

GH4169 合金高温力学行为本构建模及参数识别

Constitutive Modeling and Parameter Identification of Mechanical Behavior for GH4169 Alloy at High Temperature

魏洪亮¹, 杨晓光¹, 于慧臣²

(1 北京航空航天大学, 北京 100083;

2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

WEI Hong-liang¹, YANG Xiao-guang¹, YU Hui-chen²

(1 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 针对涡轮盘用 GH4169 合金开展了高温下单调拉伸、对称循环及非对称循环的实验工作, 结果表明, 该材料具有比较明显的循环软化和平均应力松弛特性。采用带 Ohno/Wang 修正的 Chaboche 粘塑性理论本构方程, 对其表现出的复杂力学现象进行本构建模, 介绍了 Levenberg-Marquadt 非线性优化算法, 结合材料实验数据并通过该算法识别了本构方程参数, 将本构方程通过用户子程序嵌入到有限元软件 ABAQUS 中, 对 GH4169 合金的上述实验现象进行了数值模拟, 计算曲线与实验曲线取得了较好的一致性。

关键词: 循环软化; 平均应力松弛; 本构方程; 参数识别

中图分类号: TG132.3+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2005) 04-0042-04

Abstract: Tests concerning monotonic loading, symmetric and unsymmetric cycling were carried out at high temperatures in GH4169 used for turbine disk. The results showed that the material had a distinct characteristic of cyclic softening and mean stress relaxation. The Chaboche type viscoplastic constitutive model modified by Ohno/Wang was adopted to model the mechanical behaviors. The Levenberg-Marquadt nonlinear optimization strategy was introduced briefly. Combing the material test data and utilizing the strategy, parameters of the constitutive model were identified. The model was implemented into ABAQUS and the material tests were numerically simulated. Some good agreement between test data and calculated curves was achieved.

Key words: cyclic softening; mean stress relaxation; constitutive modeling; parameter identification

GH4169 合金在常温和 650℃ 下具有屈服强度高, 塑性、抗疲劳及持久性能好的特点, 因此被广泛应用在航空发动机的一些关键部件上, 如涡轮盘等。此类部件形状复杂, 结构上存在较多易产生应力集中的圆孔和圆角过渡, 这些位置上的材料容易发生塑性变形。在发动机典型的 0-最大-0 循环载荷作用下, 涡轮盘上局部进入屈服的位置, 在卸载过程中, 由于受到周围广大弹性体的约束作用, 会出现反向屈服现象, 即呈现出应变控制, 且应变比接近为 0 的迟滞响应。构件的疲劳损伤^[1] 主要与危险点处的应力范围、应变范围、平均应力和环境温度等因素有关, 其中平均应力对于构件寿命的影响不可忽略, 因此寿命预测模型中往往有平均应力修正这一项。本研究考虑到涡轮盘的实际承载特点, 开展了高温下 GH4169 合金的单调拉伸、对称及非对称循环实验, 得到应力范围和平均应力随循环数的变化规律, 对于涡轮盘在服役期间耐久性的准确评估, 具有一定的现实意义。

为了便于工程应用, 利用理论模型对 GH4169 合金所表现出的复杂力学现象进行本构建模。研究表明^[2], 经典的屈服、硬化与流动理论不能描述材料的循环硬化/软化现象, 更无法描述平均应力松弛现象。而粘塑性本构理论^[3] 却可以解决这样的问题。近年来, 国内学者^[4,5] 在高温合金粘塑性本构理论的应用方面已经进行了广泛深入的研究, 其中比较流行的本构模型主要有 Walker 模型、Bodner-Partom 模型和 Chaboche 模型等。文献 [5] 中提到, Chaboche 模型可以同时很好地描述材料的相关塑性、蠕变和循环硬化/软化特性, 并且在加入 Ohno/Wang 修正以后, 能够较好地模拟材料的平均应力松弛现象。本工作即采用带 Ohno/Wang 修正的 Chaboche 模型, 开展针对 GH4169 合金的粘塑性本构建模工作。Chaboche 模型^[3] 的参数比较多, 且有的参数处于变量的指数项位置, 通常不能轻易获得。因此, 关于粘塑性理论本构方程参数的识别, 一直是一个比较难于解决的问题,

相关文献对此进行过研究^[6,7]。本工作借助 Levenberg-Marquadt 非线性优化算法, 根据材料实验数据, 通过优化的方法来识别 Chaboche 粘塑性理论本构方程的参数。

1 实验结果与分析

实验用材料为直接时效 GH4169 合金。进行了 4 种不同温度: 即 400, 550, 650, 730 °C 下 3 种类型的单轴材料实验。单调拉伸实验, 应变率为 10^{-4} s^{-1} , 用于了解材料的塑性性能, 以及便于对材料进行粘塑性本构建模; 应变控制对称循环实验, 应变比 $R = -1$, 应变范围为 $\Delta\epsilon = \pm 1.0\%$, 应变率为 10^{-3} s^{-1} , 以了解材料的循环硬化或循环软化特性; 应变控制非对称循环实验, 应变比 $R = 0$, 最大应变为 1.5% , 应变率为 10^{-3} s^{-1} , 以了解材料的平均应力松弛特性。

材料实验结果如图 1–3 所示, 其中 N 代表循环数。

图 1 为材料的单调拉伸曲线, 图中给出了应变在 1.5% 以前的实验数据。由图可见, GH4169 合金在 650 °C 下的单调拉伸曲线和 550 °C 下的单调拉伸曲线比较接近, 而和 730 °C 下的单调拉伸曲线相差较多, 显然, 合金在 650 °C 下的塑性性能要明显好于 730 °C 下的塑性性能。由于合金在制备过程中, 可以通过调节控制参数来使得合金在某个温度下的性能突出, 所以这种现象的出现是正常的。

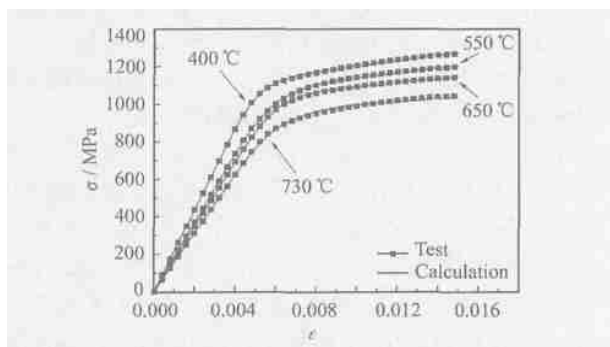


图 1 不同温度下的单调拉伸曲线

Fig. 1 Monotonic tension curves at different temperatures

图 2 为 GH4169 合金的应力范围随循环数而变化的曲线。由图可见, 材料表现出了明显的循环软化特性, 即应力范围随着循环数的增加而减小, 在达到一定的循环数之后, 出现循环稳定状态。温度不同循环软化的程度也不相同, 其中在 650 °C 下应力范围减小了将近 400 MPa, 可见材料的循环软化程度是相当可观的。

图 3 为 GH4169 合金的平均应力随循环数的变化曲线, 由图可见, 材料表现出了明显的平均应力松

弛特性, 即平均应力随着循环数的增加而减小, 温度不同松弛程度也有所区别, 同样, 在经过一定的循环数之后出现循环稳定状态。相比而言, GH4169 合金在 650 °C 下的平均应力松弛程度最大, 达到了将近 40 MPa。值得一提的是, 材料在非对称循环加载下的平均应力松弛特性和对称循环加载下的循环软化特性以及单调拉伸这三种力学现象之间不存在必然的联系, 因此图 3 中 400 °C 与 550 °C 下的应力松弛特性曲线相差不大也是有可能的。

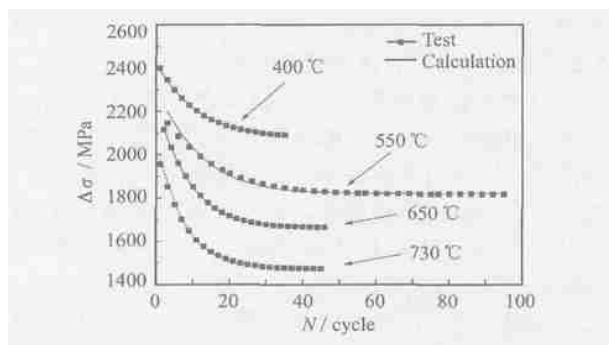


图 2 对称加载时的循环软化曲线

Fig. 2 Cyclic softening curves under symmetric loading

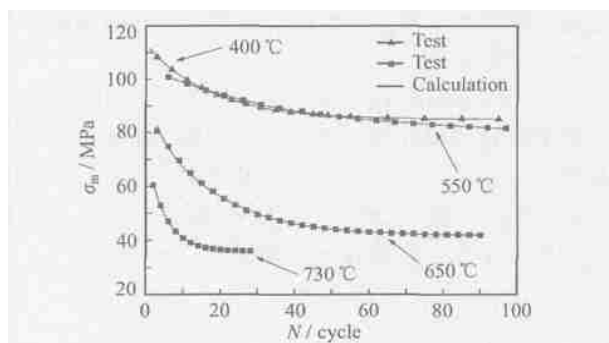


图 3 非对称加载时的平均应力松弛曲线

Fig. 3 Mean stress relaxation curves under unsymmetric loading

总之, GH4169 合金在高温下循环软化和平均应力松弛的程度都是比较大的, 如果不考虑这些特性, 会对涡轮盘寿命的评估带来较大的误差。

2 Chaboche 本构方程及参数识别

2.1 Chaboche 粘塑性理论本构方程^[3]

有关 Chaboche 粘塑性理论本构方程的详细内容可参见文献 [3], 本研究所涉及到的本构方程:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^n = \frac{3}{2} \left[\frac{J(\sigma_{ij} - X_{ij}) - R - k}{K} \right]^n \frac{\sigma_{ij} - X_{ij}}{J(\sigma_{ij} - X_{ij})} \quad (1)$$

$$X_{ij} = c \left[\frac{2}{3} a \dot{\epsilon}_{ij}^n - \left(\frac{J(X_{ij})}{a} \right)^{m_p} X_{ij} \right] \quad (2)$$

$$R = b(Q - R)p \quad (3)$$

式中: $\dot{\epsilon}_{ij}^n$ 为非弹性应变率, $p = 3/2\dot{\epsilon}_{ij}^n$, $\dot{\epsilon}_{ij}^n$ 为累积非弹性应变率, X_{ij} 和 R 分别为材料非线性运动硬化和各向同性硬化的内变量, $J(\sigma_{ij} - X_{ij})$ 和 $J(X_{ij})$ 为自变量的第二不变量形式, 式(2)中采用了2个运动硬化变量, 其中带指数 m 的一项即为 Ohno/Wang 修正项。上述方程中的 $K, n, k, a_1, c_1, a_2, c_2, m_1, m_2, b, Q$ 以及弹性模量 E 均为与温度有关的模型参数。

2.2 非线性优化算法与模型参数识别

对材料进行粘塑性本构建模之后需要识别出本构方程中的各参数值。把本构方程的参数视为一组可变向量, 则本构方程就是这组向量的非线性函数。这样, 事先给定一组初始值, 本构方程在理论上就可以计算出不同种类的应力-应变响应, 将计算结果与相应的材料实验数据进行对比, 会发现二者通常存在较大的差别, 这时借助非线性优化算法, 通过改变这组可变向量的数值, 使计算结果与实验数据之间的残量平方和达到最小, 这样就得到了经过优化以后的模型参数。利用这组参数, 本构模型可以比较好地模拟出材料的实验曲线。

采用 Levenberg-Marquadt 非线性优化算法^[8], 实际上就是求解非线性最小二乘问题。需要拟和的数据为 $(t_i, y_i), i = 1, \dots, m$, 拟和函数为 $\Phi(t, x)$, 它是 x 的非线性函数。选择 x 使得拟和函数 $\Phi(t, x)$ 在残量平方和意义上尽可能好地拟和数据, 其中残量为:

$$r_i(x) = \Phi(t, x) - y_i \quad (i = 1, \dots, m) \quad (4)$$

通常 $m \gg n$ 。对于本研究来讲, 这里的 $\Phi(t, x)$ 就是本构方程中某一变量的表达式, x 为模型参数向量, (t_i, y_i) 就是材料实验数据, m 为实验数据点的个数, n 为模型参数向量的维数。考虑约束线性最小二乘问题, 即考虑信赖域模型^[8]:

$$\min r(x_k + J(x_k)(x - x_k)) \quad (5)$$

$$s.t. \quad x - x_k \leq h_k$$

$$x_{k+1} = x_k - (J(x_k)^T J(x_k) + \mu_k I)^{-1} J(x_k)^T r(x_k) \quad (6)$$

式中: $J(x_k)$ 是 $r(x_k)$ 的雅克比矩阵, 如果 $(J(x_k)^T J(x_k))^{-1} J(x_k)^T r(x_k) \leq h_k$, 则 $\mu_k = 0$; 否则 $\mu_k > 0$ 。由于 $(J(x_k)^T J(x_k) + \mu_k I)$ 正定, 故式(6)产生的向量方向 s 是下降方向, 即模型参数向量将逐渐逼近期望值, 从而将得到最终的优化结果。这种方法是国外学者 Levenberg (1944) 和 Marquadt (1963) 提出的, 称为 Levenberg-Marquadt 方法。本

研究利用 Levenberg-Marquadt 算法要实现的优化目标函数为:

$$\Delta = \sum_{\text{Test type}} \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} \left(\frac{\Phi_{\text{Theory}} - \Phi_{\text{Test}}}{\Phi_{\text{Test}}} \right)^2 \quad (7)$$

式中: NP 是一种温度下每类实验数据点的个数。单调拉伸时 $\Phi = \sigma$; 对称循环加载时 $\Phi = \Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, 即应力范围; 非对称循环加载时 $\Phi = \sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$, 即平均应力。

Levenberg-Marquadt 算法的特点是优化速度快、效率高, 但是对所优化参数的初始值有一定的敏感性, 不过根据本构方程中各内变量的物理意义, 可以从实验曲线上通过粗估得到部分参数的初值。针对 Chaboche 粘塑性理论本构模型分层次的特点^[3], 优化过程亦采取由简单到复杂的顺序。

首先仅针对单调拉伸曲线进行部分参数的优化, 在式(1)和(2)中, 不考虑 Ohno/Wang 修正项时, 加上弹性模量 E , 共有8个材料参数: $E, K, n, k, a_1, c_1, a_2, c_2$ 。弹性模量 E 的初值可由单调拉伸曲线弹性段的斜率粗估获得; k 的值一般对应于单调拉伸曲线弹性段最大值的点所对应的应力值; 另外, 根据 Chaboche 本构方程中参数的物理意义, 积分退化为单轴形式的式(1)和(2)并考虑单调拉伸实验数据, 可以确定其他各参数的初值, 将其代入到优化程序中进行优化。在得到上述8个参数的优化值以后, 固定之, 积分式(3)并参照循环软化实验数据, 可以确定出参数 b 和 Q 的初值, 利用单调拉伸和循环软化两条实验曲线, 优化得到参数 b 和 Q 。然后考虑材料在非对称循环载荷下的平均应力松弛特性, 由式(2)可见, 由于加入的修正项涉及到了参数 a 和 m , 又因为参数 a 与 c 是密切相关的, 所以利用单调拉伸和平均应力松弛2条曲线, 同时优化 $a_1, c_1, a_2, c_2, m_1, m_2$ 6个参数, 其它参数固定不变。最后, 利用单调拉伸、循环软化和平均应力松弛3条实验曲线, 同时优化得到 Chaboche 模型的12个参数。通过上述方法识别得到 GH4169 合金不同温度下 Chaboche 本构方程参数(表1)。在确定出几种特定温度下的参数之后, 利用插值的方法就可以求出任意温度下的本构模型参数。

2.3 数值模拟结果

将所涉及到的 Chaboche 粘塑性理论本构方程通过用户子程序 UMAT 嵌入到有限元软件 ABAQUS 中, 利用表1的本构方程参数, 对 GH4169 合金不同温度下的各种力学现象进行了数值模拟, 其计算结果见图1-3。

由图可知, 计算曲线和实验曲线是较为一致的。首先, 说明经过 Ohno/Wang 修正的 Chaboche 粘塑性

表 1 GH4169 合金不同温度下 Chaboche 本构方程参数

Table 1 Parameters of Chaboche model for GH4169 alloy at different temperatures

$T /$	E / MPa	K / MPa	n	k / MPa	b	Q / MPa	a_1 / MPa	c_1	m_1	a_2 / MPa	c_2	m_2
400	217377	3996	3.60	560	4.39	- 175.8	325	12	0.257	223	54	14.28
550	184251	4091	4.10	343	4.54	- 249.0	571	4	0.0026	718	17	2.76
650	172724	2642	5.90	241	6.00	- 283.9	130	56	1.351	826	7	2.22
730	155809	11632	2.09	559	6.96	- 283.3	1952	2.5	427.7	140	36	0.096

本构理论，能够很好地描述材料的各种复杂力学现象，这是经典弹塑性理论所无法实现的，而且即使同时针对单调拉伸、循环软化和平均应力松弛这三种力学现象进行建模，粘塑性本构理论也能够很好地模拟材料实验曲线，从而更进一步体现了它所具有的优势。其次，借助非线性优化算法对粘塑性本构方程进行参数识别是切实可行的，可以成功地得到 GH4169 合金的 Chaboche 粘塑性理论本构方程参数。

3 结论

对 GH4169 合金在高温下进行了单调拉伸、对称循环及非对称循环的实验和数值模拟研究。在不同温度下，材料均表现出了明显的循环软化和平均应力松弛特性，采用带 Ohno/Wang 修正的 Chaboche 粘塑性理论本构方程，对其表现出的复杂力学现象进行了本构建模，并通过 Levenberg-Marquadt 非线性优化算法识别了本构方程参数，最后通过嵌入子程序的方法对 GH4169 合金的实验现象进行了数值模拟，并与实验数据取得了较好的一致性。

参考文献

[1] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 160-162.

[2] 王仁, 熊祝华, 黄文彬. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 134-140.

[3] CHABOCHE J L. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5: 247-302.

[4] 李海燕. 正交各向异性粘塑性损伤统一本构方程的研究与应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.

[5] 石多奇. 热端部件材料先进粘塑性本构理论与高温多轴疲劳理论研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.

[6] 李海燕, 聂景旭. 粘塑性损伤统一本构模型中材料常数的一种确定方法[J]. 航空动力学报, 2003, 18 (3): 388-393.

[7] 宋迎东, 王舸, 高德平. 一种弹-粘塑性本构模型材料常数的估计方法[J]. 固体力学学报, 2000, 21 (2): 152-156.

[8] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 382-383.

收稿日期: 2004-09-07; 修订日期: 2005-01-05
作者简介: 魏洪亮 (1978-), 男, 博士生, 主要从事发动机结构强度

研究, 联系地址: 北京航空航天大学 10-22# (100083)。

* * * * *

(上接第 20 页)

(2) 随着环境温度从 23 升高到 550 , Fe-13Cr-2.5Mo 合金的铁磁性逐渐降低, 其阻尼逐渐降低到原来的 60% ~ 70%。在外磁场作用下, 磁性阻尼基本消失, 非磁性阻尼保持下来。

(3) 晶粒的大小, 析出物及水冷过程中产生的微观残余应力是 900 水冷处理的合金阻尼峰对应的扭转应变较高的主要原因。1100 炉冷的试样峰值应变较小, 其因外界噪声产生高阻尼的能力较强。

参考文献

[1] 罗兵辉, 柏振海, 谢佑卿. 高阻尼金属的发展及应用 [J]. 材料导报, 1997, 11 (5): 23-26.

[2] 李沛勇, 戴圣龙, 刘大博, 等. 材料阻尼及阻尼合金的研究现状 [J]. 材料工程, 1999, (8): 44-48.

[3] AZCOITIA C, KARIMI A. Soft magnetic materials for optimized vibration control [J]. Materials Science Forum, 2001, 373-376 (7): 765-768.

[4] PULINO SAGRADID. Damping capacity of Fe-Cr-X high-damping alloys and its dependence on magnetic domain structure [J]. Scripta Materialia, 1998, 39 (2): 131-138.

[5] PULINO SAGRADID, SAGRADIM. Noise and vibration damping of Fe-Cr-X alloys [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 2001, 23 (2): 115-122.

[6] 夏茂森, 蒋善玉. 铁基减振合金 00Cr25Al5 减振性能研究 [J]. 山东冶金, 1996, 18 (1): 33-37.

[7] 毕殿清. 铁基阻尼合金的阻尼特性与磁性 [J]. 钢铁研究学报, 1994, 6 (3): 37-40.

[8] 刘效东, 吴宝榕. 铁基阻尼合金中磁畴运动的动态观察 [J]. 钢铁研究学报, 1993, 5 (1): 45-48.

[9] 钟文定. 铁磁学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

基金项目: 核燃料及材料国防重点实验室基金资助项目 (51481040203SC0102)。
收稿日期: 2004-07-21; 修订日期: 2005-01-10
作者简介: 胥永刚 (1969-), 男, 副教授, 博士, 从事焊接材料、阻尼材料、形状记忆合金等领域的研究, 联系地址: 四川大学材料成型系 (610065)。