

基于零点有效缺口应力的薄板焊接接头疲劳评估

舒伟¹, 高静坤¹, 李海峰¹, 邓彩艳², 刘强¹, 龚宝明²

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 天津, 300451; 2. 天津大学, 材料科学与工程学院, 天津, 300354)

摘要: 文中采用零点有效缺口应力进行了薄板焊接接头的疲劳评估研究。该方法综合考虑整体结构应力以及缺口根部到零点位置的非线性峰值应力的影响, 以临界距离法和零点结构应力法为基础, 将零点应力位置作为缺口对结构疲劳影响的临界距离对焊接结构进行疲劳强度评估。通过对两种不同类型的焊接接头试样 (T 形单面焊接接头和不同厚度组合搭接接头) 的疲劳试验结果进行拟合。结果表明, 在对焊根失效的试样进行疲劳评估时, 焊根位置不同截面应力线性化之后得到零点有效缺口应力存在较大差异; 其中, 焊脚截面应力线性化得到的 S-N 曲线分散带宽度最小; 再者, 同时考虑焊趾和焊根失效的零点有效缺口应力 S-N 曲线, 与分别考虑焊趾或焊根失效的零点有效缺口应力 S-N 曲线分散带相差不大, 证明该方法可同时用于焊接接头焊趾和焊根疲劳评估。

创新点: (1) 提出了一种以零点有效缺口应力为评估参量的疲劳寿命评估的新方法。

(2) 确定了评估焊根失效时的应力线性化的最优截面。

(3) 验证了该评估方法同时评估焊接接头焊趾和焊根疲劳性能的有效性。

关键词: 零点有效缺口应力; 焊接接头; 疲劳评估

中图分类号: TG 405 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20230731002

Fatigue assessment of thin plate welded joints based on zero-point effective notch stress

SHU Wei¹, GAO Jingkun¹, LI Haifeng¹, DENG Caiyan², LIU Qiang¹, GONG Baoming²

(1. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300451, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300354, China)

Abstract: In this paper, the fatigue assessment of welded joints in thin plates was conducted using zero-point effective notch stress. This method comprehensively considered the influence of overall structural stress and the nonlinear stress peak at the root of the notch to the zero-point position. Based on the critical distance method and zero-point structural stress method, the zero-point stress position was taken as the critical distance for the fatigue assessment of welded structures. Through fitting the fatigue test results of two different types of welded joint specimens (T-type single-sided welded joint and lapped joint with different thickness combinations), the results showed that there were significant differences in the zero-point effective notch stress when evaluating specimens with different cross-sectional stress linearization at the weld root. Among them, the width of the scattered band of the S-N curves obtained by linearizing the stress at the weld toe cross-section was the smallest. Furthermore, the difference of scattered bands between the S-N curves of considering for weld toe cross-section and weld root failure simultaneously and separately was not significant, proving that this method could be used simultaneously for fatigue assessment of both weld toe and weld root in welded joints.

Highlights: (1) A new method was proposed for fatigue life assessment using zero-point effective notch stress as the evaluation parameter.

(2) The optimal cross-section for stress linearization when assessing weld root failure was determined.

(3) The effectiveness of this assessment method for simultaneously evaluating the fatigue performance of both weld toe and weld root in welded joints was verified.

Key words: zero-point effective notch stress; welded joints; fatigue assessment

0 序言

疲劳破坏是焊接结构中最主要的失效模式之一,这是由于即使构件某些区域承载载荷低于弹性极限,其仍会发生疲劳失效^[1-3].因此,疲劳性能对焊接结构安全运行有着至关重要的意义,准确评估焊接结构疲劳寿命成为近年来国内外焊接领域的研究热点.目前国内众多学者基于焊接接头位置不同的应力、应变或者能量参数,提出了名义应力法、热点应力法、缺口应力法和应变能密度法等焊接结构疲劳设计与寿命评估方法^[4].其中,缺口应力法提取的参量是基于局部缺口特征(焊趾、焊根)产生的非线性峰值应力,使得其评估结果更加精准.

基于 Taylor^[5]对缺口应力的研究,诸多学者在对结构的疲劳评估中发现,结构的疲劳强度不仅取决于缺口产生的峰值应力,同时还与距离缺口根部一定范围内的整体应力水平有关^[6-8].在此基础上,Taylor^[9]总结并提出了适用于缺口结构的疲劳性能评估和预测的方法,即临界距离法.其核心思想是根据缺口的形状存在一个与材料性能相关的临界距离,通过计算该临界距离内的应力、应变或者能量参量可以建立与结构疲劳强度的关系,该方法已经被证明可以应用于不同焊接结构的疲劳强度评估^[10-11].然而,关于临界距离的确定目前还没有统一的方法. Liu 等人^[12]提出了一种基于零点结构应力的焊接结构疲劳评估的方法,采用结构应力作为焊接接头疲劳评估参量.所定义的零点是非线性峰值应力为零的位置,即缺口应力与结构应力相等的位置.因为非线性峰值应力在整个厚度方向上为自平衡应力,所以一定会存在 1 个零点位置 d_0 ,使得缺口应力等于结构应力.零点结构应力法将零点位置作为区分结构是否受局部缺口影响的临界位置,即距离缺口根部的距离大于 d_0 时,结构疲劳强度不受局部缺口的影响,距离缺口根部的距离小于 d_0 时,结构疲劳强度会受到局部缺口的影响.

文中以临界距离法^[9]和零点结构应力法^[12]为基础,将零点位置作为缺口对结构疲劳影响的临界距离,综合考虑整体结构应力以及缺口根部到零点

$$\int_0^t \sigma_m \left(\frac{t}{2} - x \right) dx + \int_0^t \sigma_b \left(1 - \frac{2x}{t} \right) \left(\frac{t}{2} - x \right) dx + \int_0^t \sigma_{nlp}(x) \left(\frac{t}{2} - x \right) dx = \int_0^t \sigma_y(x) \left(\frac{t}{2} - x \right) dx \quad (3)$$

位置的非线性应力峰值的影响,提出了一种以零点有效缺口应力(zero-point effective notch stress, σ_{zp})为评估参量的疲劳寿命评估的新方法,并对不同类型的薄板焊接接头试样进行疲劳寿命评估,验证该方法的适用性.

1 零点有效缺口应力的计算方法

通过有限元分析可确定在外部施加载荷 F 作用下焊接接头沿厚度方向 x 的节点应力分布,如图 1 所示.节点应力为与单元网格尺寸对应的离散数据点,通过数据拟合可以获得其应力分布函数 $\sigma_y(x)$.此应力分布可以分解为 3 个部分:薄膜应力 $\sigma_m(x)$ 、弯曲应力 $\sigma_b(x)$ 和非线性峰值应力 $\sigma_{nlp}(x)$.

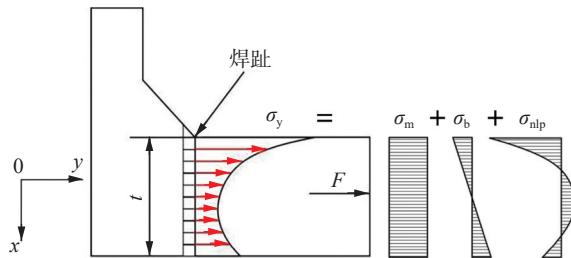


图 1 焊接接头厚度方向应力分布

Fig. 1 Stress distribution in the thickness direction of welded joints

以缺口根部为坐标原点,在厚度方向上建立力的平衡方程为

$$\int_0^t \sigma_m dx + \int_0^t \sigma_b \left(1 - \frac{2x}{t} \right) dx + \int_0^t \sigma_{nlp}(x) dx = \int_0^t \sigma_y(x) dx \quad (1)$$

式中: σ_m 为薄膜应力 (MPa); σ_b 为弯曲应力 (MPa); σ_{nlp} 为非线性峰值应力 (MPa); σ_y 为节点应力 (MPa); t 为接头厚度 (mm); x 为沿厚度方向距缺口根部的距离 (mm).

弯曲应力在整个厚度方向上是线性分布并且关于厚度方向的中点对称,因此弯曲应力的合力为零;非线性峰值应力在整个厚度方向为自平衡应力,故其合力也为零.因此,可以得到均匀分布的薄膜应力 σ_m 为

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_y(x) dx \quad (2)$$

以厚度方向的中点为坐标原点,在厚度方向上建立力矩平衡方程为

由于薄膜应力在厚度方向上均匀分布, 因此薄膜应力对中点的合力矩为零, 式(3)可以简化为

$$\sigma_m = \frac{2}{t^2} \int_0^t \sigma_y(x) \left(\frac{t}{2} - x \right) dx \quad (4)$$

根据式(2)和式(4)求解得到的薄膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_b 可以求得非线性峰值应力分布为

$$\sigma_{nlp}(x) = \sigma_y(x) - \sigma_m - \sigma_b \left(1 - \frac{2x}{t} \right) \quad (5)$$

基于以上分析, 必须要获得厚度方向上的精确的应力分布才可以对节点应力进行应力线性化处理。然而, 有限元软件中, 缺口附近的应力分布与网格尺寸有着密切的关系, 这就意味着在实际有限元仿真分析过程中, 需要采用精细的网格来进行仿真计算, 这会增加有限元网格的数目, 增加计算时间, 尤其是对于大型复杂结构来说, 采用精密网格进行有限元计算是不切实际的, 通常会采用子模型技术进行关键部位的应力计算。Dong^[13]提出的基于节点力的线性化方法不具有网格敏感性, 但需要注意的是, 零点临界距离法中非线性峰值应力的计算需要依据厚度方向上的应力分布; 因此, 基于节点力的方法并不能应用到零点有效缺口应力的计算。根据所求的薄膜应力 $\sigma_m(x)$ 和弯曲应力 $\sigma_b(x)$, 结构应力 $\sigma_s(x)$ 可以表示为

$$\sigma_s(x) = \sigma_m(x) + \sigma_b(x) = \sigma_m + \left(1 - \frac{2x}{t} \right) \sigma_b \quad (6)$$

$x=0$ 时的结构应力即为结构热点应力 σ_{hs} 。结构热点应力被广泛应用于焊接结构的疲劳评估中, 然而结构热点应力只考虑一次应力的影响, 并未考虑由局部缺口引起峰值应力的影响, 而在美国机械工程师学会规范中明确指出了疲劳分析时需要综合考虑一次应力、二次应力和峰值应力的影响^[14]。根据式(5)可以获得零点位置 d_0 为

$$d_0 = \frac{\sigma_m + \sigma_b - \sigma_y(x)}{2\sigma_b} t \quad (7)$$

采用与获得结构应力相同的方式处理缺口位置到零点的非线性峰值应力, 即对缺口位置到零点位置的非线性峰值应力进行线性化处理, 并将线性化之后的应力定义为两个分量为

$$\sigma_m^p = \frac{1}{d_0} \int_0^{d_0} \sigma_{nlp}(x) dx \quad (8)$$

$$\frac{\sigma_m^p d_0^2}{2} + \frac{\sigma_b^p d_0^2}{2} = \int_0^{d_0} x \sigma_{nlp}(x) dx \quad (9)$$

式中: σ_m^p 为峰值薄膜应力 (MP); σ_b^p 为峰值弯曲应力 (MP)。

将峰值薄膜应力和峰值弯曲应力两者相加为

$$\sigma_{hs}^p = \sigma_m^p + \sigma_b^p \quad (10)$$

式中: σ_{hs}^p 为峰值热点应力 (MPa)。

由式(6)和式(10)可以得到用于结构疲劳强度评估的零点有效缺口应力 σ_{zp} , 其为结构热点应力 σ_{hs} 和峰值热点应力 σ_{hs}^p 之和, 即

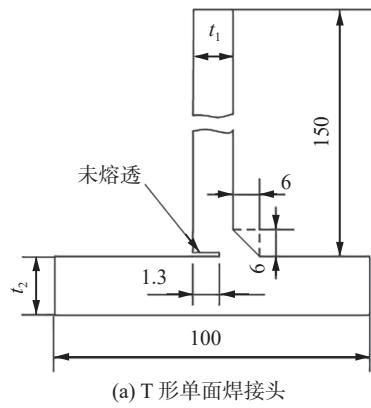
$$\sigma_{zp} = \sigma_{hs} + \sigma_{hs}^p \quad (11)$$

综上所述, 零点有效缺口应力的计算过程考虑了缺口对于整体结构的影响(结构热点应力)以及缺口对于局部应力的影响(峰值热点应力), 反映的是整个厚度方向上的应力分布情况, 与文献[15]研究结果相符合。

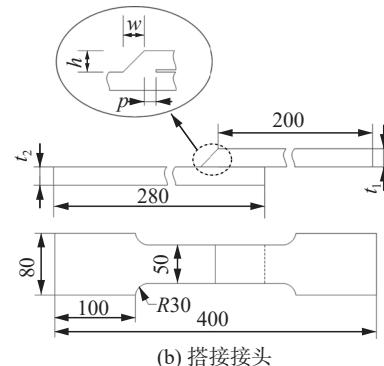
2 试验结果与分析

2.1 疲劳试验机试验结果

针对两种不同类型的焊接接头试样进行疲劳试验, 即 T 形单面焊接头和搭接接头。其中搭接接头有两种不同的厚度组合(搭接接头-A、搭接接头-C)。通过 Smart zoom 5 超景深三维数码显微镜确定焊接接头熔深、焊脚尺寸等局部几何尺寸信息, 试样示意图如图 2 所示, 图 2 中的板厚、熔深和焊脚



(a) T 形单面焊接头



(b) 搭接接头

图 2 试样几何尺寸 (mm)

Fig. 2 Geometric dimensions of the sample. (a) T-joints; (b) lapped joints

等具体尺寸如表 1 所示。疲劳试验设备采用 GPS 300 型高频疲劳试验机, 该试验机最大静载荷为 300 kN, 最大动载 150 kN。T 形接头和搭接接头载荷类型均为单轴拉伸。疲劳试验中所有规格搭接接头和 T 形接头所采用的应力比 R 均为 0.1, 试验过程中设置频率保护。当试验机频率大幅度下降或者试样断裂保护, 并且试样能观察到明显裂纹时, 认为试件发生疲劳失效。疲劳试验结果具体数值如表 2 和表 3 所示。除未发生疲劳失效的试样之外, T 形接头全部为焊根失效; 搭接接头-A 均为焊趾失效; 搭接接头-C 大部分为焊根失效, 少数为焊趾失效。

表 1 试样具体尺寸
Table 1 Specific dimensions of the samples

试样形式	腹板厚度 t_1 / mm	底板厚度 t_2 / mm	熔深 h / mm	焊脚 w / mm	未熔透 p / mm
T形接头	2.8	7.8	6.0	6.0	1.3
搭接接头-A	2.8	3.7	2.8	2.8	3.0
搭接接头-C	9.7	4.7	6.9	5.6	1.1

表 2 T 形单面焊接头疲劳数据
Table 2 Fatigue datas of T-joints

序号	应力范围 $\Delta\sigma / \text{MPa}$	循环次数 N/次	失效位置
1	214	15636	焊根
2	161	37428	焊根
3	107	95511	焊根
4	107	171387	焊根
5	107	90984	焊根
6	96	644355	焊根
7	96	292204	焊根
8	96	576643	焊根
9	86	392585	焊根
10	86	584343	焊根
11	75	1079541	焊根
12	75	3877063	焊根
13	75	1006136	焊根
14	64	1402427	焊根
15	64	2736823	焊根
16	64	10000000	未失效

2.2 零点有效缺口应力的确定

通过建立试样的二维平面应变有限元模型确

表 3 搭接接头疲劳数据
Table 3 Fatigue data of lapped joints

序号	应力范围 $\Delta\sigma / \text{MPa}$	循环次数 N/次	失效位置
A-1	92	155434	焊趾
A-2	92	528006	焊趾
A-3	83	1102545	焊趾
A-4	83	425066	焊趾
A-5	83	374675	焊趾
A-6	83	2313522	焊趾
A-7	83	570955	焊趾
A-8	75	1116623	焊趾
A-9	75	530224	焊趾
A-10	75	1194911	焊趾
A-11	75	1356180	焊趾
A-12	75	281967	焊趾
A-13	67	1496709	焊趾
A-14	67	10000000	未失效
C-1	133	41314	焊根
C-2	111	88463	焊根
C-3	111	14729	焊根
C-4	100	91642	焊根
C-5	100	330274	焊趾
C-6	89	122878	焊根
C-7	89	124191	焊根
C-8	89	70257	焊根
C-9	78	181142	焊根
C-10	78	1069192	焊趾
C-11	78	600284	焊趾
C-12	67	1028448	焊根
C-13	67	1623832	焊趾
C-14	67	10000000	未失效

定对应接头类型的零点有效缺口应力, T 形单面焊接头和搭接接头边界条件和载荷设置如图 3 所示。其中焊趾位置按照过度半径 $\rho = 0$ 建模, 因焊根位置需要提取不同截面的应力分布, 因此需要对模型进行不同的分割处理。为了便于施加载荷与划分网格以及后处理中提取焊根不同位置应力分布, 在模型上进行不同角度的分割处理, 如图 4 所示。对于

T形接头, 均为焊根失效, 仅提取焊根位置不同截面的应力分布; 对于搭接接头-A, 均为焊趾失效, 仅提取焊趾位置截面的应力分布。由于缺口根部附近存在着应力奇异性, 因此对缺口根部一定范围内的区域进行网格细化, 网格尺寸设置为 0.01 mm, 网格类型为 4 节点减缩积分平面应变单元, 如图 5 所示。

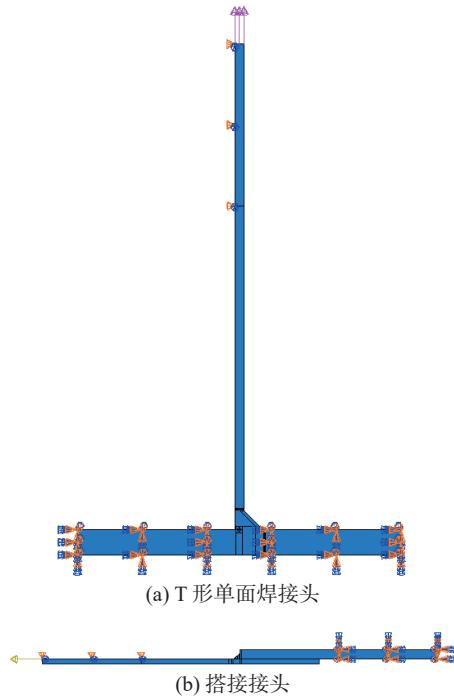


图 3 边界条件和载荷设置

Fig. 3 Setting of boundary condition and load. (a) T-joint; (b) lapped joint

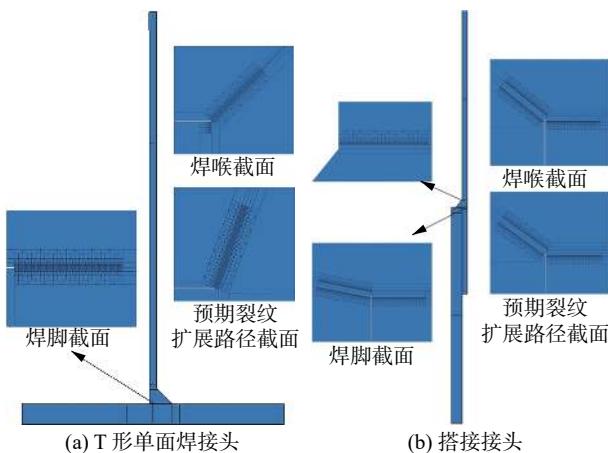


图 4 零点临界距离法有限元模型

Fig. 4 Finite element model of zero-point critical distance method. (a) T-joint; (b) lapped joint

以 T 形单面焊接头焊脚截面的应力处理过程为例, 详细介绍零点有效缺口应力的计算, 计算结果如图 6 所示。首先, 提取 T 形焊接接头焊脚截面

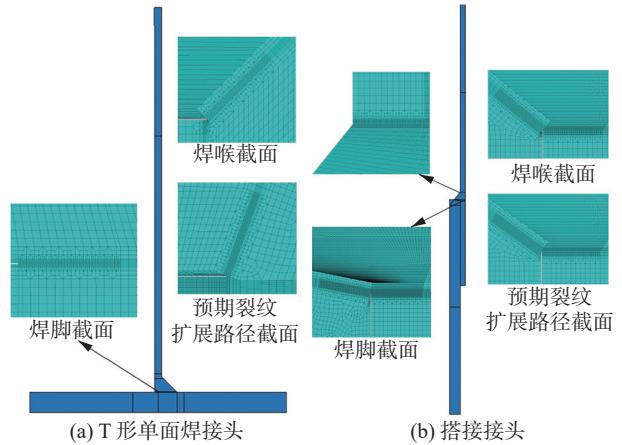
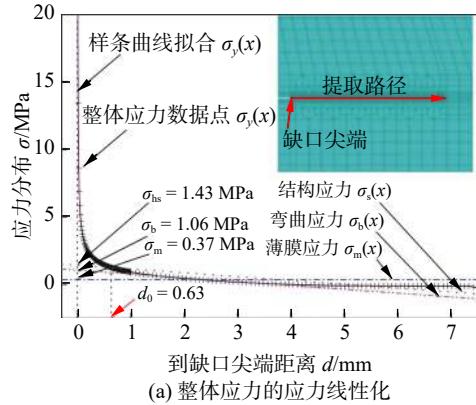
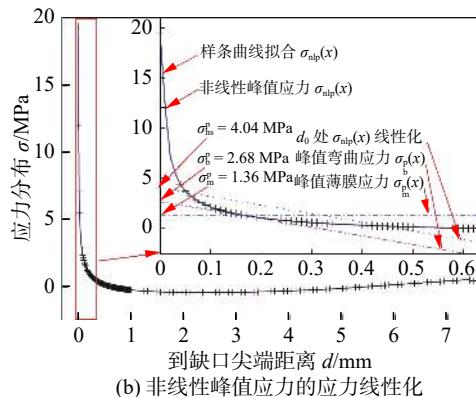


图 5 有限元模型网格划分

Fig. 5 Mesh of finite element model. (a) T-joint; (b) lapped joint



(a) 整体应力的应力线性化



(b) 非线性峰值应力的应力线性化

图 6 应力线性化过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of stress linearization process. (a) stress linearization of overall stress; (b) stress linearization of nonlinear peak stress

上的法向应力分布, 如图 6(a) 中的“+”符号所示, 由于缺口的存在, 在缺口附近的总应力 $\sigma_y(x)$ 存在高度的非线性化。要计算结构热点应力分量, 需要根据式(2) 和式(4) 分别获得薄膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_b , 这就需要对图 6(a) 所示的应力分布进行积分运算, 由于此时的数据为离散的数据点, 需要对数据进行拟合获得其分布函数。图 6(a) 给出了拟合的

样条曲线, 样条曲线与数据点完全吻合。根据式(2)和式(4), 可以得到薄膜应力 σ_m 和弯曲应力 σ_b 分别为 0.37 MPa 和 1.06 MPa。根据式(6)可以获得结构应力分布 $\sigma_s(x)$, 如图 6(a)所示, 在缺口根部的结构应力定义为结构热点应力 $\sigma_{hs}=1.43$ MPa。根据整体应力分布 $\sigma_y(x)$ 和结构应力分布 $\sigma_s(x)$, 可以确定“零点”的位置 $d_0=0.63$ mm。

非线性峰值应力 $\sigma_{nlp}(x)$ 是整体应力分布 $\sigma_y(x)$ 和结构应力分布 $\sigma_s(x)$ 的差值, 如图 6(b)所示。非线性峰值应力为自平衡应力, 即在整个截面上的合力和合弯矩均为零。非线性峰值应力在 d_0 范围内的线性化处理过程与整体应力 $\sigma_y(x)$ 的线性化处理过程类似, 首先基于样条曲线拟合以及样条曲线积分来获得峰值薄膜应力 σ_m^p 和峰值弯曲应力 σ_n^p , 分别为 1.36 MPa 和 2.68 MPa。峰值热点应力 σ_{hs}^p 为峰值薄膜应力和峰值弯曲应力之和为 4.04 MPa。结构热点应力和缺口热点应力相加即为零点有效缺口应力 σ_{zp} , 为 5.47 MPa。为了实现对不同缺口零点有效缺口应力的计算, 采用 Python 语言编写了 ABAQUS 应力自动提取以及零点有效缺口应力自动计算的脚本程序。

2.3 评估结果

将所有类型焊接接头零点有效缺口应力-寿命数据绘制为 S-N 曲线并对疲劳数据进行拟合。分别计算每种类型焊接接头 S-N 曲线分散带宽度以及整体疲劳数据 S-N 曲线分散带宽度, 以 T_σ 表示, 其表达式为

$$T_\sigma = 1 : \frac{\Delta\sigma(N=2 \times 10^6, P_s = 5\%)}{\Delta\sigma(N=2 \times 10^6, P_s = 95\%)} \quad (12)$$

式中: $\Delta\sigma(N=2 \times 10^6, P_s = 5\%)$ 和 $\Delta\sigma(N=2 \times 10^6, P_s = 95\%)$ 分别表示存活率为 5% 和 95% 的 S-N 曲线对应的循环次数为 2×10^6 次所对应的疲劳强度。

针对 T 形接头、搭接接头-A 和搭接接头-C, 提取焊趾位置厚度方向应力以及焊根位置不同截面应力线性化之后得到零点有效缺口应力集中系数, 建立的零点有效缺口应力 S-N 曲线参数如表 4 所示。由表 4 可知, 通过对焊脚截面应力线性化得到的 S-N 曲线分散带宽度最小 ($m=6.7, T_\sigma=1:1.74$), 对应的 95% 存活率 S-N 曲线在循环次数为 2×10^6 次下的疲劳强度 (fatigue strength at 2×10^6 cycle, F_a) 为 343 MPa, S-N 曲线如图 7 所示, 说明焊

脚截面的应力分布更能准确地反映焊根位置应力状态。从图 8 的搭接接头-C 疲劳裂纹来看, 疲劳裂纹扩展方向与焊脚截面基本吻合, 这从另一方面解释了通过焊脚截面应力线性化得到的 S-N 曲线分散带宽度最小的原因。

表 4 S-N 曲线参数

Table 4 S-N curve parameters

位置	斜率 m	分散带宽度 T_σ
焊脚截面	6.7	1:1.74
焊喉截面	6.4	1:2.71
预期裂纹扩展截面	6.2	1:6.59

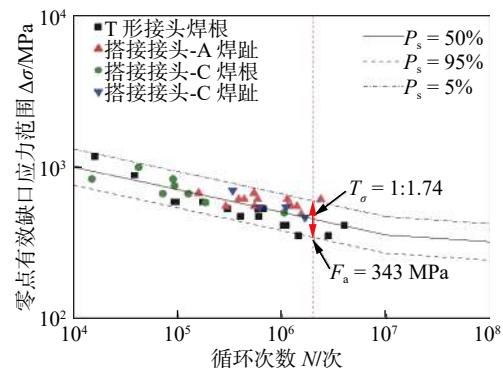


图 7 零点有效缺口应力 S-N 曲线

Fig. 7 S-N curve of zero-point effective notch stress



图 8 搭接接头-C 疲劳断裂试样示意图

Fig. 8 Schematic diagram of lapped joint-C fatigue fracture

在采用零点有效缺口应力法, 也对焊趾失效和焊根失效分别评估, 拟合获得的 S-N 曲线如图 9 所示, S-N 曲线参数如表 5 所示。焊趾失效疲劳数据拟合得到的零点有效缺口应力 S-N 曲线参数为 $m=11.5, T_\sigma=1:1.44$, 95% 存活率 S-N 曲线 F_a 为 440 MPa。焊根位置处, 通过对焊脚截面应力线性化得到的零点有效缺口应力 S-N 曲线分散带宽度最小 ($m=5.2, T_\sigma=1:1.60$), 95% 存活率 S-N 曲线 F_a 为 303 MPa, 对应的 S-N 曲线如图 9(b) 所示。

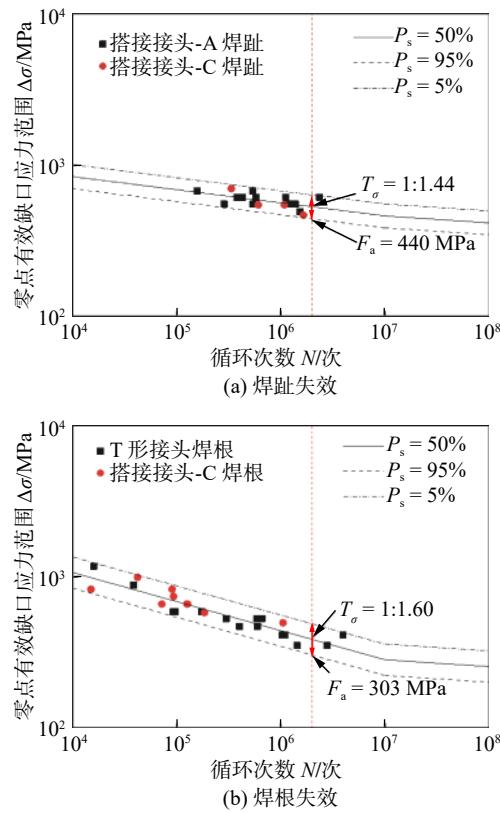


图9 基于零点有效缺口应力的焊趾和焊根失效S-N曲线
Fig. 9 S-N curve of weld toe and root fatigue failure based on zero-point effective notch stress. (a) weld toe failure; (b) weld root failure

表5 焊趾和焊根疲劳失效S-N曲线参数

Table 5 S-N curve parameters for fatigue failure of weld toe and root

位置	斜率 m	分散带宽度 T_σ
焊趾	11.5	1:1.44
焊脚截面	5.2	1:1.60
焊喉截面	4.2	1:2.36
预期裂纹扩展截面	3.2	1:5.43

3 结论

(1) 两种不同类型焊接接头试样的疲劳试验结果表明, 疲劳失效位置与焊接接头形式和接头尺寸有关, 即T形接头全部为焊根失效; 搭接接头-A均为焊趾失效; 搭接接头-C大部分为焊根失效, 少数为焊趾失效。

(2) 构建了基于零点有效缺口应力的疲劳S-N曲线。其中, 在提取焊根零点有效缺口应力时, 不同截面应力线性化之后得到零点有效缺口应力存在差异, 其中对焊脚截面应力线性化得到的S-N曲

线分散带宽度最小。

(3) 采用零点有效缺口应力分别确定焊趾和焊根失效的S-N曲线分散带分别为1:1.44和1:1.60, 与综合考虑焊趾和焊根失效的分散带宽度1:1.74之间相差不大, 表明了零点有效缺口应力方法适用于同时评估焊接接头焊趾和焊根疲劳性能。

参考文献

- [1] 周韶泽, 郭硕, 陈秉智, 等. 焊接结构超高周疲劳主S-N曲线拟合及寿命预测方法 [J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 76–82.
Zhou Shaoze, Guo Shuo, Chen Bingzhi, et al. Master S-N curve fitting and life prediction method for very high cycle fatigue of welded structures[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(5): 76–82.
- [2] 邓彩艳, 刘庚, 龚宝明, 等. 基于 Tanaka-Mura 位错模型的疲劳裂纹萌生寿命预测 [J]. 焊接学报, 2021, 42(1): 30–37.
Deng Caiyan, Liu Geng, Gong Baoming, et al. Fatigue crack initiation life prediction based on Tanaka-Mura dislocation model[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(1): 30–37.
- [3] 胡鑫, 李艳青, 黄进浩. HFMI 处理的钢制焊接接头疲劳评估模型探讨 [J]. 焊接学报, 2022, 43(3): 80–86.
Hu Xin, Li Yanqing, Huang Jinhao. Discussion on fatigue evaluation models of steel welded joints treated by HFMI[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(3): 80–86.
- [4] Xing S Z, Pei X J, Mei J F, et al. A novel elastic strain energy density approach for fatigue evaluation of welded components[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 293: 109713.
- [5] Taylor D. The theory of critical distances: a history and a new definition[J]. Structural Durability & Health Monitoring, 2006, 2(1): 1–10.
- [6] He J C, Zhu S P, Tilahun A T, et al. Evaluation of critical distance, highly stressed volume, and weakest-link methods in notch fatigue analysis[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 162: 106950.
- [7] Vikram A R, Kumar S P, Akhilendra S. Influence of uniaxial and equi-biaxial tensile pre-straining on the high cycle and notch fatigue behaviour of AA2024-T4 aluminium alloy[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 128: 104176.
- [8] Zhu S P, Ye W L, Correia J A, et al. Stress gradient effect in met-

- al fatigue: review and solutions[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103513.
- [9] Taylor D. The theory of critical distances: a review of its applications in fatigue[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(7): 1706 – 1724.
- [10] Liao D, Zhu S P, Qian G. Multiaxial fatigue analysis of notched components using combined critical plane and critical distance approach [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 160, 38 – 50.
- [11] Ye W L, Zhu S P, Niu X P, et al. Fatigue life prediction of notched components under size effect using critical distance theory[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103519.
- [12] Liu G, Zhao X L, Huang Y. Prediction of stress distribution along the intersection of tubular T-joints by a novel structural stress approach[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 80: 216 – 230.
- [13] Dong P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(10): 865 – 876.
- [14] American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Committe. 2021 section VIII, rules for construction of pressure vessels [S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- [15] Liu Y, Deng C Y, Gong B M, et al. Fatigue limit prediction of notched plates using the zero-point effective notch stress method[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 151: 106392.

第一作者:舒伟, 硕士, 高级工程师; 主要研究方向为焊接疲劳对于海洋石油钢结构设施的影响及改善方式, 采用先进焊接方式改善和提高焊接效率并提高焊接质量. Email: shuwei2@cooec.com.cn

通信作者:龚宝明, 博士, 副教授, 博士生导师; Email: gong_bm@tju.edu.cn.

(编辑: 汤明日)