

316L 焊接接头不同区域低周疲劳特性与寿命预测方法

郭严峻, 张 威*, 杨桥发, 周昌玉

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 系统研究了 316L 母材、焊材、焊接接头三种试样的高温低周疲劳特性, 通过在传统寿命预测模型中引入疲劳寿命减损系数, 实现了焊接接头不同区域的低周疲劳寿命预测。结果表明, 低周疲劳过程中, 三种试样均在初期快速硬化, 然后进入稳定循环状态, 最后峰值应力快速下降并失效, 其中母材硬化持续周次最长, 焊材与焊接接头的硬化持续周次相对较短。随着应变幅值的增加, 三者的疲劳寿命显著降低, 其中母材疲劳寿命明显高于焊材及焊接接头, 焊材与焊接接头的疲劳寿命相近。基于母材低周疲劳寿命, 采用寿命减损系数对不同材料的低周疲劳寿命进行等效处理, 选用多种寿命预测模型对三种试样的等温疲劳寿命进行预测, 其中广义应变能损伤函数法在五个模型中表现出最强的适用性。

关键词: 316L; 焊接接头; 低周疲劳; 寿命预测

中图分类号: TF76, TG405

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)05-0183-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.05.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Low cycle fatigue characteristics and life prediction methods for different regions of 316L welded joints

Guo Yanjun, Zhang Wei*, Yang Qiaofa, Zhou Changyu

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech. University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: In this paper, the high-temperature low-cycle fatigue characteristics of three types of materials: 316L base metal, welded material, and welded joints were systematically studied. By introducing a fatigue life reduction coefficient into the traditional life prediction model, the low-cycle fatigue life prediction of different regions of the welded joints has been achieved. The results show that during the low-cycle fatigue process, all three materials undergo initial rapid hardening, then enter a stable cyclic state, and finally experience a rapid decrease in peak stress followed by failure. Among them, the base metal has the longest duration of hardening, while the hardening duration of the welded material and welded joints is relatively shorter. With the increase of strain amplitude, the fatigue life of the three materials significantly decreases. The fatigue life of the base metal is significantly higher than that of the welded material and welded joints, while the fatigue lives of the welded material and welded joints are similar. Based on the low-cycle fatigue life of the base metal, the fatigue lives of different materials are equivalently processed using a life reduction coefficient. Multiple life prediction models are selected to predict and evaluate the isothermal fatigue life of the three materials. It is found out that Generalized Strain En-

收稿日期: 2023-06-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52005250)。

作者简介: 郭严峻, 1999 年出生, 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要从事高温材料强度研究, E-mail: 202161207139@njtech.edu.cn; * 通讯作者: 张威, 1992 年出生, 男, 江苏徐州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事高温结构的蠕变、疲劳与结构完整性研究, E-mail: zhang_wei@njtech.edu.cn。

ergy Damage Function (GSEDF) method can achieve the best agreement with measured result.

Key words: 316L, welded joint, low cycle fatigue, life prediction

0 引言

核电作为一种清洁高效的可持续性能源,可以稳定大规模地生产电力,对改善我国能源结构发挥着巨大的作用^[1-3]。而以核电主管道为代表的典型核安全 I 级部件长期在高温、高压、变载的严苛环境下运行,316L 奥氏体不锈钢由于具有良好的抗疲劳、耐热性和耐腐蚀性能,被广泛应用于核电主管道系统中^[4]。由于核电机组高温部件及管道结构较为复杂,在其制造过程中,采用焊接的方式制造是不可避免的。然而,由于焊接接头的微观结构的不均匀性以及焊接残余应力的影响,其常被认为是焊接结构的薄弱环节^[5]。不同于均质材料的高温低周疲劳破坏,焊接接头在高温低周疲劳载荷作用下的宏观变形行为和微观损伤机制往往更加复杂,材料寿命也远低于均质材料的寿命,因此研究 316L 焊接接头低周疲劳特性及寿命预测方法对于保障我国核电机组长期安全平稳运行具有重要的研究价值和工程意义^[6]。

近年来,已有学者对焊接接头低周疲劳行为进行了研究。Veerababu 等人^[7-8]研究了 P92 钢母材及其焊接接头的低周疲劳行为,研究表明,母材和焊接接头均表现出连续软化,软化量随着应变幅值的增加而增加,母材的软化量在所有应变幅值下都高于焊接接头。在低应变幅值下,焊接接头的疲劳寿命低于母材,而在较高的应变幅值下,两种材料的疲劳寿命相近。Farragher 等人^[9]研究了 P91 母材、焊材、焊接接头的高温低周疲劳行为,发现与母材和焊接接头相比,焊材具有更高的应力-应变响应,而焊接接头表现出与母材相似的循环应力-应变响应,所有试样的应力响应均表现出连续循环软化,焊接接头的软化程度低于母材和焊材。Li 等人^[10]研究了 Sanicro25 钢焊接接头的低周疲劳变形行为,并建立了循环硬化模型,研究表明,该材料疲劳寿命随着应变幅值的增大而下降。材料持续硬化,最终快速软化并失效,而循环硬化比(硬化量与第一周峰值应力的比值)呈现先增大后减小的趋势,他们将这种异常趋势归因于循环屈服应力的变化和位错形态的演变,并根据修正的泰勒应力,统一考虑了位错在析出相上缠结和位错缠结的循环硬化模型,继而

利用此循环硬化模型准确计算了焊接接头低周疲劳期间的最大循环应力。Rao 等人^[11-12]研究了保载条件(连续循环、拉伸保载、压缩保载和拉伸加压缩保载)和保载时间对 304 不锈钢母材和 308 不锈钢焊材低周疲劳行为的影响,发现在相同测试条件下,308 不锈钢的低周疲劳寿命低于 304 不锈钢,表现出较差的疲劳抗性,与压缩保载相比,拉伸保载导致这两种材料的寿命更低,拉伸保载时间增加后,308 不锈钢焊材的寿命显著降低,Brinkman 等人^[13-14]也得出了相同的结论。Rao 等人^[15]还研究了以 308 不锈钢为焊材的 304 不锈钢焊接接头中的缺陷对低周疲劳行为的影响,发现焊接接头试样表面上的缺陷与试样内部的缺陷相比会更显著地降低疲劳寿命。张莹莹和李明娜等人^[16-18]对 316L 母材以及 316L/308L 焊接接头的低周疲劳行为进行了对比分析,发现 316L 母材在初期发生快速的循环硬化,然后进入循环稳定阶段,最后应力快速下降并失效。而 316L/308L 焊接接头则未出现硬化现象,发生持续软化,最后应力快速下降并失效。Kumar 等人^[19]研究了短期热老化对 316LN 不锈钢焊接接头低周疲劳行为的影响,与未经热老化的焊接接头试样相比,经过 700 ℃、2 h 热老化的焊接接头疲劳寿命明显增加。尽管以上研究对不锈钢焊接接头的低周疲劳特性进行了系统研究,但针对 316L 焊接接头不同区域试样低周疲劳变形行为和疲劳寿命预测方法的研究鲜有报道。

笔者以我国核电机组主管道广泛采用的 316L 奥氏体不锈钢为研究对象,开展不同应变幅值下 316L 母材、焊材、焊接接头的等温低周疲劳试验,研究其宏观变形行为和疲劳寿命规律,对比分析三种试样在宏观变形行为方面的区别与联系,并对三者的等温低周疲劳寿命进行分析总结,得到其低周疲劳寿命变化规律。基于 316L 母材、焊材、焊接接头等温低周疲劳寿命之间的区别与联系,通过引入疲劳寿命减损系数,建立了适用于三种试样的等温低周疲劳寿命预测模型。

1 试验

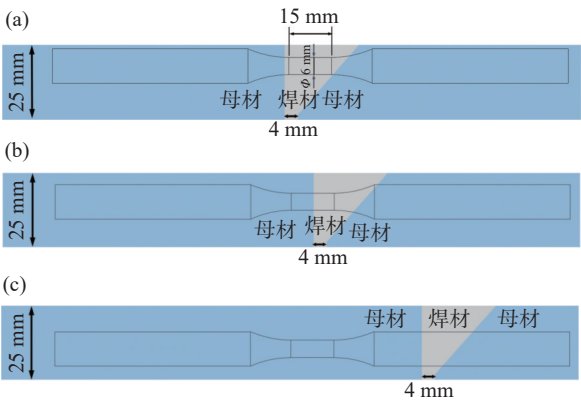
1.1 材料与试样

试验使用的母材为 316L SS 无缝钢管,外径为

219 mm, 壁厚为 25 mm, 在 1 040 ℃ 进行固溶热处理, 然后用水冷却至室温。焊材选用核级焊材, 根据母材与焊材“等强”匹配原则选用 E-316-15, 母材与焊材主要化学成分如表 1 所示。为了进行等温低周疲劳试验, 沿管道轴向加工出标距直径为 6 mm、长度为 15 mm 的圆柱形试样, 如图 1 所示, 焊接方法采用手工钨极氩弧焊 (GTAW) 打底、焊条电弧焊 (SMAW) 层间和盖面的方式。316L 母材、焊材、焊接接头疲劳试样的取样位置如图 1 所示, 为了避免多轴应力的影响, 焊接接头熔合线方向与加载方向垂直。

表 1 316L 母材和焊材的主要化学成分
Table 1 Main chemical compositions of 316L base metal and weld metal %

材料	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
母材	0.018	17.80	12.08	2.23	1.08	0.35	0.019	0.001
焊材	0.020	19.64	13.20	2.33	1.50	0.28	0.014	0.007



(a) 焊材试样; (b) 焊接接头试样; (c) 母材试样
图 1 低周疲劳试样及取样位置

Fig. 1 Low cycle fatigue specimen and sampling location

1.2 试验方法

试验采用 316L 母材、焊材、焊接接头光滑圆棒型试样, 根据 ASTM E606/E606 M-12 试验标准, 利用 MTS809 型液压伺服疲劳试验机, 分别进行 550 ℃ 下应变幅值为±0.4%、±0.5%、±0.6%、±0.8% 的等温低周疲劳试验。在测试过程中, 使用电磁感应加热的方式对试样进行加热, 并利用 K 型热电偶对温度进行测量与控制。机械应变加载采用三角波, 选择 $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的恒定应变速率, 试样的疲劳寿命定义为峰值拉应力下降 25% 所对应的疲劳周次。具体的试验方案如表 2 所示。

表 2 不同应变幅值下 316L 母材、焊材、焊接接头等温低周疲劳试验方案

Table 2 Isothermal low-cycle fatigue test scheme for 316L base material, welded metal and welded joint under different strain amplitudes

试样编号	温度/℃	应变幅值/%	周期/s
BMIF04550	550	±0.4	80
BMIF05550	550	±0.5	100
BMIF06550	550	±0.6	120
BMIF08550	550	±0.8	160
WJIF04550	550	±0.4	80
WJIF05550	550	±0.5	100
WJIF06550	550	±0.6	120
WJIF08550	550	±0.8	160
WMIF04550	550	±0.4	80
WMIF05550	550	±0.5	100
WMIF06550	550	±0.6	120
WMIF08550	550	±0.8	160

2 结果与讨论

2.1 宏观力学行为

2.1.1 循环峰值应力

316L 母材、焊材、焊接接头在不同应变幅值下的等温低周疲劳循环峰值应力响应曲线如图 2 所示, 三者的峰值应力均在初期快速增加, 然后进入循环稳定状态, 随后峰值应力快速下降并失效, 在稳定阶段, 所有材料的峰值应力均随着应变幅值的增大而增大。图 3 分别描述了这三种试样不同应变幅值下的硬化持续周次、硬化量 (第 1 周与硬化结束周次峰值应力的比值)、软化速率。从图 3 可以看出, 焊材与焊接接头的硬化持续周次相近, 而母材硬化持续周次明显高于焊材及焊接接头。随着应变幅值的增加, 母材硬化持续周次持续减小, 而焊材与焊接接头无明显变化, 如图 3(a) 所示。随着应变幅值的增大, 三者的硬化量均表现出逐渐增大的趋势, 表明这三种试样的硬化程度与应变幅值有关。在每个应变幅值下, 硬化量从大到小的排序依次为母材、焊接接头、焊材, 如图 3(b) 所示。母材与焊材在循环软化阶段的软化速率均表现出随着应变幅值的增大逐渐增大的趋势, 而焊接接头在 0.6% 应变幅值后软化速率显著降低, 产生这种现象主要是由于焊接接头在 0.6% 应变幅值后出现了二次硬化现象, 如图 3(c) 所示, 二次硬化是由位错的锁定造成的^[20], 因此可以推断在此应变幅值下硬化持续发生并阻碍了材料的软化。

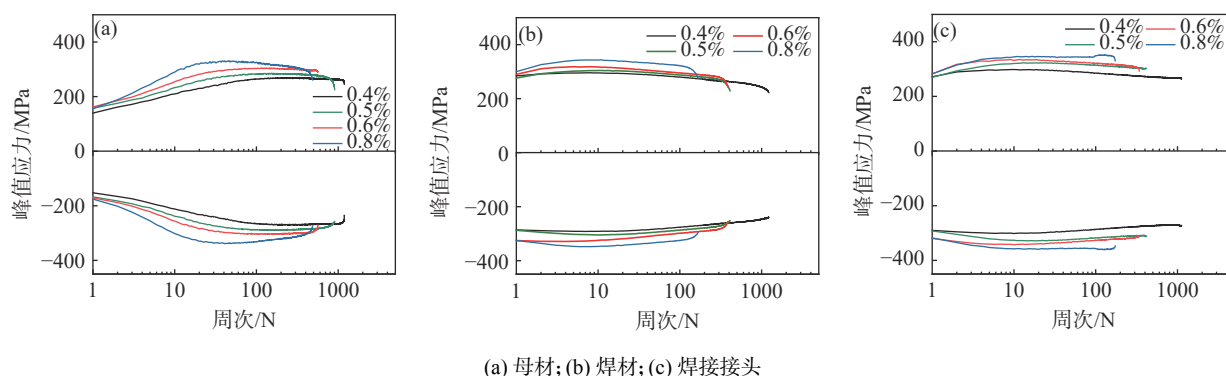


图2 不同应变幅值下的循环峰值应力响应曲线

Fig. 2 Cyclic peak stress response curves under various strain amplitudes

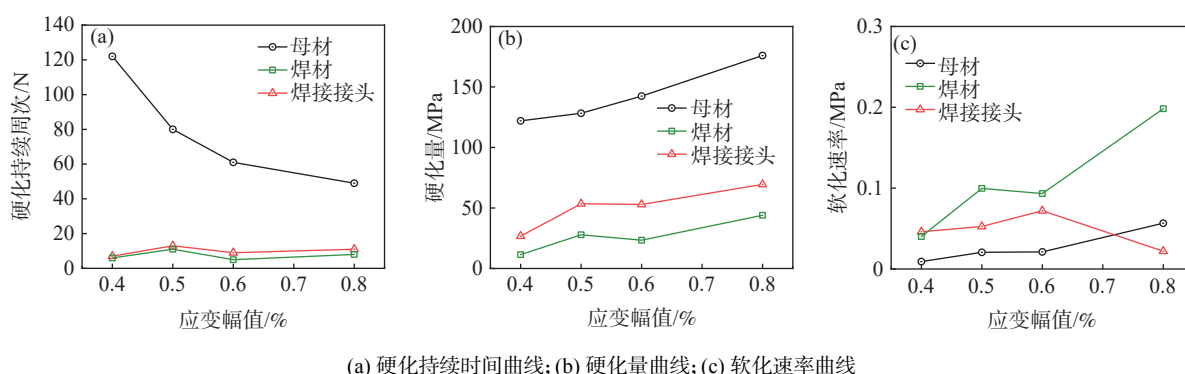


图3 三种材料的硬化与软化趋势

Fig. 3 Evolution of hardening and softening of the three materials

2.1.2 应力应变滞回曲线

图4描述了不同应变幅值下316L母材、焊材、焊接接头半寿命周期的滞回曲线,滞回曲线与横轴交点之间的距离表示半寿命周期的非弹性应变,滞回曲线的面积表示非弹性应变能密度,三者的非弹性应变

与非弹性应变能密度均随着应变幅值的增大而增大。同一应变幅值下不同材料的非弹性应变较为接近,通过对比迟滞环的面积可以发现,在0.4%应变幅值下,母材的非弹性应变能密度最大,而在其他更高应变幅值下焊接接头的非弹性应变能密度最高。

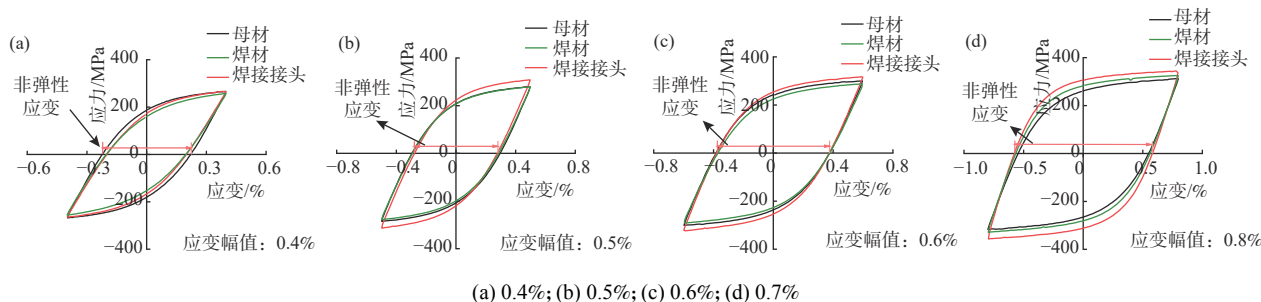


图4 不同材料半寿命周期的循环应力-应变曲线

Fig. 4 Cyclic stress-strain curves at half-life cycle of different materials

2.1.3 非弹性应变与非弹性应变能密度

图5描述了316L母材、焊材、焊接接头在不同应变幅值下的非弹性应变曲线,其中焊材与焊接接头的非弹性应变范围趋势相似,大小相近,即在初期降低后趋向平稳,在稳定软化阶段,非弹性应变没有显著增加。而母材在所有应变幅值下均表现出非弹性应变范围的持续降低,在稳定软化阶段,母材的

非弹性应变降低的速率减缓,并且在所有应变幅值下母材的非弹性应变范围大小在初期明显高于焊材与焊接接头,在中后期则与焊材和焊接接头相近。

图6描述了不同应变幅值下316L母材、焊材、焊接接头非弹性应变能密度变化曲线,三者的非弹性应变能密度均随着应变幅值的增大而增大,其中焊材、焊接接头在不同应变幅值下非弹性应变能密

度变化曲线趋势相似, 总体趋势平稳, 而母材在 0.8% 应变幅值下表现出与其余应变幅值下明显不

同的变化趋势, 在 0.8% 应变幅值下, 母材的非弹性应变能密度曲线波动较大。

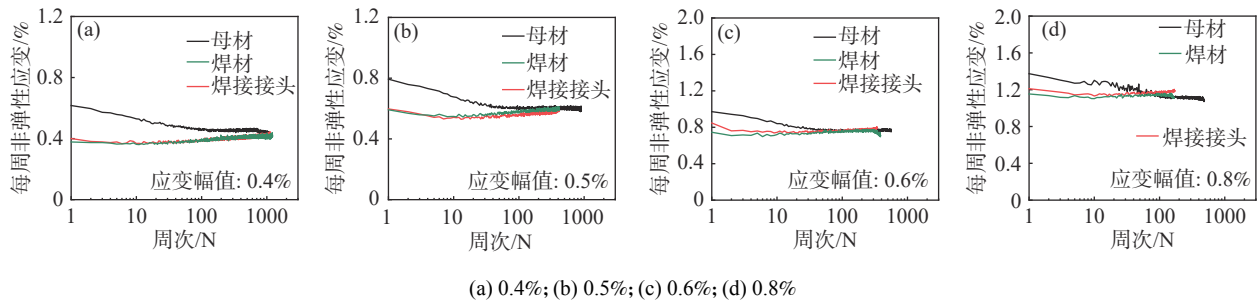


图 5 不同应变幅值下不同材料非弹性应变变化规律

Fig. 5 Variation of the inelastic strain of different materials under different strain amplitudes

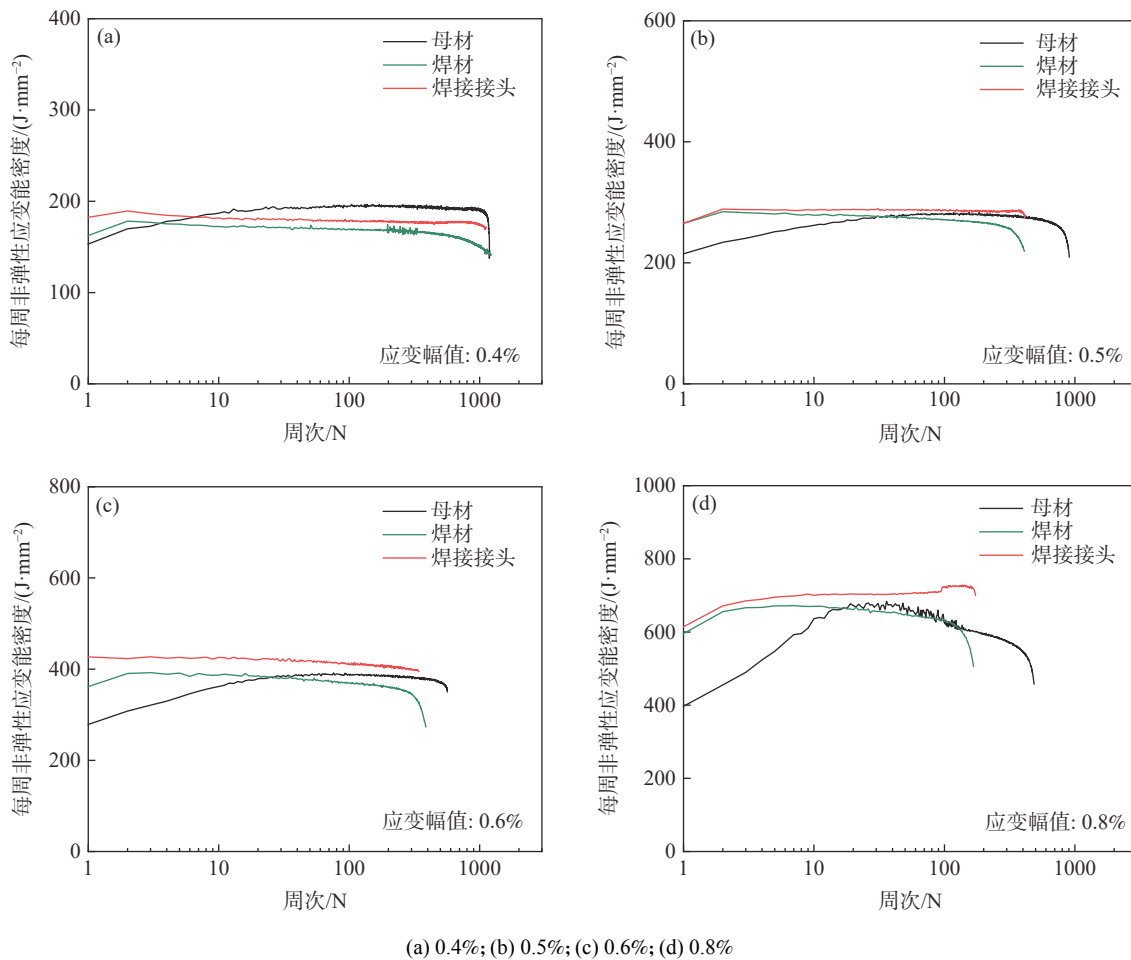


图 6 不同应变幅值下不同材料非弹性应变能密度变化规律

Fig. 6 Variation of the inelastic strain energy density of different materials under different strain amplitudes

在所有应变幅值下, 初始阶段 (前两周) 的焊接接头非弹性应变能密度最大, 焊材次之, 母材最小。另外, 随着循环周次的增加, 所有应变幅值下母材的非弹性应变能密度逐渐增大并超过焊材, 而在应变幅值为 0.4% 下, 母材的非弹性应变能密度明显高于焊接接头。在其他较高应变幅值下, 焊接接头的

非弹性应变能密度最大。

2.1.4 疲劳寿命演化规律

316L 母材、焊材、焊接接头在 550 °C 不同应变幅值下的低周疲劳寿命散点图及拟合曲线如图 7(a) 所示, 可以看出三者的疲劳寿命都随着应变幅值的增加显著降低。前文研究发现三者的非弹性

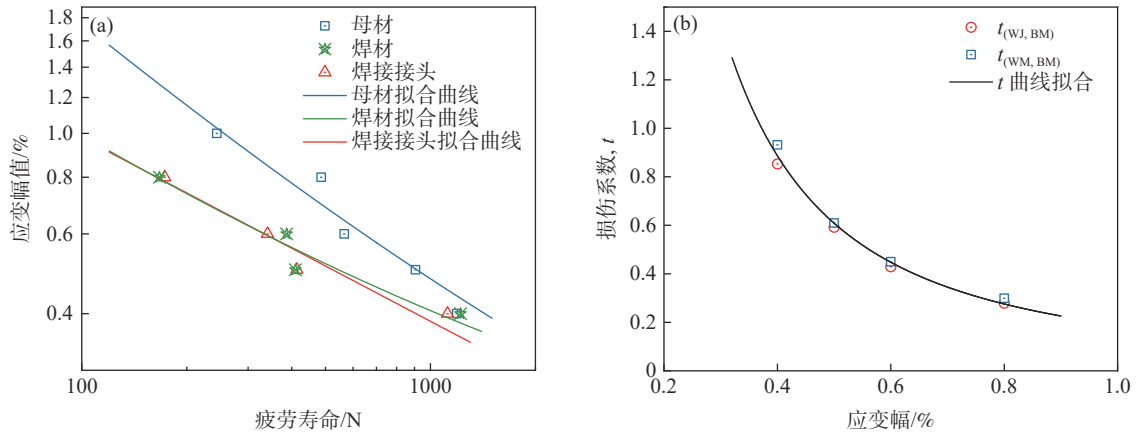
应变范围、非弹性应变能密度均随着应变幅值的增加而增加(图5,6),与此同时,母材疲劳寿命明显高于焊材及焊接接头,焊材与焊接接头的疲劳寿命相近,而焊材与焊接接头在相同应变幅值下的非弹性应变范围、非弹性应变能密度也表现出类似的趋势,因此可以推断非弹性应变范围、非弹性应变能密度对疲劳寿命有显著影响。而在实际工程应用中,提取焊接接头以及焊材进行试验难度较大, Mohyla 等人^[21]提出焊接对材料高温蠕变性能的影响可以用焊接减损系数来表示,焊接减损系数可以表示为焊接接头强度与母材强度的比值。考虑到材料的疲劳损伤与应变幅值相关,不同应变幅值下不同材料的寿命行为存在一定规律,因此引入疲劳寿命减损系数 t (焊接接头/焊材疲劳寿命与母材疲劳寿命的比值),用来表示焊接接头、焊材相对于母材的疲劳寿命减损程度。疲劳寿命减损系数表达式如式(1)(2)所示。

$$t_{(WJ,BM)} = \frac{N_{WJ}}{N_{BM}} \quad (1)$$

$$t_{(WM,BM)} = \frac{N_{WM}}{N_{BM}} \quad (2)$$

其中, N_{WJ} 、 N_{WM} 、 N_{BM} 分别为焊接接头、焊材和母材的疲劳寿命, $t_{(WJ,BM)}$ 与 $t_{(WM,BM)}$ 分别为焊接接头相对于母材和焊材相对于母材的疲劳寿命减损系数。由于不同应变幅值下 316L 焊接接头与焊材的低周疲劳寿命相近,且拟合曲线基本重合,如图7(a)所以,因此 $t_{(WJ,BM)}$ 与 $t_{(WM,BM)}$ 大小相近并采用同一函数进行拟合。绘制不同应变幅值下的两组减损系数散点图如图7(b)所示,发现在所有应变幅值下, $t_{(WJ,BM)}$ 与 $t_{(WM,BM)}$ 大小基本重合,且整体趋势表现为随着应变幅值的增大而减小,即寿命减损程度随着应变幅值的增大而增大。采用同一函数对 $t_{(WJ,BM)}$ 与 $t_{(WM,BM)}$ 进行曲线拟合,得到式(3)。减损系数为 316L 母材、焊材、焊接接头疲劳寿命建立了联系。

$$t = 0.1892\varepsilon^{-1.686} \quad (3)$$



(a) 不同应变幅值下的低周疲劳寿命及拟合曲线; (b) 疲劳寿命减损系数曲线

图7 母材、焊材、焊接接头在不同应变幅值下的疲劳寿命

Fig. 7 Fatigue life of three materials under different strain amplitudes

2.2 低周疲劳寿命预测

2.2.1 Manson-Coffin 寿命预测模型

从以上试验结果可知,母材、焊材和焊接接头试样的疲劳变形行为有很大区别,而引入疲劳寿命减损系数后可对其疲劳寿命演化进行统一描述。因此进一步采用不同寿命预测模型对等效处理后的疲劳寿命进行预测,以验证该方法在寿命预测中的适用性。

Manson-Coffin 寿命预测模型适用于非弹性变形占疲劳损伤主导作用的低周疲劳寿命预测,最早被 Manson 和 Coffin 提出^[22],并一直受到广泛使用,

其形式可表示为式(4)。

$$\frac{\Delta\varepsilon_{in}}{2} = \varepsilon'(2N_f)^m \quad (4)$$

其中, $\Delta\varepsilon_{in}$ 为稳定循环阶段的非弹性应变幅值; ε' 为疲劳粘性系数; m 为延性指数; N_f 为疲劳寿命。对母材、焊材和焊接接头等效处理后的低周疲劳寿命曲线拟合得到式(4)中的未知参量, $\varepsilon' = 5.43$, $m = -0.5176$, 得到表达式(5)。

$$\frac{\Delta\varepsilon_{in}}{2} = 5.53(2N_f)^{-0.5176} \quad (5)$$

图8给出了 316L 母材、焊材、焊接接头基于 Manson-Coffin 寿命预测模型不同应变幅值下等温

低周疲劳预测值与试验值的比较结果。从图 8 可以看出, 所有预测结果都处于 1.5 倍误差带内, 预测效果较好, 说明非弹性变形对 316L 母材、焊材、焊接接头低周疲劳寿命有显著影响, 通过引入寿命减损系数后, Manson-Coffin 寿命预测模型对 316L 焊接接头三种材料试样的等温低周疲劳寿命预测效果较好。

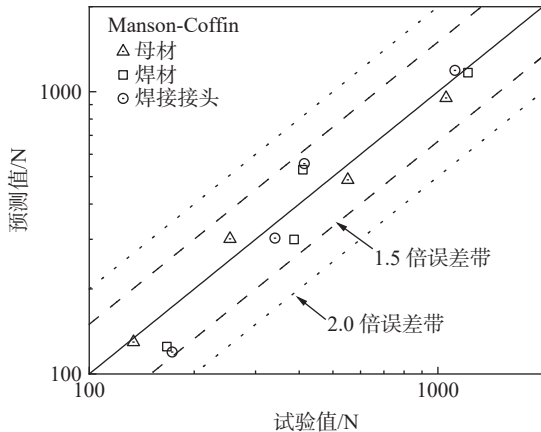


图 8 基于 Manson-Coffin 寿命预测模型的低周疲劳寿命预测值与试验值的比较

Fig. 8 Comparison of predicted and experimental values of fatigue life based on the Manson-Coffin model

2.2.2 能量法寿命预测模型

能量法寿命预测模型是常用的寿命预测方法之一, 该模型采用非弹性应变能密度来表征低周疲劳的损伤, 从而预测低周疲劳寿命^[23]。能量法寿命预测模型的表达式如式(6)所示。

$$A(\Delta W_p)^B = N_f \quad (6)$$

其中, ΔW_p 是半寿命时的非弹性应变能密度, 即半寿命时循环应力-应变曲线的面积; N_f 是疲劳寿命; A 和 B 是材料常数。对母材、焊材和焊接接头等效处理后的低周疲劳寿命曲线拟合得到式(6)中的未知参量, $A=5.45 \times 10^6$, $B=-1.65$ 。得到表达式(7)。

$$5.45 \times 10^6 (\Delta W_p)^{-1.65} = N_f \quad (7)$$

图 9 给出了 316L 母材、焊材、焊接接头基于能量法寿命预测模型不同应变幅值下等温低周疲劳预测值与试验值的比较结果。从图 9 可以看出, 所有预测结果都处于 2 倍误差带内, 其中有一点落于 1.5 倍误差带与 2 倍误差带之间, 其余所有点都在 1.5 倍误差带以内, 预测效果较好, 说明塑性应变能对 316L 母材、焊材、焊接接头低周疲劳寿命也有明显影响, 通过引入寿命减损系数后, 能量法寿命预测模型对 316L 焊接接头三种试样的等温低周疲劳寿命的预测效果较好。

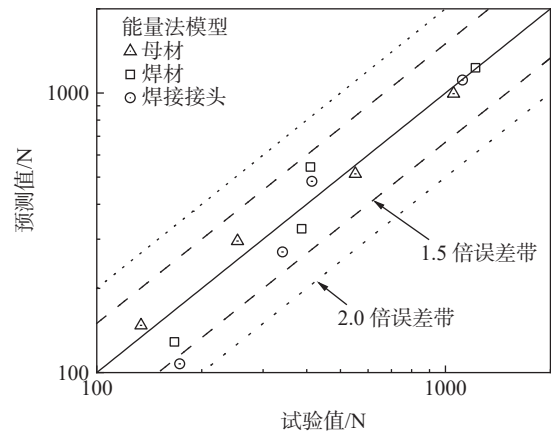


图 9 基于能量法的等温疲劳寿命预测值与试验值的比较

Fig. 9 Comparison of predicted and measured values of fatigue life based on energy method

2.2.3 广义应变能损伤函数法 (GSEDF)

朱顺鹏等人^[24-25]对引起材料损伤的非弹性拉伸应变能的函数表达方式进行了研究, 提出了广义应变能损伤函数法 (GSEDF), 该模型主要考虑了蠕变疲劳交互作用损伤机制。由于压缩非弹性应变能密度也可引起材料的损伤, Wang 等人^[26]将 GSEDF 模型中的非弹性拉伸应变能用非弹性应变能密度替代, 表达式如式(8)所示。

$$N_f = C(\Delta \epsilon_{in}(W_p)^\beta)^m \quad (8)$$

其中, W_p 为稳定循环周次的非弹性应变能密度; $\Delta \epsilon_{in}$ 为稳定循环周次的非弹性应变; C , β , m 分别为材料常数。对母材、焊材和焊接接头等效处理后的低周疲劳寿命曲线拟合得到式(8)中的未知参量, $C=6.67 \times 10^5$, $\beta=5.82$, $m=-0.23$, 得到表达式(9)。

$$N_f = 6.67 \times 10^5 (\Delta \epsilon_{in}(W_p)^{5.82})^{-0.23} \quad (9)$$

图 10 描述了 316L 母材、焊材、焊接接头基于广义应变能损伤函数法寿命预测模型不同应变幅值下等温低周疲劳预测值与试验值的比较结果。从图 10 可以看出, 所有预测结果都处于 1.5 倍误差带内, 预测效果很好。该模型综合考虑了非弹性应变以及非弹性应变能密度对 316L 母材、焊材、焊接接头低周疲劳寿命的影响, 通过引入寿命减损系数后, 广义应变能损伤函数法对 316L 焊接接头三种试样的等温低周疲劳寿命的预测效果很好。

2.2.4 断裂能预测法 (FE)

Nagae 研究了断裂能对材料蠕变疲劳寿命的影响, 并提出了断裂能预测法^[27-28]。Nagae 认为断裂能的变化由非弹性应变能密度和一个循环周期的时间的幂律函数描述。因此, 断裂能预测法可用式

(10)表示。

$$N_f = A t_{\text{cycle}}^{n-1} W_p^{-n} \quad (10)$$

其中, W_p 为半寿命时的非弹性应变能密度, t_{cycle} 为一个循环周期的时间, A, n 为材料常数。对母材、焊材和焊接接头等效处理后的低周疲劳寿命曲线拟合得到式(10)中的未知参量, $A=4.76 \times 10^5$, $n=2.2$, 得到的表达式如式(11)所示。

$$N_f = 4.76 \times 10^5 t_{\text{cycle}}^{1.22} W_p^{-2.22} \quad (11)$$

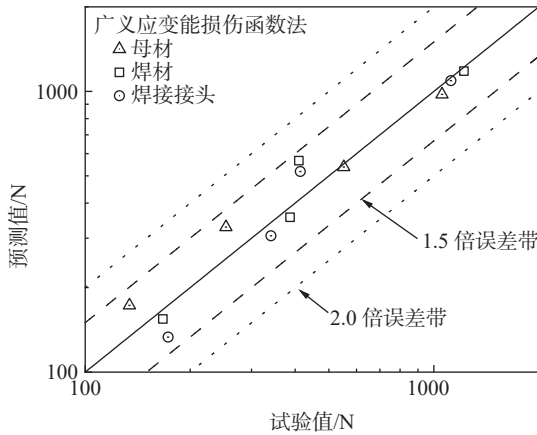


图 10 基于广义应变能损伤函数法的寿命预测结果与试验值的比较

Fig. 10 Comparison of predicted and measured values of fatigue life based on GSEDF

图 11 描述了 316L 母材、焊材、焊接接头基于断裂能预测法寿命预测模型不同应变幅值下等温低周疲劳预测值与试验值的比较结果。从图 11 可以看出,除了有一点略微超出 1.5 倍误差,其余点都处于 1.5 倍误差带内,预测效果较好。该模型综合考虑了非弹性应变能密度以及每周循环时间对 316L 母材、焊材、焊接接头低周疲劳寿命的影响,通过引入寿命减损系数后,断裂能预测法对 316L 焊接接头三种试样的等温低周疲劳寿命的预测效果较好。

2.2.5 Ostergern 损伤函数模型

Ostergern 损伤函数模型由 Ostergern 提出,该模型认为疲劳加载下疲劳裂纹的萌生与扩展归因于拉伸应力的影响,而压缩应力对材料疲劳寿命的影响较小,因此 Ostergern 认为采用净拉伸滞后能可以更好地评估疲劳损伤^[29]。Ostergern 损伤函数模型的表达式如式(12)所示。

$$N_f = C(\sigma_{\max} \Delta \varepsilon_p)^\beta \quad (12)$$

其中, $\sigma_{\max}$ 为半寿命时的最大拉伸应力; $\Delta \varepsilon_p$ 为半寿

命时的非弹性应变范围; C, β 为材料常数。对母材、焊材和焊接接头等效处理后的低周疲劳寿命曲线拟合得到式(12)中的未知参量, $C=3.44 \times 10^9$, $\beta=-1.39$ 。得到表达式(13)。

$$N_f = 3.44 \times 10^9 (\sigma_{\max} \Delta \varepsilon_p)^{-1.39} \quad (13)$$

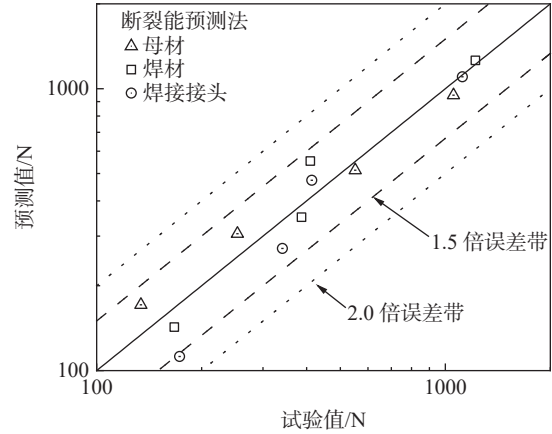


图 11 基于断裂能预测法的寿命预测结果与试验值的比较
Fig. 11 Comparison of predicted and measured values of fatigue life based on FE

图 12 描述了 316L 母材、焊材、焊接接头基于断裂能预测法寿命预测模型不同应变幅值下等温低周疲劳预测值与试验值的比较结果。从图 12 可以看出,全部预测值均处于 2 倍误差带以内,预测效果较好。该模型考虑了净拉伸滞后能对 316L 母材、焊材、焊接接头低周疲劳寿命的影响,通过引入寿命减损系数后, Ostergern 损伤函数模型也能实现对 316L 焊接接头三种材料试样的等温低周疲劳寿命的预测。

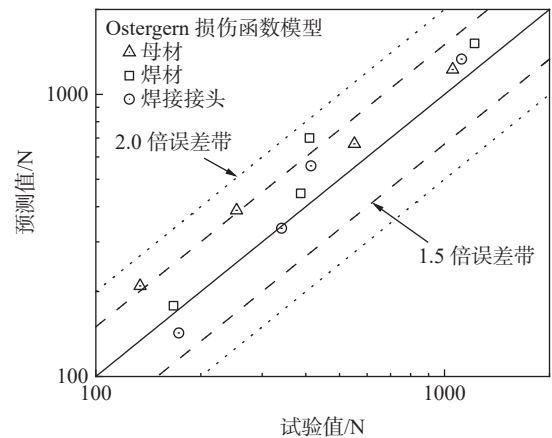


图 12 基于 Ostergern 损伤函数模型的寿命预测结果与试验值的比较

Fig. 12 Comparison of predicted and measured values of fatigue life based on Ostergern damage function model

为了对上述五种寿命预测模型的预测效果进行评价,采用统计学中的相对平均误差 (MRE) 对其寿命预测结果进行定量分析,以对比不同寿命预测模型的优劣。平均误差的数学表达式如式(14)所示。

$$\text{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{N_e - N_p}{N_e} \right| \times 100\% \quad (14)$$

其中, N_e 是试验得到的寿命, N_p 是寿命预测模型计算得到的寿命。统计结果如图 13 所示。

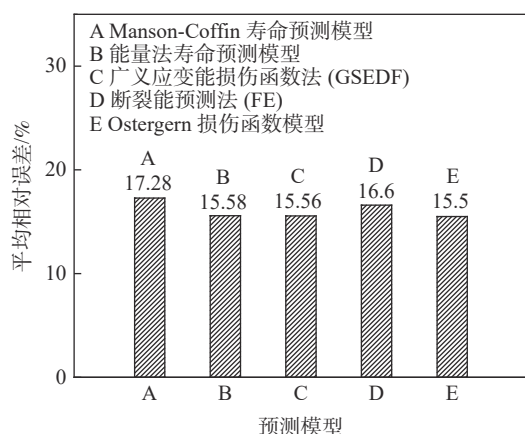


图 13 五种寿命预测模型的寿命预测结果平均相对误差的对比

Fig. 13 Comparison of the mean relative error of life prediction results from five life prediction models

根据统计结果可以看出,五种寿命预测模型预测结果的平均相对误差均低于 20%,其中 Manson-Coffin 寿命预测模型和传统能量法寿命预测模型分别考虑了非弹性应变与非弹性应变能密度对疲劳寿命的影响,其中 Manson-Coffin 寿命预测值均位于 1.5 倍误差带内,传统能量法寿命预测值有一点落于 1.5 倍误差带外,然而对比二者的平均相对误差,发现传统能量法的平均相对误差明显低于 Manson-Coffin 寿命预测模型。广义应变能损伤函数法综合考虑了非弹性应变能密度以及非弹性应变对材料疲

劳寿命的影响,预测值的相对平均误差略低于传统能量法,且寿命预测值均处于 1.5 倍误差带内,预测效果很好,表明非弹性应变以及非弹性应变能密度对疲劳寿命产生了显著影响。而断裂能预测法的平均误差在五个模型中属于较高水平,且寿命预测值有一点落于 1.5 倍误差带外。Ostergerg 损伤函数模型的平均误差虽然在五个模型中最低,但是预测值有 3 点位于 1.5 倍误差带外。综上所述,通过在传统寿命预测模型中引入疲劳寿命减损系数,均可以实现焊接接头三种材料试样的等温低周疲劳寿命的预测,而广义应变能损伤函数法在五个模型中表现出最强的适用性。

3 结论

1) 母材硬化持续周次较长,焊材与焊接接头的硬化持续周次相对较短。随着应变幅值的增加,母材硬化持续周次持续减小,而焊材与焊接接头无明显变化,与此同时,三者的硬化量均表现出逐渐增大的趋势。

2) 母材、焊材、焊接接头的非弹性应变与非弹性应变能密度均随着应变幅值增大而增大,焊材与焊接接头在相同应变幅值下的非弹性应变范围、非弹性应变能密度表现出相似的趋势。随着应变幅值的增加,三者的疲劳寿命均显著降低,其中母材疲劳寿命明显高于焊材及焊接接头,而焊材与焊接接头的疲劳寿命相近。

3) 采用减损系数对不同材料的低周疲劳寿命进行等效处理,并选用多种寿命预测模型对母材、焊材、焊接接头的等温疲劳寿命进行预测,均可实现焊接接头三种材料试样的等温低周疲劳寿命预测,其中广义应变能损伤函数法在五个模型中表现出最强的适用性。

参考文献

- [1] Stamford L, Azapagic A. Sustainability indicators for the assessment of nuclear power[J]. Energy, 2011, 36(10): 6037-6057.
- [2] Zhu Zhiqian, Chen Qian. Opportunities and risks confronted by the development of China's nuclear power industry and the countermeasures[J]. Journal of East China University of Technology(Social Science), 2017, 36(4): 318-321.
(朱志权, 陈倩. 我国核电产业发展面临的机遇、风险及其对策 [J]. 东华理工大学学报(社会科学版), 2017, 36(4): 318-321.)
- [3] Fan Y, Liu T G, Xin L, et al. Thermal aging behaviors of duplex stainless steels used in nuclear power plant: A review[J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 544: 152693.
- [4] Zinkle S J, Was G S. Materials challenges in nuclear energy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 735-758.
- [5] Luo Jiong. Influence of environment on fracture toughness and fracture behavior of nuclear safe-end dissimilar metal welded joint[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
(罗炯. 环境对核电接管安全端接头断裂行为及断裂韧性影响 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.)
- [6] Li Yifei, Cai Zhipeng, Tang Zhinan, et al. Weak zone shift in welded joints for low cycle fatigue[J]. Journal of Tsinghua

- University(Science and Technology), 2015, 55(10): 1056-1060, 1066.
(李轶非, 蔡志鹏, 汤之南, 等. 焊接接头低周疲劳性能薄弱区转移 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2015, 55(10): 1056-1060, 1066.)
- [7] Veerababu J, Goyal S, Sandhya R, *et al.* Low cycle fatigue behaviour of grade 92 steel weld joints[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 105: 60-70.
- [8] Veerababu J, Goyal S, Nagesha A. Studies on creep-fatigue interaction behavior of grade 92 steel and its weld joints[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 149: 106307.
- [9] Farragher T P, Scully S, O'Dowd N P, *et al.* High temperature, low cycle fatigue characterization of P91 weld and heat affected zone material[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2014, 136(2): 021403.
- [10] Li Haizhou, Chen Jintao, Chen Hui, *et al.* Cyclic plastic deformation mechanism and cyclic hardening model of sanicro 25 steel welded joint[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 827: 141878.
- [11] Rao K B S, Valsan M, Mannan S L. Strain-controlled low-cycle fatigue behavior of type-304 stainless-steel base material, type-308 stainless-steel weld metal and 304-308 stainless-steel weldments[J]. Materials Science & Engineering A, 1990, 130(1): 67-82.
- [12] Rao K B S, Sandhya R, Mannan S L. Creep-fatigue interaction behavior of type-308 stainless-steel weld metal and type-304 stainless-steel base-metal[J]. International Journal of Fatigue, 1993, 15(3): 221-229.
- [13] Brinkman C, Korth G. Heat-to-heat variations in the fatigue and creep-fatigue behavior of AISI type 304 stainless steel at 593 °C [J]. Journal of Nuclear Materials, 1973, 48(3): 293-306.
- [14] Brinkman C, Koth G, Beeston J. Comparison of the strain-controlled low cycle fatigue behavior of stainless type 304/308 weld and base material[R]. Idaho Falls, ID, Aerojet Nuclear Co. , 1975.
- [15] Rao K B S, Valsan M, Sandhya R, *et al.* Influence of weld discontinuities on strain controlled fatigue behavior of 308 stainless-steel weld metal[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 1994, 116(2): 193-199.
- [16] Zhang Yingying, Zhang Xinning, Shi Yu. Microstructure and fracture behavior of 316L stainless steel welded joints under high temperature low cycle[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37(3): 501-504.
(张莹莹, 张新宁, 师瑀. 316L 不锈钢焊接接头高温低周期疲劳显微结构变化和断裂特征 [J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(3): 501-504.)
- [17] Li Mingna, Liu Feng. Effect of tensile dwell on low cycle fatigue cyclic stress response and damage mechanism of 316L austenitic stainless steel welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(9): 87-91, 95.
(李明娜, 刘峰. 拉保持对 316L 奥氏体不锈钢焊接接头低周疲劳循环应力响应及损伤机制的影响 [J]. 焊接学报, 2014, 35(9): 87-91, 95.)
- [18] Li Mingna, Liu Feng, Yu Hongmiao. Effect of post weld heat treatment on δ -ferrite structure and properties of 308L weldment stainless steel[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(9): 9-11.
(李明娜, 刘峰, 于洪淼. 焊后热处理对 308L 不锈钢焊缝 δ -铁素体形态及性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(9): 9-11.)
- [19] Kumar T S, Nagesha A, Kumar J G, *et al.* Influence of thermal aging on tensile and low cycle fatigue behavior of type 316LN austenitic stainless steel weld joint[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49a(8): 3257-3273.
- [20] Pham M S, Holdsworth S R. Dynamic strain ageing of AISI 316L during cyclic loading at 300 degrees C: Mechanism, evolution, and its effects[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556: 122-133.
- [21] Mohyla, Kubon P, Cep Z, *et al.* Evaluation of creep properties of steel P92 and its welded joint[J]. Metalurgija, 2014, 53(2): 175-178.
- [22] Coffin L. Predictive parameters and their application to high-temperature, low-cycle fatigue[J]. Fracture London Chapman & Hall, 1969: 643-654.
- [23] Wen Jianbin, Zhou Changyu, Li Xin, *et al.* Effect of temperature range on thermal-mechanical fatigue properties of P92 steel and fatigue life prediction with a new cyclic softening model[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105226.
- [24] Zhu Shunpeng, Huang Hongzhong, He Liping, *et al.* Improved generalized strain energy damage function method for high temperature low cycle fatigue-creep[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(8): 1445-1452.
(朱顺鹏, 黄洪钟, 何俐萍, 等. 高温低周疲劳-蠕变的改进型广义应变能损伤函数方法 [J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1445-1452.)
- [25] Zhu S P, Huang H Z. A generalized frequency separation-strain energy damage function model for low cycle fatigue-creep life prediction[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33(4): 227-237.
- [26] Wang Xiaowei, Zhang Wei, Zhang Tianyu, *et al.* A new empirical life prediction model for 9%–12% Cr steels under low cycle fatigue and creep fatigue interaction loadings[J]. Metals, 2019, 9(2): 183.
- [27] Nagae Y. Evaluation of creep-fatigue life based on fracture energy for modified 9Cr-1Mo steel[J]. Materials Science & Engineering A: Structural Materials Properties Microstructure & Processing, 2013, 560: 752-758.
- [28] Nagae Y, Takaya S, Asayama T. Creep-fatigue evaluation by hysteresis energy in modified 9Cr-1Mo steel[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2009, 3(3): 449-456.
- [29] Yin Peng, Zhang Wei, Guo Shen, *et al.* Thermomechanical fatigue behaviour and damage mechanisms in a 9% Cr steel: Effect of strain rate[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 815: 141308.