

考虑疲劳性能的十字接头角焊缝尺寸设计

聂春戈， 孙振轩， 孙彦彬， 马思群
(大连交通大学 交通运输工程学院,大连 116028)

摘 要: 传统的角焊缝尺寸设计往往只考虑焊缝的静力强度,文中则从疲劳性能的角度对十字接头角焊缝的尺寸设计问题进行研究. 首先计算了无熔深十字接头可能失效截面的结构应力,通过对不同焊脚尺寸时结构应力变化特点的分析,从理论上证明了焊脚尺寸越大,接头的疲劳性能越高;当焊脚尺寸 s 和板厚 h 之比小于 0.75 时为焊根失效,大于 0.75 时为焊趾失效;而实际工程中 s/h 在 0.8 和 1.0 之间是比较理想的选择. 然后通过一系列疲劳试验验证了上述结论. 最后还分析了焊接熔深对十字接头疲劳性能和焊脚尺寸设计的影响.

关键词: 结构应力; 角焊缝; 尺寸设计; 疲劳性能; 十字接头

中图分类号: TG 405 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20170227003

0 序 言

十字接头是焊接结构中的常见接头形式. 十字接头中的承载角焊缝需要具有足够的尺寸,以保证接头具有足够的静力强度和疲劳强度. 传统的角焊缝尺寸设计往往只考虑焊缝的静力强度性能^[1-2]. 而对于接头疲劳性能的评估,则是在结构设计完成后再进行相关计算.

疲劳是一个局部问题,焊接接头的细节特征,如焊脚尺寸、熔深等对接头疲劳性能的影响很大,这在常见的疲劳标准对接头的分级可以看出来^[3-4]. 一个典型的例子是,在英国标准 BS7608-1993《钢结构疲劳设计和评定实用规程》中,具有不同细节特征的承载角焊缝十字接头分别对应了三种疲劳等级,即 W 级、F2 级和 F 级,疲劳性能相差很大. 因此,在结构设计过程中从抗疲劳性能的角度进行接头的细节设计具有重要意义.

角焊缝的焊脚尺寸是十字接头最重要的细节特征之一. 以无熔深的十字接头为例,如果焊脚尺寸小,疲劳失效往往起始于焊根,接头抗疲劳性能很低,标准 BS7608 中被归为 W 级;增大焊脚尺寸会使疲劳失效起始于焊趾,接头抗疲劳性能明显提高,属于 F2 级. 然而,标准 BS7608 中只是根据失效模式划分等级,并没有具体规定进行疲劳评估时焊脚尺寸多大可以使用 F2 级. 反映到实际生产中,人们往

往为了保守,在进行焊缝尺寸设计和实际焊接过程中都会取偏大的焊脚尺寸,而过大的焊缝尺寸会引起严重的“过焊接”现象,不但经济上浪费大,而且引起结构过大的焊接变形,这一问题在高强度薄板结构应用越来越广泛的背景下显得更为突出. 因此,如何选择“最合适”的焊脚尺寸,是一个具有重要工程价值的问题.

焊脚尺寸对接头疲劳性能的影响这一问题已经有不少研究^[5-7]. Maddox^[5]在对文献中大量试验数据和接头设计方法进行分析的基础上,通过直接令标准中的焊趾失效与焊根失效的疲劳寿命相等,得到最佳焊脚尺寸与板厚之间的比例关系,结果表明随着板厚减低,该比值增加. Gurney^[6]则利用断裂力学方法,推导了临界焊脚尺寸与板厚之间的关系,当板厚从 10 mm 变化到 50 mm 时,焊脚尺寸为板厚的 0.85 到 1.1 倍. Kainuma 等人^[7]通过对一系列不同焊脚尺寸的十字接头疲劳试验和基于断裂力学的裂纹扩展分析,得到最佳焊脚尺寸为 1.2 倍板厚.

文中基于网格不敏感结构应力方法^[8-12],对十字接头承载角焊缝在不同焊脚尺寸时的疲劳性能和破坏模式进行研究,然后利用疲劳试验进行了验证. 结果表明,试验结果与理论分析一致,从而为考虑抗疲劳性能的角焊缝尺寸设计提供理论基础. 最后文中还分析了焊缝熔深对十字接头抗疲劳能力和焊脚尺寸设计的影响.

1 角焊缝的结构应力定义

角焊缝附近是结构刚度发生变化的位置,应力

收稿日期: 2017-02-27
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405057); 国家重点研发计划(2016YFB1200403-A-04,2016YFB1200404-06); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540121)

状态复杂,是常规有限元方法的应力奇异位置. 以焊趾截面的法向应力分布为例,有限元的应力计算结果如图 1a 所示,具有典型的非线性特征,并在焊趾位置达到峰值. 在利用有限元方法进行接头的疲劳评估时,由于应力计算结果对网格尺寸、单元类型的依赖性,会严重影响疲劳评估精度. 董平沙^[8-9]提出的结构应力方法则很好地解决了这一问题.

接头位置的应力可分解为线性应力部分(图 1b)和高阶自平衡应力部分(图 1c). 线性部分称为结构应力,又可分解为膜应力和弯曲应力,这部分对接头疲劳裂纹扩展起主导作用. 高阶自平衡应力只在裂纹萌生阶段起作用,而这一阶段在整个接头疲劳寿命期内占比很小,因此进行接头疲劳寿命分析时往往不考虑^[8].

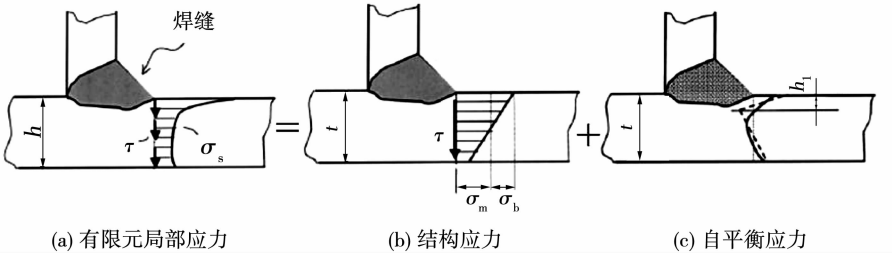


图 1 焊趾截面结构应力定义
Fig. 1 Structural stress definition at weld toe section

与常规有限元的应力计算方法不同的是,结构应力利用有限元结果中的单元节点力进行计算. 对于平面实体有限元模型,焊趾位置法向结构应力的数值计算过程可以总结为以下步骤.

- (1)提取图 2a 中截面 A-A 右侧共 N 个单元以定义焊趾截面.
- (2)提取截面上各节点的节点力 $F_1, F_2, \dots, F_{N+1}$ (图 2b).

- (3)根据平衡等效原理将截面上的节点力转化为合力 $F_{y'}$ 和相对于截面中点的弯矩 $M_{z'}$ (图 2c).
- (4)最后利用材料力学公式可计算 A-A 截面的结构应力,即

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{F_{y'}}{h} + \frac{M_{z'}}{\frac{1}{6}h^2} \tag{1}$$

式中: σ_m 和 σ_b 分别为膜应力和弯曲应力部分; h 为板厚.

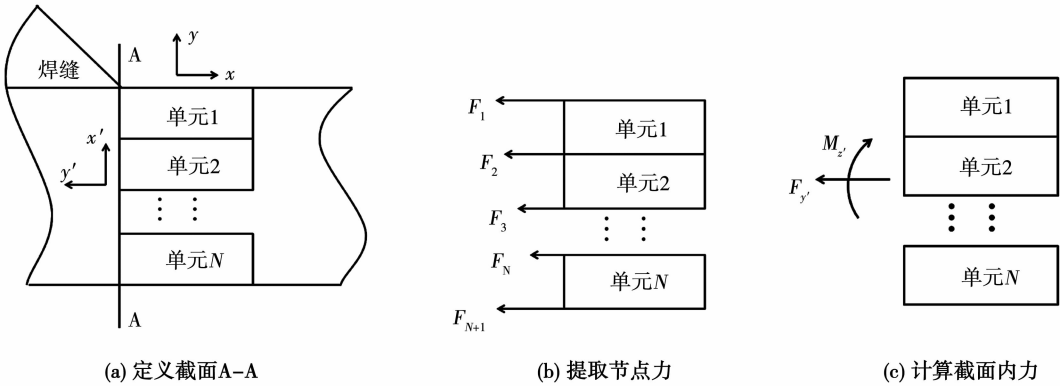


图 2 平面有限元模型中焊趾截面的节点力提取
Fig. 2 Extraction of nodal forces at weld toe section in plane FE model

对于图 3 中任意角度 θ 焊缝截面可以按照同样方法进行计算结构应力. 图中焊缝截面的宽度为 a_θ . 结构应力结果满足单元和结构水平上的平衡条件,其计算结果具有良好的网格不敏感特性,即单元网格的形状和类型对结果影响很小. 这一特征在文献中^[8-10]有大量实例,这里不再赘述.

结构应力最初用于焊接接头疲劳问题的分析,基于结构应力的主 S-N 曲线方法已经被规范 2007 ASME Div 2 和 2007 API 579 RP-1/ASME FFS-1^[9]吸收,并在实际工程中得到广泛应用^[10-11]. 同时,聂春戈等人^[12]还将该方法用于角焊缝抗剪强度的分析.

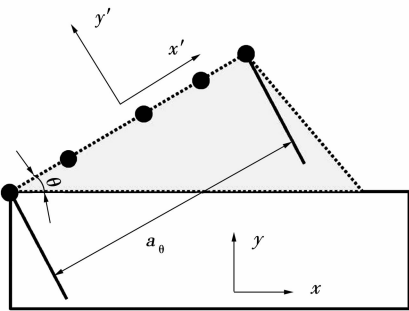


图 3 焊喉截面的结构应力计算

Fig. 3 Calculation of structural stress at weld throat section

2 无熔深十字接头角焊缝的尺寸设计与试验验证

2.1 十字接头角焊缝的结构应力计算与分析

对于十字接头而言,根据其细节特征的不同,疲劳薄弱位置可以是焊趾截面或者为焊喉截面. 根据主 S-N 曲线理论,利用结构应力方法计算不同位置的疲劳寿命时,由于使用的是同一条 S-N 曲线,直接通过对比不同截面结构应力的相对大小就可以判断哪一个位置为薄弱截面.

为分析焊脚尺寸对十字接头疲劳性能的影响,针对图 4a 中板厚 10 mm 的十字接头,建立了具有不同焊脚尺寸的有限元模型. 根据接头的几何和载荷特征,计算时取 1/4 结构,并应用了平面应变单元,其中一个典型有限元网格如图 4b 所示. 考虑到接头可能的失效模式,共定义并计算三个截面上的结构应力,分别为焊趾截面(截面 1)、45°焊喉截面(截面 2)和熔合线截面(截面 3).

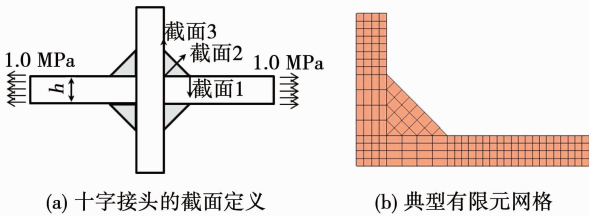


图 4 十字接头几何与有限元模型

Fig. 4 Geometry and FE model of cruciform joint

在接头上施加单位拉伸载荷,按照之前介绍的计算流程,得到不同截面的结构应力与焊脚尺寸之间的关系,如图 5 所示. 由图 5 可以看出,随着焊脚尺寸的增加,三个截面的结构应力呈单调下降的趋势,表明增大焊脚尺寸有利于接头每一个截面位置疲劳性能的提高.

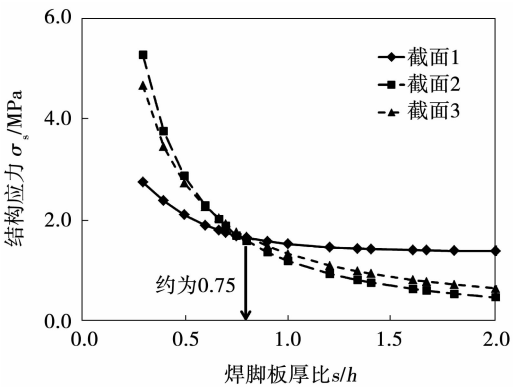


图 5 结构应力与焊脚尺寸的关系

Fig. 5 Relationship of structural stress and weld size

当焊脚尺寸较小时,焊趾截面的结构应力值明显低于另外两个截面,说明这种情况下接头不会从焊趾失效,疲劳薄弱位置是通过焊根的焊缝截面. 而其中截面 2 的结构应力又比截面 3 的更大,意味着焊喉截面更易于发生疲劳失效. 当然也应当认识到,此时截面 2 和截面 3 的应力差别并不大,同时考虑到实际接头中的焊缝周围性能的离散性,截面 3 (即焊缝熔合线位置)也有可能发生疲劳失效.

当接头中的焊脚尺寸较大,即当 $s/h > 0.75$,截面 1 的结构应力最大,表明焊趾截面成为疲劳薄弱位置,接头的失效模式发生转换,接头的疲劳寿命取决于焊趾截面的寿命. 而当 $s/h > 1.0$ 之后,可以看到焊趾截面的结构应力几乎不再继续降低,说明继续增大的焊脚尺寸已经不能使接头的疲劳寿命显著提高. 因此从疲劳性能的角度来讲,过大的焊脚尺寸(即 $s/h > 1.0$)是没有必要的.

2.2 试验验证

为验证上述计算和分析的正确性,这里设计不同焊脚尺寸的承载角焊缝十字接头试件进行试验验证,试件几何如图 6 所示. 试件板厚为 10 mm,焊脚尺寸分别为 $s = 5, 6, 8, 10$ 和 12 mm,共 5 种. 每种焊

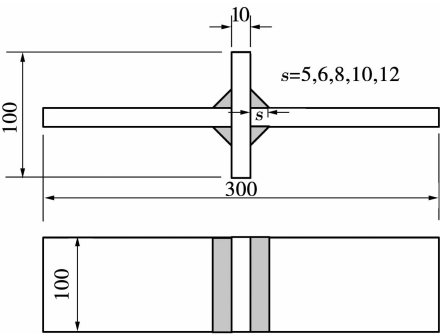


图 6 试件几何尺寸 (mm)

Fig. 6 Geometries of specimens

脚尺寸的试件个数为 8 个,分两个应力水平进行试验,试件总计 40 个.

所有试件均采用药芯焊丝电弧焊 (fluxed-cored arc welding,FCAW) 方法焊接. 为了使疲劳试验结

果更接近于工程实际,该批试件由工厂按照实际生产所使用的工艺参数进行自动化焊接. 其中焊脚尺寸分别为 5 和 8 mm 的两种典型接头宏观形貌如图 7 所示.

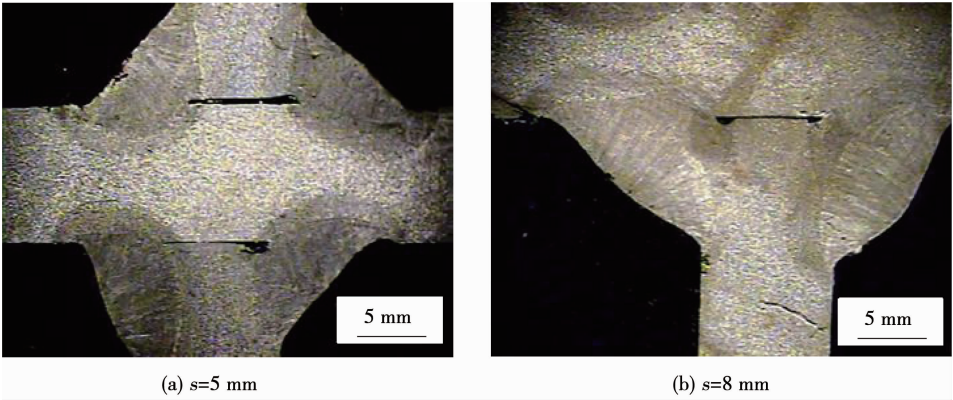


图 7 典型接头的宏观图
Fig. 7 Macrographs of typical joints

试验在 MTS 200 KIPs 通用液压测试设备上完成,全部试样均为焊态,试验采用的两级应力水平分别为 ± 105 和 $\pm 210\text{ MPa}$,加载频率 12 Hz.

图 8 中首先将试验数据与 BS7608 中疲劳等级分别为 F2 和 W 级的均值 S-N 曲线作了对比如下.

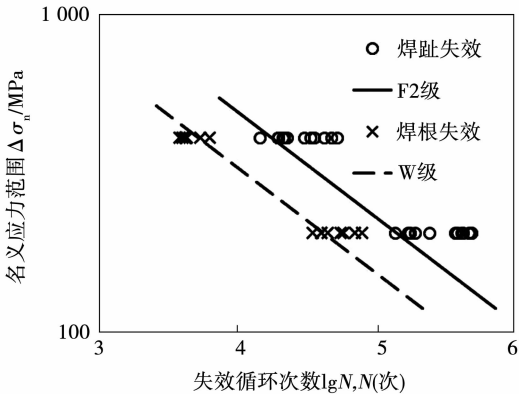


图 8 疲劳试验数据
Fig. 8 Fatigue test data

试验数据基本位于相应等级 S-N 曲线附近,说明了试验数据的可信. 但也可以发现试验的疲劳寿命稍偏高,这应当归结于试验使用的板厚为 10 mm,比 BS7608 中的标准板厚 16 mm 要小,因此这样的结果符合预期. 另外,应力水平为 $\pm 105\text{ MPa}$ 的试件疲劳寿命与焊脚尺寸之间的关系如图 9 所示.

观察可以发现,焊脚尺寸为 5 和 6 mm 的试件 (即 $s/h=0.5$ 和 0.6) 全部从焊根失效,而另外三种

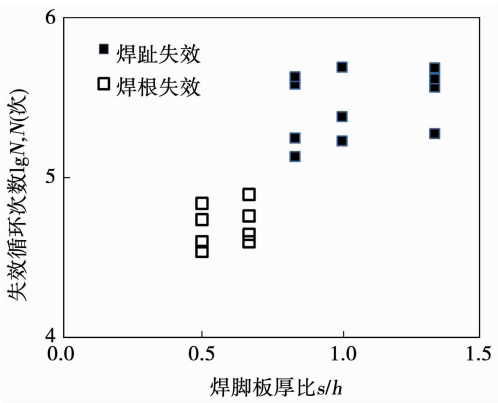


图 9 疲劳寿命与焊脚尺寸的关系
Fig. 9 Relationship of fatigue life and weld size

焊脚尺寸的试件则全部从焊趾穿透板厚失效. 当焊脚尺寸从 6 mm 增加到 8 mm 时,焊缝的失效模式发生了变化,这与上文计算的理论转换值 (约为 $s/h=0.75$) 一致.

从疲劳寿命的角度看,焊趾失效试件的寿命明显高于焊根失效试件,同样的应力水平下,焊趾失效试件的寿命可以是焊根失效试件的 5 倍以上. 因此在相关标准中两种接头对应不同的疲劳等级. 然而,同时需要注意的是,当焊脚从 8 mm 继续增加到 12 mm 时,接头的疲劳寿命虽然有所提高,但是非常有限. 这也就从疲劳试验的角度证明了焊脚尺寸设计的关键在于保证接头的焊趾失效模式,满足这一基本条件之后更大的尺寸对于接头的疲劳性能并没有明显提高,因此也是没有必要的. 结合前文对结

构应力计算结果的分析,实际工程中 s/h 在 0.8 和 1.0 之间就是比较理想的选择,这既保证了一定的保守性,有不至于使用过大的焊脚尺寸.

3 熔深对十字接头尺寸设计的影响

在实际工程结构中,如果十字接头需要更高的疲劳等级,则可以通过使用开坡口,从而增加焊缝熔深来实现. 根据标准 BS7608,当焊缝完全熔透时,接头的失效模式为焊趾开裂,疲劳等级为 F 级,与非承载角焊缝接头相同. 为从理论上研究这一特点,这里仍然利用结构应力方法研究不同焊缝熔深的十字接头.

与之前相似,首先针对板厚 10 mm 的十字接头建立包含不同焊缝熔深的平面有限元模型,其中 $s = 10\text{ mm}$,熔深 $p = 3\text{ mm}$ 的典型模型如图 10 所示.

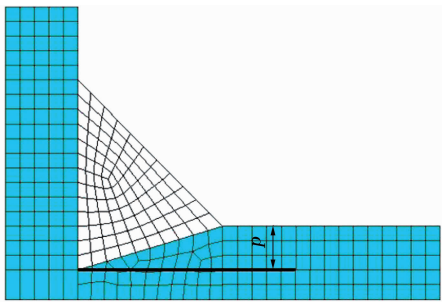


图 10 包含焊缝熔深的十字接头有限元模型
Fig. 10 FEA model of cruciform joint with weld penetration

全熔透时的接头为焊趾失效,因此只计算焊趾截面的结构应力. 为进行对比分析,这里的计算包含两种焊脚尺寸,分别为 $s = 5$ 和 10 mm . 两种焊脚尺寸的计算结果如图 11 所示,由于接头几何对称,图 11 中的 $p/h = 0.5$ 即代表了全熔透. 由图 11 可以看出,两种焊脚时,结构应力均随着焊缝熔深的增加而降低,表明熔深对焊趾截面的疲劳性能是有利的. 根据前文的计算与试验, $s/h = 1.0$ 时,无熔深接头为焊趾开裂,当熔深增大,接头的失效模式不会发生变化,但是其疲劳寿命仍然会增加,体现到图 11 中的结构应力为一条平缓下降的曲线; $s/h = 0.5$ 时,无熔深接头为焊根开裂,当熔深增大到一定程度后转换为焊趾失效模式,反映到图 11 中的结构应力为一条变化较为陡峭的曲线. 当接头接近于全熔透时,两种焊接尺寸的结构应力的变化均已非常平缓,表明此时熔深对疲劳的影响已经很小,接头中允许一定的未熔透是可行的.

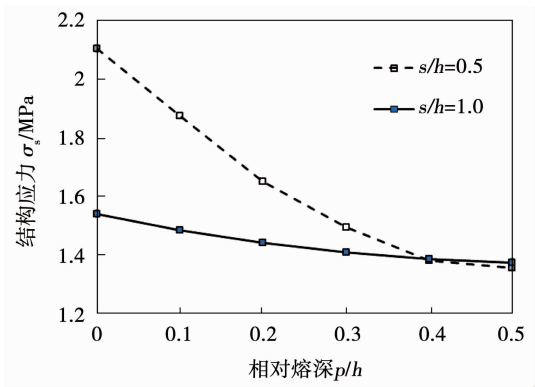


图 11 结构应力与焊缝熔深的关系
Fig. 11 Relation of structural stress and weld penetration

当接头接近于全熔透时, $s/h = 0.5$ 接头的结构应力甚至低于 $s/h = 1.0$ 的接头,说明此时焊脚尺寸小的接头的疲劳寿命反而更大. 因此如果为全熔透焊缝,可以使用更小的焊脚尺寸,如 $s/h = 0.5$,这能够大大节约焊材用量.

4 结 论

- (1) 结构应力方法可以准确识别不同焊脚尺寸时接头的疲劳失效模式,当 $s/h < 0.75$ 时为焊根失效,当 $s/h > 0.75$ 时为焊趾失效.
- (2) 无熔深接头焊脚尺寸的设计的关键在于保证焊趾失效模式,实际工程中 s/h 在 0.8 ~ 1.0 之间是比较理想的选择.
- (3) 焊缝熔深可以提高接头疲劳寿命,并且接头全熔透时,较小的焊脚尺寸具有更高的疲劳性能.

参考文献:

- [1] Commission XV of the IIW. Design rules for arc-welded connections in steel submitted to static loads [J]. Welding in the World, 1976, 14(5): 132 - 149.
- [2] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范[S]. GB 50017—2003 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [3] BS7608 B S. Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures [S]. London: British Standards Institution, 1993.
- [4] Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components [S]. England: International Institute of Welding, 2008.
- [5] Maddox S J. Status review on fatigue performance of fillet welds [J]. Journal of Offshore Mechanics and arctic engineering. 2008; 130(3): 31 - 36.
- [6] Gurney T R. Fatigue of welded structures [M]. London: Cambridge University Press, 1979.

表面晶粒尺寸均匀,硬质相弥散分布,焊层磨损均匀,剥落坑较少,磨损量为 4.2 mg,较纯氩气保护时降低了 63% 倍,耐磨性相对较好.

参考文献:

[1] 王福德,游 敏. YDCrMoV CO₂ 气保护堆焊药芯焊丝的磨粒磨损性能[J]. 焊接学报, 2000, 21(4): 46-49.
Wang Fude, You Ming. Abrasive wear of cladding metal of YD-CrMoV CO₂ shielded flux-cored wire [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(4): 46-49.

[2] 桂赤斌,曾海斌,吴平安,等. 气保护药芯焊丝合金元素 C、Mn 过渡行为[J]. 焊接学报, 2003, 24(2): 86-88.
Gui Chibin, Zeng Haibin, Wu Pingan, *et al.* Transfer behaviors of carbon and manganese of flux-cored wire in gas shielded arc welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(2): 86-88.

[3] 国旭明,杨功斌. 保护气体对高强钢熔敷金属组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(7): 141-142.
Guo Xuming, Yang Gongbin. Effects of shielded gas on microstructures and properties of high strength steel deposits[J]. Hot Working Techonology, 2012, 41(7): 141-142.

[4] 傅 卫,王惜宝,陈国喜. 镍基 WC 等离子弧熔敷层的组织和高温磨损性能[J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 65-67.
Fu Wei, Wang Xibao, Chen Guoxi. Microstructure and high temperature abrasion resistance of Ni-based WC composite layer deposited by plasma arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(5): 65-67.

[5] Li L, Gui C. Dissolving behavior of tungsten carbide in surface welded using flux-cored wire[J]. Procedia Engineering, 2012, 27: 823-827.

[6] Zafar S, Sharma A K. Structure-property correlations in nano-structured WC - 12Co microwave clad[J]. Applied Surface Science, 2016, 370: 92-101.

[7] 王惠斌. 不锈钢堆焊层金相组织分析[J]. 石油化工设备, 2003, 32(5): 45-46.
Wang Huibin. Metallographic structure analysis of stainless steel surfacing[J]. Petro-chemical Equipment, 2003, 32(5): 45-46.

[8] Sudha C, Shankar P, Rao R V S, *et al.* Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni - Cr - Si - B alloy on AISI 304L stainless steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(10): 2103-2112.

[9] 熊 瑞. Fe-Cr-C 堆焊合金层耐磨性试验分析[D]. 太原:太原理工大学, 2013.

[10] 杨尚磊,吕学勤,邹增大,等. 含内生硬质碳化物颗粒的金属堆焊层的抗磨性能及磨损机理[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(6): 508-511.
Yang Shanglei, Lü Xueqin, Zou Zengda, *et al.* Wear resistance and wear mechanism of welded surfacing layers containing internally produced carbide particulates [J]. Tribology, 2004, 24(6): 508-511.

作者简介: 袁晓波,女,1990 年出生,硕士. 主要从事铁基复合堆焊材料耐磨性能研究. Email: xiaobo_yuan0720@163.com

通讯作者: 易江龙,男,高级工程师. Email: yijl@gwi.gd.cn

[上接第 20 页]

[7] Kainuma S, Mori T. A study on fatigue crack initiation point of load-carrying fillet welded cruciform joints [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(9): 1669-77.

[8] Dong P. A robust structural stress method for fatigue analysis of offshore/marine structures [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2005, 127(2): 68-74.

[9] Dong P, Hong J K. Analysis of recent fatigue data using the structural stress procedure in ASME Div. 2 rewrite[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(8): 355-362.

[10] 武 奇,邱惠清,王伟生. 基于结构应力的焊接接头疲劳分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 101-106.
Wu Qi, Qiu Huiqing, Wang Weisheng. Fatigue analysis of welded joints by method of structural stress[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 101-106.

[11] 兆文忠,魏鸿亮,方 吉,等. 基于主 S-N 曲线法的焊接结构虚拟疲劳试验理论与应用[J]. 焊接学报, 2014, 35(5):

75-78.
Zhao Wenzhong, Wei Hongliang, Fang Ji, *et al.* The theory and application of the virtual fatigue test of welded structures based on the master S-N curve method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 75-78.

[12] 聂春戈,魏鸿亮,董平沙,等. 基于结构应力方法的正面角焊缝抗剪强度分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 70-74.
Nie Chungge, Wei Hongliang, Dong Pingsha, *et al.* Shear strength analysis of transverse fillet welds based on structural stress method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(1): 70-74.

作者简介: 聂春戈,男,1979 年出生,博士,副教授. 主要从事焊接结构疲劳强度分析,焊接变形与残余应力分析等的科研和教学工作. 已发表论文 20 余篇. Email: niechunge@126.com