激光拼焊错边产生与预测建模方法

辛立明^{1,2}, 赵明扬¹, 徐志刚¹

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016, 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:错边是评定激光拼焊质量的一个非常重要的指标,薄板构件错边的控制是激 光拼焊中一个难题。针对国内首条全自动激光拼焊设备,对错边的产生以及控制方法 进行了深入研究,经过大量试验确定了影响错边大小的几个主要因素,板材自身物理变 形、压紧力大小与均匀性、压紧横梁变形、支撑底板平面度误差以及焊接变形的影响。 通过分析以上因素对错边的影响以及各个因素之间相互关系,建立了错边预测的数学 模型。试验验证了模型的正确性,从而为确定错边产生原因,提高焊接质量提供了一个 有效的理论指导。

关键词:激光拼焊;错边;有限元分析;错边预测模型 中图分类号:TG441.7 文献标识码:A 文章编号:0253-360X(2008)11-0089-05



辛立明

0 序 言

激光焊接作为一种先进的加工技术,具有效率高、加工质量清洁等优点,已经成为工业生产中一项 不可缺少的技术^[1]。中国的激光拼板技术应用刚刚 起步,主要应用在引进的国外车型上。随着国内汽 车制造技术的发展,具有自主产权的国产汽车也开 始采用拼板,比如奇瑞汽车上采用了5块拼板,中华 汽车准备在其车身上采用9块拼板。因此以汽车制 造业为主要应用背景的激光拼焊技术在国内有很大 的发展空间。

激光拼板是指将两块或两块以上的薄板在冲压 成形前用激光焊接在一起,然后进行成形,以满足不 同部位等强度的要求^[1]。激光焊接的质量较普通焊 接方法具有明显的优点,但是在成形前对拼板的各 项指标有较高的要求,尤其是错边,必须控制在薄板 厚度的15%以下才能保证冲压成形时强度要求和 减小对模具的损伤。因此研究激光拼板错边产生原 因以及控制方法对于提高激光拼焊质量以及冲压成 形精度有重要意义。

作者将以中国科学院沈阳自动化研究所研制的 国内首条全自动激光拼焊生产线为例,对错边进行 详细深入的研究,寻找其产生原因,建立错边预测模 型,为减小错边提供理论指导。

1 系统总体结构

全自动激光拼焊生产线主要由上料单元、定位、 压紧单元、焊接单元、侧向出料单元、下料单元以及 控制系统等组成。错边主要是由于压紧装置的机构 误差和焊接热变形引起的。压紧装置主要由气缸、 压紧横梁、压紧弹簧、压板和支撑底板构成(图1)。



图 1 压紧装置 Fig. 1 Clamping set

2 错边源分析

2.1 错边的定义

激光拼焊是将两块等厚或者不等厚钢板焊接在 一起,由于板材或者设备等原因使得本来应该在同 一平面内的焊接接头在高度上存在误差 h,这个现 象叫做错边。由于焊接强度和后续冲压工序的要

收稿日期: 2008-01-04

基金项目:中国科学院知识创新工程方向项目"全自动激光拼焊成 套装备关键技术研究与示范应用"

求,错边量不能超过薄板厚度的15%或者2mm(两 者取小)^[2]。

2.2 错边源分析

错边主要是由于板材自身的变形和压紧装置的 机构误差产生。具体包含以下几个主要因素:板材 自身物理变形、压紧力大小以及均匀性、压紧横梁变 形、支撑底板平面度误差和焊接热变形等。

2.2.1 板材自身物理变形

板材自身物理变形是错边产生的直接原因。被 焊钢板在备料(剪切、气割、冷弯等)、储存或运输过 程中可能引起局部不平直。薄板变形具有复杂性、 多元性,通过对焊接前板材变形的研究,发现在激光 拼焊中对错边有影响的变形主要表现为两种形式: 一种是绕 x 轴(焊缝方向)的变形,第二种是绕 y 轴 (板材平面内垂直焊缝方向)的变形。板材的变形主 要是这两种形式或者这两种变形的综合。如图1所 示,压紧时,板材在被压紧后距离焊缝有10 mm的悬 边,因此焊缝处的板材变形控制比较困难。对于第 一种情况,变形不能完全消除,变形大小可以通过数 学计算的方法得到;对于第二种变形,在压紧力足够 大的情况下压紧装置能够对其进行很好的控制,通 过有限元分析的方法可以确定变形大小。

第一种变形过程分析:压紧前板材自身有变形, 压紧后压块压紧处板材变形消失,但是悬边处由于 没有压紧力的作用变形依然存在,压紧处板材中面 为平面,与悬边处板材中面(圆弧面)相切,假设板材 变形曲率半径为 R_x,板材悬边长度为 l,根据几何关 系可以得到板材在垂直方向变形误差 h,即

$$h = R_x - \sqrt{R_x^2 - l^2} \tag{1}$$

由板材变形引起的错边可以表示为

 $M_{bd} = M_{bdx} + M_{bdy} = R_x - \sqrt{R_x^2 - l^2} + M_{bdy}$ (2) 式中: M_{bd} 为板材变形引起的错边; M_{bdx} 为绕x轴变 形引起的错边; M_{bdy} 为绕y轴变形引起的错边。 2.2.2 压紧力大小

压紧力大小是影响错边的一个重要因素。压紧 力过小不能有效控制板材变形,容易发生错边;压紧 力过大对系统的结构刚度要求比较高,同时导致其 它未知情况产生。因此选择合理的压紧力范围对有 效控制错边非常重要。图 2 为板厚为 0.7 mm 与 1.6 mm钢板在不同压紧力作用下进行焊接后的错 边情况,采用 Servo-Robot 检测系统采集结果,可以看 出随着压紧力的增加错边变小,但是当压力增加到 一定数值以后错边曲线波动性增加,说明压紧力数 值超过了系统刚度允许范围,导致压紧力不均匀从 而错边增大。



图 2 不同压紧力下的错边 Fig. 2 Misalignment with different clamping forces

针对板材的两种典型变形形式,按照文献[3]所述方法确定压紧力大小。这里对绕 y 轴的变形进行分析,变形可以认为是两边固定的矩形板在均布载荷 q 作用下产生的变形。设定矩形板边长分别为 a, b,长度为b 的两对边固定,根据边界条件,解得板材挠度为

 $f = \sum_{m=1}^{\infty} \left[A_m \operatorname{ch} \frac{m\pi y}{a} + B_m \frac{m\pi y}{a} \operatorname{sh} \frac{m\pi y}{a} + C_m \operatorname{sh} \frac{m\pi y}{a} + D_m \frac{m\pi y}{a} \operatorname{ch} \frac{m\pi y}{a} + f_m(y) \right] \sin \frac{m\pi y}{a} (m = 1, 2 \dots \infty) (3)$ $\operatorname{dr} : \operatorname{star} A_m, B_m, C_m, D_m \operatorname{TUR} \operatorname{Hz} \operatorname{Hz}$

$$M_F = M(F) \tag{4}$$

2.2.3 压紧力均匀性

压紧力均匀性主要包括压板之间压紧力均匀性 和单个压板压紧力均匀性。每个压板通过两个弹簧 进行压紧,当弹簧的压缩量不同时,每个压块的压紧 力不一致,压紧力小的压块就不能对板材构件的变 形进行有效控制,导致错边。同时由于每个压板在 压紧过程中容易产生偏载,使压板和板材线接触,不 能有效地控制板材变形,这样也将导致错边。由于 压紧力不均匀产生的错边用 *M*equ表示。

2.2.4 压紧横梁刚度

压紧横梁是简支梁结构,在压紧过程中会发生 变形。经过测量最大变形发生在横梁中间,大小约 为2 mm。横梁的变形将导致压紧块的弹簧压缩量 不同,从而使压紧力不均匀。在进行3组焊接试验 时,发现中间一组错边比两边的严重。

下面分析横梁变形对压紧力均匀性的影响。如 图 3a 所示,每个弹簧受力为 *F*_i,由于初始状态下弹簧伸长量相等,所以

$$l_1 = l_2 = l_i (i = 1, 2 \dots n)$$
 (5)
压紧后压紧块在同一平面上,所以

$$l'_{1} - f_{1} = l'_{2} - f_{2} = l'_{i} - f_{i} = h$$
 (*i* = 1, 2...*n*)
(6)

式中: $l_i 与 l'_i$ (*i* = 1,2…*n*)分别为弹簧压缩前后长 度; fi 为横梁在 i 点的变形。

压紧状态下弹簧压缩量为

$$\Delta x_{i} = l_{i} - l'_{i} \quad (i = 1, 2 \cdots n)$$
(7)

因为有 $EIf_i = \int [M_i(x)dx] dx + Cx + D$ (8) $F_i = k \Delta x_i$ E. (9)

联立式(5),(6),(7),(8)与(9)即求得F_i的表达式。

解决横梁变形的方法有两种:一是提高横梁刚 度,二是根据横梁变形,调节弹簧初始长度,使压紧 力一致。第一种方法会使得横梁尺寸增大,实现起 来困难比较大,下面详细分析第二种方法。

根据式(8)计算在相同压力下横梁每一点的变 形f_i,由于压块压紧时在同一平面上(图 3b),且压 紧力相同所以弹簧压缩量相同,即

 $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_i \quad (i = 1, 2 \cdots n)$ (10)由此可以计算出弹簧的原始长度为

$$l_i = l'_i + \Delta x_i = f_i + h + \Delta x_i \tag{11}$$

根据式(11)的计算结果调整弹簧初始长度可以保 证压紧力的均匀性。





2.2.5 支撑底板平面度

如图1所示支撑底板由前后支撑底板组成。两 个支撑底板平面度误差也是影响错边的一个重要因 素。为了验证支撑底板对错边的影响,首先对前后 支撑底板的平面度误差进行测量,根据测量结果进 行错边验证试验,验证支撑底板对错边的影响情况。

采用千分表测量支撑底板平面度误差,通过测 量两个支撑底板与标尺之间相对位置关系确定误差 大小。首先将标尺(精度 0.01 mm)置于两个支撑底 板上,标尺与两个支撑底板的中心线垂直,并沿支撑 底板中心线每隔 50 mm 移动一个位置,千分表在标 尺上移动测量数据,每个位置测量6个点用来拟合 出两条直线,两条直线与中心线相交,两个交点之间 距离即是此位置的支撑底板平面度误差。测得支撑 底板平面度误差曲线如图4所示。





为了验证支撑底板平面度误差对拼板错边的影 响,设计了如下试验,选取范围为 200~600 mm 的支 撑底板的一段,对 50组厚度为0.7 mm 与1.6 mm,焊 缝长度为400 mm 的钢板进行焊接并对焊后拼焊板 错边进行检测,通过检测结果分析支撑底板平面度 误差与拼焊错边之间关系。根据 Servo-Robot 检测结 果(图5)可以看出支撑底板平面度误差趋势与拼板 错边趋势基本一致。因此,支撑底板面对错边影响 可以表示为

$$M_p = p(x) \tag{12}$$

式中:p(x)为支撑底板不同位置上的错边。



图5 错边检测曲线 Fig. 5 Misalignment detected using Servo-Robot

2.2.6 焊接变形

式中

 $k(h_1)$

焊接变形也是影响错边的一个重要因素,通过 对焊接前后错边曲线的分析(图 6),可以看出焊接 后错边量增大。近几年随着计算机的发展,人们采 用数值模拟技术对焊接变形进行预测,但是在高温 时对材料性能认识不足,计算过程过于复杂并且累 积误差较大难以保证精度[4]。这里采用经验公式对 焊接变形引起的错边进行估计,即

$$M_{after} = k(h_1, h_2, F) M_{before}$$
 (13)
式中: M_{after} 为焊接后错边; M_{before} 为焊接前错边;
 $k(h_1, h_2, F)$ 为焊接错边放大函数; h_1 和 h_2 分别为
薄板和厚板厚度; F 为压紧力。



图 6 焊接前后错边 Fig. 6 Misalignment before and after welding

3 错边预测模型

综合以上几点分析,错边是以上所提出的 6 个 因素综合决定的,所以错边可以表示成如下形式

 $M = M_{bd} + M_F + M_{equ} + M_{cbd} + M_p + M_w$ (14) 式中: M_{cbd} 为压紧横梁变形导致的错边; M_w 为焊接 变形产生的错边。将 M_{equ} 并入 M_F ,可以得到错边预 测数学模型为

M = Mbd + MF + Mcbd + Mp + Mw (15) 生产中,将实际错边结果与错边预测模型相结 合,有助于快速确定错边产生的主要原因,并及时对 设备进行调整从而保证生产质量。

4 试验与仿真分析

4.1 试验方法

为了验证错边预测模型的准确性,在全自动激 光拼焊生产线上进行试验。试验材料为 0.7 mm 和 1.6 mm 厚的钢板 (Q235),平面尺寸为 500 mm × 400 mm。0.7 mm 厚的板材沿 x 轴和y 轴变形曲率 分别为 1×10^4 mm 与 1.3×10^4 mm, 1.6 mm 厚的板材 沿 x 轴和y 轴变形曲率分别为 1.5×10^4 mm 与 2.0×10^4 mm。焊接参数为:速度 6.8 m/min,功率 4 kW,偏移量 0.08 mm,离焦量 0.6 mm。压紧力为 4.8×10^3 N。采用长度范围为 200~600 mm 的一段 支撑底板进行试验,焊后错边检测设备采用加拿大 Servo-Robot。

4.2 错边预测仿真

首先根据式(1)得到压紧后薄板和厚板沿 x 轴的变形曲线,如图 7 所示。试验之前,根据式(11)调节弹簧初始长度使压紧力均匀,消除压紧力不均匀性对错边的影响。图 8 是通过有限元分析得到板材沿 y 轴变形结果。长度范围为 200~600 mm 的支撑底板平面度误差可以从图 4 中获得。根据焊接经验可以得到 k(h₁, h₂, F)的具体数值为 k(h₁, h₂, F)= 4/3。









4.3 结果与分析

根据式(15)得到的拼板的错边曲线与 Servo-Robot 检测结果如图 9 所示。通过两组曲线的对比 可以看出通过错边预测模型得到的错边曲线与实际 检测曲线非常接近,但也存在一些偏差,偏差产生的 原因是不能完全有效地对焊接变形进行预测。





Fig. 9 Misalignment obtained by simulation and Servo-Robot

5 结 论

(1) 激光拼焊中错边是由多个因素引起的。

(2)错边预测模型对错边具有很好的预测效果,但是也存在一些误差,主要是由于不能完全准确预测焊接变形造成的,需要进一步的研究建立更加完善的焊接变形模型。

[下转第 96 页]

Materials Science and Technology, 2004, 20(11): 1479-1483.

- [6] Li R F, Yu Z S, Qi K, et al. Growth mechanisms of interfacial compounds in arc brazed galvanized steel joints with Cu97Si3 filler[J]. Materials Science and Technology, 2005, 21(4): 483-487.
- [7] Lancaster J F. The physics of welding MJ. Oxford: Pergamon Press, 1986.
- [8] 徐 强, 国旭明, 王宗杰, 等. 双脉冲 MIG 焊对 2219A FCu 合

[上接第 92 页]

(3)根据错边预测模型能准确确定错边产生的 主要原因,对设备调整和保证生产质量有一定指导 作用。

参考文献:

- [1] 陈 炜, 吴毅明, 吕 盾, 等. 差厚激光拼焊板门内板的成形 性能研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(11): 1188-1190.
- [2] CEN. ISO 13919-1-1996 电子束和激光焊接接头质量缺陷及 质量等级指南[S]. Switzerland, International Organization for Stan-

金焊缝组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2004(10): 3-5. [9] 单辉祖. 材料力学(II)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

作者简介:李瑞峰,男,1979年出生,硕士,讲师。主要从事新材 料连接方面的科研和教学工作。发表论文10余篇。

Email: hfzj7912@yahoo.com.cn

dardization, 1996.

- [3] Xin L Xu Z, Zhao M, et al. Analysis and design of a novel four-axis plane laser welding system [C] // In: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, 2007: 2020-2025.
- [4] 陈海洋,俞建荣,赵增慧,等.薄形焊件变形数值模拟的研究现状[J].焊接技术,2006,35(3):4-7.

作者简介: 辛立明, 男, 1980 年出生, 博士研究生。主要研究方向 为激光拼焊。发表论文3篇。

Email: Imxin@sia. cn

different in the second specimen. One of them is 1 mm, and the other one is 2 mm. Meanwhile, the size of bridge between two hole are different. The former is 0. 4 mm, and the later is 0. 2 mm. Then the numerical resultes were compared with that of the experiment to verify the validity of Gurson damage models in describing the initiation and propagation of cracks during their evolution. The results show Gurson damage model give good results to the second specimen. Because the stress triaxiality of second specimen greater than 0. 4.

Key words: aluminium alloy; double-hole test; damae; finite element method

Wear resistance of chromium carbides coating alloyed by vacaum electron beam LU Binfeng, LU Fenggui, TANG Xinhua, YAO Shun (Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). p77–80

Abstract Fe/Cr/C powder mixtures were employed to modfy the surface of a low carbon steel substrate by electron beam irradation in vacuum condition. By optimizing the electron beam parameters chromium carbide is in situ synthesized in the surface composite layer. The surface composite layer was analyzed with optical microscope. XRD analysis and trobological test. There are two main phases in the surface composite layer: chromium carbides as hard phase and austenite as tough phase. There are little typical hexagonal primary chromium carbides in the surface composite layer. Eutectic chromium carbides dispersively distribute between the interface of austenite phase to form a net like structure. It is metallugical combination in the surface composite layer and the substrate. The existing of carbides in the composite layer provides a notable improvement on the wear resistant property of the surface layer.

Key words: surface composite layer; vacuum electron beam irradiation; chromium carbide; wear resistance

Offline automatic programming of arc prototype system based on arc welding robot DU Naicheng^{1, 2}, HU Shengsun^{1, 2}, DING Wei¹(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin university, Tianjin 300072, China). p81– 84

Abstract: At present methods of graphic teaching for robot are mostly adopted in offline programming system to establish the path of robotic movement. However, for this programming of the approach complex path, the workload is still a large. Moreover, the robot procedure (JOB) is hardly formed by using the position data and welding instructions, which calculated directly by path planning. The offline automatic programming was researched for arc welding robots. The relative JOB is a data exchange interface of MO-TOMAN robots. With this interface, the offline automatic programming module generates robots procedures. Through ODBC interface, offline automatic programming module queries the planning instructions and data in the corresponding database in the arc prototype system. The advantages of database are conducive to the expansion of offline programming system. The experiment results show that the researched offline programming operates stably, and the robot moves coherently, and the welding path is accordant to the design.

Key words: robot; arc prototype; offline automatic programming; relative job

Quantitative analysis method of geometrical precision quality on precision welding structure KONG Liang¹, YU Hailiang¹, JIN Xin¹, WU Yixiong^{1, 2}(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiatong University, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). p85 -88

Abstract Based on fussy set theory, a quantitative method for welding geometrical quality control of precision welding structure (PWS) is presented. The "Quality Differentiation Coefficient" which characterizes the relation between quality difference and effective quality essentials is adopted to formulate the qualitative linguistic variables of welding quality difference properties. The welding quality analysis model which could fully utilize experts experiments and historical data for PWS is established to quantificational analysis and decision-making.

Key words: precision welding structure; welding geometrical precision; quantification; quality analysis

Misalignment production and its prediction model in tailored blank laser welding XIN Liming^{1,2}, ZHAO Mingyang¹, XU Zhigang¹ (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese A cademy of Science, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100039, China). p89–92, 96

Abstract Misalignment is an important quality evaluation standard in tailor welded blanks. The control of misalignment especially for thinner blanks, is a difficult problem in tailored blank laser welding process. The production and control of misalignment is studied based on a tailored blank laser welding system. The influential factors of the misalignment are obtained after numbers of experiments: the deformation of the blanks before welding, the intensity of the clamping force, the uniformity of the clamping force deformation of the clamping beam, flatness error of the based platform and the welding process. A mathematical model is established according to the analysis of misalignment. Experimental results indicate that the model provides an effective theorical guidance in improving welding quality.

Key words: tailored blank laser welding; misalignment; finite element analysis; misalignment prediction modeling

Interfacial structure and properties of galvanized steel sheetjoined by pulsed arc brazing processLI Ruifeng, YU ZhishuiHE Jianping (College of Materials Engineering, Sharghai University