

GH4169合金的循环本构模型研究*

卢孔汉, 张宏建, 贾鹏超

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为研究GH4169合金在高温环境不同载荷条件下的非弹性响应力学行为, 对其开展650℃下单轴拉伸和恒温低周疲劳试验, 采用Bodner-Partom (B-P) 统一本构理论对其力学行为开展数值模拟研究。通过试验, 获得GH4169合金高温单轴拉伸曲线及半应变幅为0.65%, 0.75%及0.85%下的循环曲线, 基于B-P理论并结合有限元方法, 引入介于0~1的缩小因子, 研究了本构方程隐式积分新算法, 通过ABAQUS用户子程序, 计算得到GH4169合金不同载荷条件下的数值模拟曲线。计算曲线与试验曲线均具有较好的一致性, 说明B-P模型能较合理地建模GH4169合金的高温非弹性响应力学行为, 同时验证了本文模型的完整性和计算程序的正确性。

关键词: 合金; 载荷; 隐式积分算法; 弹性应力; 循环应力; 应变曲线

中图分类号: V250.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2019) 02-0416-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.180055

Study on Cyclic Constitutive Model for GH4169 Alloy

LU Kong-han, ZHANG Hong-jian, JIA Peng-chao

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to study the inelastic response behaviors of GH4169 alloy under different loading conditions at high temperature, the uniaxial tension and low cycle fatigue tests were carried out at 650°C. The Bodner-Partom (B-P) unified constitutive theory was used to simulate the mechanical behaviors of GH4169 alloy. Through the experiment, the uniaxial tension stress-strain data and the cyclic stress-strain data at the half-strain amplitudes of 0.65%, 0.75%, and 0.85% were obtained. Based on the B-P theory and the finite element method, the new implicit integration algorithm for constitutive equations were studied by introducing a reduction factor that is between 0 and 1. The B-P model was implemented in ABAQUS software through UMAT subroutine. Numerical simulation curves of GH4169 alloy under different loading conditions were calculated. The calculated results agree well with the experimental results, indicating that the B-P model can reasonably describe such kinds of high temperature mechanical behaviors of GH4169 alloy, and verify the integrity of the B-P model and the correctness of the program.

Key words: Alloy; Loading condition; Implicit integration algorithm; Elastic stress; Cyclic stress; Strain curve

1 引言

GH4169合金由于具有在较宽温度范围内保持良好的机械性能、抗氧化性能及耐腐蚀性能等优点,

使其在航空发动机涡轮部件等热端结构中得到了广泛使用^[1]。由于航空发动机热端部件在服役时环境恶劣、载荷复杂,因此,对GH4169合金在高温环境下开展循环本构模型研究有助于理解其高温疲劳行为

* 收稿日期: 2018-01-22; 修订日期: 2018-03-19。

基金项目: 国家自然科学基金 (51205190); 航空科学基金 (20150252003)。

作者简介: 卢孔汉, 硕士, 研究领域为高温合金疲劳行为与本构关系。E-mail: lukonghan1993@foxmail.com

通讯作者: 张宏建, 博士, 副教授, 研究领域为先进材料与结构设计技术。E-mail: zhanghongjian@nuaa.edu.cn

以及提高疲劳寿命预测精度。目前研究高温合金本构关系有经典弹塑性论和蠕变理论,但已不能很好地模拟一些先进材料在复杂载荷条件下表现出的力学行为^[2],统一本构理论将塑性和蠕变统一为非弹性应变,采用基于微观结构变化而演化的内部状态变量来表征材料非弹性变形行为,能够较精确地模拟材料在复杂载荷条件下的力学行为。

统一本构理论从提出到现在已发展出了许多知名模型,如 Walker 模型^[3]、B-P 模型^[4]以及 Chaboche 模型^[5]等。目前国内外有不少学者基于统一本构理论,针对 GH4169 合金的本构关系开展了相关研究。Wei 等^[6]针对 GH4169 合金开展了高温准静态单轴拉伸、对称循环和非对称循环本构关系研究,采用 Ohno-Wang 修正的 Chaboche 粘塑性理论并结合非线性优化算法建立了相应本构关系。蔚夺魁等^[7]基于晶体塑性理论并类比 Chaboche 对材料非线性运动硬化描述,在滑移剪切率演化方程中引入背应力项,建立了能够描述 GH4169 合金高温循环应变硬化、Bauschinger 及棘轮效应的晶体塑性本构模型。Huang 等^[8]考虑 Kachanov 损伤演化方程,并结合 Ohno-Wang 改进模型,在各向同性硬化变量中引入指数项,建立了 GH4169 合金的高温循环硬化本构模型。上述研究均是基于较为成熟的 Chaboche 理论或 O-W 理论而开展,而 B-P 理论虽然因为模型参数少、提取材料参数所需试验数量少而广受欢迎,但针对镍基高温合金 GH4169,应用该理论开展的本构关系研究大多只是集中于单轴静强度方面,如 Ambroziak^[9]基于 B-P 理论建立了 GH4169 合金高温单轴静强度本构模型,并研究不同应变速率对材料单轴拉伸力学行为的影响,然而针对 GH4169 合金应用该理论开展复杂载荷条件下的循环本构关系研究则鲜有报道。

本文根据 GH4169 合金单轴拉伸试验结果,计算得到 B-P 模型初始参数,并采用 Levenberg-Marquardt (L-M) 方法^[10]对参数进行了优化,基于 Bodner 的积分思想^[11],为避免直接求解等效塑性应变带来的收

敛失败,引入介于 0~1 的缩小因子 δ 研究了三维 B-P 模型的隐式积分新算法和 Newton-Raphson 迭代算法^[12],并推导本构模型一致切线刚度矩阵以提高积分过程收敛稳定性,利用 Fortran 语言编制了用于 ABAQUS 有限元软件的 UMAT 用户子程序,针对 GH4169 合金在 650℃ 单轴拉伸以及半应变幅为 $\pm 0.65\%$ (即应变在 $-0.65\% \sim 0.65\%$ 不断变化)、 $\pm 0.75\%$ 和 $\pm 0.85\%$ 的高温非弹性响应力学行为开展数值模拟研究,讨论了 B-P 模型用于 GH4169 合金高温疲劳力学行为分析的合理性。

2 试验结果与分析

本文研究对象为 GH4169 合金,美国牌号为 Inconel 718 合金,属于沉淀强化型合金,强化相包括体心四方结构的 γ'' 相和面心立方结构的 γ' 相, γ'' 相为主要强化相,其体心四方结构晶胞可视为由两个面心立方结构 γ' 相晶胞堆垛而成,中间为反向畴界。GH4169 合金化学成分如表 1 所示。为了得到良好的综合力学性能,对 GH4169 合金锻件进行了标准热处理,具体为 960℃ 保温 1h 后空冷,720℃ 保温 8h 并以 50℃/h 随炉冷却至 620℃ 再保温 8h 后空冷。

Table 1 GH4169 alloy chemical composition (wt%)

Al	C	Cr	Mo	Mn
0.50	0.032	19.05	3.00	0.03
Nb	Ti	Si	Ni	Fe
5.17	0.92	0.10	52.16	—

参照《金属材料高温拉伸试验方法 (GB/T4338-2006)》和《金属材料疲劳试验轴向应变控制方法》并结合疲劳试验机夹持条件,设计拉伸试验件总长 110mm,标距段长度为 30mm,疲劳试验件总长 100mm,标距段长度为 14mm,标距段直径均为 $\phi 6\text{mm}$,均采用螺纹连接,具体尺寸及形位公差如图 1 所示。

根据热端部件工作时的环境温度以及主要受载

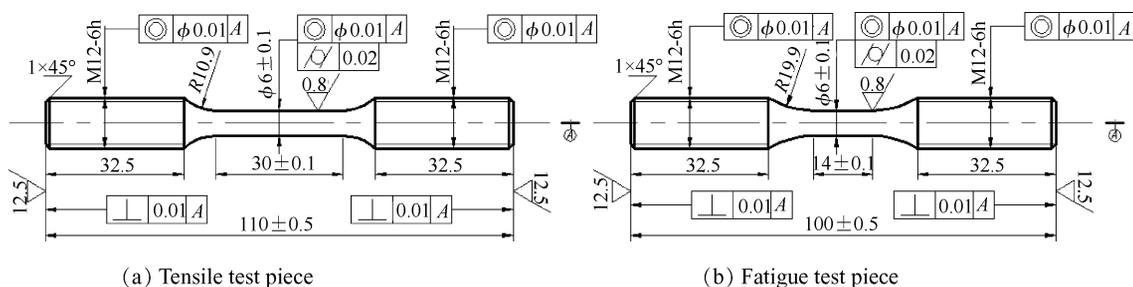


Fig. 1 Shape and size of different test parts of GH4169 alloy (mm)

情况,本文针对GH4169合金开展650℃高温单轴拉伸及恒温疲劳试验研究。两种加载类型试验均在MTS Landmark 370液压伺服疲劳试验机进行,试验件在试验过程中采用高温环境箱进行加热,在加热到指定温度后保温30min使试验件温度均匀分布以防止后续试验过程产生热应力。为了更好地确定高温低周疲劳试验加载条件,首先需要对GH4169合金开展高温单轴拉伸试验,以获取合金基本力学性能参数(弹性模量、屈服强度、抗拉强度及断后延伸率等)和应力-应变曲线。

GH4169合金650℃恒温低周疲劳试验在空气环境中进行,采用轴向应变控制,加载应变速率为 $6.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,应变水平选取为应变幅 $\Delta\epsilon_1/2=0.65\%$,0.75%和0.85%,应变比 $R=-1$,加载波形为三角波。所有试验均进行到疲劳破坏或者最大应力下降30%为止,同时记录下所有循环数(疲劳寿命)、每一循环应力峰谷值,同时按一定循环间隔记录循环响应迟滞回线,试验结果如图2~4所示。

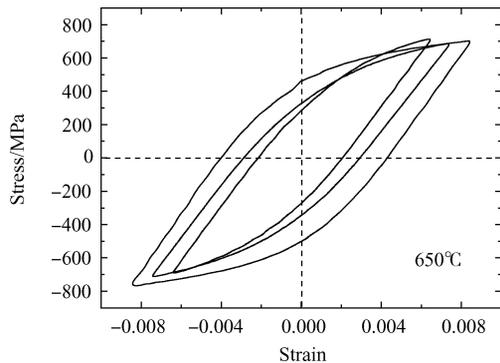
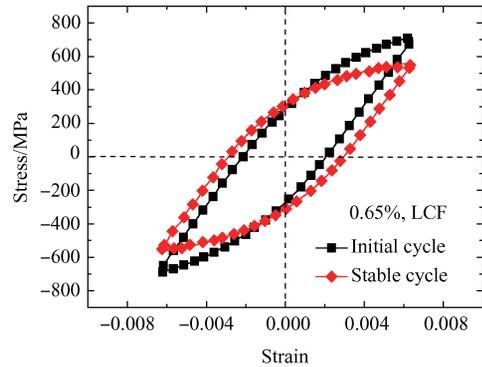
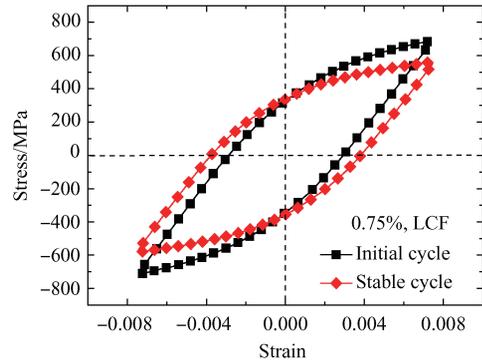


Fig. 2 Cyclic stress-strain curve of GH4169 alloy

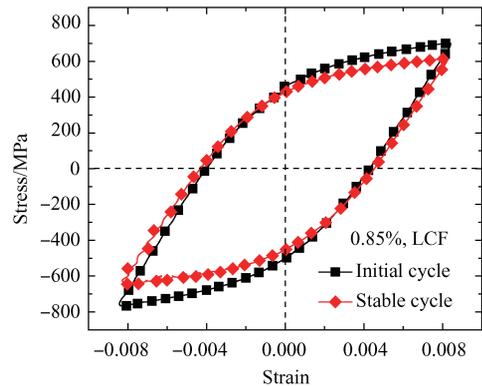
从图2与图3中可以看出LCF试验单个循环内,应力与应变保持着良好单调变化关系,并且迟滞回线表现出拉压对称;从图4中可以看出在三种应变水平下,GH4169合金循环应力响应特征基本相同,均表现为初始循环软化,随后保持循环稳定并在最终断裂前出现快速应力下降,且增大应变水平会明显降低GH4169合金的疲劳寿命。对于GH4169合金而言,强化相 γ'' 相的结构完整性对材料的循环软/硬化行为影响重大。本文试验中GH4169合金出现的循环软化行为可解释为材料在承受低周疲劳载荷作用时,非热运动位错反复剪切或绕过 γ'' 相,导致 γ'' 相空间尺寸减小,降低材料的变形抗性,宏观上表现为所需外加载荷随循环数增加而减小。而Prakash^[13]指出与热处理机制有关的微观结构 δ 相在与位错交互



(a) 0.65%



(b) 0.75%



(c) 0.85%

Fig. 3 Hysteresis loop of low cycle fatigue response at different strain levels of GH4169 alloy at 650℃

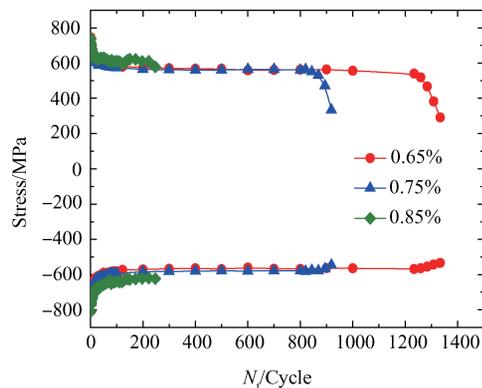


Fig. 4 Stress response curve of low cycle fatigue cycle of GH4169 alloy at 650℃

作用时会促使GH4169合金发生循环硬化,国内研究人员也发现了类似规律^[14],因此本文试验中,材料的循环软化或与不含 δ 相有关。

3 B-P理论

3.1 循环本构模型基本公式^[11]

B-P模型假设在小变形前提下,总应变率可分为弹性应变率与非弹性应变率两部分

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^e + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^in \quad (1)$$

弹性部分服从广义Hooke定律

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}_{ij} = \mathbf{D}_{ijkl} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{kl}^e \quad (2)$$

对于非弹性部分,B-P模型采用Prandtl-Reuss流动法则来定义非弹性应变率和应力偏量之间的张量关系

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^in = \lambda_{ijkl} \mathbf{S}_{ij} \quad (3)$$

式中 \mathbf{S}_{ij} 为应力偏量, λ_{ijkl} 为四阶张量,上式两边自乘并考虑张量求和约定得到

$$\lambda^2 = D_2^in / J_2 \quad (4)$$

式中 D_2^in 为非弹性应变率张量的第二不变量, J_2 为应力偏量第二不变量。

B-P模型根据位错动力学模型建立起非弹性应变率张量与应力偏量第二不变量函数关系 $D_2^in = f(J_2)$,使得塑性本构关系具有微观位错运动的物理基础

$$D_2^in = D_0^3 \exp \left[- \left(\frac{Z^2}{3J_2} \right)^n \right] \quad (5)$$

式中 D_0 为极限剪切应变率,一般认为应变率小于 10s^{-1} 时 $D_0 = 10^4\text{s}^{-1}$,联立式(3)~(5),可得非弹性应变率表达式为

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^in = D_0 \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{Z^2}{3J_2} \right)^n \right] \frac{\mathbf{S}_{ij}}{\sqrt{J_2}} \quad (6)$$

式中内变量 Z 由各向同性分量 Z' 和运动硬化分量 Z^D 两部分组成

$$Z = Z' + Z^D \quad (7)$$

Z' 在比例加载情况下的演化方程由式(8)给出,初始条件为 $Z'(0) = Z_0$ 。

$$\dot{Z}' = m_1 \left[Z_1 - Z' \right] \dot{W}^in - A_1 Z_1 \left[\frac{Z' - Z_2}{Z_1} \right]^{r_1} \quad (8)$$

Z^D 与一个张量 $\boldsymbol{\beta}$ 有关, $\boldsymbol{\beta}$ 的演化方程由式(10)给

出,初始条件为 $\boldsymbol{\beta}_{ij}(0) = 0$

$$Z^D = \boldsymbol{\beta}_{ij} \mathbf{u}_{ij} \quad (9)$$

$$\dot{\boldsymbol{\beta}}_{ij} = m_2 \left[Z_3 \mathbf{u}_{ij} - \boldsymbol{\beta}_{ij} \right] \dot{W}^in - A_2 Z_1 \left[\frac{(\boldsymbol{\beta}_{kl} \boldsymbol{\beta}_{kl})^{1/2}}{Z_1} \right]^{r_2} \mathbf{V}_{ij} \quad (10)$$

式中 n 为材料应变率敏感指数; m_1 控制 Z' 从初值 Z_0 到终值 Z_1 的速率,而 m_2 控制 Z^D 从0到终值 Z_3 的速率; $\dot{W}^in = \boldsymbol{\sigma}_{ij} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij}^in$ 为塑性功率; A 和 r 分别为热恢复系数和热恢复指数,一般认为 $A_1 = A_2 = A$, $r_1 = r_2 = r$; \mathbf{u}_{ij} 和 \mathbf{V}_{ij} 为两个方向性张量。

3.2 隐式积分算法

假定 t_n 时刻 $\boldsymbol{\sigma}_n, \boldsymbol{\varepsilon}_n, \boldsymbol{\varepsilon}_n^in, Z_n$ 等变量已知, t_n 至 t_{n+1} 的应变增量 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ 给定,在弹性预测和塑性校正的基础上通过Newton-Raphson迭代,求得应力增量 $\Delta \boldsymbol{\sigma}_{n+1}$ 。首先假定应变增量 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ 全部为弹性应变,用下式计算试探应力

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^trial = \mathbf{D}^e : (\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - \boldsymbol{\varepsilon}_n^in) \quad (11)$$

并由 $\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^trial$ 计算等效试探应力 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^trial$,如果小于前一步等效应力 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_n$,则说明材料发生弹性变形,直接采用试探应力进行应力更新,反之材料发生塑性流动,需要通过式(12)进行塑性校正。

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^trial - \mathbf{D}^e : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^in \quad (12)$$

由于材料具有不可压缩性,将上式写成偏张量形式

$$\mathbf{S}_{n+1} = \mathbf{S}_{n+1}^trial - 2G \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^in \quad (13)$$

关联塑性流动准则,并考虑到径向返回过程中的方向始终保持径向^[15-16],得到

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1} = \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^trial - 3G \Delta p_{n+1} \quad (14)$$

为避免直接求解等效塑性应变时,其数值过大或过小而造成的收敛困难或收敛失败,假设当前等效应力是试探等效应力的 δ 倍($0 < \delta < 1$),即 $\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1} = \delta \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^trial$,代入式(14),并构造关于 δ 的非线性标量方程

$$F(\delta) = \delta \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^trial - \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^trial + 3G \frac{2}{\sqrt{3}} D_0 \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{Z}{\delta \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^trial} \right)^n \right] \Delta t \quad (15)$$

利用Newton-Raphson迭代算法,以 $\delta = 1$ 对非线性方程进行迭代求解,直到 $F(\delta^k)$ 小于某一小量,具体迭代过程如下

$$\delta^{k+1} = \delta^k - \frac{F(\delta^k)}{F'(\delta^k)} \quad (16)$$

在每一步迭代求解前,需要对 $W_n^{\text{in}}, Z_n', \beta_n, Z_n^D$ 等内变量进行更新^[17]。根据求解得到的 $\bar{\sigma}_{n+1}$ 更新 Δp_{n+1} , 再根据塑性流动法则得到塑性应变增量 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}}$, 然后依次更新其他变量, 最后通过式(17)计算得到应力增量进行应力更新

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \mathbf{D}^e : (\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}}) \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_n + \Delta \boldsymbol{\sigma}_{n+1} \quad (18)$$

3.3 一致切线刚度矩阵

当应用 Newton-Raphson 迭代法在每次载荷步内求解平衡方程时, 为提高本构方程积分过程收敛性, 需要给出本构关系的一致切线刚度矩阵, 即 Jacobian 矩阵 $\mathbf{J} = (\partial \Delta \boldsymbol{\sigma} / \partial \Delta \boldsymbol{\varepsilon})_{t+\Delta t}$ 。因此, 求出 t_{n+1} 时刻的 $\boldsymbol{\sigma}_{n+1}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}}, Z_{n+1}', \beta_{n+1}$ 和 W_{n+1}^{in} 等变量后, 对本构方程再进行微分以求解对应的一致切线刚度矩阵。对式(11)进行微分得到

$$d\Delta \boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \mathbf{D}^e : (d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}}) \quad (19)$$

考虑等效非弹性应变率 $\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{in}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{in}}$, 应力偏量第二不变量 $J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$, 关联塑性流动法则可得到非弹性应变率另一表达式

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{in}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{p} \mathbf{n} \quad (20)$$

式中 $\mathbf{n} = S_{ij} / \|S_{ij}\|$, 对式(20)进行微分得到

$$d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} = \sqrt{\frac{3}{2}} (d\Delta p_{n+1} \mathbf{n}_{n+1} + \Delta p_{n+1} d\mathbf{n}_{n+1}) \quad (21)$$

对等效非弹性应变速率公式进行微分得到

$$d\Delta p = \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta t D_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z_{n+1}}{\bar{\sigma}_{n+1}} \right)^{2n} \right] \times \left[-n \left(\frac{Z_{n+1}}{\bar{\sigma}_{n+1}} \right)^{2n-1} \right] \times \left[\frac{d\Delta Z_{n+1}}{\bar{\sigma}_{n+1}} \right] \quad (22)$$

对二阶方向性张量 \mathbf{n} 进行微分得到

$$d\mathbf{n} = \mathbf{J}_{n+1} : d\Delta \mathbf{S}_{n+1} \quad (23)$$

式中四阶张量 $\mathbf{J}_{n+1} = \frac{\mathbf{I} - \mathbf{n}_{n+1} \otimes \mathbf{n}_{n+1}}{\|S_{ij}\|}$, 对内变量进行微分得到 $d\Delta Z_{n+1}'$ 和 $d\Delta \beta_{n+1, ij}$, 代入式(22)得到

$$d\Delta p_{n+1} = A_0 \sigma_{ij} d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} \quad (24)$$

式中 A_0 为常数。对式(13)进行微分得到

$$d\Delta \mathbf{S}_{n+1} = 2G \mathbf{I}_d : d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - 2G d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} \quad (25)$$

式中 $\mathbf{I}_d = \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$, \mathbf{I}_d 是张量的偏量运算矩阵, \mathbf{I} 为四阶单位张量, \mathbf{I} 为二阶单位张量。将式(23)~(25)代入式(21)得到

$$d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} = \mathbf{L}_{n+1}^{-1} : \sqrt{6} G \Delta p_{n+1} \mathbf{J}_{n+1} : \mathbf{I}_d : d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} \quad (26)$$

式中 $\mathbf{L}_{n+1} = \mathbf{I} - \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{J}_{n+1}^0, \mathbf{J}_{n+1}^0 = \mathbf{L}_{n+1}^0 - 2G \Delta p_{n+1} \mathbf{J}_{n+1}, \mathbf{L}_{n+1}^0 = A_0 \mathbf{n}_{n+1} \otimes \boldsymbol{\sigma}_{n+1}$, 将式(26)代入式(19)得到 B-P 模型的一致切线刚度矩阵为

$$\frac{d\Delta \boldsymbol{\sigma}_{n+1}}{d\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}} = \mathbf{D}^e - 2\sqrt{6} G^2 \Delta p_{n+1} (\mathbf{L}_{n+1}^{-1} : \mathbf{J}_{n+1}) : \mathbf{I}_d \quad (27)$$

本文通过 ABAQUS 软件用户子程序 UMAT 接口, 编制了 B-P 模型完整算法程序, UMAT 流程图如图 5 所示。

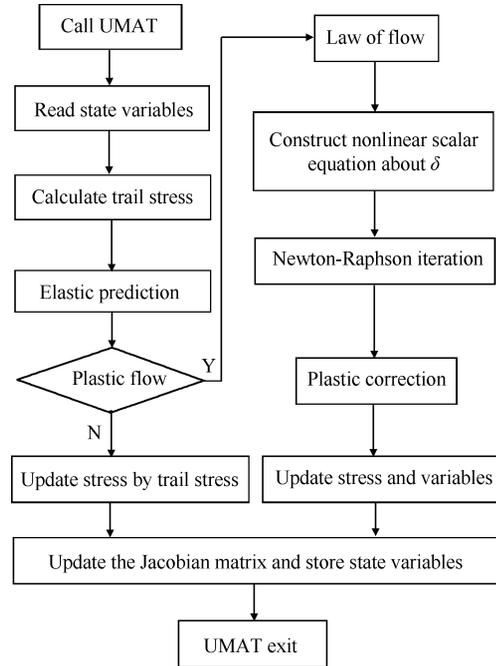


Fig. 5 UMAT flowchart

4 B-P模型的数值模拟与分析

在 B-P 模型中, 材料的非弹性应变和内部结构的演化由内变量来表征, 并用互相耦合的一组非线性微分方程来描述这些内变量的演化。本文结合单轴拉伸试验数据, 参考胡绪腾^[18]改进的模型参数计算方法获得本文模型初始参数, 并采用 L-M 方法对初始模型参数进行优化。目标函数设定为各应变计算出的理论应力值与试验应力值的残差平方和

$$Q = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{\Phi_{i, \text{theory}} - \Phi_{i, \text{test}}}{\Phi_{i, \text{test}}} \right)^2 \quad (28)$$

式中 N_p 为单调拉伸或循环加载的数据点。获得 GH4169 合金在 650℃ 下的 B-P 模型材料参数, 如表 2 所示。

Table 2 Parameter optimization of B-P model material for GH4169 alloy at 650℃

E/GPa	D_0/s^{-1}	Z_0/MPa	Z_1/MPa	Z_3/MPa
189269	10000	1248.2	1702.5	248
m_1/MPa^{-1}	m_2/MPa^{-1}	n	A/s^{-1}	r
0.0033	0.1457	2.72	4.5×10^{-5}	0.7

本文编写了模型参数优化算法, 并编制了 B-P 模型 UMAT 子程序嵌入到有限元软件 ABAQUS 中, 采用表 2 的材料参数对 GH4169 合金在高温环境不同载荷条件下的非弹性响应力学行为开展数值模拟。为了保证仿真过程与试验过程相一致, GH4169 合金几何模型的约束条件为一端固支, 一端受载, 采用 C3D8 单元的 3D 模型对实体进行有限元划分, 并针对试验件的标距段进行了网格细分, 拉伸试验件与疲劳试验件的单元数量分别为 1728 和 1364, 图 6 给出了 GH4169 合金单轴拉伸试验件和疲劳试验件的几何模型以及两种试验类型下的应力云图。

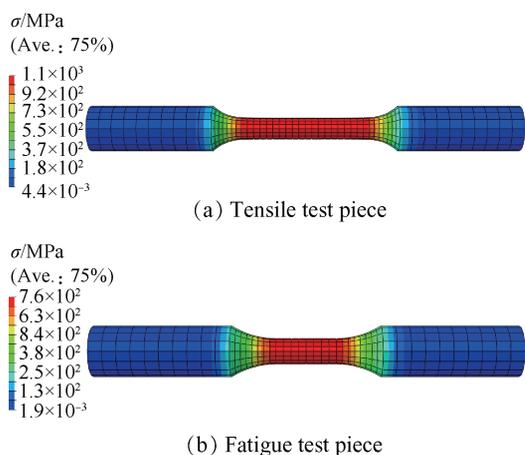


Fig. 6 Geometric model of GH4169 alloy test parts

针对单轴拉伸试验, 通过对几何模型施加 10% 的位移载荷, 绘制应力-应变曲线, 并与试验曲线的比较结果如图 7 所示。从图中可以看出, 单轴拉伸情况下, 计算曲线与试验曲线很吻合。

因为试验机加载的波形为三角波形, 因此本文仿真过程中亦采用三角波形, 单个循环的相对幅值曲线如图 8 所示, 其中相对时间长度表示单个循环周期, 而相对幅值表示施加的位移载荷按照该幅值

进行循环变化。针对试验过程不同的应变水平, 通过对几何模型施加 0.65%, 0.75% 和 0.85% 的位移载荷, 按照图 8 的循环曲线进行循环模拟, 绘制相应的应力-应变曲线, 并与试验曲线相比较, 结果如图 9 所示。从图中可以看出, 在三种应变水平条件下的计算曲线与试验曲线均具有良好的-致性, 特别是在材料弹性加载、卸载阶段以及循环顶点均具有较高的吻合程度, 说明 B-P 模型能够较合理地模拟 GH4169 合金在不同加载条件下的高温疲劳力学行为。

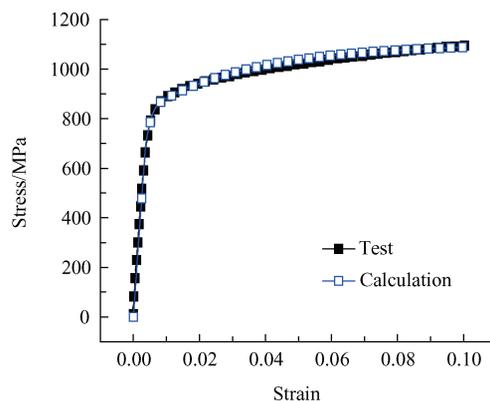


Fig. 7 Numerical simulation results of uniaxial tension of GH4169 alloy

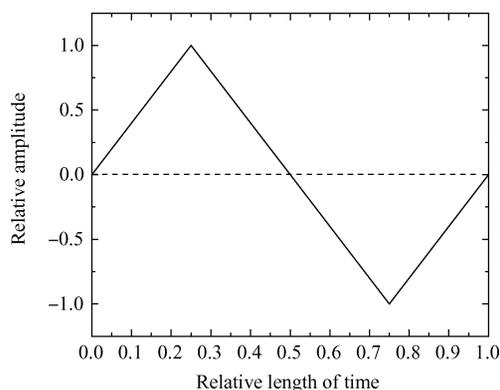


Fig. 8 Cyclic loading relative amplitude curve

本文的数值模拟结果较试验结果更为平坦一些, 即表现为“过方”现象, 这是因为本构模型运动硬化变量的演化方程中缺少动力恢复项, 使得模型的弹性阶段与稳态流动塑性阶段迅速衔接。另外, 冯明辉^[19]指出, 统一本构模型的变形方程中缺少粘弹性变形, 也会造成迟滞环的“过方”。因此, 本文模型有待进一步改进, 在运动硬化变量的演化方程中引入动力恢复项, 考虑更多的运动硬化变量影响因素, 或在本构模型弹性部分引入一个与弹性应变速率、总应变速率以及温度有关的粘弹性变形函数, 以更加全面地反映材料的变形过程。

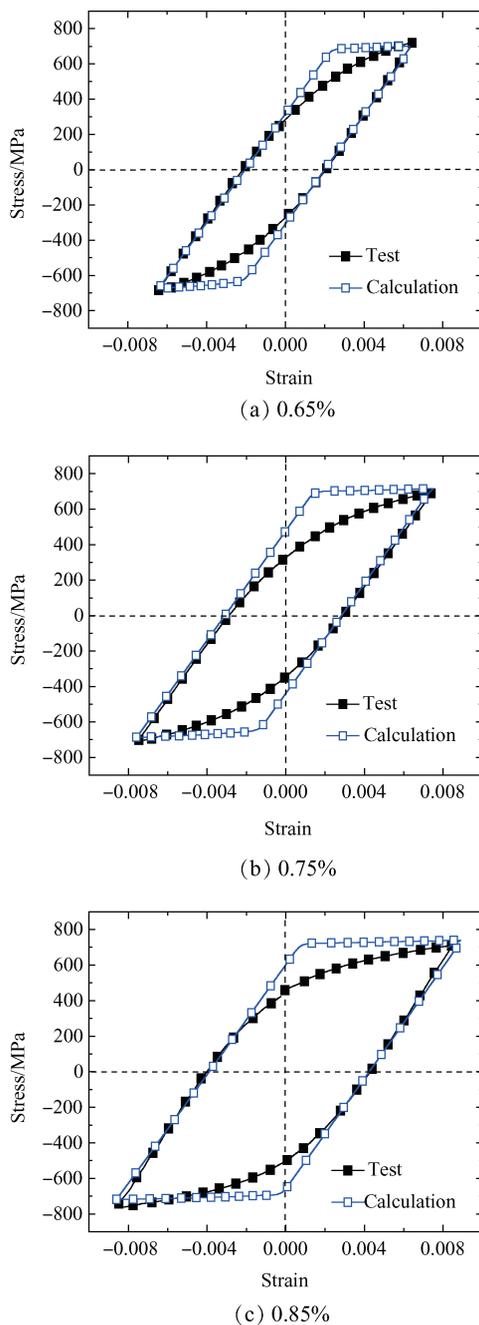


Fig. 9 Numerical simulation results of low cycle fatigue at different strain levels of GH4169 alloy at 650°C

5 结论

本文针对GH4169合金开展了650°C高温环境下单调拉伸及三种应变水平的恒温低周疲劳试验研究,分析材料的力学行为和循环应力-应变曲线,采用B-P理论对其力学行为开展模拟研究,得到结论如下:

(1)GH4169合金在高温疲劳试验单个载荷内应力与应变保持单调变化关系,循环响应迟滞回线关于原点对称;在整个寿命周期内,循环应力响应特征

表现为初始循环软化后进入循环稳定阶段,并于最终断裂前发生快速应力下降。

(2)基于B-P理论,采用引入介于0~1的缩小因子 δ 方法,研究了本构模型隐式积分新算法,编制的本构模型UMAT子程序计算得到了GH4169合金高温单轴拉伸模拟曲线及半应变幅为0.65%,0.75%和0.85%的循环模拟曲线。计算曲线与试验曲线均具有较好的一致性,说明B-P模型能较合理地描述GH4169合金的高温疲劳力学行为,同时验证了本文模型的完整性和计算程序的正确性,但本构模型的“过方”问题有待进一步研究。

致谢:感谢国家自然科学基金、航空科学基金资助。

参考文献:

- [1] 张鹏,朱强,秦鹤勇,等.航空发动机用耐高温材料的研究进展[J].材料导报,2014,28(11):27-31.
- [2] 杨挺青.粘弹塑性本构理论及其应用[J].力学进展,1992,22(1):10-19.
- [3] 周柏卓,张晓霞.正交各向异性材料粘塑性统一本构模型[J].推进技术,1998,19(1):89-93.(ZHOU Bai-zhuo, ZHANG Xiao-xia. The Viscoplastic Unified Constitutive Model of Orthotropic Material[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(1): 89-93.)
- [4] Bodner S R, Partom Y. A Large Deformation Elastic-Viscoplastic Analysis of a Thick Walled Spherical Shell [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1970, 39(3): 751-757.
- [5] Chaboche J L, Kanouté P, Azzouz F. Cyclic Inelastic Constitutive Equations and Their Impact on the Fatigue Life Predictions[J]. *International Journal of Plasticity*, 2012, 35(2): 44-66.
- [6] Wei H L, Yang X G, Yu H C. Constitutive Modeling and Parameter Identification of Mechanical Behavior for GH4169 Alloy at High Temperature[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2005, (4): 42-45.
- [7] 蔚夺魁,杨晓光,张克实.多晶镍基合金循环塑性细观本构关系[J].航空动力学报,2013,28(10):2167-2173.
- [8] Huang J, Shi D Q, Yang X G, et al. Unified Modeling of High Temperature Deformations of a Ni-Based Polycrystalline Wrought Super-Alloy under Tension-Compression, Cyclic, Creep and Creep-Fatigue Loadings [J]. *中国科学:技术科学*, 2015, 58(2): 248-257.
- [9] Ambroziak A. Application of Elasto-Viscoplastic Bodner-Partom Constitutive Equations in Finite Element Analysis[J]. *Computer Assisted Mechanics & Engineering Sciences*, 2007, 14: 405-429.

- [10] 魏洪亮, 杨晓光, 于慧臣. GH4169合金高温力学行为本构建模及参数识别[J]. 材料工程, 2005, (4): 42-45.
- [11] Bodner S R. Unified Plasticity for Engineering Applications[M]. USA: Springer, 2002.
- [12] 邓 斌, 申志彬, 谢 燕, 等. 含损伤粘弹性本构及其在有限元分析中的实现[J]. 推进技术, 2013, 34(5): 699-705. (DENG Bin, SHEN Zhi-bin, XIE Yan, et al. Viscoelastic Constitutive Model with Damage and Its Implementation in Finite Element Analysis[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(5): 699-705.)
- [13] Prakash D G L, Walsh M J, Maclachlan D, et al. Crack Growth Micro-Mechanisms in the IN718 Alloy under the Combined Influence of Fatigue, Creep and Oxidation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(11): 1966-1977.
- [14] 安金岚, 王 磊, 刘 杨, 等. 长期时效对 GH4169合金组织演化及低周疲劳行为的影响[J]. 金属学报, 2015, 51(7): 835-843.
- [15] 康国政. 循环稳定材料的棘轮行为:II. 隐式应力积分算法和有限元实现[J]. 工程力学, 2005, 22(3): 204-209.
- [16] 胡桂娟, 张克实, 黄世鸿. Chaboche率相关本构模型的数值积分算法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(1): 166-171.
- [17] 周计明, 齐乐华. 率相关本构方程积分新算法[J]. 应用力学学报, 2009, 26(4): 762-766.
- [18] 胡绪腾, 宋迎东. Bodner-Partom本构模型材料参数估计新方法[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(2): 196-199.
- [19] 冯明琿. 粘弹塑性统一本构理论[D]. 大连:大连理工大学, 2000.

(编辑:史亚红)