

# 描述 T225NG 钛合金高温单轴棘轮 行为的黏塑性本构模型

刘宇杰<sup>1</sup>, 蔡力勋<sup>1</sup>, 邱绍宇<sup>2</sup>, 杨显杰<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学应用力学与工程系, 610031, 成都; 2. 中国核动力研究院核燃料与材料国家重点实验室, 610041, 成都)

**摘要:** 在 350 °C 下对 T225NG 钛合金进行了单轴棘轮试验研究, 提出了一种新的带有记忆面的黏塑性本构模型. 引入了能记忆最大应变的记忆面, 在记忆面内和面上采用不同形式的塑性流动律, 将单调拉伸响应和循环响应独立开来, 简化了模型参数的确定方法. 在背应力随动硬化演化方程中引入了等效应变门槛值, 可较好地描述 T225NG 钛合金应力-应变曲线的屈服平台及其后的强化效应. 加入黏性指数修正, 可描述棘轮应变率随循环次数迅速衰减的试验现象. 将模型应用于 T225NG 钛合金 350 °C 单轴棘轮行为描述中, 对饱和棘轮应变的预测结果与试验结果吻合较好.

**关键词:** 棘轮; 本构模型; 高温; 钛合金

**中图分类号:** O344; O346 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)03-0321-04

## Visco-Plastic Constitutive Model for Uniaxial Ratcheting Behavior of T225NG Titanium Alloy at Elevated Temperature

Liu Yujie<sup>1</sup>, Cai Lixun<sup>1</sup>, Qiu Shaoyu<sup>2</sup>, Yang Xianjie<sup>1</sup>

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

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

**Abstract:** The uniaxial ratcheting behavior of T225NG titanium alloy at 350 °C was experimentally investigated. A new visco-plastic constitutive model with the memory surface was presented. A memory surface for maximum strain was introduced and different plastic flow rules were applied according to the memory surface. The monotonic tensile response and cyclic response were separated and the determination of constants in the model was simplified. The threshold of equivalent strain was introduced into the evolution equation for kinematic hardening back stress and the yield platform and hardening effect were described exactly. To describe the experimental phenomenon that ratcheting strain rate decreases quickly with the increasing of cyclic number, the modification of viscosity exponent was adopted. The model was applied to simulation for uniaxial ratcheting behavior of T225NG alloy at 350 °C, and demonstrated a satisfied agreement of the simulated results with the experimental ones.

**Keywords:** ratcheting; constitutive model; elevated temperature; titanium alloy

棘轮效应指金属材料在非对称应力循环加载下产生的塑性应变循环积累现象, 是在设计承受循环载荷的部件和结构时需要考虑的一个重要问题. 随

着有限元软件的广泛应用, 使得用基于描述材料循环塑性变形行为的本构模型来预测构件的棘轮变形行为成为可能, 因此发展循环塑性本构模型具有重

要意义. 近年来,国内外研究者对金属材料的棘轮效应进行了大量的试验研究<sup>[1-3]</sup>,并形成了一些本构模型<sup>[4-7]</sup>,较有代表性的有基于随动强化背应力演化的Chaboche<sup>[4]</sup>和 Ohno<sup>[5]</sup>模型等,其中 Chaboche 模型已经嵌入 ANSYS 和 Marc 有限元软件中.然而,现有的本构模型大都基于常温下不锈钢类材料的棘轮行为试验,而高温下材料的棘轮行为更加复杂,在试验和本构描述上都需要做更深入的研究.在国内,对于本文研究的 T225NG 钛合金棘轮行为,除蔡力勋等人<sup>[8,9]</sup>开展了一些工作外,还鲜见有报道.

针对 T225NG 钛合金的实际工作环境,本文根据 T225NG 钛合金在 350 °C 下的单轴棘轮试验与分析,并基于黏塑性循环本构框架,引入能记忆最大应变的记忆面,对记忆面上和面内采用不同形式的塑性流动律,将单调拉伸与循环响应区别开来,并在背应力随动强化律中引入了描述屈服平台的应变门槛值来描述材料的强化特性,最后利用本文建立的带有记忆面的黏塑性本构模型,对 T225NG 钛合金在 350 °C 下的单轴棘轮行为进行了模拟,并与试验结果进行了比较.

## 1 试验方法与结果

### 1.1 材料、设备和试验方法

试样材料为 T225NG 钛合金,其化学成分(质量分数)为: C 0.02%, Si 低于 0.04%, Al 2.0%, Zr 2.45%, N 0.016%, Fe 0.03%, H 0.001%, O 0.08%. 在 350 °C 下,其屈服应力、抗拉强度和杨氏模量分别为 221 MPa、306 MPa 和 83 GPa. 将 T225NG 钛合金原材料进行高温固溶处理并加工成圆棒状试样,试样等直段直径和长度分别为 6 mm 和 40 mm. 应变通过标距为 25 mm 的 MTS632.68F-08 高温引伸计测量,高温发生与控制设备为 MTS653 系统,试验设备为 MTS809(25 kN)电液伺服材料试验机.

在 350 °C 下对 T225NG 试样进行应力控制下的单轴拉压循环棘轮行为试验,加载指令为三角波形,加载频率为 4 Hz. 加载工况可表示为  $\sigma_m \pm \sigma_a$ , 其中  $\sigma_m$  为平均应力,  $\sigma_a$  为应力幅值. 所有加载工况见表 1.

表 1 350 °C 下 T225NG 的试验加载工况

编号	$\sigma_m$ /MPa	$\sigma_a$ /MPa
1	120	120
2	130	130
3	167	83
4	180	90
5	193	97

万方数据

本文中,单轴棘轮应变定义为

$$\epsilon_r = (\epsilon_{max}^p + \epsilon_{min}^p) / 2 \tag{1a}$$

$$\epsilon_{max}^p = \epsilon_{max}^t - \sigma_{max}^t / E \tag{1b}$$

$$\epsilon_{min}^p = \epsilon_{min}^t - \sigma_{min}^t / E \tag{1c}$$

式中:  $\epsilon_{max}^p$  和  $\epsilon_{min}^p$  分别为 1 次循环中的最大和最小塑性应变;  $\epsilon_{max}^t$  和  $\epsilon_{min}^t$  分别表示 1 次循环中的最大和最小真应变;  $\sigma_{max}^t$  和  $\sigma_{min}^t$  分别为与应变  $\epsilon_{max}^t$  和  $\epsilon_{min}^t$  所对应的真应力. 真应变和真应力的表达式分别为  $\epsilon^t = \ln(1 + \epsilon)$  和  $\sigma^t = \sigma(1 + \epsilon)$ . 棘轮应变率  $\dot{\epsilon}$  定义为每一个循环下棘轮应变的增量,当  $\dot{\epsilon} \leq 1 \times 10^{-8}$  /次时认为材料达到棘轮饱和状态,对应的棘轮应变称之为饱和棘轮应变.

### 1.2 试验结果与讨论

图 1 和图 2 给出了部分加载工况的试验结果. 和室温下的棘轮行为<sup>[9]</sup>相比, T225NG 在 350 °C 下的棘轮行为减弱,在数千次循环内就能达到饱和,而常温下 T225NG 需数万至数十万次循环方能达到饱和. 由图 2 可见, T225NG 的应力-应变曲线有明显的屈服平台,在应变大于 1.2% 后产生明显的强化,此现象对 T225NG 的棘轮行为有很大影响. 对多个加载工况的试验结果分析表明: 当应变小于 1.2% 时,该材料有明显的棘轮行为,棘轮效应达到饱和需要的循环次数较多; 当应变大于 1.2% 后,材料产生明显强化,黏性下降,棘轮率随循环次数的增

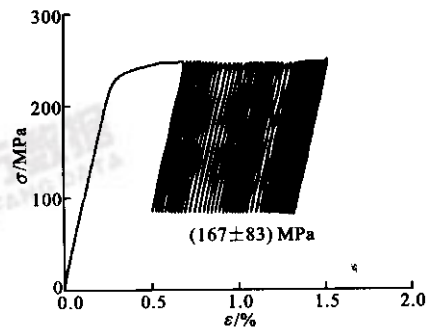


图 1 工况 3 的循环应力-应变曲线

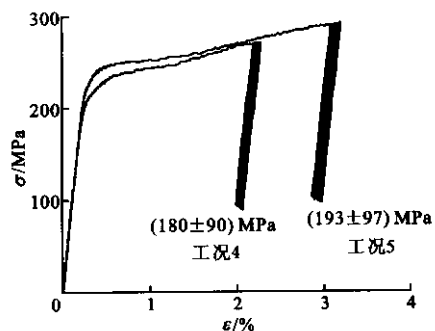


图 2 工况 4、工况 5 的循环应力-应变曲线

加而迅速下降,棘轮效应很快趋于饱和.在该材料的循环本构描述中,应该对此现象加以考虑.

## 2 带有最大应变记忆面的黏塑性本构模型

### 2.1 黏塑性本构方程

等温条件下的黏塑性本构方程一般描述为

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^1 + \epsilon_{ij}^e \quad (2a)$$

$$\epsilon_{ij}^e = \mathbf{D}_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2b)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^1 = \left(\frac{3}{2}\right)^{1/2} \left\langle \frac{F_y}{K} \right\rangle^n \frac{S_{ij} - \alpha_{ij}}{\|S_{ij} - \alpha_{ij}\|} \quad (2c)$$

$$F_y = [1.5(S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij})]^{1/2} - Q \quad (2d)$$

式中: $\epsilon_{ij}$ 为总应变; $\epsilon_{ij}^1$ 为非弹性应变; $\epsilon_{ij}^e$ 为弹性应变; $\dot{\epsilon}_{ij}^1$ 为非弹性应变率; $\mathbf{D}_{ijkl}$ 为弹性矩阵; $K$ 为黏性阻力系数; $n$ 为材料的黏性指数, $n$ 越小材料的黏性越显著; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij}$ 为偏应力; $\alpha_{ij}$ 为偏背应力; $Q$ 为材料的各向同性变形阻力; $\langle \cdot \rangle$ 为 Macauley 括号,当  $x \leq 0$  时  $\langle x \rangle = 0$ ,当  $x > 0$  时  $\langle x \rangle = x$ .正确描述材料应力-应变响应的关键在于合理地描述背应力、各向同性变形阻力和非弹性应变率的演化.

### 2.2 最大应变的记忆面

本文在应变空间中引入能记忆最大应变的超曲面  $F$ ,并在最大应变记忆面内和面上采用不同的塑性流动率.这可将记忆面上的单调拉伸响应和记忆面内的循环响应解耦,在不改变单调拉伸响应的情况下调节循环响应,使参数的确定方法得以简化.采用 Chaboche<sup>[4]</sup>提出的最大塑性应变记忆面  $F$

$$F = \frac{2}{3}(\epsilon_{ij}^1 - \zeta_{ij}^1)(\epsilon_{ij}^1 - \zeta_{ij}^1) - q^2 \leq 0 \quad (3a)$$

$$\dot{\zeta}_{ij}^1 = \frac{H(F)}{2} \langle \dot{\epsilon}_{kl}^1 n'_{kl} \rangle n'_{ij} \quad (3b)$$

$$\dot{q} = \frac{1}{2} H(F) \lambda \dot{p} \quad (3c)$$

式中

$$n'_{ij} = (\partial F / \partial \epsilon_{ij}^1) / \|\partial F / \partial \epsilon_{ij}^1\|$$

$$n_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^1 / \|\dot{\epsilon}_{ij}^1\|$$

$$\lambda = \begin{cases} n_{ij} n'_{ij}, & \text{当 } F = 0, \quad n_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^1 > 0 \\ 0, & \text{当 } F < 0 \text{ 或 } n_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^1 \leq 0 \end{cases}$$

$H(F)$ 为 Heaviside 函数,当  $F \geq 0$  时  $H(F) = 1$ ,当

$$F < 0 \text{ 时 } H(F) = 0; \dot{p} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^1 \dot{\epsilon}_{ij}^1\right)^{1/2}.$$

### 2.3 塑性应变流动律

采用式(3)所示的基于记忆面的塑性流动律来

代替式(2c)

$$\dot{\epsilon}_{ij}^1 = \left(\frac{3}{2}\right)^{1/2} \left\langle \frac{F_y}{K} \right\rangle^{n_0 + [1 - H(F)]n(p)} \frac{S_{ij} - \alpha_{ij}}{\|S_{ij} - \alpha_{ij}\|} \quad (4)$$

式中: $n(p) = b \ln(p) + n_1$ .在式(4)中将式(2c)中的黏性指数  $n$  改为累积塑性应变  $p$  的函数  $n_0 + [1 - H(F)]n(p)$ ,该函数的值随  $p$  的增大而增大.通过引入该函数,在  $p$  增大时对  $n$  进行修正,反映材料的黏性随  $p$  的增加而减弱,从而可描述由于黏性引起的那一部分棘轮应变率随循环次数的增加而迅速下降的试验现象.

### 2.4 背应力的随动强化律

已有的许多循环塑性本构模型<sup>[4-6]</sup>都采用了 Armstrong-Frederick 背应力非线性随动强化律或其改进形式.本文采用如下改进的 A-F 非线性随动强化律

$$\dot{\alpha}_{ij} = \frac{2}{3} C(\epsilon_{\max}^{\text{eq}}) \dot{\epsilon}_{ij}^1 - \gamma \alpha_{ij} \dot{p} \quad (5)$$

式中: $C(\epsilon_{\max}^{\text{eq}}) = C_0 + H(\epsilon^{\text{eq}} - \epsilon_{\text{th}}^{\text{eq}})(d \epsilon_{\max}^{\text{eq}} + C_1)$ ,其中  $H(\epsilon^{\text{eq}} - \epsilon_{\text{th}}^{\text{eq}})$  是 Heaviside 函数, $\epsilon^{\text{eq}}$ 是等效应变, $\epsilon_{\max}^{\text{eq}}$ 是最大等效应变, $\epsilon_{\text{th}}^{\text{eq}}$ 为等效应变门槛值,它对应于屈服平台区的结束点, $C_0$ 、 $d$ 、 $C_1$ 均为与温度有关的材料常数; $p$ 是累积塑性应变; $\gamma$ 是动态恢复项.引入  $C(\epsilon_{\max}^{\text{eq}})$ 是为了在等效应变大于门槛值后叠加一个随应变增加而递增的线形强化项,以描述屈服平台后的强化曲线.

### 2.5 模型中参数的确定

通过对单轴拉伸试验曲线进行拟合可以得到材料常数  $K$  和  $n$ ,根据初始弹性范围可确定  $Q$ ,对几个工况的循环加载试验曲线进行非线性拟合可以确定其他参数.350 °C 下模型所用的材料常数如表 2 所示.

表 2 模型所用的材料常数

$K/\text{MPa}$	$Q/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$n_0$	$n_1$	$b$
131	212	83	5	8.852	1.587
$C_0/\text{GPa}$	$C_1/\text{GPa}$	$d$	$\gamma$	$\epsilon_{\text{th}}^{\text{eq}}$	
8.8	-8.22	$1.05 \times 10^6$	510	0.012	

## 3 模型对单轴棘轮的描述能力

利用本文提出的带有最大应变记忆面的黏塑性本构模型,对表 1 所示加载条件下 T225NG 的棘轮行为进行了模拟,模拟结果如图 3、图 4 所示.从图中可知,该模型能较好地描述应力-应变曲线在屈服

平台后的强化,还能较好地描述棘轮应变率随循环次数  $N$  的增长而迅速下降,棘轮效应饱和的试验现象.在数千次循环范围内,预测的多个工况的饱和棘轮应变与试验结果符合较好.在加载工况为  $(120 \pm 120)$  MPa 时,预测的棘轮应变的演化过程与试验结果有一定的误差,但在循环载荷的结构分析中,常只限于分析循环的稳定状态,故给出的饱和棘轮应变在工程应用中已经足够.本文提出的黏塑性本构模型减少了为描述棘轮演化过程而引入的其他参数,使本构模型得以简化,便于工程应用.

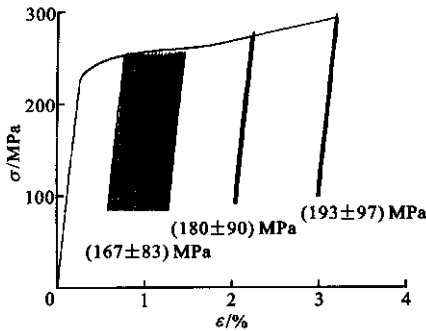


图3 模拟的应力-应变曲线

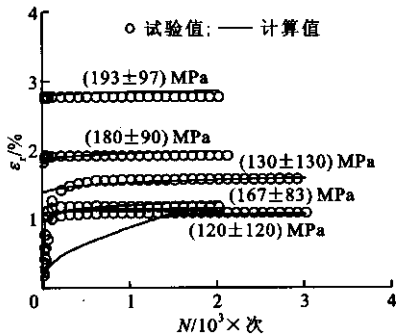


图4 棘轮应变-循环次数关系

## 4 结论

基于对  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  下 T225NG 钛合金的棘轮试验结果分析,本文提出的黏塑性本构模型在以下几方面进行了改进:

(1)引入最大应变记忆面,在记忆面内和面上采用了不同的塑性应变流动律,将单调拉伸响应和循环响应独立开来,简化了模型参数的确定方法;

(2)在背应力随动硬化演化方程中引入了等效应变门限值,可较好地描述 T225NG 钛合金应力-应变曲线的屈服平台及其后的强化效应;

(3)加入黏性指数修正,可描述棘轮应变率随循环次数迅速衰减的试验现象.

模拟结果与试验结果的比较表明,本文提出的带有最大应变记忆面的黏塑性本构模型能较好地描述 T225NG 钛合金在  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的棘轮行为,预测的饱和棘轮应变有较高精度.

## 参考文献:

- [1] Chaboche J L, Nouailhas D. Constitutive modeling of ratcheting effects, part I: experimental facts and properties of classical models [J]. ASME J Eng Mater Tech, 1989, 111(4):384-392.
- [2] 杨显杰,高庆,蔡力勋. 316L 不锈钢的单轴棘轮效应[J]. 航空学报,1997,18(4):395-400.
- [3] Mizuno M, Mima Y, Ohno N. Uniaxial ratcheting of 316FR steel at room temperature, part I: experiments [J]. ASME J Eng Mater Tech, 2000, 122(1):29-33.
- [4] Chaboche J L, Nouailhas D. Constitutive modeling of ratcheting effects, part II: possibilities of some additional kinematic rules [J]. ASME J Eng Mater Tech, 1989, 111(4):409-416.
- [5] Ohno N, Wang J D. Constitutive modeling of cyclic plasticity with emphasis on ratcheting [J]. Int J Mechanical Sciences, 1998,40(2-3):251-261.
- [6] 高庆,康国政,杨显杰,等. 304 不锈钢高温多轴非比例循环棘轮行为的粘塑性本构描述[J]. 核动力工程, 2002,23(3):22-29.
- [7] 刘宇杰,蔡力勋,高庆. 考虑温度效应的材料单轴饱和棘轮本构模型研究[J]. 北京科技大学学报,2001, 23(s):59-61.
- [8] 蔡力勋,刘宇杰,邱绍宇. T225NG 合金的高温单轴棘轮行为研究[J]. 西安交通大学学报,2004,38(7):762-766.
- [9] 蔡力勋,牛清勇,刘宇杰,等. 应力循环下 T225NG 合金塑性累积行为研究[J]. 核动力工程,2004,25(4): 352-356.

(编辑 葛赵青)