

文章编号:1001-4888(2022)05-0669-06

# Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢循环软化特性分析<sup>\*</sup>

金丹, 金铠, 龙皓跃, 韩高枫

(沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 辽宁沈阳 110142)

**摘要:** 对 Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢 550℃下循环软化特性的应变范围和路径相关性进行了分析, 并采用 ABAQUS 软件对 Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢的循环软化特性进行了模拟。结果表明, Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢在 550℃不同路径、不同应变范围内均表现出了明显的循环软化现象, 应变路径对循环软化特性的影响大于应变范围的影响。其次, 采用非线性随动硬化与各向同性硬化的 Chaboche 混合模型进行了不同条件下循环软化特性模拟, 单轴不同应变范围下的模拟结果与实验结果前 100 周次内最大平均误差仅为 4.2%。针对主应变比为 -0.54、-0.64 和 -0.80 的 3 种多轴路径下的软化特性进行模拟计算, 得到的正应力与实验结果一致性较好; 剪应力的模拟结果与实验结果误差略大于正应力的结果, 但 100 周次内平均误差最大值仍仅为 3.2%。

**关键词:** Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢; 循环软化; 本构模型; 有限元模拟

**中图分类号:** TG144; TG142.1<sup>+2</sup>    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-237

## 0 引言

Mod. 9Cr-1Mo 钢是高铬铁素体耐热钢的代表钢种, 由于具有优异的高温持久性能、抗蠕变性能, 以及良好的导热性和较低的热膨胀系数等优点, 被广泛用于火力发电厂动力设备的制造<sup>[1,2]</sup>。

各国学者针对不同材料疲劳过程中的循环软化特性开展了大量研究工作, 研究结果<sup>[3-5]</sup>表明, T91 钢在室温到 600℃的条件下, 均表现出了明显的循环软化行为。Wu 等<sup>[6]</sup>对 Mod9-12%Cr 不锈钢进行了 600℃对称和非对称的应变循环实验, 在疲劳过程中观察到了显著的速率依赖性、平均应力松弛和连续循环软化行为, 并在此基础上, 结合新的非线性运动硬化准则和 Abdel-Karime-Ohno 模型, 通过引入平均应力松弛参数, 提出了一种新的循环黏塑性本构模型, 较好地再现了不同应变幅下的循环软化和平均应力松弛行为。Mrozinski 等<sup>[7]</sup>的疲劳实验结果表明, 室温和 600℃下 P91 钢均表现出了明显的循环软化特征, 整个疲劳过程没有明显的稳定周期, 且应力控制的循环软化特征较应变控制时的软化特征更为显著。

随着计算机技术和计算方法的发展, 各国学者采用有限元方法对材料疲劳硬化/软化特性进行了研究<sup>[8-10]</sup>。陈小辉<sup>[8]</sup>采用 ANSYS 软件基于 Chen-Jiao-Kim 循环塑性本构模型, 对 Z2CND18.12N 奥氏体不锈钢在循环弯曲载荷作用下的棘轮效应进行了模拟, 模拟结果与实验结果误差仅为 4.7%。卫璇等<sup>[9]</sup>对新型抗震结构用钢 AQ315 进行了单调和循环加载实验, 采用有限元软件 ABAQUS 基于 Chaboche 模型的混合强化参数, 较好地模拟了 AQ315 钢在循环载荷下的力学性能。Wang 等<sup>[10]</sup>对 10Ni5CrMoV 钢进行单轴疲劳实验, 在 Abdel-Karim-Ohno 模型的基础上, 引入运动硬化参数和棘轮参

\* 收稿日期: 2021-10-14; 修回日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目号 11102119); 辽宁省教育厅项目(LJKZ0437)资助

通信作者: 金丹(1976—), 女, 博士, 教授。金属材料的疲劳与断裂; 高效节能化工设备的开发。Email: jindan76@163.com

数,模拟了材料对称应变循环下的非饱和循环软化行为。

本文在 Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢高温多轴低周疲劳实验的基础上,分析了材料循环软化特性的路径相关性和幅值相关性。采用 ABAQUS 有限元软件,选择非线性随动硬化与各向同性硬化的 Chaboche 混合模型,模拟了不同应变范围和不同应变路径下材料的循环软化特性。

## 1 疲劳实验及实验结果

### 1.1 疲劳实验

实验材料为 Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢,采用薄壁管状试件进行实验,试件尺寸如图 1 所示。在 550℃ 时,材料弹性模量  $E=170\text{GPa}$ ,屈服强度  $\sigma_s=364\text{MPa}$ ,泊松比  $\mu=0.3$ 。具体实验过程见文献[11]。

定义主应变比  $\Phi=\epsilon_3/\epsilon_1$  ( $\epsilon_3$  为第三主应变,  $\epsilon_1$  为第一主应变) 来体现各应变路径间的差别,其中,  $\Phi=-0.50$  对应于单轴,  $\Phi=-1.0$  对应于纯扭转,见图 2 所示(图中  $\epsilon$  为正应变,  $\gamma$  为剪应变)。

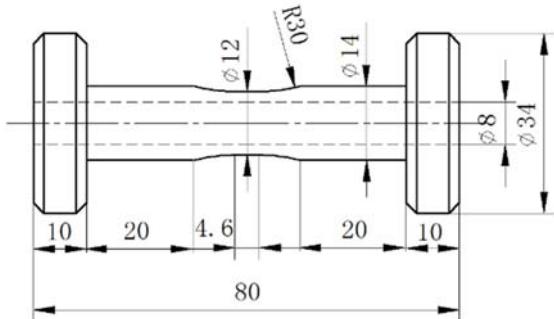


图 1 试件形状及尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Specimen shape and size(unit: mm)

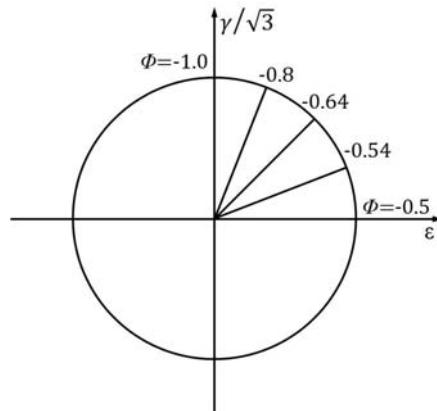


图 2  $\Phi$  的定义

Fig. 2 The definition of  $\Phi$

### 1.2 实验结果

图 3 给出了单轴路径不同应变范围下的等效应力值随循环周次的变化,图 4 给出了等效应变范围  $\Delta\epsilon_{eq}=0.5\%$  时不同路径下等效应力值随循环周次的变化。从图 3 和图 4 可以看出,材料仅在循环加载

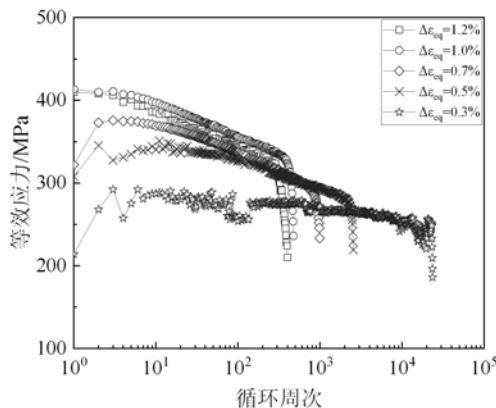


图 3 不同应变范围下的等效应力  
与循环周次( $\Phi=-0.50$ )

Fig. 3 Equivalent stress and cycles for different strain ranges( $\Phi=-0.50$ )

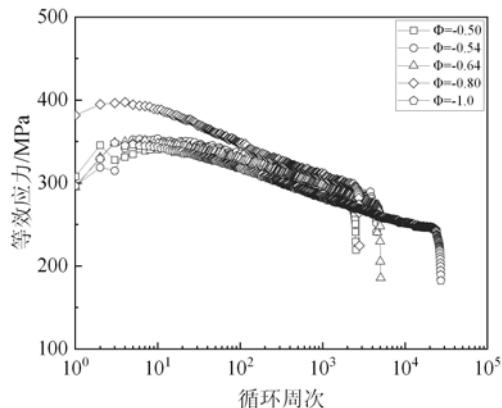


图 4 不同应变路径下的等效应力  
与循环周次( $\Delta\epsilon_{eq}=0.5\%$ )

Fig. 4 Equivalent stress and cycles for different strain paths ( $\Delta\epsilon_{eq}=0.5\%$ )

初期的前 3 个周次呈现出了不同程度的循环硬化现象, 随后即表现出循环软化、饱和直至最终应力急剧下降的特点。采用软化率  $R_s$  来表示不同条件下材料循环软化的程度<sup>[12]</sup>:

$$R_s = 1 - \sigma_{\max(\text{soft})} / \sigma_{\max} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{\max}$  为最大峰值应力;  $\sigma_{\max(\text{soft})}$  为软化过程中相应周次下的应力。

从图 3 中可以得到, 当  $\Delta\epsilon_{eq}=0.3\%$  时, 软化率为 16.3%; 当  $\Delta\epsilon_{eq}=1.2\%$  时, 软化率为 23.8%。从图 4 中可以看到, 相同等效应变范围  $\Delta\epsilon_{eq}=0.5\%$  下,  $\Phi=-0.50$  时的软化率为 17.2%;  $\Phi=-0.54$  时的软化率为 18.5%;  $\Phi=-0.64$  时的软化率为 21.4%;  $\Phi=-1.0$  时的软化率为 28.5%。对比各条件下的软化率可以看出, 随着路径中剪应变比例的增加, 软化率呈增加的趋势。对比图 3 和图 4 中的软化率值, 可以看到应变路径对循环软化特性的影响大于应变范围对循环软化特性的影响。

## 2 单轴疲劳特性有限元分析

采用 ABAQUS 软件, 针对 Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢不同条件下的循环软化特性进行模拟。依据不同循环周次下应力应变滞环特点以及循环软化特性, 选取能体现非线性随动硬化与各向同性硬化的 Chaboche 混合模型进行模拟计算。

### 2.1 材料常数的确定

随动硬化部分采用经典 A-F 随动硬化模型<sup>[13]</sup>, 其背应力  $\alpha$  的表达式为

$$d\alpha = \frac{2}{3}Cd\bar{\epsilon}^p - \gamma\alpha d\bar{\epsilon}^p \quad (2)$$

对式(2)积分得

$$\alpha = \frac{2}{3}\frac{C}{\gamma}[1 - \exp(-\gamma\bar{\epsilon}^p)] \quad (3)$$

式中:  $d\bar{\epsilon}^p$  为等效塑性应变增量;  $C$  和  $\gamma$  为随动硬化材料参数, 其中  $C$  为初始随动硬化模量,  $\gamma$  为随动硬化模量随塑性变形增加而减小的速率。

选择 Voce 非线性各向同性硬化准则来体现材料的各向同性硬化特性<sup>[14]</sup>, 其表达式为

$$\sigma^* = \sigma_0 - Q[1 - \exp(-bP)] \quad (4)$$

式中:  $\sigma^*$  为屈服面尺寸;  $\sigma_0$  为零塑性应变时的屈服应力;  $Q$  为屈服面的最大变化值;  $b$  为屈服面尺寸随着塑性应变发展而变化的速率;  $P$  为累计塑形应变<sup>[15]</sup>。采用单调拉伸实验和单轴疲劳实验确定随动硬化参数  $C$ 、 $\gamma$  与各向同性硬化参数  $b$  和  $Q$ , 可得  $C=230000$ ,  $\gamma=938$ ,  $Q=-75$ ,  $b=5$ 。

### 2.2 有限元建模、边界条件处理及载荷施加

选取实验试件标距段进行建模分析。单元类型选择六面体减缩积分单元, 即 C3D8R, 建立有限元模型并划分网格, 共产生 31382 个节点, 26994 个单元(见图 5)。选择的加载方式为直接循环, 试件一端固定, 另一端施加与实验条件相同的位移载荷量, 位移量  $\Delta L$  的计算方法如式(5)所示:

$$\Delta L = L \times \epsilon \quad (5)$$

式中:  $L$  为标距段长度;  $\epsilon$  为正应变值。

### 2.3 有限元模拟结果

由图 3 和图 4 可以看出, Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢在整个疲劳过程中表现出循环软化特性, 且 100 周次后循环软化速率基本稳定, 因此本文只针对前 100 周次进行模拟。

图 6 给出了  $\Phi=-0.50$  单轴路径 3 个应变范围下的实验和模拟结果。从图 6(a)可以看出,  $\Delta\epsilon_{eq}=0.7\%$  时, 各循环周次内有限元模拟结果略大于实验值, 模拟得到的最大应力值为 373MPa, 仅高于实验值 3MPa; 前 100 周次内, 模拟结果与实验值整体软化趋势一致, 平均误差仅为 2.1%;  $\Delta\epsilon_{eq}=1.0\%$  时, 模拟得到的最大应力值为 413MPa, 与实验值的误差仅为 0.9%。20 周次后, 有限元模拟结果略高于实验结果, 100 周次内的平均误差为 4.2%;  $\Delta\epsilon_{eq}=1.2\%$  时 100 周次内模拟结果与实验值的平均误差仅为 0.4%。

图 6(b)给出了  $\Delta\epsilon_{eq}=1.2\%$  时应力应变滞环的模拟结果与实验结果, 模拟得到的总趋势与实验结

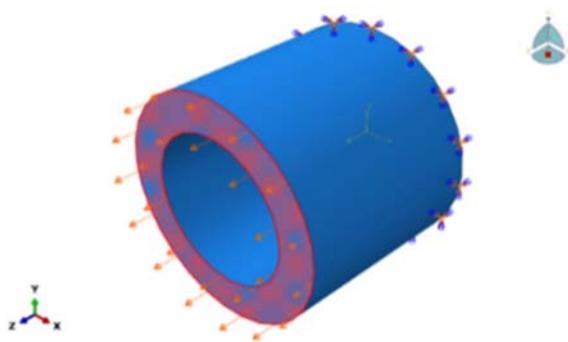
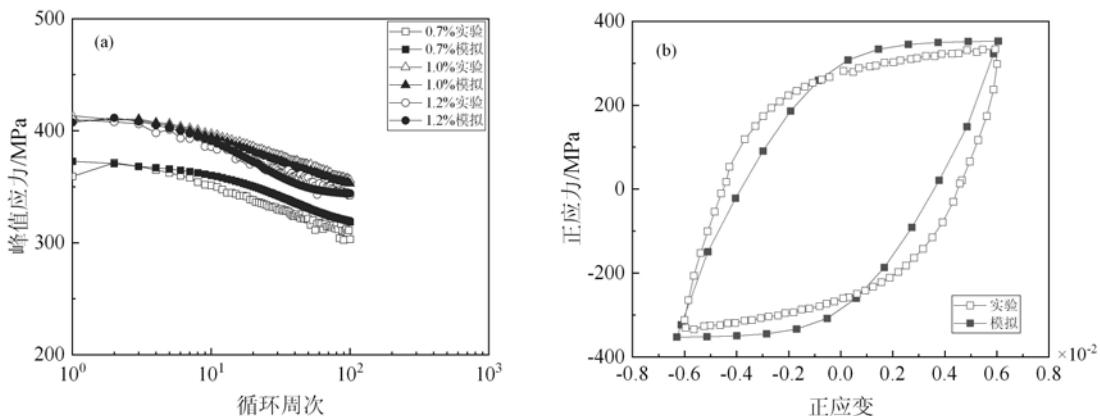


图 5 薄壁管试件网格形状与载荷加载示意图

Fig. 5 Diagram of grid and loading of specimen of thin wall pipe

果相一致,平均误差仅为2.5%,因此,可将所选模型和材料常数直接用于该材料多轴疲劳的模拟计算。

图 6 不同应变范围内实验结果和模拟结果( $\Phi = -0.50$ ):

(a) 峰值应力与循环周次; (b) 正应力正应变滞回线

Fig. 6 Comparison of experiments and simulations for different strain ranges( $\Phi = -0.50$ ):

(a) equivalent stress and cycle number; (b) stress strain hysteresis loop

### 3 多轴疲劳特性的有限元分析

#### 3.1 有限元建模、边界条件处理及载荷施加

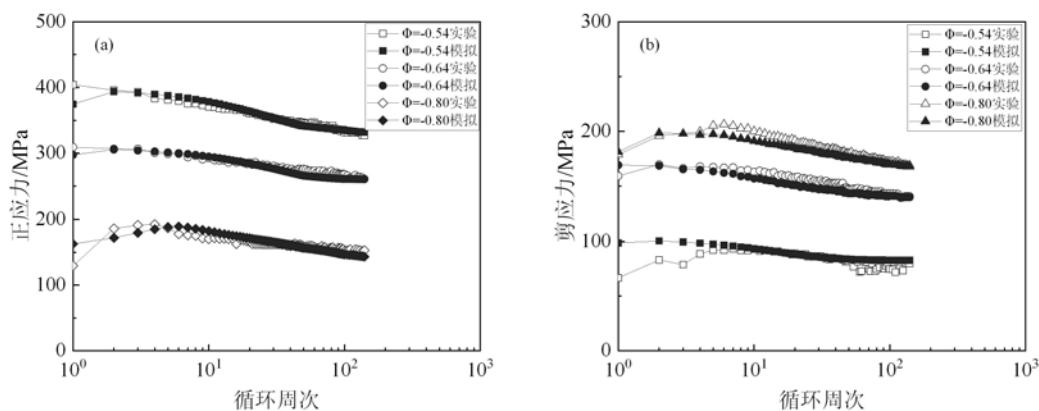
选取 $\Delta\epsilon_{eq}=1.0\%$ ,针对 $\Phi=-0.54$ 、 $\Phi=-0.64$ 和 $\Phi=-0.80$ 多轴路径下材料循环软化特性进行模拟。模型建立以及网格划分与2.2节中单轴疲劳模拟情况相同,需要在2.2节单轴载荷的基础上加入扭转载荷,扭转位移量 $\Delta\theta$ 由式(6)计算得到:

$$\Delta\theta = \sqrt{3}L\gamma r \quad (6)$$

其中: $r$ 为试件半径; $\gamma$ 为剪应变。

#### 3.2 有限元模拟结果

图7给出了试件在不同路径下的有限元模拟结果与实验结果。主应变比 $\Phi=-0.54$ 下,模拟得到的正应力最大值为393 MPa,与实验值的误差为2.7%。前30周次内,有限元模拟结果略大于实验结果,平均误差值为0.6%;100周次内的平均误差为0.96%;从图8(b)中可以看出,在主应变比 $\Phi=-0.54$ 条件下,模拟剪应力值在开始几周误差略大,模拟值与实验结果的最大误差为17%;第三周次后模拟值与实验结果的误差减小,100周次内平均误差为4%。主应变比 $\Phi=-0.64$ 和 $\Phi=-0.80$ 下,模拟值与实验结果间的误差情况与 $\Phi=-0.54$ 相类似,100周次内正应力平均误差分别为2.2%和3.4%,剪应力平均误差分别为2.8%和2.5%,模拟结果和实验结果吻合较好。

图 7 不同路径下实验结果和模拟结果( $\Delta\epsilon_{eq}=1.0\%$ ):

(a)正应力与循环周次; (b)剪应力与循环周次

Fig. 7 Comparison of experiments and simulations for different strain paths( $\Delta\epsilon_{eq}=1.0\%$ ):

(a) normal stress and cycle number; (b) shear stress and cycle number

## 4 结论

本文对 Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢不同应变范围和不同应变路径下的循环软化特性进行了分析,并采用 ABAQUS 软件针对不同条件下的软化特性进行模拟计算,得到如下结论:

(1) Mod. 9Cr-1Mo 不锈钢在 550℃ 不同应变路径、不同应变范围下均表现出了明显的循环软化现象。单轴路径下,循环软化程度随应变范围的增加而更加明显;在相同应变范围  $\Delta\epsilon_{eq}=0.5\%$  时,随着路径中剪应变比例的增加,软化率呈增加的趋势,由  $\Phi=-0.50$  时的 17.2% 增至  $\Phi=-1.0$  时的 28.5%。对比软化率值可以看出应变路径对循环软化特性的影响大于应变范围的影响。

(2) 模拟结果与实验结果对比表明,单轴路径  $\Delta\epsilon_{eq}=0.7\%$ 、 $\Delta\epsilon_{eq}=1.0\%$  和  $\Delta\epsilon_{eq}=1.2\%$  的模拟结果与实验结果吻合较好,3 个应变范围内,前 100 周次内,模拟结果与实验结果最大平均误差仅为 4.2%。

(3) 针对  $\Delta\epsilon_{eq}=1.0\%$ ,不同多轴路径  $\Phi=-0.54$ 、 $\Phi=-0.64$ 、 $\Phi=-0.80$  下的循环软化特性的模拟结果表明,3 个路径下模拟得到的正应力与实验值吻合较好;剪应力模拟结果与实验结果误差略大于正应力的结果,但 100 周次内平均误差仍在 3.2% 以内。

## 参考文献:

- [1] Zhang Z F, Liu R, Zhang Z J, et al. Exploration on the unified model for fatigue properties prediction of metallic materials[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(11):1693–1704.
- [2] 王卫泽, 王钥, 朱月梅, 等. 我国 P91/T91 钢生产及其性能的现状与进展[J]. 机械工程材料, 2010, 34(4):6–9 (WANG Weize, WANG Yao, ZHU Yuemei, et al. Status and development of production and properties of P91/T91 steel in China[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(4):6–9 (in Chinese))
- [3] Egner W, Sulich P, Mrozinski S, et al. Modelling thermo-mechanical cyclic behavior of P91 steel [J]. International Journal of Plasticity, 2020, 135:102820.
- [4] 陈建云, 陆大敏, 莫德凯, 等. 对称拉压循环对 HRB400E 钢弹塑性行为影响的试验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(5):759–766 (CHEN Jianyun, LU Damin, MO Dekai, et al. Experimental study on elastoplastic behavior of HRB400E steel under low-cycle symmetric loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5):759–766 (in Chinese))
- [5] 周红伟, 何宜柱, 岑豫皖, 等. 应变时效对 P91 马氏体钢高温低周疲劳行为的影响[J]. 机械工程材料, 2014, 38(10):37–41 (ZHOU Hongwei, HE Yizhu, CEN Yuwan, et al. Effect of strain aging on high temperature and low cycle fatigue behavior of P91 martensitic steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(10):37–41 (in Chinese))

- [6] Wu D L, Xuan F Z, Guo S J, et al. Uniaxial mean stress relaxation of 9–12% Cr steel at high temperature: experiments and viscoplastic constitutive modeling[J]. International Journal of Plasticity, 2016, 77:156–173.
- [7] Mrozinski S, Egner H, Piotrowski M. Effects of fatigue testing on low-cycle properties of P91 steel [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 120:65–72.
- [8] 陈小辉. 循环载荷作用下压力管道棘轮效应及安定性研究[D]. 天津: 天津大学, 2014 (CHEN Xiaohui. Research on ratchet effect and stability of pressure pipeline under cyclic loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014 (in Chinese))
- [9] 卫璇, 杨璐, 施刚, 等. AQ315 钢材单调与循环加载试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9):85–92, 128 (WEI Xuan, YANG Lu, SHI Gang, et al. Experimental study on monotony and cyclic loading of AQ315 steel[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(9):85–92, 128(in Chinese))
- [10] Wang Q, Liu X S. Non-saturated cyclic softening and uniaxial ratcheting of a high-strength steel: experiments and viscoplastic constitutive modeling[J]. Mechanics of Materials, 2017, 113:112–125.
- [11] 王巍. Mod. 9Cr-1Mo 钢多轴低周疲劳特性研究[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2013 (WANG Wei. Low cycle fatigue of characteristic for Mod. 9Cr-1Mo steel under multiaxial loading[D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2013 (in Chinese))
- [12] 张兆福, 徐连勇, 马东方, 等. P92 钢的高温低周疲劳行为及寿命预测[J]. 机械工程材料, 2019, 43(11):1–4 (ZHANG Zhaofu, XU Lianyong, MA Dongfang, et al. High temperature low cycle fatigue behavior and life prediction of P92 steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(11):1–4 (in Chinese))
- [13] Frederick C O, Armstrong P J. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect[J]. Materials at High Temperatures, 2007, 24(1):1–26.
- [14] Liu S, Kouadri -Hennia A, Gavrus A. Numerical simulation and experimental investigation on the residual stresses in a laser beam welded dual phase DP600 steel plate: thermo-mechanical material plasticity model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 122:5–12.
- [15] Chaboche J L. Time independent constitutive theories for cyclic plasticity[J]. International Journal of Plasticity, 1986, 2(2):149–188.

## Analysis of cyclic softening characteristics of Mod. 9Cr-1Mo stainless steel

JIN Dan, JIN Kai, LONG Haoyue, HAN Gaofeng

(School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, Liaoning, China)

**Abstract:** Based on the previous fatigue test results of Mo. 9Cr-1Mo stainless steel at 550°C, the correlation analyses were carried out for cyclic softening characteristics related to strain ranges and paths. Meanwhile, the ABAQUS software was used to select a hybrid model of nonlinear follow-up hardening and isotropic hardening to simulate the cyclic softening characteristics of the material. The results show that the material exhibits obvious cyclic softening in different paths and strain ranges at 550°C. In general, the effect of strain path on cyclic softening characteristics is greater than that of strain range. The Chaboche mixed hardening model was used to simulate the degree of cyclic softening under different conditions. The simulations are in agreement with the experimental results under different strain ranges, and the maximum average error is 4.2% in the first 100 cycles. The softening characteristics under the principal strain ratios of -0.54, -0.64 and -0.80 were simulated which agree with the experimental results in terms of normal stress. The error between the simulated shear stress and the experimental stress is slightly larger than that of the normal stress, while the maximum average error is 3.2% in the first 100 cycles.

**Keywords:** Mod. 9cr-1Mo stainless steel; cyclic softening; constitutive model; finite element simulation