

文章编号: 1000-8055(2002)05-0615-08

Chaboche 热粘塑性损伤模型的应用研究

张克实¹, B rocksW olfgang²

(1. 西北工业大学 工程力学系, 陕西 西安 710072;

2. GKSS Research Center 德国)

摘要: 本文讨论了 Chaboche 粘塑性模型的材料参数确定问题, 提出了一种简单实用的模型参数确定方法, 并用本文提出的方法确定了 TAl 材料的 Chaboche 模型参数, 并用这些参数进行了不同应变率下的拉伸模拟计算、不同应力下的蠕变模拟计算和 CT 试样在阶梯载荷下的蠕变模拟计算。

关键词: 热粘塑性; 蠕变; 本构模型; 模型参数

中图分类号: V 231.91

文献标识码: A

Application of Chaboche Thermal Viscoplastic Model

ZHANG Ke-shi¹, B rocksW olfgang²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Institute of Materials Research, GKSS Research Center, Geesthacht D-21502, Germany)

Abstract: In the present paper, the research on the parameter determination of Chaboche thermal viscoplastic constitutive model has been carried out and a method is proposed. By using this method a set of parameters for the material TAl has been determined. Furthermore the finite element analyses by using the UMAT coded by A rz t and B rocks et al associated with above parameters for uniaxial tension at different rates, uniaxial creep under different stress levels and creep procedure of a CT specimen under a ladder type load have been performed.

Key words: thermal viscoplasticity; creep; constitutive equations; model parameters

1 引言

用于高温结构强度分析的本构模型不仅应能够考虑温度的影响, 而且应能合理地描述循环载荷下的各种非弹性变形, 如非线性运动硬化、循环硬化、循环软化、蠕变、松弛、恢复效应等。为了描述材料在循环载荷下的包兴格效应, Armstrong 和 Frederick (1966 年) 最先在率无关塑性模型中引入非线性运动硬化^[1]。Chaboche 在 1979 年在提出他的粘塑性模型时沿用了非线性运动硬化这一概念和描述方法, 同时在非线性运动硬化上迭

加了一个各向同性硬化, 以用于描述弹性区的膨胀(硬化)和循环硬化, 于是给出了可以同时描述蠕变和循环塑性的模型的理论框架。

后来完善模型描述的主要工作是改进对非线性运动硬化描述方式, 如 Chaboche (1991 年, 1998 年) 提出运动硬化的“门槛”概念, 只有背应力达到某个临界值后背应力的演化才有动力恢复过程^[2, 3]。之后 Jiang 和 Sehitoglu (1993 年) 在硬化规律、记忆面、循环硬化/软化方面对 Chaboche 模型的改进进行了探讨^[4]。在这方面研究的目的主要是使模型能更合理、更准确地与人们的试验观测

收稿日期: 2001- 10- 08; 修订日期: 2001- 12- 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19972055); 航空科学基础资助项目(00C53022); 德国 GKSS 研究中心的资助项目

作者简介: 张克实(1954-), 男, 广西桂林人, 西北工业大学工程力学系教授, 博士, 主要从事固体力学研究

相吻合。而其中很多研究集中于循环塑性的描述上,如 Mollica 等(2001 年)对包兴格效应^[5]、Bari 和 Hassan(2000 年)对“棘齿”现象的研究^[6]。

要将该模型用于实际分析,必需要有相应的有限元计算方法和程序,并且要有合理的确定模型参数的方法。算法问题现已基本得到解决^[7,8],而模型参数确定问题却较为复杂。因为该模型含有很多待定参数,如何加以确定一直是一个困扰人们的难题。

为在航空发动机高温部件的强度和寿命分析中应用 Chaboche 模型,针对高温环境下的蠕变和粘塑性分析的需要,本文对 Chaboche 模型进行了应用研究,并提出了一种较为简便的确定模型参数的方法,同时采用该模型对 TiAl 材料在不同应变率下的粘塑性变形、不同应力水平下的单轴蠕变和 CT 试样在阶梯载荷下的蠕变进行了数值模拟分析。

2 Chaboche 模型的基本公式

Chaboche 模型有多种表达形式,本文采用文献[1]的基本表述,在损伤描述上采用文献[8]给出的基本公式。对于热粘塑性变形的情形,应变可以分解为:

$$\epsilon = \epsilon^{\text{el}} + \epsilon^{\text{in}} + \epsilon^{\text{th}} \quad (1)$$

式中, ϵ , ϵ^{el} , ϵ^{in} 和 ϵ^{th} 分别是总应变、弹性、非弹性和热应变。而相应的增量分解是:

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon^{\text{el}} + \Delta \epsilon^{\text{in}} + \Delta \epsilon^{\text{th}} \quad (2)$$

这三部分应变增量分别由材料的弹性性质、粘塑性性质和热膨胀性质来确定。

引入损伤变量 D 和等效应力 σ_{eff} , 则应力 σ 与等效应力 σ_{eff} 的关系为:

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{1}{1-D} \sigma \quad (3)$$

按照广义胡克定律,有:

$$\sigma_{\text{eff}} = D \epsilon^{\text{el}} \quad (4)$$

式中, D 是弹性各向同性本构张量,于是弹性应变与应力的关系可以由下式确定:

$$\sigma_{\text{eff}} = (1-D) D \epsilon^{\text{el}} \quad (5)$$

而热应变的定义是:

$$\epsilon^{\text{th}} = \alpha(T - T_0) \mathbf{I} \quad (6)$$

式中: α 是热膨胀系数, T 和 T_0 是当前温度和参照温度, $\mathbf{I}$ 是二阶单位张量。

材料的粘塑性(非弹性)应变可以由考虑损伤的 Chaboche 模型确定^[8]:

$$\dot{\epsilon}^{\text{in}} = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{\text{eff}} - x}{J_2(\sigma_{\text{eff}} - x)} \cdot$$

$$\left[\frac{\langle f(\sigma_{\text{eff}}, x, R) \rangle}{K} \right]^n \quad (7)$$

$$\dot{x} = c(1-D) \left[\frac{\langle f(\sigma_{\text{eff}}, x, R) \rangle}{K} \right]^n \cdot \left[a(p) \frac{\sigma_{\text{eff}} - x}{J_2(\sigma_{\text{eff}} - x)} - \Phi(p)x \right] - d \frac{x}{J_2(x)} \left[\frac{J_2(x)}{a(p)} \right]^r \quad (8)$$

$$\Phi(p) = \Phi_{\infty} + (1 - \Phi_{\infty}) e^{-\omega p} \quad (9)$$

式中, σ_{eff} 是由等效应力定义的偏应力; x 用于描述材料随动硬化,称为背应力; R 用于描述材料各向同性硬化能力的变化,称为各向同性硬化函数; $\Phi(p)$ 被称为松弛函数, $\langle \rangle$ 是 MacCauley 括号, J_2 是第二不变量,为简便起见按下式来定义:

$$J_2(y) = \sqrt{\frac{3}{2} y : y}$$

$f(\sigma_{\text{eff}}, x, R)$ 是屈服函数,且:

$$f(\sigma_{\text{eff}}, x, R) = J_2(\sigma_{\text{eff}} - x) - R - k \quad (10)$$

$$a(p) = a_0 + a_1 e^{-\omega_1 p} \quad (11)$$

在以往的研究中 a 都考虑为常数,由于背应力在材料初始变形阶段可能变化急剧,因此本文建议按(11)式将 a 考虑为变量,这样可以模拟较为复杂的变化。而 c , a_0 , a_1 , Φ_{∞} , ω 和 ω_1 是表征背应力演化规律的材料常数, K 和 n 是表征材料率敏感特性的材料常数, d 和 r 反映材料的静态恢复特性,可以用于辅助描述材料的蠕变。 k 是对应于零塑性应变的屈服强度,各向同性硬化函数 R 由下式确定:

$$R = Q(1 - e^{-b(1-D)p}) \quad (12)$$

式中, Q 和 b 是材料常数。记:

$$\dot{p} = \left[\frac{\langle f(\sigma_{\text{eff}}, x, R) \rangle}{K} \right]^n \quad (13)$$

$$\text{则} \quad \dot{p} = \dot{\epsilon}_{\text{eq}}^{\text{in}} \quad (14)$$

$$\text{且} \quad p = \int \dot{p} dt = \int \dot{\epsilon}_{\text{eq}}^{\text{in}} dt \quad (15)$$

而损伤演化采用 Rabotnov 定律来描述^[1,8]:

$$\dot{D} = \left[\frac{J_2(s)}{A} \right]^m (1-D)^{-l} \quad (16)$$

式中, A , m 和 l 是材料常数。

非等温情形下考虑材料性质随温度的变化,有下列增量关系:

$$\Delta \sigma = (1-D) D \Delta \epsilon^{\text{el}} + (1-D) \Delta D \epsilon^{\text{el}} - \Delta D D \epsilon^{\text{el}} \quad (17)$$

$$\Delta x = \Delta x|_{\Delta T=0} + \frac{1}{c\alpha} x (c\Delta a + a\Delta c) \quad (18)$$

$$\Delta R = b(1 - D)(Q - R)\Delta p + \frac{R}{Q}\Delta Q + (Q - R)(1 - D)p\Delta b \quad (19)$$

3 单轴拉伸/压缩情形下的应力应变关系

材料损伤对应力、应变的耦合的影响主要反映在材料变形的后期,在确定材料其它性能参数时可以先不计入损伤的影响。而不考虑损伤时,在单轴拉伸/压缩情形下有:

$$J_2(s - x) = \left[\frac{3}{2} (s_{ij} - x_{ij})(s_{ij} - x_{ij}) \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{3}{2} \left| \frac{2}{3} \sigma - x \right| \quad (20)$$

单轴拉伸状态下:

$$f(\sigma, x, R) = J_2(s - x) - R - k = \sigma - \frac{3}{2}x - R - k \quad (21)$$

单轴压缩时:

$$f(\sigma, x, R) = -\sigma + \frac{3}{2}x - R - k \quad (22)$$

于是在单轴拉伸/压缩状态下:

$$\dot{p} = \left[\frac{\left| \sigma - \frac{3}{2}x \right| - R - k}{K} \right]^n \quad (23)$$

由(7)、(13)式,在单轴拉伸/压缩状态下有:

$$\dot{\epsilon}^n = \operatorname{sgn} \left(\sigma - \frac{3}{2}x \right) \cdot \left[\frac{\left| \sigma - \frac{3}{2}x \right| - R - k}{K} \right]^n \quad (24)$$

于是单轴拉伸时:

$$\sigma = \frac{3}{2}x + R + k + K(\dot{\epsilon}^n)^{\frac{1}{n}} \quad (25)$$

单轴压缩时:

$$\sigma = \frac{3}{2}x - R - k - K(|\dot{\epsilon}^n|)^{\frac{1}{n}} \quad (26)$$

对于单轴拉伸情形,应力、背应力、初始屈服强度、各向同性硬化函数 R 及率相关项的关系可以用图 1 表示(单轴压缩情形亦可由图相应表示)。

Chaboche 模型带有较多的待定模型参数,设定这些参数是为了能合理描述率相关材料短时塑性、蠕变、松弛、循环塑性等众多的非弹性行为;但对于大多数应用分析来说,可能涉及的(或分析主要关心的)力学行为比较单一,这时就可以对模型进行简化以减少模型参数从而减少试验的数量。例如,只需估计蠕变及蠕变损伤时,取 $x = 0, R$

$= 0$ 和 $k = 0$, 则模型退化为 Norton 蠕变公式,模型常数可以减少 9 个。即确定等向硬化规律的 Q , k, b 和确定随动硬化规律的 $c, a, d, r, \Phi_\infty, \omega$ 都不需要测定。因此采用 Chaboche 模型并不意味着必须确定很多材料常数。

4 确定模型参数的一种方法

本文建议一种比较方便的确定参数的方法,按此方法确定的模型参数可以用于短时塑性、蠕变和循环塑性合理的近似描述。

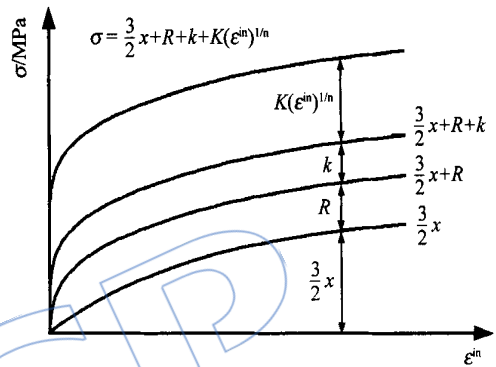


图 1 单轴拉伸下 σ, x, k, R 及率相关项 $K(\dot{\epsilon}^n)^{1/n}$ 的关系

Fig 1 Relationship of σ, x, k, R and $K(\dot{\epsilon}^n)^{1/n}$ under uniaxial tension

考虑公式(25),如果单轴拉伸试验以恒定应变率进行,可以近似认为材料非弹性应变率 $\dot{\epsilon}^n$ 为常数,因此在单轴拉伸时有:

$$\sigma - \left(\frac{3}{2}x + R \right) = k + K(\dot{\epsilon}^n)^{\frac{1}{n}} = \text{const} \quad (27)$$

即此时图 1 的曲线 σ 和曲线 $\frac{3}{2}x + R$ 平行。上式表明该曲线 $\sigma - \epsilon^n$ 可以方便地加以分解。利用上述分解可以进一步分离出背应力 x 和各向同性硬化函数 R 与非弹性应变的关系。记:

$$x^* = x + \frac{2}{3}R \quad (28)$$

x^* 是一条与 σ 平行的曲线,当塑性变形起始时有 $x^*|_{\epsilon^n = \epsilon_0} \approx 0$, 这条曲线可以比较方便地由试验曲线 $\sigma(\epsilon^n)$ 得到。可以定义:

$$\frac{3}{2}x^* = \frac{3}{2}x + R = \sigma - \sigma|_{\epsilon^n = \epsilon_0} \quad (29)$$

式中: $\sigma(\epsilon^n)$ 曲线上塑性应变的起始点 ϵ_0 被设定为一个很小的数,本文取 $\epsilon_0 = 0.0005$ 。需要指出,确定 ϵ_0 与实测所能达到的精度和能否有效分辨有关,同时也取决于对非弹性变形分析要求的精度。

本文取 ϵ_0 的主要考虑是: 万分之五以下的非弹性变形对所考虑的应用条件可以忽略不计, 更小的非弹性变形在实测中已难以分辨, 因此对应用分析来说已具有合理的精度。显然 ϵ_0 取值大小会对 x^* 的大小有影响, 但从图 1 可知由于 ϵ_0 取值造成 x^* 的浮动将在 $k + K(\epsilon^n)^{\frac{1}{n}}$ 中得到补偿, 因此 ϵ_0 很小时其取值范围的微小变化对模型整体的描述误差不会有很大影响。

这样, 测得 x^* 后如果能确定 x 就能由上式得到 R , 或通过确定 R 而得到 x_0 。

4.1 确定背应力和各向同性硬化函数曲线

假定在这拉伸和反向压缩过程中非弹性应变速率可以控制且其绝对值近似不变, 根据 (25) 式和 (26) 式, 在卸载点和反向压缩转折点分别有:

$$f = \sigma^+ - \frac{3}{2}x^+ - R^+ - k - K(\epsilon^{in+})^{\frac{1}{n}} = 0$$

$$f = -\sigma^- + \frac{3}{2}x^- - R^- - k - K(|\epsilon^{in-}|)^{\frac{1}{n}} = 0$$

由于 $\epsilon^{in+} = |\epsilon^{in-}|$, 且过程很短, 塑性变形很小, 因此有:

$$x^+ = x^-, \quad R^+ = R^-$$

而且:

$$x = \frac{1}{3}(\sigma^+ + \sigma^-) \quad (30)$$

于是利用它可以通过一系列给定应变速率的循环试验来确定背应力曲线。然后由 (29) 式可以确定各向同性硬化函数曲线。图 2 描绘了单轴拉伸

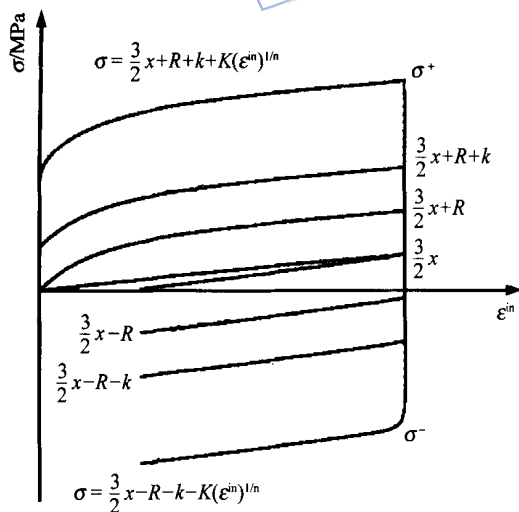


图 2 单轴拉伸—卸载—反向压缩下的分解曲线

Fig. 2 The resolved curves under uniaxial tension, unloading and compression

—卸载—反向压缩下的变量分解关系。

对纯随动硬化材料这一过程更为简单, 利用公式 (28) 就可以从单轴拉伸实验数据中方便地分离出背应力和各向同性硬化函数 R 。因为此时有:

$$R = 0, \quad x^* = x + \frac{2}{3}R = x$$

4.2 确定参数 k, K 和 n

由 (25) 和 (28) 式:

$$\sigma = \frac{3}{2}x^* + k + K(\epsilon^n)^{\frac{1}{n}} \quad (31)$$

利用公式 (27) 和 (29) 可以从上式分离出 $\Psi = k + K(\epsilon^n)^{\frac{1}{n}}$ 。而根据不同应变速率的试验结果和非线性最小二乘法^[9]识别常数 k, K 和 n_0 。

如果材料是纯随动硬化材料, 可设定 $k =$ 某一常数, 这时用线性最小二乘法^[9]来识别常数 K 和 n_0 。特别是 $k = 0$ 时:

$$\sigma = \frac{3}{2}x^* + K(\epsilon^n)^{\frac{1}{n}} = \frac{3}{2}x + K(\epsilon^n)^{\frac{1}{n}} \quad (32)$$

在这种情形下确定材料率相关性质的常数 K 和 n 更简单。

4.3 背应力演化方程参数的确定

在已知背应力—塑性应变曲线的情况下, 取 $\Phi_\infty = 1, \omega = 0$, 单轴拉伸情形下不计静态恢复的背应力演化方程为:

$$\dot{x} = c \left[\frac{2}{3}a_0 + \frac{2}{3}a_1 e^{-\omega p} - x \right] p \quad (33)$$

其积分解为:

$$x = \frac{1}{3(c - \omega)} [2a_0 c - 2a_0 \omega + 2ca_1 e^{-\omega p} - (2a_0 c + 2ca_1 - 2a_0 \omega) e^{-\omega p}] \quad (34)$$

注意到 x 在 p 增大到一定值后与末端值 x_s 差别很小, 如果末端处于饱和状态, 由 (34) 式有:

$$x_s = \frac{2}{3}a_0$$

因此 a_0 可以直接由测试的饱和值确定, 而 ω 可以事先设定 (建议 ω 在 0~500 间选择一数), 然后用非线性最小二乘法识别 a_1 和 c_0 。对于 x 不是很明显趋于饱和的情形, 可以设 $\omega = 0$, 则有 $a(p) = a_0 + a_1$, a_0 由 $x_s = \frac{2}{3}a_0$ 确定。总之只要背应力 x 可以从试验曲线得到, 就可采用此方法确定参数 a_0, a_1 和 c_0 。

图 3 给出一个用此方法确定参数 a_0, a_1 和 c 的例子, 该例子中设 $\omega = 0$, 用图中实测 x 曲线通

过非线性最小二乘法求得 $a_0 = 277.56 \text{ MPa}$, $a_1 = 32.33 \text{ MPa}$ 和 $c = 2.13$ 。可以看出, 按所得参数描述的背应力曲线与实测曲线吻合很好。

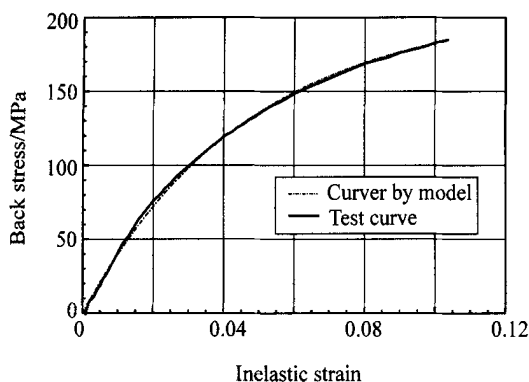


图 3 确定参数 a_0 , a_1 和 c 的实例

Fig 3 An example of application for parameters determination of a_0 , a_1 and c

4.4 各向同性硬化函数参数的估计

在已知各向同性硬化函数 R —塑性应变曲线的情形, 略去损伤由 (12) 式有:

$$R = Q(1 - e^{-bp})$$

式中: Q 是 R 的饱和值, 利用上式和 R —塑性应变曲线可以通过最小二乘法拟合得到。

4.5 静态恢复参数的估计

确定材料的率相关性质所用的单轴拉伸试验的应变速率一般都在 $10^{-5}/\text{s}$ 以上, 而通常实际结构和零件的蠕变速率会远低于这一量级。因此用给定应变速率单轴拉伸试验确定的材料率相关性质参数一般难以准确描述低应力下的蠕变, 在此情形下需考虑静态恢复的影响。在稳定蠕变时, 由于 $\dot{\sigma} = 0$, 背应力 x 处于平衡状态 $\dot{x} = 0$, 而各向同性硬化函数 R 处于饱和或滞止状态 $R = Q$, 亦有 $\dot{R} = 0$, 因此由 (8) 式近似有:

$$c \left[\frac{2}{3} a(p) - x \right] \dot{p} - d \frac{2}{3} \left[\frac{3x}{2a(p)} \right]^r = 0 \quad (35)$$

稳定蠕变时应力和应变率 $\dot{p}$ 是已知的, 而背应力 x 可由 (25) 式确定, 因此由上式可以通过对试验数据的拟合而得到静态恢复参数 d 和 r 。

需要指出, (35) 式仅可以在稳定蠕变情形下才是合理的。在一般情形例如应力水平较低时, 各向同性硬化函数 R 很难达到饱和, 背应力 x 也很难达到平衡状态。这时用 (35) 式拟合得到的静态恢复参数 d 和 r 还需在与试验结果比较的试算中

加以修正。

静态恢复一般对历时很长的蠕变过程才有明显影响, 短时粘塑性变形过程可以忽略静态恢复的作用。

4.6 蠕变损伤参数的估计

由 (16) 式, 描述材料损伤规律的参数有 A , m 和 l 。在单轴情形下, 按照 Rabotnov 定律损伤演化规律可写为:

$$\dot{D} = \left(\frac{\sigma}{A} \right)^m (1 - D)^{-l} \quad (36)$$

记:
$$t_e(\sigma) = \frac{1}{1+l} \left(\frac{\sigma}{A} \right)^{-m}$$

积分可得:

$$D = 1 - \left[1 - \frac{t}{t_e(\sigma)} \right]^{\frac{1}{1+l}} \quad (37)$$

假定破坏时 D 达到临界值 D_c (设 $D_c = 0.1$), 则由不同应力水平的实验可以得到破坏时间 $t_{cf} = t_{cf}(\sigma)$, 于是有:

$$\ln(1 - D_c) = \frac{1}{1+l} \ln \left[1 - \frac{t_{cf}(\sigma)}{t_e(\sigma)} \right] \quad (38)$$

知 $\frac{t_{cf}(\sigma)}{t_e(\sigma)}$ 是常数, 记: $C_d = \frac{t_{cf}(\sigma)}{t_e(\sigma)}$ 有:

$$\ln t_{cf}(\sigma) = \ln \frac{1}{1+l} \ln C_d - m \ln(\sigma) + m \ln(A) \quad (39)$$

上式可以用来确定 m , 可以先认为 $l = m$ (由 (38) 式可以求出 C_d), 然后 A 可求, 再由比较试验数据的试算逐步逼近 l 。

至此, 全部模型参数得到确定。

5 隐式积分方法

本文采用文献[8]的方法来求解 $\Delta\sigma$, $\Delta\epsilon^{\text{in}}$, Δx , ΔR 和 ΔD 。设非弹性应变率、背应力变化率和各向同性硬化率可表示为下列函数:

$$\dot{\epsilon}^{\text{in}} = g(\sigma, x, R, D, T) \quad (40)$$

$$\dot{x} = h(\sigma, x, R, D, T) \quad (41)$$

$$\dot{R} = q(\sigma, x, R, D, T) \quad (42)$$

$$\dot{D} = v(\sigma, D, T) \quad (43)$$

于是可以通过 θ 参数方法用增量时间 Δt 内开始和末了的变化率来表达相应的增量:

$$\Delta \epsilon^{\text{in}} = [(1 - \theta) \dot{\epsilon}^{\text{in}}|_t + \theta \dot{\epsilon}^{\text{in}}|_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (44)$$

$$\Delta x = [(1 - \theta) \dot{x}|_t + \theta \dot{x}|_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (45)$$

$$\Delta R = [(1 - \theta) \dot{R}|_t + \theta \dot{R}|_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (46)$$

$$\Delta D = [(1 - \theta) \dot{D}|_t + \theta \dot{D}|_{t+\Delta t}] \Delta t \quad (47)$$

表 1 材料常数及模型参数

弹性常数	$E=97545\text{ MPa}$		$\nu=0.33$	
率相关参数	$n=7.156$		$K=665.1\text{ MPa}$	
背应力演化参数	$a_0=277.56\text{ MPa}$	$a_1=32.33\text{ MPa}$	$\alpha=0$	$c=21.3$
初始屈服强度及各向同性硬化参数	$\Phi_\infty=1$	$\omega=0$	$d=0.0089\text{ MPa}$	$r=2.1$
	$k=102\text{ MPa}$	$Q=123\text{ MPa}$	$b=500$	
	$A=3118\text{ MPa}$	$m=8.5$	$l=15$	
蠕变损伤参数				

$\theta=0$ 对应于 Euler 的显式算法, $\theta=1$ 对应于 Euler 的隐式算法。 θ 可以在 $0\leq\theta\leq1$ 范围内选择。 上式中增量末了的率是未知的, 但可以将 (40)~ (43) 式用泰勒展开而得到:

$$\begin{aligned} & -\theta\Delta t\left.\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right|_t\Delta\sigma - \theta\Delta t\left.\frac{\partial g}{\partial\kappa}\right|_t\Delta\kappa - \\ & \theta\Delta t\left.\frac{\partial g}{\partial R}\right|_t\Delta R - \theta\Delta t\left.\frac{\partial g}{\partial D}\right|_t\Delta D = \\ & \theta\Delta t\left.\frac{\partial g}{\partial T}\right|_t\Delta T + \Delta t^t g - \Delta\epsilon^{\text{in}} \end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned} & -\theta\Delta t\left.\frac{\partial g}{\partial\sigma}\right|_t\Delta\sigma + \left(1 - \theta\Delta t\left.\frac{\partial h}{\partial\kappa}\right|_t\right)\Delta\kappa - \\ & \theta\Delta t\left.\frac{\partial h}{\partial R}\right|_t\Delta R - \theta\Delta t\left.\frac{\partial h}{\partial D}\right|_t\Delta D = \\ & \theta\Delta t\left.\frac{\partial h}{\partial T}\right|_t\Delta T + \Delta t^t h \end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned} & -\theta\Delta t\left.\frac{\partial q}{\partial\sigma}\right|_t\Delta\sigma - \theta\Delta t\left.\frac{\partial q}{\partial\kappa}\right|_t\Delta\kappa + \\ & \left(1 - \theta\Delta t\left.\frac{\partial q}{\partial R}\right|_t\right)\Delta R - \theta\Delta t\left.\frac{\partial q}{\partial D}\right|_t\Delta D = \\ & \theta\Delta t\left.\frac{\partial q}{\partial T}\right|_t\Delta T + \Delta t^t q \end{aligned} \tag{50}$$

$$\begin{aligned} & -\theta\Delta t\left.\frac{\partial v}{\partial\sigma}\right|_t\Delta\sigma + \left(1 - \theta\Delta t\left.\frac{\partial v}{\partial D}\right|_t\right)\Delta D = \\ & \theta\Delta t\left.\frac{\partial v}{\partial T}\right|_t\Delta T + \theta\Delta t^t v \end{aligned} \tag{51}$$

上式结合 (2) 和 (17) 式可以求解未知增量 $\Delta\sigma$, $\Delta\kappa$, ΔR , 损伤变量 ΔD 和 $\Delta\epsilon^{\text{in}}$ 。 关于计算单元刚度矩阵的切线本构张量, 篇幅所限这里不予介绍。

6 应用例子

所用材料为 GKSS 研究中心材料研究所研制的 TAl 材料。 在 700°C 下的材料参数见表 1, 其中 Chaboche 模型参数是按本文方法确定。 确定这些参数的试验是: 不同速率的单轴拉伸试验和不同应力水平下的蠕变试验。 由于缺少循环试验, 本文

采用的各向同性硬化参数 Q 和 b 是由试算加以确定。

6.1 计算程序

计算采用 ABAQUS 5-1。 应用了在 A rzt 等研究基础^[8]上由本文作者改进的 UMAT 用户子程序。 在计算中, 设定 $\theta=1$ 。

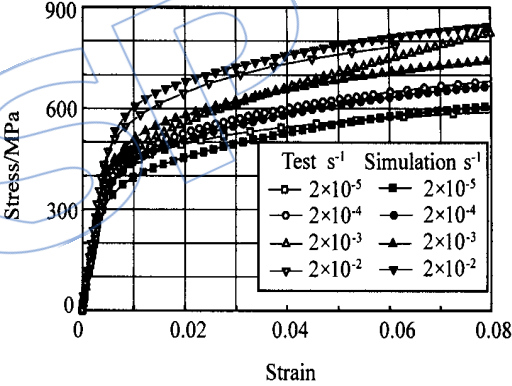


图 4 对不同拉伸应变率的单轴拉伸试验的模型计算结果

Fig 4 The results of tension simulation under different strain rates

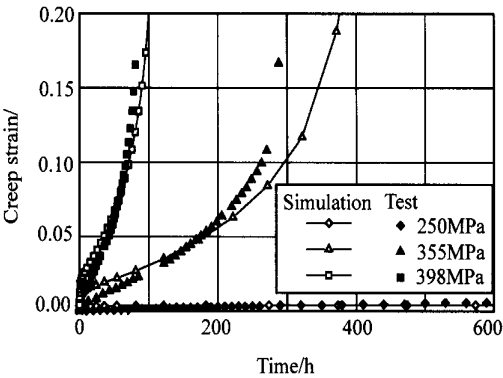
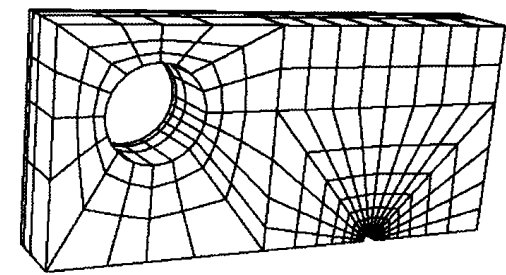
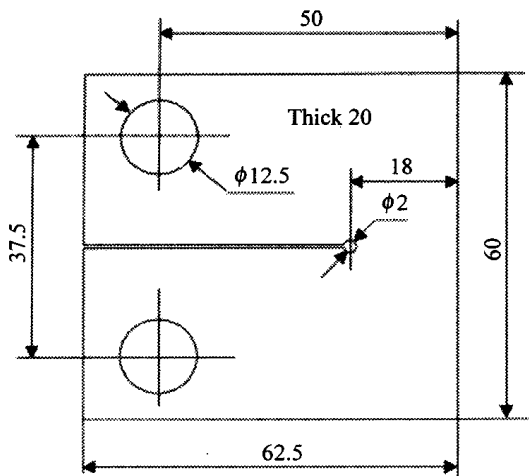


图 5 单轴蠕变的数值模型结果与实测数据比较

Fig 5 Comparison between numerical results and tests for uniaxial creep



Unit:mm

图 6 CT 缺口试样的几何尺寸与有限元网格划分

Fig 6 Size of the CT notched specimen and FEM mesh

6 2 不同速率的单轴拉伸试验模拟

采用上述参数描述的 Chaboche 模型对 4 种不同拉伸应变率的单轴拉伸试验进行模拟计算,得到的结果见图 4。该结果表明本报告采用的 Chaboche 模型可以合理地反映材料对于不同速率拉伸的率相关性质。

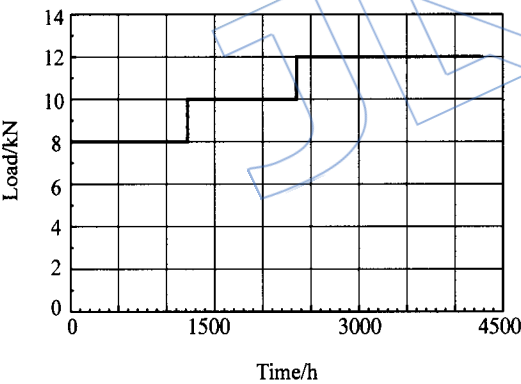


图 7 时间载荷曲线

Fig 7 The time-load curve

6 3 单轴拉伸蠕变试验模拟

对恒应力(名义应力)下的单轴蠕变数值模拟的结果见图 5。给定应力(名义应力)分别是: 250 MPa, 355 MPa, 398 MPa。这些结果表明采用本文确定的 Chaboche 模型参数可以合理地描述材料的蠕变变形。

6 4 CT 试样蠕变试验模拟

CT 试样的几何及有限元网格(考虑对称性只取四分之一)如图 6 所示,所加载荷分为 3 段,时间载荷曲线如图 7 所示。数值计算的结果及其

与实验测试结果的比较见图 8。可以认为试样的蠕变变形的数值模拟结果与实测结果有较好的吻合。

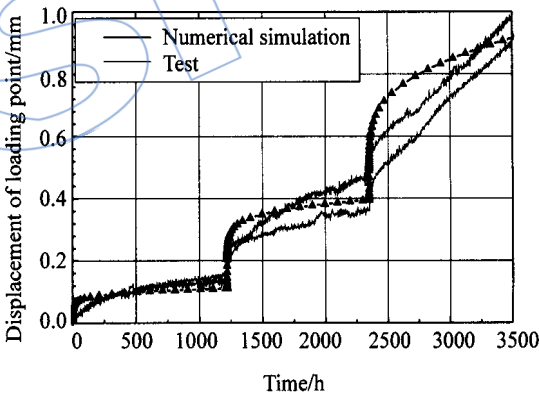


图 8 CT 试样蠕变数值计算的结果与实测结果的比较

Fig 8 Comparison between numerical result and tests for creep experiment of CT specimen

7 结 论

通过本文研究可以得到以下结论:

(1) Chaboche 粘塑性模型可以用本文建议的比较容易实施的方法来确定材料的模型参数,结合这些参数可以对材料的瞬时塑性、蠕变和损伤进行合理的分析。

(2) 通过对 TiAl 材料的参数测定、简单试样的率相关变形分析、单轴蠕变分析和 CT 试样的率相关非弹性变形分析极其与实测结果的比较,证实了本文建议的 Chaboche 模型参数测定方法

用于实际分析的可行性。表明本文介绍的确定参数方法、计算方法及程序是合理、可用的。

参考文献

[1] L emaitre J, Chaboche J L. Mechanics of Solid M aterials[D]. Cambridge U niversity Press, U K, 1990

[2] Chaboche J L. On Some M odifications of Kinematic Harden- ing to Improve the Description of Ratcheting Effects[J]. Int J. Plasticity, 1991, (7): 661- 678

[3] Chaboche J L, Jung O. Application of a Kinematic Hardening V iscoplasticity Model w ith Thresholds to the Residual Stress Relaxation[J]. Int J. Plasticity, 1998, 13(10): 785- 807.

[4] Jiang Y, Sehitoglu H. Modeling of Cyclic Ratcheting Plasticity [J]. J. Appl M ech , 1996, 63(3): 720- 773

[5] Mollica K, Rajagopal K R, Srinivasa A R. The Inelastic Behav-

ior of Metals Subject to Loading Reversal[J]. Int J. Plasticity, 2001, 17(8): 1119- 1146

[6] ShafiquiBari, Tasnim Hassan. A natomy of Coupled Constitutive Models Forratcheting Simulation [J]. Int J. Plasticity, 2000, 16(): 381- 409

[7] Arzt M , Brocks W , Rainer M. Two U ser-M aterial Routines for Cyclic V iscoplasticity[R]. TechnicalNote GKSS/WM G/98/9

[8] Arzt M , Brocks W , Rainer M , QiW D. U serM aterialRoutine for Simulating Anisothermal Elasto - V iscoplasticity and Damage[R]. TechnicalNote GKSS/WM G/99/11.

[9] 何光渝. FORTRAN 77 算法手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993

(责任编辑 王震华)

