

# EH36 钢焊接接头焊趾处应力集中对高低周复合疲劳的影响

徐连勇<sup>1,2</sup>, 龙志平<sup>1,2</sup>, 赵雷<sup>1,2</sup>, 韩永典<sup>1,2</sup>, 彭晨涛<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津, 300350; 2. 天津大学 天津市现代连接技术重点实验室, 天津, 300350)

**摘要:** 为研究船舶结构用钢 EH36 钢焊接接头焊趾处应力集中对高低周复合疲劳的影响, 对不同焊缝形貌 20 mm 厚 EH36 钢双面全熔透对接接头进行高低周复合疲劳试验. 研究发现, 高低周复合疲劳对接头寿命的降低幅度随着高周应力比的增大而增大; 结合数字图像相关法测量结果分析, 发现焊趾处应力集中系数越大, 接头的高低周复合疲劳寿命越低, 其降低幅度随着高周应力比的增大而增大. 基于试验数据对模型进行验证, 结果表明, 应力集中系数高的接头疲劳寿命低且寿命预测结果分散性增大; Palmgren-Miner 模型和 Zhu 模型由于未充分考虑高低周耦合损伤作用, 导致寿命预测结果相对危险. 修正后 Zhu 模型在充分考虑低周疲劳对高低周复合疲劳寿命的影响后, 预测寿命大于实际寿命的预测点较少, 预测结果相对安全, 且分散性较小, 误差也较小.

**创新点:** (1) 结合数字图像相关法分析了 EH36 钢焊接接头焊趾处应力集中对高低周复合疲劳的影响.  
(2) 获得了 EH36 钢焊接接头的高低周复合疲劳规律.  
(3) 获得了适用于船舶结构用钢 EH36 钢焊接接头的高低周复合疲劳寿命预测模型.

**关键词:** 高低周复合疲劳;  $S-N$  曲线; 应力集中; 疲劳寿命预测; 数字图像相关法

**中图分类号:** TG 404; TG 405 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230619003

## Effect of stress concentration at weld toes on combined high and low cycle fatigue of EH36 steel welded joints

XU Lianyong<sup>1,2</sup>, LONG Zhiping<sup>1,2</sup>, ZHAO Lei<sup>1,2</sup>, HAN Yongdian<sup>1,2</sup>, PENG Chentao<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of advance joining technology, Tianjin University, Tianjin, 300350, China)

**Abstract:** In order to study the effect of stress concentration at the weld toes on combined high and low cycle fatigue (CCF) of EH36 steel welded joints for ship structure, CCF tests were carried out on EH36 steel double-sided butt joints with 20 mm thick and different weld profiles. The results show the extent of reduction in joint life subjected to CCF increased with increasing high stress ratio of high cycle fatigue; Based on the digital image correlation method, the higher the stress concentration coefficient at the weld toes, the lower the CCF life of the joints. The extent of reduction increased with increasing stress ratio of high cycle fatigue. Validation of the models based on experimental data shows that joints with high stress concentration coefficient have lower fatigue life and increased dispersion of life prediction results; The Palmgren-Miner model and Zhu model do not fully consider the CCF damage effect, which leads to dangerous prediction results of CCF life. The modified Zhu model fully considers the influence of CCF. There are few prediction data points that the predicted life is higher than the actual life. The prediction results are relatively safer. The dispersion and the error are smaller.

**Highlights:** (1) Combined with the digital image correlation method, the effect of stress concentration at weld toes on combined high and low cycle fatigue of EH36 steel welded joints was analyzed.

(2) The combined high and low cycle fatigue law of EH36 steel welded joints was obtained.

(3) The combined high and low cycle fatigue life prediction model which is suitable for EH36 steel welded joints for ship structure was obtained.

**Key words:** combined high and low cycle fatigue;  $S-N$  curve; stress concentration; fatigue life prediction; digital image correlation method

## 0 序言

EH36 钢为船舶结构用钢, 主要应用于大型焊接海洋平台结构<sup>[1-2]</sup>. EH36 钢焊接接头在服役过程中承受周期性波浪载荷引起的高周疲劳 (high cycle fatigue, HCF) 载荷与装卸载引起的低周疲劳 (low cycle fatigue, LCF) 载荷的共同作用<sup>[3-4]</sup>, 易发生高低周复合疲劳 (combined high and low cycle fatigue, CCF) 破坏. 尤其焊趾处由于焊缝几何不连续性产生的应力集中会加速高低周疲劳失效<sup>[5-6]</sup>. 焊接接头作为疲劳断裂的关键部位, 焊缝倾角、板厚、余高、焊缝宽度和焊趾过渡圆弧半径的作用将导致焊趾处应力集中<sup>[7-11]</sup>. Tsutsumi 等人<sup>[12]</sup>通过试验和模拟分析研究, 发现焊趾处应力集中会导致焊接接头疲劳寿命降低. 因此, 应充分重视焊趾对焊接接头高低周疲劳规律的影响及相应的寿命预测和评估.

高低周复合疲劳寿命预测主要采用高周和低周寿命线性叠加模型. 然而, Gan 等人<sup>[13]</sup>通过对船体结构典型焊接接头疲劳寿命研究, 发现高低周耦合损伤对疲劳寿命的降低有显著影响. Qiu 等人<sup>[14]</sup>通过高低周应力幅比阈值研究了高低周复合疲劳对寿命的影响, 发现高低周耦合损伤加速试样疲劳失效. Zhao 等人<sup>[15]</sup>对 TC11 钛合金试件高低周复合疲劳试验, 发现高周疲劳的平均应力水平和应力比对高低周复合寿命有较大的影响, 非线性累积损伤准则的预测效果优于线性累积损伤准则.

目前对于船舶领域钢材焊接结构的高低周复合疲劳的研究较少, 且尚未阐明焊缝几何不连续性引起的焊趾处应力集中对高低周复合疲劳寿命的影响. 因此以船舶结构钢为研究材料, 对不同焊缝形貌的焊接接头进行高低周复合疲劳试验, 研究焊接结构的高低周复合疲劳性能和寿命预测方法具有重大意义.

## 1 试验方法

试验材料为船舶结构钢 EH36 钢, 其力学性能

见表 1. 选取 20 mm 厚双面全熔透对接焊缝为研究节点<sup>[16]</sup>, 载荷方向垂直于焊缝. 根据 ASTM E466-15<sup>[17]</sup> 的标准要求取样, 试样形状尺寸如图 1 所示, 采用 GMAW 打底加 SAW 填充、盖面的焊接工艺分别制备了 Type-1、Type-2 两种类型焊缝形貌的焊接接头, 如图 2a、2c 所示. GMAW 和 SAW 关键焊接工艺参数见表 2.

表 1 EH36 钢力学性能  
Table 1 Mechanical properties of EH36 steel

牌号	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断后伸长率 $A(\%)$
EH36	$\geq 355$	490 ~ 630	21

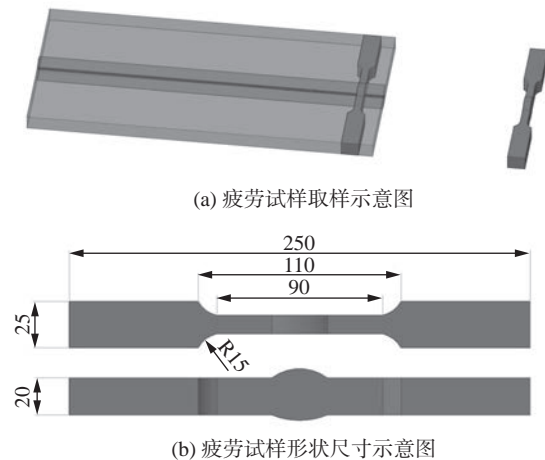


图 1 疲劳试样取样以及形状尺寸示意图 (mm)

Fig. 1 Sampling, size and form of the fatigue specimens (mm). (a) sampling of the fatigue specimens; (b) size and form of the fatigue specimens

疲劳试验分为高低周复合疲劳试验和不同应力比下的常幅疲劳试验. 高低周复合疲劳试验采用的载荷谱由一个低周梯形波载荷 (图 3a) 与叠加在低周载荷峰值上的高周正弦载荷 (图 3b) 组成, 如图 3c 所示. 文中高低周复合疲劳载荷谱中低周载荷应力比  $R_{LCF}=0.1$ ; 高周载荷平均应力  $\sigma_{\text{Havg}}$  即为低周载荷最大应力  $\sigma_{L\text{max}}$ , 高周频率为 128 Hz, 在  $\sigma_{\text{Havg}}=300 \text{ MPa}$ ,  $R_{\text{HCF}}=0.5, 0.6, 0.7$ , 三个应力水平下进行试验, 高低周复合循环次数比  $m$  为 10000. 常幅疲劳试验在与高低周复合疲劳载荷相同应力

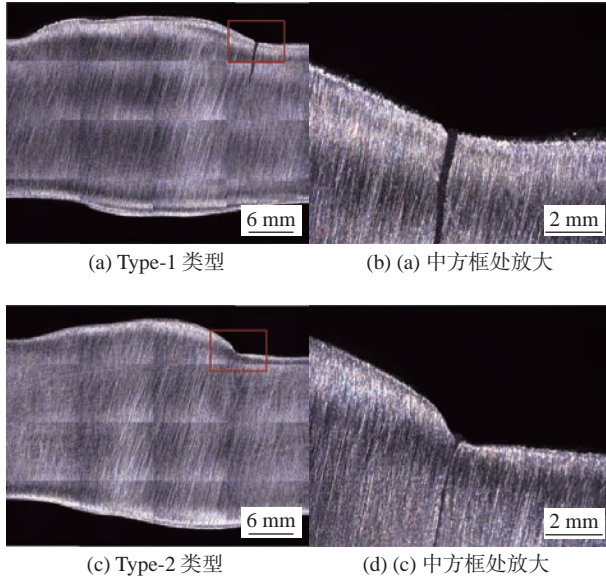


图 2 两种类型试样的焊缝形貌  
Fig. 2 Weld profiles of two specimens. (a) Type-1; (b) magnify of Type-1; (c) Type-2; (d) magnify of Type-2

表 2 焊接工艺参数  
Table 2 Welding process parameters

焊接方法	焊丝牌号	电流 $I/A$	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$
GMAW	JM-58( $\phi 1.2$ )	127 ~ 155	170 ~ 280
SAW	PREMLER WELD Ni1K( $\phi 4.0$ )	400 ~ 650	400 ~ 600

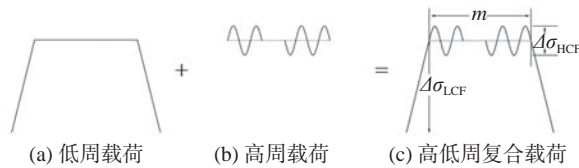


图 3 疲劳试验载荷示意图  
Fig. 3 Fatigue loadings. (a) low cycle fatigue loading; (b) high cycle fatigue loading; (c) combined high and low fatigue cycle loading

水平的常幅疲劳载荷下进行。

为探究焊趾处应力集中对接头疲劳寿命的影响, 针对 Type-1、Type-2 两种类型焊缝形貌的接头试样进行高低周复合疲劳试验和常幅疲劳试验, 每个应力水平进行 3 次重复试验。两种类型试样在不同应力水平下疲劳失效的位置均发生在焊趾处, 如图 2b、图 2d 所示。用超景深测量两种类型试样断裂位置的焊缝倾角  $\alpha$ 、板厚  $T$ 、余高  $h$ 、焊缝宽度  $h_p$ 、焊趾过渡圆弧半径  $\rho$  和错边  $\Delta\delta$ , 见表 3。

表 3 两种类型接头焊缝几何参数

Table 3 Geometrical parameters of two welded joints

试样类型	几何参数	均值
Type-1	焊缝倾角 $\alpha(^{\circ})$	26.05
	板厚 $T/mm$	20.00
	余高 $h/mm$	3.273
	焊缝宽度 $h_p/mm$	33.74
	过渡圆弧半径 $\rho/mm$	8.425
	错边 $\Delta\delta/mm$	0.937
Type-2	焊缝倾角 $\alpha(^{\circ})$	50.60
	板厚 $T/mm$	20.00
	余高 $h/mm$	4.648
	焊缝宽度 $h_p/mm$	26.63
	过渡圆弧半径 $\rho/mm$	1.022
	错边 $\Delta\delta/mm$	2.020

## 2 试验结果及分析

### 2.1 EH36 钢焊接接头 $S-N$ 曲线

表 4 和表 5 分别为 Type-1 类型焊接接头在各应力水平下的高低周复合疲劳试验结果和相同应力水平下的常幅疲劳试验结果, 表 6 为  $R=0.1$  时的常幅疲劳试验结果。

高周疲劳载荷叠加在低周疲劳载荷上时, 原高周疲劳载荷的平均应力也会相应增大, 此时接头的疲劳寿命降低。比较表 5 与表 6 中同一应力幅值的数据, 发现接头寿命在平均应力较高时下降,  $\Delta\sigma=200$  MPa 时下降了 4.5%,  $\Delta\sigma=150$  MPa 时下降了 18.81%。因此, 为更直观地比较高低周复合疲劳对焊接接头寿命的影响, 可将高低周复合疲劳寿命与其相同应力水平下的常幅疲劳寿命进行比较。

图 4 为高低周复合疲劳试验  $S-N$  曲线与其相同应力水平下常幅疲劳试验  $S-N$  曲线。从图 4 中可以看出, 高低周复合疲劳降低了接头的疲劳寿命, 且寿命降低幅度随着高周应力比的增大而增大, 具体降低幅度见表 7。当高周应力比为 0.5、0.6、0.7 时, 疲劳寿命分别降低了 19.64%、25.15%、30.05%。其原因是随着复合疲劳中高周应力比的增加, 高周应力幅值降低, 使得高低周复合疲劳寿命增加, 其中低周寿命相应增加, 由于低周循环次

表 4 Type-1 类型接头高低周复合疲劳试验结果

Table 4 Combined high and low cycle fatigue test results of Type-1 welded joints

试样编号	低周应力比 $R_{LCF}$	高周应力比 $R_{HCF}$	高周应力幅值 $\Delta\sigma_{HCF}/\text{MPa}$	疲劳寿命 $N/\text{次}$
300/0.5C-1	0.1	0.5	200	144983
300/0.5C-2	0.1	0.5	200	126924
300/0.5C-3	0.1	0.5	200	150016
300/0.6C-1	0.1	0.6	150	315563
300/0.6C-2	0.1	0.6	150	327714
300/0.6C-3	0.1	0.6	150	355930
300/0.7C-1	0.1	0.7	106	2010492
300/0.7C-2	0.1	0.7	106	1794010
300/0.7C-3	0.1	0.7	106	1989428

表 5 Type-1 类型接头常幅疲劳试验结果 (平均应力  $\sigma_{avg}=300\text{ MPa}$ )

Table 5 Constant amplitude fatigue test results of Type-1 welded joints ( $\sigma_{avg}=300\text{ MPa}$ )

试样编号	应力比 $R$	应力幅值 $\Delta\sigma/\text{MPa}$	疲劳寿命 $N/\text{次}$
300/0.5H-1	0.5	200	152302
300/0.5H-2	0.5	200	196278
300/0.5H-3	0.5	200	176452
300/0.6H-1	0.6	150	470065
300/0.6H-2	0.6	150	419282
300/0.6H-3	0.6	150	445682
300/0.7H-1	0.7	106	3099247
300/0.7H-2	0.7	106	2786650
300/0.7H-3	0.7	106	2517640

表 6 Type-1 类型接头常幅疲劳试验结果 (应力比  $R=0.1$ )

Table 6 Constant amplitude fatigue test results of Type-1 welded joints ( $R=0.1$ )

试样编号	应力比 $R$	应力幅值 $\Delta\sigma/\text{MPa}$	疲劳寿命 $N/\text{次}$
300L-1	0.1	270	50291
300L-2	0.1	270	44974
300L-3	0.1	270	40254
222L-1	0.1	200	201218
222L-2	0.1	200	196988
222L-3	0.1	200	151752
166L-1	0.1	150	512587
166L-2	0.1	150	661207
166L-3	0.1	150	470533

数的增多, 塑性诱导裂纹闭合效应减弱, 导致其寿命降低幅度增大<sup>[18]</sup>.

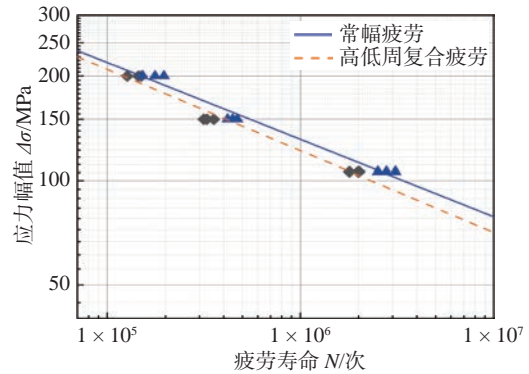


图 4 Type-1 类型接头高低周复合疲劳  $S-N$  曲线与常幅疲劳  $S-N$  曲线

Fig. 4  $S-N$  curves of combined high and low cycle fatigue tests and constant amplitude fatigue tests of Type-1 welded joints

表 7 不同应力比下高低周复合疲劳寿命降低幅度

Table 7 Fatigue life decrease of combined high and low cycle fatigue at different stress ratios

应力水平	常幅疲劳寿命 $N_{CAF}/\text{次}$	高低周复合疲劳寿命 $N_{CCF}/\text{次}$	寿命降低幅度 $eN(\%)$
300/0.5	175010	140641	19.64
300/0.6	445009	333069	25.15
300/0.7	2801179	1931310	30.05

## 2.2 焊趾处应力集中对接头疲劳寿命的影响

影响焊接接头高低周疲劳寿命的因素除应力水平外, 还有焊趾处应力集中. 基于数字图像相关法 (digital image correlation method, DIC) 测量结果, 得到了高低周复合疲劳过程中焊趾处应变场<sup>[19]</sup>, 如图 5 所示. 从图 5 可以看出焊趾处应变是周围区域的 2 倍左右, 根据胡克定律中应力应变关系, 可从图 5 推断出焊趾处存在明显应力集中.

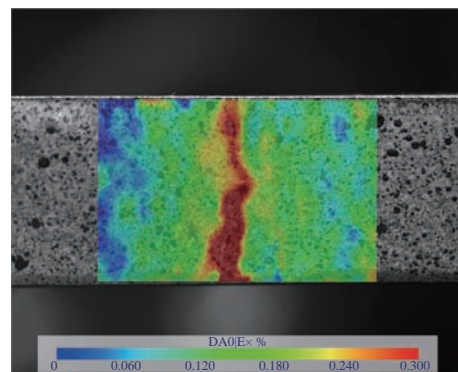


图 5 焊趾处应变场

Fig. 5 Strain field at weld toe

表 8 和表 9 分别为 Type-2 类型焊接接头在各应力水平下的高低周复合疲劳试验结果和相同应力水平下的常幅疲劳试验结果, 表 10 为  $R=0.1$  时的常幅疲劳试验结果. 图 6、图 7 分别为 Type-1、Type-2 两种类型焊缝形貌接头的高低周复合疲劳 S-N 曲线和对应的常幅疲劳 S-N 曲线. 从图 6、图 7 可以看出, 在相同应力水平下, Type-2 类型接头的疲劳寿命较 Type-1 类型均有降低, 具体降低幅度见表 11, 其降低幅度随着应力比的增大而增大, 当应力比为 0.5、0.6、0.7, Type-2 类型接头的高低周复合疲劳寿命较 Type-1 类型分别降低了 30.59%、50.94%、67.21%.

表 8 Type-2 类型接头高低周复合疲劳试验结果  
Table 8 Combined high and low cycle fatigue test results of Type-2 welded joints

试样编号	低周应力比	高周应力比	高周应力幅值	疲劳寿命 $N/次$
	$R_{LCF}$	$R_{HCF}$	$\Delta\sigma_{HCF}/MPa$	
h300/0.5C-1	0.1	0.5	200	95 192
h300/0.5C-2	0.1	0.5	200	102 212
h300/0.5C-3	0.1	0.5	200	95 454
h300/0.6C-1	0.1	0.6	150	141 294
h300/0.6C-2	0.1	0.6	150	165 487
h300/0.6C-3	0.1	0.6	150	183 425
h300/0.7C-1	0.1	0.7	106	550 027
h300/0.7C-2	0.1	0.7	106	742 598
h300/0.7C-3	0.1	0.7	106	607 245

表 9 Type-2 类型接头常幅疲劳试验结果 (平均应力  $\sigma_{avg}=300 MPa$ )  
Table 9 Constant amplitude fatigue test results of Type-2 welded joints ( $\sigma_{avg}=300 MPa$ )

试样编号	应力比 $R$	应力幅值 $\Delta\sigma/MPa$	疲劳寿命 $N/次$
h300/0.5H-1	0.5	200	125 423
h300/0.5H-2	0.5	200	145 009
h300/0.5H-3	0.5	200	109 157
h300/0.6H-1	0.6	150	212 545
h300/0.6H-2	0.6	150	274 904
h300/0.6H-3	0.6	150	242 758
h300/0.7H-1	0.7	106	902 564
h300/0.7H-2	0.7	106	1 062 651
h300/0.7H-3	0.7	106	959 898

表 10 Type-2 类型接头常幅疲劳试验结果 (应力比  $R=0.1$ )  
Table 10 Constant amplitude fatigue test results of Type-2 welded joints ( $R=0.1$ )

试样编号	应力比 $R$	应力幅值 $\Delta\sigma/MPa$	疲劳寿命 $N/次$
h300L-1	0.1	297	25 145
h300L-2	0.1	297	30 026
h300L-3	0.1	297	25 229

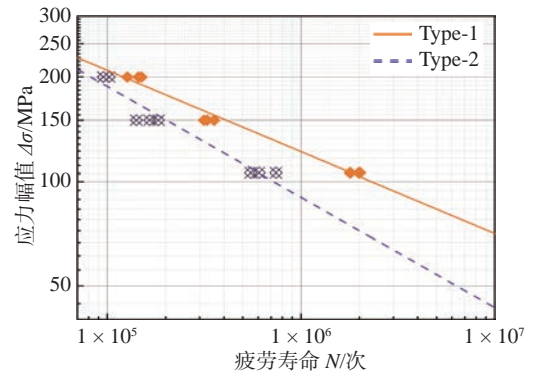


图 6 两种类型焊缝形貌焊接接头高低周复合疲劳 S-N 曲线  
Fig. 6 S-N curves of combined high and low cycle fatigue tests of welded joints with two weld profiles

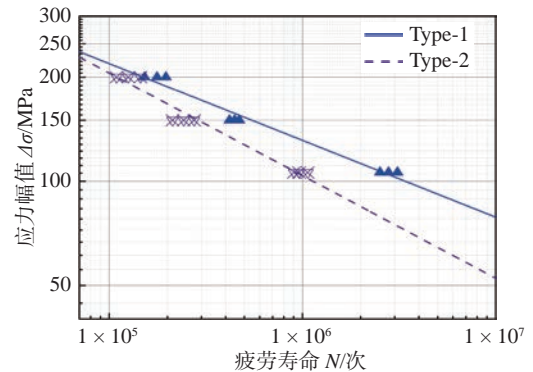


图 7 两种类型焊缝形貌焊接接头常幅疲劳 S-N 曲线  
Fig. 7 S-N curves of high cycle fatigue tests of welded joints with two weld profiles

两种类型接头焊趾处应力集中系数  $K_t$  可表示为<sup>[20-21]</sup>.

$$K_t = 1 + \frac{1 - e^{\left(-0.9a \sqrt{\frac{T + 2h + 0.6h_o}{2h}}\right)}}{1 - e^{\left(-0.45\pi \sqrt{\frac{T + 2h + 0.6h_o}{2h}}\right)}} \times 2 \times \left[ \frac{h}{\rho} \cdot \frac{1}{2.8 \times \left(\frac{T + 2h + 0.6 \cdot h_p}{T}\right) - 2} \right]^{0.65} \quad (1)$$

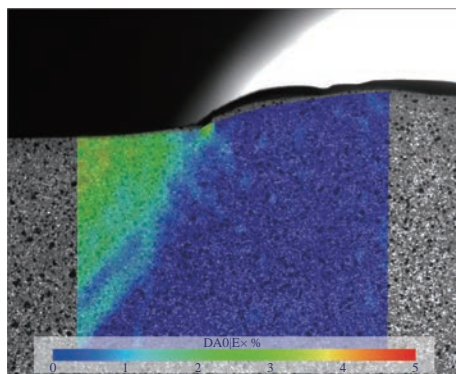
经计算, Type-1 类型接头焊趾处应力集中系数为 1.414, Type-2 类型接头焊趾处应力集中系数为

表 11 焊接接头寿命降低幅度  
Table 11 Fatigue life decrease of welded joints

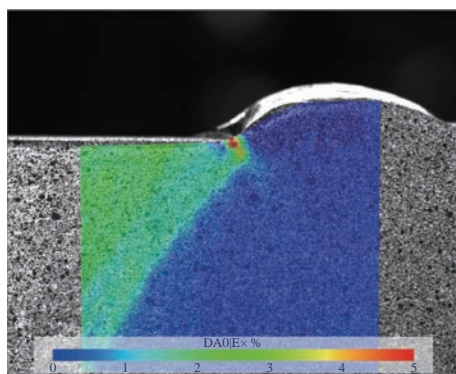
应力水平	Type-1 类型接头 疲劳寿命 $N_1$ /次	Type-2 类型接头 疲劳寿命 $N_2$ /次	寿命降低幅度 $\varepsilon N(\%)$
300/0.5C	140641	97619	30.59
300/0.6C	333069	163402	50.94
300/0.7C	1931310	646312	67.21
300/0.5H	175010	126529	27.70
300/0.6H	445009	243402	45.30
300/0.7H	2801179	975037	65.19
300L	45173	28304	37.34

### 3.603.

图 8 为同一寿命下两种类型接头焊趾处应变场, Type-2 类型接头焊趾处应变约是 Type-1 类型接头的 2.5 倍, 根据胡克定律中应力应变关系, 可推断出 Type-2 类型接头焊趾处应力集中较 Type-1 类型接头更为明显, 这与应力集中系数  $K_t$  有很好的对应关系, 焊缝几何不连续性越大, 焊趾处应力集中越大, 接头疲劳寿命越低<sup>[11, 22]</sup>. 试验采用的试样加工时基本释放了焊接残余应力<sup>[23]</sup>, 若焊接结构



(a) Type-1 类型接头焊趾



(b) Type-2 类型接头焊趾

图 8 两种类型接头焊趾处应力集中

Fig. 8 Strain fields at weld toes of two weld profiles. (a) strain fields at weld toe of Type-1 welded joint; (b) strain fields at weld toe of Type-2 welded joint

中存在残余应力, 可修正平均应力来考虑残余应力的影响<sup>[24]</sup>.

### 2.3 高低周复合疲劳寿命预测

变幅载荷下疲劳寿命预测常用 Palmgren-Miner 线性模型, 但实际上高低周复合疲劳寿命  $N_{CCF}$  不只是低周寿命  $N_{LCF}$  与高周寿命  $N_{HCF}$  的简单线性叠加, 二者之间存在着交互作用. 忽略高低周疲劳载荷的交互作用将导致试样疲劳寿命被高估, 不能保证结构安全性的要求<sup>[25-27]</sup>. 此外, 焊趾处应力集中也很大程度影响着高低周复合疲劳寿命预测模型的精确性.

为研究高低周复合模型对 EH36 钢焊接接头疲劳寿命预测的适用性, 对 Palmgren-Miner 模型<sup>[28]</sup>、T-K 模型<sup>[29]</sup> 和 Zhu 模型<sup>[30]</sup> 进行验证, 模型中材料常数根据试验数据拟合<sup>[31]</sup>.

Palmgren-Miner 模型:

$$N_{CCF} = \frac{1+m}{\frac{m}{N_{HCF}} + \frac{1}{N_{LCF}}} \quad (2)$$

式中:  $N_{CCF}$  为高低周复合疲劳寿命;  $N_{HCF}$  为高周寿命;  $N_{LCF}$  为低周寿命;  $m$  为高低周复合循环次数比.

T-K 模型:

$$N_{CCF} = (1+m) \cdot N_{LCF} \cdot \left(\frac{1}{m}\right)^{\gamma-\alpha} \quad (3)$$

式中:  $N_{CCF}$  为高低周复合疲劳寿命;  $N_{LCF}$  为低周寿命;  $m$  为高低周复合循环次数比;  $\gamma$  为材料常数, 取 1.55;  $\alpha$  为高低周应力幅值比.

Zhu 模型:

$$N_{CCF} = \frac{1+m}{\frac{m}{N_{HCF}} + \frac{1}{N_{LCF}} + \frac{1}{(m+1) \cdot \lg(N_{HCF})^\alpha}} \quad (4)$$

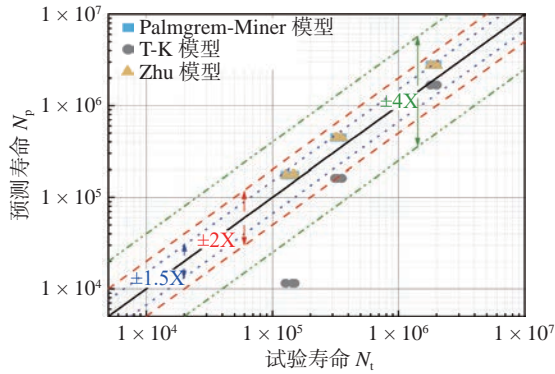
式中:  $N_{CCF}$  为高低周复合疲劳寿命;  $N_{HCF}$  为高周寿命;  $N_{LCF}$  为低周寿命;  $m$  为高低周复合循环次数比;  $\alpha$  为高低周应力幅值比.

基于试样试验寿命  $N_t$  和模型预测寿命  $N_p$  绘制两种类型接头的高低周复合疲劳寿命预测图和误差箱线图, 如图 9 所示. 寿命预测图中的点线、划线和双点划线分别表示 1.5 倍分散带、2 倍分散带和 4 倍分散带. 从图 9 中可以看出, 应力集中系数大的焊接接头高低周复合疲劳寿命预测结果分散性大, 可能原因是焊趾处应力集中对高低周耦合损伤有一定影响.

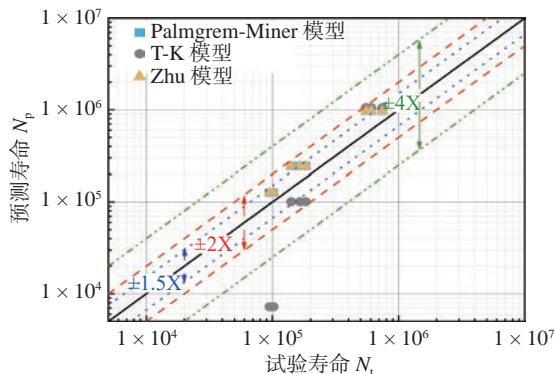
图 10 为寿命预测汇总图和误差箱线汇总图, 从图 10 中可以看出, Palmgren-Miner 模型的高低周复合疲劳寿命预测结果相对实际寿命偏大, 预测

结果相对危险. T-K 模型的预测寿命分散性较大,

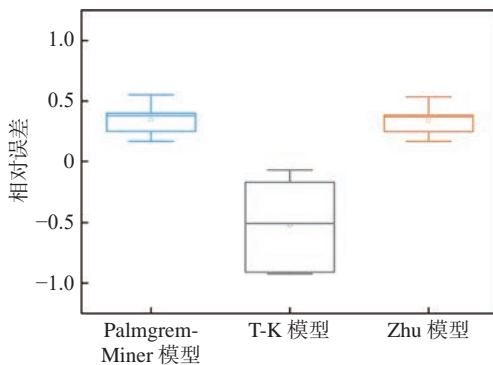
误差也较大, 出现了在 4 倍寿命分散带以外的预测点, 该模型不适用于 EH36 钢焊接接头高低周复合疲劳寿命预测. 由于试验中高低周复合疲劳循环次数比  $m$  较大, Zhu 模型在考虑高低周复合疲劳耦合损伤作用后, 其寿命预测结果与 Palmgren-Miner 模型相比仍没有明显差异.



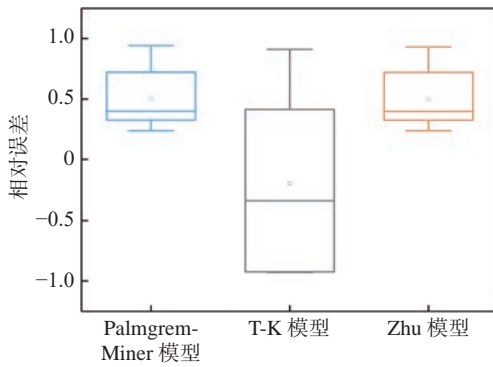
(a) Type-1 类型寿命预测



(b) Type-2 类型寿命预测



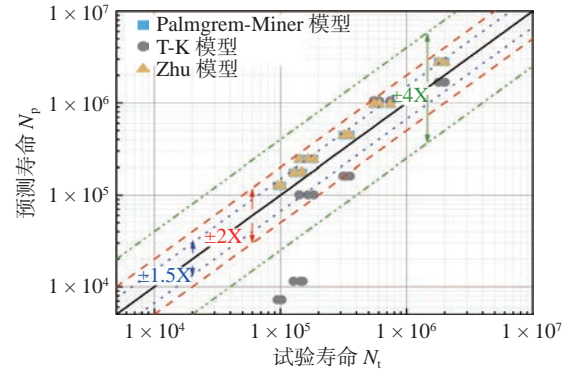
(c) Type-1 类型误差



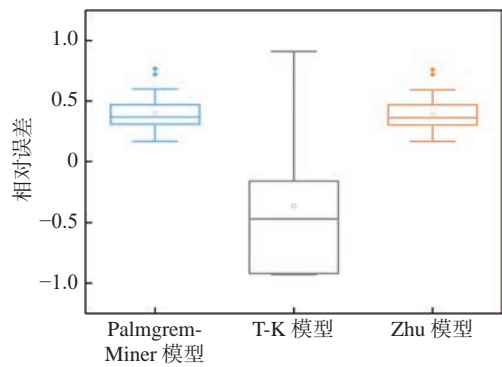
(d) Type-2 类型误差

图 9 两种类型焊接接头寿命预测图和误差箱线图

Fig. 9 Life prediction and error under two weld profiles. (a) Life prediction under Type-1 welded joints; (b) Life prediction under Type-2 welded joints; (c) error under Type-1 welded joints; (d) error under Type-2 welded joints



(a) 寿命预测汇总表



(b) 误差汇总表

图 10 寿命预测汇总表和误差箱线图

Fig. 10 Summary of life prediction and error. (a) summary of life prediction; (b) summary of error

通过分析发现, Zhu 模型考虑了一个循环内  $m$  次高周疲劳循环和 1 次低周疲劳循环的交互作用, 对于高低周复合循环次数比  $m$  大的情况, Zhu 模型会高估  $m$  对耦合作用的影响, 模型应用受到限制<sup>[32]</sup>. 因此根据实际情况, 将高低周复合疲劳过程中由高周平均应力卸载到低周最低应力, 再次加载到高周平均应力这一过程视为高低周复合疲劳的 1 次交互作用, 并对 Zhu 模型进行修正, 将耦合损伤项修正为  $1/\log(N_{HCF})^\alpha$ .

得到修正后的 Zhu 模型, 即

$$N_{CCF} = \frac{1+m}{\frac{m}{N_{HCF}} + \frac{1}{N_{LCF}} + \frac{1}{\lg(N_{HCF})^\alpha}} \quad (5)$$

图 11 为 Zhu 模型修正前后的寿命预测图和误差箱线图. 从图 11 中可以看出, 修正后 Zhu 模型的

高低周复合疲劳寿命预测结果分散性较小, 误差也较小, 预测点均处于 1.5 倍分散带以内, 且预测寿命大于实际寿命的预测点较少, 寿命预测结果相对安全。

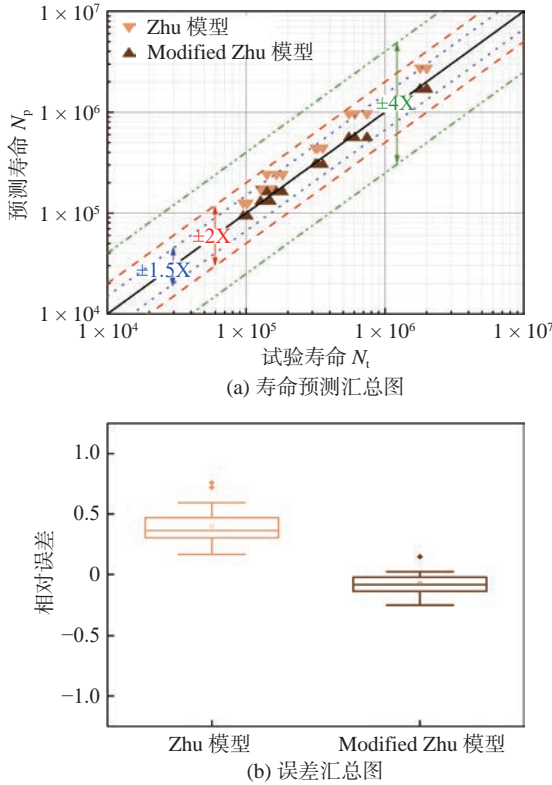


图 11 修改前后 Zhu 模型寿命预测图和误差箱线图

Fig. 11 Life prediction and error of Zhu model. (a) life prediction of Zhu model; (b) error of Zhu model

### 3 结论

(1) 高低周复合疲劳对寿命的影响随着高周应力比的增大而增大. 相同应力幅值下, 接头寿命随平均应力增大而降低.

(2) 在相同载荷条件下, 焊趾处应力集中系数越大, 接头的高低周复合疲劳寿命越低, 其寿命降低幅值随着高周应力比的增大而增大. 此外, 焊趾处应力集中系数大的接头寿命预测结果分散性大.

(3) Palmgren-Miner 模型和 Zhu 模型寿命预测结果相对危险. 修正后 Zhu 模型的寿命预测结果分散性较小, 误差也较小, 预测结果相对安全.

### 参考文献

[1] Wang Y, Liu J, Hu J, *et al.* Fatigue strength of EH36 steel welded joints and base material at low-temperature[J]. International

Journal of Fatigue, 2021, 142: 105896.

- [2] Song Y, Yang P, Xia T, *et al.* The crack growth rate and crack opening displacement of EH-36 steel under low-cycle fatigue loading[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114734.
- [3] Li L, Jia Q, Wan Z, *et al.* Experimental and numerical investigation of effects of residual stress and its release on fatigue strength of typical FPSO-unit welded joint[J]. Ocean Engineering, 2020, 196: 106858.
- [4] Wang C, Wang S, Xie L, *et al.* Fatigue crack growth behavior of marine steel under variable amplitude loading-combining DIC technique and SEM observation[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 170: 107508.
- [5] Ibarra M A C, Simão M L, Videiro P M, *et al.* Long-term fatigue analysis of mooring lines considering wind-sea and swell waves using the Univariate Dimension-Reduction Method[J]. Applied Ocean Research, 2022, 118: 102997.
- [6] 魏国前, 陈斯雯, 余茜, 等. 焊趾多裂纹的试验与仿真分析 [J]. 焊接学报, 2019, 40(11): 75-81.  
Wei Guoqian, Chen Siwen, Yu Xi, *et al.* Experimental and simulation study on multiple cracks of weld toe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(11): 75-81.
- [7] Luo Y, Ma R, Tsutsumi S. Parametric formulae for elastic stress concentration factor at the weld toe of distorted butt-welded joints[J]. Materials, 2020, 13(1): 169.
- [8] Ottersböck M J, Leitner M, Stoschka M. Characterisation of actual weld geometry and stress concentration of butt welds exhibiting local undercuts[J]. Engineering Structures, 2021, 240: 112266.
- [9] 张晨星. 焊缝形貌对焊接强度的影响研究 [D]. 河北: 燕山大学. 2022.  
Zhang Chenxing. Study on the influence of weld morphology on weld strength[D]. Yanshan: Yanshan University. 2022.
- [10] Wu X, Kang H. A fracture mechanics-based stress approach for fatigue life prediction of welded joints considering weld profile effect[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 123: 103698.
- [11] Bai S, Li Y, Huang H, *et al.* A probabilistic combined high and low cycle fatigue life prediction framework for the turbine shaft with random geometric parameters[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 165: 107218.
- [12] Tsutsumi S, Fincato R, Luo P, *et al.* Effects of weld geometry and HAZ property on low-cycle fatigue behavior of welded joint[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 156: 106683.
- [13] Gan J, Liu X, Wang Z, *et al.* Experimental study on the fatigue damage of designed T-type specimen with high-low frequency superimposed loading[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143: 105985.
- [14] Qiu S, Cui H, Zhang H, *et al.* A dual-threshold modelling approach for fatigue life prediction under combined high and low cycle fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 164:

- 107110.
- [15] Zhao Z, Lu K, Wang L, *et al.* Prediction of combined cycle fatigue life of TC11 alloy based on modified nonlinear cumulative damage model[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(7): 73 – 84.
- [16] Det Norske Veritas. Fatigue strength analysis of offshore steel structures[S]. Norway: Academic Press, 2001.
- [17] ASTM E466-Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials[S]. England: Edinburgh University Press, 2015.
- [18] Liang H, Zhan R, Wang D, *et al.* Effect of crack-tip deformation on fatigue crack growth: A comparative study under overload/underload conditions[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 118: 103268.
- [19] Huang H, Hu M, Xu A, *et al.* In-situ strain measurement and error analysis of arc welding with 2D digital image correlation[J]. China Welding, 2022, 31(3): 17 – 23.
- [20] Ushirokawa O. Stress concentration factor at welded joints. II.-probabilistic approach[J]. Ishikawajima-Harima Engineering Review, 1984, 24(2): 98 – 103.
- [21] Tsuji I. Estimation of stress concentration factor at weld toe of non-load carrying fillet welded joints[J]. Journal of the West-Japan Society of Naval Architects, 1990, 80: 241 – 251.
- [22] 徐连勇, 彭晨涛, 赵雷, 等. 深水浮体平台焊接结构疲劳性能测试方法 [J]. 焊接学报, 2022, 43(11): 84 – 90.  
Xu Lianyong, Peng Chentao, Zhao Lei, *et al.* Research on fatigue performance test method of welding structure of floating platform in deep water[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(11): 84 – 90.
- [23] 周昊, 刘英芳, 刘刚, 等. 考虑残余应力的焊接结构多轴疲劳准则 [J]. 焊接学报, 2017, 38(11): 41 – 46.  
Zhou Hao, Liu Yingfang, Liu Gang, *et al.* Multiaxial fatigue criteria of welded structures considering the residual stress[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(11): 41 – 46.
- [24] Jiang W, Xie X, Wang T, *et al.* Fatigue life prediction of 316L stainless steel weld joint including the role of residual stress and its evolution: Experimental and modelling[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 143: 105997.
- [25] 张涛, 王东坡, 邓彩艳, 等. 双周疲劳载荷作用下焊接接头线性累计损伤分析 [J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 61 – 65.  
Zhang Tao, Wang Dongpo, Deng Caiyan, *et al.* Linear cumulative damage analysis of welded joints under combined cycle fatigue[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 61 – 65.
- [26] 幸杰, 韩永典, 徐连勇, 等. 基于连续损伤力学的高低周复合疲劳损伤 [J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 63 – 66.  
Xing Jie, Han Yongdian, Xu Lianyong, *et al.* High cycle and low cycle hybrid fatigue damage based on continuum damage mechanics[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 63 – 66.
- [27] 魏国前, 郭子贤, 闫梦煜, 等. 基于 Pavlou 方法的焊接结构疲劳寿命预测 [J]. 焊接学报, 2023, 44(9): 16 – 23.  
Wei Guoqian, Guo Zixian, Yan Mengyu, *et al.* Pavlou approach based fatigue life prediction for welded structures[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(9): 16 – 23.
- [28] Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12: 159 – 164.
- [29] Trufiyakov V I, Koval' chuk V S. Determination of life under two-frequency loading. Report no. 2. Proposed method[J]. Strength of Materials, 1982, 14(10): 1303 – 1308.
- [30] Zhu S, Yue P, Yu Z, *et al.* A Combined high and low cycle fatigue model for life prediction of turbine blades[J]. Materials, 2017, 10(7): 698.
- [31] Han L, Huang D, Yan X, *et al.* Combined high and low cycle fatigue life prediction model based on damage mechanics and its application in determining the aluminized location of turbine blade[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 127: 120 – 130.
- [32] 杨民, 李青键, 黄志勇. 低周-超高周复合循环疲劳实验及寿命模型研究 [J]. 实验力学, 2021, 36(5): 638 – 646.  
Yang Min, Li Qingjian, Huang Zhiyong. Combined low and very-high cycle fatigue test and life model study[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(5): 638 – 646.

第一作者: 徐连勇, 男, 博士, 教授, 博士生导师. 主要从事焊接结构的寿命设计与评价, 高性能长寿命焊接制造以及增材制造等方面的研究. 发表论文 300 余篇. Email: xulianyong@tju.edu.cn.

通信作者: 赵雷, 男, 博士, 副教授, 博士生导师. 主要从事焊接结构的蠕变、疲劳、断裂与损伤研究. Email: zhaolei85@tju.edu.cn.

(编辑: 周珍珍)