

# 基于缺口应力法的 IIW 多轴疲劳准则分析

胡 鑫<sup>1,2</sup>, 严仁军<sup>1,2</sup>, 湛 伟<sup>1,2</sup>, 胡耀愚<sup>1,2</sup>, 何 丰<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 高性能舰船技术教育部重点实验室, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 交通学院, 武汉 430063;  
3. 湖北航达科技有限公司, 武汉 430040)

**摘 要:** 焊接接头的多轴疲劳强度评估是领域内的复杂课题. 结合缺口应力法, 利用 IIW 多轴疲劳准则对已公开发表的文献中的多轴疲劳试验数据进行了重新评估. 结果表明, 缺口应力系统下的比例加载与非比例加载数据点重合性较好; IIW 推荐的单轴疲劳评估 S-N 曲线不适用于多轴疲劳评估, 循环次数在  $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$  范围内时, 可能得到偏危险的评估结果; 而高于  $1 \times 10^5$  次时, 评估结果过于保守. 基于此, 拟合得到了存活率  $P_s = 97.7\%$  的 S-N 评估曲线, 其疲劳等级  $FAT=430$  MPa, 斜率  $m = 5.8$ , 同时适用于比例加载与非比例加载, 可为工程焊接结构疲劳寿命预估提供参考.

**关键词:** 焊接结构; 多轴疲劳; 缺口应力; 疲劳等级

**中图分类号:** TG 405 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400185

## 0 序 言

焊接结构在其服役期间经常性的会受到多轴载荷的联合作用, 多轴疲劳破坏是其失效的主要形式. 对于焊接接头而言, 一般可分为名义应力区、结构应力区、缺口应力区三大应力区域, 由此发展而来的疲劳强度评估方法包括名义应力法、结构应力法、缺口应力法等<sup>[1-2]</sup>. 缺口应力法是基于线弹性理论提出的一种评估方法, 建模时将焊趾或焊根处的缺口用虚拟圆弧代替, 从而计算出缺口附近的局部应力. 该方法一方面考虑了结构几何和焊缝与母材不连续对局部应力造成的影响; 另一方面, 相对于其它疲劳评估方法, 缺口应力法能用一条 S-N 曲线评估所有种类的接头形式的疲劳寿命, 因而被 IIW(国际焊接协会) 所推荐<sup>[3-5]</sup>.

相对于单轴疲劳, 多轴疲劳损伤机理更为复杂. 在多轴高周疲劳强度评估领域, 国内外学者在长期的研究中提出了多种评估准则, 总的来说, 可以分为三类: (1) 基于等效应力法的主应力准则, von Mises 准则; (2) 基于平衡方程的 IIW 准则与 EC3 准则; (3) 基于临界面方法的 EESH 准则、C-S 准则、Findley 准则、MWCM 准则. 在这些多轴准则中, 主应力准则只适用于比例加载的情况; von

Mises 准则因没有考虑应力方向, 在评估时需对裂纹萌生路径进行假设, 由此带来评估精度的不确定性, 并且, Sonsino<sup>[6]</sup> 指出 von Mises 准则对非比例加载的疲劳强度评估是危险的; 而基于临界面方法发展而来的评估准则需对疲劳损伤最大平面进行定义, 这对工程技术人员的理论知识水平要求较高. 以 Gough-Pollard 方程为基础的 IIW 准则同时适用于比例加载与非比例加载, 而且疲劳损伤参量定义相对简单, 因而广泛应用于钢结构的疲劳设计与评估中.

目前国内外将缺口应力法应用于多轴疲劳强度评估尚处于探索阶段, IIW 将单轴疲劳评估 S-N 曲线 (疲劳等级  $FAT = 225$  MPa, 斜率  $m = 3$ ) 作为多轴疲劳评估的参考曲线, 然而其适用性如何仍值得探讨. 鉴于此, 将缺口应力法与 IIW 多轴准则相结合, 对现有的多轴疲劳试验数据重新评估, 分析上述参考 S-N 曲线适用情况, 同时提出一条可同时应用于比例加载与非比例加载情况下的多轴疲劳评估 S-N 曲线, 使之更好地应用于工程焊接结构疲劳寿命的预估.

## 1 缺口应力法

缺口应力法是源于 Neuber<sup>[7]</sup> 提出的微观支持理论, 即焊趾 (或焊根) 局部 (微结构约束长度  $\rho^*$ )

范围内的平均应力是影响焊接接头疲劳的主要因素. 为了便于分析, 一般采取在缺口处构建一个半径为 $\rho_f$ 的虚拟圆弧, 如图1所示. 基于线弹性理论, 用圆弧段上应力最大值代表微结构约束长度范围内的应力平均值. 该理论考虑了应力梯度对局部疲劳强度的影响. 虚拟半径 $\rho_f$ 满足以下关系式, 即

$$\rho_f = \rho + S * \rho^* \quad (1)$$

式中:  $\rho_f$ 为虚拟圆弧半径;  $\rho$ 为结构实际缺口半径;  $S$ 为约束因子;  $\rho^*$ 为微结构约束长度.

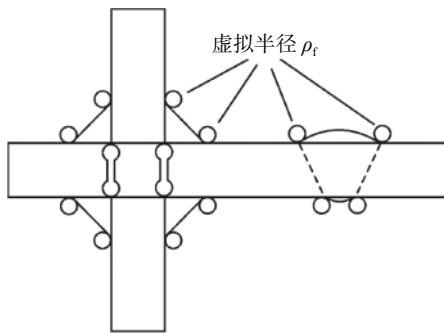


图1 虚拟圆弧定义

Fig. 1 Definition of fictitious notch rounding

根据IIW的推荐, 对于焊接钢结构或者铝合金结构, 当板厚 $t \geq 5 \text{ mm}$ 时, 虚拟圆弧半径 $\rho_f$ 取1 mm, 其可靠性得到了大量的试验验证.

## 2 IIW 多轴疲劳评估准则

IIW 准则是目前广泛应用的钢结构疲劳设计准则. 其推荐, 焊接结构在承受多轴载荷作用下, 可以使用如下评估方程, 即

$$\left(\frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta\tau_R}\right)^2 \leq CV \quad (2)$$

式中:  $\Delta\sigma_R$ 为单轴正应力疲劳强度;  $\Delta\tau_R$ 为单轴剪应力疲劳强度;  $CV$ 为跟载荷相关的参考值, 比例加载取1, 非比例加载取0.5;  $\Delta\sigma_x, \Delta\tau_{xy}$ 疲劳评估参量.

为了便于在实际工程中的运用, 式(2)可转换成等效应力范围 $\Delta\sigma_{\text{Iw}}$ 的形式, 即

$$\Delta\sigma_{\text{Iw}} = \frac{1}{\sqrt{CV}} \sqrt{\Delta\sigma_x^2 + k \cdot \Delta\tau_{xy}^2} \quad (3)$$

式中:  $k = \Delta\sigma_R^2 / \Delta\tau_R^2$ .

关于疲劳评估参量 $\Delta\sigma_x$ 与 $\Delta\tau_{xy}$ , 现有的多轴疲劳评估准则在提出之初大多是以总体坐标系下的应力分量作为疲劳评估的依据, 而缺口应力法评估多轴疲劳强度时, 总体坐标系下的应力分量显然与虚拟圆弧处实际的几何特征不相符, 因此并不能直接

代入这些准则中评估多轴疲劳强度, 而应选择缺口局部坐标系下的各缺口应力分量作为多轴疲劳评估的依据. 如图2所示, 局部坐标系 $x$ 方向定义为虚拟圆弧段的切向,  $y$ 方向定义为沿着焊缝宽度的方向, 而 $z$ 向定义为虚拟圆弧段的法向.

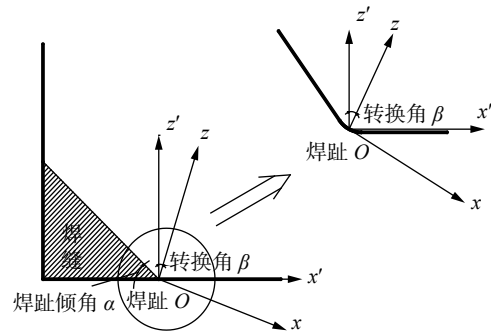


图2 缺口局部坐标系

Fig. 2 Notch local coordinate system

## 3 焊接接头试验数据

### 3.1 焊接接头试样选取

在利用缺口应力法评估时需要对接头进行精确的建模分析, 这就要求试验对焊缝尺寸数据有详细的记录. 在此基础上, 从非常有限的多轴疲劳试验资料中选取了两种典型焊接接头(均为焊后未处理的接头), 包括Sonsino<sup>[8]</sup>、Amstutz<sup>[9]</sup>、Bertini<sup>[10]</sup>、Yousefi<sup>[11]</sup>、Witt<sup>[12]</sup>的管盘模型(角接头), 以及Sonsino<sup>[8]</sup>的管管模型(对接接头), 如图3所示. 其中比例加载数据点57个, 非比例加载数据点51个.

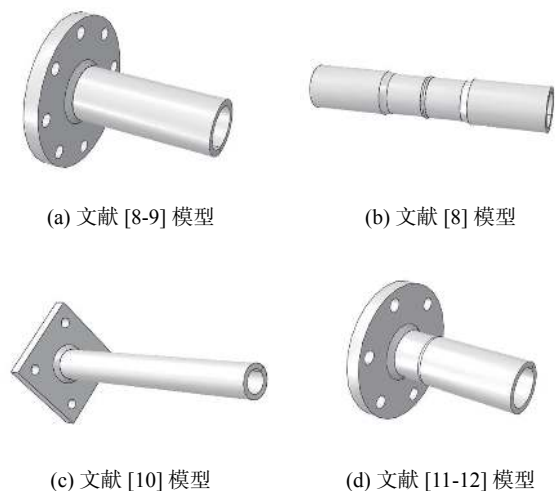


图3 多轴疲劳试验几何模型

Fig. 3 Geometric models of multi-axial fatigue tests

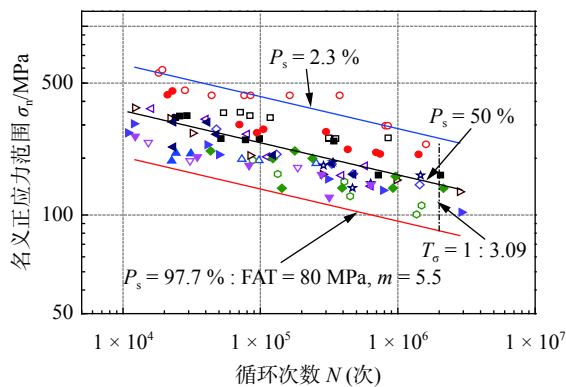
对文献中涉及到的试样的结构尺寸、多轴加载方式、加载名义应力比等信息进行统计, 如表1所示.

表 1 多轴疲劳试验基本信息统计  
Table 1 Basic information of multiaxial fatigue tests

| 试验来源                       | 材料     | 尺寸 mm × mm            | 多轴加载方式 | 加载名义应力比 $R'$ | 应力循环比 $R$ |
|----------------------------|--------|-----------------------|--------|--------------|-----------|
| Sonsino(TP) <sup>[8]</sup> | StE460 | $\phi 88.9 \times 10$ | 弯扭组合   | $\sqrt{3}$   | -1        |
| Amstutz <sup>[9]</sup>     | StE460 | $\phi 88.9 \times 10$ | 弯扭组合   | 1            | -1;0      |
| Sonsino(TT) <sup>[8]</sup> | StE460 | $\phi 80.9 \times 6$  | 弯扭组合   | $\sqrt{3}$   | -1        |
| Bertini <sup>[10]</sup>    | S355JR | $\phi 64 \times 10$   | 弯扭组合   | 3.25         | -1;0      |
| Yousefi <sup>[11]</sup>    | P460   | $\phi 84.9 \times 8$  | 弯扭组合   | 1            | -1        |
| Witt <sup>[12]</sup>       | S460M  | $\phi 84.9 \times 8$  | 弯扭组合   | 1            | -1;0      |

3.2 名义应力试验数据

在进行焊接接头的多轴疲劳试验时,根据载荷大小,结合试样截面尺寸与材料参数,最终以名义应力范围与循环次数的形式得到名义应力系统下的疲劳数据.选取的试验数据加载循环应力比  $R$  有 -1 与 0 两种,加载方式为弯扭组合,试验数据以名义正应力范围形式给出,寿命集中在高于  $1 \times 10^4$  次的高周范围内,如图 4.



- 注:
- 管盘比例加载 (Sonsino,  $R = -1$ );
  - ◇ 管盘比例加载 (Amstutz,  $R = -1$ );
  - △ 管盘比例加载 (Yousefi,  $R = -1$ );
  - ▷ 管盘比例加载 (Witt,  $R = -1$ );
  - ★ 管盘比例加载 (Bertini,  $R = -1$ );
  - 管管非比例加载 (Sonsino,  $R = 0$ );
  - ▼ 管管非比例加载 (Amstutz,  $R = 0$ );
  - ◀ 管管非比例加载 (Yousefi,  $R = 0$ );
  - 管管比例加载 (Sonsino,  $R = -1$ );
  - ▽ 管管比例加载 (Amstutz,  $R = 0$ );
  - ◁ 管管比例加载 (Yousefi,  $R = 0$ );
  - 管管比例加载 (Bertini,  $R = 0$ );
  - 管管非比例加载 (Sonsino,  $R = -1$ );
  - ▲ 管管非比例加载 (Amstutz,  $R = -1$ );
  - ◆ 管管非比例加载 (Yousefi,  $R = -1$ );
  - ▷ 管管非比例加载 (Witt,  $R = -1$ );

图 4 名义应力多轴疲劳试验数据

Fig. 4 Nominal stress data for multiaxial fatigue tests

从图 4 中可以看出,①比例加载与非比例加载的数据出现了明显分层,非比例加载的疲劳寿命普遍低于比例加载.这是由于对于韧性钢材料而言,

非比例加载导致主应力(应变)方向不断发生变化,疲劳损伤由此增大,因而疲劳寿命降低;②不同试验数据点也出现了分层,这主要是由于不同试件的结构形式与焊缝尺寸会导致不同的缺口等级,然而这是名义应力系统所不能考虑到的.计算得到试验数据分散带  $T_\sigma = 1: [\Delta\sigma(2.3\%)/\Delta\sigma(97.7\%)] = 1:3.09$ ,由于数据离散性较大,难以应用于工程实践.

4 多轴缺口应力法分析

4.1 多轴缺口应力集中系数

参照图 2,总体坐标系  $Ox'y'z'$  下,危险  $O$  点(有限元结果表明该危险点位于虚拟圆弧段中点处)的应力张量为

$$[\sigma'] = \begin{bmatrix} \sigma_{x'} & \tau_{x'y'} & \tau_{x'z'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'} & \tau_{y'z'} \\ \tau_{z'x'} & \tau_{z'y'} & \sigma_{z'} \end{bmatrix} \quad (4)$$

局部坐标系  $Oxyz$  下,  $O$  点处的应力张量为

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_x, \tau_{xy}$  为 IIW 准则所关注的两个缺口应力分量,可以利用总体坐标系下各分量的结果经过坐标转化计算得到.

定义坐标转换矩阵  $[M]$ , 根据局部坐标系相对于总体坐标系的偏转角  $\beta$  (由焊缝几何关系易知偏转角  $\beta$  等于焊趾倾角  $\alpha$  的一半), 该坐标转换矩阵的形式为

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

因此,局部坐标系与总体坐标系下应力张量之间的关系式可以采用式 (7) 表示,即

$$[\sigma] = [M] \cdot [\sigma'] \cdot [M]^T \quad (7)$$

由此可以得到缺口局部坐标系下的应力分量 $\sigma_x$ 与 $\tau_{xy}$ .

定义缺口应力集中系数 $K_{n,\sigma}$ ,  $K_{n,\tau}$ 为

$$\begin{cases} K_{n,\sigma} = \sigma_x / \sigma_{nom} \\ K_{n,\tau} = \tau_{xy} / \tau_{nom} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $K_{n,\sigma}$ ,  $K_{n,\tau}$ 分别为局部坐标系 $Oxyz$ 下 $x$ 方向正应力应力集中系数和 $yz$ 平面内 $y$ 方向剪应力应力集中系数; $\sigma_{nom}$ ,  $\tau_{nom}$ 分别为加载名义正应力与名义剪应力值.

在得到缺口应力集中系数后,结合图4中加载名义应力值,代入到方程(3)中,就可以得到缺口应力系统下的多轴等效应力.这种求解应力集中系数的方法能够避免重复的计算性的工作,提高分析的效率.

## 4.2 多轴缺口应力分析及评估

利用ABAQUS软件对4种焊接接头进行有限元建模,模型全部采用二次六面体单元.沿着焊接接头的表面与靠近焊趾的方向,网格密度逐渐增大.焊趾缺口的局部采用1 mm的虚拟圆弧过渡,根据IIW<sup>[13]</sup>关于网格划分的推荐,将虚拟圆弧段划分六等分,且厚度方向上靠近接头表面的单元长度不大于0.25 mm,模型网格划分情况如图5所示.依据试验中的试样夹紧及加载位置对有限元模型施加约束与载荷,基于线弹性理论进行有限元分析.需要注意的是,Bertini试验多轴加载时部分试件裂纹萌生于焊根,参照IIW规范,对焊趾与焊根处网格均构建了虚拟圆弧段,其余试验模型只需在焊趾处进行了处理.

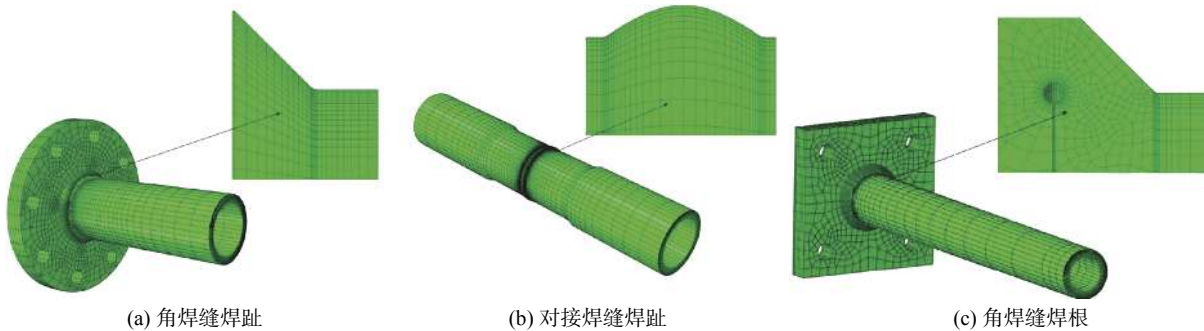


图5 有限元模型网格划分细节

Fig. 5 Finite element models meshing details

将缺口应力集中系数 $K_{n,\sigma}$ ,  $K_{n,\tau}$ 计算结果统计成如表2所示.

表2 有限元计算结果  
Table 2 Finite element calculation results

| 试验来源                            | 模型 | 转换角 $\beta/(\circ)$ | 缺口应力集中系数       |              |
|---------------------------------|----|---------------------|----------------|--------------|
|                                 |    |                     | $K_{n,\sigma}$ | $K_{n,\tau}$ |
| Sonsino <sup>[8]</sup>          | 管盘 | 22.5                | 3.63           | 1.85         |
| Amstutz <sup>[9]</sup>          | 管盘 | 22.5                | 3.63           | 1.85         |
| Sonsino <sup>[8]</sup>          | 管管 | 15                  | 1.77           | 1.40         |
| Bertini <sup>[10]</sup>         | 管盘 | 22.5                | 4.96           | 1.91         |
| Yousefi/Witt <sup>[11-12]</sup> | 管盘 | 22.5                | 3.39           | 1.80         |

在此基础上,就可以得到缺口应力系统下的焊接接头试验数据,如图6,其中对于管管对接接头而言,考虑到其焊接过程中易出现焊接错位,对计算结果乘上1.1的修正系数.图中给出了利用origin软件线性拟合得到的存活率 $P_s$ 分别为97.7%, 50%, 2.3%的三条S-N曲线,并计算得到了分散带

带宽 $T_\sigma$ ,虚线表示的是IIW推荐的单轴疲劳评估曲线.

对比图4与图6,可以发现比例加载与非比例加载数据点重合性较好,不同种试验数据之间分布差异性小.同时,循环次数在 $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 范围内的小部分数据点位于IIW推荐的单轴疲劳评估曲线的下方,即评估结果偏危险,对于循环次数大于 $1 \times 10^5$ 的数据点,评估会过于保守,不利于结构的轻量化设计.

相较于名义应力法,缺口应力系统下的疲劳数据点离散性有了较大改善,计算得到分散带带宽 $T_\sigma = 1:[\Delta\sigma(2.3\%)/\Delta\sigma(97.7\%)] = 1:1.97$ .在利用缺口应力法进行分析时,对于疲劳等级较高的焊接接头,比如对接接头,其缺口应力集中系数较小;反之,缺口应力集中系数较大,因而能有效降低试验数据分散性.

拟合得到了存活率 $P_s = 97.7\%$ 的S-N曲线,其疲劳等级为430 MPa,曲线斜率 $m = 5.8$ .

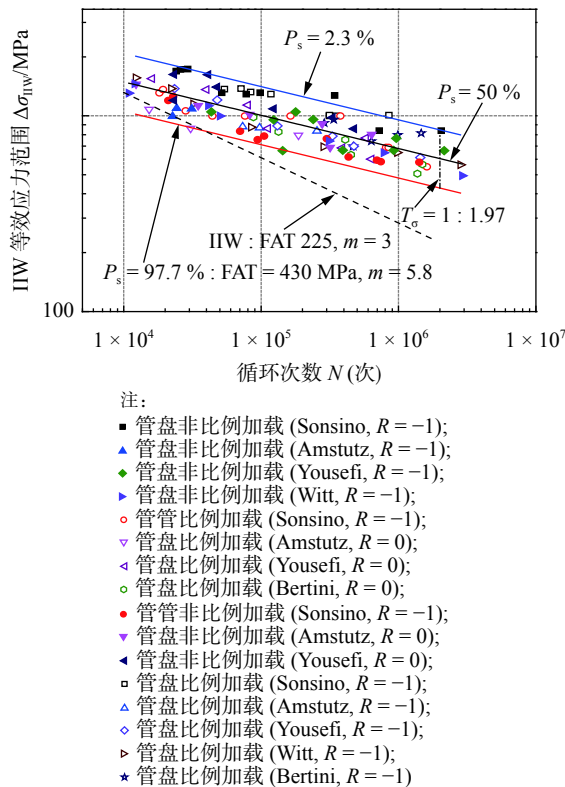


图 6 IIW 准则计算结果

Fig. 6 Calculation results of IIW criteria

## 5 结 论

(1) 大量的试验数据分析表明 IIW 推荐的单轴疲劳评估 S-N 曲线并不适用于多轴比例加载的评估: 循环次数在  $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$  之间时, 可能会得到偏危险的评估结果, 在高于  $1 \times 10^5$  次时结果偏保守。

(2) 缺口应力法同时考虑了结构几何与焊缝、母材的不连续, 试验数据点的离散性较好。比例加载与非比例加载数据点未出现明显分层, 显示出了 IIW 准则良好的通用性, 即能用一条 S-N 曲线评估比例加载与非比例加载下的焊接接头多轴疲劳强度。

(3) 结合 IIW 多轴疲劳准则, 对现有的多轴试验数据的分析得到了存活率为 97.7% 的 S-N 曲线, 其疲劳等级为 430 MPa, 斜率为 5.8, 相比 IIW 推荐的单轴疲劳评估 S-N 曲线, 其具有更高的疲劳等级和更小的倾斜度, 可以为工程实际提供参考。

### 参考文献:

[1] 刘 刚, 黄如旭, 黄 一. 复杂焊接接头多轴疲劳强度评估的等效热点应力法 [J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 10 - 14.  
Liu Gang, Huang Ruxu, Huang Yi. Equivalent hot spot stress approach for multiaxial fatigue strength assessment of complex wel-

ded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 10 - 14.

- [2] 周张义, 王雨舟, 杨 欣. 基于不同应力法的焊接构架纵向角接头疲劳累积损伤评估 [J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 18 - 22.  
Zhou Zhangyi, Wang Yuzhou, Yang Xin. Fatigue cumulative damage assessment of longitudinal fillet welded gusset in welded frame based on different stress approaches[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8): 18 - 22.
- [3] 王东坡, 曹 舒, 邓彩艳. 基于缺口应力法的场桥导轨焊接结构疲劳性能评估 [J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 5 - 8.  
Wang Dongpo, Cao Shu, Deng Caiyan. Notch stress concepts for fatigue assessment of welded portal crane rail structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(4): 5 - 8.
- [4] Radaj D, Sonsino C, Fricke W. Recent developments in local concepts of fatigue assessment of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 2 - 11.
- [5] Sonsino C M, Fricke W, de Bruyne F, *et al.* Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints - Background and applications[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 34(1): 2 - 16.
- [6] Sonsino C. Multiaxial fatigue assessment of welded joints - recommendations for design codes[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 173 - 187.
- [7] Radaj D, Lazzarin P, Berto F. Generalised Neuber concept of fictitious notch rounding[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 51(6): 105 - 115.
- [8] Sonsino C M. Multiaxial fatigue of welded joints under in- and out-of-phase local strains and stresses[J]. International Journal of Fatigue, 1995, 17(1): 55 - 70.
- [9] Amstutz H K, Störzel, Seeger T. Fatigue crack growth of a welded tube-flange connection under bending and torsional loading[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 24(5): 357 - 368.
- [10] Bertini L, Frenzo F, Marulo G. Effects of plate stiffness on the fatigue resistance and failure location of pipe-to-plate welded joints under bending[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 90(6): 78 - 86.
- [11] Yousefi F, Witt M, Zenner H. Fatigue strength of welded joints under multiaxial loading: experiments and calculations[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 24(5): 339 - 355.
- [12] Witt M, Zenner H. Multiaxial fatigue behaviour of welded flange-tube connections under combined loading. experiments and lifetime calculation[C]//In: 5th International conference on biaxial/multiaxial fatigue and fracture, Cracow, Poland; 1997: 421-434.
- [13] Fricke W. Guideline for the fatigue assessment by notch stress analysis for welded structures[C]//Assembly of International Institute of Welding, 2008: 1 - 133.

第一作者简介: 胡鑫, 男, 1995 年生, 硕士研究生。研究方向为焊接结构的疲劳与断裂。Email: 2418825975@qq.com

通信作者简介: 严仁军, 男, 教授, 博士研究生导师。Email: yan\_renjun@163.com