

板料焊接屈曲变形测量

冯超^{1,2}, 梁晋^{1,2}, 郭楠^{1,2}, 刘烈金^{1,2*}

(1. 西安交通大学 机械工程学院 机械制造系统国家重点实验室, 西安 710049;
2. 广东西安交通大学研究院, 佛山 528300)

摘要: 板料屈曲变形在焊接工艺中不可避免且难以控制矫正, 采用先进的测量手段获得焊接屈曲变形规律进而揭示变形机理是目前研究焊接变形的难点问题。文中拟采用一种基于数字图像相关法的非接触测量方法获取板料焊接屈曲变形的全场全过程变形状态。首先, 提出了一种针对弱相关和大变形的对应点匹配算法; 其次, 建立试验平台并利用 DIC 测量系统对平板堆焊变形进行测量; 最后, 在平板堆焊试验的基础上, 通过分析变形数据, 揭示屈曲变形规律。结果表明, 低碳钢在板料焊接与冷却过程中均发生屈曲变形, 分别呈蝶形与马鞍形; 板料焊接产生的应变主要分布在焊缝周围; 焊缝纵向收缩是引起板料塑性屈曲变形的主要原因。板料焊接屈曲变形规律试验不仅能验证焊接变形预测有限元理论, 而且对焊接矫正方法提供依据和思路, 同时对板料焊接工艺的发展具有积极的促进和指导作用。

关键词: 板料; 屈曲变形; 数字图像相关法; 纵向收缩

中图分类号: TG 404; TB92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)07-0061-04

0 序言

板料焊接时常发生屈曲变形, 此塑性变形不可避免且及其复杂, 使得变形规律无法准确预测, 极大的影响了焊接结构件的设计制造精度, 因此, 需要充分了解焊接变形机理, 掌握屈曲的变形规律, 为焊接矫正工艺提供依据及思路。

焊接是一种高温成形工艺, 测量变形时需要考虑高温、大变形、高亮度弧光等因素的影响。目前对焊接屈曲变形的实时测量试验方法主要分为接触式与非接触式两种。接触式测量^[1] 主要采用高温应变片、高温引伸计、高温位移计等固定于板料指定位置上, 虽然具有较高精度, 但只能测量板料单点单向的变形状态。非接触式测量方法主要包括电子散斑干涉测量法^[2], 激光位移传感测量法^[3] 以及数字图像相关法^[4] 等。Ocelik 等人^[5] 采用数字图像相关技术对板料激光焊接及冷却过程进行检测, 获得板料随时间变化的位移和应变曲线。De Strycker 等人^[6] 采用数字图像相关法结合位移传感器记录 GTAW 焊接管子过程中的应变变化。Zain-ul-Abdein 等人^[7]、

Muramatsu 等人^[8] 也分别对采用激光散斑法和数字图像法测量焊接过程中的瞬态变形和应变进行了研究。数字图像相关方法由 Sutton 等人^[9] 提出, 通过跟踪和匹配变形前后所采图像灰度信息来测量物体在各种载荷作用下的瞬时位移场和应变场。这种方法具有非接触、高精度、自动化程度高等优点, 适用于复杂环境下的大变形、多尺度的现场测量。

上述研究已将数字图像相关技术成功应用于焊接变形的动态全场测量, 对测量方法的验证以及焊接变形规律做了初步探讨。文中针对焊接屈曲变形, 在通过数字图像相关技术的基础上研究适用于焊接高温图像相似度低的跟踪匹配算法, 设计焊接变形测量试验并获取全场变形数据, 研究焊接屈曲应变场, 分析焊缝处及周围的变形规律, 进而揭示板料屈曲变形机理。

1 TIG 平板堆焊试验

基于上述关键匹配技术, 利用实验室自主研发的基于数字图像相关法 XJUDIC^[10] 三维应变测量系统对 Q235 板料进行 TIG 平板堆焊试验, 焊接参数如表 1 所示, 焊接现场如图 1 所示。板料置于支撑架上, 其余方向均无约束, 为避免焊接强光及烟雾对图像采集的影响, 采用板料正面进行焊接作业, 反面同时进行测量变形的试验方案; 避免了散斑脱落褪色

收稿日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51421004, 51275378, 51275389); 中央高校基本科研业务费专项资金资助; 广东省公益研究与能力建设专项资金(2014A010104003)资助

* 参加此项研究工作的还有王晓光

问题,在测量区域涂布耐高温胶,特别是焊缝处;在焊接时板料下端会出现随焊点移动的高温红点,此处相关性太低而出现不匹配现象,后处理时采用灰度双三次插值的方法填充不匹配区域,从而在整个焊接过程形成连续变形。测量系统记录从焊接开始到冷却结束(420 s)的整个过程的板料变形图像,根据焊接位移变化后处理计算,获得全场动态变形数据。

表 1 焊接工艺参数
Table 1 Welding parameters

焊件尺寸 mm × mm × mm	氩气流量 $q/(L \cdot min^{-1})$	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$
200 × 300 × 2.5	10	90	5

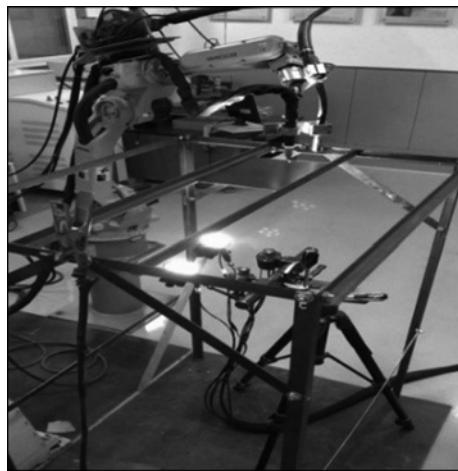


图 1 焊接现场
Fig. 1 Welding spot

图 2 为左相机所获得的第一幅板料初始未变形时的图像,纵向为板料焊接方向,纵向白色实线为焊枪所经过的焊缝处,横向白色实线与焊缝相垂直,约在板料的中间位置,A~I点为板料靠近边缘处的关键点。文中通过分析横向与纵向白色实线、所有关键点的变形状态,研究板料焊接屈曲变形规律,进而

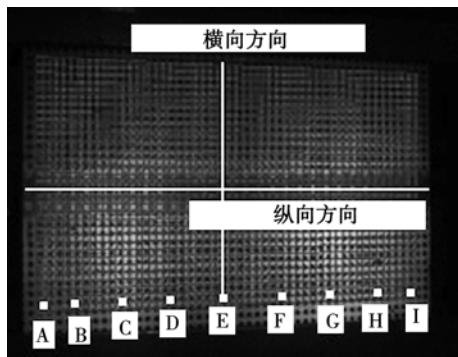


图 2 初始板料图像及关键点
Fig. 2 Initial sheet image and key points

揭示变形机理。板料的焊接总应变包括弹性应变、塑性应变、热应变、体积应变以及相应变(式 1),利用测量系统对板料宏观变形状态进行检测,实时记录板料的总应变变形规律。焊接板料的纵向收缩、横向收缩是衡量板料变形的重要指标,采用式(2)、式(3)分别用来计算板料冷却后焊缝处的纵向收缩、横向收缩。

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_{\text{elastic}} + \varepsilon_{\text{plastic}} + \varepsilon_{\text{thermal}} + \varepsilon_{\text{volume}} + \varepsilon_{\text{phase}} \quad (1)$$

$$\delta_L = \frac{1}{h} \iint \varepsilon_L dx dz \quad (2)$$

$$\delta_T = \frac{1}{h} \iint \varepsilon_T dx dz \quad (3)$$

式中: δ_L 焊缝纵向收缩量; δ_T 焊缝横向收缩量; ε_L 焊缝处所有点的纵向总应变; ε_T 焊缝处所有点的横向总应变; h 板料厚度.

2 试验分析与结果

图 3 为关键点 A~I 在焊接与冷却整个过程中的 z 向位移变形图,0~60 s 为焊接时间,60~420 s 为冷却时间。所有关键点在 36 s 时出现较大的偏离初始位置现象,95 s 是关键点变形量的峰值,在之后的冷却时间内,越靠近板料中间位置的关键点向 z 负向变形的速度越快,而板料两侧的 A 点、I 点保持峰值几乎不变化。从图 3 中的明显变形可以看出,板料屈曲变形在焊接过程和冷却过程中均有发生,对照 36 s,95 s,360 s 的全场变形云图(图 4)可以看出,焊接过程中,板料屈曲变形呈碟形;冷却完成后,板料屈曲变形呈马鞍形。

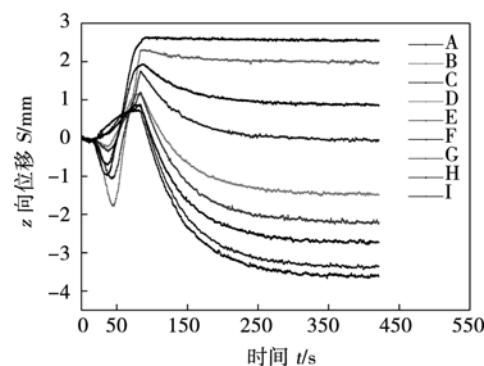


图 3 关键点 z 向位移曲线
Fig. 3 z displacement curve of key points

在焊接与冷却的过程中,焊缝处材料受到局部的集中快速加热,应力状态复杂。焊缝收缩量是评价焊接面内变形的一个重要指标,能够反映出焊缝处的变形规律。图 5 为焊接冷却后焊缝处的收缩变

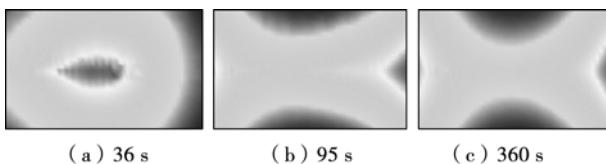


图4 全场变形云图

Fig. 4 Full-field deformation cloud figure

形量,其中焊缝横向收缩变形量均集中在 -0.2 mm 左右,说明焊缝处的横向收缩量比较均匀;纵向收缩变形量变化较大且均为负值,越靠近焊缝中心位置,收缩量越大,最大收缩量达 -1.3 mm ,说明冷却完成后,热应力消失,纵向收缩量远远大于热膨胀时变形量。因此,焊缝处的面内收缩变形主要由纵向收缩产生。

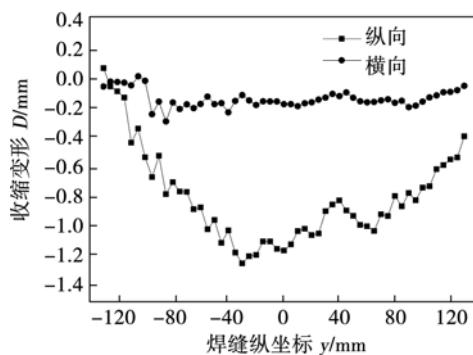
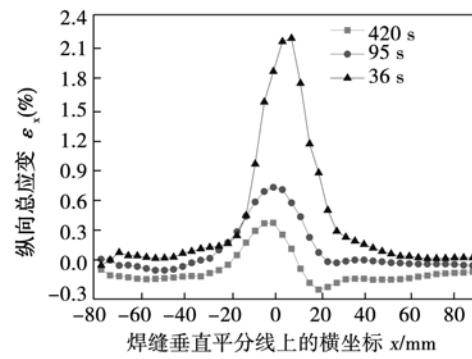


图5 焊缝处收缩变形量

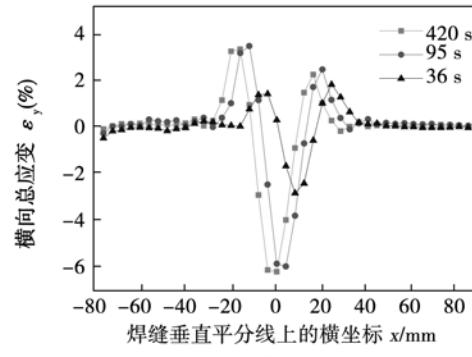
Fig. 5 Shrinkage deformation of welding line

横向白色实线垂直于焊缝方向,分析其上所有点的应变规律能够了解焊接对焊缝周围变形规律的影响,从而揭示焊接屈曲变形趋势、产生原因、影响因素等。图6为横向白色实线上所有点在不同时间的横向/纵向总应变曲线,其中可以看出:固有应变主要分布在焊缝附近,在距焊缝 $-25\sim 25\text{ mm}$ 的范围内,横向和纵向应变变化较大,焊接影响区占总尺寸的 $1/4$ 左右,越靠近焊缝,应变量越大;板料在焊缝及周围处受高温影响,屈服点较低,在残余应力超过屈服应力时,发生塑性变形,图6中应变值有正有负,可认为发生塑性变形与两个因素有关:第一,温度,焊缝处温度最高,材料屈服点相对较低,应变值也最大;第二,热应力,在图6b中,越靠近焊缝,横向压缩应变越大,稍远离焊缝的区域却产生拉伸应变,而在图6a中,焊缝周围塑性变形大部分由纵向拉应力产生;横向应变量明显大于纵向应变量,冷却结束后,横向应变量可达 6% ,而纵向应变量仅有 0.5% ;纵向应变量随着冷却时间的增加逐渐减小,而横向

应变量随着时间的增加逐渐增大;焊接和冷却中所有点的变形趋势是一致的,在焊接热胀(36 s)和冷却(420 s)情况下,在焊缝及周围在横向均会同时产生拉伸应变与压缩应变,而焊缝及周围在纵向仍保持拉伸应变,但是由于冷却收缩,拉伸应变量有所减小。



(a) 纵向应变



(b) 横向应变

图6 横向实线上所有点在不同时间的总应变曲线

Fig. 6 All points on the transverse direction line total strain curves at different times

板料沿焊缝方向的纵向收缩量是衡量焊接变形的重要指标,纵向收缩变形是引起焊接屈服变形的主要原因,因此研究焊缝处的纵向收缩量与热输入之间关系对材料性能研究具有重要意义。

从图7中可以看出,板料的纵向面内收缩量与

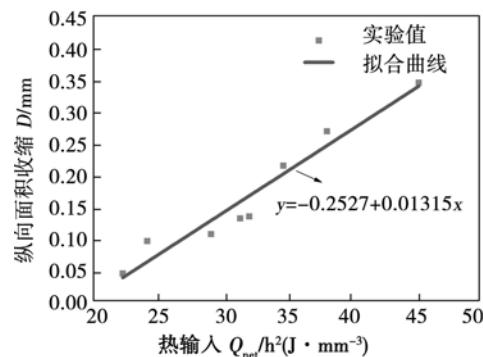


图7 热输入参数与纵向面内收缩的关系

Fig. 7 Relation between thermal input parameters and longitudinal in-plane shrinkage

热输入参数基本呈线性增大的趋势,热输入参数越大,纵向面内收缩量越大。纵向收缩量和热输入参数之间的关系为

$$\delta_L = -0.2527 + 0.01315 \frac{Q_{\text{net}}}{h^2} \quad (4)$$

式中: Q_{net} 净热输入(J/mm); h 薄板厚度(mm)。

在实际平板堆焊工业应用中,可以根据此经验公式,通过调节板料焊接电流、电压以及焊接速度,控制板料的屈曲变形情况,从而提高焊接结构件的使用寿命,对工程应用具有重要的意义。

3 结 论

(1) 板料焊接温度分布的梯度较大及焊缝热胀冷缩受到周围材料的约束是产生板料发生屈曲变形的主要原因,焊缝内呈现的热应力超过临界应力时,板料容易丧失稳定性而发生屈曲变形,Q235板料焊接屈曲变形同时发生在焊接与冷却的过程中,分别呈碟形和马鞍形。

(2) 焊缝纵向收缩是焊接冷却完成后的塑性屈曲变形主要原因,焊缝横向收缩对焊接变形影响较小。

(3) 在焊接与冷却过程中,应变分布于焊缝周围,焊缝周围均同时出现拉伸应变与压缩应变,在横向与纵向出现的屈曲变形趋势一致,而应变数值相差较大。

参考文献:

- [1] Huang Y H, Liu L, Sham F C. Optical strain gauge vs. traditional strain gauges for concrete elasticity modulus determination origi-

nal research[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2010, 121(18): 1635–1641.

- [2] Yang Y, Liu Y S, Sun S Z. A research on ESPI stripe-image processing in controlling welding stress and deformation[J]. Electronic Imaging and Multimedia Technology III, 2002, 4925: 487–491.
- [3] Arai T. The laser butt welding simulation of the thin sheet metal [J]. Materials with Complex Behaviour, 2010, 3: 279–296.
- [4] Lyons J S, Liu J, Sutton M A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation[J]. Experimental Mechanics, 1996, 36(1): 64–70.
- [5] Ocelik V, Bosgra J, De Hosson J T M. In-situ strain observation in high power laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(20–21): 3189–3196.
- [6] DeStrycker M, Lava P, Van Paepegem W, et al. Measuring welding deformations with the digital image correlation technique[J]. Welding Journal, 2011, 90(6): 107–112.
- [7] Zain-ul-Abdein M, Nelias D, Jullien J F, et al. Prediction of laser beam welding-induced distortions and residual stresses by numerical simulation for aeronautic application[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(6): 2907–2917.
- [8] Muramatsu Y, Kuroda S, Shiga C. Strain measurement during welding procedure. Application of laser speckle method to strain measurement in welding process (Report 5)[J]. Welding International, 2003, 17(8): 615–623.
- [9] Sutton M A, Cheng M Q, Peters W H, et al. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis[J]. Image Vision Computing, 1986, 4(3): 143–150.
- [10] 唐正宗. 数字图像相关法理论及应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.

作者简介: 冯超,男,1988年出生,博士研究生。主要从事三维光学摄影测量研究。Email: choyfung@163.com

通讯作者: 梁晋,男,教授,博士研究生导师。Email: liangjin@mail.xjtu.edu.com