

基于 Chaboche 理论的 GH901 合金本构模型改进

徐可君¹, 王永旗², 秦海勤¹, 夏毅锐¹

(1. 海军航空大学 青岛校区, 山东青岛 266041; 2. 中国人民解放军 92514 部队, 山东烟台 264007)

摘要:为某型航空发动机涡轮盘损伤分析的需要,在涡轮盘材料 GH901 试件高温拉伸试验、低周疲劳试验、蠕变试验以及疲劳/蠕变交互作用试验基础上,分析 Chaboche 本构模型特点,基于涡轮盘实际使用中的变幅脉冲循环,将应变幅值记忆项引入 Chaboche 本构方程;通过已有试验结果,应用量子遗传算法优化得到改进的本构方程各参数。将本构方程计算结果与试验结果对比,证明改进的本构方程是合理的。

关键词: 涡轮盘; 本构模型; GH901; 航空发动机

中图分类号: V235.1

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.05.008

Improvement of Constitutive Model for GH901 Material Based on Chaboche Theory

XU Kejun¹, WANG Yongqi², QIN Haiqin¹, XIA Yirui¹

(1. Qingdao Campus of Naval Aeronautical University, Qingdao, Shandong 266041, China;

2. No.92514 Troop of PLA, Yantai, Shandong 264007, China)

Abstract: For the damage analysis of turbine disc of an aeroengine, the characters of Chaboche constitutive model was analyzed on the basis of high temperature monotonic tension test, low cycle fatigue test, creep test and fatigue creep interaction test of GH901 samples. The stain amplitude memory item was introduced into Chaboche constitutive model on the basis of variational pulse cycles of turbine disc in actual use. The Quantum Genetic Algorithm (QGA) was used to get the parameters of improved constitutive model according to the test result. Compared the calculation result with test result after getting the parameters of improved constitutive model, the improved constitutive model is proved to be reasonable.

Key words: turbine disc; constitutive model; GH901; aeroengine

0 引言

航空发动机涡轮盘在高温下工作时承受交变的机械载荷和温度载荷的共同作用,在转速较高时部分工作区域承受的应力已经达到塑性区,产生疲劳、蠕变、循环棘轮应变、应力松弛等现象,严重影响涡轮盘的寿命。

GH901 是某型航空发动机高压涡轮盘材料,为对涡轮盘进行损伤分析,必须构建能够准确反映材料性能的本构方程。20 世纪 60 年代以来,各国学者基于位错动力学和热力学最新理论,提出了多种类型的内变量本构理论,杨晓光以是否采用屈服条件为标准,将这些本构理论分为两种^[1]:第 1 类黏塑性本构理

论认为材料达到屈服条件后才能产生非弹性流动,其中 A-F 模型和 Chaboche 模型在工程上得到大量应用。第 2 类黏塑性本构理论不需要屈服准则,以 Bodner 和 Partom 提出的本构模型最为著名^[2]。国内学者也对这 2 种理论进行了大量研究,针对具体材料进行了相应的改进。杨晓光、石多奇团队对这 2 种理论都进行了研究,相对而言,对 Chaboche 理论的工程应用研究更加深入^[3-5]。王庆五基于 Chaboche 理论进行数值算法创新,并编写程序进行有限元二次开发^[6-8]。康国政等对合金的单轴、多轴棘轮行为进行研究,提出适用模型并用数值方法实现^[9-11]。

参考涡轮盘在实际工作条件下的典型温度和应力数据,结合已有试验结果^[12],改进 Chaboche 本构模

收稿日期:2017-01-09

作者简介:徐可君(1963),男,教授,博导,主要研究方向为航空发动机结构强度、寿命可靠性、振动控制、故障诊断; xukejunxuran@126.com。

引用格式:徐可君,王永旗,秦海勤,等.基于 Chaboche 理论的 GH901 合金本构模型改进[J].航空发动机,2017,43(5):39-47.XU Kejun, WANG Yongqi, QIN Haiqin, et al. Improvement of constitutive model for GH901 material based on chaboche theory[J].Aeroengine, 2017, 43(5): 39-47.

型,使之能够更加合理的描述材料的力学行为,为后续有限元分析和损伤计算奠定基础。

1 GH901 合金的力学性能试验

1.1 单调拉伸试验

为了后续建立本构方程的需要并测试某型材料在高温下对应变率的敏感程度,参考某型发动机高压涡轮盘的工作温度,在 575℃ 时进行应变率分别为 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-5}/s$ 和 $10^{-6}/s$ 的单调拉伸试验,结果如图 1 所示。并在 625℃ 时进行应变率为 $10^{-3}/s$ 的单调拉伸试验。

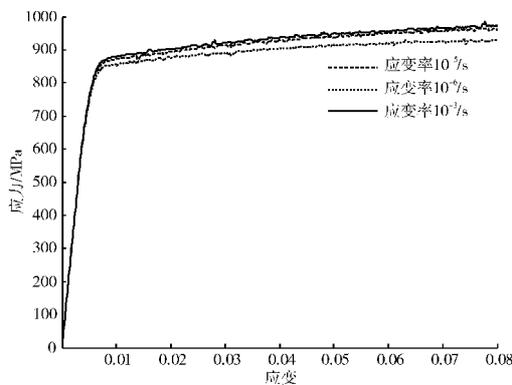


图 1 575℃ 时不同应变率下的拉伸试验结果

从图中可见,应变率为 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-5}/s$ 时拉伸曲线相差不大,当应变率为 $10^{-6}/s$ 时,应力相对其他 2 种应变率时有较明显地降低,说明当应变率低于 $10^{-5}/s$ 时,应力松弛的现象比较明显,而应变率高于 $10^{-5}/s$ 时,应变率对材料性能没有明显影响。在 625℃ 时的单调拉伸试验与 575℃ 时的类似,在此不单独列出。

1.2 轴向控制应变和控制应力低周疲劳试验

分别进行控制应变和控制应力的低周疲劳试验,考察材料在轮盘典型工作温度和应力下的应力-应变响应,为后续建立本构方程获取试验数据。

试件采用圆形等截面试棒,参考第 2 级高压涡轮盘的实际工作温度范围,试验温度仍取 625℃ 和 575℃。

进行轴向应变控制疲劳试验时,应变比 $R=-1$,波形为三角波;经前期试算,选择 625℃ 时对称应变疲劳的应变幅值范围分别为 $\pm 0.7\%$ 、 $\pm 0.4\%$ 和 $\pm 0.3\%$,575℃ 时应变幅值范围分别为 $\pm 0.9\%$ 、 $\pm 0.4\%$ 和 $\pm 0.3\%$ 。

进行应力控制的疲劳试验时,为便于后续的本构方程参数求取,首先进行 625℃ 和 575℃ 时 800 MPa

对称应力循环加载试验,然后参考第 2 级高压涡轮盘的实际工作应力和温度范围,采用有预应力且带保载时间的应力加载波形,预应力分别取 200、300 MPa,峰值应力分别取 790、810 MPa,峰值保载时间分别为 30、60 s,应力加载波形如图 2 所示。

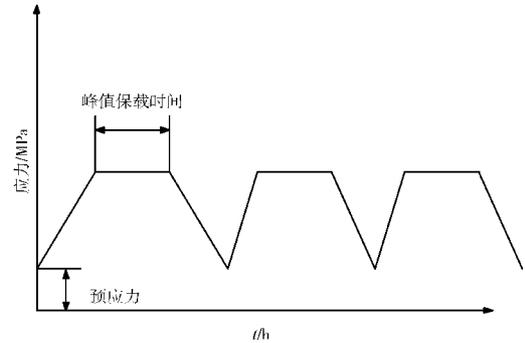


图 2 应力加载波形

(1)单轴应变控制循环试验结果。应用 Matlab 软件处理所有数据。575℃ 时 $\pm 0.9\%$ 对称应变导出数据滞回曲线如图 3 所示。

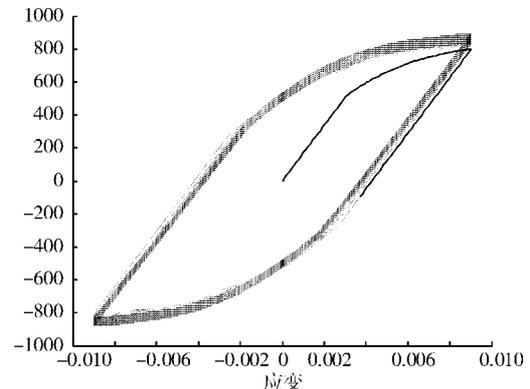


图 3 575℃ 时 $\pm 0.9\%$ 对称应变滞回曲线

从图中可见,在 $\pm 0.9\%$ 对称应变疲劳试验中,在循环初期的 15 个循环中,应变硬化达到饱和,之后随着循环的进行,应力有所减小,直至最后试样断裂。625℃ 时 $\pm 0.7\%$ 和 $\pm 0.4\%$ 对称应变滞回曲线与 575℃ 时的类似,在此不单独列出。

(2)单轴应力控制循环试验结果。575℃ 时 800 MPa 对称应力控制循环导出数据滞回曲线如图 4 所示。

625℃ 时的滞回曲线形状与 575℃ 时的类似,只是应变稍大,在此不单独列出。

图 3、4 中的对称疲劳试验结果表明,GH901 合金在循环初期表现出硬化特性,但很快稳定,之后随着循环的进行,应力值(应变值)缓慢减小(增大),直

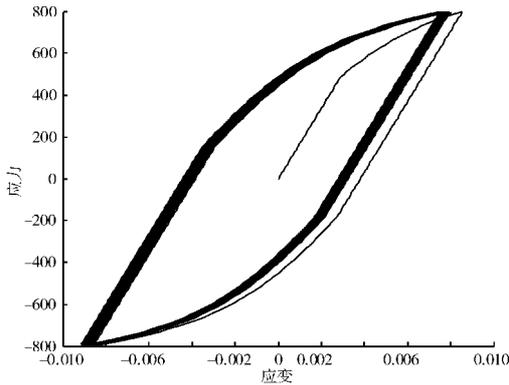


图 4 575 °C 时 800 MPa 对称应力滞回曲线

至试样断裂;随着控制应变幅或应力幅的提高,疲劳寿命缩短;温度对疲劳寿命的影响也很显著,在相同应力下,温度升高,应变增大,疲劳寿命缩短。

为考察疲劳 / 蠕变作用对材料寿命的影响,进行带保载时间的疲劳试验。

575 °C 时最大应力为 790 MPa, 最小应力为 300 MPa,最大应力峰值保载 60 s 的应力控制循环应变变化如图 5 所示。

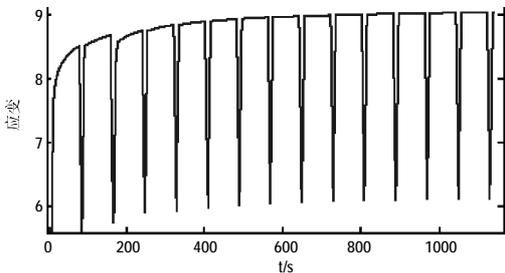


图 5 575 °C 时最大应力保载 60 s 应力应变曲线

从图中可见,在最大载荷处带保载时间时,应变随着时间的增加缓慢增大,说明蠕变对应变增大起到了作用。625 °C 时的试验结果与 575 °C 时的类似,在此不单独列出。

1.3 等温拉伸蠕变试验

为后续本构建模需要,参考高压涡轮盘实际工作时的温度范围,进行 GH901 合金在 550、575 和 625 °C 时不同应力的蠕变试验。仅列出 625 °C 时应力分别为 575、660、700 MPa 的蠕变试验曲线,如图 6 所示。

蠕变试验结果表明:

(1)在材料蠕变第 1 阶段即不稳定蠕变阶段(又称过渡蠕变阶段)不明显,蠕变很快进入第 2 阶段即稳定蠕变阶段;第 2 阶段时间较长,第 2 与第 3 阶段间的过渡段时间较短,进入第 3 阶段后蠕变增长很快,

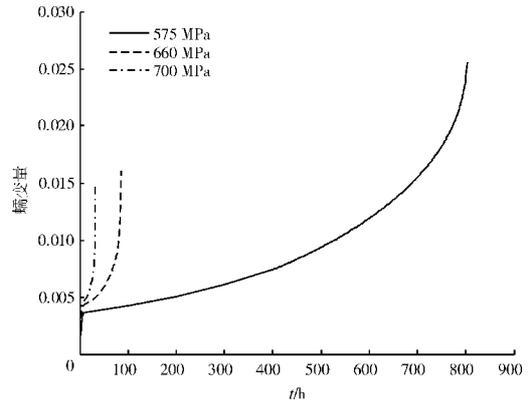


图 6 625 °C 时的蠕变试验曲线

为保护应变规不被破坏,在试件破坏前取下应变规,记录的数据已经能够反映蠕变规律。

(2)稳定蠕变阶段蠕变率变化较小,在相同温度下,随着应力升高,蠕变第 2 阶段时间缩短,第 3 阶段提前;在温度升高时也有类似规律。

(3)在同一温度下的蠕变试验,在相同时间内蠕变应力越低蠕变量越小;以破断为标准,则在破断前较小应力下试件的蠕变量大于较高应力下试件的蠕变量。

为了验证加卸载对蠕变的影响,单独进行了 2 个试件在 625 °C 时 575 MPa 的加卸载蠕变试验,试验结果曲线如图 7 所示。

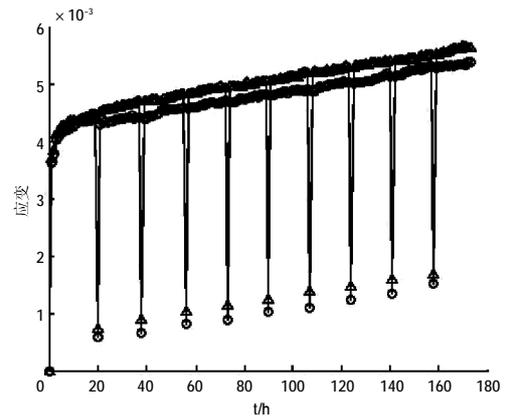


图 7 625 °C 时蠕变加卸载曲线

图 7 表明:

(1)在蠕变过程中经卸载又重新加载后,原来的蠕变量继续存在,在相同应力和温度下,蠕变基本沿着原来的蠕变速率继续进行,蠕变规律不受加卸载影响;

(2)蠕变重新开始后的蠕变量比卸载时的蠕变量会稍稍减少,减少幅度与温度和应力有关,但对于整体蠕变量来说基本可忽略不计。

从蠕变加卸载试验结果可见,在发动机实际使用中,发动机高温部件温度经历 0- 升温 - 保温 - 降温 -0 过程,虽然有停车降温过程,但高温部件的蠕变一旦发生就不可逆转,随着使用次数和时间的增多蠕变量会越来越大,直至试样失效。

2 改进的Chaboche 本构模型及材料参数求取方法

2.1 考虑最大塑性应变记忆效应的本构模型建立

对相关文献研究发现,平均应力历史、应力幅历史、应变循环历史等因素都对后续的应力应变响应有影响。如果承受循环载荷的试件前期循环时产生的塑性应变幅值较大,则循环稳定后再进行低于此应变幅值的循环时硬化效应会减弱^[13-17]。在变幅值应变试验中也发现了 GH901 合金具有这一特点。文献[1]给出的 Chaboche 本构方程没有考虑最大塑性应变记忆的影响,对于前期循环应变幅值较大,而后续循环应变幅值较小的情况,计算时仍然会产生明显的硬化效应(如图 8 所示,先大应变幅值,后小应变幅值加载,计算结果仍存在硬化效应),这是不符合实际的。

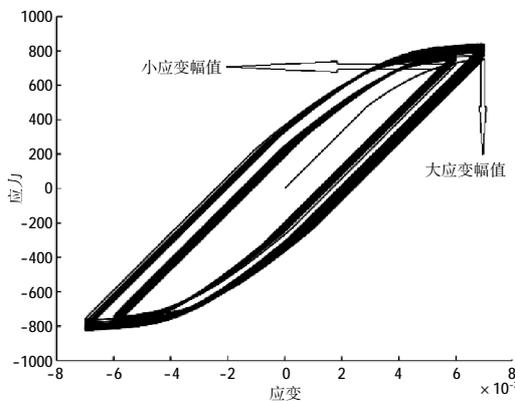


图 8 未加记忆项的应力应变响应

为在计算中考虑最大塑性应变对后续循环的影响,有必要改进本构方程。

Chaboche 统一黏塑性本构理论采用内变量建立本构方程,通过内变量的演化描述应力应变历史,其本构方程的构建过程是开放的,在工程应用中可以根据材料和结构的实际情况灵活选择内变量。基于文献[13-17],在文献[1]给出的本构方程基础上引入 1 种简便的应变记忆项表达式 q 和代表各向同性硬化饱和值的表达式 Q , 得到 1 维形式的本构方程组

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^{in} \\ \dot{\sigma} &= E \dot{\varepsilon}^e \\ \dot{\varepsilon}^{in} &= \left\langle \frac{\sigma_v}{K} \right\rangle^n \text{sign}(\sigma - X) \\ \sigma_v &= |\sigma - X| - R - k_0 \\ \dot{X}_k &= \left[\frac{2}{3} c_k a_k \dot{\varepsilon}^{in} - c_k \Phi(p) \left| \frac{X_k}{a_k / \Phi(p)} \right|^{m_k} X_k \dot{p} - \beta_k |X_k|^{r_1 - 1} X_k \right] \\ \Phi(p) &= \Phi_s + (1 - \Phi_s) e^{-\omega p} \\ \dot{R} &= b(Q - R) \dot{p} \\ q &= \max(|\varepsilon_{in}|, q) \\ Q &= Q_{max}(1 - e^{-\mu q}) \\ \dot{p} &= |\dot{\varepsilon}^{in}| \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $\langle h \rangle$ 是 Heaviside 方程, $\text{sign}(m)$ 是 sign 函数

$$\langle h \rangle = \begin{cases} h & \text{if } h > 0 \\ 0 & \text{if } h \leq 0 \end{cases}$$

$$\text{sign}(m) = \begin{cases} 1 & \text{if } m > 0 \\ 0 & \text{if } m = 0 \\ -1 & \text{if } m < 0 \end{cases}$$

式(1)中可以通过试验获取的变量有应力 σ 、初始屈服应力 k 、应变 ε 、塑性应变 ε_p (或非弹性应变 ε^{in})、累积塑性(非弹性)应变 p 、应变率 $\dot{\varepsilon}$ 、塑性应变率 $\dot{\varepsilon}_p$ (或非弹性应变率 $\dot{\varepsilon}^{in}$),由此可以导出运动硬化应力 X 、各向同性硬化应力 R 、各向同性硬化饱和应力 Q 、黏性应力 σ_v 、负载期间的最大塑性应变 q ;通过拟合得到的参数初值有:运动硬化参数 $a_1, c_1, a_2, c_2, \Phi_s, \omega$,各向同性硬化参数 Q_{max}, μ, b ,热恢复参数 β_1, β_2, r_1 和 r_2 ,棘轮效应参数 m_k ,黏性应力参数 n, k 和 K 。

通过试验获得本构模型各参数的初值后,根据式(1)结合试验结果,应用量子遗传算法^[18-23],采取先分组后整体优化的方法可以得到各参数取值,见表 1。

表 1 优化得到的本构模型参数

温度 T/°C	弹性模量 E/MPa	k/ MPa	a ₁ / MPa	c ₁	a ₂ / MPa	c ₂	Q _{max} / MPa	μ	n	K/ MPa
625	165250	440	101	1528	57	133	89	557	5.1	521
575	168500	450	129	1132	187	49	94	592	5.5	531
550	170500	461	143	1120	195	47	96	601	6.5	537
温度 T/°C	Φ _s	ω	β ₁	β ₂	r ₁	r ₂	b	m ₁	m ₂	
625	0.77	9	3.2E-4	8.6E-6	1.35	3.30	28	0.008	1.57	
575	0.87	14	3.5E-4	6.8E-7	1.10	2.55	30	0.010	1.67	
550	0.91	16	1.8E-5	5.6E-8	1.02	2.40	31	0.011	1.69	

由此方程计算先大幅值、后小幅值以及先小幅值、后大幅值的循环加载,得到计算结果如图 9、10 所示。

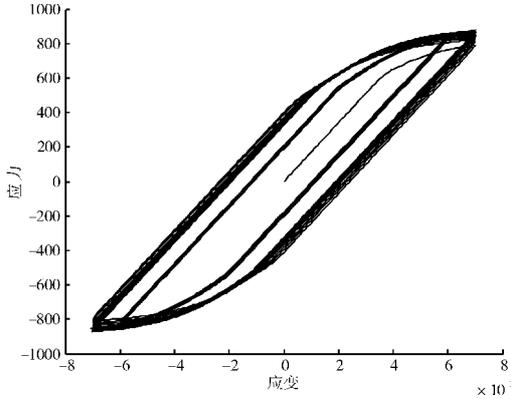


图 9 幅值由大到小应力应变响应

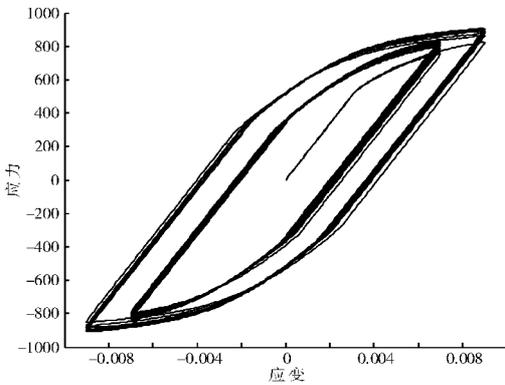


图 10 幅值由小到大应力应变响应

对比图 8、9 表明,考虑最大塑性应变记忆效应,当经历前期较大幅值循环后,后续较小幅值循环的硬化效应会明显减弱。反之(图 10),当前期经历较小幅值循环后,后期较大幅值循环时还会产生比较明显的硬化效应。所以本文提出的改进的本构方程是合理的。

2.2 改进结果与试验结果对比

将改进本构方程计算得到的单调拉伸曲线、循环应力应变曲线和蠕变曲线与试验结果比较,验证模型的准确性。

2.2.1 单调拉伸计算结果与试验数据对比

575 °C 时单调拉伸模拟数据与试验数据对比如图 11 所示。

从图中可见,改进的本构模型对 575 °C 时的单调拉伸曲线拟合较好,相关系数在 0.9 以上。625 °C 时的模拟结果与试验结果相关系数也在 0.9 以上,不单独列出。

2.2.2 应变控制循环计算结果与试验数据对比

575 °C 时 ± 0.9% 对称应变模拟数据与试验数据

对比如图 12 所示。

625 °C 时 ± 0.7% 对称应变模拟数据与试验数据对比如图 13 所示。

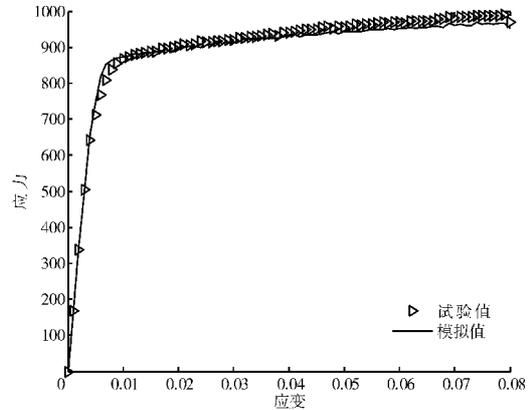


图 11 575 °C 单调拉伸模拟数据与试验数据对比

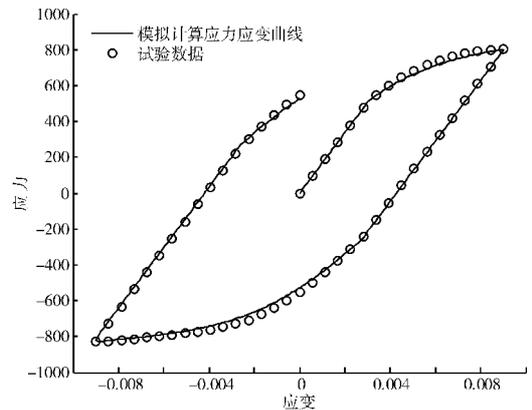


图 12 575 °C 时 ± 0.9% 对称应变模拟数据与试验数据对比

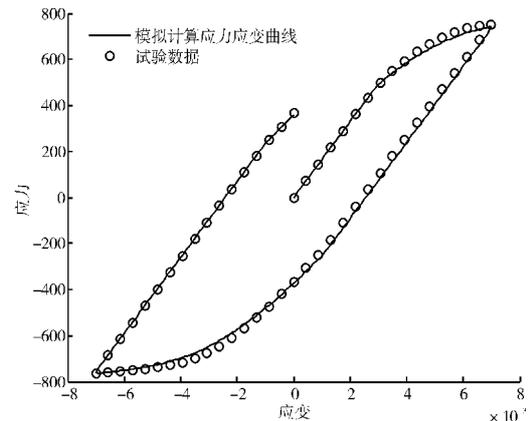


图 13 625 °C 时 ± 0.7% 对称应变模拟数据与试验数据对比

从图 12、13 中可见,改进的本构模型对 575 和 625 °C 时不同应变范围的试验数据拟合效果良好,相关系数在 0.92 以上。其他应变范围下的对比不一——列出。

2.2.3 应力控制循环计算结果与试验数据对比

625 °C 时 800 MPa 对称应力控制循环计算数据与试验数据对比如图 14 所示。

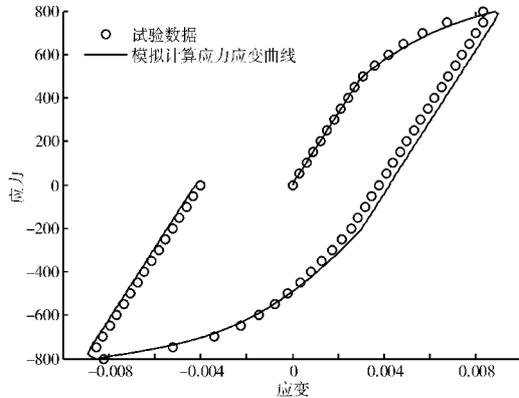


图 14 625 °C 时 800 MPa 对称应力模拟数据与试验数据对比

从图中可见,在应力控制下的模拟计算结果可以较好地描述材料的对称循环应力情况,得到的滞回曲线与试验数据吻合较好,相关系数都在 0.89 以上。其他温度下的计算结果不一列出。

575 °C 时最大应力为 790 MPa, 最小应力为 300 MPa, 最大应力峰值保载 60 s 的应力控制循环计算数据与试验数据对比如图 15 所示。

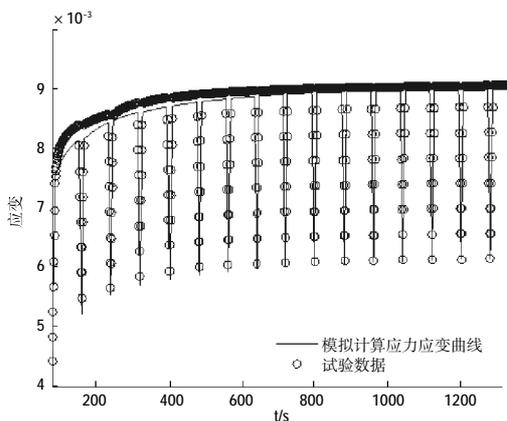


图 15 575 °C 时最大应力 790 MPa 保载 60 s 模拟数据与试验数据对比

从图中可见,带保持时间的优化精度比不带保持时间的低,主要原因是带保持时间的试验要求更高,数据获取时偏差增大所致。

2.2.4 单轴棘轮行为计算结果与试验数据对比

625 °C 时最大应力 810 MPa、应变比 $R=0$ 的应力控制低周疲劳试验观测到的棘轮现象如图 16 所示。

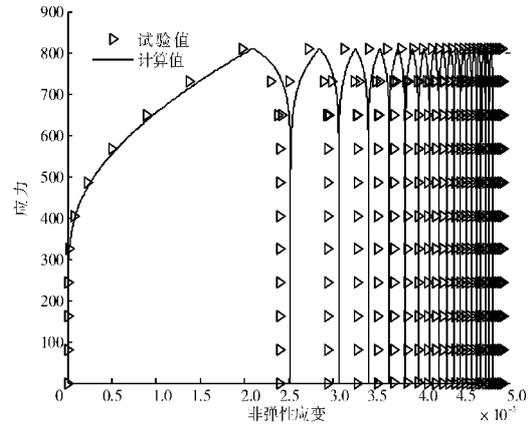


图 16 625 °C 下的棘轮现象

从图中可见,计算得到的最大非弹性应变随着循环的进行逐渐增高,但增高的趋势越来越小,直至达到稳定的现象,与试验结果吻合。材料棘轮应变达到稳定状态后,棘轮应变不再随循环次数增加而增长。模拟棘轮应变比试验值要大,但差值不超过 15%,在 575 °C 的棘轮应变模拟中也存在同样问题,总体而言,模拟结果反映了棘轮应变的趋势,在工程上是适用的。

2.2.5 蠕变计算结果与试验数据对比

单轴蠕变加载时,应用改进的 Chaboche 模型对 575 °C 时 720、760、800 MPa 下的蠕变曲线模拟结果如图 17 所示。

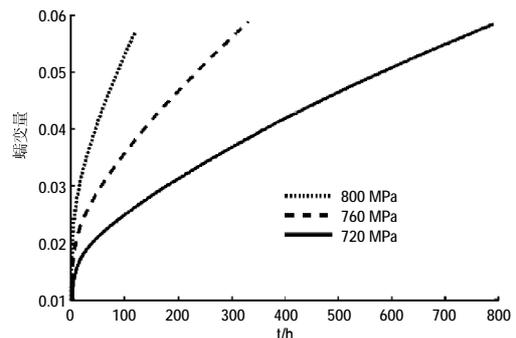


图 17 575 °C 时不包含损伤项的模拟结果

从图中可见,由改进的 Chaboche 模型计算的蠕变应变基本呈线性发展,只能反映蠕变第 2 阶段的情况,不能反映蠕变第 3 阶段的应变变化情况。625 °C 时各应力的蠕变模拟结果与此类似,不单独列出。

对这种问题的处理方式,大多学者采用将蠕变损伤项耦合进本构方程的形式,以反映蠕变第 3 阶段应变加速发展的情形^[1, 24-27]。同时由于增加了 1 个损伤

变量 D , 需要在本构方程中增加蠕变损伤演化方程, 这样本构方程就可以描述蠕变损伤在蠕变第 3 阶段快速增长的现象。

由 Lemaitre 应变等价原理: 任何对于损伤材料建立的应变本构方程都可以用与对于无损伤材料同样的方式导出, 只是其中的通常应力须用有效应力代替。由此理论指导, 根据 Rabotnov 蠕变损伤演化法则^[24-26], 结合式(1), 构建 1 维形式耦合损伤的本构方程组

$$\begin{cases}
 \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^{in} \\
 \dot{\sigma} = \frac{E\dot{\varepsilon}^e(1-D)^2 - \sigma\dot{D}}{1-D} \\
 \dot{\varepsilon}^{in} = \left\langle \frac{\sigma_v}{K} \right\rangle^n \frac{\text{sign}(\frac{\sigma}{1-D} - X)}{1-D} \\
 \sigma_v = \left| \frac{\sigma}{1-D} - X \right| - R - k_0 \\
 \dot{X}_k = \left[\frac{2}{3} c_k a_k \dot{\varepsilon}^{in} - c_k \Phi(p) \right] \left| \frac{X_k}{a_k / \Phi(p)} \right|^{m_k} X_k \dot{p} \\
 - \beta_k |X_k|^{r_k-1} X_k \\
 \Phi(p) = \Phi_s + (1 - \Phi_s) e^{-\alpha p} \\
 \dot{R} = b(Q - R) \dot{p} \\
 \dot{p} = |\dot{\varepsilon}^{in}| \\
 q = \max(|\dot{\varepsilon}_p|, q) \\
 Q = Q_{max}(1 - e^{-\omega q}) \\
 \dot{D} = [\sigma/B] (1-D)^{-k_1} (1-D/D_\sigma)
 \end{cases} \quad (2)$$

耦合损伤的方程中的内变量演化方程和不耦合损伤的形式相同, 只是将无损时的非弹性应变率 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{in}$ 和累计塑性应变 p 用有损时的变量代替即可。

结合蠕变试验数据, 应用量子遗传算法优化求得单轴蠕变损伤演化参数, 见表 2。

温度 / °C	r	B	k	D_0	D_σ
625	16.347	1063.838	28.1376	0	$-4.71E-6\sigma^2 + 5.4E-3\sigma - 1.274$
550	17.216	1425.835	30.7966	0	$2.55E-6\sigma^2 - 3.729E-3\sigma + 1.591$
575	16.9263	1305.169	29.9103	0	$4.69E-6\sigma^2 - 7.69E-3\sigma + 3.375$

625 °C 时保持应力分别为 575、660、700 MPa 下包含损伤的计算蠕变应变曲线与试验数据比较如图 18 所示。

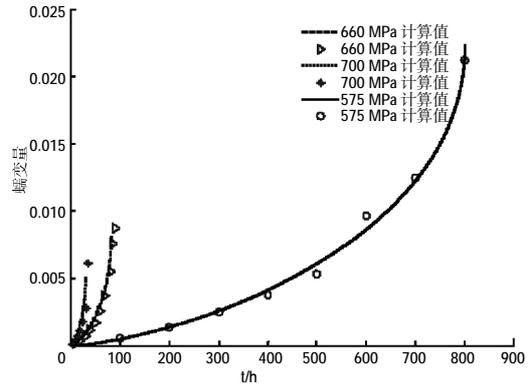


图 18 625 °C 时的蠕变计算应变与试验结果对比

从图中可见, 包含损伤项时, 蠕变应变的发展与试验结果吻合较好, 总体相关系数为 0.87, 可以反映蠕变第 2、3 阶段的应变变化规律。因为 GH901 合金第 1 阶段蠕变时间较短, 所以优化得到的这组参数可以反映材料在 625 °C 时的蠕变行为。

需要注意的是, 由于试验结果的分散性, 在优化时需要兼顾到这种差别, 模拟结果不可能与试验结果完全一致, 有时甚至差别很大, 为此需要多做几次试验, 从统计结果中得到合理的试验数据, 以便更好地优化。

575 °C 时保持应力 720、760、800 MPa 下的计算结果与此类似, 不单独列出。

3 结论

在 GH901 合金相应温度和应力下力学性能试验基础上, 分析文献[1]给出的 Chaboche 本构模型特点, 引入应变记忆项, 应用此改进模型计算得到模拟值并与试验值对比, 其中为得到更好的蠕变模拟曲线, 在改进本构方程中又引入 Rabotnov 蠕变损伤演化法则。得到以下结论:

(1) 在相同温度下, 改进的 Chaboche 模型可以较好地描述材料的循环应力或应变情况, 得到的滞回曲线与试验数据吻合较好, 相关系数在 0.9 以上; 能较好地描述棘轮应变增量随循环次数的增长逐渐减小, 棘轮应变趋于饱和的现象; 带保持时间循环的优化精度比不带保持时间的低, 主要原因是带保持时间的循环存在疲劳 / 蠕变交互作用且对试验要求更高。

(2) 不耦合蠕变损伤的本构模型只能描述蠕变的第 1、2 阶段, 不能描述蠕变的第 3 阶段, 耦合损伤的本构模型可以更好地描述蠕变的第 2、3 阶段, 但对蠕变第 1 阶段描述不理想, 考虑到 GH901 合金蠕变第

1 阶段不明显,蠕变时很快进入第 2 阶段,耦合损伤的本构模型对蠕变的描述是合理的。

(3)本构模型参数的获取对试验的要求较高,对于在同 1 台试验机试验的同批试件,如果前期的试验数据比较精确,则获得的模型可以比较准确地预测剩余试件在同 1 台试验机下的应力应变响应,对不同批次不同试验机的预测结果偏差稍高,但在合理范围之内。

在试验比较充分的情况下,改进的 Chaboche 模型总体上可较准确地模拟材料的各种力学行为。

参考文献:

- [1] 杨晓光,石多奇.粘塑性本构理论及其应用[M].北京:国防工业出版社,2013:6-10.
YANG Xiaoguang,SHI Duoqi. Visco plastic constitutive theory and its application[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2013:6-10. (in Chinese)
- [2] Werner Schiehlen, Leen van Wijngaarden eds. Mechanics at the turn of the century [R]. Aachen: Shaker Verlag.
- [3] 石多奇,杨晓光.时间硬化蠕变本构方程耦合损伤的应用研究[J].航空动力学报,2004,19(1):12-16.
SHI Duoqi, YANG Xiaoguang. Application of the time-hardening creep law coupling damage [J]. Journal of Aerospace Power, 2004,19(1): 12-16.(in Chinese)
- [4] 石多奇,杨晓光,王延荣. Udimet 720 Li 高温变形特性的粘塑性本构建模研究[J].北京航空航天大学学报,2004,30(8):728-731.
SHI Duoqi, YANG Xiaoguang, WANG Yanrong. Visco-plastic constitutive modeling of inelastic deformation of Udimet 720 Li at high temperature[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004,30(8):728-731.(in Chinese)
- [5] 周天朋,杨晓光,石多奇. DZ125 合金高温循环变形特性及本构建模[J].强度与环境,2013,40(1):17-22.
ZHOU Tianpeng, YANG Xiaoguang, SHI Duoqi. High temperature cyclic deformation characteristics and constitutive modeling for alloy DZ125[J]. Structure & Environment Engineering, 2013, 40(1): 17-22. (in Chinese)
- [6] 王庆五,杨晓光,石多奇. IN738LC 材料 Chaboche 热粘塑性本构模型的隐式 Euler 格式[J].航空动力学报,2005,20(6):965-968.
Implicit euler form of chaboche thermal viscoplastic model of IN738LC material [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20 (6): 965-968.(in Chinese)
- [7] 王庆五,杨晓光,石多奇.统一粘塑性本构方程一致切线刚度矩阵的研究[J].航空动力学报,2007,22(11):1898-1901.
WANG Qingwu, YANG Xiaoguang, SHI Duoqi. Research on consistent tangent modulus for unified viscoplastic constitutive equations[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1898-1901.(in Chinese)
- [8] 王庆五,张世辉.各向异性 Chaboche 黏塑性本构方程隐式应力积分算法[J].航空动力学报,2012,27(11):2534-2537.
WANG Qingwu, ZHANG Shihui. Implicit stress integrational gorithm for Chaboche anisotropic visco-plastic constitutive equations [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(11): 2534-2537.(in Chinese)
- [9] Kang G Z. Uniaxial time-dependent ratcheting of SiC/6061Al alloy composites at room and high temperature [J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(14): 18-30.
- [10] Kang G Z, Liu Y J. Uniaxial and multiaxial cycling deformation behaviors of SiC/6061Al alloy composites at room temperature [J]. Key Engineering Material, 2007, 353: 47-50.
- [11] Kang G Z, Kan Q H, Zhang J. Experimental study on the uniaxial cyclic deformation of 25CDV4.11 steel [J]. Journal of Material Science and Technology, 2005, 21(1): 5-9.
- [12] 颜鸣皋.中国航空材料手册:第2卷[M].2版.北京:中国标准出版社,2001:494-508.
YAN Minggao. China aeronautical materials handbook: second volumes [M]. 2nd edition.Beijing: China Standard Press, 2001: 494-508. (in Chinese)
- [13] 康国政.超弹性镍钛形状记忆合金循环变形行为的研究进展[J].西南交通大学学报,2011,41(3):356-363.
KANG Guozheng. Research progress in cyclic deformation of super-elastic NITI shape memory alloy [J]. Journal of Southwest Jiao Tong University,2011, 41(3): 356-363. (in Chinese)
- [14] 余海燕,王友.一种基于 Chaboche 理论的混合硬化模型及其在回弹仿真中的应用[J].机械工程学报,2015,51(16):127-134.
YU Haiyan, WANG You. Study on the ratcheting behavior of metal material [J]. Doctorial Dissertation of Southwest Jiao Tong University, 2015,51(16): 127-134.(in Chinese)
- [15] Ashutosh Mishra,R Suresh Kumar,P Chellapandi. Time dependent ratcheting of thin cylindrical shell due to axial temperature variation using visco-plastic model[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2014, 6(3): 234-237.
- [16] The Chaboche hardening rule.A reevaluation of calibration procedures and a modified rule with an evolving material parameter[J]. Mechanics Research Communications,2015, 69(10): 150-158.
- [17] 高庆,康国政,杨显杰.304 不锈钢室温单轴循环棘轮行为的粘塑性本构描述[J].固体力学学报,2002,23(2):167-172.
GAO Qing, KANG Guozheng, YANG Xianjie. Visco plastic constitutive description of 304 stainless steel under uniaxial cyclic ratcheting behavior at room temperature [J]. Journal of Solid Mechanics,2002, 23(2): 167-172.(in Chinese)
- [18] 王宇平,李英华.求解 TSP 的量子遗传算法[J].计算机学报,2007,30(5):748-755.
WANG Yuping, LI Yinghua. Quantum genetic algorithm of solving TSP [J]. Journal of Computer Science,2007, 30 (5): 748-755.(in Chinese)
- [19] ZHENG Shilian, YANG Xiaoniu. Swarm initialization of shuffled frog leaping algorithm for cooperative spectrum sensing in cognitive radio [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 32(11): 1-6.
- [20] 蒋勇,谭怀亮,李光文.基于量子遗传算法的 XML 聚类方法[J].计

- 算机应用, 2011, 31(2): 446-449.
- JIANG Yong, TAN Huailiang, LI Guangwen. XML clustering method based on quantum genetic algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(2): 446-449.(in Chinese)
- [21] 王瑞琪, 李珂, 张承慧. 基于多目标混沌量子遗传算法的分布式电源规划[J]. 电网技术, 2011, 35(12):183-189.
- WANG Ruiqi, LI Ke, ZHANG Chenghui. Distributed generation planning based on multi-objective chaotic quantum genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 183-189.(in Chinese)
- [22] 叶奇明, 梁根. 量子遗传算法的模糊 K-prototypes 聚类 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(1): 112-115.
- YE Qiming, LIANG Gen. Fuzzy K-prototypes clustering based on quantum genetic algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(1): 112-115.(in Chinese)
- [23] 任帅. 基于振动信号的滚动轴承故障诊断技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014: 41-44.
- REN Shuai. Research on fault diagnosis method and application for rolling element bearing based on vibration signal [D]. Nanchang: Master Thesis of Nanchang University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 41-44.(in Chinese)
- [24] Mahmoudi A H, Pezeshki-Najafabadi S M, Badnava H. Parameter determination of Chaboche kinematic hardening model using a multi objective Genetic Algorithm [J]. Computational Materials Science, 2011, 50(3): 1114-1122.
- [25] Lemaitre J, Chaboche J L. Mechanics of Solid Materials [M]. Cambridge University Press, UK, 1990: 399-420.
- [26] 石多奇, 杨晓光, 王延荣. 耦合蠕变损伤的 Chaboche 粘塑性本构方程的应用[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 61-65.
- SHI Duoqi, YANG Xiaoguang, WANG Yanrong. Applied investigation of Chaboche's unified visco-plastic constitutive model of coupled creep damage[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 61-65. (in Chinese)
- [27] 姜金朋, 陈涛, 金平. 等. Chaboche 随动硬化模型参数确定及棘轮效应[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 58(10): 1430-1435.
- JIANG Jinpeng, CHEN Tao, JIN Ping. et al. Parameter determination of Chaboche kinematic hardening models and ratcheting simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 58(10): 1430-1435.(in Chinese)

(编辑: 李华文)