

文章编号: 1000-6893(2005)01-0058-04

描述 1Cr18Ni9Ti 不锈钢单轴棘轮行为的黏塑性本构模型

刘宇杰, 蔡力勋, 杨显杰, 牛清勇

(西南交通大学 应用力学与工程系, 四川 成都 610031)

Visco-Plastic Constitutive Model for Uniaxial Ratcheting Behavior of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel

LIU Yu-jie, CAI Li-xun, YANG Xian-jie, NIU Qing-yong

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

摘要: 在室温下对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢进行了单轴棘轮实验研究, 提出了一种新的分离型黏塑性本构模型。引入了能记忆最大塑性应变的记忆面, 在记忆面内和面上采用不同形式的塑性应变流动律和背应力演化律, 将单调拉伸和循环行为分别独立描述。将模型应用于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢单轴棘轮行为的描述中, 模拟结果和实验结果吻合较好。

关键词: 不锈钢; 棘轮; 本构模型; 黏塑性; 随动硬化

中图分类号: TG142.71 **文献标识码:** A

Abstract: The uniaxial ratcheting behavior of 1Cr18Ni9Ti stainless steel at room temperature is experimentally investigated. A new separate visco-plastic constitutive model is presented. A memory surface for maximum plastic strain is introduced and different plastic strain flow rules and evolution rules of back stress are applied according to the memory surface. The monotonic tensile behavior and cyclic behavior of the material are separately described independently. The model is applied to simulation for uniaxial ratcheting behavior of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. It is shown that the simulative results agree well with the experimental ones.

Key words: stainless steel; ratcheting; constitutive model; visco-plasticity; kinematic hardening

棘轮效应指金属材料在非对称应力循环加载条件下产生的塑性应变循环积累现象(Ratcheting)。它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, 例如压力容器、高温下工作的核反应堆、航空发动机构件等。有限元软件的广泛应用, 使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, 国内外研究者对棘轮效应进行了大量研究^[1~3], 并形成了一些本构模型^[4~8]。然而, 现有的本构模型都有各自的局限性, 不同材料的本构模型也不尽相同。本文基于对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在室温下进行的单轴棘轮实验与分析, 并基于黏塑性循环本构框架, 引入了能记忆最大塑性应变的记忆面, 对记忆面上和面内采用不同形式的塑性应变流动律和背应力随动强化律, 将单调拉伸与循环响应区别开来, 建立了分离型黏塑性本构模型, 对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢单轴棘轮行为进行了模拟, 并与实验结果进行比较。

1 实验方法与结果

(1) 材料、设备和实验方法 试样材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 其化学成分(重量百分比)为 C: 0.064, Mn: 1.72, P: 0.032, S: 0.015, Si: 0.064, Ni: 8.7, Cr: 18.45, Ti: 0.36。屈服强度、抗拉强度和杨氏模量分别为 231MPa、700MPa 和 195 GPa, 延伸率和断面收缩率分别为 53% 和 62%。将 1Cr18Ni9Ti 不锈钢原材料进行高温固溶处理并加工成圆棒状试样。试样的等直段直径和长度分别为 $\phi 5\text{mm}$ 和 10mm。应变通过标距为 5mm 的 MTS632.29F-30 引伸计测量。实验设备为 MTS809(25kN) 电液伺服材料试验机。

室温下对 1Cr18Ni9Ti 试样进行应力控制单轴拉压循环棘轮行为实验。加载条件为, 平均应力分别为 120 MPa 和 110 MPa, 应力幅值分别为 235 MPa 和 205 MPa, 循环 300 周, 加载速率为 200 MPa/s。加载工况可表示为: $m \pm a$, 其中, m 为平均应力, a 为应力幅值。

单轴棘轮应变定义为

$$r = (\sigma_{\max,p} + \sigma_{\min,p}) / 2 \quad (1a)$$

$$\sigma_{\max,p} = \sigma_{\max,T} - \sigma_{\max,T} / E \quad (1b)$$

收稿日期: 2003-12-19; 修订日期: 2004-04-27

基金项目: 核燃料与材料国防科技重点实验室开放基金(51481070101QT2201)资助项目

$$\min_{,p} = \min_{,T} - \min_{,T} / E \quad (1c)$$

式中: $\max_{,p}$ 和 $\min_{,p}$ 分别为一个循环中的最大和最小塑性应变; $\max_{,T}$ 和 $\min_{,T}$ 表示一个循环中的最大和最小真应变; $\max_{,T}$ 和 $\min_{,T}$ 分别为与应变 $\max_{,T}$ 和 $\min_{,T}$ 所对应的真应力。真应变和真应力的表达式分别为 $\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon_p)$ 和 $\sigma_T = (1 + \epsilon_p) \sigma_p$ 。

(2) 实验结果与讨论 实验加载条件下, 1Cr18Ni9Ti 不锈钢产生明显的棘轮效应。每一周的棘轮应变增量随循环周次的增加而迅速下降, 很快接近于零。实验结果见图 1 和图 2。在循环历程中, 应力应变滞回环几乎完全封闭且形状无明显变化, 但在滞回环顶部当应变大于先前最大应变时, 应变率会发生增长性突变, 在前几个循环中表现尤为突出。Mizuno 和 Ohno^[3] 对 316FR 不锈钢室温棘轮行为研究表明, 在循环前几周中, 黏塑性在棘轮应变的增长中占主要部分, 它随循环次数的增长而迅速衰减, 因此黏塑性导致了上述应变率突变。在循环后期, 滞回环微小的不封闭性是棘轮应变缓慢增长的主要原因。在循环本构描述中, 应该将这两种不同的效应区别开来。

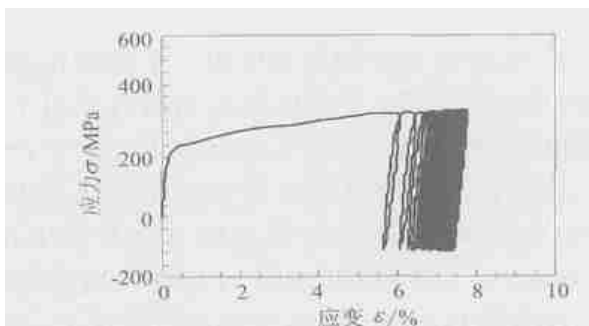


图 1 应力-应变曲线 (120 ± 235 MPa)
Fig. 1 Stress-strain curve (120 ± 235 MPa)

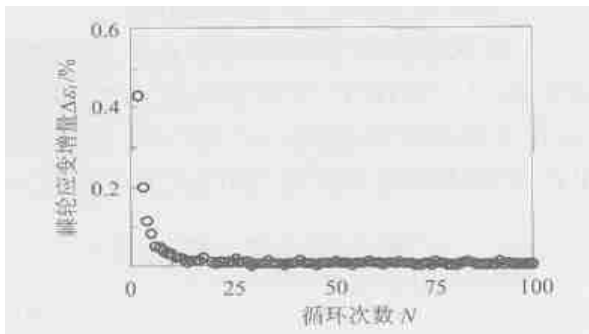


图 2 棘轮应变增量和循环次数关系 (120 ± 235 MPa)
Fig. 2 The relationship between increment of ratcheting strain and cyclic times (120 ± 235 MPa)

棘轮应变增量迅速减小, 同时应力应变滞回环形状无大的改变, 这在棘轮行为的本构描述中

是一个难点。

3 分离型黏塑性本构模型

(1) 黏塑性本构方程 等温条件下黏塑性本构方程一般描述为

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij,I} + \dot{\epsilon}_{ij,e} \quad (2a)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij,e} = E_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (2b)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij,I} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{F_y}{K} n \frac{S_{ij} - \bar{\epsilon}_{ij}}{S_{ij} - \bar{\epsilon}_{ij}} \quad (2c)$$

$$F_y = \sqrt{1.5 (S_{ij} - \bar{\epsilon}_{ij}) (S_{ij} - \bar{\epsilon}_{ij})} - Q \quad (2d)$$

式中: ϵ_{ij} 是总应变; $\epsilon_{ij,I}$ 为非弹性应变; $\epsilon_{ij,e}$ 为弹性应变; $\dot{\epsilon}_{ij,I}$ 为非弹性应变率; E_{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; $S_{ij} = \frac{1}{3} \epsilon_{kk} \epsilon_{ij}$ 为偏应力; $\bar{\epsilon}_{ij}$ 为偏背应力; Q 为材料的各向同性变形阻力; $\langle x \rangle$ 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的描述背应力、各向同性变形阻力和非弹性应变率的演化。

(2) 最大塑性应变的记忆面 本文采用 Chaboche^[4] 提出的能记忆最大塑性应变的记忆面 $f(\epsilon_{ij})$

$$f = \frac{2}{3} (\dot{\epsilon}_{ij,I} - \dot{\epsilon}_{ij,V}) (\dot{\epsilon}_{ij,I} - \dot{\epsilon}_{ij,V}) - q^2 \leq 0 \quad (3a)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij,I} = \frac{H(f)}{2} (\dot{\epsilon}_{ij,I} n_{kl}) n_{ij} \quad (3b)$$

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

式中: $n_{ij} = \frac{\partial f / \partial \epsilon_{ij,I}}{\partial f / \partial \epsilon_{ij,I}}$; $n_{ij} = \frac{\partial f / \partial \epsilon_{ij,I}}{\partial f / \partial \epsilon_{ij,I}}$;

$$= \begin{cases} n_{ij} n_{ij} & \text{当 } f = 0, n_{ij} \dot{\epsilon}_{ij,I} > 0 \\ 0 & \text{当 } f < 0 \text{ 或 } n_{ij} \dot{\epsilon}_{ij,I} \leq 0 \end{cases}$$

$H(f)$ 为 Heaviside 函数: 当 $f > 0$ 时, $H(f) = 1$; 当 $f \leq 0$ 时, $H(f) = 0$ 。

(3) 塑性应变流动律 本文采用式(4)所示的基于记忆面的塑性流动律来代替式(2c)。式(4)在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分别描述, 将黏塑性和循环塑性区别开来, 能描述 1Cr18Ni9Ti 不锈钢单轴棘轮滞回环顶部存在的应变率突变。

$$\dot{\epsilon}_{ij,I} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{F_y}{K} n_0 H(f) n_0 \frac{S_{ij} - \bar{\epsilon}_{ij}}{S_{ij} - \bar{\epsilon}_{ij}} \quad (4)$$

式中: n_0 是单调拉伸关系黏性指数与循环黏性指

数的差值。

(4) 背应力的随动强化律 已有的许多循环塑性本构模型^[4~7]都采用了 Armstrong-Frederick (1966) 提出的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:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{2}{3} C \dot{\epsilon}_{ij,1} - (p) \dot{\epsilon}_{ij} \quad (5)$$

式中: $(p) = G[1 + (1 - \dots) \exp(-bp)] [1 - H(f)]$; p 是累积塑性应变; $\dot{p} = \left[\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij,1} \dot{\epsilon}_{ij,1} \right]^{1/2}$; C, G, b 均为与材料有关的参数。引入 (p) 是为了将各向同性强化效应引入背应力演化中, 反映弹性区域中心的移动。 > 1 时, 表示循环强化, < 1 时, 表示循环软化。 (p) 含有 $H(f)$ 是为了将循环强/软化作用限定在记忆面内, 即动态恢复项 (p) 只在记忆面内起作用。

(5) 各向同性变形阻力的演化 采用如下形式的各向同性变形阻力 Q 的演化方程

$$\dot{Q} = (Q - Q) \dot{p} [1 - H(f)] \quad (6)$$

式中: Q 为材料常数, 它与材料达到循环稳定的快慢有关; Q 为循环稳定时的各向同性变形阻力; \dot{p} 为累积塑性应变率。 \dot{Q} 中的 $[1 - H(f)]$ 项, 将 Q 的演化限定于记忆面内。

(6) 模型中参数的确定 通过对几个不同应变率下的单轴拉伸实验曲线进行回归可以得到材料常数 K 和 n , 根据初始弹性范围可确定 Q , 对循环加载实验曲线进行非线性拟合可以确定其它参数。室温下模型所用的材料常数如表 1 所示。

表 1 模型所用的材料常数

Table 1 The material constants used in the model

模型常数		常数值			
K	Q	E	435 MPa	133 MPa	163 GPa
n	n_0	C	5	0.5	1900 MPa
G	b		50	29	0.008
	Q		10	173 MPa	

4 模型对单轴棘轮的描述能力

利用所提出的带有记忆面的黏塑性本构模型采用表 1 中材料常数对室温下 120 ± 235 MPa 和 110 ± 205 MPa 加载条件下的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢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滞回环顶部应变率突变; 也能较好描述棘轮应变增量随循环次数 N 的增长而迅速下降, 棘轮效应趋于饱和的实验现象; 在较大循环次数范围 (300 周) 内, 预测的棘轮应变和实验结果符合较好, 相对误差不超过 9%。

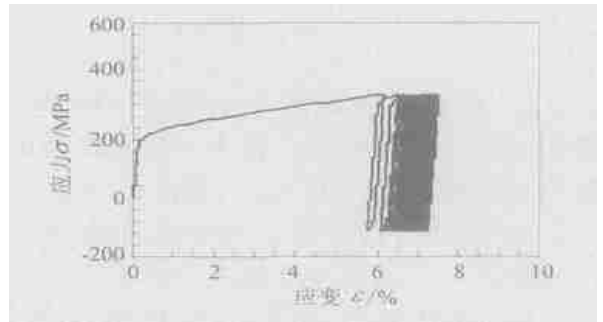


图 3 模拟的循环应力-应变曲线 (120 ± 235 MPa)

Fig. 3 Simulated results of stress-strain curve (120 ± 235 MPa)

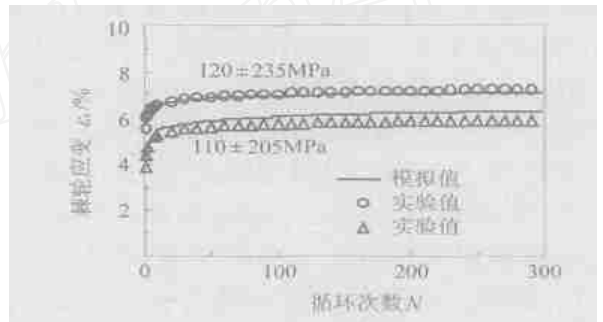


图 4 棘轮应变和循环次数关系

Fig. 4 The relationships between ratcheting strain and cyclic times

5 结论

(1) 在黏塑性本构模型中引入了能记忆最大塑性应变的记忆面, 对记忆面上和面内采用不同的塑性应变流动律, 并将背应力演化限定于记忆面内, 使记忆面上的单调拉伸响应和记忆面内的循环响应解耦, 单调拉伸响应成为经典的 Ramberg-Osgood 关系, 循环响应为背应力随动强化关系, 改变循环响应不会影响单调拉伸行为, 使模型参数的确定得以简化, 也与实验现象相符。该特点对于多种金属材料具有普遍性。

(2) 本文提出的分离型黏塑性本构模型能较好地描述 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的室温单轴棘轮行为, 在较大循环次数范围 (300 周) 内, 预测的棘轮应变和实验结果符合较好, 相对误差不超过 9%。

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.
Yang X J, Gao Q, Cai L X. On the ratchetting effects of

- 316L stainless steel under uniaxial loading [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(4):395 - 400. (in Chinese)
- [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 I: possible of some additional kinematic rules [J]. ASME J Eng Mater Tech, 1989, 111(4):409 - 416.
- [5] Ohno N, Wang J D. Kinematic hardening rules for simulation of ratcheting behavior [J]. Eur J Mech A/ Solids, 1994, 13(4):519 - 531.
- [6] Ohno N, Wang J D. Constitutive modeling of cyclic plasticity with emphasis on ratcheting [J]. Int J Mechanical Science, 1998, 40(2-3):251 - 261.
- [7] 高庆, 康国政, 杨显杰. 304 不锈钢室温单轴循环棘轮行为的黏塑性本构描述[J]. 固体力学学报, 2002, 23(2):167 - 172.
Gao Q, Kang G Z, Yang X J. Viscoplastic constitutive model for uniaxial ratcheting of 304 stainless steel at room temperature [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2002, 23(2):167 - 172. (in Chinese)
- [8] 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.

Liu Y J, Cai L X, Gao Q. Modeling of saturated ratcheting strain under uniaxial cyclic stress loading at elevated temperature [J]. Journal of Beijing Science and Technology University, 2001, 23(s):59 - 61. (in Chinese)

作者简介:



刘宇杰(1978 -) 男,西南交通大学固体力学专业硕士研究生,研究方向:金属材料棘轮行为,Email:yjliu6@163.com

蔡力勋(1959 -) 男,西南交通大学应用力学与工程系教授,1986年研究生毕业于西南交通大学固体力学专业,主要从事试验固体力学和材料本构方面研究,网址:<http://mtscail.swjtu.edu.cn>. Email:lix-cai@263.net, 电话:(028)87602706。

杨显杰(1964 -) 男,西南交通大学教授,博士,1992年西南交通大学固体力学专业毕业,从事复杂加载下的材料本构关系研究。

牛清勇(1977 -) 男,武汉科技大学讲师,硕士,2003年西南交通大学固体力学专业毕业,从事力学专业教学工作。

(责任编辑:李铁柏)