

非等温循环粘塑性本构模型研究*

西南交通大学 杨显杰** 高庆 孙训方

【摘要】 本文提出了一个考虑在非等温条件下循环硬化行为的温度依赖性的粘塑性本构模型。在该模型中,引入了三个具有不同演化速率的背应力演化方程;对各向同性变形阻力引入了具有先前加载历史和温度历史记忆的演化方程。将本文模型用于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的单轴非等温循环加载历史下材料变形行为的本构描述中,其预言结果与实验结果吻合较好,表明该模型能很好地描述材料在非等温条件下的循环变形行为。

主题词: 粘塑性 周期性载荷 建立模型 本构关系

1 前言

材料高温本构关系的研究一直是近来国际力学界、工程界十分感兴趣的研究领域之一,航空、航天、核电、化工等高新技术产业的迅速发展是其主要动力。提高性能、延长使用寿命、避免服役时破坏是高温环境下结构设计的主要目标。许多高温部件受到复杂加载和温度变化的迭加作用,其变形和应力响应十分复杂,经典的高温本构理论难以精确地描述这些复杂行为。现有某些高温本构模型限于对等温条件下的循环变形行为进行描述,对于非等温条件,某些模型^{1,2)}通过对背应力演化方程引入温度率项的办法来描述材料的变形行为。然而,这些模型都不能较好地反映诸如 304、316 不锈钢在单轴循环时所反映出来的温度历史依赖性。

本文针对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在单轴循环时的温度历史依赖性³⁾,提出了一个具有温度历史记忆的粘塑性本构模型。在多种恒温改变历史下,1Cr18Ni9Ti 不锈钢的单轴循环变形行为的预言结果与相应的实验结果吻合较好。

2 粘塑性本构模型

在高温环境下的多轴本构方程为:

$$\epsilon_j = \epsilon_j^I + \epsilon_j^E + \epsilon_j^T \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_j^E = D_{ijkl} \dot{\alpha}_l \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_j^T = \frac{3}{2} < F_y / K >^n \frac{S_{ij} - \alpha_j}{\|S_{ij} - \alpha_j\|} \quad (3)$$

$$F_y = 1.5(S_{ij} - \alpha_j)(S_{ij} - \alpha_j) - Q \quad (4)$$

上面诸式中, ϵ_j 为总应变, ϵ_j^I 为非弹性应变, ϵ_j^E 为弹性应变, ϵ_j^T 为温度应变, K 为粘性阻力系数, S_{ij} 为偏应力, α_j 为背应力, Q 为材料变形阻力, $< >$ 为 Macauley 符号。

2.1 随动硬化演化律

金属材料在变形过程中,材料硬化规律受到多种微观机理的控制^[4],短程背应力饱和速率快,长程背应力饱和速率慢。Armstrong 和 Frederick^[5]的非线性随动硬化演化律能够表征背应力的饱和趋势。可以对该非线性随动硬化演化律进行改进,来实现对这些微观机理的表征。本文引入如下具有三个不同速率的背应力演化方程:

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_{ij} = C_1(2/3a_1\dot{\epsilon}_{ij} - \psi(p)\alpha_{ij}p) \\ \psi(p) = \psi_{\infty} + (1 - \psi_{\infty})\exp(-bp) \quad , \quad p = (2/3\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij})^{1/2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\dot{\alpha}_{ij} = C_2(2/3a_2\dot{\epsilon}_{ij} - \alpha_{ij}p) \quad , \quad \dot{\alpha}_{3j} = C_3(2/3a_3\dot{\epsilon}_{ij} - \alpha_{3j}p) \quad (6)$$

$$\dot{\alpha}_j = \dot{\alpha}_{ij} + \dot{\alpha}_{2ij} + \dot{\alpha}_{3ij} \quad (7)$$

2.2 非等温条件下各向同性变形阻力 Q 的演化方程

材料循环硬化行为受到材料位错亚结构的支配,材料的层错能对位错滑移模式起决定性作用,而温度又对材料层错能的大小产生显著影响。一般来讲,当温度足够高时,材料层错能也很高,螺型位错易于交滑移,刃型位错易于攀移^[6]。此时,材料容易形成胞状、迷宫状位错亚结构,这些位错亚结构对后继较低温度下在外载作用下的位错亚结构产生影响。为了考虑温度对材料位错亚结构的影响,引入表观变形阻力:

$$Q_{asm} = Qc(T) \quad (8)$$

在上式中, $c(T)$ 是与温度相关的函数。通过它来反映材料在温度 T 时的材料微结构表征,从而达到反映材料循环变形的温度及温度历史效应的目的。为了考虑材料循环变形行为对先前历史的衰减记忆效应,将材料对先前历史的记忆考虑为对先前最大表观变形阻力 $Q_{asm\max}$ 的非完全衰减记忆,有:

$$Q_{sa} = Q_{s1} + \langle Q_{asm\max} - Q_{as1} \rangle \omega(T)/c(T) \quad (9)$$

$$Q_{as1} = Q_{s1}c(T) \quad (10)$$

$$Q_{asm\max} = \max_{i=0}^{ta} [Q_{asm}] \quad (11)$$

$$Q_{s1} = Q_{s1}(q, T) \quad (12)$$

上面诸式中, Q_{s1} 为当前循环路径下的循环各向同性变形阻力饱和值, q 为当前循环路径的最大非弹性应变幅值, $Q_{asm\max}$ 为先前加载历史中的最大表观变形阻力。 $\langle \rangle$ 为Macauley符号, $\omega(T)$ 是与温度有关的表观变形阻力衰减记忆参数, ta 代表当前加载时刻。

为了考虑循环变形阻力随加载历史的演化,同时,考虑温度变化对变形阻力的影响, Q 的演化方程为:

$$\dot{Q} = \gamma(Q_{sa} - Q)p + (\partial Q / \partial T) \dot{T} \quad (13)$$

上面诸式组成的 Q 的演化方程中, $c(T)$ 为温度 T 的增函数。尽管在较高温度下各向同性变形阻力 Q 较小,但其表观变形阻力 Q_{asm} 在温度较高时反而比同等条件下 T 较低时的 Q_{asm} 大,通过对先前历史中最大表观变形阻力的非完全衰减记忆,可描述由实验观察^[3]所发现的单轴循环硬化行为对先前最高温度下循环历史的非完全衰减记忆这一实验现象。若 Q 大于 Q_{sa} ,则也能描述材料的循环软化现象。

3 高温粘塑性本构模型的预言能力

在进行本文本构模型的数值模拟过程中,采用时间步长自动选取的预估-校正数值积分法,以期得到精确的数值计算结果。将本文所发展的本构模型用于固溶处理的1Cr18Ni9Ti不

锈钢,对如下情形给出了模型预测结果与实验结果的比较。

3.1 给定应变幅值下单轴循环情形

在 200℃、650℃等恒温下,给定应变幅值为 0.60%,应变率为 3×10^{-3} /s,本构模型预言结果与实验结果的比较如图 1(图中仅给出 200℃下单轴循环)所示。由图中可以看出:本文所提出的本构模型能很好地描述其循环变形行为。

3.2 单轴循环的温度历史效应

为了检验本文所提出的模型是否能较好地描述这种温度历史效应,对如下情形进行本构模型的数值模拟,等效应变幅值为 0.60%,应变率为 3×10^{-3} /s,温度历史为如下 3 种情形:

- (a) 室温→650℃→室温;
- (b) 200℃→700℃→200℃;
- (c) 650℃→700℃→650℃。

上述 3 种情形的本构理论预测与实验结果的比较如图 2 所示,尽管在情形(b)中可能由

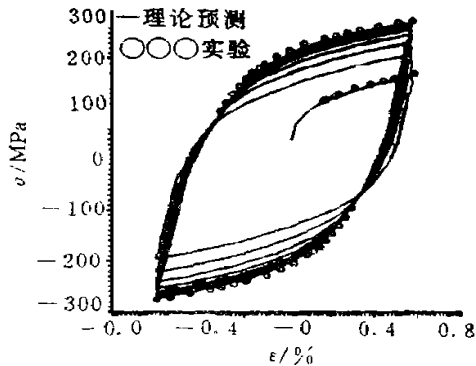


图 1 单轴循环

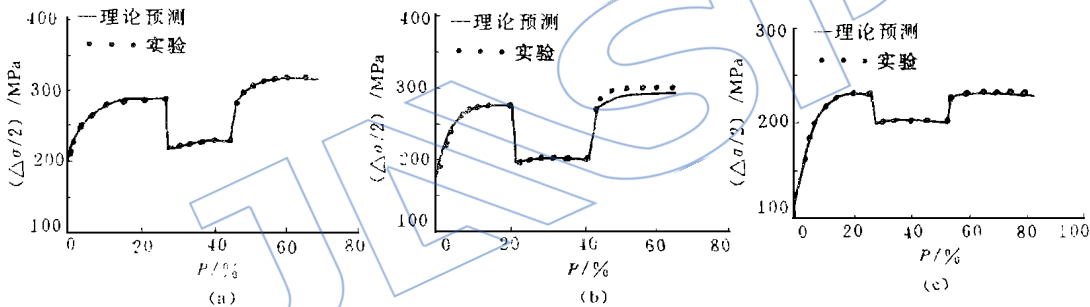


图 2 单轴温度历史效应(a) 室温→650℃→室温(b) 200℃→700℃→200℃(c) 650℃→700℃→650℃

于实验数据的分散性,其理论预测与实验结果有一点差别,总的来讲,理论预测与实验结果吻合较好。由此可见,本文模型能较好地描述该材料的单轴循环的温度历史依赖性。

4 结 论

本文所建立的粘塑性本构模型充分地考虑了金属材料在高温环境下比例循环加载及其温度历史的循环特性。在本文模型中,引入的由三个演化速率不同的背应力演化方程对于较好地描述循环滞后环形状是非常必要的;提出的考虑非等温条件下对循环加载历史衰减记忆的各向同性变形阻力 Q 演化方程,通过对变形历史中最大表观变形阻力的记忆,较好地实现了对循环变形温度历史效应的本构描述。

从本文构模型的结构中可以看出:本文对于应变幅值历史效应、循环软化历史效应、循环软化等复杂加载变形行为也能给出正确描述。

参 考 文 献

1 Walker K P. Research and Development Program for Nonlinear Structural Modelling with Advanced Time-Temperature

Dependent Constitutive Relationships. NASA CR-165533, 1981

- 2 Moreno V, Jordan E H. Predication of Material Thermomechanical Response with a Unified Viscoplastic Constitutive Model. Int J Plast, 1986, (2): 223- 245
- 3 杨显杰. 金属材料循环塑性和循环粘塑性本构关系研究: [学位论文]. 成都: 西南交通大学, 1992
- 4 Kocks U F, Mecking H. Dislocation Kinematics at not-so-Constant Structure. in Dislocation Modelling of Physical Systems, Ed. M F Ashby et al, Pergamon, 1981: 173- 192
- 5 Armstrong P J, Frederick C O. A Mathematical Representation of the Multiaxial Bauschinger Effect. CEGB Report RD/B/N731, 1966, Central Electricity Generating Board
- 6 Marshall P. Austenitic Stainless Steels: Microstructure and Mechanical Properties. Elsevier Applied Science Publishers, 1984

(责任编辑 王震华)

航空发动机设计用材料数据手册》介绍

一、航空发动机设计用材料数据手册》第一分册由原中国航空发动机总公司组织、北京航空材料研究所主编, 六〇六研究所等单位参加编制的, 曾于1990年出版、发行, 现尚有部份存书。该书约210万字, 在大量试验基础上, 给出了55种发动机常用金属材料的静力、持久、蠕变、疲劳、应变疲劳、断裂韧性、裂纹扩展速率等各种图表700多幅, 并给出室温、高温下静强度设计许用值(A 、 B 和 S 值)。

二、航空发动机设计用材料数据手册》第二分册是为提高航空发动机设计水平、满足当前发动机研制的需要、供发动机结构可靠性设计与分析, 经历四年的艰辛编制工作完成的。该书主要研究和测试了供发动机重要零件—盘、叶片和轴使用的五种金属材料($GH4169$ 、 $TC11$ 、 $DZ22$ 、 $DZ4$ 和 $ICr11Ni2W2MoV$)的静强度、持久强度、应力疲劳和应变疲劳等性能的可靠性数据和曲线(具有95%置信度和99.83%存活率), 还论述了可靠性数值新的处理与分析方法。全书约70万字, 1994年1月已由国防工业出版社正式出版。

上述两《手册》均为精装16开本, 内容新颖、图文并茂, 是航空科研、设计、工厂、院校和空军等部门工程技术人员必需的技术资料。

订购办法:

1. 银行汇款 户名: 北京市航发机电技术开发中心 开户行: 北京海淀工商行 302 中信
帐号: 051293- 44
2. 邮局汇款(请注明邮政编码) 北京市学院路37号 航空动力学报》编辑部 100083

航空动力学报》编辑部
一九九四年三月