数^[1,10], 因此在均值应力较小时峰值应力对饱和棘轮应变仍具有一元控制特性; 而 T225NG 合金在常温应力循环下, 棘轮应变达到饱和的次数需要数万次, 如果均值应力较小, 则局部疲劳损伤的速度高于塑性应变累积速度, 当达到疲劳破坏时材料不能达到棘轮变形饱和态, 因此原本制约饱和棘轮变形的峰值应力必然失去独立制约棘轮应变 ϵ_{cr} 的能力. 应认识到: 临界棘轮应变 ϵ_{cr} 不仅与峰值应力有关且与引起疲劳损伤的小均值应力有关.

图 21 还表明, 当均值应力 $\sigma_m=0$ MPa 时, 只要初始加载路径为 $0 \rightarrow \sigma_p$, 经过约 2000 次应力循环仍产生了 0.514% 的棘轮应变 (ϵ_{cr}).

7.3 幅值与均值应力对疲劳寿命的影响

图 22 给出了 $\sigma_p=390$ MPa 时的 $\sigma_a - 2N_f$ 和 $\sigma_m - 2N_f$ 实验曲线. 从实验结果的趋势看出, $\sigma_m - 2N_f$ 曲线随着均值应力增大从小到大变化, 当均值应力在 180—200 MPa 区域曲线则由高至低衰减, 曲线存在上凸区, 因而均值应力对疲劳寿命的影响不具有单调特性; 而 $\sigma_a - 2N_f$ 曲线随着幅值应力下降而逐渐衰减, 曲线趋势具有单调性, 即, 幅值应力越大寿命越短. $\sigma_a - 2N_f$ 曲线的单调性表明幅值应力制约了局部微裂纹的扩展, 因而是应力循环下制约单轴疲劳损伤的良好参量. 为了预测疲劳损伤

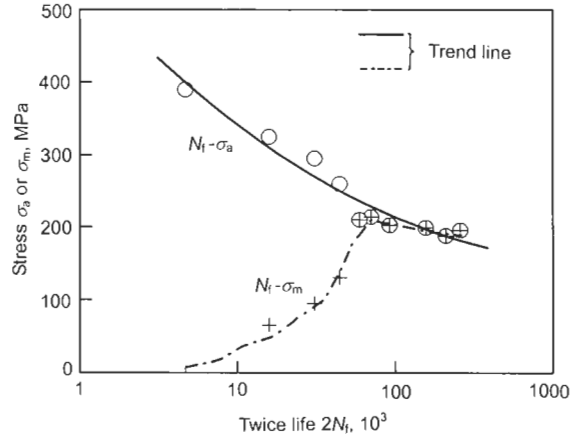


图 22 $\sigma_a - 2N_f$ 和 $\sigma_m - 2N_f$ 实验关系曲线

Fig.22 Test curves of $\sigma_a - 2N_f$ and $\sigma_m - 2N_f$ (regression relative coefficient to be 0.96 using Eq.(10))

引起的 T225NG 合金疲劳破断寿命, 仍采用幂律描述 $\sigma_a - 2N_f$ 关系:

$$\sigma_a = 2092.0(2N_f)^{-0.1977}, \quad \sigma_a \in [\sigma_p/2, \sigma_p] \quad (10)$$

式 (10) 对图 22 中实验数据的回归相关系数为 0.96. 该方程可用于估算常温应力循环下的单轴低周疲劳寿命.

8 结论

(1) T225NG 合金常温下经过数万次循环后棘轮达到饱和; 在高温下达到棘轮饱和和经历的循环次数大大减少, 温度越高达棘轮饱和和所需循环周次越少.

(2) 在单轴循环应力加载条件下, 峰值真应力主导正向棘轮变形起始与发展, 是控制饱和棘轮应变的一元应力参量.

(3) 温度对 T225NG 合金单轴饱和和棘轮应变随棘轮应力变化关系不产生影响, 仅影响材料的棘轮门槛应力, 温度越高棘轮门槛应力越低.

(4) 当峰值应力介于棘轮门槛应力与屈服强度之间, T225NG 合金的棘轮应变会发生变异演化.

(5) 饱和棘轮本构模型 SRMT 反映了棘轮饱和和材料单轴棘轮变形的物理本质, 模型与实验点之间有很好的相关性.

(6) 用单试样多级加载法建立 SRMT 模型和获得棘轮门槛应力值具有循环应力历史无关性, 该方法简便、有效.

(7) 当 $\sigma_m \in [0 - \sigma_p/2]$ 时, T225NG 合金的棘轮应变因局部损伤使材料较快达到疲劳破坏而不能达到饱和态, 此时峰值应力不能独立控制棘轮的塑性累积程度.

(8) 单轴应力循环加载下当幅值较大时, T225NG 合金在棘轮演化过程中将伴随疲劳损伤, 幅值应力是控制该合金低周应力疲劳破坏的良好参量.

参考文献

- [1] Cai L X, Niu Q Y, Liu Y J. *Acta Metall Sin*, 2002; 38(9): 966
(蔡力勋, 牛清勇, 刘宇杰. 金属学报, 2002; 38(9): 966)
- [2] Chaboche J L, Nouailhas D. *ASME J Eng Mater Technol*, 1989; 111(4): 384
- [3] Hassan T, Kriakides S. *Int J Plast*, 1992; 8: 91
- [4] Ohno N, Wang J D. *Int J Plast*, 1993; 9: 375
- [5] Jiang Y Y, Sehitoglu H. *ASME J Appl Mech*, 1996; 63: 720
- [6] Jiang Y Y, Sehitoglu H. *ASME J Appl Mech*, 1996; 63: 726
- [7] Mizuno M, Mima Y, Ohno N. *ASME J Eng Mater Technol*, 2000; 122(1): 29
- [8] Cai L X, Luo H F, Gao Q, Wang L, Qiu S Y. *Acta Nuclear Power Eng Sin*, 2002; 23(4): 12
(蔡力勋, 罗海丰, 高庆, 王理, 邱绍宇. 核动力工程, 2002; 23(4): 12)
- [9] The American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler & Pressure VESSEL CODE III, Division 1-Subsection NB, Class 1 Components, 1995
- [10] Cai L X, Luo H F, Sun Y F. *J Uni Sci Technol Beijing*, 2001; 23(S): 52
(蔡力勋, 罗海丰, 孙亚芳. 北京科技大学学报, 2001; 23(S): 52)