

文章编号: 1000-4750(2016)06-0209-06

基于缺口应力法的焊接接头疲劳分析

刘 旭, 张开林, 姚 远, 王晓鹏

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川, 成都 610031)

摘 要: 等效缺口应力法作为焊接疲劳分析的一种局部方法, 不仅克服了焊接结构名义应力难以确定和焊根结构应力无法定义的困难, 而且能够反映焊接局部后处理对焊接接头疲劳强度的影响, 因此近年来备受关注。该文建立了典型焊接接头的三维缺口应力模型, 对焊趾根部的缺口应力集中系数进行了求解; 通过对对接接头和纵向角接头在焊后未处理(AS-weld)和超声喷丸处理(UPT)两种状态下的疲劳试验数据进行分析处理, 获得了两种焊接接头在缺口应力系统下统一的 $S-N$ 曲线, 并与目前国际焊接学会所推荐的具有相同存活率的疲劳寿命曲线(IIW: $m=3$, $FAT=225$)进行比较, 结果表明, 该曲线具有更高的疲劳等级和更低的斜度。

关键词: 焊接接头; 疲劳等级; 缺口应力法; $S-N$ 曲线; 超声喷丸处理

中图分类号: TG405 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.0925

FATIGUE ANALYSIS OF WELDED JOINTS BASED ON NOTCH STRESS METHOD

LIU Xu, ZHANG Kai-lin, YAO Yuan, WANG Xiao-peng

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiao tong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The notch stress method (NSM) is a local method of welding fatigue analysis, which has attracted much attention in recent years. Traditionally, the nominal stresses in welded structures are difficult to determine and the weld root stress cannot be defined, but NSM can not only successfully overcome these problems but also assess the effects of welded joint fatigue strength with local welding post-processing. In this paper, 3D notch stress models of typical welded joints are presented to solve the notch stress concentration factors (nSCF) in a weld toe. Some fatigue test data from butt joints and longitudinal fillet joints are referenced from literature, which include two conditions: As-weld and ultrasonic peening treatment(UPT); then unified $S-N$ curves under notch stress system are obtained by combining the nSCF and fatigue data. Compared to the referenced fatigue-life curve of International Institute of Welding (IIW: $m=3$, $FAT=225$) at the same survival probability, it shows that these fitting curves have higher fatigue classes and shallower slopes.

Key words: welded joint; fatigue class; notch stress method; $S-N$ curve; UPT

对于典型的焊接接头(图1), 在外载荷作用下, 按不同应力集中因素影响分类, 接头表面可划分为若干应力区域: 名义应力区、结构应力区和缺口应力区。因此关于焊接接头的疲劳寿命评估, 目前从整体到局部先后发展出了名义应力法、结构应力法

(热点应力法)、缺口应力法^[1]。

其中, 缺口应力法克服了焊接结构名义应力难以确定和焊根结构应力无法定义的困难, 较为真实的反映了焊接结构局部应力应变状态, 大大提高了焊缝疲劳分析的准确性^[2]。由于缺口应力模型构造

收稿日期: 2014-11-03; 修改日期: 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205324)

通讯作者: 刘 旭(1987—), 男, 四川人, 博士生, 从事机车车辆结构疲劳强度研究(E-mail: liuxu19870815@163.com)。

作者简介: 张开林(1967—), 男, 江苏人, 研究员, 博士, 从事机车车辆结构疲劳强度研究(E-mail: zhangkailin@swjtu.cn);

姚 远(1983—), 男, 安徽人, 副研究员, 博士, 从事机车车辆动力学研究(E-mail: yyuan8848@163.com);

王晓鹏(1990—), 男, 河南人, 硕士生, 从事机车车辆动力学研究(E-mail: xpwang4109@163.com)。

相对复杂, 计算规模较大, 因此一直应用较少; 但随着缺口力学和计算机技术的发展, 缺口应力法在焊接疲劳分析中的应用越来越多, 近年来发表了大量有关其理论研究和应用案例的文献[3—4]。本文旨在通过对典型焊接接头疲劳试验数据进行分析处理, 从而获取缺口应力系统下的疲劳寿命曲线。

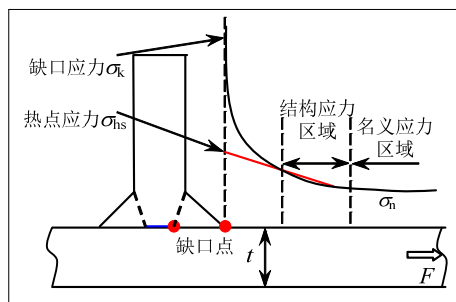


图1 焊接接头的表面应力分布

Fig.1 Stress distribution at weld joint's surface

1 缺口应力法

所谓缺口应力法, 即基于局部完全弹性假设的基础上, 以焊趾和焊根缺口点(图1)的非线性峰值应力作为疲劳评估参量。由于缺口应力法考虑了焊缝局部几何条件, 包含了焊接接头所有的应力集中^[5], 因此能够反映出不同焊缝尺寸和形貌下的应力分布情况, 这无疑能够极大提高疲劳分析准确性和促进焊缝的优化设计。

1.1 缺口应力

在理想情况下, 焊趾处可分别视为角度为 θ 的尖锐V型缺口(根部曲率半径为0), 而缺口根部应力(图1)即所求的缺口应力。目前, 在断裂力学基础上发展而来缺口力学已经解决了多种载荷模式下的平面问题^[6]。但对于焊接接头这种边界复杂的情况, 获得缺口顶点的解析解过于复杂, 更难以用于工程实践之中。可行的途径只能是数值方法, 如FEM、BEM等。但数值分析同样存在两方面的问题: 1) 尖锐的V型缺口根部属于奇异点, 计算结果不能收敛; 2) 由于材料各向异性的影响, 缺口根部存在着微观结构约束效应(microstructural support effect), 直接约束和降低了应力峰值, 即基于各向同性的弹性理论(弹性力学、有限元法等)所计算的缺口尖端应力往往过高。

1.2 虚拟缺口半径法

为了解决上述缺口根部应力奇异和峰值应力过高的问题, Neuber^[7]提出应力平均概念, 采用局部范围内的平均应力作为缺口等效应力。如图2所

示, 对于一个张开角度 2α , 根部半径为 ρ 的缺口, 首先确定一个微结构约束尺寸 ρ^* (microstructural support length)—与材料断裂韧度和屈服强度有关, 等效缺口应力应当与 ρ^* 内的应力平均值相等。为了方便有限元数值方法分析缺口应力状态, 可以在缺口根部构造一个较大的虚拟缺口半径 ρ_f (FNR, fictitious notch radius), 如果此时的最大缺口应力等于原缺口 ρ^* 内的平均应力, 则该虚拟缺口即与实际缺口等效。这种虚拟缺口半径法不仅避免了对每个实际缺口进行重复积分求平均值, 而且较好的解决了缺口点应力奇异和偏高的问题, 因此得到了广泛的应用^[8]。而问题的关键变化为如何确定虚拟缺口半径 ρ_f 大小。

根据国际焊接学会(IIW)的建议, 对于未进行任何焊后处理的钢接头, 实际缺口半径考虑为最恶劣的情况, 即 $\rho=0$; 缺口约束因子 $s=2.5$; 约束尺寸 $\rho^*=0.4$ mm; 从而虚拟缺口半径 $\rho_f=1$ mm。对于焊后进行打磨处理的焊缝, 虚拟缺口半径采用 $\rho_f=\rho+1$ mm 进行分析(图3)。这些参数对于板厚超过5 mm 的接头得到了试验验证, 并被写入了相关标准^[8]。

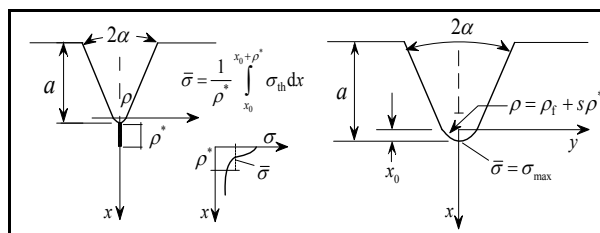


图2 缺口应力平均概念及虚拟缺口半径法

Fig.2 Notch stress average concept and FNR method

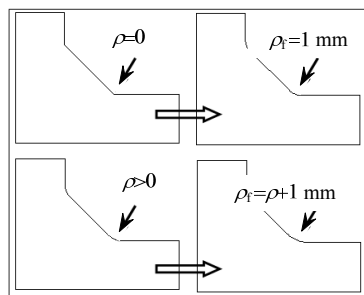


图3 焊趾真实缺口半径与虚拟缺口半径关系

Fig.3 Relationship between real notch radius and FNR

1.3 疲劳评估方法

缺口疲劳寿命预测所采用的 $S-N$ 曲线如图4所示, 曲线以拐点为界分为上下两段。式1给出了对数坐标下 $S-N$ 曲线方程, 其中 $\Delta\sigma$ 为应力范围, N 为载荷循环次数, N_k 为拐点处的次数, m_1 、 m_2 分别

是曲线上下各段斜度, C_1 、 C_2 为常数。IIW 定义了不同焊接接头的疲劳等级曲线^[9], 以循环次数 $N_f(2 \times 10^6)$ 处的应力范围 $\Delta\sigma_f$ 作为疲劳等级值; 曲线拐点设定在 10^7 , 拐点之后为了考虑了小载荷的影响, 采用了 $m_2=22$ 的斜线段。

$$\begin{cases} \log(N) = -m_1 \log(\Delta\sigma) + \log(C_1), & N < N_k \\ \log(N) = -m_2 \log(\Delta\sigma) + \log(C_2), & N \geq N_k \end{cases} \quad (1)$$

由于在进行焊接接头疲劳试验时, 能确定的是试样的持久名义应力, 而缺口应力不能直接测量获得。这就需要采用缺口应力集中系数 K_{notch} 将名义应力转换为焊趾焊根处的缺口应力(图 4), 而 K_{notch} 的获取通常采用经验公式法或有限元法。

IIW 建议将不同焊接接头的疲劳数据统一在同一缺口系统 $S-N$ 曲线之下, 这避免了采用名义应力法时选择接头类型的困难, 表 1 给出了 1 mm 虚拟缺口半径下钢和铝合金接头的缺口疲劳等级^[8]。然而, 诸多文献认为, 这组数据在高应力范围偏于危险, 而低应力范围区域保守^[10], 因此, 有必要对焊接接头的疲劳数据进行重新分析, 针对具体的接头细节和载荷形式, 重建更为可靠的疲劳评估曲线。

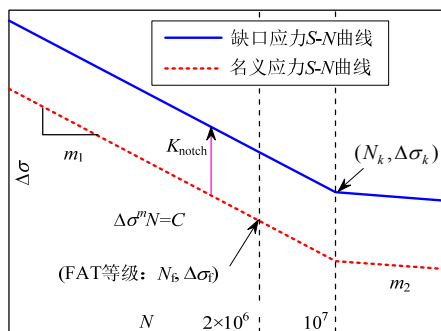


图 4 IIW 标准疲劳寿命曲线

Fig.4 Standard fatigue-life curves of IIW

表 1 钢和铝合金接头缺口疲劳等级(IIW^[9])

Table 1 Weld joint fatigue class for steel and aluminium alloy (IIW^[9])

材料类型	疲劳等级($N_f=2 \times 10^6$)		曲线斜度		拐点处 循环次数	存活率/ (%)
	Von Mises	最大主应力	m_1	m_2		
钢	FAT200	FAT225	3	22	10^7	95
铝合金	FAT63	FAT 71	3	22	10^7	95

2 焊接接头疲劳试验

由于焊接接头疲劳试验的相关文献和标准已经累积了大量的试验数据, 因此可以从中选选出可靠的试验数据进行缺口疲劳分析。本次选择的分析对象为对接接头和纵向角接头两种试样(文献[11]), 每种焊接接头采用高中低三种不同强度等级的材

料(表 2)。试验采用轴向拉伸载荷, 应力比 R 在 0.1~0.5。

表 2 焊接接头材料机械性能(文献[11])

Table 2 Mechanical properties of weld joint material [11]

材料类型	屈服强度	抗拉强度	断裂伸长率
	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ (%)
SS800	700	830-840	22
16Mn	390	591	24.4
Q235B	267	435	26

2.1 名义应力数据

对于焊后无处理的焊接接头(As-weld), 其疲劳性能与材料抗拉强度相关性不大, 而取决于焊接接头局部的焊缝质量和应力集中状况^[12]; 因此, 将文献[11]所发表的疲劳试验结果统一在名义应力坐标下进行线性拟合并与 IIW 所建议的疲劳曲线进行比较。如图 5~图 6 分别给出了试验数据在不同存活率下的拟合 $S-N$ 曲线, 可以看出对接接头和纵向角接头疲劳曲线斜度更低, 疲劳等级更高, 因此 IIW 所建议的疲劳曲线更偏于保守。

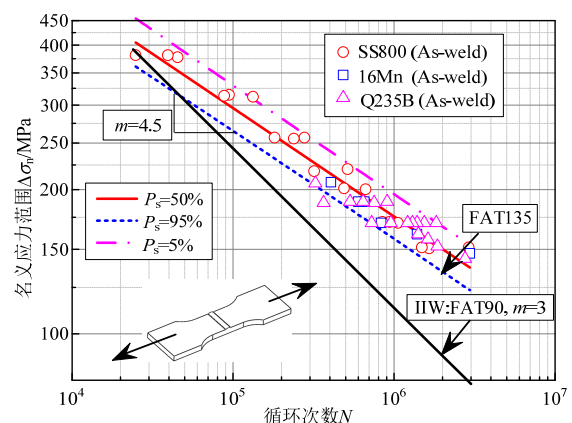


图 5 名义应力下对接接头疲劳数据

Fig.5 Fatigue test data of butt joints under nominal stress

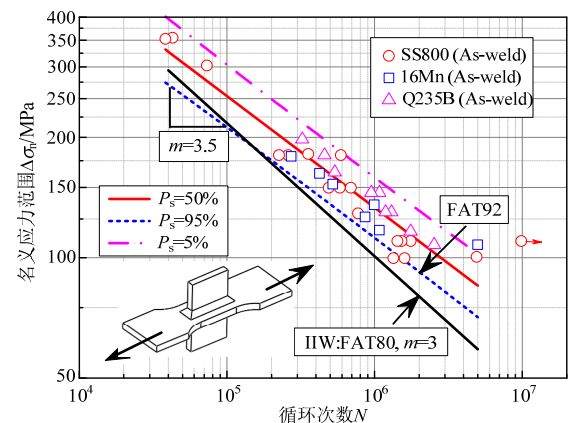


图 6 名义应力下纵向角接头疲劳数据拟合

Fig.6 Fatigue test data of longitudinal fillet joints under nominal stress

2.2 焊后 UPT 处理

缺口应力法的另一特点在于能够分析焊缝尺寸和形貌改变对于结构疲劳强度的影响，这是名义应力法和结构应力法所不具备的优势。对于重要的焊接结构，为了降低应力集中和焊接残余应力产生的不利影响，在焊接完成后要进行焊缝后处理。通常采用的传统方法有打磨、TIG 重熔、锤击、喷丸等；近年来兴起的高频机械冲击技术(HFMI)能够最大限度的提高结构疲劳强度^[13]，因此越来越多的被应用。图 7~图 8 给出了采用超声喷丸冲击(UPT)设备进行处理后的焊接接头疲劳试验数据。可以看出，UPT 处理后焊接接头的疲劳寿命明显提高，对于高强度等级材料的影响尤为明显。

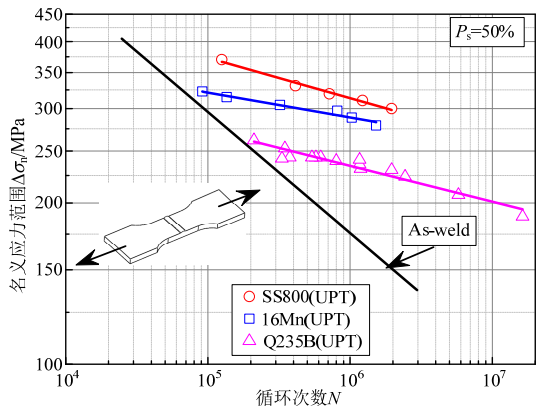


图 7 UPT 处理后对接接头疲劳试验数据^[11]

Fig.7 Fatigue test data of butt joints with ultrasonic peening treatment^[11]

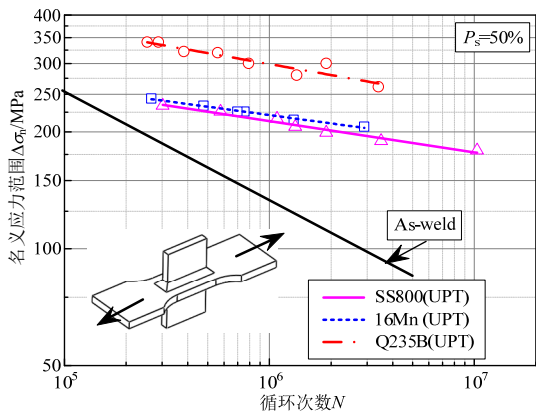


图 8 UPT 处理后纵向角接头疲劳试验数据^[11]

Fig.8 Fatigue test data of longitudinal fillet joints with ultrasonic peening treatment^[11]

3 缺口应力集中

缺口应力集中系数(nSCF) K_{notch} 是准确获取焊缝局部缺口应力的关键参数。而影响 nSCF 的因素较多，如缺口角度、母板和附板厚度、焊喉深度和

焊角长度等，因此不同的焊接结构和载荷形式， K_{notch} 取值也不尽相同。传统的经验公式法很难满足要求，因此采用有限元方法，按照焊接接头实际几何条件进行建模分析是准确求解 nSCF 的可靠方法。

3.1 缺口半径的确定

采用有限元方法确定接头缺口应力集中系数，关键在于准确获取焊趾真实和虚拟缺口半径。对于未进行处理的焊接接头，考虑焊趾为根部半径为 0 的尖锐缺口；对于进行打磨或冲击处理的焊接接头，将在焊趾处形成圆弧过渡区域。文献[14]采用橡胶倒模的方法对不同高频冲击设备(HiFiT、UPT、UIT)处理后的缺口半径进行了测量，结果显示，焊趾缺口半径测量值总体上呈正态分布规律，如图 9 所示。本文取分布概率最大的半径平均值作为建立缺口模型的参数，表 3 给出了不同后处理情况下的缺口半径取值。

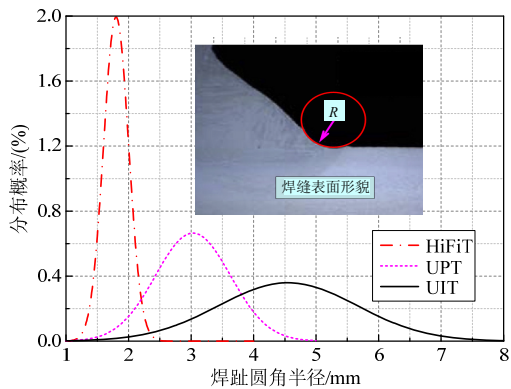


图 9 不同高频冲击设备处理下的焊趾缺口半径概率分布

Fig.9 The distribution probability of weld toe radius under different HFMI devices

表 3 不同焊后处理情况下的缺口半径参数

Table 3 Parameters of notch radius with welding post-processing by different methods

焊接接头 处理方法	焊趾缺口半径 测量平均值 $\bar{\rho}$ /mm	虚拟缺口半径 取值 ρ_f /mm
As-Weld	0	1
HiFiT	1.81	2.81
UPT	3.81	4.81
UIT	4.55	5.55

3.2 缺口应力集中系数

根据文献中的对接接头和纵向角接头试样尺寸建立有限元模型(ANSYS)，其中包括无处理(As-weld)和超声喷丸处理(UPT)两种情况。其中，对接接头焊缝余高 1.2 mm，焊趾角度 145°；纵向角接头焊角 6 mm，焊趾角度 135°。计算模型全部

采用六面体二次实体单元(图 10~图 11), 通过施加轴向(x 向)载荷计算焊趾缺口根部的应力集中情况。

缺口应力集中系数 K_{notch} 等于缺口应力 σ_k 与名义应力 σ_n 的比值, 如式(2)。图 12~图 13 给出了两种接头纵向中心线应力与名义应力的比值变化情况。可以看出: 角接头的缺口应力集中较对接接头更为明显; UPT 处理明显改善了应力集中情况, 应力集中系数降低了 35%左右; 采用最大主应力^[15]作为参量的 nSCF 较等效应力做为参量的 nSCF 略大。

$$K_{\text{notch}} = \sigma_k / \sigma_n \quad (2)$$

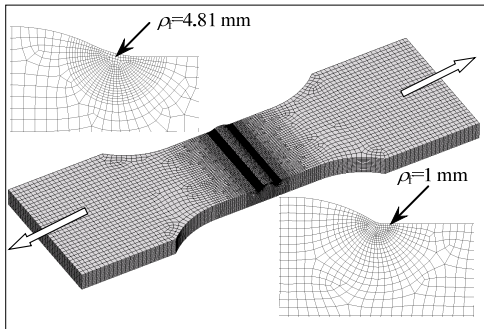


图 10 对接接头整体及局部有限元模型

Fig.10 Overall and local FE model of butt joint

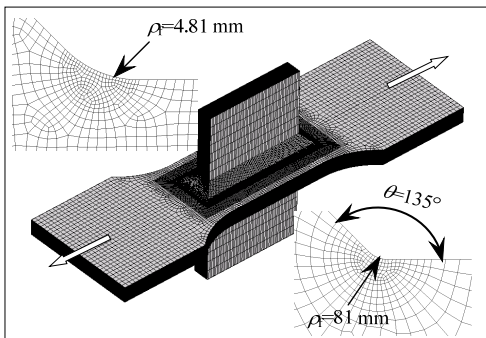


图 11 纵向角接头整体及局部有限元模型

Fig.11 Overall and local FE model of longitudinal fillet joint

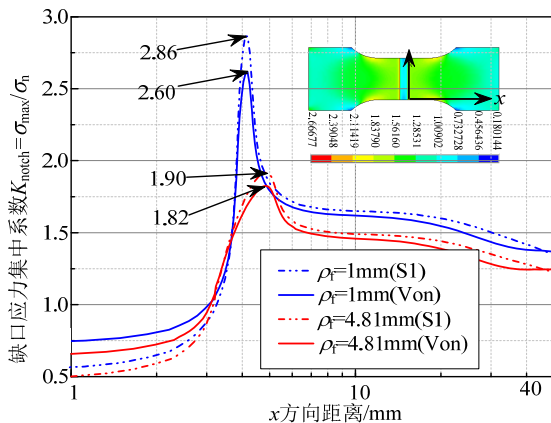


图 12 对接接头应力分布情况

Fig.12 Stress distribution of butt joint along x direction

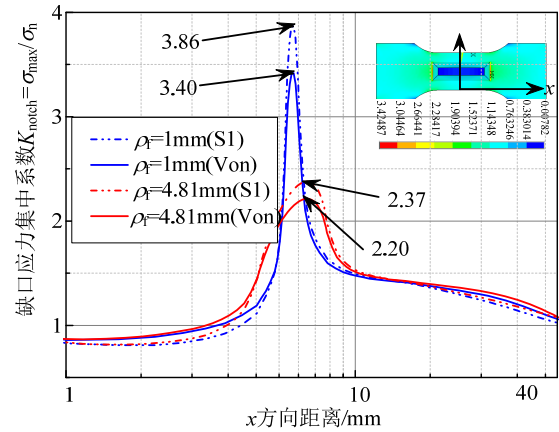


图 13 纵向角接头应力分布情况

Fig.13 Stress distribution of longitudinal fillet joint along x direction

4 缺口疲劳分析

通过焊接接头疲劳试验数据以及数值计算的缺口应力集中系数, 可以建立缺口疲劳寿命曲线。为了与 IIW 疲劳曲线具有可比性^[15], 采用最大主应力数据进行转换。对于未处理(As-weld)状态的两种焊接接头, 其疲劳数据统一在缺口应力系统下具有较好的重合性(图 14), 因此, 可以采用同一条疲劳寿命曲线对此类焊接接头进行疲劳评估。通过线性拟合, 获得了不同存活率下的 $S-N$ 设计曲线簇, 其中具有 95%存活率的曲线斜度 $m=4$, FAT310。相对与 IIW 推荐的 FAT225, 该曲线许用应力范围更大, 在进行焊接结构强度设计时, 更能适应轻量化和节约材料的要求。

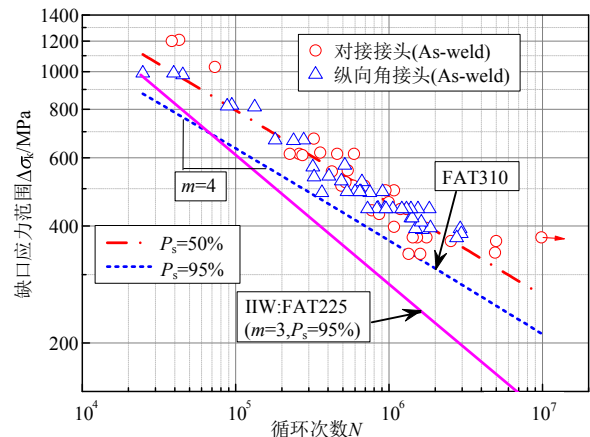


图 14 缺口应力下的疲劳拟合曲线(As-weld)

Fig.14 Fatigue fitting curve under notch stress(As-weld)

经 UPT 处理过的焊接接头, 其应力范围具有较大的分散性(400 MPa~800 MPa)(图 15), 因为焊趾的应力集中得到有效改善, 且焊缝处产生了残余压应力, 此时焊接接头强度在一定程度上取决于材料

本身的特性。相比较无后处理的情况, UPT 处理后的焊接接头拟合曲线斜度更低($m=11$), 这意味着大大提高了高周范围内的疲劳许用应力。表 4 总结了本文拟合 $S-N$ 曲线数据以及 IIW 参考数据。

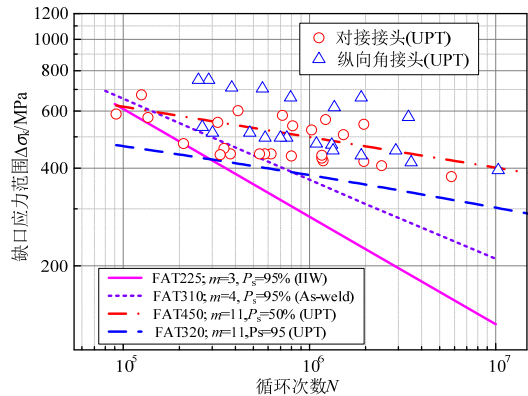


图 15 缺口应力下的疲劳拟合曲线(UPT)

Fig.15 Fatigue fitting curve under notch stress (UPT)

表 4 焊接接头疲劳等级与 IIW^[9]参考值

Table4 Fatigue class of weld joints and reference value from IIW^[9]

接头形式	As weld			
	名义应力 $S-N$ 曲线(95%)		名义应力 $S-N$ 曲线(IIW)(95%)	
	斜度/m	疲劳等级	斜度/m	疲劳等级
对接接头	4.5	135	3	90
纵向角接头	3.5	92	3	80

接头形式	As weld			
	缺口应力 $S-N$ 曲线(95%)		缺口应力 $S-N$ 曲线(IIW)(95%)	
	斜度/m	疲劳等级	斜度/m	疲劳等级
对接接头	4	310	3	225
纵向角接头				

接头形式	UPT 处理			
	缺口应力 $S-N$ 曲线(95%)		缺口应力 $S-N$ 曲线(50%)	
	斜度/m	疲劳等级	斜度/m	疲劳等级
对接接头	11	357	11	466
纵向角接头				

5 结论

(1) 通过对接接头以及纵向角接头轴向拉伸试验数据的分析拟合, 表明在相同存活率情况下, IIW 所推荐焊接接头名义应力 $S-N$ 曲线偏于保守; 焊接后采用超声喷丸处理(UPT)能够较大程度提高焊接接头(特别是高强度钢)疲劳性能。

(2) 考虑焊接接头焊后无处理(As-weld)和 UPT 处理两种状态, 采用虚拟缺口半径法建立了焊接接头三维缺口应力模型; 并通过 FEM 求解了拉伸情况下的缺口应力集中系数, UPT 处理降低了 35%左右的缺口应力集中系数。

(3) 基于缺口应力法, 建立了缺口应力系统下焊接接头统一的疲劳寿命评估曲线(FAT310, $m=4$), 相对于 IIW 所建议的 FAT225, $m=3$, 具有更高的疲劳等级和更低的斜度, 适合焊接结构进行轻量化的设计; 焊接接头经 UPT 处理后, 明显提高了高周范围内的疲劳性能。

参考文献

[1] 张彦华. 焊接结构疲劳强度分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 118—122.
Zhang Yanhua. Fatigue strength analysis of welded structure [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 118—122. (in Chinese)

[2] Radaj D, Sonsino C M, Fricke W. Fatigue Assessment of welded joints by local approaches [M]. Cambridge: Woodhead Publishing and Maney Publishing, 2006: 92—99.

[3] Sonsino C M. Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints-Background and applications [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 34(1): 2—16.

[4] 邱宝象, 高增梁, 王效贵, 冯淼林. 基于有限元法的 16MnR 缺口件疲劳寿命预测方法[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 21—27.
Qiu Baoxiang, Gao Zengliang, Wang Xiaogui, Feng Miaolin. A fatigue life prediction method for 16mnR steel notched components based on the finite element method [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 21—27. (in Chinese)

[5] 吴志荣, 胡绪腾, 宋迎东. 多轴载荷下缺口件的疲劳寿命估算方法[J]. 工程力学, 2014, 31(10): 216—221.
Wu Zhirong, Hu Xuteng, Song Yingdong. Estimation method for fatigue life of notched specimen under multi-axial loading [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 216—221. (in Chinese)

[6] Radaj D, Vormwald M. Advanced methods of fatigue assessment [M]. Berlin: Springer, 2013:12—15.

[7] Radaj D, Lazzarin P, Berto F. Generalized Neuber concept of fictitious notch rounding [J]. International Journal of Fatigue, 2013, 51(6): 105—115.

[8] IIW-Doc XIII-2240r1-08/XV-1289r1-08, Guideline for the fatigue assessment by notch stress analysis for welded structures [S]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

[9] IIW doc. XIII2151r1/ XV-1254r1-07, Fatigue design of welded joints and components [S]. Cambridge: Abington Publishing, 2007.

[10] Pedersen M M. Re-analysis of fatigue data for welded joints using the notch stress approach [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(10): 1620—1626.

[11] Wang Ting, Wang Dongpo, Huo Lixing. Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT) [J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(4): 644—650.

(参考文献[12]—[15]转第 249 页)

- 31(1): 53—55. (in Chinese)
- [15] 王卫永, 刘兵, 李国强. 高强度 Q460 钢材高温力学性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(增刊 1): 30—35.
Wang Weiyong, Liu Bing, Li Guoqiang. Experimental study on mechanical properties of Q460 high strength steel at elevated temperature [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32 (Suppl 1): 30—35. (in Chinese)
- [16] 王跃琴. 16Mn 结构钢的高温力学性能试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2006: 24—40.
Wang Yueqin. Experimental research on mechanical behaviours of structural steel 16Mn at elevated temperatures [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2006: 24—40. (in Chinese)
- [17] Outinen J, Makelainen P. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down [J]. Fire and Materials, 2004, 28(2/3/4): 237—251.
- [18] Chen J, Young B, Uy B. Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(12): 1948—1954.
- [19] Deng D, Murakawa H. Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint [J]. Computational Materials Science, 2008, 43(2): 353—365.
- [20] Deng D, Luo Y, Serizawa H, Shibahara M, Murakawa H. Numerical simulation of residual stress and deformation considering phase transformation effect [J]. Transactions of JWRI, 2003, 32(2): 325—333.

(上接第 214 页)

- [12] 拉达伊. 焊接结构疲劳强度[M]. 郑朝云, 张式成, 译. 北京: 机械工业出版社, 1994: 9—20.
Radaj D. Fatigue strength of welded structure [M]. Translated by Zheng Chaoyun, Zhang Shicheng. Beijing: China Machine Press, 1994: 9—20. (in Chinese)
- [13] 王东坡, 田瑞莹, 霍立兴. 超声冲击处理焊接接头疲劳设计若干问题的探讨[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 173—178.
Wang Dongpo, Tian Ruiying, Huo Lixing. Discussion about improving fatigue performance of welded joint by ultrasonic peening [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(1): 173—178. (in Chinese)
- [14] Halid Can Yildirim, Gary B. Marquis. Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44(1): 168—176.
- [15] Sonsino C M. A consideration of allowable equivalent stresses for fatigue design of welded joints according to the notch stress concept with the reference radii $r_{ref}=1.00$ and 0.05 mm [J]. Welding in the World, 2009, 53(3/4): R64—R74.