

薄板单面密集焊缝焊后弯曲变形分析

陈高詹， 唐 彬， 陶海燕， 陈 路
(中国核动力研究设计院 第四研究所,成都 610041)

摘 要: 针对 2 mm 的 316L 薄板单面密集焊缝结构,采用数值模拟的方法分析了两种焊接方案下的薄板焊接弯曲变形. 利用高度测量装置建立了薄板弯曲变形测量方法,进行了两种焊接方案的工艺试验,对焊后弯曲变形进行了测量. 在此基础上,对数值模拟和工艺试验的结果进行了对比. 结果表明,薄板单面密集焊缝结构焊接后呈船形变形,拉通焊弯曲变形中心接近于板中心,而两端向中间焊弯曲变形中心偏向板的先焊位置. 两端向中间焊在长度方向弯曲变形量小于拉通焊,两端向中间焊的焊接方案较优.

关键词: 薄板; 单面密集焊缝; 焊后弯曲变形; 焊接方向

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20150208002

0 序 言

20 世纪 90 年代以来,发达国家在军事制造和工业生产中,薄板钢材的使用情况日益剧增. 板厚的减薄能节约材料,减轻产品质量,但给焊接生产带来了不小的难题. 2 mm 以下薄板焊接过程中,存在容易烧穿、变形大、焊缝成形不良等问题. 薄板刚度小,焊接过程中易产生弯曲变形,甚至失稳发生波浪变形^[1],从而严重影响焊接结构的精度和质量,导致产品质量隐患^[2]. 薄板单面密集焊缝结构在薄板的单面密集分布着多条焊缝,其焊接变形具有复杂性、多元性. 多条焊缝的焊接顺序、焊接方向选择直接影响到薄板焊后形状,控制不当极易引起产品质量隐患. 合理的设计薄板焊接顺序方案,对于控制薄板焊接变形和薄板结构的安全应用非常重要.

1 试验方法

1.1 薄板单面密集焊缝结构

一种典型的薄板单面密集焊缝结构,其模型示意图如图 1 所示.

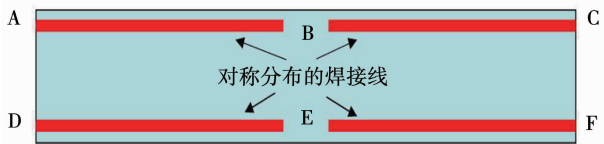


图 1 模型示意图
Fig. 1 Example of single side intensive welding

薄板尺寸为 260 mm × 50 mm × 2 mm 的 316 L 不锈钢,在其单面两侧四个边沿对称密集分布着四条焊缝.

图 1 中所示的 AB,BC,DE,EF 为四条焊缝,焊缝位置离薄板长边的距离为 6 mm,焊缝 AB 与焊缝 BC,焊缝 DE 与焊缝 EF 之间存在一非焊区,距离为 30 mm.

图 1 所示的结构,焊缝位于薄板的四周,焊接后,由于焊缝的纵向收缩和横向收缩均会引起薄板构件的挠曲变形,将会发生图 2 所示的船形变形.

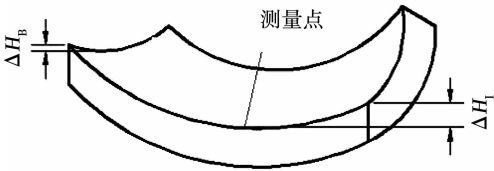


图 2 船形变形
Fig. 2 Ship-shaped deformation

船形变形主要分为两部分,一部分为长度方向的弯曲变形 $\angle\alpha$,一部分为宽度方向的弯曲变形 $\angle\beta$. $\tan\alpha = \Delta H_L/L$, L 为测点长度方向离端部的距离; $\tan\beta = \Delta H_B/B$, B 为宽度方向测点离端部的距离. 长宽比较大的薄板,长度方向的弯曲变形较大. 因此文中主要针对薄板长度方向弯曲变形进行分析. 针对图 1 结构的四条焊缝,为了研究焊接方向对薄板的弯曲变形的影响,设计了两种焊接方案,(1)拉通焊,焊接工艺顺序为 A - B, B - C; D - E, E - F;(2)

两边往中间焊,焊接工艺顺序为 A - B,C - B;D - E, F - E.

1.2 弯曲变形的测量方法

测量装置由高度测量装置和支撑块组成,支撑块上包含简易固定装置,在板的 AD,CE 两侧分别选取固定位置,在测量时保证每次能将板固定在固定位置,保证测量的精确并使测量具有重复性,以两端为基准,测量薄板各点的高度,获得薄板的形状和弯曲变形值,假设测得的距端面距离为 L 处的高度为 H_c ,则

$$\Delta H_1 = H_c - H_z - h \tag{1}$$

式中: H_c 实际测量高度; H_z 支撑块高度; h 板厚.

在板未发生弯曲变形时,板足够平整且无变形,理想情况下 ΔH_1 值应为零. 发生弯曲变形后, ΔH_1 为负值表示钢板向下凹, ΔH_1 为正值表示钢板向上凸.

薄板单面密集结构焊后,为了描述薄板弯曲变形后的形状,分别选取位于薄板两侧 AC,DF 两条直线作为测量线. 每条测量线选取七个点作为测量点,分别位于距端部 A 或 D 的 32,64,96,130,164,196,228 mm 距离处. 测量时将焊缝朝上正向放置,则钢板应为下凹变形. 理想情况下,两端最高, ΔH_1 应均为负值, ΔH_1 的最小值应位于钢板中部.

2 数值模拟分析

2.1 模型的建立

网格的划分直接关系到计算的精度和效率,为

了提高计算精度,针对薄板密集焊缝结构,在四条焊缝及其附近区域用较细的网格,远离焊缝区域用较稀疏的网格^[3-5],网格划分采用六面体单元,网格总数为 27 644 个,网格划分结果如图 3 所示.

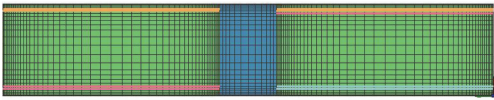


图 3 有限元网格
Fig. 3 Finite element mesh

2.2 热源的选择

薄板焊接,热输入不大,焊接熔深浅,文中选择高斯面热源作为热源模型,模型的表达式为

$$q(r) = q(0) \exp(-cr^2) \tag{2}$$

式中: $q(r)$ 为半径 r 处的表面热流; $q(0)$ 为热源中心处热流量最大值; c 为热源集中系数; r 为距热源中心的距离.

2.3 模拟结果与分析

对薄板密集焊缝单面焊接进行了有限元分析,获得了两种焊接方案的焊后变形云图. 图 4a,b 所示分别为焊接方案一和焊接方案二的焊后变形云图. 为了直观地观察焊接变形情况,分别对变形结果进行了 10 倍、20 倍和 30 倍放大.

薄板单面密集焊缝焊接后,受热面的纵向收缩引起薄板向受热面方向的翘曲变形^[6]. 模拟结果显

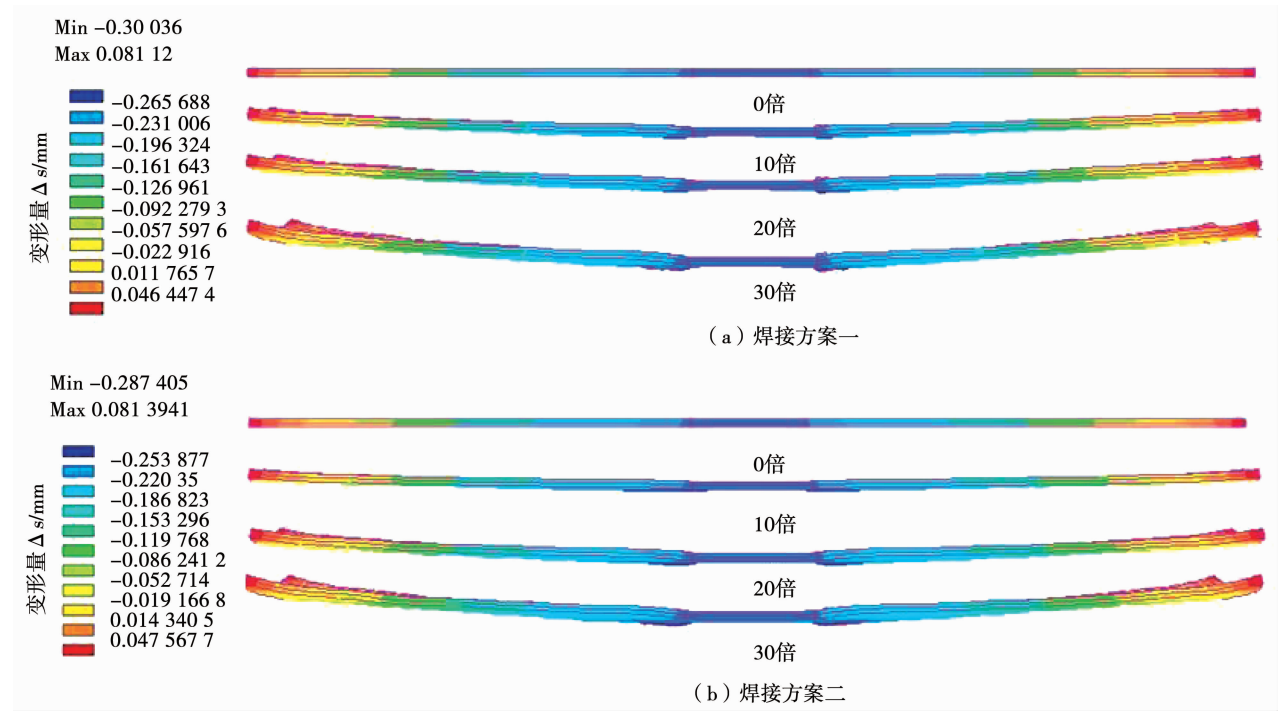


图 4 两种方案焊后变形云图
Fig. 4 Deformation contour of two processes

示,焊接方案一与焊接方案二变形趋势一致,在钢板中心,负向位移值最大,在薄板的两端部,正向位移值最大,薄板单面密集焊缝的焊后变形呈船形,与理论分析相似. 薄板单面焊后的弯曲变形包含焊缝的长度方向弯曲变形及宽度方向的弯曲变形,长度方向弯曲变形和宽度方向弯曲的中心均位于钢板中心. 因此在薄板四角位置,正向位移值最大.

从图 4a 中可以看出,焊接方案一的正向最大位移值为 0.081 1 mm,负向位移值最大为 -0.300 4 mm. 从图 4b 中可以看出,焊接方案二的正向最大位移值为 0.081 4 mm,负向位移值最大为 -0.287 4 mm. 以最大正向位移值为零点,最大变形量为正向最大位移值和负向位移值绝对值之和. 焊接方案一的最大变形量为 0.381 8 mm,焊接方案二的最大变形量为 0.368 8 mm. 因此,从长度方向的弯曲变形来看,焊接方案二的最大变形量小于焊接方案一的最大变形量,焊接方案二优于焊接方案一.

3 试验过程与结果分析

3.1 试验方法

选取尺寸为 260 mm × 50 mm × 2 mm 的 316 L 不锈钢薄板. 为消除薄板本身质量的影响,尽量选择平整的不锈钢薄板,并对薄板进行校平和检测,将不锈钢薄板清洗,烘干后. 按照实际焊接线在试验板上设置好 4 条焊接线的长度和位置. 利用法国 NORMA 电子束焊机进行焊接,焊接主要工艺参数如表 1 所示.

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameter

高压 U/kV	束流 I/mA	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
60	10	900

待钢板焊后冷却至常温,沿着 AC 侧和 DF 侧每边测量 7 个位置的高度数据,获得不锈钢薄板焊后的弯曲变形值.

3.2 试验结果分析

按照焊接线在每块板上设置固定的焊接位置后,按照表 1 所述工艺参数对试板进行了两种方案的焊接,每组工艺包含 3 块试板,焊后试验样件如图 5 所示.

从试验样件焊后外观观察结果看,焊后弯曲肉眼看不明显,焊后测量 ΔH_i 值,根据测得的数据,作 ΔH_i - 位置图如图 6 所示.



图 5 焊后试验样件
Fig. 5 Sample after welding

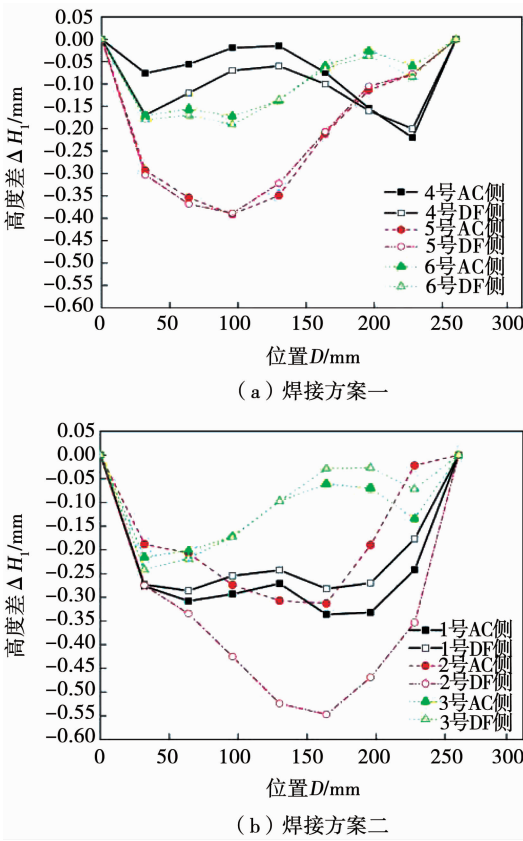


图 6 焊后 ΔH_i - 位置图
Fig. 6 ΔH_i -position curve graph of sample after welding

ΔH_i 的值主要由焊缝的纵向收缩引起,理论上在板弯曲的中心部位应最低^[7]. 从图 6 可以看出,六块试验板焊后均发生了明显的弯曲变形,薄板两端向上翘,中间向下凹,呈弓形,与理论分析相符,两种焊接方案的变形趋势大体一致. 同一块板的 AC 侧与 DF 侧两侧的变形量接近,因此单块薄板两侧的焊接先后顺序对两侧的弯曲变形影响较小. 从变形分布来看,采用焊接方案一的 3 块试验板, ΔH_i 的最大值接近于板的中心位置,弯曲变形较对称;采用焊接方案二的 3 块试验板, ΔH_i 的最大值偏向于板的 A 侧, D 侧(先焊侧),弯曲变形中心偏向板的先焊位置.

焊接方案一焊接的 3 块试板中,试验板 2 发生

的弯曲变形最大,最大 ΔH_1 值位置在 164 mm 处,为 -0.547 mm,试验板 3 存在轻微的波浪变形. 焊接方案二焊接的 3 块试板中,试验板 5 弯曲变形最大,最大 ΔH_1 值位置在 96 mm 处,为 -0.391 mm,试验板 4,试验板 6 存在轻微的波浪变形. 对比图 6a 与图 6b 可见采用焊接方案二的 3 块试验板相比于采用焊接方案一的 3 块试验板,焊接弯曲变形略小,焊接方案较优.

3.3 模拟结果与试验结果对比

利用模拟获得的数据,作位置-位移图,与两种方案试验结果得到的典型薄板弯曲变形形状图进行对比,结果如图 7 所示.

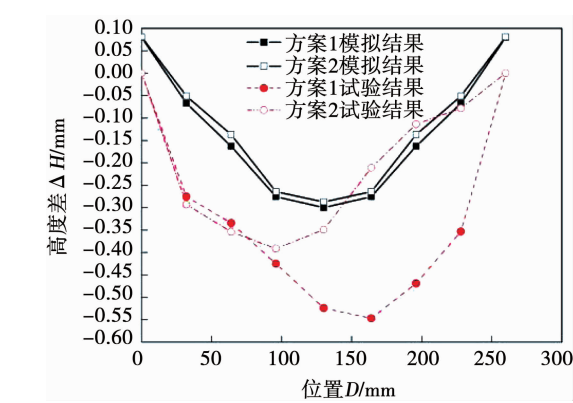


图 7 试验结果与模拟结果对比

Fig. 7 Comparison results of simulation and test

图 7 中所示的方案一试验结果为板 2 (DF 侧) 的形状,方案二模拟结果为板 5 (DF 侧) 的弯曲变形形状,从图可以看出,模拟得到的结果与试验结果的薄板变形均为弓形变形形状,且焊接方案一的弯曲变形要略大于焊接方案二的弯曲变形. 模拟结果与实际结果不同点在于,模拟获得的薄板密集焊缝结构的弯曲变形中心基本位于板的中心位置,而在实际焊接过程中,受板初始条件和焊接条件的影响,薄板焊接的弯曲变形中心并不位于板的中心位置.

4 结 论

(1) 薄板密集焊缝结构焊后,受热面的纵向收

缩引起薄板向受热面方向的翘曲变形,最终变形为船形弯曲变形.

(2) 从纵向弯曲变形来看,采用两端向中间焊的焊接方案的焊接弯曲变形较直通焊略小,焊接方案较优.

(3) 拉通焊弯曲变形中心接近于板中心,而两端向中间焊弯曲变形中心偏向板的先焊位置.

参考文献:

[1] 李 军,杨建国,翁路露,等. 薄壁结构焊接的焊中控制研究现状[J]. 焊接,2008(8): 16-22.
Li Jun, Yang Jianguo, Weng Lulu, *et al.* Research status of process control during we lding of thin-walled structures [J]. Welding & Joining, 2008(8): 16-22.

[2] Deo M V, Michaleris P. Mitigation of welding induced buckling distortion using transient thermal tensioning [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2003(8): 49-54.

[3] T. W. Eager, N. S. Tsai. Temperature fields produced by traveling distributed heat sources [J]. Welding Journal, 1983, 62 (12): 3462-3552.

[4] 张学秋,杨建国,刘雪松,等. 焊接顺序对整体叶盘圆度影响的有限元分析[J]. 焊接学报,2010, 31(3): 57-60.
Zhang Xueqiu, Yang Jianguo, Liu Xuesong, *et al.* Finite element analysis of welding sequence impact on blisk roundness[J], Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(3): 57-60.

[5] 张 勇,杨建国,刘雪松,等. TC4 薄板随焊旋转挤压工艺 [J]. 焊接学报,2010, 31(9): 81-86.
Zhang Yong, Yang Jianguo, Liu Xuesong, *et al.* Welding TC4 thin plates by revolution pressing in welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(9): 81-86.

[6] 许鸿吉,尹丽香,李晋炜,等. TC4 钛合金电子束焊接接头组织和性能[J]. 焊接学报,2005, 26(11): 43-46.
Xu Hongji, Yin Lixiang, Li Jinwei, *et al.* Microstructures and properties of TC4 alloy joints welded by th e electron beam welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26 (11): 43-46.

作者简介: 陈高詹,男,1985 年出生,硕士,助理研究员. 主要从事核燃料与材料焊接. Email: chengaozhan77@163.com

通讯作者: 唐 彬,男,助理研究员. Email: tangbinzk789@163.com

GTAW 熔池三维表面激光点阵反射特征的仿真与优化

李春凯，石 玟，顾玉芬，朱 明*

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进材料加工与再利用国家重点实验室,兰州 730050)

摘 要: 熔池表面三维测量对实现 GTAW 熔透控制及深入理解电弧、熔池耦合作用具有重要意义. 基于激光视觉提出了一种熔池表面测量方法. 在熔池表面测量时激光光路参数变化对反射点阵图像有较大影响. 为了研究激光入射角、激光器到熔池距离、成像屏到钨极距离对传感质量的影响规律,建立了熔池表面标准模型、入射线、反射线、成像屏方程,并采用光学反射定律逆向仿真了反射点阵的变化规律,并通过工艺试验对仿真结果进行了验证. 结果表明, θ , D , L 的最佳调节范围为 $28^{\circ} \sim 32^{\circ}$, $45 \sim 55$ mm, $50 \sim 60$ mm;仿真结果与试验结果吻合良好.

关键词: 熔池自由表面; 激光视觉; GTAW; 三维测量

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20151118004

0 序 言

焊缝熔透状态对焊缝力学性能具有决定性影响,重要的焊接结构件为保证焊接质量对焊缝熔透均提出了较高的要求. 因此,实现焊缝熔透的实时检测与控制对保证焊接质量具有重要的意义.

相关研究表明 TIG 焊熔池表面三维形貌与焊缝熔透状态具有一定相关性^[1-3]. 然而由于熔池表面的类镜面特性及强烈电弧光的干扰,使得从熔池正面获取熔池三维信息十分困难. 肯塔基大学的张裕明等人^[4]提出了结构光法,利用熔池表面类镜面特性,将小功率线条结构光投射于熔池表面,并采集反射激光条纹通过三维恢复算法得到熔池表面形貌. 该方法具有较好的测量效果与抗弧光干扰能力. 在结构光法的基础上,提出了一种激光点阵测量熔池表面三维形貌的方法. 在熔池表面测量试验中发现激光光路参数变化对反射激光点阵图像有较大影响,为了研究各个参数对传感质量的影响规律,建立了熔池表面的标准模型,入射线、反射线、成像屏方程,采用光学反射定律逆向仿真了光路参数变化时点阵变化规律,并得到了最优光路参数;最后通过工艺试验对仿真结果进行了验证.

1 激光视觉测量原理

利用熔池表面类镜面特性,将 19×19 的点阵激光投射于熔池表面发生镜面反射,用成像屏来捕捉反射的激光点阵,用 CCD 摄像机采集成像屏上激光点阵的动态变化,通过光学反射几何关系和坐标变换,可以恢复熔池表面的三维形貌^[5]. 该系统中的光路参数主要包括:激光器入射角(θ)、激光器到熔池距离(D)、成像屏到钨极距离(L)等,如图 1 所示.

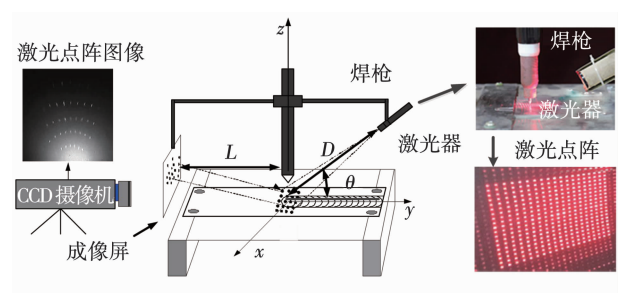


图 1 激光视觉系统简图
Fig. 1 System diagram of laser-vision

2 熔池表面标准模型及仿真算法

建立了 GTAW 熔池自由表面标准模型、激光反射线、入射线方程,并采用镜面反射定律对各个参数变化后激光点阵形态进行了仿真.

2.1 熔池表面标准模型

熔池表面采用以下模型描述,即

收稿日期: 2015-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51765037);兰州理工大学 优秀学生出国学习交流基金;兰州理工大学红柳杰出人才培养计划项目(J201201);省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室开放基金(SKLAB2015008)

* 参加此项研究工作的还有张 刚和杜雷明.