

基于 Chaboche 硬化模型的 304SS 全寿命 循环力学行为仿真分析

刘士杰¹, 王 召², 刘继超³, 梁国柱⁴

(1. 北京航天动力研究所 低温液体推进技术实验室, 北京 100076; 2. 北京航天动力研究所, 北京 100076; 3. 北京机床研究所有限公司, 北京 100102; 4. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 102206)

摘 要:以研究 Chaboche 硬化模型对低循环载荷下 304SS 全寿命循环力学行为仿真的可行性为目的。首先, 结合试验数据与仿真结果, 分析导致 Chaboche 随动/混合硬化模型无法模拟屈服平台效应问题的原因; 然后, 对可以模拟前四分之一循环和稳定迟滞环的模型进行分析, 据此给出问题的解决方案; 最后, 程序验证 Chaboche 硬化模型对 304SS 在 $\pm 0.8\%$ 应变控制下完整循环力学响应模拟的可行性。结果表明: ① 304SS 具有明显的屈服平台效应, 它的初始屈服应力为 200 MPa 左右, 而屈服强度达到 400 MPa, 这是无法利用一套 Chaboche 硬化模型参数对全寿命循环进行模拟的主要原因; ② 304SS 以 $\pm 0.9\%$ 应变范围为界表现出 Masing/Non-Masing 效应, 利用 $\pm 0.8\%$ 应变控制循环曲线确定的 304SS Ramberg-Osgood 模型常数 $n_0 = 34.713$, $\varepsilon_0 = 0.002\ 24$, $\sigma_0 = 430$ MPa, 该组参数不适用于 $\pm 3.0\%$ 高循环应变载荷控制的力学行为曲线; ③ 适合 304SS 前四分之一循环的 Chaboche 随动硬化模型参数是: $C^1 = 744\ 639$ MPa, $\chi^1 = 155\ 193$, $C^2 = 71\ 633$ MPa, $\chi^2 = 3\ 014$, $C^3 = 20\ 608$ MPa, $\chi^3 = 1\ 051$, $\sigma_y = 380$ MPa。由于背应力的差异, 无法对前四分之一循环和后续循环分别采用不同的硬化模型参数来模拟 304SS 全寿命循环的应力应变曲线。研究结果可为 304SS 结构件的力学行为仿真分析提供参考。

关键词: 304SS; Chaboche 硬化模型; 屈服平台; 应变控制试验; 仿真

中图分类号: V250.3, O341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2022)03-0040-10

Simulation analysis of 304SS full-life cyclic mechanical behavior based on Chaboche hardening model

LIU Shijie¹, WANG Zhao², LIU Jichao³, LIANG Guozhu⁴

(1. Laboratory of Science and Technology on Cryogenic Liquid Propulsion, Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China; 2. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China; 3. Beijing Machine Tool Research Institute-Precision Mechatronics Co., Ltd., Beijing 100102, China; 4. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 102206, China)

收稿日期: 2021-01-30; 修回日期: 2021-04-11

基金项目: 中国航天推进技术研究院可靠性保证中心研究课题

作者简介: 刘士杰(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机可重复使用性设计与仿真方法、火箭发动机部件疲劳寿命理论与试验。

通信作者: 梁国柱(1966—), 男, 教授, 研究领域为火箭发动机设计、仿真与优化集成, 火箭发动机点火与燃烧动态过程试验。

Abstract: The purpose of this paper is to study the feasibility of the Chaboche hardening model to simulate the mechanical behavior of 304SS full life cycle under low cyclic load. Firstly, combined with the experimental data and simulation results, the reasons why the Chaboche follow-up/hybrid hardening model cannot simulate the yielding platform effect are analyzed. Then, the model that can simulate the first quarter cycle and the stable hysteresis loop is analyzed, and the solution of the problem is given accordingly. Finally, the feasibility of the Chaboche hardening model for simulating the full-cycle mechanical response of 304SS under $\pm 0.8\%$ strain control is verified by the program. The results show that: ① 304SS has an obvious yield plateau effect. Its initial yield stress is about 200 MPa and its yield strength reaches 400 MPa, which is the main reason why a set of the Chaboche hardening model parameters cannot be used to simulate the full life cycle; ② 304SS shows the Masing/Non-Masing effect with the $\pm 0.9\%$ strain range as the boundary. The 304SS Ramberg-Osgood model constants determined by the $\pm 0.8\%$ strain control cycle curve are $n_0 = 34.713$, $\varepsilon_0 = 0.002\ 24$, $\sigma_0 = 430$ MPa. This group of parameters is not suitable for the mechanical behavior curve of $\pm 3.0\%$ high cyclic strain load control; ③ The parameters of the Chaboche kinematic hardening model suitable for the first quarter cycle of 304SS are: $C^1 = 744\ 639$ MPa, $\chi^1 = 155\ 193$, $C^2 = 71\ 633$ MPa, $\chi^2 = 3\ 014$, $C^3 = 20\ 608$ MPa, $\chi^3 = 1\ 051$, $\sigma_y = 380$ MPa. Due to the difference in back stress, it is impossible to use different hardening model parameters for the first quarter cycle and subsequent cycles to simulate the stress-strain curve of 304SS full life cycle. This paper can provide a reference for the simulation analysis of mechanical behavior for 304SS structural components.

Keywords: 304 stainless steel; Chaboche hardening model; yield plateau; strain controlled experiment; simulation

0 引言

304SS在航空航天、石油化工等行业被大量应用,由304SS制造的结构在非对称循环载荷作用下会表现出多种形式的力学特性,比如蠕变和棘轮效应。Chaboche本构模型可以较好地描述金属材料的循环力学行为,因此,它被广泛地用于不锈钢结构疲劳寿命评估程序。但对于工程人员而言,Chaboche混合型硬化模型参数的选取比较困难,而且所选取的模型参数是否可以代表全寿命循环的力学行为的研究鲜有报道,这在一定程度上限制了人们对模型的理解和应用。因此,本文开展了基于Chaboche硬化模型的低循环应变载荷下304SS全寿命循环力学响应仿真的研究。

1956年,Prager首先提出了一个线性硬化模型,它可以模拟包辛格效应,但这个模型却因为在拉伸和压缩的塑性阶段具有相同的硬化模量而无法模拟棘轮效应^[1]。鉴于此,1998年,Frederick和Armstrong通过在线性Prager硬化模型中添加非线性动态恢复项提出了Armstrong-Frederick(AF)硬化模

型,该模型实现了对应变路径瞬态记忆效应的模拟,可以仿真材料的棘轮应变行为,但AF硬化模型仅能模拟稳态棘轮应变^[2]。为了提高棘轮应变的预测能力,在AF模型的基础上提出了大量的利用非线性微分方程描述随动硬化变量演化的硬化模型^[3-4]。其中Chaboche非线性随动硬化模型(CHK- M , M 是模型包含的AF模型的个数)最为经典,该模型由多个AF模型叠加而来,每个AF模型在整个应力应变响应阶段起不同的作用。CHK- M 是率无关的且能很好地模拟包辛格效应与棘轮应变行为,该模型的一大优势是,经过修改后它适用于材料在各种复杂载荷场合下复杂力学行为的模拟。因此,该模型得到了大量的工程应用,如Aguis等利用多目标遗传算法优化获得Chaboche模型参数,提高了P-3C航空部件疲劳寿命预测的准确性^[5]。同时,研究者对优化参数进行了敏感性分析,给出了基于数据的结构疲劳寿命分析指南。Badnava等通过考虑不同加载条件,参考松弛和多级应变控制的疲劳试验,获得了两个适应性函数,然后利用遗传算法优化获得了Chaboche混合硬化模型参数^[6]。

Chaboche 等建议 Chaboche 随动硬化模型至少应包含 3 个 AF 硬化律, 这可以提高不同应变范围下模型的预测精度^[7]。2017 年, Liu 等采用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法对 304SS 的 CHK-3 Chaboche 随动硬化模型参数进行了识别, 得到的模型参数较好地模拟了 304SS 的稳定迟滞环^[8]。ASME 蒸汽锅炉和压力管道设计要求对核能使用高温零件的非弹性力学行为进行分析, 但缺乏本构模型作为指导, 针对该问题, Phan 等研究了 316H 不锈钢非弹性本构建模过程, 以实验数据平均量为依据提出的本构模型对蠕变和率相关的高温塑性行为进行了表示, 这可为高温构件的本构方程选取和建模提供参考^[9]。为了研究 304SS 的棘轮应变演化过程, 2019 年, Liu 等利用 Chaboche 弹塑性本构模型对 304SS 应变控和应力控的力学行为进行了优化分析, 得到的模型参数不仅可以仿真其应力控制的大部分棘轮行为, 而且还可以模拟 304SS 的应变控制变形过程, 但对前四分之一循环的预测精度较差^[10]。除此以外, 针对具体材料专有力学行为预测的改进 Chaboche 硬化模型方法得到了研究。2021 年, Li 等建立了 10% Cr 马氏体钢循环载荷下的初次蠕变再生的统一弹黏塑性本构模型, 理论分析与试验表明该模型可以可靠地描述初次蠕变再生现象和不同载荷的蠕变敏感性^[11]。Zhou 等提出了 9Cr 钢基于物理的高温疲劳裂纹萌生预估方法, 该方法融合了滑移带形成的 Tanaka-Mura 模型和统一循环黏塑性本构模型, 包含了沉淀硬化、晶界强化等关键材料硬化机理, 成功地预测了 9Cr 钢的循环软化行为^[12]。同时, 该项研究工作可为焊接结构的寿命预测提供参考。Meyer 等研究了塑性各向异性演化机理, 对现有扭曲硬化模型的分析揭示了应力驱动和应变驱动模型的差异, 并提出了热力学自洽和保证屈服面凸性的应力驱动模型, 与之前模型相比, 该模型在不需要额外参数的情况下更好地吻合试验数据^[13]。

综上可知, Chaboche 硬化模型得到了广泛研究和应用, 可以同时实现对 304SS 应变控和应力控力学行为特性的模拟, 但对全寿命循环, 尤其前四分之一循环的预测精度较差。为此, 本文对基于 Chaboche 硬化模型的低应变循环载荷下(即 $\pm 0.9\%$ 应变范围内) 304SS 全寿命疲劳曲线仿真的可行性

进行了研究。本文可以为其他金属材料 Chaboche 弹塑性本构模型的研究提供一定的参考。

1 研究思路

低循环载荷下 304SS 全寿命循环力学响应的研究流程如图 1 所示。

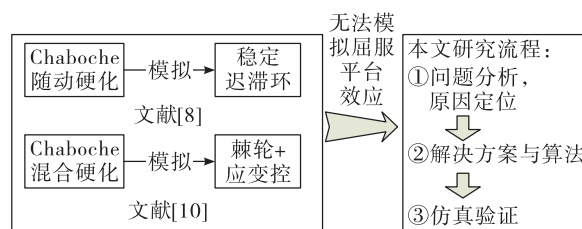


图 1 材料循环力学特性研究流程

Fig. 1 Study flowchart of cyclic material mechanical properties

由图 1 可知, 本文所指的低循环载荷下 304SS 力学特性研究主要由 3 部分组成。

1) 问题分析与原因定位。根据试验结果, 对 304SS 材料的 Masing 效应、屈服应力演化和平台屈服等基本力学行为进行分析, 找出引起前四分之一循环屈服平台仿真误差较大的原因。

2) 解决方案与算法实现。研究 Chaboche 随动和混合硬化模型模拟稳定迟滞环的算法实现流程, 根据屈服平台仿真误差较大的原因, 研究适用于前四分之一循环力学行为仿真的模型, 并针对本文的研究目的提出基于两套硬化参数的分段仿真算法。

3) 仿真验证。对 304SS $\pm 0.8\%$ 应变控制循环载荷下的全寿命力学响应曲线进行仿真, 验证算法对屈服平台效应仿真的适应性。

2 仿真误差分析与原因定位

2.1 Chaboche 混合硬化模型

文献[10]利用 Chaboche 混合硬化模型来表达 304SS 变形过程中的应力应变行为, 其中, 描述材料受力后状态的 Von Mises 屈服准则为

$$f(s, \alpha) = \left| \frac{3}{2}(s - \alpha) \right| - k - L \quad (1)$$

式中: s 为偏应力张量; α 为背应力张量; k 为初始屈服应力; L 为描述等向硬化的阻应力, 表示为

$$\dot{L} = b(Q - L)\dot{p} \quad (2)$$

式中: b 和 Q 为材料常数,由应变控制的疲劳试验获取; p 为累积塑性应变。当阻应力的初始值为 0 时,对式(2)积分可以得到

$$L = Q(1 - e^{-bp}) \quad (3)$$

由式(3)可知, b 值的符号决定了阻应力 L 的正负,即决定了材料的循环硬化、循环软化特性。

Chaboche 随动硬化模型是由多个 AF 硬化模型叠加而来,即

$$\begin{aligned} d\alpha &= \sum_{i=1}^M d\alpha^i \\ d\alpha^i &= \frac{2}{3}C^i d\varepsilon_p - \chi^i \alpha^i dp \end{aligned} \quad (4)$$

$$dp = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_p : d\varepsilon_p$$

式中: C^i 和 χ^i 为第 i 个背应力分量所对应的材料常数; $d\varepsilon_p$ 和 dp 分别表示塑性应变增量和累积塑性应变增量; M 表示使用的 AF 硬化模型的数目。

对于单轴应力状态,最初拉伸状态有 $\varepsilon_0^p = 0$, $\alpha_0^i = 0$, 于是,得到最初拉伸段积分方程为

$$\alpha^i = \frac{C^i}{\chi^i} \exp[1 - \chi^i(\varepsilon^p)] \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

由式(5)可知,当 $\varepsilon^p \rightarrow \infty$, 应力逼近但不超过饱和值 C^i/χ^i 。

假设第一次拉伸卸载时的塑性应变为 ε_1^p , 则由式(5)可知,此时的背应力为 $\alpha_1^i = \alpha_\infty^i [1 - \exp(-\chi^i \varepsilon_1^p)]$, 随后的卸载压缩背应力曲线为

$$\begin{aligned} \alpha^i &= -\frac{C^i}{\chi^i} + \left(\alpha_1^i + \frac{C^i}{\chi^i} \right) \exp[\chi^i(\varepsilon^p - \varepsilon_1^p)] = \\ &= -\alpha_\infty^i + (\alpha_1^i + \alpha_\infty^i) \exp[\chi^i(\varepsilon^p - \varepsilon_1^p)] \end{aligned} \quad (6)$$

同样,假设压缩卸载时刻的背应力和塑性应变分别为 α_2^i 和 ε_2^p , 则随后的拉伸段背应力曲线为

$$\begin{aligned} \alpha^i &= \frac{C^i}{\chi^i} + \left(\alpha_2^i - \frac{C^i}{\chi^i} \right) \exp[-\chi^i(\varepsilon^p - \varepsilon_2^p)] = \\ &= \alpha_\infty^i + (\alpha_2^i - \alpha_\infty^i) \exp[-\chi^i(\varepsilon^p - \varepsilon_2^p)] \end{aligned} \quad (7)$$

式(5)~式(7)以及 $|\sigma - a| - k = 0$ ($a = 3\alpha/2$) 是研究 Chaboche 随动硬化模型的基础。

由式(4)~式(7)可知, Chaboche 硬化模型的应用是一种逼近方法,因此,它的精度与选取的硬化

模型数量有关。Chaboche 首先使用 3 个 AF 模型叠加来研究材料的单调拉伸曲线,每个 AF 模型所担任的角色为^[14]

1) 第一个 AF 模型的 C^1 和 χ^1 较大,它主要模拟初始阶段(小应变区)的应力应变响应;

2) 第二个 AF 模型的 C^2 和 χ^2 也较大,此时第一个 AF 模型已稳定,它主要模拟中间阶段(中等应变区)的应力应变响应;

3) 第三个 AF 模型的 C^3 和 χ^3 不算大,此时第一个和第二个 AF 模型已稳定,它主要模拟最后阶段(大应变区)的应力应变响应,以往的研究称第三个 AF 模型为棘轮效应控制模型^[15]。

关于 Chaboche 硬化模型的应力控与应变控仿真算法参见文献[10]。

2.2 304SS 循环力学行为分析

基于文献[8]和文献[10]的研究,本文开展了多种应变控制状态下 304SS 的循环力学行为试验,以此分析 304SS 的循环力学行为。304SS 材料中各化学元素质量百分比如表 1 所示。

表 1 304SS 化学成分质量百分比

Tab. 1 Chemical compositions of 304SS 单位: %

C	Si	Mn	P	S	C	Ni	Mo
≤0.08	≤1	≤2	≤0.045	≤0.03	>17.03	>8.01	>0.02

为了使 304SS 材料组织均匀以获得预期的机械性能,对其采取的热处理工艺是:在 1 160 ℃ 下将钢锭锻造成棒材;然后进行退火处理,加热到 720 ℃,随后非常缓慢地冷却到室温。

2.2.1 低应变载荷下的 Masing 效应

图 2 是 304SS 在 $\pm 0.9\%$ 对称循环应变范围内的应变控制试验曲线。由图 2 可知,控制载荷在低对称应变范围内 304SS 表现出 Masing 效应。与之类似,文献[16-17]对 304LN 的 Masing 效应进行了分析,结论如下:室温下,在 $\pm 0.85\%$ 应变控制范围内,材料表现出明显的 Masing 效应,这与本文研究结果相近。文献[18]对这一现象的机理进行了解释:室温下,马氏体相变和位错是造成这种材料在不同对称应变范围控制下表现出 Masing 和 Non-Masing 效应的根本原因。

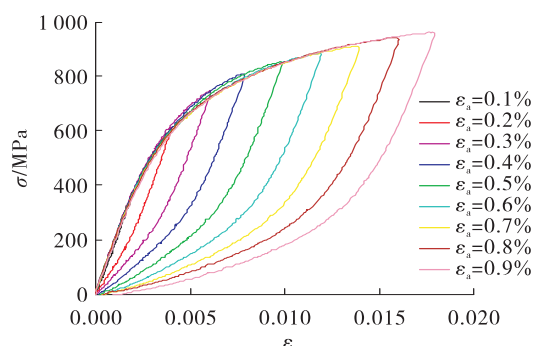


图2 应变范围 $\pm 0.9\%$ 以内应变控制疲劳试验曲线

Fig.2 Fatigue testing curves of symmetric controlling strain within $\pm 0.9\%$

对于大应变控制的情形,即对称应变范围大于 $\pm 0.9\%$,304SS 不仅表现出 Non-Masing 效应,而且它循环阶段的屈服应力在不断变化,这一现象可以通过叠放拉伸段重合部分来进行观察,如图3所示。

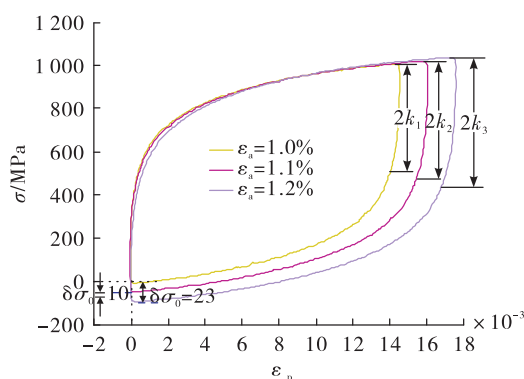


图3 应变范围 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.1\%$ 和 $\pm 1.2\%$ 拉伸段叠放的 ε_p - σ 曲线

Fig.3 Overlapping of ε_p - σ tensile curves under strain range of $\pm 1.0\%$, $\pm 1.1\%$ and $\pm 1.2\%$

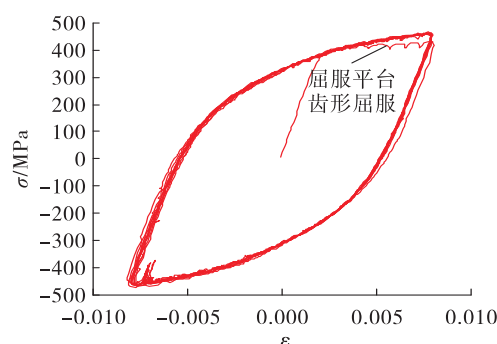
由图3可知,在大应变控制下,304SS 的屈服应力变化比较明显,在不改变屈服应力的条件下,很难利用一组 Chaboche 硬化模型模拟这种演化行为。为此,本文只对在 $\pm 0.9\%$ 应变范围内表现 Masing 效应的 304SS 循环力学行为进行研究。

2.2.2 屈服平台效应

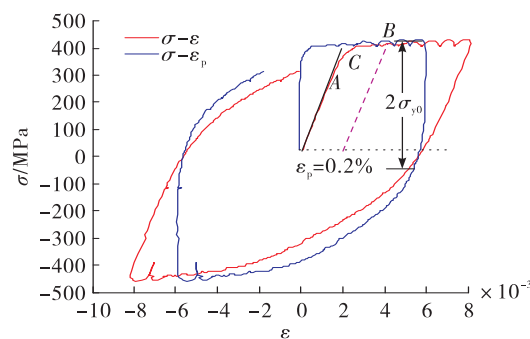
屈服平台效应是材料在拉伸或者压缩阶段表现出来的应变增加但应力近似不变的力学现象,尤其在前四分之一循环中表现得尤其突出,这会显著降低硬化模型参数对材料疲劳全寿命循环曲线

的预测精度。

图4是 $\pm 0.8\%$ 应变控制下 304SS 的循环应力应变试验结果^[10]。



(a) 0.8%应变控制循环应力应变曲线



(b) 第一个循环应力应变曲线

图4 304SS 的循环应力应变试验

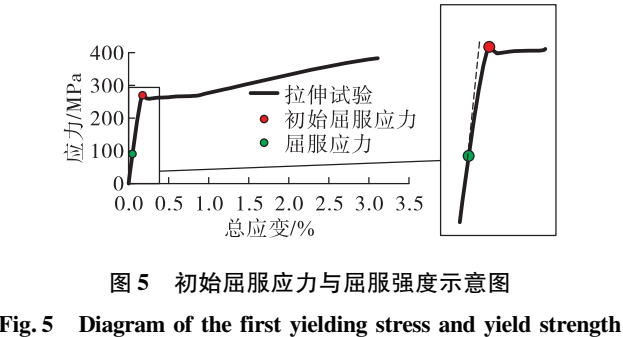
Fig.4 Cyclic stress-strain test for 304SS

由图4可知,304SS 在前四分之一循环中表现出了明显的屈服平台效应。除此以外,304SS 表现出等向硬化特性,经历大约14个循环应力-应变曲线后基本处于稳定迟滞状态。同时,由图4(b)可知:①循环载荷下,304SS 无明显应变强化现象;②材料力学屈服强度对应的应力要比图示转折点C的应力稍大。

2.3 仿真误差分析

2.3.1 初始屈服应力分析

工程中,一般称下屈服应力为材料的屈服强度,它对应着标准试样测试标距内发生了0.2%的塑性应变,而材料力学本构建模中的初始屈服应力可以理解为发生某一数值的塑性应变时的应力,二者的区别要特别注意,这直接决定了分析结果的正确性。在文献[19]中,初始屈服应力对应的塑性应变取为0.01%,如图5所示。



综上可知,初始屈服应力和屈服强度的定义明确,但初始屈服应力的确定方法比较“模糊”。实际上,由图 3 可知,屈服应力是一个变化的量。文献[19]利用对数硬化模型建立了屈服应力的演化方程,较为准确地模拟了材料的后继屈服应力。本文低循环应变载荷下 304SS 屈服应力的演化不太明显,因此,此处假定初始屈服应力和后继屈服应力相等。对于这种情况,一般有两种方法确定初始屈服应力:①基于图 3 或图 4(b)中的塑性应力-应变曲线转折的方法,即根据转折点确定出 2 倍的初始屈服应力,由此可得初始屈服应力满足 $2k \approx 450$ MPa,即 $k \approx 225$ MPa;②取塑性应变为定值的方法,如文献[20]取 0.002 5%的塑性应变对应的应力为初始屈服应力。这两种方法确定的应力差别较小。

同时,由图 4(b)可知,304SS 的弹性模量 $E = 183.5$ GPa,屈服强度 $\sigma_y \approx 400$ MPa。显然,初始屈服应力远低于屈服强度。而在材料循环力学行为分析中,为了使用一套 Chaboche 硬化模型参数模拟绝大多数(除前四分之一一个循环)循环曲线,需要基于 Chaboche 硬化律的屈服准则使用初始屈服应力来构造屈服面的演化方程,这样的方法很难捕捉到前四分之一一个循环准确的曲线“转弯”状态。

2.3.2 仿真误差分析

文献[10]利用发展的伪贡献数法和试错法,得到了可以同时近似模拟应力控制和应变控制下 304SS 应力应变响应的 Chaboche 混合硬化参数,见表 2。

表 2 Chaboche 混合硬化模型参数					
Tab. 2 Parameters of Chaboche combined hardening model					
C^1 /MPa	C^2 /MPa	C^3 /MPa	χ^1	χ^2	χ^3
165 362	60 140	4 322	7 937	280	2.5

注:等向硬化参数 $Q = 75$ MPa, $b = 44$ 。

图 6(a)是文献[10]利用表 2 得到的棘轮应变模拟结果,图 6(b)是应变控制下循环应力应变行为仿真结果。

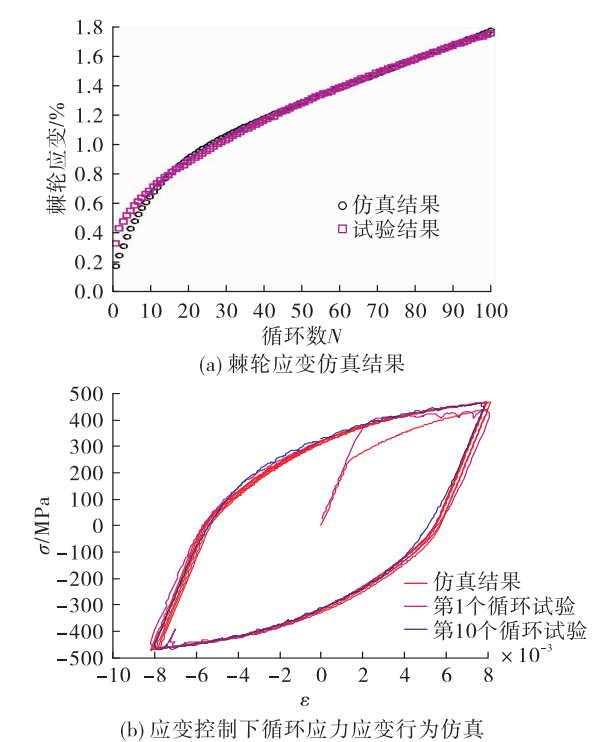


图 6 文献[10]仿真结果

Fig. 6 Simulation results from Ref. [10]

由图 6 可知,文献[10]给出的 Chaboche 混合硬化模型参数实现了对 304SS 棘轮效应和应变控制下应力应变行为的模拟,但对前四分之一一个循环的模拟能力较差,这主要是由初始屈服应力和屈服强度的差异造成的。必须使用初始屈服应力构造屈服函数,才可以模拟前四分之一一个循环后的后继屈服循环曲线,而为了模拟前四分之一一个循环就需要使用屈服强度来构造屈服函数。除此以外,前四分之一一个循环的变化趋势与后继循环曲线明显不同,无法用一套 Chaboche 随动硬化模型来对二者进行模拟,因此,有必要讨论能对前四分之一一个循环进行仿真的可行模型。

3 全循环力学行为仿真分析

3.1 前四分之一一个循环的模拟

3.1.1 基于 Ramberg-Osgood 模型的模拟

前四分之一一个循环表示的是材料的单轴拉伸过程,可以利用 Ramberg-Osgood 方程[式(8)]实现

对该段的模拟。

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n_0} \quad (8)$$

式中 σ_0 、 ε_0 、 n_0 均为 Ramberg-Osgood 方程常数。利用 Levenberg-Marquardt (L-M) 非线性最小二乘优化算法得到如表 3 所示的前四分之一循环的 Ramberg-Osgood 方程常数。同时,为了验证这些参数对大于 $\pm 0.9\%$ 应变控制试验前四分之一循环的模拟能力,采用试错法得到了 $\pm 3.0\%$ 试验中前四分之一循环的 Ramberg-Osgood 方程常数,见表 3。

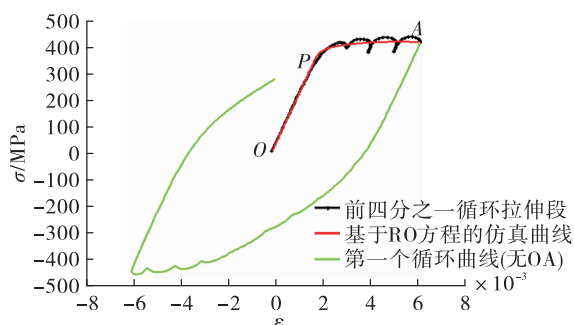
表 3 前四分之一循环的 Ramberg-Osgood 常数

Tab. 3 Ramberg-Osgood constants of the first quarter tensile cycle

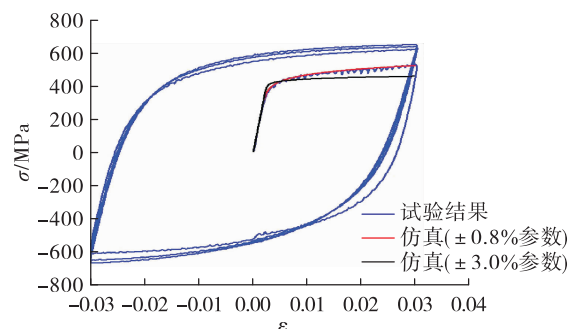
对象	n_0	$\varepsilon_0/\%$	σ_0/MPa
$\pm 0.8\%$	34.713	0.224	430
$\pm 3.0\%$	11.713	0.260	430

由表 2 和表 3 可知,模拟前四分之一循环和其他循环的主要区别在于曲线“转弯”点的应力值发生了改变。 σ_0 更接近材料的屈服强度,这符合 2.3.2 节所述的前四分之一循环拉伸段仿真误差的原因。

为了考察表 3 模型参数对前四分之一循环模拟的适用性,图 7(a) 给出了利用表 3 中的参数对 $\pm 0.8\%$ 试验前四分之一循环的仿真结果。图 7(b) 给出了修正参数对 $\pm 3.0\%$ 试验前四分之一循环的仿真结果。由图 7 可知,表 3 的数据较好地实现了对 $\pm 0.8\%$ 控制下前四分之一循环的仿真,但从 $\pm 0.8\%$ 前四分之一循环得到 Ramberg-Osgood 方程常数并不适用于 $\pm 3.0\%$ 的循环响应曲线。二者之间的差别主要在于形状控制参数 n_0 和比例参数 ε_0 不同,它们共同决定了 Ramberg-Osgood 屈服点附近的走势。



(a) 棘轮应变仿真结果



(b) 3.0%应变循环

图 7 基于 Ramberg-Osgood 方程的前四分之一段仿真

Fig. 7 Simulation for the first quarter cycle based on Ramberg-Osgood equation

需要说明的是, $\pm 0.8\%$ 应变控制的疲劳试验条件为室温、三角波、试验频率 0.25 Hz; $\pm 3.0\%$ 应变控制的疲劳试验条件为室温、三角波、试验频率 0.05 Hz。本文的分析并未考虑率效应对结果的影响,这是以后有待分析的一个问题。

3.1.2 基于 Chaboche 随动硬化模型的模拟

前四分之一循环拉伸段具有指数函数的变化趋势,因此,可以使用 Chaboche 硬化模型对该段进行模拟。

表 4 是基于前四分之一循环优化得到的 Chaboche 随动硬化模型参数。

表 4 基于前四分之一循环的 Chaboche 随动硬化模型参数

Tab. 4 Parameters of Chaboche kinematic hardening model based on the first quarter cycle

C^1/MPa	C^2/MPa	C^3/MPa	χ^1	χ^2	χ^3
744 639	71 633	20 608	155 193	3 014	1 051

利用表 4 中的数据对前四分之一循环进行了仿真验证,并与稳定迟滞环进行了图示的对比分析,如图 8 所示。

仿真使用屈服强度 $\sigma_y = 380 \text{ MPa}$ (与前文的 400 MPa 略有差别,此处是经试错法调整得到)构造屈服函数,等向硬化模型参数同文献[10]。

由图 8 可知:

1) 不能通过修改初始屈服应力为屈服强度来提高文献[10]中的模型参数对 $\pm 0.8\%$ 试验中前四分之一循环的模拟的准确度。

2) 利用表 4 中的 Chaboche 随动硬化模型参数,

并选取较为接近前四分之一循环宏观“转折点”(屈服强度附近)的应力构造屈服函数,可以较好地模拟前四分之一循环的应力应变响应。

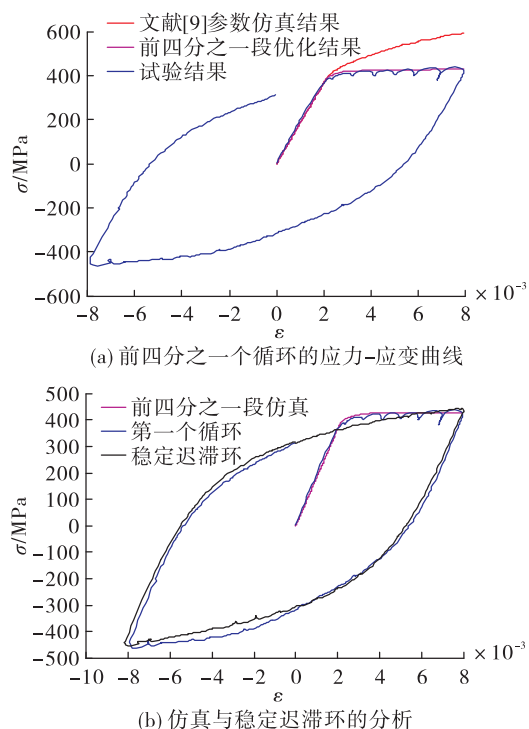


图 8 前四分之一循环以及与稳定迟滞环的比较
Fig. 8 Simulation of the first quarter cycle and stabilized hysteresis loop

基于以上分析发现,可以较好地分别利用 Chaboche 硬化模型实现对前四分之一循环和稳定迟滞环的仿真。但可否利用 Chaboche 硬化模型实现对全寿命循环曲线的仿真是值得讨论的问题。

作为对比,本文给出文献[10]中 304SS 混合硬化模型参数,如表 5 所示。

表 5 文献[10]中的 Chaboche 随动硬化模型参数

Tab. 5 Chaboche kinematic hardening parameters from Ref. [10]

C^1/MPa	C^2/MPa	C^3/MPa	χ^1	χ^2	χ^3
165 362	60 140	4 322	7 937	280	2.5

3.2 全循环周期模拟

3.2.1 算法

由第 3.1 节的分析可知,本文给出了两种适合模拟前四分之一循环曲线的方法,它们的优缺点

概括如下:

1) Ramberg-Osgood 模型适于模拟单调拉伸、循环应力应变曲线,以及疲劳试验的前四分之一循环曲线,但对于整个疲劳循环曲线的仿真难度较大,这是由循环硬(软)化和包辛格效应等因素共同决定的;

2) Chaboche 混合硬化模型不仅可以模拟前四分之一循环的后继屈服力学响应曲线,而且还可以较准确地模拟前四分之一循环的曲线,只是无法使用一套模型参数来同时模拟这两种循环力学状态。

除此以外,Chaboche 硬化模型更便于程序实现,而且具有成熟的算法(如基于径向回退算法的应力应变仿真算法)和程序(如 ANSYS/ABAQUS 内置本构模型)。图 9 是利用表 5 的参数对 304SS 稳定迟滞环进行的有限元仿真结果。

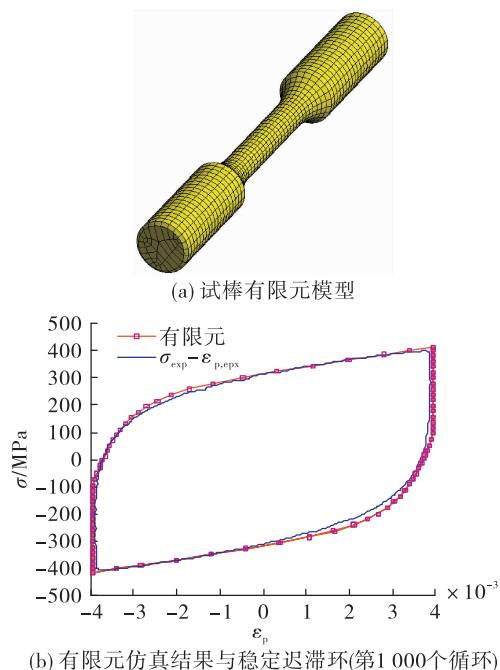


图 9 试棒仿真分析
Fig. 9 Simulation analysis of test specimen

基于以上分析,本文提出的低循环载荷下 304SS 全寿命周期循环力学响应曲线的模拟方案为:①在前四分之一循环采用表 4 的数据仿真前四分之一循环,如图 8 所示;②在后继循环中,尤其对稳定迟滞环,使用表 5 的参数进行仿真。两个阶段的计算都是 Chaboche 硬化模型的基本应用,关键是通过如下算法(单轴各向同性状态)实现模型参数的转换。

1) 第 $n+1$ 步已知量: $\{\varepsilon_n^p, \alpha_n, p_n\}$; $\text{flag} = 1$ 。

2) 应变增量关系: $\varepsilon_{n+1}^p = \varepsilon_n + \Delta\varepsilon_n$ 。

3) 是否第一次卸载? 否, 则 $\text{flag} = 1$; 是, 则 $\text{flag} = \text{flag} + 1$ 。

4) 若 $\text{flag} = 1$, 则参数取表 3; 若 $\text{flag} = 2$, 则参数取表 4; 若 flag 为其他, 则报错。

5) 计算如下预测应力和预测屈服函数

$$\sigma_{n+1}^{\text{trial}} = E(\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n^p) \quad \xi_{n+1}^{\text{trial}} = \sigma_{n+1}^{\text{trial}} - X_n$$

$$f_{n+1}^{\text{trial}} = |\xi_{n+1}^{\text{trial}}| - k - L_n$$

如果 $f_{n+1}^{\text{trial}} \leq 0$, 则弹性步设置 $(\cdot)_{n+1} = (\cdot)_{n+1}^{\text{trial}}$ 并退出; 否则返回步骤 4) 进行塑性步设置。

6) 回退法公式如下

$$\Delta\lambda = \frac{f_{n+1}^{\text{trial}}}{E + \sum_{i=1}^M [C^i - \chi^i \alpha_n^i \text{sign}(\xi_{n+1}^{\text{trial}})] + b(Q - L_n)}$$

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{\text{trial}} - \Delta\lambda E \text{sign}(\xi_{n+1}^{\text{trial}})$$

$$\varepsilon_{n+1}^p = \varepsilon_n^p + \Delta\lambda \text{sign}(\xi_{n+1}^{\text{trial}})$$

$$\alpha_{n+1}^i = \alpha_n^i + \Delta\lambda C_k \text{sign}(\xi_{n+1}^{\text{trial}})$$

$$L_{n+1} = L_n + b(Q - L_n) \Delta\lambda$$

$$p_{n+1} = p_n + \Delta\lambda$$

模型参数的转换是由载荷形式控制的[即步骤 3)], 而且仅在前四分之一循环和后继第一个反向段起作用。

3.2.2 结果分析

基于 3.2.1 节算法, 利用 MATLAB 软件编程实现了对 304SS $\pm 0.8\%$ 应变控制下全寿命循环力学行为的仿真, 其中, 模型参数取自表 4, 仿真结果见图 10。

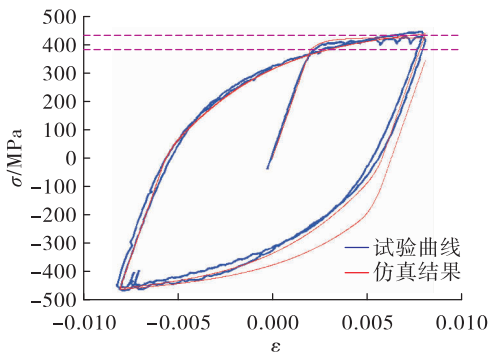


图 10 304SS $\pm 0.8\%$ 应变控制下全寿命循环力学行为模拟

Fig. 10 Full-life cycle simulation of 304SS mechanical behavior under $\pm 0.8\%$ strain controlled

尽管图 10 所示的前四分之一循环和后继曲线(除前四分之一循环后的压缩段)较好地得到了仿真, 但这个仿真是不可取的, 原因是表 4 和表 5 参数分别控制了仿真过程中前四分之一循环和后继曲线中背应力的演化形式, 前四分之一循环的随动硬化背应力只有图 10 所示的 40 MPa 左右, 而图 6(b)所示的背应力高达 205 MPa, 如果按照表 4 的参数进行仿真, 那么图 10 所示的前四分之一循环后的卸载段初始点设置背应力为 205 MPa, 其他参数保持不变, 则得到的仿真结果如图 11 所示。

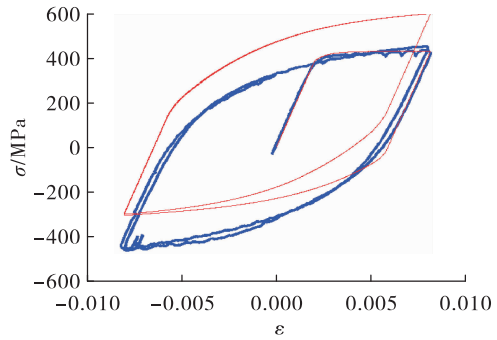


图 11 调整前四分之一段尾背应力的全寿命循环力学行为模拟

Fig. 11 Simulation of life cycle mechanical behavior by adjusting the tail back-stress of the first quarter cycle

显然, 这样的仿真是不合理的。通过以上分析可知, 无法结合表 6 利用两套 Chaboche 硬化模型参数来模拟 304SS 的全寿命循环曲线。

4 结论

通过本文的研究主要得出如下结论。

1) 低循环载荷下, 304SS 表现出明显的 Masing 效应和循环硬化特性, $\pm 0.8\%$ 应变控制下经历 14 个应力循环后, 应力应变曲线基本处于稳定迟滞状态。

2) $\pm 0.8\%$ 应变控制试验中前四分之一循环对应的 Ramberg-Osgood 模型常数是: $n_0 = 34.713$, $\varepsilon_0 = 0.00224$, $\sigma_0 = 430$ MPa; Chaboche 硬化模型参数是: $C^1 = 744639$ MPa, $\chi^1 = 155193$, $C^2 = 71633$ MPa, $\chi^2 = 3014$, $C^3 = 20608$ MPa, $\chi^3 = 1051$, 对应的初始屈服应力 $\sigma_y = 380$ MPa。

3) Chaboche 硬化模型可以分别对前四分之一循环和后继循环曲线实现准确仿真, 但利用两套

Chaboche 硬化模型参数实现对 304SS 低循环载荷下全寿命循环曲线的仿真方案是不可行的。

本文的研究可以为其他金属材料 Chaboche 型本构模型参数识别和仿真研究提供参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] FREDERICK C O, ARMSTRONG P J. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect[J]. Materials at High Temperatures, 2007, 24(1): 1-26.
- [3] CHABOCHE J L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(10): 1642-1693.
- [4] 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.
- [5] AGIUS D, KAJTAZ M, KOUROUSIS K I, et al. Sensitivity and optimisation of the Chaboche plasticity model parameters in strain-life fatigue predictions[J]. Materials & Design, 2017, 118: 107-121.
- [6] BADNAVA H, PEZESHKI S M, NEJAD K F, et al. Determination of combined hardening material parameters under strain controlled cyclic loading by using the genetic algorithm method[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2012, 26(10): 3067-3072.
- [7] CHABOCHE J L, CORDIER G. Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/310478904_Modelization_of_the_strain_memory_effect_on_the_cyclic_hardening_of_316_stainless_steel, 1979.
- [8] LIU S J, LIANG G Z. Optimization of Chaboche kinematic hardening parameters by using an algebraic method based on integral equations[J]. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2017, 12(4): 439-455.
- [9] PHAN V T, MESSNER M C, SHAM T L. A unified engineering inelastic model for 316H stainless steel [C]// ASME 2019 Pressure Vessels & Piping Conference. New York: ASME, 2019.
- [10] 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.
- [11] LI X, HOLDSWORTH S R, MAZZA E, et al. The investigation of primary creep regeneration for 10% Cr martensitic steel: unified constitutive modelling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 190: 106044.
- [12] ZHOU J B, BARRETT R A, LEEN S B. A physically-based method for predicting high temperature fatigue crack initiation in P91 welded steel[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 153: 106480.
- [13] MEYER K A, MENZEL A. A distortional hardening model for finite plasticity[J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 232: 111055.
- [14] CHABOCHE J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity[J]. International Journal of Plasticity, 1986, 2(2): 149-188.
- [15] 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.
- [16] SIVAPRASAD S, PAUL S K, DAS A, et al. Cyclic plastic behaviour of primary heat transport piping materials; influence of loading schemes on hysteresis loop[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(26): 6858-6869.
- [17] PAUL S K, SIVAPRASAD S, DHAR S, et al. Key issues in cyclic plastic deformation; experimentation[J]. Mechanics of Materials, 2011, 43(11): 705-720.
- [18] DEY R, TARAFDER S, SIVAPRASAD S. Influence of phase transformation due to temperature on cyclic plastic deformation in 304LN stainless steel [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 90: 148-157.
- [19] OKOROKOV V, GORASH Y, MACKENZIE D, et al. New formulation of nonlinear kinematic hardening model, Part I: A Dirac delta function approach[J]. International Journal of Plasticity, 2019, 122: 89-114.
- [20] ABDEL-KARIM M. An evaluation for several kinematic hardening rules on prediction of multiaxial stress-controlled ratchetting[J]. International Journal of Plasticity, 2010, 26(5): 711-730.