

基于改进遗传算法的不锈钢混合硬化模型 参数快速标定方法

郑 帅, 周 锋*

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于常用结构奥氏体不锈钢 S30408、S31608 以及双相不锈钢 S22053 的循环加载试验结果, 提出了基于经典混合硬化模型的改进遗传算法和自适应子步积分方法联合使用的模型参数快速标定方法。试验表明, 3 种牌号的结构不锈钢在大应变幅度下的循环硬化/软化行为普遍表现出明显的应变幅值依赖性和断裂前的硬化不饱和性, 这与常用的碳素钢有显著差异。结果表明, 该方法相较于传统标定方法显著减少了人工工作量和时间成本, 且具有良好的精度和广谱性, 更适用于不锈钢等不存在稳定滞回环的循环硬化不饱和及 Non-Masing 材料。相较于两种常用的传统标定方法以及基本遗传算法, 提出的改进自适应遗传算法具有更高的计算效率和精度, 且与多种加载制度试验结果吻合良好。

关键词: 不锈钢本构模型; 奥氏体不锈钢; 双相不锈钢; 混合硬化模型; 改进自适应遗传算法

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)01-0059-13

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230806001

A Fast Calibration Method for Stainless Steel Mixed Hardening Model Parameters Based on an Improved Genetic Algorithm

ZHENG Shuai, ZHOU Feng*

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

*Corresponding author: zhoufeng@tongji.edu.cn

Abstract: In this paper, the cyclic loading test results of commonly used structural stainless steel grades austenitic S30408, S31608 and duplex S22053 were used, and a fast parameter calibration method for classical mixed hardening model based on an improved genetic algorithm was proposed. The test results reveal that all these stainless steels show pronouncing unsaturated cyclic hardening/softening characteristics under large strain amplitudes prior to fracture, which differs from mild steel. The results show that this method saves a lot of labor and time costs, and has good accuracy and broad spectrum compared with the traditional calibration method. It is more suitable for unsaturated cyclic hardening and Non-Masing materials such as stainless steel without stable hysteresis loops. The proposed improved adaptive genetic algorithm can achieve better computational efficiency and accuracy compared with the two commonly used traditional calibration methods and the simple genetic algorithm, and the results are in good agreement with the experimental results under various loading protocols.

Keywords: constitutive model for stainless steel; austenitic stainless steel; duplex stainless steel; mixed hardening model; improved adaptive genetic algorithm

收稿日期: 2023-08-06

作者简介:

郑 帅(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事钢材非线性本构关系及数值算法、钢结构抗震方面的研究。

E-mail: szheng@tongji.edu.cn。

通信作者:

周 锋(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事不锈钢冷弯薄壁结构方面的研究。E-mail: zhoufeng@tongji.edu.cn。

不锈钢材料作为一种绿色的新型建筑钢材,因具有造型美观、力学性能优良、抗腐蚀及延性性能好、加工容易及全生命周期成本低等优点而越来越多地得到建筑行业的青睐^[1]。根据其化学组成成分尤其是铬、锰、镍等合金元素占比的不同,不锈钢可分为奥氏体S30408、S31608以及双相S22053、S2101等牌号,表现出不同的力学特性。不锈钢构件在单调加载下的力学性能及破坏模式的研究已经比较完备,形成了一系列考虑压、弯及其组合效应以及局部、整体耦合失稳等破坏模式的设计方法,如连续强度法^[2-3]、直接强度法^[4-5]等,并广泛被各国家和地区的钢结构设计规范所采用^[6-8]。

不锈钢材料的单调拉伸应力应变关系研究已较为完备^[9-10],多采用两阶段或三阶段Ramberg-Osgood模型来描述整个单调拉伸阶段至颈缩前的应力应变关系^[11-13]。但不锈钢材料的循环塑性力学性能与碳素钢的循环塑性力学性能存在显著差异,主要体现在加载幅值、加载历史依赖性、断裂前的硬化不饱特性等^[14]。大量研究表明,若要进一步描述该复杂的力学性质,不可避免地需要引入大量模型参数,如记忆面等,极大地增加了实际应用、分析的难度以及不便利性^[15-16]。而经典混合硬化(classical combination of isotropic and kinetic hardening, CCIKH)模型能使用较少参数模拟钢材在较大应变幅($\pm 10\%$ 以内)下的循环响应特征,如循环硬化/软化、包辛格效应等,且数学表达式简单、具有良好的鲁棒性,因此被广泛应用于多种有限元软件中。综上所述,本文选择CCIKH模型作为不锈钢材料循环塑性本构模型,并用于验证改进遗传算法的性能。

近年来,越来越多的学者聚焦于不锈钢材料及其结构构件的滞回性能研究。2014年,王元清等^[17-18]采用8种加载制度研究了奥氏体不锈钢S31608在循环加载下的力学性能,并根据试验结果标定了循环硬化模型,其加载幅度为 $\pm 0.4\% \sim \pm 1.0\%$ 。2016年,ZHOU等^[19]研究了奥氏体不锈钢S304和双相不锈钢S2101在循环加载下的力学性能,并探究了塑性加工成形和加载方式对材料循环性能的影响。2022年,ZHENG等^[14]通过对多级应变控制常幅、升幅、降幅加载制度研究了S30408、S31608以及S22053三种常用牌号的结构不锈钢的循环硬化/软化性能。

上述研究虽采用混合硬化模型对不锈钢材料本构关系进行描述,但均未涉及适用于有限元计算模型参数的快速精确标定问题,一定程度上限制了不锈钢材料及构件在实际工程中的研究、应用和推广。

本构模型参数的传统标定方法可归结为两类:第一种是两阶段标定方法^[20],即将完整的稳定滞回环划分为弹性段以及弹塑性加载段,通过回归分析方法以及弹性阶段的数据可以得到材料各向同性硬化模型的参数,

而弹塑性加载阶段的数据对应着背应力的演化关系,其模型参数可由试验数据结合背应力理论公式拟合得到。然而,该方法存在明显弊端。首先,它显著依赖于人工作业,易受主观因素影响。其次,由于需要使用稳定的滞回环,该方法更适用于碳素钢等循环稳定的钢材,而不适用于不锈钢等材料,因为这些材料不存在传统意义上的稳定滞回环。因此,该方法难以准确描述材料在整个超低周疲劳寿命内的行为。第二种则是逆标定方法^[21],该方法需要利用有限元分析软件ABAQUS的材料模块,结合Matlab或Python文本编辑脚本,实现参数化建模和分析,并通过其他优化搜索算法寻找试验与模拟结果拟合最好的参数集。该方法可以综合考虑材料在整个疲劳寿命内的力学响应,但本质上仍属于试算法,且计算精度受网格尺寸和几何建模技术的影响较大,耗时较长。

上述传统标定方法得到的参数严重依赖于加载制度,其广谱性往往较差且耗时耗力,而采用启发式智能搜索算法如遗传算法(genetic algorithm, GA)等能够实现具体加载制度下CCIKH模型参数的标定,提高不锈钢材料循环响应的模拟精度,但基本遗传算法(simple genetic algorithm, SGA)的优化效率较差。针对该问题,本文提出了改进自适应遗传算法(improved adaptive genetic algorithm, IAGA)以提高优化效率。同时,为避免应变增量步长过大导致的数值振荡,引入了自适应子步积分方法。本文根据现有不锈钢试件循环加载试验数据,结合自适应子步方法以及改进遗传算法,对3种常用结构不锈钢牌号钢板在多种加载制度下的CCIKH模型参数进行了自动标定和优化,并验证了CCIKH模型对于具体加载制度下不锈钢材料循环响应描述的准确性及适用性。

1 CCIKH模型的数值计算方法

本文采用的试验数据详见文献[14],本构模型的数值算法作为参数优化的基础与核心,在进行CCIKH模型的数值建模之前,有必要对该模型进行介绍。

1.1 经典弹塑性本构模型框架

有限元分析中,常用的是真实应力应变关系,需要采用式(1)~(2)进行变换。

$$\epsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{nom}}(1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (2)$$

式中: ϵ_{nom} 和 σ_{nom} 分别为名义应变和名义应力; ϵ_{true} 和 σ_{true} 分别为真实应变和真实应力。

对一般延性金属而言,其完整滞回环在经典塑性理论框架下可分解为弹性阶段和弹塑性阶段,分别对应弹性域半径和背应力2个内变量,如图1所示。其中上标e、p、t分别表示弹性、塑性及总应变,上标T和C分别表示

受拉向阶段以及受压向阶段,上标*i*表示第*i*圈滞回环,下标max和min分别对应每半圈的最大、最小加载位置。

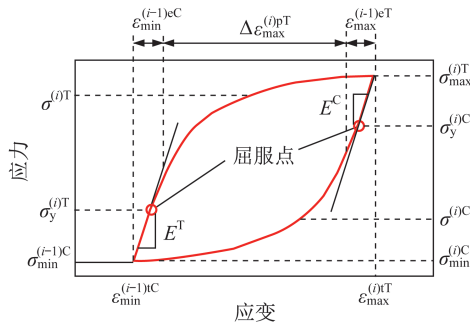


图1 典型滞回环中各参数意义示意

Fig. 1 Schematic of implication of parameters in typical hysteresis loop

在经典金属宏观塑性本构理论框架中,主控方程主要为:

a) 应变分解

小变形假定下,总应变分解为弹性及塑性应变如下:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为总应变; $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 为弹性应变; $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ 为塑性应变。

根据应力应变关系则有:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量; $\mathbf{C} = K\boldsymbol{\delta} \otimes \boldsymbol{\delta} + 2G\left(\mathbf{I} - \frac{1}{3}\boldsymbol{\delta} \otimes \boldsymbol{\delta}\right)$, \mathbf{C} 为四阶等同弹性张量, $\boldsymbol{\delta}$ 为二阶单位张量, \mathbf{I} 为四阶对称单位张量, K 、 G 均为材料常数。

b) 屈服准则

采用仅考虑偏应力张量第二不变量的J2理论的Von Mises屈服准则,即:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(\mathbf{s} - \boldsymbol{\alpha}) : (\mathbf{s} - \boldsymbol{\alpha})} - Y \leq 0 \quad (5)$$

式中: \mathbf{s} 为偏应力张量; $\boldsymbol{\alpha}$ 为总背应力张量, $\boldsymbol{\alpha} = \sum_i \boldsymbol{\alpha}_i$,表征了应力空间中屈服面中心位置; $Y = \sigma_0 + R$, Y 为屈服面半径, σ_0 为初始屈服强度, R 为各向同性硬化内变量。

c) 流动法则

采用完全关联流动法则,定义如下:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{3}{2} d\lambda \mathbf{n} \quad (6)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ 为塑性应变增量; \mathbf{n} 为塑性流动方向, $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{s} - \boldsymbol{\alpha}}{\sigma_0 + R}$; $d\lambda$ 为非负塑性乘子; $\dot{p} = d\lambda = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p}$, \dot{p} 为等效塑性功意义上的等效塑性应变增量。

d) 硬化准则

CCIKH模型考虑了随动硬化和各向同性硬化的联合使用。对于随动硬化律,采用Chaboche模型,对总背应力进行分解,即 $\boldsymbol{\alpha} = \sum_{i=1}^M \boldsymbol{\alpha}_i$,有:

$$d\boldsymbol{\alpha}_i = \frac{2}{3} C_i d\boldsymbol{\varepsilon}^p - \gamma_i \boldsymbol{\alpha}_i dp \quad (7)$$

式中: C_i 、 γ_i 为材料参数; M 为背应力分量数; dp 为等效塑性应变增量。

研究表明,3个背应力分量能够较好模拟典型滞回环在弹塑性转换区、较大塑性应变范围内的非线性行为^[22],本文在此基础上取 $M=4$,第4项保持为线性即 $\gamma_4=0$,模拟在大塑性应变下的近似线性硬化。

各向同性硬化规律采用Voce指数形式,有:

$$dR = b(Q - R)dp \quad (8)$$

式中: Q 为各向同性硬化变量 R 的饱和值; b 为材料参数。

1.2 CCIKH模型的离散、更新和计算

有限元理论中,一般使用一步积分法实现单个计算步的应力更新。针对材料本构层面上的塑性求解问题,WILKINS^[23]最早提出径向回映算法,而后SIMO等^[24]提出了典型的弹性试算-塑性修正的两步计算方法,即最近点投影算法,如图2所示,其中 E_σ 表示弹性域, ∂E_σ 表示弹性域边界, σ_i 、 σ_{i+1} 分别表示第*n*步和第*n+1*步的应力, σ_{i+1}^{trial} 表示第*n+1*步的试应力,下面使用该方法得到CCIKH模型的弹塑性求解算法。

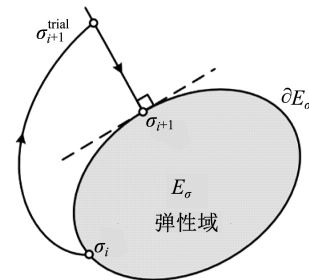


图2 最近点投影算法几何示意

Fig. 2 Geometric illustration of the closest point mapping algorithm

应力更新增量算法的本质即在给定第*n*步所有的状态变量和场变量信息的情况下,由模型采用的形函数求解位移函数的连续导数,得到第*n+1*步的应变增量 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ 作为第*n+1*计算步的已知量,进而更新第*n+1*步的所有变量,如图3所示。

为求解上述非线性方程组,需对微分方程进行线性离散,可采用完全隐式后向欧拉方法,该部分内容详见文献^[25]。

本文利用一维单轴对称受力特征进行数值建模,CCIKH模型的单轴数值积分算法如表1所示(图中变量含义与本文对应内容保持一致),计算流程如图4所示。

一般采用Python或Matlab语言调用ABAQUS等有限元软件接口进行优化的逆标定方法,这种方法本质上

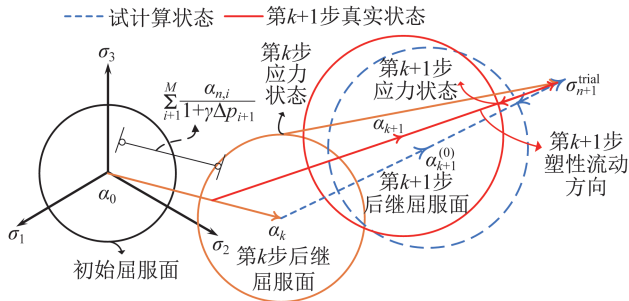


图3 CCIKH模型在应变空间中最近点投影算法的几何表示

Fig. 3 Geometric illustration of CCIKH model in stress space for mapping algorithm

表1 CCIKH一维应力状态离散格式

Table 1 Linearization discretization format of CCIKH for one-dimensional case

算法	计算式
试应力状态	$\sigma_{n+1}^{trial} = \sigma_n + E\Delta\epsilon_{n+1}$
流动法则	$\epsilon_{n+1}^p = \epsilon_n^p + \Delta p_{n+1} \text{sign}(\sigma_{n+1} - \alpha_{n+1})$
真实应力更新	$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{trial} - E \text{sign}(\sigma_{n+1} - \alpha_{n+1}) \Delta p_{n+1}$
硬化法则	$R_{n+1} = \frac{R_n + bQ\Delta p_{n+1}}{1 + b\Delta p_{n+1}}$
	$\alpha_{n+1} = \sum_{i=1}^M \alpha_{n+1,i}$
	$\alpha_{n+1,i} = \frac{\alpha_{n,i} + C_i \Delta p_{n+1}}{1 + \gamma_i \Delta p_{n+1}}$

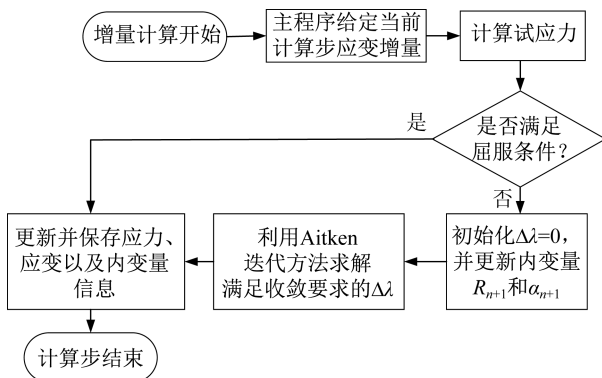


图4 CCIKH模型数值计算流程图

Fig. 4 Flow chart of numerical calculation for CCIKH model

仍然依赖于软件内置的求解模块,并且需要在结构构件层次上整合一致切线刚度矩阵,这导致了计算的耗时显著增加。特别是在进行高维度计算时,这一问题尤为突出^[21]。为解决上述问题,本文直接使用试验数据作为数据集,利用单轴加载特性建立数值计算模型,避免了传统ABAQUS等有限元计算中可能存在的因网格尺寸依赖性导致的精度问题,同时由于该计算过程相当于仅

在单个单元内进行,不需要计算一致切线刚度矩阵,因此优化效率相比传统逆标定方法的优化效率提升显著。研究发现,采用型号为AMD Ryzen 5 3600X 6-Core的处理器,对于指定加载制度下的约10 000个数据点,种群数量为100个,迭代50代,使用本文方法的优化耗时仅为3 h,比传统标定方法的计算效率提高了200%,计算精度提高了20%,且对于多加载制度联合标定的情况,本文方法的计算效率和精度较传统标定方法的提高幅度更为显著。

1.3 自适应子步法

试验中可能存在加载速率不稳定、测量传感器的采样频率波动等因素,容易造成测量值的缺省,导致某些连续两个加载步的应变增量变大。根据计算力学理论,即便完全隐式后向欧拉算法满足无条件稳定收敛条件,但对最大应变增量步长仍有严格限制^[26]。实际计算发现,当应变增量步长超过0.03%时,计算过程将出现数值振荡的情况,如图5所示。

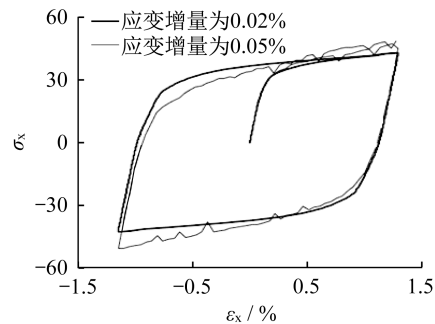


图5 单轴加载下应变增量步长分别为0.02%与0.05%时的循环圈拟合结果对比

Fig. 5 Comparison of hysteretic curve fitting results for strain increment steps of 0.02% and 0.05% under uniaxial loading

显然,应变增量步长过大必然出现数值振荡现象,过小则显著增加计算量,且数值计算的结果极大程度上取决于每一计算步结果的精度和稳定性。为解决应变增量步长可能引起的计算效率和鲁棒性问题,本文受自适应子步积分法^[27-28]启发,在迭代求解中若发现迭代次数超过规定的最大次数,即认为在该应变增量步长下不收敛,触发自适应子步积分法,具体计算流程如图6所示。

自适应子步积分法的一般思路是:对于较大的增量步长,将其均匀地分为若干较小子步,在子步内运用一步积分方法更新变量,通过对所有连续、相邻子步的求解完成整个计算步长的计算^[28-29]。子步步长的计算式如下:

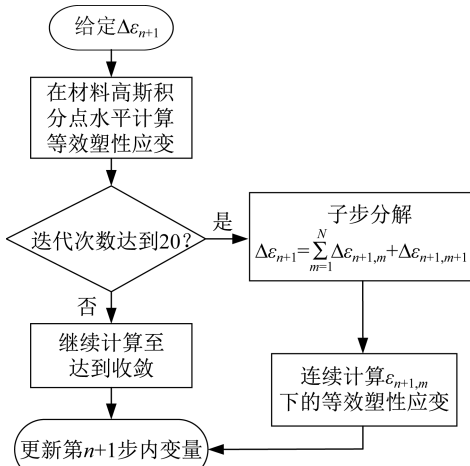


图6 自适应子步积分法计算流程图

Fig. 6 Flow chart of adaptive sub-step integration method

$$\Delta \epsilon_{n+1} = \sum_{m=1}^N \Delta \epsilon_{n+1,m} + \Delta \epsilon_{n+1,m+1} \quad (9)$$

式中： $\Delta \epsilon_{n+1,m+1} < \Delta \epsilon_{n+1,m}$ ； $\Delta \epsilon_{n+1,m}$ 为子步步长； $\Delta \epsilon_{n+1,m+1}$ 为均分子步后的残余步长；子步步数 $N = \left\lfloor \frac{\Delta \epsilon_{n+1}}{\Delta \epsilon_{n+1,m}} \right\rfloor$ ，其中 $\lfloor x \rfloor$ 为向下取整算子，即 $x - 1 < \lfloor x \rfloor = \text{int}(x) \leq x, x > 0$ 。

本文选取子步步长为 0.02%，结果表明该子步步长能够在保证计算精度和效率的条件下增强鲁棒性，子步积分方法在应力空间中的求解过程示意如图 7 所示。

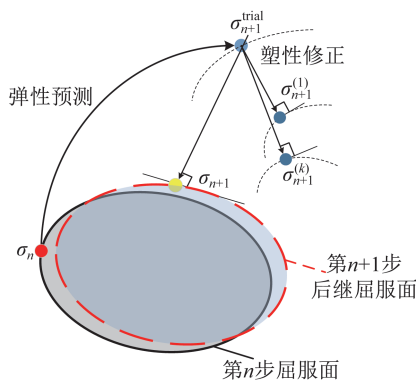


图7 应力空间中自适应子步积分法求解过程示意

Fig. 7 Illustration of solution process for adaptive sub-step integration method in stress space

2 改进遗传算法

分析发现，若使用求解非线性多元函数最小值的 Matlab 函数 fmincon 优化工具箱进行优化，当变量较多时，搜索空间的范围和计算代价呈指数上升趋势。更重要的是，该函数基于梯度信息更新，当待优化参数较多、模型较复杂时，目标函数本身对多参数梯度缺乏敏感性，

且缺乏足够多的个体和变异性实现参数域的全局搜索，陷入局部最优，鲁棒性较差。

遗传算法最早于 1967 年由 Bagley^[30] 提出，是一种基于生物进化理论的智能搜索算法，不依赖于梯度信息。SGA 的算法流程如图 8 所示。SGA 优化性能严重依赖于种群数量，子代生成的随机性决定了 SGA 在整个参数域上搜索路径的盲目性，而固定的交叉和变异概率难以保障当代种群中优秀基因模式的延续，且进化后期易造成不收敛。基于以上问题，本文提出了 IAGA 以进一步提高优化性能。

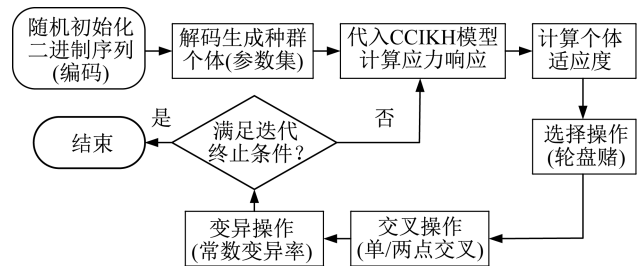


图8 SGA流程图

Fig. 8 SGA flow chart

2.1 改进自适应遗传算法

本文对基本遗传算法的改进主要体现在选择、交叉及最佳个体保留策略上，流程如图 9 所示。

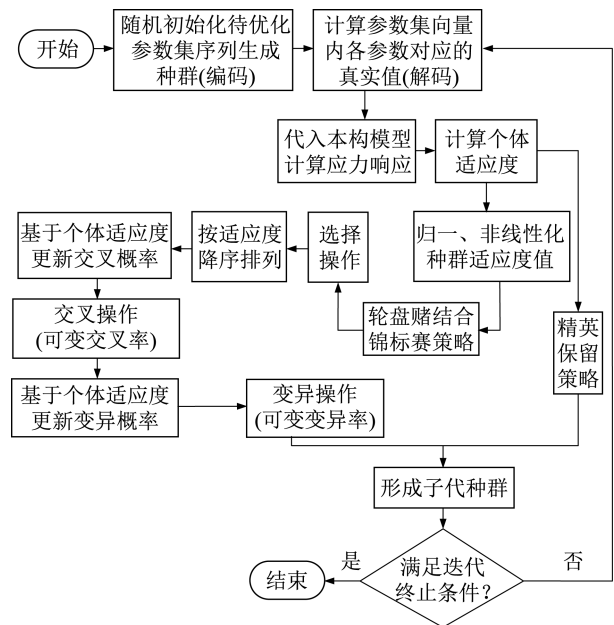


图9 IAGA流程图

Fig. 9 IAGA flow chart

IAGA 对于选择的改进主要体现在适应度值的归一化和非线性化以及联合使用改进的轮盘赌和锦标赛机制上。不同于 SGA，IAGA 在生成子代种群并计算所有个

体的适应度值后,首先对种群原始适应度值进行归一化,而后通过指数函数映射至 $[0,1]$ 范围内,变换方法如下:

$$f_{\text{norm}} = \frac{1}{2} \left(\frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} + \frac{f}{f_{\max}} \right) \quad (10)$$

$$f_{\text{adj}} = \frac{\exp(\omega f_{\text{norm}}) - 1}{\exp(\omega) - 1} + kf \quad (11)$$

式中: f 为当代种群原始适应度值; f_{\min} 、 f_{\max} 分别对应种群适应度函数最小值和最大值; f_{adj} 为修正后的适应度函数值。加入归一化和非线性调整的意义在于将原种群个体中适应度间的绝对值比较转换为对每一批种群适应度值的相对比较,确保进化方向不会随着迭代次数的增加而消失,如图10所示。另外,为避免过早陷入局部最优,在归一化及非线性化的基础上引入了原始适应度的影响,即 f/f_{\max} 和 kf 项,参数 $\omega = 2, k = 1$ 。

进一步由新的适应度值进行累积概率分布的计算。每次进行选择操作时,首先根据轮盘赌规则随机有放回地选出种群中两个个体,将其中适应度最高的个体置于交配池中等待交叉,即为联合使用改进轮盘赌和锦标赛

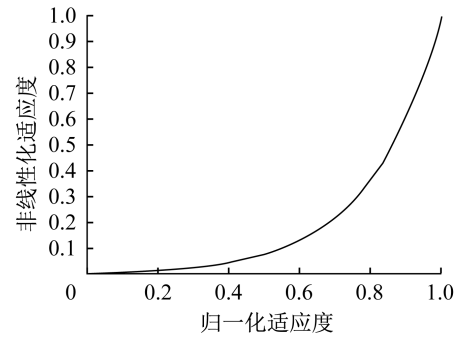


图10 适应度值的非线性转换

Fig. 10 Non-linear transform of fitness values

方法的选择策略。

IAGA在进行交叉及变异时,首先基于种群平均适应度及个体适应度信息更新交叉及变异概率。本文使用典型非线性函数sigmoid函数作为适应度值到概率值的映射函数。针对最大值优化问题,具体更新方式如式(12)~(13)所示,个体交叉与变异概率与适应度的演化关系如图11所示。

$$P_c = \begin{cases} p_{c1} + \frac{p_{c2} - p_{c1}}{1 + \exp \left\{ A \left[\frac{2(f_{\text{avg}} - f)}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} - 1 \right] \right\}} & f_{\min} \leq f' \leq \frac{(f_{\text{avg}} + f_{\min})}{2} \\ p_{c2} + \frac{p_{c1} - p_{c2}}{1 + \exp \left\{ A \left[\frac{f - \frac{(f_{\text{avg}} + f_{\min})}{2}}{(f_{\text{avg}} - f)(f - f_{\min})} \right] \right\}} & \frac{(f_{\text{avg}} + f_{\min})}{2} < f' < f_{\text{avg}} \\ p_{c3} + \frac{p_{c2} - p_{c3}}{1 + \exp \left\{ A \left[\frac{2(f - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} - 1 \right] \right\}} & f_{\text{avg}} \leq f' \leq f_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_m = \begin{cases} p_{m1} + \frac{p_{m2} - p_{m1}}{1 + \exp \left\{ A \left[\frac{2(f_{\text{avg}} - f)}{f_{\text{avg}} - f_{\min}} - 1 \right] \right\}} & f_{\min} \leq f \leq \frac{(f_{\text{avg}} + f_{\min})}{2} \\ p_{m2} + \frac{p_{m1} - p_{m2}}{1 + \exp \left\{ A \left[\frac{f - \frac{(f_{\text{avg}} + f_{\min})}{2}}{(f_{\text{avg}} - f)(f - f_{\min})} \right] \right\}} & \frac{(f_{\text{avg}} + f_{\min})}{2} < f < f_{\text{avg}} \\ p_{m3} + \frac{p_{m2} - p_{m3}}{1 + \exp \left\{ A \left[\frac{2(f - f_{\text{avg}})}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} - 1 \right] \right\}} & f_{\text{avg}} \leq f \leq f_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中： f_{avg} 为当代种群的平均适应度值； f_{max} 为最大适应度值； f' 为将要交叉的两个个体之间的较大适应度值； f 为要变异个体的适应度值； A 、 p_{c1} 、 p_{c2} 、 p_{c3} 、 p_{m1} 、 p_{m2} 和 p_{m3} 为常数，按照文献[31]的方法取 $A=9.090\ 343\ 8$ 。而交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 对种群演化及寻优过程起着控制性作用，当二者取值过小时，难以引入新个体而使寻优过程陷入局部最优；反之，当 p_m 过大时，易造成整个种群的震荡，达到一种近似“随机寻优”的不收敛情况，如图12所示。而随着迭代次数增加，如果 p_c 过大又容易造成在进化后期局部寻优能力过差。针对不同优化问题，需要对 p_c 和 p_m 进行敏感性分析，结合文献[32]，交叉及变异概率的选择范围分别在 $[0.3, 0.9]$ 和 $[0.01, 0.10]$ 之间时能够保证遗传算法的优化性能。

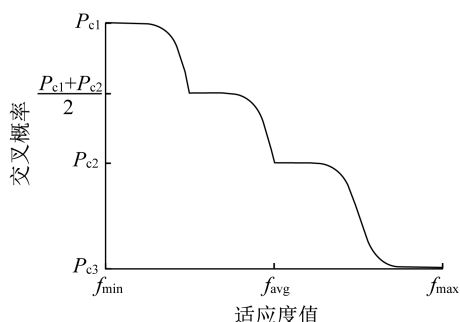


图11 个体交叉概率随适应度值演化示意

Fig. 11 Schematic of evolution of individual crossover probabilities with fitness values

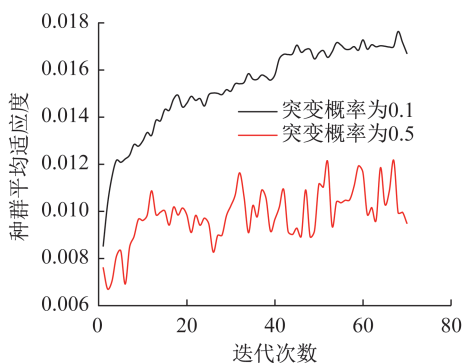


图12 突变概率对算法性能的影响

Fig. 12 Effect of mutation probability on algorithm performance

IAGA 与 SGA 的优化结果对比如图13所示。本次对比参数设置如下：种群规模均为200，迭代次数为50代。其中，IAGA的分段交叉概率分别为0.9、0.7、0.5；分段突变概率为0.20、0.10、0.05；而SGA交叉及突变概率设为0.9、0.1。不难发现，相较于SGA，在寻找单一最大值的问题框架内，IAGA能够寻找到更优解，且优化效率更高。

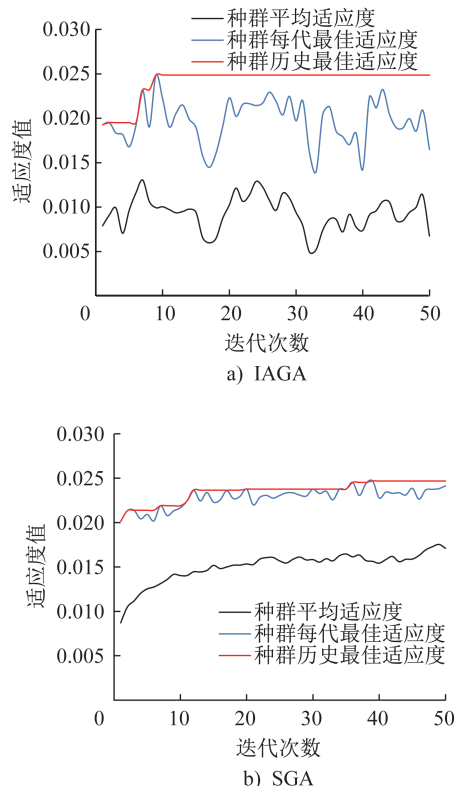


图13 IAGA与SGA种群平均、最大及历史最佳适应度对比

Fig. 13 Comparison of IAGA and SGA results in population average, maximum and best fitness values

2.2 目标函数

在遗传算法中，适应度的评价依赖于目标函数的选择。目标函数须能反映个体的适应度状况，即应当能够准确衡量某参数集下的模拟应力值与试验应力值之间的误差大小。对多加载制度下模型参数的联合优化本质上属于多目标优化问题，但可通过按权重聚合的方法转化为单目标问题。考虑到优化目标应使模拟与试验结果偏差尽可能小，且要求适应度值为非负数，可选择任意度量模拟值与试验值的凸向量函数，本文选择如下目标函数：

$$\left\{ \begin{aligned} f_{\text{dist},i} &= \sqrt{\sum_{j=1}^M (Y_{\text{exp},j}^i - Y_{\text{s},j}^i)^2} \\ \bar{f}_{\text{dist},i} &= \frac{f_{\text{dist},i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^M (Y_{\text{exp},j}^i)^2}} \\ f_{\text{value}} &= \frac{N}{\sum_{i=1}^N \omega_i \bar{f}_{\text{dist},i}} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

式中： $f_{\text{dist},i}$ 、 $\bar{f}_{\text{dist},i}$ 分别表示两点的L2范数距离及其正则化结果； N 为待优化的加载制度数量； M 为每个加载制度的数据点数； $Y_{\text{exp},j}^i$ 为试验应力； $Y_{\text{s},j}^i$ 为模拟应力； ω_i 为每个

数据集的权重系数,取 $\omega_i = 1$; f_{value} 为目标函数值, IAGA算法的核心即是在可行域内搜寻使 f_{value} 达到最大的参数集。

结果表明,该目标函数能够有效表征模型参数对模拟值与试验值之间差异的影响。

3 基于IAGA算法的优化结果

本文所提出的优化方法操作简便,仅需给出试验实测的真实应力应变数据、待优化参数序列的上、下限取值、迭代终止次数、各个阶段的交叉概率及变异概率序列值。以本文为例,初始屈服应力 σ_0 和弹性模量 E 可直接由单调加载弹性段的数据经回归分析得到。循环塑性阶段的待优化参数序列为 $[C_1, C_2, C_3, C_4, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, b, Q]$ 。需要特别指出的是,通过线性回归方法求取初始屈服应

力 σ_0 能够保证混合硬化模型对钢材单调加载阶段的拟合效果良好,但考虑到工程常用的名义屈服应力指标 $\sigma_{0.01}$ 、 $\sigma_{0.1}$ 以及 $\sigma_{0.2}$,为保证一致性,可进一步将上述初始屈服应力的计算方法进一步修正为上述指标,以本文为例,统一采取 $\sigma_{0.01}$ 作为材料初始屈服面大小。

本文使用多牌号结构不锈钢常幅、升幅加载的试验数据进行了基于CCIKH模型的参数优化。考虑到计算效率,在优化前首先对优化数据集进行预处理,对常幅加载试验数据,低幅值下取前30圈,高幅值下取前10圈,且每隔4个数据点取一个数据组成新的数据集。对于升幅加载试验取所有滞回环,每隔4个数据点取一个数据。使用IAGA得到的参数集对应数值计算结果与试验数据的对比结果如图14~16所示,各加载制度下单独优化及多加载制度下联合优化得到的参数集如表2所示。

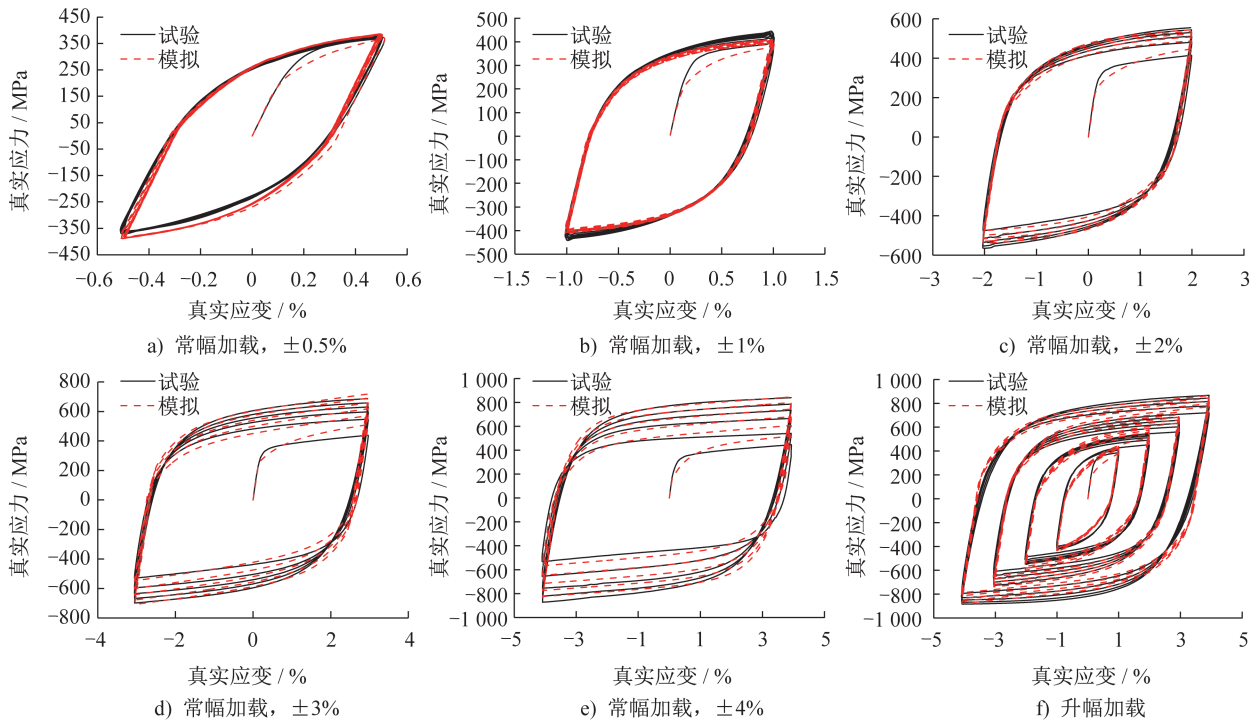
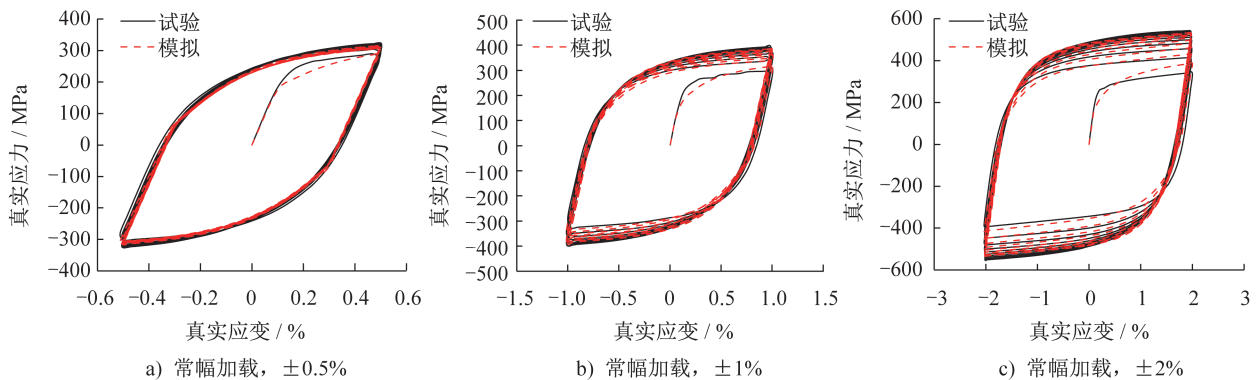


图14 6 mm厚S30408不锈钢板试验与优化结果对比^[14]

Fig. 14 Comparison of S30408 stainless steel specimens with 6 mm thickness between test and optimization results^[14]



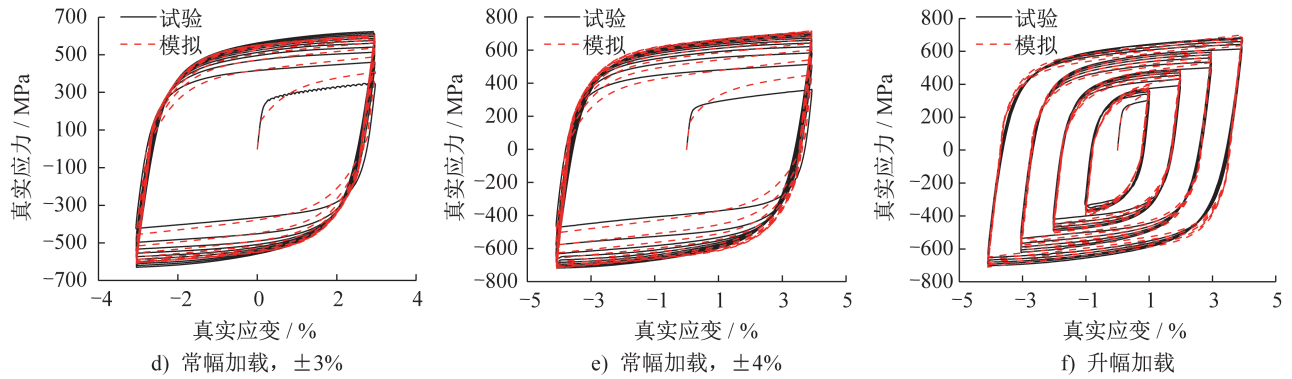


图15 6 mm厚 S31608 不锈钢板试验与优化结果对比^[14]

Fig. 15 Comparison of S31608 stainless steel specimens with 6 mm thickness between test and optimization results^[14]

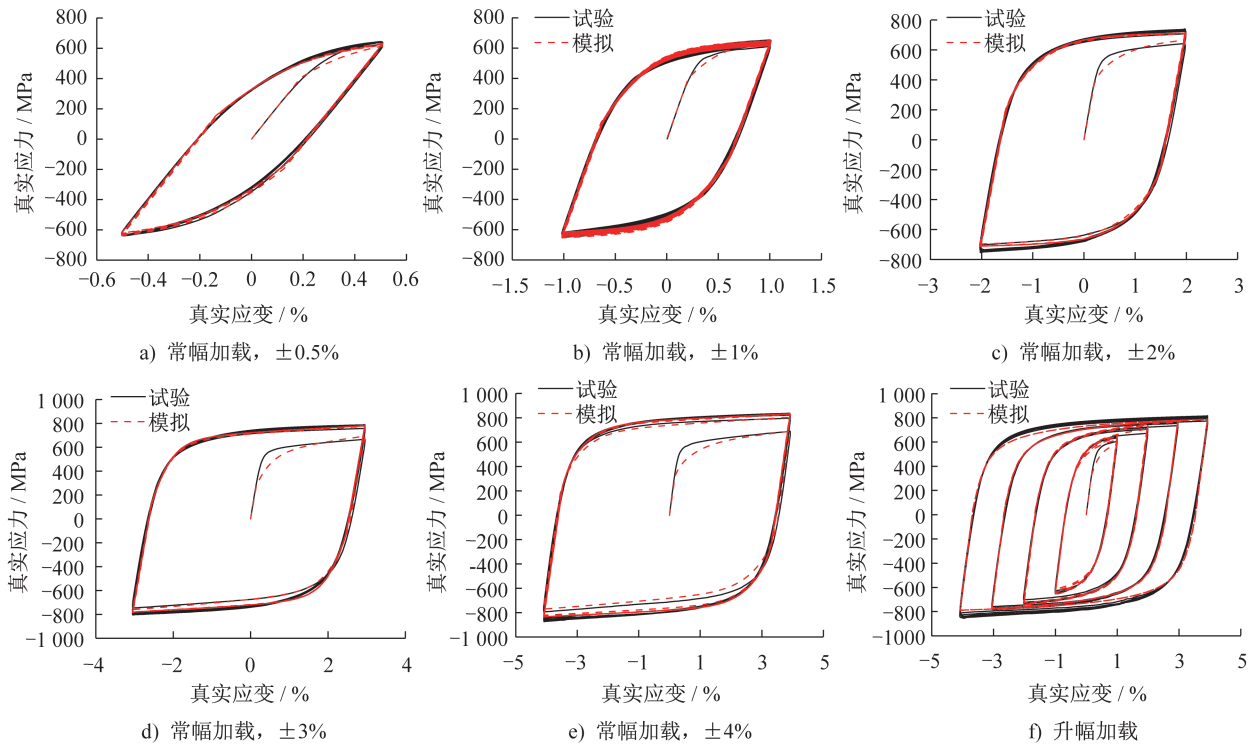


图16 6 mm厚 S22053 不锈钢板试验与优化结果对比^[14]

Fig. 16 Comparison of S22053 stainless steel specimens with 6 mm thickness between test and optimization results^[14]

表2 采用 IAGA 的 CCIKH 模型参数

Table 2 Parameters of CCIKH model using IAGA

牌号	加载制度	弹性模量 E/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.01}$ /MPa	C_1 /MPa	γ_1	C_2 /MPa	γ_2	C_3 /MPa	γ_3	C_4 /MPa	b	Q /MPa
S30408	±0.5	186	260	95 230	25 356	1 534	7 771	663	1 709	997	0.70	37
	±1.0			108 409	28 341	6 923	1 989	1 548	292	215	0.69	110
	±2.0			71 817	19 110	5 623	1 105	1 944	14	110	3.90	123
	±3.0			98 392	20 235	8 858	3 298	8 322	262	107	1.57	381
	±4.0			43 376	25 062	3 586	1 507	481	165	80	0.98	672
	升幅			58 101	24 608	4 804	2 443	1 602	137	110	0.43	685
联合标定				37 690	880	24 619	225	9 202	61	32	0.77	407

续表

牌号	加载制度	弹性模量 E/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.01}/\text{MPa}$	C_1/MPa	γ_1	C_2/MPa	γ_2	C_3/MPa	γ_3	C_4/MPa	b	Q/MPa
S31608	±0.5	185	280	56 609	20 313	7 036	1 434	511	1 594	964	0.40	235
	±1.0			61 898	15 523	4 450	800	805	233	214	5.07	76
	±2.0			61 100	38 405	3 917	2 126	1 891	308	166	4.49	165
	±3.0			23 719	11 828	545	1 632	166	268	211	4.70	227
	±4.0			23 113	24 198	4 291	1 770	1 308	142	282	2.74	301
	升幅			25 916	18 482	4 153	2 228	505	176	378	0.60	415
	联合标定			97 319	1 664	20 630	152	2 403	54	561	1.86	223
S22053	±0.5	193	380	143 665	62 551	10 295	6 461	1 335	487	474	14.37	-43
	±1.0			99 371	22 090	2 886	1 304	609	304	99	3.45	-42
	±2.0			82 120	36 919	9 608	417	2 002	187	437	29.72	61
	±3.0			40 543	51 777	16 698	1 885	587	442	187	27.21	176
	±4.0			78 743	35 745	938	1 254	1 603	179	146	11.36	215
	升幅			136 119	35 877	6 691	579	1 114	303	57	7.97	101
	联合标定			154 355	756	24 926	134	4 175	479	1129	30.72	111

需要指出的是,这里的单独优化是直接使用单个加载制度的试验结果进行标定,而联合优化指使用多个加载制度试验数据进行的平均权重的联合标定。为便于比较,本文分别选择文献[18,33]中两种不锈钢牌号的混合

硬化模型参数标定结果与本文优化结果进行对比,如图17~18所示,本文所提出的方法在多加加载制度下的联合参数标定中能够取得更为精确的结果,表现出良好的广谱性。

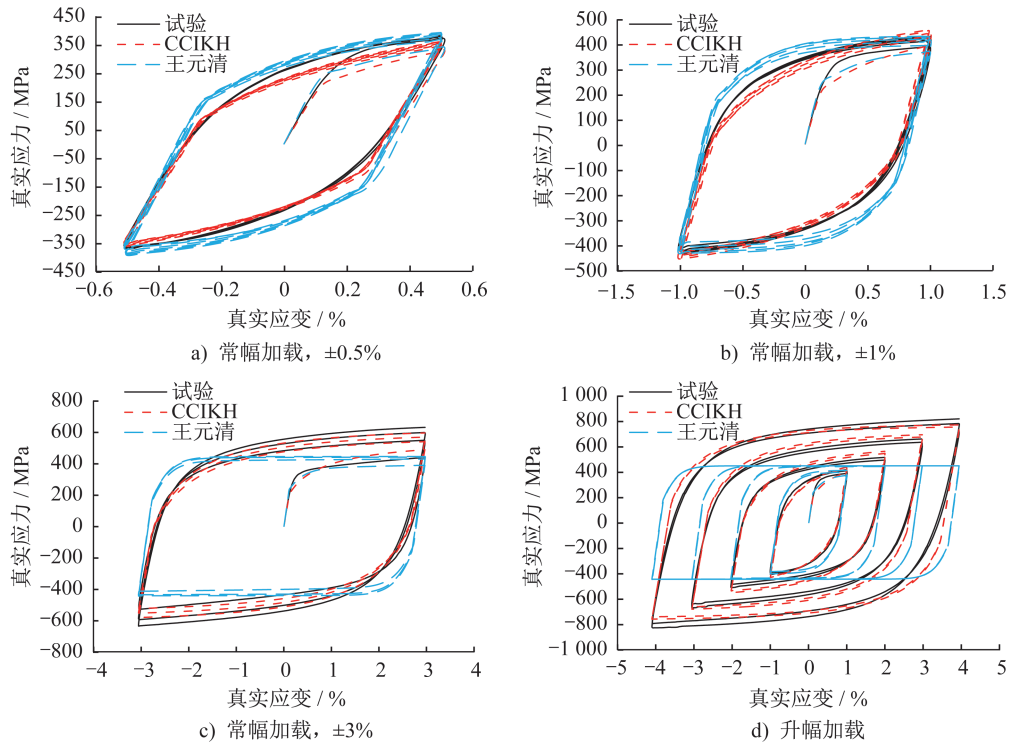


图17 S30408 不锈钢多加载制度的联合优化与试验、文献结果对比^[18]

Fig. 17 Optimization of multiple loading protocols compared with test and literature results for S30408 stainless steel specimens^[18]

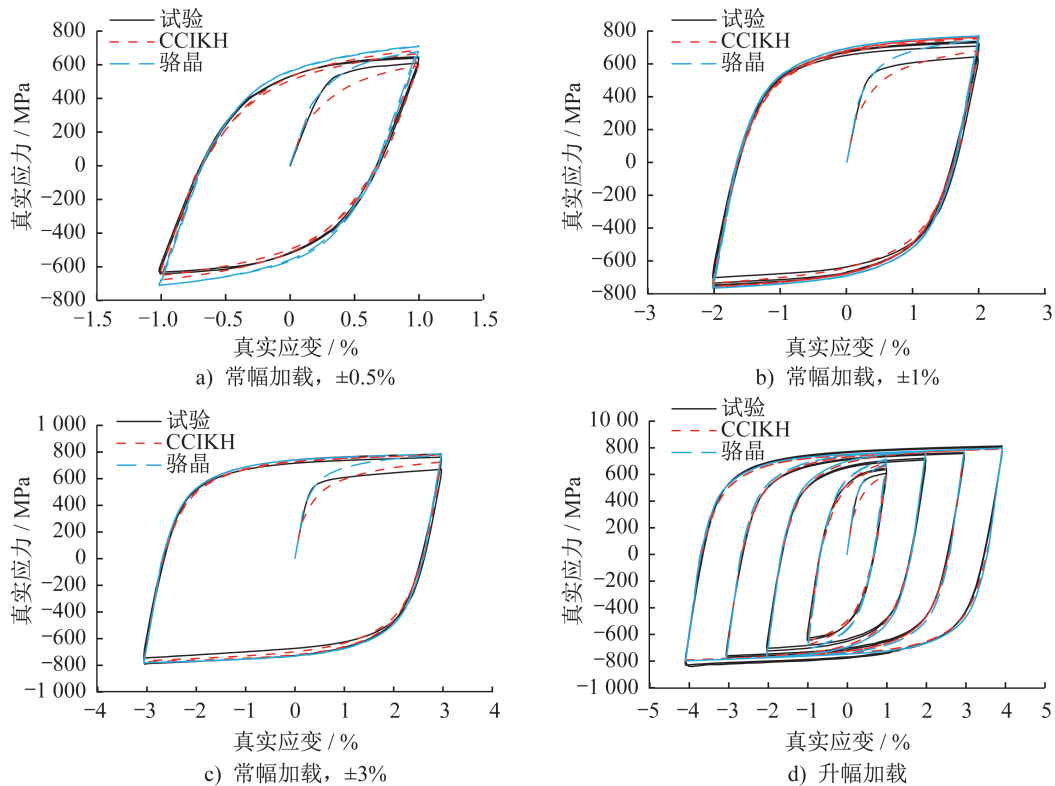


图 18 S22053 不锈钢多加载制度的联合优化与试验、文献结果对比^[33]

Fig. 18 Optimization of multiple loading protocols compared with test and literature results for S22053 stainless steel specimens^[33]

对比分析表明,CCIKH 模型对 S30408 和 S31608 奥氏体不锈钢的模拟精度略低于 S22053 不锈钢的模拟精度,这主要归结于奥氏体不锈钢显著的循环硬化不饱和以及无稳定滞回环的循环塑性特性,而对于 S22053 双相不锈钢等具有稳定滞回环的材料,该方法模拟精度极高。进一步发现,使用改进遗传算法结合多目标优化方法可实现对同一材料的多种加载制度进行联合优化,且优化结果与试验数据吻合良好,这对于断裂前不存在稳定滞回环以及 Non-Masing 材料的本构模型参数标定尤为重要,能够更加真实、全面地反映材料在断裂起始前的真实循环塑性特性。

综上所述,结合 IAGA 和 CCIKH 模型,能够快速给出有效的模型参数,验证了该方法的高效性和准确性,便于实际工程及有限元分析中的快速应用。

4 结论

本文基于常用不锈钢牌号平板试件常幅、升幅循环加载试验结果,使用 Python 语言搭建了 CCIKH 单轴数值模型,通过联合使用改进遗传算法以及自适应子步法实现了对该模型参数的高效、准确标定,可以得出以下结论:

(1) 相较于传统标定方法,IAGA 的计算效率可提高

200%,计算精度可提高 20%,且对于多加载制度联合标定情况的计算效率和精度提高更为显著。相较于基本遗传算法,该方法具有更高的优化效率。

(2) 自适应子步积分法能够改善材料在高斯积分点层次上的计算稳定性,有效避免了因增量步长过大而导致的数值计算不收敛、数值振荡等问题。

(3) 结合改进遗传算法,CCIKH 模型能够较为准确地描述不锈钢材料在任意给定多种加载制度下的力学行为,增强了模型参数的适用性,便于不锈钢结构及构件的实际分析与应用推广。

参考文献:

- [1] BURGAN B A, BADDOO N R, GILSENAN K A. Structural design of stainless steel members—comparison between Eurocode 3, part 1.4 and test results[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 54(1): 51-73. DOI: 10.1016/S0143-974X(99)00055-3.
- [2] AFSHAN S, GARDNER L. The continuous strength method for structural stainless steel design[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 68: 42-49. DOI: 10.1016/j.tws.2013.02.011.
- [3] GARDNER L. Stability and design of stainless steel structures—review and outlook[J]. Thin-Walled Structures,

- 2019, 141: 208-216. DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.019.
- [4] BECQUE J, LECCE M, RASMUSSEN K J R. The direct strength method for stainless steel compression members[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(11): 1231-1238. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.007.
- [5] SCHAFER B W. Advances in the direct strength method of cold-formed steel design [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 140: 533-541. DOI: 10.1016/j.tws.2019.03.001.
- [6] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-4: General Rules-Supplementary Rules for Stainless Steels; EN 1993-1-4 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [7] American Society of Civil Engineers. Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members[S]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2002.
- [8] Australian/New Zealand Standards. Cold-Formed Stainless Steel Structures; AS/NZS 4673:2001[S]. Sydney: Australian/New Zealand Standard, 2001.
- [9] ZHOU F, CHEN Y Y, WU Q. Dependence of the cyclic response of structural steel on loading history under large inelastic strains[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 104: 64-73. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.09.019.
- [10] YOSHIDA F, UEMORI T, FUJIWARA K. Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain [J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18 (5/6) : 633-659. DOI: 10.1016/S0749-6419(01)00049-3.
- [11] GARDNER L, NETHERCOT D A. Experiments on stainless steel hollow sections: part 1: material and cross-sectional behaviour [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60 (9) : 1291-1318. DOI: 10.1016/j.jcsr.2003.11.006.
- [12] RASMUSSEN K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59 (1) : 47-61. DOI: 10.1016/S0143-974X(02)00018-4.
- [13] ARRAYAGO I, REAL E, GARDNER L. Description of stress-strain curves for stainless steel alloys[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 540-552. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.08.001.
- [14] ZHENG S, ZHOU F, CHENG J, et al. Experimental study on cyclic hardening characteristics of structural stainless steels[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 191: 107196. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107196.
- [15] CHABOCHE J L, VAN K D, CORDIER G. Modelization of the strain memory effect on the cyclic hardening of 316 stainless steel[J]. *Smirt5 Div L*, 1979; L 11/3.
- [16] ZHOU J, SUN Z, KANOUTÉ P, et al. Experimental analysis and constitutive modelling of cyclic behaviour of 316L steels including hardening/softening and strain range memory effect in LCF regime [J]. *International Journal of Plasticity*, 2018, 107: 54-78. DOI: 10.1016/j.ijplas.2018.03.013.
- [17] 王元清, 常婷, 石永久, 等. 奥氏体不锈钢 S31608 的本构关系试验[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013, 53(9): 1231-1234, 1240. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2013.09.004. WANG Yuanqing, CHANG Ting, SHI Yongjiu, et al. Experimental study of the stress-strain relation of austenitic stainless steel S31608 [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2013, 53(9): 1231-1234, 1240. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2013.09.004. (in Chinese)
- [18] 王元清, 常婷, 石永久. 循环荷载下奥氏体不锈钢的本构关系试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(6): 1175-1179. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.06.028. WANG Yuanqing, CHANG Ting, SHI Yongjiu. Experimental study on constitutive relationship in austenitic stainless steel under cyclic loading [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(6): 1175-1179. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.06.028. (in Chinese)
- [19] ZHOU F, LI L. Experimental study on hysteretic behavior of structural stainless steels under cyclic loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 122: 94-109. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.03.006.
- [20] NIP K H, GARDNER L, DAVIES C M, et al. Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(1): 96-110. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.08.004.
- [21] SMITH C, KANVINDE A, DEIERLEIN G. Calibration of continuum cyclic constitutive models for structural steel using particle swarm optimization [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, 143(5): 04017012. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001214.
- [22] CHABOCHE J L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories [J]. *International Journal of Plasticity*, 2008, 24(10): 1642-1693. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.03.009.
- [23] WILKINS M. Calculation of elastic-plastic flow [R]. Livermore: California Univ Livermore Radiation Lab, 1963.
- [24] SIMO J C, HUGHES T J R. Computational inelasticity[M]. New York: Springer, 1998: 149-151.
- [25] 张娟. 循环硬化材料高温非比例循环棘轮行为的本构描述及其有限元实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. ZHANG Juan. Constitutive description for non-proportionally ratcheting of cyclically hardening material and its finite element implementation at high temperatures [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [26] FELL B V. Large-scale testing and simulation of

- earthquake-induced ultra low cycle fatigue in bracing members subjected to cyclic inelastic buckling [D]. Davis: University of California, 2008.
- [27] SLOAN S W. Substepping schemes for the numerical integration of elastoplastic stress-strain relations [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1987, 24(5): 893-911. DOI: 10.1002/nme.1620240505.
- [28] JIA L J. Integration algorithm for a modified Yoshida-Uemori model to simulate cyclic plasticity in extremely large plastic strain ranges up to fracture [J]. *Computers & Structures*, 2014, 145: 36-46. DOI: 10.1016/j.compstruc.2014.08.010.
- [29] GHAEI A, GREEN D E. Numerical implementation of Yoshida-Uemori two-surface plasticity model using a fully implicit integration scheme [J]. *Computational Materials Science*, 2010, 48(1): 195-205. DOI: 10.1016/j.commatsci.2009.12.028.
- [30] BAGLEY J D. The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms [D]. Michigan: University of Michigan, 1967.
- [31] YAN B, YAN C, LONG F, et al. Multi-objective optimization of electronic product goods location assignment in stereoscopic warehouse based on adaptive genetic algorithm [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29(6): 1273-1285. DOI: 10.1007/s10845-015-1177-7.
- [32] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1994, 24(4): 656-667. DOI: 10.1109/21.286385.
- [33] 骆晶, 施刚, 毛灵涛, 等. 双相型不锈钢 S22053 循环本构关系研究 [J]. *工程力学*, 2021, 38(9): 171-181. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.09.0659.
- LUO Jing, SHI Gang, MAO Lingtao, et al. Constitutive relation of duplex stainless steel s22053 under cyclic loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(9): 171-181. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.09.0659. (in Chinese)