

材料与成形性能

GH4169 高温合金高温低周疲劳行为及 Chaboche 本构分析

方 舟, 吴英弘, 王维民

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 针对 GH4169 高温合金, 开展了高温单调拉伸以及高温低周疲劳试验, 研究了其力学响应行为。结果表明, 在较低应变幅 (0.6%) 下, 合金并未出现明显软化特征, 反而在循环后期出现了较小硬化现象, 在较高应变幅 (0.8%、1.0% 和 1.2%) 下, 呈现出较明显的硬化特征。Manson-Confin 曲线拟合分析结果显示, 合金的总应变幅由塑性应变决定, 不符合 Manson-Confin 的双线性特点。Romberg-Osgood 模型拟合结果表明, 循环加载下材料硬化能力显著高于单调拉伸。Masing 特性研究结果显示, 随着应变幅的增大, 合金的 Non-Masing 特征愈加明显。最后, 基于试验数据, 拟合了 Chaboche 混合硬化模型参数, 并通过 Abaqus 有限元仿真验证了其准确性。研究结果为 GH4169 高温合金的复杂工况仿真提供了可靠的本构模型参数依据。

关键词: GH4169 高温合金; 低周疲劳; 单调拉伸; 循环载荷; Masing 特性

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.026

中图分类号: TG131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2025) 06-0204-10

High temperature and low cycle fatigue behavior and Chaboche constitutive analysis on superalloy GH4169

Fang Zhou, Wu Yinghong, Wang Weimin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: For superalloy GH4169, high-temperature monotonic tensile and high-temperature low-cycle fatigue tests were conducted, and its mechanical response behavior was studied. The results show that at a low strain amplitude of 0.6%, the alloy does not show obvious softening characteristics, but instead shows a small hardening phenomenon in the later stage of the cycle. At higher strain amplitudes (0.8%, 1.0% and 1.2%), it shows a more obvious hardening characteristic. Manson-Coffin curve fitting analysis results indicates that the total strain amplitude of alloy is determined by the plastic strain, which does not conform to the bilinear characteristics of Manson-Coffin. The Romberg-Osgood model fitting results show that the hardening ability of the material under cyclic loading is significantly higher than that under monotonic tensile. The results of Masing characteristics study show that with the increasing of the strain amplitude, the Non-Masing characteristics of the alloy become more obvious. Finally, based on the test data, the Chaboche mixed hardening model parameters are fitted, and the accuracy is verified by Abaqus finite element simulation. Thus, the research results provide a reliable constitutive model parameters basis for complex working condition simulation of superalloy GH4169.

Key words: superalloy GH4169; low cycle fatigue; monotonic tensile; cyclic load; Masing characteristics

GH4169 高温合金广泛应用于航天航空、石油化工等领域, 由于复杂的载荷环境, 该合金会表现出多种力学形式。Fan M L 等^[1]通过有限元模型分析了中心孔边缘的残余应力和应力-应变场, 研究了 GH4169 高温合金在不同温度下的低周疲劳寿命;

Li S M 等^[2]对 GH4169 高温合金在正常和疲劳载荷作用下的摩擦应力损伤规律进行了研究, 引入硬度参数修改了现有的寿命预测模型, 通过有限元模拟和试验数据相结合的方法, 建立了高温摩擦疲劳寿命预测模型, 并进行了验证; Wang Z G 等^[3]使用 GH4169 镍基超合金作为测试基材, 对其进行了固溶、时效、研磨和抛光处理, 并在 500 °C 下进行了摩擦疲劳测试, 结果发现, 粘结固体润滑涂层的应用显著提高了 GH4169 高温黑金榫头连接部件在 500 °C 高温下的摩擦疲劳寿命。

Chaboche 模型是一种用于描述材料在循环加载下行为的本构关系模型, 可以很好地描述金属材料

收稿日期: 2024-05-27; 修订日期: 2024-08-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (92160203); 国家重点研发计划项目 (2020YFB2010803); 中央高校人才基金 (buctrc202026)

作者简介: 方 舟 (1984-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师

E-mail: zhoufang@buct.edu.cn

通信作者: 王维民 (1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师

E-mail: 2006500088@buct.edu.cn

的循环力学行为。因此, 本文通过试验研究 GH4169 高温合金在高温低周下的行为特征, 通过拟合计算 Chaboche 循环本构模型的参数, 并在 ABAQUS 中进行拟合验证参数。

Prager W^[4] 于 1956 年提出了第 1 个线性硬化模型, 该模型可以很好地模拟材料的反向塑性软化特征, 即包辛格效应, 但其却无法模拟出棘轮效应; 1998 年, Frederick C O 和 Armstrong P J^[5] 提出了非线性硬化模型, 其在线性强化律的前提下引入了动态恢复项, 使模型在模拟棘轮相应和瞬态应力特征时有良好效果。AF 模型可以很好地通过模拟应变路径来仿真材料的棘轮应变, 其认为相继屈服面是初始屈服面的平移, 大小、形状均不变, 但其却无法描述非稳态的棘轮应变。后续研究学者在 AF 模型基础上引入了许多非线性微分方程来描述硬化模型和提高预测精度。Chaboche J L 等^[6-7] 在 AF 模型基础上将背应力分解为多级背应力, 使其在每个应力、应变阶段均能进行描述, 有利于模拟材料在各种复杂环境下的工况, 得到了广泛应用。Burler H 等^[8] 将 AF 模型中对于变形路径中关于减退记忆的动力恢复项修正为径向恢复项, 提高了对棘轮效应的模拟。Ohon N 等^[9] 在 Chaboche 模型的基础上, 为每一级背应力均设置了门槛值,

以此构建多级背应力来模拟循环中的棘轮效应。McDowell D L^[10] 在 OW 模型上修正了一个与塑性应变率和背应力相关的函数, 提高了模型对多棘轮效应预测的准确性。

综上所述, Chaboche 本构模型由于其优良的模拟能力, 得到了广泛的研究和应用。为此, 本文开展了 GH4169 高温合金的高温 (650 ℃) 低周试验和高温 (650 ℃) 单调拉伸试验, 低周试验应变比为 -1, 在 4 个应变幅 (0.6%、0.8%、1.0% 和 1.2%) 的载荷条件下循环, 并进行了单调拉伸实验和低周疲劳试验对照, 研究了合金的低周疲劳应力、应变行为规则, 为后续有限元仿真提供了 Chaboche 本构模型参数。

1 实验方法和步骤

本文将主要介绍试验器材、试验操作步骤, 试验采用的器材为 Z250 电子万能材料试验机和万测 HDT 电液伺服疲劳试验机, 进行的试验包括室温单调拉伸试验、不同应变幅的光滑低周疲劳试验。

1.1 试件介绍

试验材料为 GH4169 高温合金, 其具有良好的抗疲劳、抗辐射性能, 适用于制造各种复杂工况下的仪器零件, 常用于航天发动机、石油工业等领域, 其化学成分如表 1 所示。

表 1 GH4169 高温合金的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of superalloy GH4169 (% , mass fraction)

C	Cr	Ni	Si	P	Al	Mn	S	Fe
≤0.08	17~21	50~51	<0.35	<0.015	0.3~0.7	<0.35	<0.015	余量

为完成本研究试验, 按照 GB/T 228.2—2015^[11] 及疲劳试验机要求, 分别设计拉伸试件和疲劳试件, 如图 1 和图 2 所示, 其中 B2/6.3 为 GB 145—2001^[12] 中的 B 型孔。

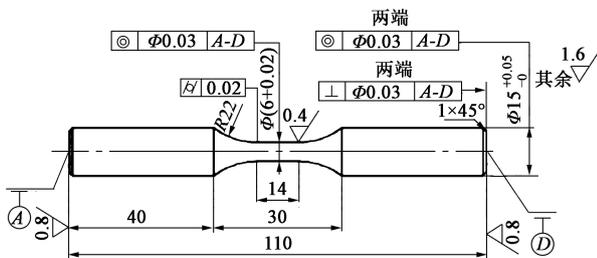


图 1 GH4169 高温合金单调拉伸尺寸图

Fig. 1 Monotonic tensile dimension diagram of superalloy GH4169

1.2 单调拉伸试验

单调拉伸试验根据 GB/T 228.2—2015^[11], 采用 650 ℃ 高温进行, 试验现场如图 3 所示, 由于合

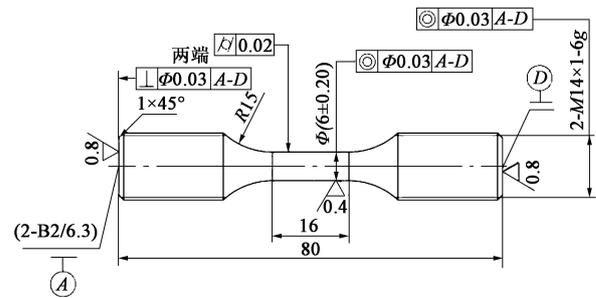


图 2 GH4169 高温合金疲劳试验尺寸图

Fig. 2 Fatigue test dimension diagram of superalloy GH4169

金会出现应力强化或应力软化现象, 试验分为两个阶段进行: (1) 首先采用应变控制, 选用应变控制的载荷模式来测量应变, 根据试件尺寸选用标距为 25 mm 的引伸计, 为保证材料屈服应力和弹性模量测定的精确性, 先以较低的应变速率加载, 直至达到屈服极限; (2) 其次, 切换至位移控制, 以



图 3 单调拉伸试验现场

Fig. 3 On-site of monotonic tensile test

0.021 mm · s⁻¹ 的速率进行拉伸，直至断裂。

1.3 低周疲劳试验

将试件安装在疲劳试验机上进行低周疲劳试验，选取应变控制，应变比为-1，应变速率为 0.004 s⁻¹，三角形波形，应变幅为 0.6%、0.8%、1.0% 和 1.2%，以最大载荷下降 25% 为失效判定，此时对应的循环数为疲劳寿命。低周疲劳试验现场如图 4 所示，试验试件如图 5 所示。



图 4 低周疲劳试验现场

Fig. 4 On-site of low cycle fatigue test

2 GH4169 高温合金循环力学行为响应分析

2.1 GH4169 高温合金的峰/谷值应力分析

图 6 给出了 GH4169 高温合金在循环载荷下的



图 5 低周疲劳试验样品

Fig. 5 Specimen of low cycle fatigue test

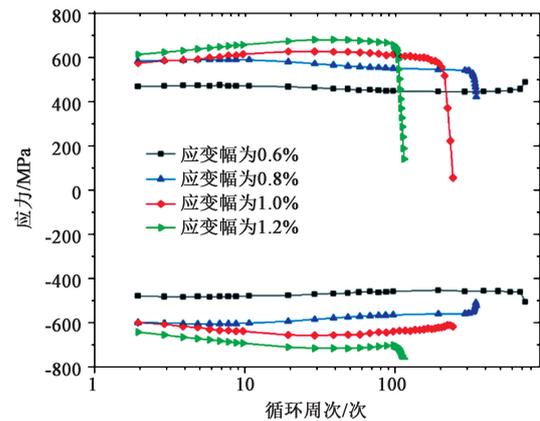


图 6 GH4169 高温合金不同应变幅下峰/谷值应力-循环周次曲线

Fig. 6 Curves of peak/valley stress-cycle for superalloy GH4169 under different strain amplitudes

峰/谷值应力，即一次循环下的最大/最小应力，其趋势可以表示材料塑性的硬化或软化。

从图 6 中可以看出，随着应变幅的增大，材料表现出逐渐软化的特性，这与循环损伤积累相符合。同时，随着应变幅的增大，峰值应力和谷值应力的初始绝对大小均会增大，并在 10 次循环之后，除了较低的应力幅 (0.6%)，其余均会发生迅速变大，并在后期出现裂纹快速松弛。

应力幅大小由峰值应力和谷值应力直接决定，其变化在一定程度体现了材料的硬化、软化行为，如图 7 所示。可以发现，应变幅为 0.6% 时，材料在循环过程中的硬化软化特征并不明显，且在后期还出现了硬化现象；而当应变幅较大时，材料先在循环初期出现软化现象，并保持了较短的稳定状态，在后期迅速软化。

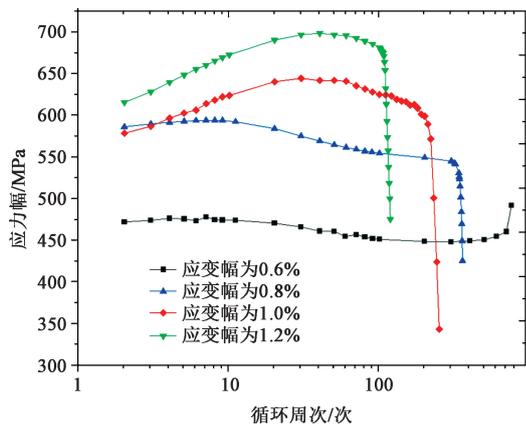


图 7 GH4169 高温合金不同应变幅下应力幅-循环周次曲线
 Fig. 7 Curves of stress amplitude-cycle for superalloy GH4169 under different strain amplitudes

出现上述差异的原因可能为: 应变幅较低时, 材料内部晶体移动幅度较小, 位错缠结并未减少, 在循环后期逐渐积累, 导致内部流动应力增加, 在后期出现硬化^[13]; 当应变幅较大时, 材料在循环初期导致位错增加, 出现了循环硬化的现象, 但随着循环周次的进行, 在后期位错湮灭导致了循环软化, 当位错的增值和湮灭达到平衡时, 材料表现出循环稳定的状态。

2.2 GH4169 高温合金的应变幅分析

针对 4 种应变幅 (0.6%、0.8%、1.0% 和 1.2%) 情况, 绘制不同循环周次下的滞回环曲线, 研究材料在循环过程中的循环变形行为, 如图 8~图 11 所示, 其中 N_f 为疲劳寿命。

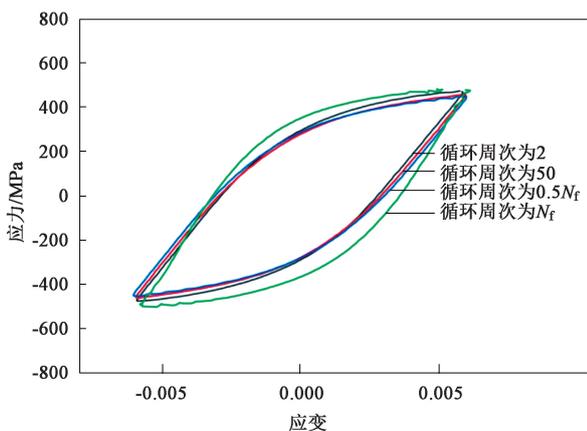


图 8 0.6%应变幅时的滞回环曲线
 Fig. 8 Hysteresis loop curves at strain amplitude of 0.6%

由图 8~图 11 所知, 当应变幅较大时, 随着循环周次的增加, 峰值应力下降, 谷值应力减少, 由图 9、图 10 和图 11 可以发现, 由于循环后期出现较小裂纹, 屈服面尺寸迅速减小, 卸载与加载对称

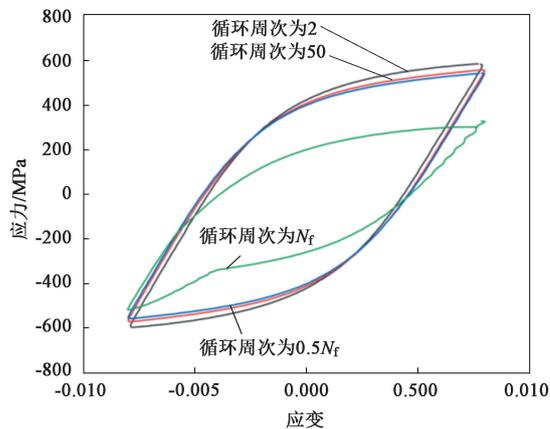


图 9 0.8%应变幅时的滞回环曲线
 Fig. 9 Hysteresis loop curves at strain amplitude of 0.8%

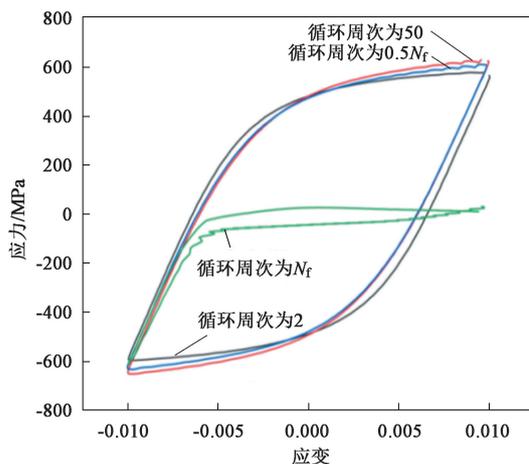


图 10 1.0%应变幅时的滞回环曲线
 Fig. 10 Hysteresis loop curves at strain amplitude of 1.0%

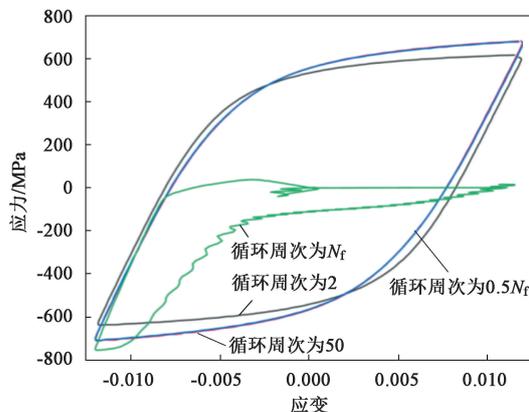


图 11 1.2%应变幅时的滞回环曲线
 Fig. 11 Hysteresis loop curves at strain amplitude of 1.2%

性消失, 出现拐点; 而应力幅较低时, 随着试验的进行, 在循环周次还较小的时候, 峰值应力与谷值应力均呈现出下降的现象, 与其他应变幅行为一致,

表现出较小范围的软化, 而到了循环后期, 随着位错积累, 其呈现出硬化现象, 屈服面尺寸大小并未发生较大变化, 如图 8 所示。

滞回环所反映出来的现象也可以通过平均应力曲线来证明, 如图 12 所示。可以发现, 各应变幅的初始平均应力比较接近, 幅动不大, 且均低于正值, 这表明在各应变幅下, 材料内部体现为压缩应力。且几乎整个循环过程中平均应力变化幅度均较小, 直至循环后期急剧松弛下降, 与滞回环展示出来的现象一致。

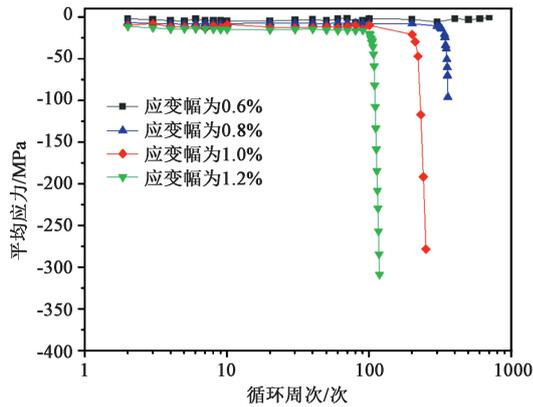


图 12 不同应变幅下的平均应力-循环周次曲线

Fig. 12 Curves of mean stress-cycle under different strain amplitudes

2.3 Manson-Coffin 曲线参数分析

Manson-Coffin (MC) 方程是一种描述材料应变与寿命之间关系的数学经验方程, 该方程可以将总应变幅分解为弹性应变和塑性应变两部分, 其表达式如式 (1) 所示。

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \varepsilon'_f(2N_f)^c \quad (1)$$

式中: ε_a 为应变幅; σ'_f 为材料的疲劳强度系数; E 为弹性模量; ε'_f 为疲劳延性系数; b 为疲劳强度指数; c 为疲劳延性指数。

试验提取相关半疲劳寿命 ($0.5N_f$) 下的数据进行数据处理, 将应力、应变转化为真实应力、真实应变, 具体试验结果见表 2, 其中弹性模量为加/卸载弹性模量平均值; ε_{ta} 为总应变幅, 其值为应变幅的两倍; σ_a 为应力幅。

通过拟合可以得出疲劳参数如表 3 所示。

MC 方程中, 若总应变幅较大时, 材料寿命由塑性应变幅决定; 当总应变幅较小时, 则材料寿命由弹性应变幅决定。

绘制 GH4169 高温合金应变幅-寿命关系曲线如图 13 所示, 其中, ε_{pa} 为塑性应变幅, ε_{ea} 为弹性应变幅。

表 2 GH4169 高温合金低周疲劳试验结果

Table 2 Low cycle fatigue test results of superalloy GH4169

$\varepsilon_a/\%$	$0.5N_f$			$N_f/\text{次}$
	$\varepsilon_{ta}/\%$	σ_a/MPa	E/MPa	
0.6	0.60000	449.205	154317.0	761
0.8	0.79895	550.355	166507.0	360
1.0	0.99345	622.340	161868.0	250
1.2	1.20055	696.550	165987.5	118

表 3 Manson-Coffin 曲线参数

Table 3 Parameters of Manson-Coffin curve

参数	载荷形式	c	b	σ'_f	ε'_f
数值	应变比为-1	-0.469	-0.21	2311	0.1034

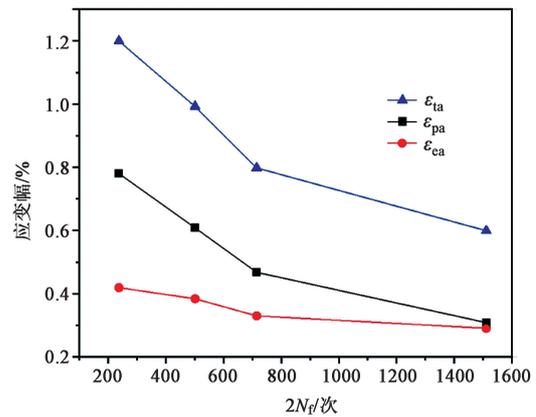


图 13 GH4169 高温合金应变幅-寿命关系曲线

Fig. 13 Relationship curves between strain amplitude and life of superalloy GH4169

由图 13 可以发现, 弹性应变幅-寿命曲线和塑性应变幅-寿命曲线均呈现出非线性递减的特征, 表明该材料不符合 Manson-Coffin 的双线性特点。这表明 GH4169 高温合金的塑性应变积累敏感度要高于弹性应变。同时也可以发现, 随着应变幅的增大, 塑性线和弹性线之间的应变幅越来越大, 材料的总应变幅由塑性应变决定; 而当应变幅较小时, 材料的塑性应变和弹性应变较为接近, 可以将其看作材料变形的分界点。

2.4 循环应变应力寿命分析

单调拉伸试验应力、应变关系可以用 Romberg-Osgood (RO) 方程来进行描述, 如式 (2) 所示。

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

式中: σ 和 ε 分别为应力和应变; K 和 n 分别为材料的强度系数和应变硬化指数。

单调拉伸试验曲线如图 14 所示。

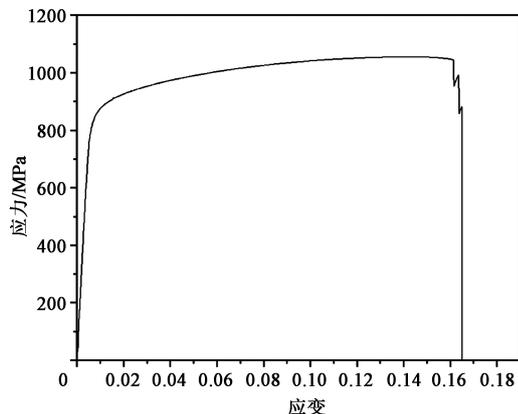


图 14 GH4169 高温合金单调拉伸曲线

Fig. 14 Monotonic tensile curve of superalloy GH4169

在低周疲劳试验中，一般以不同应变幅下的稳定循环阶段的滞回曲线定点连线作为循环应变-应力曲线，也可以使用 Romberg-Osgood 模型进行定量描述，如式 (3) 所示。

$$\varepsilon_{ta} = \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{\frac{1}{n'}} + \frac{\sigma_a}{E'} \quad (3)$$

式中： n' 、 K' 和 E' 分别为材料的循环应变硬化指数、循环强度系数和循环弹性模量。

通过式 (2) 和式 (3) 对单调拉伸和低周疲劳分别拟合，可得到 RO 模型相关参数，如表 4 所示。

表 4 单调拉伸和循环载荷应力应变特性参数

Table 4 Characteristic parameters of stress-strain for monotonic tensile and cyclic load

参数	载荷形式	强度系数/MPa	硬化指数	弹性模量/GPa
数值	单调拉伸	1202	0.0648	156
	循环加载	3017	0.3267	162

由上述参数可知，循环加载的循环强度系数和循环应变硬化指数均远远大于单调拉伸响应参数，这表明该材料在循环疲劳中硬化能力得到大幅提高。

2.5 Masing 特性分析

大多数金属材料在循环疲劳中均会出现 Masing 现象或 Non-Masing 现象。Masing 特性是用来描述材料在循环疲劳加载下弹性范围不因应变幅的变化而变化，在加载周期的每次循环中，材料的应力应变响应均会重复，并且无累积损伤，即材料在应力应变平面上表示的一种特定形状的轨迹完全重叠，其循环应力-应变曲线尺寸未发生变化。

材料在变形过程中是否表现出 Masing 特性与材

料类型、材料状态、应变幅值、温度等因素有关^[14-17]。从微观层面上看，当应变幅过大时会影响到其内部中位错结构的稳定性，从而使材料体现出 Non-Masing 特性^[18-19]。

判断材料是否有 Masing 特性，可以在应力应变坐标图中，将稳定状态下的滞回环曲线平移至坐标轴，如图 15 所示。

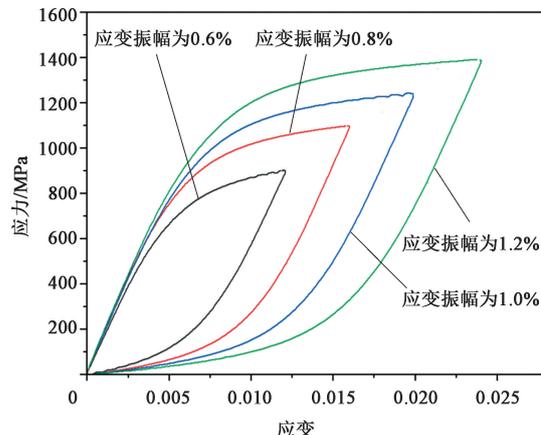


图 15 GH4169 高温合金的 Masing 特性曲线

Fig. 15 Masing characteristic curves of superalloy GH4169

由图 15 可以发现，GH4169 高温合金在 0.6% 应变幅之上的几个应变循环皆体现出了 Non-Masing 特性，且在大应变幅条件下，材料的 Non-Masing 特性更为明显。

3 Chaboche 本构模型分析

3.1 混合硬化模型

根据文献 [20] 可知，可使用 Chaboche 混合硬化模型来表达 GH4169 高温合金循环试验中应力应变行为，其屈服准则如式 (4) 所示。

$$f(\sigma - X, y) = \sqrt{\frac{3}{2}(s - a) \cdot (s - a) - Q - y_0} = 0 \quad (4)$$

式中： $f(\sigma - X, y)$ 为屈服准则表达式； X 为背应力； y 为屈服应力； s 为偏应力张量； a 为背应力张量； y_0 为初始屈服应力； Q 为各向同性应力，代表屈服面的扩张移动。

在循环加载中，各向变量累积塑性应变 p 和各向同性应力 Q 可以用来表示各向同性硬化，其各向同性应力 Q 的表达式可以写为：

$$dQ = v_s(Q_{max} - Q) dp \quad (5)$$

对其积分可以得到同性硬化率：

$$Q = Q_{\max}(1 - e^{-v_{\max} p}) \quad (6)$$

式中: Q_{\max} 为 Q 所能达到的最大值, 即各向同性应力最大值, 代表了循环稳定下区域相对应的渐进值; v_s 为屈服面扩展速度达到稳定的变化率; v_{\max} 为屈服面扩展速度达到最大值的变化率。

p 的表达式如式 (7) 所示。

$$p = 2N\varepsilon_{pa} \quad (7)$$

式中: N 为循环周次。

Chaboche J L 等^[6-7] 提出可以用随动硬化率将背应力 X 划分为不同分背应力 X_i , 如式 (8) 所示。

$$dX = \sum_{i=1}^M dX_i \quad (8)$$

式中: M 为背应力划分的级数。

同时, 背应力 X 满足 Armstrong 随动硬化规则, 如式 (9) 所示。

$$dX_i = \frac{2}{3}C_i d\varepsilon_p - \gamma_i X_i dp \quad (9)$$

但在单轴循环加载时, 随动硬化的演化方程可以解析积分为式 (10):

$$X = \sum_{i=1}^M dX_i = \sum_{i=1}^M \left(\varepsilon' \frac{C_i}{\gamma_i} + \left(X_0 - \varepsilon' \frac{C_i}{\gamma_i} \right) e^{-\gamma_i \varepsilon' (\varepsilon_p - \varepsilon_{p0})} \right) \quad (10)$$

式中: X_0 和 ε_{p0} 分别为背应力和塑性应变的初始值, 即上一个加载或卸载的终值; C_i 和 γ_i 为随动硬化参数, 分别代表随动硬化模量和动态恢复系数, 其大小可以从单调拉伸曲线或滞回环中获取; ε'_i 为第 i 分级背应力对应的正/负塑性应变速率; ε' 为正/负塑性应变速率, 其值分别取 1 或 -1。

而当每个阶段的塑性应变增量足够大, 即 $\varepsilon_p - \varepsilon_{p0}$ 足够大, 背应力为 $\pm C_i / \gamma_i$, 其值为饱和值。

当加载过程达到结尾, 该点的背应力和塑性应变为下一个阶段的初始背应力和塑性应变, 将背应力再次分解, 可得分背应力最大值/最小值, 如式 (11) 与式 (12) 所示。

$$X_{\max,i} = \frac{C_i}{\gamma_i} + \left(X_{\min} - \frac{C_i}{\gamma_i} \right) e^{-\gamma_i (\varepsilon_{p\max} - \varepsilon_{p\min})} \quad (11)$$

$$X_{\min,i} = \frac{C_i}{\gamma_i} + \left(X_{\max} - \frac{C_i}{\gamma_i} \right) e^{\gamma_i (\varepsilon_{p\min} - \varepsilon_{p\max})} \quad (12)$$

式中: $X_{\max,i}$ 和 $X_{\min,i}$ 为第 i 分级背应力的最大值和最小值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为背应力的最大值和最小值; $\varepsilon_{p\max}$ 和 $\varepsilon_{p\min}$ 分别为塑性应变的最大值和最小值。

故由式 (4) ~ 式 (12) 可知, Chaboche 硬化模型^[21] 是一种逼近方法, 其使用 3 个 AF 模型来叠

加材料的单调拉伸曲线, 每个 AF 模型的作用为:

(1) 第 1 个 AF 模型的 C_1 和 X_1 较大, 用来模拟初始阶段, 应变比较小的力学行为响应;

(2) 第 2 个 AF 模型的 C_2 和 X_2 同样比较大, 此时模拟中等应变阶段的力学行为响应;

(3) 第 3 个 AF 模型的参数 C_3 和 X_3 , 模拟最后阶段, 此时为大应变区, 通常模拟材料的棘轮效应控制模型。

为确定模型参数, 首先需要确定 Chaboche 模型的后应力分级级数, 本文选择最经典的 3 级背应力模式来描述材料不同塑性阶段的非线性行为。

3.2 Chaboche 模型参数确定

上述 Chaboche 模型参数可以分为 3 类: 弹性参数 E 和初始屈服应力 y_0 ; 非线性随动硬化参数 C_i 和 γ_i ; 非线性各向参数 Q 和 v_s 。

其中弹性参数和初始屈服应力可通过相同高温单调拉伸获得; 非线性随动硬化参数则需要将单调拉伸曲线划分 3 个塑性阶段, 同时要将应力转化为背应力^[22], 具体方法如式 (13) 和式 (14) 所示。

$$\sigma_{\max}^g = \sigma_{\max}^0 h(p) \quad (13)$$

$$\sigma^* = \sigma / h(p) \quad (14)$$

式中: σ_{\max}^0 为第 1 个循环中的最大应力; σ_{\max}^g 为第 g 个循环中的最大应力; σ^* 为转换应力; $h(p)$ 为拟合函数。

获得对应转化应力的塑性应变, 最终得到非线性随动硬化参数 C_i 和 γ_i , 如式 (15) 和式 (16) 所示。

$$C_i = \left(\frac{\sigma^{*(i)} - \sigma^{*(i-1)}}{\varepsilon_p^{(i)} - \varepsilon_p^{(i-1)}} - \frac{\sigma^{*(i+1)} - \sigma^{*(i)}}{\varepsilon_p^{(i+1)} - \varepsilon_p^{(i)}} \right) \varepsilon_p^{(i)} \quad (15)$$

$$\gamma_i = \frac{1}{\varepsilon_p^{(i)}} \quad (16)$$

式中: $\sigma^{*(i)}$ 、 $\sigma^{*(i-1)}$ 、 $\sigma^{*(i+1)}$ 、 $\varepsilon_p^{(i)}$ 、 $\varepsilon_p^{(i-1)}$ 和 $\varepsilon_p^{(i+1)}$ 分别为第 i 、第 $(i-1)$ 和第 $(i+1)$ 分级背应力对应的转换应力值和塑性应变值。

各向同性硬化参数 Q 和 v_s 可以采用摩擦应力法获得, 如式 (17) 所示。

$$\sigma_F = y_0 + Q = y_0 + Q_{\max}(1 - e^{-2r_s N \varepsilon_{pa}}) \quad (17)$$

式中: σ_F 为摩擦应力, 数值为屈服面尺寸的 1/2, 即峰谷值应力与屈服点之差的 1/2^[22]。

综上所述, 计算拟合出 Chaboche 本构模型参数如表 5 所示, 其中 T 为温度。

表 5 Chaboche 本构模型参数值
Table 5 Parameter values of Chaboche constitutive model

参数	$T/^\circ\text{C}$	C_1/MPa	C_2/MPa	C_3/MPa	Q/MPa	Q_{\max}/MPa	v_s	γ_1	γ_2	γ_3	E/GPa	γ_0/MPa
数值	650	408591	11000	30	835	-210	2.6	2000	345	186	156	886

3.3 仿真结果分析

Chaboche 模型能够对材料全寿命周期进行模拟, 同时由于材料在半寿命循环下会进入一个较为稳定的状态, 通常对这个周期段进行模拟仿真。故为了验证上述参数的准确性, 本文使用 Abaqus 有限元仿真软件, 对 GH4169 高温合金在 650 °C 温度下进行半寿命滞回环曲线模拟。

在 Abaqus 导入该试件模型, 并设置材料基本属性, 如弹性模量、泊松比等, 然后进行网格划分, 如图 16 所示。并在 Abaqus Command 中运行子程序, 输入蠕变疲劳参数, 设置显性损伤。

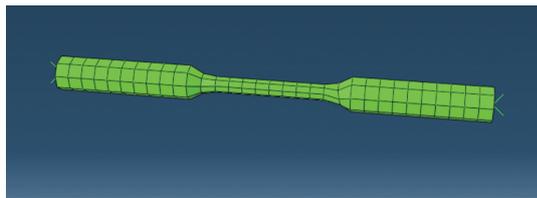


图 16 试件有限元模型
Fig. 16 Finite element model of specimen

同时在 Property 中设置相关背应力级数, 输入随动硬化参数 C_i 和 γ_i , 添加各向同性硬化律。并设置自由度, 保证试样在轴向方向可以移动, 如图 17 所示。

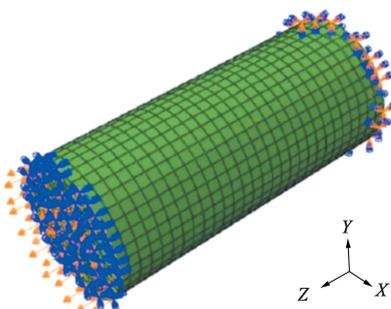


图 17 边界条件施加示意图
Fig. 17 Schematic diagram of boundary condition application

当边界条件和初始参数设置好后, 对 GH4169 高温合金分别在 0.6%、0.8%、1.0% 和 1.2% 应变幅控制下的半寿命循环力学行为进行仿真, 其结果和试验数据对比如图 18~图 21 所示。

由上述各仿真结果对比可知, Chaboche 模型对稳定寿命阶段滞回环模拟性能较好, 能够较精

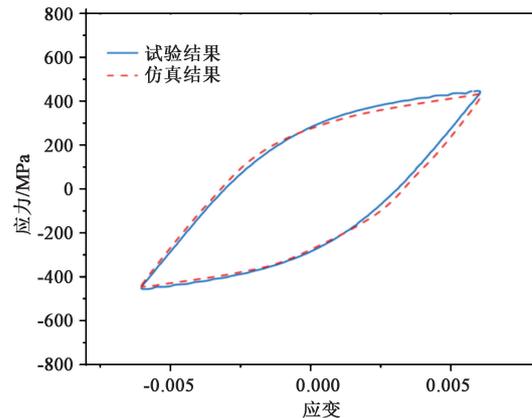


图 18 0.6%应变幅下的仿真曲线与试验曲线对比
Fig. 18 Comparison of curves between simulation and test at strain amplitude of 0.6%

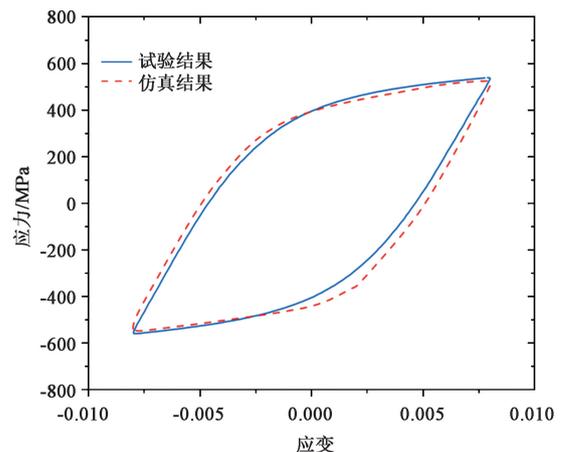


图 19 0.8%应变幅下的仿真曲线与试验曲线对比
Fig. 19 Comparison of curves between simulation and test at strain amplitude of 0.8%

准地模拟出该循环下的峰/谷值应力, 在弹性阶段有良好的重合度; 但对于整体而言, Chaboche 模型模拟出来的滞回环面积较试验数据大, 尤其在塑性阶段中, 模拟出来的应力结果有所增大, 这是因为 Chaboche 模型高估了循环过程的棘轮效应, 进而呈现出屈服面变大, 导致塑性变形能力较现实大, 产生误差。

4 结论

(1) GH4169 高温合金在较低应变幅 (0.6%)

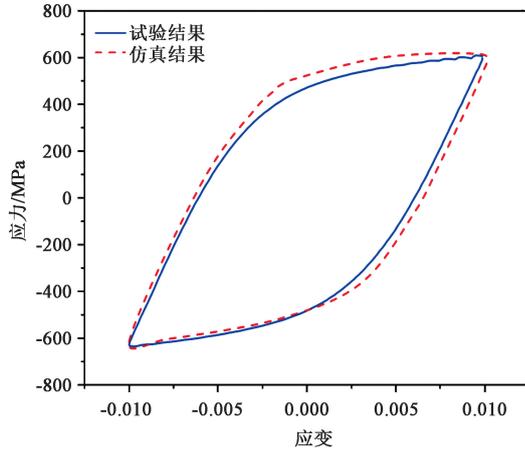


图 20 1.0%应变幅下的仿真曲线与试验曲线对比
Fig. 20 Comparison of curves between simulation and test at strain amplitude of 1.0%

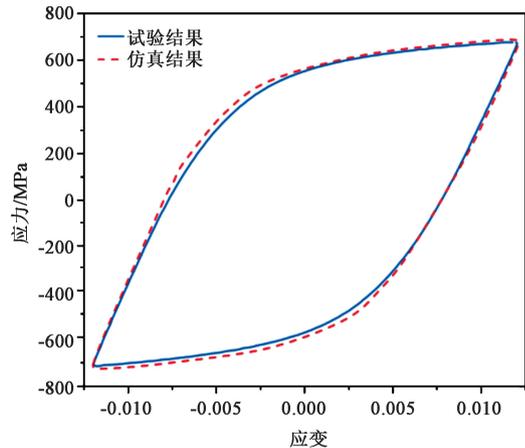


图 21 1.2%应变幅下的仿真曲线与试验曲线对比
Fig. 21 Comparison of curves between simulation and test at strain amplitude of 1.2%

时, 应力较为平稳, 到了循环后期出现较小程度的硬化; 在较大应变幅下出现了明显的循环软化现象。

(2) 在较低应变幅下, GH4169 高温合金的滞回环面积未发生较明显变化, 而在较大应变幅下, 滞回环面积在后期急剧缩小。

(3) 对 GH4169 高温合金低周疲劳应力应变数据进行了拟合, 发现不符合 Manson-Confin 曲线的双线性特征。

(4) 将单调拉伸数据和低周疲劳试验数据进行 Romberg-Osgood 模型拟合, 发现材料硬化能力相比低周疲劳有大幅提高。对将拟合的 Chaboche 模型参数进行半寿命下滞回曲线有限元仿真, 结果表明:

拟合结果、仿真结果与试验结果具有良好的 consistency, 验证了参数的可靠性。

致谢: 本课题来源于国家自然科学基金重点项目“基于叶片振动的发动机故障诊断预警和寿命预测方法研究(92160203)”, 国家重点研发计划项目“高速旋转叶片寿命预测及智能运维分析技术(2020YFB2010803)”, 中央高校人才基金(buctrc202026)支持, 感谢深圳万测试验设备公司提供的试验帮助。

参考文献:

- [1] Fan M L, Qu M M, Chen C Y, et al. Effect of initial overload on the low cycle fatigue life of GH4169 alloy at different temperatures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 186: 108424.
- [2] Li S M, Zhang H J, Xing Z Y, et al. A study of fretting fatigue in a contact pair of DZ125/GH4169: Its mechanical behavior and life prediction [J]. *Tribology International*, 2024, 196: 109707.
- [3] Wang Z G, Chen T L, Gong J N, et al. Improvement in fretting fatigue life of GH4169 dovetail joint component by bonded solid lubricant coating at 500 °C [J]. *Tribology International*, 2024, 193: 109415.
- [4] Prager W. A new method of analyzing stresses and strains in work-hardening plastic solids [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1956, 23 (4): 493-496.
- [5] Frederick C O, Armstrong P J. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect [J]. *Materials at High Temperatures*, 2007, 24 (1): 1-26.
- [6] Chaboche J L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories [J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24 (10): 1642-1693.
- [7] 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: 44-66.
- [8] Buret H, Cailletaud G. Numerical techniques for cyclic plasticity at variable temperature [J]. *Engineering Computations*, 1986, 3 (2): 143-153.
- [9] Ohno N, Wang J D. Kinematic hardening rules with critical state of dynamic recovery, part II: Application to experiments of ratchetting behavior [J]. *International Journal of Plasticity*, 1993, 9 (3): 391-403.
- [10] McDowell D L. Stress state dependence of cyclic ratchetting behavior of two rail steels [J]. *International Journal of Plasticity*, 1995, 11 (4): 397-421.
- [11] GB/T 228.2—2015, 金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法 [S].
GB/T 228.2—2015, *Metallic materials—Tensile testing—Part 2: Method of test at elevated temperature* [S].
- [12] GB 145—2001, 中心孔 [S].

- GB 145—2001, Center holes [S].
- [13] Xu L Y, Nie X, Fan J S, et al. Cyclic hardening and softening behavior of the low yield point steel BLY160; Experimental response and constitutive modeling [J]. International Journal of Plasticity, 2016, 78: 44–63.
- [14] Nikulin I, Sawaguchi T, Kushibe A, et al. Effect of strain amplitude on the low-cycle fatigue behavior of a new Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si seismic damping alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 88: 132–141.
- [15] Goyal S, Mandal S, Parameswaran P, et al. A comparative assessment of fatigue deformation behavior of 316 LN SS at ambient and high temperature [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 696: 407–415.
- [16] Arora P, Gupta S K, Bhasin V, et al. Testing and assessment of fatigue life prediction models for Indian PHWRs piping material under multi-axial load cycling [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 85: 98–113.
- [17] Mughrabi H, Christ H J. Cyclic deformation and fatigue of selected ferritic and austenitic steels: Specific aspects [J]. ISIJ International, 1997, 37 (12): 1154–1169.
- [18] Liu S J, Liang G Z, Yang Y C. A strategy to fast determine Chaboche elasto-plastic model parameters by considering ratcheting [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, 172: 251–260.
- [19] Wang R Z, Zhang X C, Gong J G, et al. Creep-fatigue life prediction and interaction diagram in nickel-based GH4169 superalloy at 650 °C based on cycle-by-cycle concept [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 97: 114–123.
- [20] Chaboche J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1986, 2 (2): 149–188.
- [21] Chaboche J L. On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratchetting effects [J]. International Journal of Plasticity, 1991, 7 (7): 661–678.
- [22] Kang G Z, Gao Q, Yang X J. A visco-plastic constitutive model incorporated with cyclic hardening for uniaxial/multi-axial ratcheting of SS304 stainless steel at room temperature [J]. Mechanics of Materials, 2002, 34 (9): 521–531.

