

描述不锈钢材料单轴棘轮行为的一元参量体系*

蔡力勋 牛清勇 刘宇杰

(西南交通大学应用力学与工程系, 成都 610031)

摘要 基于 304 不锈钢和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢单轴常温与高温应力循环棘轮实验, 提出了棘轮应力和棘轮门槛值的概念, 发展了一套基于棘轮应力一元参量的、描述高温棘轮循环饱和材料的单轴棘轮本构行为和常温演化行为的方法体系, 新体系降低了传统二元应力控制棘轮变形认识带来的难度. 由于新体系方程结构简洁, 建模方法简便, 描述实验结果精度高, 故适合工程应用.

关键词 棘轮, 塑性, 不锈钢, 模型, 本构

中图分类号 TG142.71, TH112.4 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2002)09-0966-08

METHODOLOGICAL SYSTEM TO DESCRIBE UNIAXIAL RATCHETTING BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL BY UNITARY PARAMETER

CAI Lixun, NIU Qinyong, LIU Yujie

Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong Univ., Chengdu 610031

Correspondent: CAI Lixun, professor, Tel: (028)87600851, Fax: (028)87600797, E-mail: lix_cai@263.net.

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

of National Key Laboratory for Nuclear Fuel and Material (51481070101QT2201)

Manuscript received 2001-10-18, in revised form 2002-02-23

ABSTRACT Based on a series of uniaxial ratchetting tests carried out for 304 and 1Cr18Ni9Ti stainless steels under cyclic stressing at room temperature and elevated temperature, the concepts of ratchetting stress and ratchetting stress threshold were presented and a set of methodological system was developed, which can be used not only to model evolved law of ratchetting strain of the materials under uniaxial stress at room temperature but also to simulate saturated ratchetting constitutive behavior of the materials at elevated temperatures. The presented system can overcome difficult problems to describe ratchetting deformation from traditional dualistic stress control. The ratchetting constitutive model and ratchetting evolved model given in this paper have better precision to regress experimental data and are accessible to engineering application due to better concision and easy establishment in equation.

KEY WORDS ratchetting, plasticity, stainless steel, model, constitution

材料因循环应力作用而产生的渐增性循环塑性应变累积称为棘轮变形 (ratchetting deformation). 当棘轮变形量达到等量循环增加的畸变状态时, 以及当棘轮变形达到高塑性量的循环饱和状态时, 棘轮塑性累积可导致构件尺寸超标或破坏失效. 棘轮行为给结构安全设计带来严峻挑战, 已经引起国内外学者和工程界的广泛重视. 近十几年来, 学术界普遍认为制约单轴棘轮行为的重要因素为: 应力幅 σ_a 、平均应力 σ_m 、应力率 $\dot{\sigma}$ 、循环次数 N 、温度 θ 、应力历史 χ 、温度历史 ξ , 即, 描述棘轮变形的

棘轮应变 ε_r 满足

$$\varepsilon_r = f(\sigma_a, \sigma_m, \dot{\sigma}, N, \theta, \chi, \xi) \quad (1)$$

由于制约因素的复杂性, 研究人员放弃了需要进行大量实验的单一材料的系统研究, 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. 因而现有本构模型预测精度较低且方法相当复杂, 故距适用还有相当大的距离. 已有文献报道了对不锈钢、碳钢、轨道钢等钢种在上述因素影响下大量棘轮行为实验结果^[1-6], 但实验均缺乏系统性, 尚未发展出奠基性的物理概念和揭示出十分有用的试验规律.

本文基于大量的单轴实验, 从新角度研究了循环中 $\sigma_a, \sigma_m, \sigma_v$ (谷应力)、 σ_p (峰应力) 以及 N, θ, χ, ξ 对棘轮应变的影响, 提出一元棘轮应力 σ_r 和棘轮门槛值 σ_{rth}

* 国家自然科学基金 19772041 和核燃料及材料国防科技重点实验室开放基金 51481070101QT2201 资助项目

收到初稿日期: 2001-10-18, 收到修改稿日期: 2002-02-23

作者简介: 蔡力勋, 男, 1959 年生, 教授

的概念；给出了描述饱和与非饱和棘轮材料棘轮演化规律的方法；提出了用于建立饱和棘轮材料饱和棘轮本构关系的单试样法和考虑温度影响的饱和棘轮材料本构关系。

1 实验方法

试样材料为两种材料：304 不锈钢、1Cr18Ni9Ti 不锈钢。304 钢和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢化学成分（质量分数，%）分别为：C 0.062, Mn 1.12, P 0.023, S 0.018, Si 0.74, Ni 10.27, Cr 18.57 和 C 0.064, Mn 1.72, P 0.032, S 0.015, Si 0.064, Ni 8.7, Cr 18.45, Ti 0.36。两种材料常规力学性能如表 1 所示。

表 1 材料常规力学性能
Table 1 General mechanical properties of the materials

Material	$\sigma_{0.2}$	σ_b	E	δ_5	ψ
	MPa	MPa	GPa	%	%
304 stainless steel	230	660	195	52	62
1Cr18Ni9Ti stainless steel	231	700	195	53	62

为使材料结构组织均匀，将两种不锈钢经 1100 °C +60 min+ 水冷固溶处理，然后加工成单轴棘轮实验试样，304 钢试样直径和等直段长为 8 mm 和 30 mm，1Cr18Ni9Ti 钢试样直径和等直段长为 5 和 10 mm。

实验设备为美国 MTS810(100kN)&809(25kN) 电液伺服材料试验机，其控制系统为 TestStar II 控制器。数控软件环境为 Window NT, MTS 应用软件为 TestWare/SX。MTS 载荷传感器和应变引伸计测量精度为 0.2%。高温发生与控制设备为 MTS653 系统，轴向均温区范围为 50 mm，该范围内温度梯度为 ±5 °C，温度控制精度为 ±1 °C。

所有棘轮实验的应力加载指令波形均为三角波：0→

$\sigma_p \leftrightarrow \sigma_v$ (σ_p 为峰值应力， σ_v 为谷值应力)，加载速率为 200 MPa/s。若单试样只接受单独工况 $\sigma_m \pm \sigma_a$ (σ_m 为均值应力， σ_a 为幅值应力) 的循环加载，则称该加载工况为独立加载工况。表 2 给出了两种材料试样在常温下的独立加载工况。

若在加载历程中不同应力水平的多级工况 $\sigma_p (= \sigma_m + \sigma_a)$ 组合在一起连续对单试样加载，则称该试样受了一个应力历史加载工况。表 3 给出了 304 不锈钢在不同温度下峰值应力 σ_p 历史加载工况，同时还给出了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在常温下峰值应力 σ_p 历史加载工况；表 4 给出了 304 不锈钢的温度历史加载工况。表 3,4 各种工况下的实验试样各为 1 个。

2 棘轮变形的控制参量

2.1 棘轮应变定义

棘轮应变是应力控制循环加载条件下循环塑性应变的逐步累积。国际上有 3 种棘轮应变的定义来反映这种循环塑性应变累积

$$\epsilon_r = (\epsilon_L + \epsilon_R)/2 \tag{2}$$

式中， ϵ_L 和 σ_R 可表示为：

塑性应变

$$\epsilon_{R(L)} = \epsilon_{\max(\min)}^T - \sigma_{R(L)}^T/E \tag{3}$$

峰、谷值总应变

$$\epsilon_{R(L)} = \epsilon_{\max(\min)}^T \tag{4}$$

峰值总应变

$$\epsilon_{R(L)} = \epsilon_{\max}^T \tag{5}$$

表 2 两种不锈钢材料常温独立加载工况集

Table 2 Single-loading conditions with constant σ_m and σ_a for the two stainless steels at room temperature (MPa)

Amplitude stress σ_a , MPa	Peak stress σ_p , MPa	Mean stress σ_m									Mean stress σ_m			
		304 Stainless steel									1Cr18Ni9Ti stainless steel			
		5	12.5	25	80	140	180	200	240	300	10	60	120	
5	205	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Y _a	—	Y _b	—
32.5	210	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Y _a	—	—	Y _b
60	225	—	—	—	—	Y _a	—	Y _a	—	Y _a	Y _b	—	—	—
90	240	—	—	—	—	—	—	—	—	Y _a	—	Y _b	Y _b	—
120	260	—	—	—	Y _a	Y _a	—	Y _a	—	Y _a	Y _b	—	—	—
180	280	—	—	—	Y _a	Y _a	—	Y _a	Y _a	Y _a	—	—	—	Y _b
210	285	—	—	—	—	—	—	Y _a	—	—	Y _b	—	—	—
220	300	—	—	—	Y _a	—	—	—	—	—	Y _b	—	—	—
240	320	—	—	Y _a	Y _a	Y _a	Y _a	Y _a	—	—	—	Y _b	Y _b	Y _b
300	340	Y _a	Y _a	Y _a	Y _a	Y _a	Y _a	—	—	—	—	—	—	Y _b
—	360	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Y _b	Y _b	Y _b

Note: Y_a—loading condition of steel 304: $\sigma_m \pm \sigma_a$, Y_b—loading condition of 1Cr18Ni9Ti steel: $\sigma_m \pm (\sigma_p - \sigma_m)$

表 3 两种不锈钢材料应力逐级加载工况

Table 3 Multi-grade loading conditions with progressive peak stresses for the two stainless steels

Material	Type	Cyclic loading histories of peak stress σ_p , MPa	Amplitude stress	N , cyc	Temperature
			σ_a , MPa		$^{\circ}\text{C}$
304 stainless steel	RTI	205→215→...→390→405(15grade)	45	200	RT
	RTII	205→215→...→390→405(15grade)	85	200	RT
	HT-200	180→190→...→310(14grade)	45	100	200
	HT-350	150→160→...→280(10grade)	45	100	350
	HT-500	100→110→...→260(17grade)	45	100	500
1Cr18Ni9Ti stainless steel	RT-120	200→210→225→240→260→280→300→315→335→355→370→380	120	200	RT
	RT-80	200→210→225→245→265→285→300→320→340→360→380→385	80	200	RT
	RT-40	200→210→230→250→270→290→310→325→345→365→385→410	40	200	RT
	RT-20	200→220→240→255→275→295→315→330→350→370	20	200	RT

表 4 304 不锈钢有温度历史 (200→350→300 $^{\circ}\text{C}$) 的加载工况
Table 4 Loading conditions with temperature history (200→350→300 $^{\circ}\text{C}$) of 304 steel

Type	Amplitude stress	Mean stress
	σ_p , MPa	σ_p , MPa
BW-1	85	155
BW-2	45	165

式 (3) 上标 T 表示材料变形和应力的真实状态时, 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 (轴力 P / 试样原始截面积 A_0); 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, ε_{\max}^T 和 ε_{\min}^T 分别为与折返工程应变 ε_{\max} 和 ε_{\min} 对应的真应力; 两参量 X_a 和 X_b 简记为 $X_{a(b)}$, 则式 (2, 3) 的定义表示棘轮应变为某循环下的平均塑性应变量, 式 (2, 4) 表明棘轮应变为某循环下的平均总应变量, 以及式 (2, 5) 表明棘轮应变为某循环下的峰值总应变量. 考虑到棘轮变形的塑性累积属性, 本文采用式 (2, 3) 定义棘轮应变, 记为 ε_r ; 若材料存在棘轮饱和状态, 则该状态下的棘轮应变记为 ε_r^s .

事实上, 上述 3 类棘轮应变定义均能反映塑性变形的累积, 因为 3 种应变之间存在相关性. 图 1a 示出了表 2 中独立加载工况下所有 304 不锈钢试样循环达到饱和和棘轮状态时的 $\varepsilon_{\max}^s - \varepsilon_r^s$ 关系, 图 2b 示出了表 2 独立加载工况和表 3 历史各级载荷工况下所有 1Cr18Ni9Ti 不锈钢试样循环达到饱和和棘轮状态时的 $\varepsilon_{\max}^s - \varepsilon_r^s$ 关系. 结果表明, 峰值应变与本文定义的棘轮应变呈如下线性关系

$$\varepsilon_{\max}^s = k_\varepsilon \varepsilon_r^s + c_0 \quad (6)$$

对于 304 钢, $k_\varepsilon=1.1093$, $c_0=-0.00078$; 对于 1Cr18Ni9Ti 钢, $k_\varepsilon=1.0813$, $c_0=0.00102$.

2.2 一元棘轮控制应力

根据表 2 所示 304 钢独立加载工况, 图 2, 3 给出了幅值应力 σ_a^T 和平均应力 ε_m^T 对 ε_r^s 的影响曲线和谷值应力 σ_v 对 ε_r^s 的影响曲线. 图 4a 给出了峰值应力 σ_p^T 对 ε_r^s 的影响曲线, 同时给出了先前 σ_p^T 的低应力循环历史对后继应变 ε_r^s 的影响情况. 结果表明: $\sigma_a^T, \sigma_m^T, \sigma_v^T$ 两两之间与 ε_r^s 的关系为并行曲线束, 即棘轮变形受 $\sigma_a^T, \sigma_m^T, \sigma_v^T$ 应力组中任意应力对的二元影响, 而 $\sigma_p^T - \varepsilon_r^s$ 关系不受 $\sigma_a^T, \sigma_m^T, \sigma_v^T$ 的制约, 说明棘轮饱和应变仅受峰值真应力 σ_p^T 的一元因素的影响. 对于 1Cr18Ni9Ti 钢, 图 4b 给出了表 2 所有独立加载工况以及表 3 单试样逐级加载工况下的 $\sigma_p^T - \varepsilon_r^s$ 实验关系, 实验结果进一步证实, 峰值真应力是控制材料棘轮变形的单一参量.

作者近期已经有实验证明, 在 $\sigma_m=0$ 时对称应力循环加载条件下, 由于初始拉伸应力 (或压缩应力) 的作用, 仍然会发生正向 (或负向) 棘轮变形. 当 $\sigma_m < 5$ MPa 的加载工况下棘轮变形是否仍由峰值真应力来控制, 其棘轮行为需要进一步实验来揭示. 当 σ_a 为零时, 加载工况退化为蠕变加载条件, 定常应力控制下在较长时间内会产生蠕变应变, 定常应力超过屈服应力时, 其值越大, 蠕变变形越严重. 显然峰值真应力仍然是控制蠕变变形的单一应力参量. 这时的时间参量可理解为脉动应力幅值 σ_a (数值微小) 的脉动循环次数.

2.3 棘轮变形的门槛应力特性

注意到图 4 的 $\sigma_p^T - \varepsilon_r^s$ 实验曲线与峰值应力坐标轴相交, 作者将交点应力定义为棘轮门槛应力值, 记为 σ_{rth} .

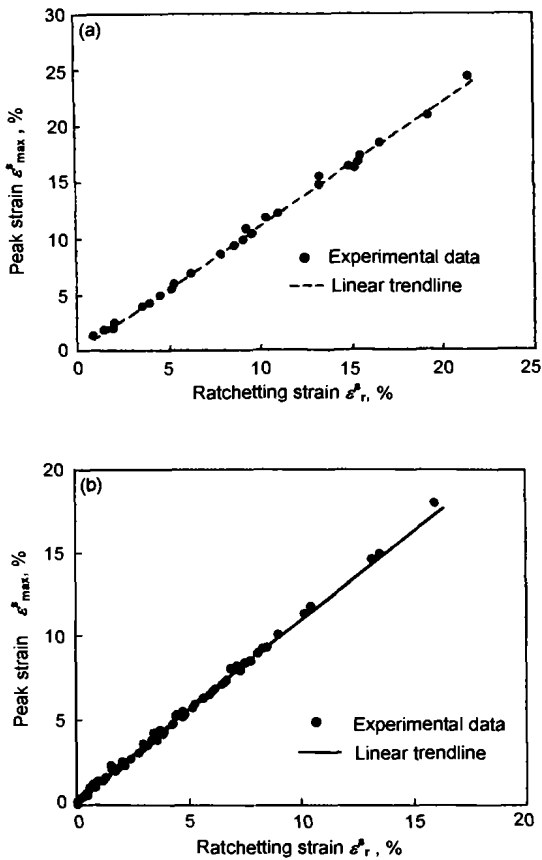


图 1 304 和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 $\epsilon_{max}^s - \epsilon_r^s$ 实验关系
 Fig.1 Relationship between peak strain ϵ_{max}^s and ratchetting strain ϵ_r^s of 304 steel (a) and 1Cr18Ni9Ti stainless steel (b)

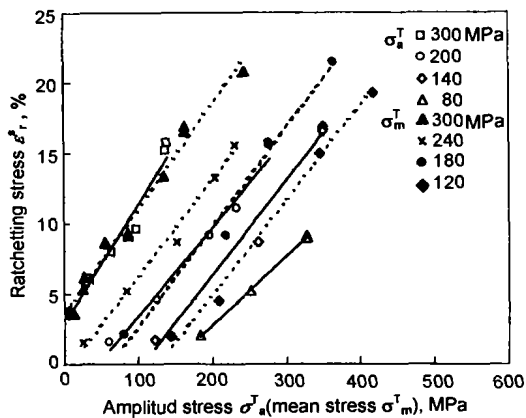


图 2 304 不锈钢 $\epsilon_r^s - \sigma_a^T$ (σ_m 恒定) 与 $\epsilon_r^s - \sigma_m^T$ (σ_a 恒定) 的实验关系
 Fig.2 Experimental relationships between ϵ_r^s and σ_a^T with constant σ_m or between ϵ_r^s and σ_m^T with constant σ_a for 304 stainless steel

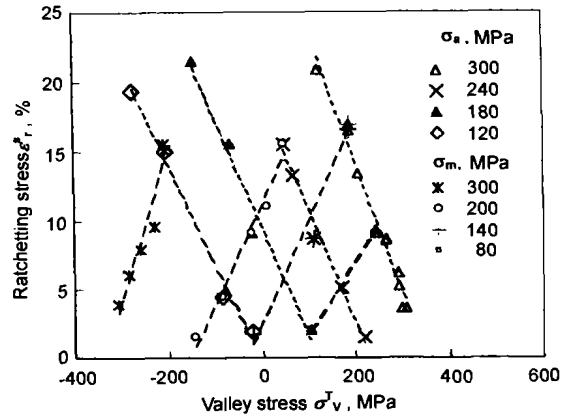


图 3 304 不锈钢 σ_a 和 σ_m 恒定下的 $\epsilon_r^s - \sigma_v^T$ 实验关系
 Fig.3 Experimental relationships between ϵ_r^s and σ_v^T with constant σ_m or with constant σ_a of 304 stainless steel

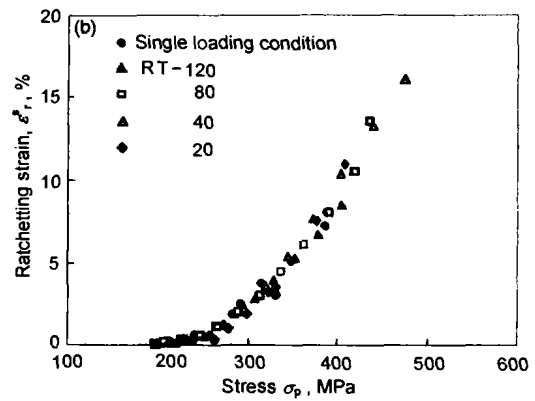
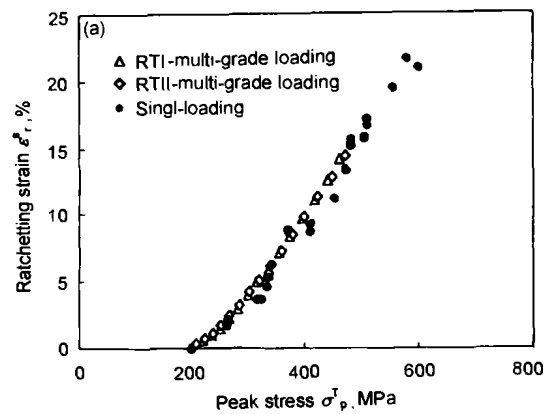


图 4 304 和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 $\sigma_p^T - \epsilon_r^s$ 实验关系
 Fig.4 Experimental relationship between σ_p^T and ϵ_r^s of 304 steel (a) and 1Cr18Ni9Ti stainless steel (b)

其物理意义为当峰值应力低于 σ_{rth} 时材料将不发生棘轮变形, 换句话说, 当不锈钢存在正向棘轮变形时峰值应力

一定高于其门槛应力. 对不同材料, σ_{rth} 是特定材料常数. 计算表明, 304 钢和 1Cr18Ni9Ti 钢的 σ_{rth} 分别为 212 和 203 MPa, 它们低于材料的屈服强度 $\sigma_{0.2}$. 对于幂

律材料, 单调拉伸曲线的应力从弹性加载部分到达名义屈服应力, 不同程度存在非线性塑性变形, 因此反映塑性起点的棘轮门槛应力低于名义屈服强度. 对于多数材料, 实验未得到精确的 σ_{rth} 时, 其近似估计值可取为 $0.9\sigma_{0.2}$.

2.4 峰值应力历史效应

从图 4 还可以看出, 304 钢在 RT-I 和 RT-II 逐级加载工况下以及 1Cr18Ni9Ti 钢在 RT-20, RT-40, RT-80, RT-120 逐级加载工况下, $\sigma_p^T - \epsilon_r^s$ 实验点与表 2 独立工况下 $\sigma_p^T - \epsilon_r^s$ 实验点均集中在很小的分散带内. 这清楚表明, 棘轮变形与先前低应力水平的循环历史无关. 文献 [7] 的研究还表明, 后继低循环应力水平下饱和棘轮变形相对先前最高循环应力水平下的饱和棘轮变形并无增加. 因此饱和棘轮应变不受低应力历史的影响, 而仅与应力历史中的高峰值应力有关.

2.5 棘轮应力定义

根据棘轮应变随峰值应力单调变化并存在棘轮门槛值的上述实验规律, 定义棘轮应力 σ_r 如下:

$$\sigma_r = \sigma_p^T - \sigma_{rth} (\sigma_r \geq 0) \quad (7)$$

式中

$$\sigma_p^T = (\sigma_m + \sigma_a)(1 + \epsilon_{max}) \quad (8)$$

其中, ϵ_{max} 与 ϵ_r 的关系可由 (6) 式给出.

本文根据棘轮实验新现象所定义的棘轮应变 ϵ_r 与棘轮应力 σ_r 之间满足一元应力函数关系, 这将大大降低传统二元应力控制棘轮变形认识带来的棘轮变形描述的难度. 如果不考虑应力率的影响, 则棘轮应变演化方程 (1) 将简化为:

$$\epsilon_r = f(\sigma_r, N, \theta, \xi) \quad (9)$$

3 单轴饱和棘轮本构模型

3.1 基于单试样法的常温饱和棘轮本构模型

对于常温饱和棘轮状态下的不锈钢材料, 式 (9) 可简化为 $\epsilon_r = f(\sigma_r)$. 根据图 4 所示, 实验点具有抛物律趋势, 可假定 $\epsilon_r^s - \sigma_r$ 本构模型满足如下方程:

$$\epsilon_r^s = \alpha_r (\sigma_r / \sigma_{0.2})^2 + k_r (\sigma_r / \sigma_{0.2}) \quad (10)$$

其中 α_r 和 k_r 称为棘轮系数. 对于特定材料, α_r, k_r 和 σ_{rth} 是唯一确定的, 因而是材料常数. 该抛物循环饱和棘轮本构模型可用于预测单轴循环应力条件下的最大棘轮应变, 故称为饱和棘轮本构模型, 简称为 SRM 模型 (saturated ratchetting model).

由于饱和棘轮应变与先前较低峰值真应力的历史无关, 可以采用表 3 所示单试样在多级峰值应力循环饱和和加载方法获得模型式 (10), 该方法简称为单试样法. 当 $\sigma_r > 0$ 时, 304 钢的 SRM 本构模型可由路径为 RTI 和 RTII 下的单试样多级循环应力饱和和实验数据通过方

程式 (10) 回归获得: $\sigma_{rth} = 202 \text{ MPa}$, $\alpha = 0.04084$, $k_r = 0.07526$; 1Cr18Ni9Ti 钢的 SRM 模型可由路径为 RT-20 RT-120 的单试样多级循环应力饱和和实验数据通过方程 (10) 式回归获得: $\sigma_{rth} = 193.5 \text{ MPa}$, $\alpha = 0.1145$, $k_r = 0.0005200$. 两种材料的 SRM 模型的方程回归相关系数均达到 0.99.

3.2 考虑温度效应的饱和棘轮本构模型

图 5 给出了表 3 和表 4 所列 304 不锈钢恒定高温工况 (HT-200, HT-350, HT-500) 和变温工况 (BW-1, BW-2) 下的 $\sigma_p^T - \epsilon_r^s$ 实验点. 可见, 变温实验点和恒温实验点分布在同一温度趋势线上, 先前较低温度下的棘轮历史对后继较高温度的饱和棘轮应变状态影响不大. 因此 304 不锈钢的饱和棘轮应变取决于加载历史中的最大峰值应力和最高温度水平, 较低峰值应力和温度水平下的棘轮历史对后继较高应力和温度水平下的饱和棘轮应变无影响. 这一特性将使得高温饱和棘轮状态下 304 不锈钢饱和棘轮本构方程简化为 $\epsilon_r = f(\sigma_r, \theta)$.

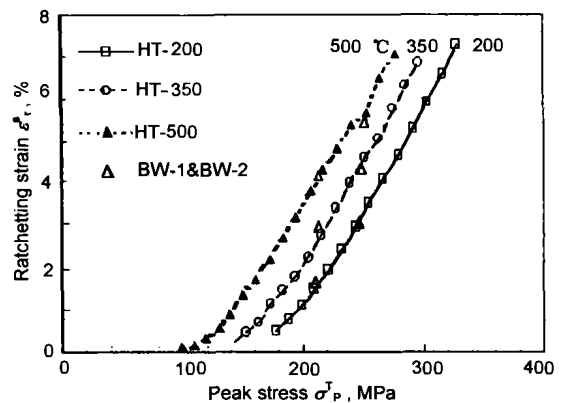


图 5 304 不锈钢变温与恒温工况下饱和棘轮应变实验结果比较

Fig.5 Experimental results of strain ϵ_r^s at fixed elevated temperatures (Table 3) and at various elevated temperatures (Table 4) of 304 steel

图 5 表明, 随着温度的提高, 恒温下的单试样 $\epsilon_r^s - \sigma_p^T$ 曲线向减少棘轮应力的方向平移, 即, 在相同峰值应力下温度越高材料的棘轮变形越严重. 根据 SRM 模型可得在室温, 200 °C, 350 °C, 500 °C 下, 304 不锈钢的棘轮门槛应力值分别为 202, 163, 139 和 108 MPa. 不难得知, $\sigma_{rth} - \theta$ 关系呈线性规律:

$$\sigma_{rth} = -0.193\theta + 205 \text{ (MPa)} \quad (11)$$

该关系表明棘轮门槛应力值对温度较敏感.

图 6 给出了表 3 工况下不锈钢的 $\epsilon_r^s - \sigma_r$ 实验关系, 显然不同温度下各 $\epsilon_r^s - \sigma_r$ 实验点重合在一起, 即 $\epsilon_r^s - \sigma_r$ 关系不受温度影响. 由此, 常温 $\epsilon_r^s - \sigma_r$ 关系可以替代高温工况下的 $\epsilon_r^s - \sigma_r$ 曲线. 含温度效应的饱和棘轮本构关系满足

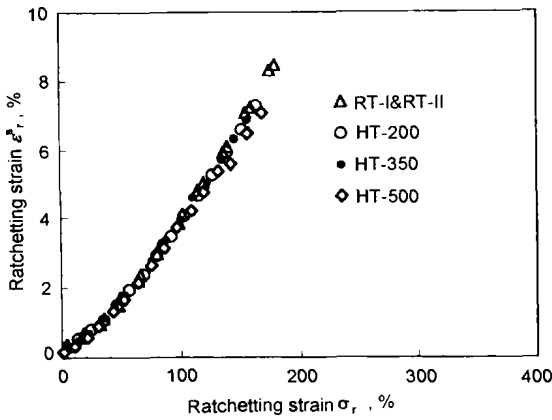


图 6 304 不锈钢 ϵ_r^s - σ_r 实验关系

Fig.6 Experimental relationship between ϵ_r^s and σ_r of 304 steel

如下统一方程:

$$\begin{cases} \epsilon_r^s = \alpha_r(\sigma_r/\sigma_{0.2})^2 + k_r(\sigma_r/\sigma_{0.2}) \\ \sigma_{rth} = \alpha_T + k_T \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\alpha_r, k_r, \sigma_{0.2}$ 为 SRM 模型常温参量, α_T 和 k_T 为高温效应参量, 式 (12) 为考虑温度效应的饱和棘轮本构模型, 简称为 SRMT 模型 (Saturated ratchetting model with temperature effect). 对于 304 不锈钢, $\alpha_r, k_r, \sigma_{0.2}, \alpha_T, k_T$ 和 σ_{rth} 分别为 4.084%, 7.526%, 230 MPa, -0.193 MPa/°C 和 205 MPa.

3.3 SRM 和 SRMT 模型对饱和棘轮应变的预测

利用饱和棘轮本构模型 SRM (式 10) 可较方便地根据棘轮应力实现对 304 不锈钢循环饱和棘轮应变的预测. 图 7 给出了独立加载工况和单试样多级加载工况下 SRM 模型的预测结果与试验结果的对比情况. 可见预测点紧靠 45° 精确解线并绝大部分落在 1.2 倍安全因子线内, 偏差最大的点也未超过 2 倍安全因子线. 图 8 给出了 SRMT 统一模型 (式 12) 对 4 种温度下的 ϵ_r^s - σ_p^T 实验结果的预测情况, 可见 SRMT 模型用于预测饱和棘轮应变有很好的精度. 由于建立模型只需通过单试样的多级加载法, 因而方法简便, 特别适合工程应用.

4 常温棘轮演化模型

如果忽略温度因素的影响, 则根据棘轮应变的演化特性, 假设独立加载工况下棘轮应变演化规律满足:

$$\bar{\epsilon}_r = 1 - \alpha N^\beta \quad (13)$$

式中 $\bar{\epsilon}_r = \epsilon_r/\epsilon_r^s, N > 1, \alpha, \beta$ 是特定应力状态下的材料常数, 称为棘轮演化参量. 该模型简称为 REM 模型 (Ratchetting evolution model).

对表 1 各工况实验结果进行回归表明, 用 REM 模型可以用来很好地描述独立棘轮加载工况下不锈钢材料的

棘轮应变演化规律, 对数线性相关系数均高达 0.98. 图 9 给出了模型式 (13) 对大、中、小峰值应力下 4 个不同试样的棘轮应变实验演化规律的模拟情况, 实验点与模型符合相当好.

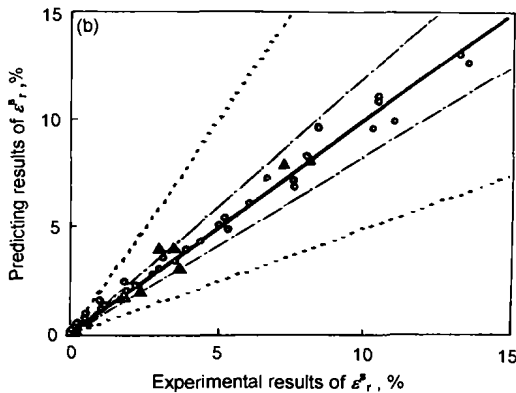
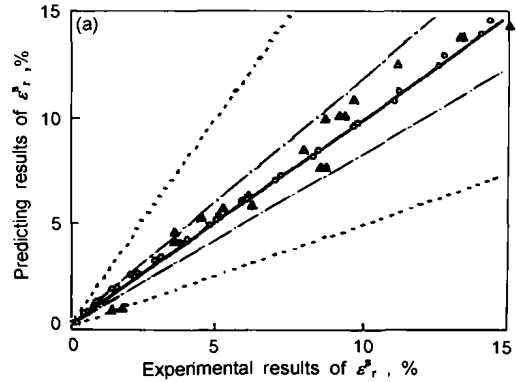


图 7 304 和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢棘轮应变 ϵ_r^s 实验结果与预测值的比较

Fig.7 Comparison of SRM predictions with experiments for 304 steel (a) and 1Cr18Ni9Ti steel (b)
— Accuracy line, ··· Line with twice safe factor, - - - Line with 1.2 time safe factor, Δ Results under single loadings, \circ Results under multi-grade loadings

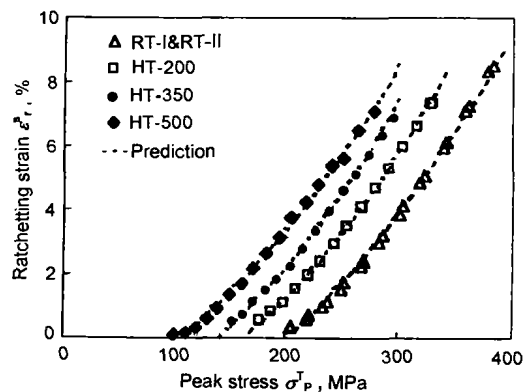


图 8 SRMT 模型对实验结果的预测

Fig.8 Simulations of strain ϵ_r^s by SRMT

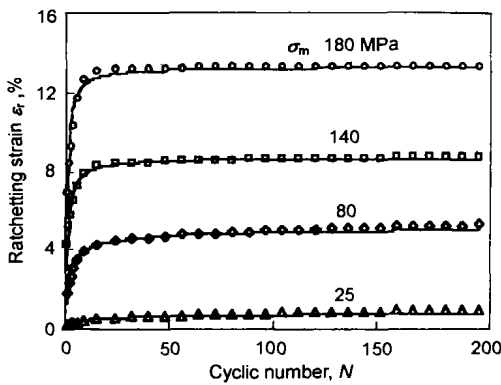


图9 REM模型对实验数据的模拟情况
 Fig.9 Regressions for experimental data by REM
 $\sigma_a=240$ MPa, — Regression curves

事实上, 式 (13) 中的 α, β 是应力状态的函数. 图 10 给出了两种不锈钢材料在各独立实验工况下 REM 模型的 α, β 结果随棘轮应力 σ_r 的变化关系, 可以看出 α 和 β 均与 σ_r 表现出较好的单调线性依赖关系. 因此棘轮应力不仅是棘轮饱和应变的控制量也是棘轮演化程度的控制量. 进而表明棘轮应变仅与循环次数 N 和棘轮应力 σ_r 有关.

根据式 (10) 和 (13), 对饱和棘轮材料, 可以得到棘轮演化应变预测的完整方程:

$$\epsilon_r = [\alpha_r(\sigma_r/\sigma_{0.2})^2 + k_r(\sigma_r/\sigma_{0.2})](1 - \alpha N^\beta) \quad (14)$$

上式称为棘轮演化统一模型, 简称为 URM 模型 (universal ratchetting model). 对于 304 和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 棘轮系数 k_r 、棘轮门槛值 σ_{rth} 与棘轮演化参量 α, β 与棘轮应力 σ_r 的关系 (图 10 给出) 均已通过实验获得. 图 11 给出了 URM 模型式 (14) 对 304 和 1Cr18Ni9Ti

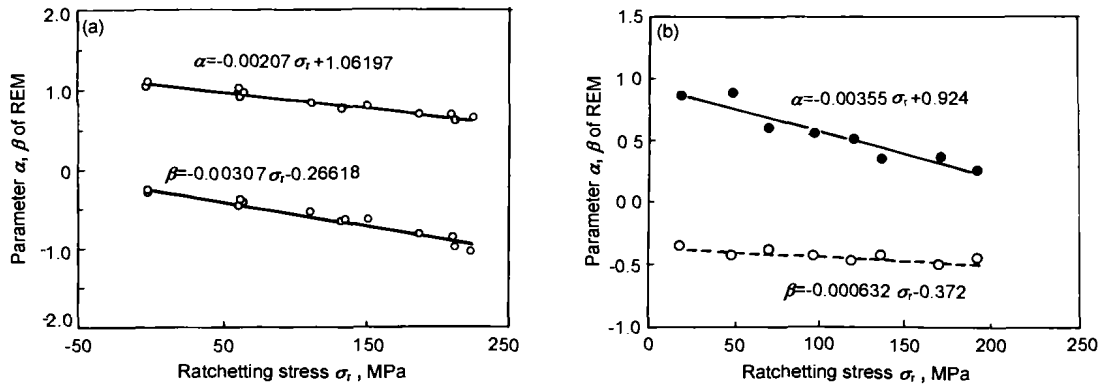


图 10 304 和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的 $\sigma_r-\alpha$ 和 $\sigma_r-\beta$ 关系曲线
 Fig.10 Curves of $\sigma_r-\alpha$ and $\sigma_r-\beta$ for 304 (a) and 1Cr18Ni9Ti (b) stainless steels
 — Linear line (α), - - - Linear line (β)

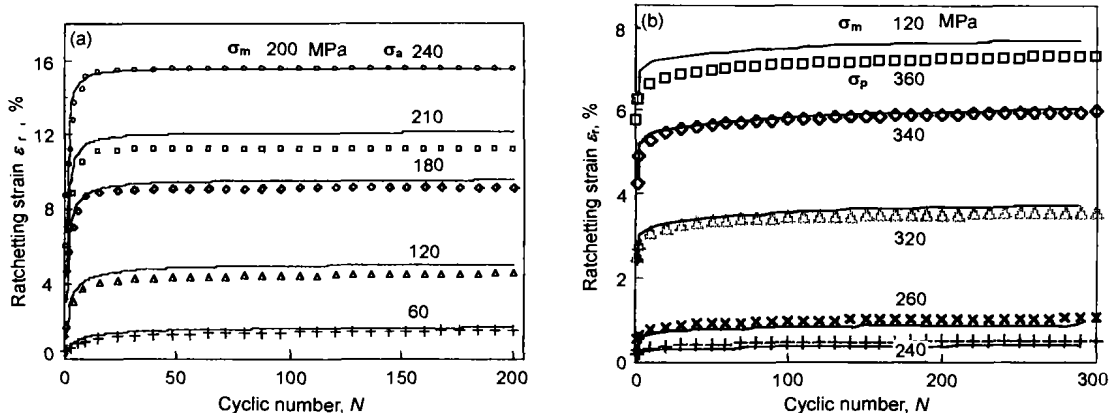


图 11 URM 模型对不同应力加载工况下 304 和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢材料棘轮应变演化规律的预测
 Fig.11 Simulations of evolved ratchetting strain by URM under various loading conditions of 304 (a) and 1Cr18Ni9Ti (b) stainless steel

1Cr18Ni9Ti 不锈钢在不同循环应力加载水平下的棘轮应变随循环次数演化规律的预测情况,并给出了两种材料的 α, β 回归算式. 可见,无论在平均应力和应力幅水平为小值还是大值的控制载荷下, URM 对两种不锈钢材料的循环棘轮应变演化规律的预测结果与实验结果均符合得相当好. 需要指出,本文的 REM 方法适合独立加载工况的棘轮应变演化规律的描述,不适用于描述具有历史效应的棘轮应变演化规律.

国际上现有单轴棘轮本构模型^[1-5],一方面理论方程形式非常复杂,由实验确定的控制参数较多且迭代求解需要很高的经验调试技巧,另一方面,近十年的研究文献表明,现有模型多对特定循环加载工况 $\sigma_m \pm \sigma_a$ 下及在有限循环次数内的棘轮变形描述有效,但对较广泛的单轴棘轮加载工况下棘轮变形的精确预测尚无可信报道,因而现有棘轮本构模型距工程应用有很大的差距. 建立在棘轮应力单变量控制棘轮变形原理上的 SRM 饱和棘轮模型和 URM 棘轮演化统一模型给棘轮饱和材料的棘轮变形控制与设计的工程应用提供了方便可行的方法.

5 结论

(1) 工程峰值应变 σ_{max} 以及峰、谷真应变的均值 ε_r 均能恰当地反映塑性变形累积效应,两种应变之间存在良好线性相关特性.

(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) 棘轮应力定义为峰值真应力(发生正向棘轮变形时)与峰值真应力阈值之差.

(4) 温度对不锈钢单轴饱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.

(5) 饱和棘轮本构模型 SRM 和棘轮演化模型 REM 反映了棘轮饱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 SRM 模型和获得棘轮门槛应力值具有循环应力历史无关性,方法简便、有效.

(7) 建立在一元棘轮应力控制棘轮变形原理上的方法体系不仅可以描述有温度效应的单轴饱和棘轮应变的变化规律也可以得到材料的棘轮演化规律,对棘轮饱和材料的棘轮大变形控制有很好的工程应用前景.

(8) 本文给出了 304 钢和 1Cr18Ni9Ti 钢的 SRM 模型参数和 URM 棘轮演化统一模型参数.

感谢中国核动力院核燃料与材料国防科技重点实验室对本文 304 不锈钢实验所提供的 MTS 设备支持.

参考文献

- [1] Chaboche J L, Nouailhas D. *J Eng Mater Technol*, 1989; 111: 384
- [2] Hassan T, Kriakides S. *Int J Plasticity*, 1992; 8: 91
- [3] Ohno N, Wang J D. *Int J Plasticity*, 1993; 9: 375
- [4] Jiang Y Y, Sehitoglu H. *J Appl Mechan*, 1996; 63: 720
- [5] Jiang Y Y, Sehitoglu H. *J Appl Mechan*, 1996; 63: 726
- [6] Yang X J, Gao Q, Cai L X. *Acta Aeronautica Astronautica Sin*, 1997; 18: 395
(杨显杰, 高庆, 蔡力勋, 航空学报, 1997; 18: 395)
- [7] Cai L X, Luo H F, Gao Q. *Acta Aeronautica Astrohoutica Sin*, 2002; 23: 17
(蔡力勋, 罗海丰, 高庆, 航空学报, 2002; 23: 17)