

# 含错位效应十字焊接接头疲劳可靠性评估

宋威<sup>1</sup>, 满铮<sup>2</sup>, 徐杰<sup>2</sup>, 魏守盼<sup>3</sup>, 崔慕春<sup>3</sup>, 侍孝建<sup>3</sup>, 刘雪松<sup>4</sup>

(1. 徐州工程学院, 徐州, 221111; 2. 中国矿业大学, 徐州, 221008; 3. 徐州徐工矿业机械有限公司, 徐州, 221000;  
4. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001)

**摘要:** 探究缺陷效应对焊接件疲劳性能的影响是控制焊接质量的重要内容. 文中引入焊接缺陷参数的影响, 基于累计寿命-临界损伤建立含缺陷承载十字焊接接头疲劳可靠性分析模型. 首先, 根据结构件焊缝和缺陷参数以及载荷条件, 建立有限元计算模型, 并基于平均应变能密度方法 (average strain energy density method, SED) 和热点应力方法 (hot spot method, HS) 等评估方法探究各特征参数对疲劳性能的影响. 其次, 结合 BP 神经网络和 Miner 线性累计损伤准则建立可靠性分析模型, 以概率统计相关参数为基础系统分析疲劳载荷和变异系数对于疲劳可靠性指标的影响. 结果表明, 位移和角错位及其概率分布参数显著影响焊件的疲劳寿命分布及可靠性概率, 该可靠性模型为工程焊件的疲劳寿命设计及监测检修提供参考依据.

**创新点:** (1) 结合平均应变能密度理论, 建立包含焊缝特征和混合缺陷等特征参数的可靠性分析模型.  
(2) 基于概率统计理论, 从缺陷分布和离散度各角度对疲劳损伤进行系统分析.

**关键词:** 焊接缺陷; 错位缺陷; 疲劳可靠性; 局部分析方法

**中图分类号:** TG 441.7; TG 405

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.20220629001

## 0 序言

承载十字焊接接头广泛用于交通运输、船舶工程、海洋平台等结构工程领域, 在结构连接、承载、整体性方面具有明显优势. 焊接区域组织结构的形成来源于热、力和冶金组织的综合作用, 常是裂纹、咬边、错位等缺陷产生的重点区域, 并在后续接头服役过程中成为影响接头承载能力和疲劳寿命的主要因素<sup>[1]</sup>. 长裂纹及咬边在接头加工及质量检测中容易避免, 而错位缺陷修复在焊接构件制造中较为困难, 因此焊后成形的含错位缺陷结构疲劳性能评价尤为重要. 焊接接头错位的种类分为两种, 分别为位移错位及角错位, 或两种错位缺陷并存. 其在焊接疲劳评估标准中均有描述和分析, 如 IIW<sup>[2]</sup>、Eurocode3<sup>[3]</sup>、BS7910<sup>[4]</sup>, 此类标准中错位缺陷常以容差形式考虑在各类型焊件的评估方法和疲劳等级中. 但在复杂焊接工艺和环境因素的影响下, 焊接结构几何特征和缺陷参数的不确定性会显著影

响构件损伤进程, 对焊接结构的安全服役及可靠性提升带来挑战<sup>[5]</sup>. 因此, 结合不确定性量化含错位效应焊接接头结构的疲劳寿命和疲劳损伤具有重要意义.

目前, 针对焊接接头错位效应国内外已有相关分析. Ahola 等人<sup>[6]</sup>应用结构应力方法分析错位对于非承载焊接接头寿命的影响, 同时分析了残余应力影响下的疲劳强度变化. Song 等人<sup>[7]</sup>基于局部应变能密度方法探究了十字焊接接头几何特征对于疲劳特征参量的影响. 研究文献 [8-9] 表明, 焊接几何特征是疲劳寿命的重要影响因素, 错位缺陷会加剧焊接接头的局部峰值应力大小, 进而增加循环载荷下局部位置的损伤程度. 传统疲劳寿命分析常基于确定性参数进行分析, 而忽略了几何、载荷及缺陷的随机特征, 使得接头疲劳寿命预测的准确性较难判定, 而基于疲劳可靠性分析的方法能够从概率角度确定结构安全及失效概率.

常见的可靠性设计方法包括剩余强度模型、累计损伤模型、临界疲劳寿命模型, 其将传统的单值疲劳失效问题进行概率描述, 为针对接头局部几何随机特征对疲劳强度的影响评价提供了可行的途径. 近期, Dong 等人<sup>[10]</sup>采用疲劳准则中参考的修正

收稿日期: 2022-06-29

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (52105403); 江苏省自然科学基金项目 (BK20200174); 中国博士后基金面上项目 (2021M0702753).

方法并基于蒙特卡洛和一次二阶矩方法对比探究了错位效应对对接焊结构件的疲劳可靠性影响,结果对比了焊接方法对于错位程度的影响,并说明了错位效应对疲劳可靠性的影响.Qiu 等人<sup>[11]</sup>分析了薄 T 型板在各约束条件下初始变形和角错位程度对应力修正系数的影响,并基于 S-N 曲线和累积损伤理论分析了结构件几何特征影响下的疲劳可靠性问题,结果表明初始变形和角错位会显著降低疲劳可靠性。

除上述经验公式和响应面法外,柯爽<sup>[12]</sup>基于 BP 神经网络和 Fourier 正交基神经网络探究了涡轮轴材料参数和运行条件对于疲劳可靠性的影响,神经网络的非线性映射能力能够提升可靠性结果的准确性.然而,由于含错位效应疲劳试验数据的匮乏,基于疲劳可靠性理论在错位十字焊接接头的疲劳评定方面仍缺少系统性研究。

## 1 试验方法

局部分析方法常基于 S-N 曲线进行焊接接头疲劳寿命评估,如等效结构应力、热点应力、有效缺口应力、平均应变能密度、峰值应力等方法,各方法具有相应的疲劳寿命评估曲线及强度准则<sup>[1,13]</sup>.本文基于局部应变能密度及热点应力法对结构应力分布特征及可靠度问题进行对比分析,针对位移、角错位效应对焊接接头疲劳寿命的影响进行定量评估.首先,确定不同错位水平下疲劳特征参数与缺陷参数数值关系,并基于试验数据探究其对疲劳强度的影响,其次,进行不同错位水平下的疲劳可靠性及损伤分析.该研究分析的整体流程如图 1 所示。

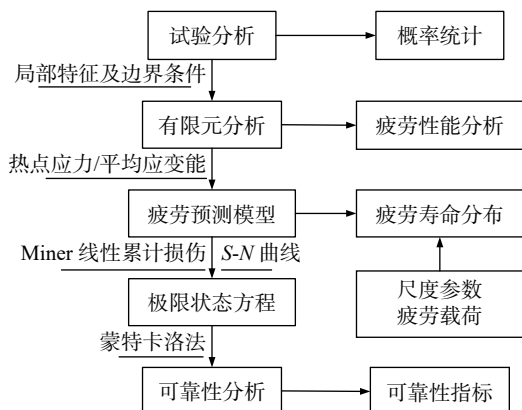


图 1 含错位效应焊接接头分析流程

Fig. 1 Analysis process of misaligned welded joint

## 1.1 试验及试样

十字焊接接头试验试样采用船用 907L (10.5 mm) 和 D32(12 mm) 高强钢等匹配焊接,如图 2 所示,承载板焊口开有间距为 2 mm 的 60°坡口便于焊接,且板长和宽度分别为 150 mm 和 30 mm. 由于焊接复杂因素的影响,焊缝区域出现不同类型的错位,如单一类型位移错位、角错位及混合类型错位.为进一步探究错位缺陷对于焊接接头疲劳性能的影响,对所有接头样品进行尺寸扫描并获取焊接接头几何特征参数尺寸.测量参数内容如图 2 所示,主要包括特征参数:熔透率 ( $P$ )、焊脚 ( $H_i$ 、 $V_i$ )、板厚 ( $T$ ) 及缺陷参数:位移错位 ( $a$ ) 和角错位 ( $e$ ),其分别用于后续有限元模型的建立及疲劳强度和可靠性的系统评估.最后,应用 MTS-810 疲劳试验机进行高周疲劳实验,实验加载频率为 10 Hz,应力比  $R = 0.1$ ,获取循环载荷及疲劳寿命等数据。

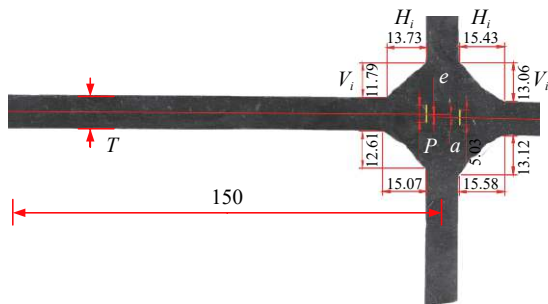


图 2 焊接接头尺寸及标注 (mm)

Fig. 2 Welded joint size and mark

## 1.2 有限元分析模型

采用 Abaqus 软件建立焊接接头有限元分析模型,材料属性杨氏模量 ( $E$ ) 和泊松比 ( $\nu$ ) 分别设置为 210 MPa 和 0.3,截面属性为均质且各向同性.为更好地结合高周疲劳试验条件,边界条件为副板单轴水平拉伸,母板上下两端不受任何约束.如图 3 为有限元分析模型网格划分细节,网格采用平面应变 4 节点缩减积分单元.用于平均应变能密度方法

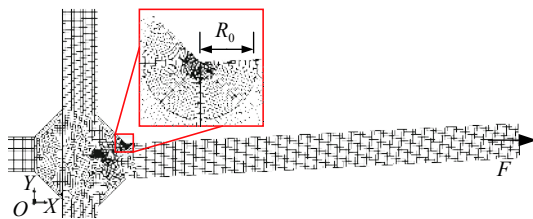


图 3 含错位焊接接头的二维有限元网格模型

Fig. 3 2D finite element model for misaligned welded joint

分析的网格区域半径设置为 0.28 mm. 为更好地探究局部特征尺寸对于缺口应力状态的影响, 除试验获取的分析参量外, 还加入了不同程度服役应力水平进行比较分析. 结合各特征参数尺寸下大量的理想错位模型和试验参数模型, 基于平均应变能密度及热点应力特征参量考察潜在失效区域焊趾处疲劳特征变化状态, 并进一步评估焊接接头疲劳可靠性.

### 1.3 平均应变能密度方法

平均应变能密度考虑裂纹尖端范围内场参量变化状态, 其可以准确的表征几何特征对于局部应力状态的影响, 是焊接接头及结构疲劳评估的有效方法. 在线弹性条件下, 其应变能密度可以表示为

$$W(r, \theta) = \frac{1}{2E} \left\{ \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - 2\nu(\sigma_{11}\sigma_{11} + \sigma_{11}\sigma_{33} + \sigma_{22}\sigma_{33}) + 2(1+\nu)\tau_{12}^2 \right\} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_i$  和  $\tau_i$  为极坐标下的正应力和切应力, 根据 Williams 公式对于裂纹尖端应力分布状态的计算公式以及 Lazzarin 等人<sup>[14]</sup> 对于缺口应力强度因子  $K_i^N$  的简化计算公式, 即

$$\Delta K_i^N = k_i \Delta \sigma_n t^{1-\lambda_i} \quad (2)$$

式中:  $k_i$  为引入的无量纲参数;  $t$  为板厚;  $\lambda_i$  是缺口张开角特征参数. 半径为  $R_0$  的扇形区域内平均应变能  $\Delta \bar{W}(R)$  可以表示为

$$\Delta \bar{W}(R) = \frac{e_1}{E} \left[ \frac{K_1^N}{R_0^{1-\lambda_1}} \right]^2 + \frac{e_2}{E} \left[ \frac{K_2^N}{R_0^{1-\lambda_2}} \right]^2 \quad (3)$$

式中:  $e_i$  是泊松比和张开角的特征参数, 简化计算参照文献<sup>[14]</sup>. 单轴拉伸试样裂纹失效过程受 II 型应力强度因子影响较小, 可以进一步将公式进行简化为

$$\Delta \bar{W}(R) = \frac{\Delta \sigma_n^2}{E} \left[ e_1 k_1^2 \left( \frac{t}{R_0} \right)^{2(1-\lambda_1)} \right] \quad (4)$$

### 1.4 可靠性分析方法及流程

选用  $S-N$  曲线作为该试样的疲劳寿命评估方法, 疲劳应力 ( $S$ ) 和疲劳寿命 ( $N$ ) 呈线性对数关系, 其表达式为

$$\lg(N) = \lg(C) - m \lg(S) \quad (5)$$

式中:  $C$  和  $m$  为材料特征常数;  $S$  表示为裂纹或缺口尖端应力状态幅值.

根据 Miner 线性累计损伤理论, 即

$$D_f = \sum_{i=1}^f \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

总损伤  $D_f$  可以表示为  $f$  次应力幅值下的疲劳寿命  $n_i$  和相应总寿命  $N_i$  之比总和, 且每次疲劳寿命循环累计损伤等价.

横幅载荷下焊件的损伤和临界寿命是可靠性设计的重要组成部分. 取 50% 概率  $S-N$  拟合曲线的疲劳特征参数  $C$ ,  $m$  为疲劳损伤  $D_i$  的预测参数,  $D_{cr}$  为当前参数和载荷条件下全熔覆率 ( $P=0$ ) 临界损伤值. 该焊接头的疲劳极限状态方程可以表示为

$$R = P(D_f - D_{cr} > 0) \quad (7)$$

几何特征和缺陷参数对局部参量影响复杂, 简化拟合关系难以探究各参数和平均应变能间的隐性耦合关系. 文中以公式 (4) 为基础, 采用 BP 神经网络拟合无量纲参数  $k_i$  和各特征参数的隐性关系式, 并引入疲劳标准推荐缺陷修正方法进行对比分析. 随后, 采用蒙特卡洛法 80 万次随机取值用于该模型的疲劳寿命可靠概率的求解计算, 以保证疲劳可靠性的准确度. 根据求解可靠概率  $R$ , 可靠性指标  $\beta$  可以表示为

$$\beta = -\Phi^{-1}(R), R = \text{Prob}\{\forall x \in X | g(D_f, X) > 0\} \quad (8)$$

式中,  $\Phi$  是标准正态分布函数.

疲劳可靠性模型建立过程中, 不确定性条件具体考虑了位移错位 ( $e$ ), 角错位 ( $a$ ), 板厚 ( $T$ ), 特征参数 ( $C$ ) 和累计损伤 ( $D$ ) 共五个参数的分布类型和变异系数. 疲劳可靠性分析流程如图 4 所示.

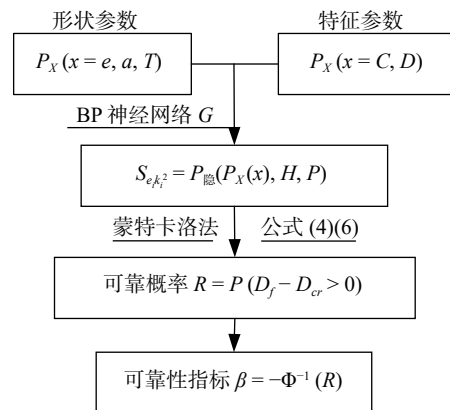


图 4 疲劳可靠性分析流程

Fig. 4 Fatigue reliability analysis process

## 2 结果分析和讨论

### 2.1 含缺陷疲劳分析模型

以角错位  $a = 3^\circ$ , 位移错位不断增加的混合错



位条件下为例,如图 5 展示了不同评估方法下应力集中系数的变化情况。

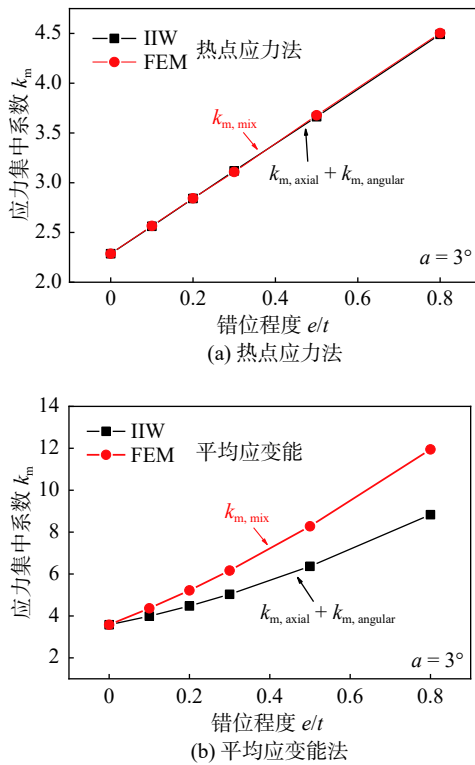


图 5 应力集中系数  $k_m$  对比

Fig. 5 Comparison of stress concentration factor. (a) Hot spot stress method; (b) Average strain energy density method

应力集中系数直观地反映了缺陷效应带来的局部应力状态变化趋势,可见错位缺陷对于整体疲劳强度的影响显著.对于混合错位情况,IIW 等<sup>[2,4]</sup>推荐将位移和角缺陷的修正系数叠加进行分析,即

$$k_m = 1 + (k_{m,axial} - 1) + (k_{m,angular} - 1) \quad (9)$$

对含错位焊趾失效的十字焊接接头,IIW 等<sup>[2,4]</sup>标准基于简化力学模型分别给出了解析修正方法,即

$$k_{m,axial} = 1 + \lambda \cdot \frac{e \cdot l_1}{t \cdot (l_1 + l_2)} \quad (10)$$

$$k_{m,angular} = 1 + \lambda \cdot a \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{t \cdot (l_1 + l_2)} \quad (11)$$

式中:  $\lambda$  表示为不同的约束条件;  $l_i$  表示为板长参数。

如图 5a 所示,基于数值分析计算的单一缺陷条件下应力集中系数之和和混合错位的结果进行对比,具有较好的一致性.但实际情况下,该方法仅将约束条件和板长作为修正参量,没有考虑焊缝区

域几何特征参数影响,限制了该修正方法的准确分析。

如图 5b 展示了不同缺陷类型下,以平均应变能为基础的应力集中系数对比,应力集中系数叠加和数值分析结果对比,结果相对保守.因此采用该方法的错位缺陷分析时,应充分考虑各缺陷参数间的耦合关系.平均应变能方法以应变能作为评估参量,相较于热点应力方法,较好的反应了几何不连续及潜在失效区域的应力状态,文中以平均应变能为基础进行疲劳可靠性的分析.基于数值分析方法,BP 神经网络方法可充分考虑不同类型错位的耦合关系,并进行各参数的隐层表达关系的拟合,显著增加分析准确性.通过上述有限元模型获取各几何参数条件下 SED 值,结合 SED 计算公式并采用 BP 神经网络建立局部分析模型.该隐性表达式可纳入不同测量参量,较好地反映各参量之间相互关系.为确保该模型分析效果,将各参数归一化后用于神经网络模型建立,以消除各参数间数值差异的影响.如图 6 展示了有限元和预测模型的差异统计图,误差主要分布在 0 值附近,且误差范围小,可以用于后续疲劳可靠性分析。

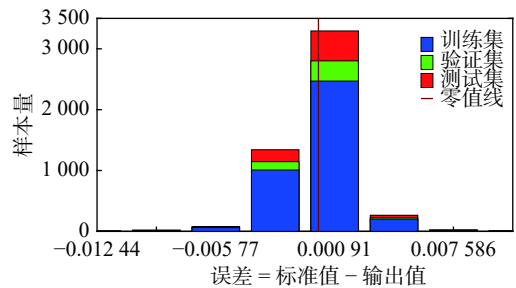


图 6 拟合误差直方图

Fig. 6 Fitting error histogram

## 2.2 几何特征对于局部应力状态的影响

基于有限元分析方法,图 7 展示了各几何参数 10% 变化率对于局部应力特征参量的影响.以含混合错位缺陷的焊接接头为例,10% 的板厚变化对于局部应力状态的影响最大.这是由于板厚的变化造成其他局部尺寸比例的相对减小,局部应力集中程度显著增加导致的.其次,混合错位对于 SED 的影响较大,显著大于单一错位效应的影响.因此定量探究错位及几何参数对于局部应力状态和疲劳寿命的影响具有重要意义,通过合理控制局部特征参数和缺陷参数改善缺口应力状态,合理的进行焊件疲劳寿命设计和检测。

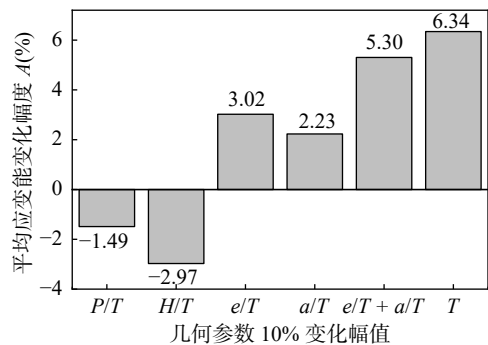
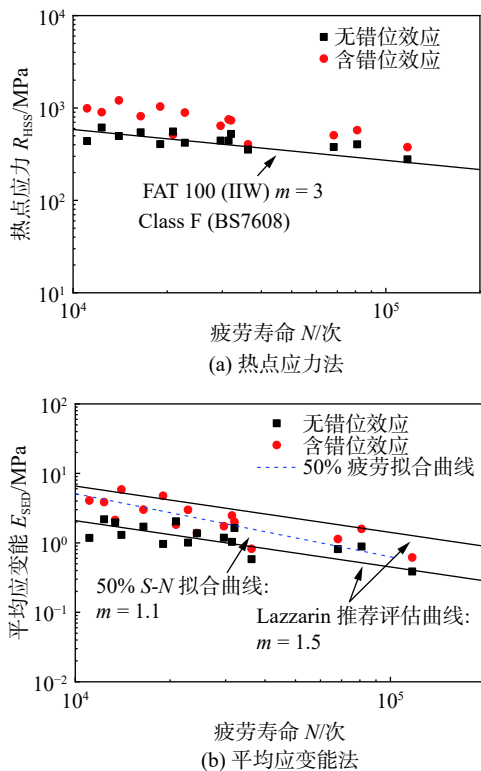


图7 几何特征参数影响

Fig. 7 Effect of geometric characteristic parameters

图8为平均应变能和热点应力方法下,含错位效应和无错位效应模型的双对数  $S-N$  曲线对比图.针对不同方法,疲劳评估标准 IIW、BS7608 和 Lazzarin 等人<sup>[15]</sup>推荐了相应的疲劳强度评估曲线.含错位效应的疲劳评估点局部应力状态变化明显,但均分布在相应的疲劳评估曲线上方,结果优于未考虑错位效应的疲劳评估点.另一方面,考虑错位的疲劳评估点的离散度具有一定程度的下降,尤其是对于平均应变能方法,这说明将缺陷特征参数考虑到  $S-N$  曲线评估方法是有效的.

图8  $S-N$  疲劳评估曲线对比Fig. 8 Comparison of  $S-N$  curves. (a) hot spot stress method; (b) average strain energy method

### 2.3 不确定参量化

不确定因素的量化分析是疲劳可靠性评估的

基础,将试验条件下不同几何、错位参数通过统计学方法进行概率描述.根据实验试样扫描和统计结果,位移错位和角错位服从极大值分布,极大值分布概率密度函数为:

$$f_{\text{Max}}(x) = \frac{1}{\sigma_i} e^{\frac{x-\mu_i}{\sigma_i}} \cdot e^{-\frac{x-\mu_i}{\sigma_i}} \quad (12)$$

式中:  $\mu_i$  为位置参数;  $\sigma_i$  为尺度参数; 和错位  $a$  和  $e$  的均值和离散程度等相关.如图9所示,是不同类型错位的极大值分布拟合图,位移错位和角错位的位置参数  $\mu_i$  分别为 0.366 3 和 0.855 3,尺度参数  $\sigma_i$  分别为 0.530 1 和 0.734 3.由于焊接过程中各类复杂因素的影响,造成错位缺陷的产生,极大值分布特征符合实际工程情况.经试验数据拟合参数和相关文献<sup>[16]</sup>说明,焊接接头  $S-N$  曲线参数及特征参数的分布类型等信息汇总在表1中.

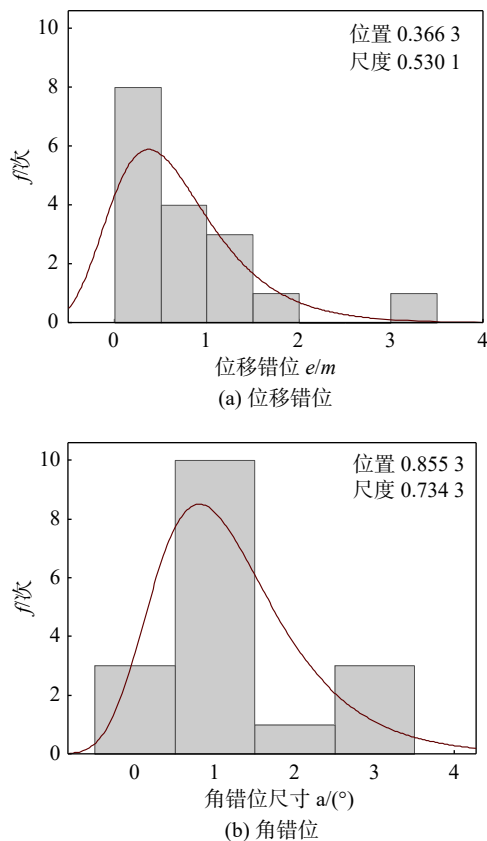


图9 位移和角错位概率分布曲线

Fig. 9 Probability distribution of axial and angular misalignment. (a) axial misalignment; (b) angular misalignment

### 2.4 可靠性分析

疲劳载荷是影响疲劳寿命的主要因素.如图10所示,绘制了在不确定参数条件下,载荷分别为 100 MPa、200 MPa、300 MPa、400 MPa 的疲劳寿命分布曲线.通过蒙特卡罗随机抽样求解的疲劳

表 1 影响因素统计数据

Table 1 statistical descriptors of influencing factors

影响因素	符号	分布类型	位置参数 $\mu$	尺度参数 $\sigma$
位移错位	$e$	极大值分布	0.3663	0.5301
角错位	$a$	极大值分布	0.8553	0.7343
板厚	$T$	正态分布	12、10	0.047 <sup>[16]</sup>
特征参数	$m$	常量	1.1	—
	$C$	正态分布	69322.1	0.057
累计损伤	$D_{cr}$	对数正态	1	0.1

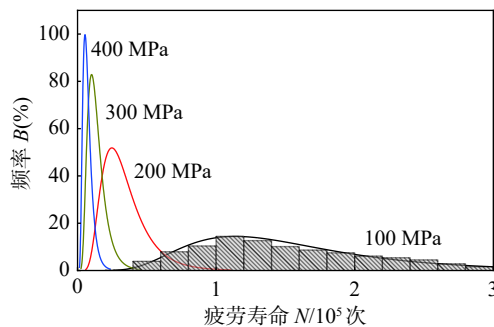


图 10 疲劳寿命概率分布曲线

Fig. 10 Probability distribution of fatigue life

寿命分布,可以采用极大值分布函数进行描述.疲劳寿命的分布是由于各不确定参数的分布类型造成的,主要包含了错位缺陷的影响.随着疲劳载荷幅值增加,疲劳寿命显著减小,其概率密度的尺度参数随之减小.可见,在应力幅度较小时,错位等不确定因素对于疲劳寿命的分布影响较大.

试验结果显示疲劳试样的疲劳载荷主要集中在 200 ~ 300 MPa,为说明该疲劳可靠性分析模型的准确性,如图 11 以模型计算和实验数据作为对比,分别绘制了 200 MPa 和 300 MPa 时疲劳寿命的累计分布及疲劳试验数据.试验疲劳试样的可靠概率较好的分布在 200 MPa 和 300 MPa 区域内,说明

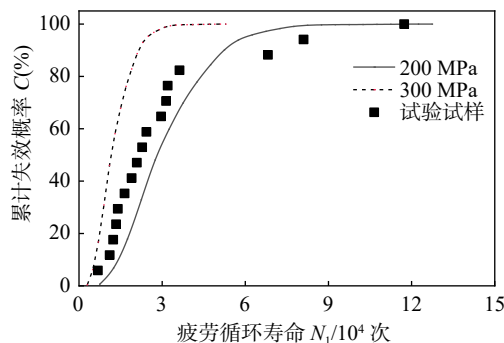


图 11 疲劳寿命累计分布函数

Fig. 11 Cumulative probability distribution of fatigue life

该疲劳模型可以用于该批试样的可靠性分析.从累计失效概率角度分析,随疲劳循环次数的增加,失效概率也不断增大.该模型中缺陷作为各载荷下的主要影响因素,直接影响疲劳寿命的分布状态.

图 12 展示分析了 100 MPa 疲劳载荷条件下错位缺陷对于疲劳可靠性的差异.随着疲劳寿命的增加,无错位缺陷试样疲劳失效概率显著好于含缺陷试样.含错位构件  $3.5 \times 10^4$  次循环载荷即出现失效现象,而无错位构件  $3.6 \times 10^5$  次循环载荷发生失效现象.此外,相同可靠概率下,疲劳寿命具有明显差异,含错位试样首先出现失效,错位的出现显著改变了局部缺口的应力状态和疲劳寿命分布.因此,定量分析错位效应的影响是研究结构的疲劳寿命时重要的评估过程.

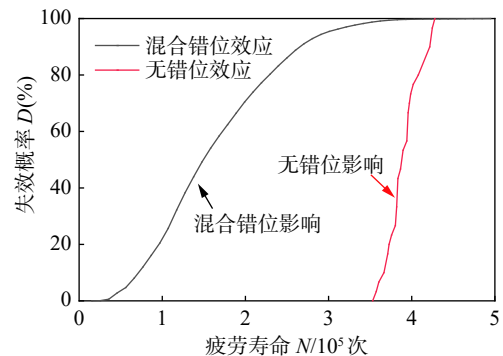


图 12 混合错位对于可靠性的影响

Fig. 12 Effect of misalignment on reliability

焊接接头质量受多方面因素影响,且由于焊接过程中各影响因素的复杂性,如钢材类型,焊接工艺,约束条件等,缺陷参数离散性受到影响,因此探究混合错位的尺度参数变化对于疲劳可靠性影响十分必要.根据  $S-N$  曲线及形状参数和特征参数的分布特征,通过引入缩放比例参数  $q$  对尺度参数进行缩放,进行不同混合错位缺陷离散度情况下疲劳寿命的分析.如图 13 所示,绘制了不同尺度参数缩放比例下疲劳寿命概率分布直方图.随着缩放比例的增加,疲劳寿命趋于减小,说明混合缺陷的离散程度对于疲劳寿命的分布较为显著,考虑焊接缺陷能提升疲劳强度评估的准确性.

以当前载荷和特征条件为基础,完全熔透 ( $P/T = 0.5$ ) 条件下的疲劳寿命为临界疲劳寿命,进行疲劳极限状态方程的构建.如图 14 绘制了不同缺陷参数离散度下可靠性指标的变化,其中横坐标是尺度参数的缩放比例  $q$ ,纵坐标为可靠性指标.随着尺度参数的比例的增加,即错位离散程度的增

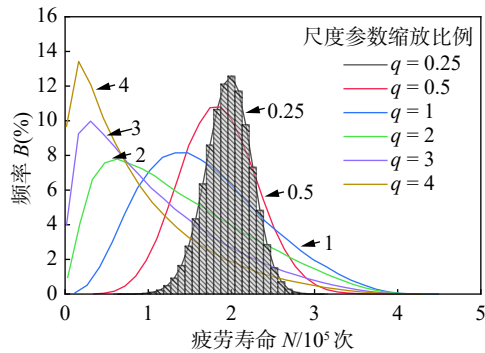


图 13 尺度参数缩放比例对疲劳寿命分布的影响

Fig. 13 Fatigue life distribution for different scale parameters

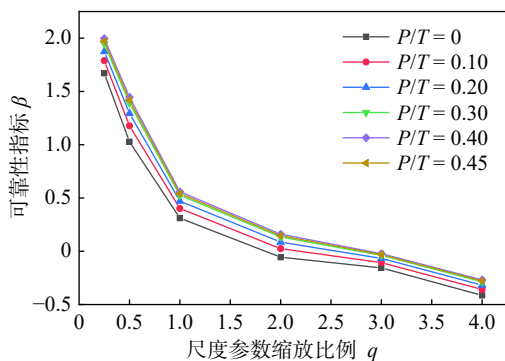


图 14 不同尺度参数缩放比例的可靠性指标

Fig. 14 Reliability index for different scale parameters

加, 疲劳可靠性指标显著下降. 当熔透率  $P=0$  时, 随着  $q$  的增加, 相应的可靠度由 97.9% 下降为 33.95%, 可见疲劳寿命的分布受混合错位尺度参数的显著影响. 因此在焊接过程中应严格控制缺陷质量, 以保证疲劳寿命评估结果的准确性.

### 3 结论

(1) 对承载十字焊接接头实验试样的和角错位进行统计学分析, 位移和角错位服从极大值分布类型, 且考虑焊缝几何特征和缺陷特征的评估方法在数据离散度方面具有明显优势.

(2) 基于平均应变能法的缺口应力状态分析结果, 接头几何特征参量对疲劳缺口特征值变化较为明显, 混合错位缺陷相较于单一错位缺陷对于局部应力状态的影响更加显著.

(3) 对比无错位缺陷的失效概率, 含错位焊接接头较早出现失效现象, 错位缺陷是焊接接头疲劳可靠性分析的重要影响因素. 此外, 随着尺度参数的增加, 疲劳可靠度显著下降. 特定条件下, 可靠度可由 97.9% 下降为 33.95%, 缺陷均值和离散度等

因素是影响疲劳可靠性的重要原因.

### 参考文献

- [1] Kang G, Luo H. Review on fatigue life prediction models of welded joint[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 36: 701 – 726.
- [2] Hobbacher A F. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [3] European Committee for Standardization. EN 1993-1-9. Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-9: Fatigue[S]. Brussels, Belgium, 2005.
- [4] British Standards Institution. Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures[M]. London, UK: British Standard Institution, 1999.
- [5] Amirafshari P, Barltrop N, Wright M, *et al.* Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 145: 106069.
- [6] Ahola A, Björk T. Fatigue strength of misaligned non-load-carrying cruciform joints made of ultra-high-strength steel[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106334.
- [7] Song W, Liu X, Berto F, *et al.* Strain energy density based fatigue cracking assessment of load-carrying cruciform welded joints[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2017, 167(90): 142 – 153.
- [8] 赵丙峰, 廖鼎, 朱顺鹏, 等. 机械结构概率疲劳寿命预测研究进展[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(16): 173 – 184.  
Zhao Bingfeng, Liao Ding, Zhu Shunpeng, *et al.* Probabilistic fatigue life prediction of mechanical structures: state of the art[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(16): 173 – 184.
- [9] 邓彩艳, 王红, 龚宝明, 等. 加载频率及焊接缺陷对 5A06 铝合金 TIG 焊接头超高周疲劳性能的影响[J]. *焊接学报*, 2015, 36(12): 61 – 64.  
Deng Caiyan, Wang Hong, Gong Baoming, *et al.* Effects of loading frequency and welding defects on very-high-cycle fatigue properties of 5A06 aluminum alloy TIG welded joints[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(12): 61 – 64.
- [10] Dong Y, Teixeira A P, Soares C G. Fatigue reliability analysis of butt welded joints with misalignments based on hotspot stress approach[J]. *Marine Structures*, 2019, 65: 215 – 228.
- [11] Qiu Y, Shen W, Yan R, *et al.* Fatigue reliability evaluation of thin plate welded joints considering initial welding deformation[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 236: 109440.
- [12] 柯爽. 航空发动机涡轮轴的疲劳寿命预测与疲劳可靠性分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
Ke Shuang. Fatigue Life Prediction and fatigue reliability analysis of aero-engine turboshaft[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

[下转第 34 页]



- ness in metallic materials using single edge notched tension (SENT) specimens[S]. London: British Standards Institution, 2018.
- [13] BMT Fleet Technology. Measurement of crack-tip opening displacement (CTOD) and J-fracture resistance curves using single edge notched tension (SENT) specimens[S]. British: BMT Fleet Technology, 2013.
- [14] 龚宝明, 田润明, 刘秀国, 等. 基于单边缺口拉伸试样的环缝接头阻力曲线确定方法对比 [J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 21 – 28.
- Gong Baoming, Tian Runming, Liu Xiuguo, *et al.* Comparative study on determination methods of resistance curves of circular joints based on single edge notched tensile specimens[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(5): 21 – 28.
- [15] Moore P L, Pisarski H G, London T. Validation of methods to determine CTOD from SENT specimens [C]//The 22nd International Ocean and Polar Engineering Conference. Rodos Palace Hotel, 2012.
- [16] Zhu X K, Paul Z, Tom M. Comparative study of CTOD-resistance curve test methods for SENT specimens[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 172: 17 – 38.
- [17] Verstraete M A, Denys R M, Van Minnebruggen K, *et al.* Determination of CTOD resistance curves in side-grooved single-edge notched tensile specimens using full field deformation measurements[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 110: 12.
- [18] Pisarski, Henryk. Treatment of fracture toughness data for engineering critical assessment (ECA)[J]. Welding in the World, 2017, 61(4): 1 – 10.
- [19] Xia Ziyu, Peng Sheng, Miao Zhangmu, *et al.* Research on the fracture toughness and remaining life of pipeline steel X70 based on the probability method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(3): 301 – 306.
- [20] 夏子钰, 苗张木. 基于 SINTAP 的管线钢 X70 断裂韧性 CTOD 分布规律及检验分析 [J]. 焊接学报, 2017, 38(9): 124 – 128.
- Xia Ziyu, Miao Zhangmu, Peng Sheng. CTOD distribution law and distribution fitting of pipeline steel X70 based on SINTAP[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(9): 124 – 128.
- 第一作者: 王磊, 博士, 高级工程师. 主要从事高钢级管线管设计开发及断裂变形能力评估; Email: wanglei200829@163.com.

(编辑: 张基隆)

#### [ 上接第 26 页 ]

- [13] 陈秉智, 何正平, 李向伟, 等. 某构件焊缝疲劳开裂的寿命预测方法应用对比 [J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 63 – 68.
- Chen Binzhi, He Zhengping, Li Xiangwei, *et al.* Comparison of fatigue life predicting methods used in cracked welded component[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(5): 63 – 68.
- [14] Lazzarin P, Zambardi R. A finite-volume-energy based approach to predict the static and fatigue behavior of components with sharp V-shaped notches[J]. International Journal of Fracture, 2001, 112: 275 – 298.
- [15] Lazzarin P, Berto F, Gomez F J, *et al.* Some advantages derived from the use of the strain energy density over a control volume in fatigue strength assessments of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(8): 1345 – 1357.
- [16] 许金锦. 水下生产系统脐带缆抗疲劳优化设计及疲劳可靠性分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- Xu Jinjin. The fatigue optimization design and reliability analysis of umbilical in subsea production system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- 第一作者: 宋威, 博士, 副教授; 主要从事焊接结构力学及可靠性评价研究, 金属材料及焊接接头的缺口疲劳效应研究以及含缺陷结构完整性评估技术及应用等工作. Email: swingways@hotmail.com.

(编辑: 张基隆)