

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.03.010

钢和铝异种金属焊接变形研究

卢晶晶, 邢彦锋

(上海工程技术大学汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对目前钢/铝异种金属薄板在焊接时,存在的焊接热变形、焊接质量差、使用性能低等缺点,采用有限元法对薄板件焊接过程进行模拟。通过不同参数组合,得出了 x 和 y 方向的焊接变形量;讨论了焊接工艺参数对焊接热变形的影响规律。结果表明:焊接电流对焊接变形影响最大,且 y 方向的变形量是 x 方向的2倍;同时,选用多层等厚焊件或者厚度较薄的板件在上层,可以大大减小变形量。因此,通过合理的焊接工艺参数来降低焊接变形量,对提高车身焊接质量具有重要的意义。

关键词:焊接变形;异种金属;电阻点焊;焊接热变形;有限元法

中图分类号: TG407

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2016)03-0044-05

Welding Deformation Study of Steel and Aluminum Metal Plate

LU Jingjing, XING Yanfeng

(School of Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: At present, there are shortcomings of welded thermal deformation, poor welding quality and low performance in the welding of steel/aluminum dissimilar metal sheet. In this paper, the finite element method (FEM) was used to simulate the welding thermal deformation of sheet. Through a combination of different parameters, the amount of welding deformation was obtained in the x and y directions, after which that the effect law of welding parameters on welding deformation was discussed. The results show that, welding current has the biggest influence on welding deformation, and the amount of deformation in the y direction is twice as in the x direction. In addition, the multilayer and equal thickness sheets or thinner plate parts in the upper layer were selected in manufacture, which can greatly reduce the deformation. Therefore, taking reasonable welding parameters to reduce the value of welding distortion, is of great significance to improve the welding quality of automobile body.

Key words: welding deformation; dissimilar metal; RSW (Resistance Spot Welding); welding thermal deformation; Finite Element Method (FEM)

随着国民经济的飞速发展,人们的生活水平得到普遍提高,带动了汽车制造业的蓬勃发展。在汽车车身设计中,由于设计的结构工艺性以及车身轻量化后的一些重要部位需要加强板,故大量存在3层板或多层板的焊接接头^[1-4]。车身结构是由冲压件点焊而形成,对焊件质量要求很高,而焊接变形一直是车身焊接质量的关键问题之一。焊接变形种类繁多,情况复杂,主要有弯曲变形、角变形、横向收缩、翘曲变形及纵向

收缩等。焊接变形不仅对结构的外观和承载能力有重要影响,而且对出现有害的焊接变形,往往需要花费很多人力和物力去矫正;而对于比较复杂的焊件变形,矫正的工作量可能比焊接工作量还要大,大大影响企业的生产效率^[5-8]。当前计算机技术的飞速发展引起各个领域的巨大变化,并渗透到各领域的各个分支,通过控制焊接变形而采用的数值模拟技术在焊接计算机应用领域中占有重要位置^[9-11]。目前国内外对2层钢/

收稿日期:2015-10-14;修回日期:2016-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51575335);上海工程技术大学研究生科研创新基金项目(EI-0903-14-01139)。

作者简介:卢晶晶(1989),女,江苏扬州人,硕士,主要研究方向为焊接热变形。通信作者:邢彦锋,男,博士,教授,硕士生导师。

E-mail: xyf2001721@163.com

铝异种金属焊接进行了深入研究,而对3层板的焊接变形研究较少。本文以SYSWELD为平台研究焊接工艺参数和焊件厚度对钢/铝3层薄板焊后变形量的影响规律,从而通过采取合理的焊接工艺参数组合来降低焊接变形量,提高车身质量。

1 试验材料与方法

试验材料为汽车轻量化AA5754铝合金,屈服强度为185 MPa,弹性模量为70.3 GPa。其化学成分如下表1所示^[10]。

表1 AA5754 铝化学成分

Table 1 Chemical composition of AA5754 Al %

材料	Cr	Cu	Mn	Fe	Mg
AA5754	≤0.30	≤0.10	≤0.50	≤0.40	2.60~3.60
材料	Si	Ti	Zn	Ni	Al
AA5754	≤0.40	≤0.15	≤0.20	≤0.05	余量

电极材料为CrZrCu,尺寸如图1所示。电极本体半径 R_b 为8 mm,电极冷却水孔半径 R_w 为5 mm,电极端面半径 R 为3 mm,电极高度 H_2 为20 mm,电极端面至冷却水的距离 H_1 为5 mm,锥形电极头端面角度为45°。SYSWELD有限元模拟中所用到的不同温度下的材料参数均调用自带材料数据库;使用的电极冷却水温度为25℃,流量为3 L/min,换热系数为3 500 W/(m²·K),周围环境温度为20℃,与空气的总热交换系数设为40 W/(m²·K)。分别改变焊接工艺参数,建立钢/铝异种金属电阻点焊温度场和应力应变场。本文采用的是只改变一个因素,其它3个参数不变时该因素对焊接变形量的影响。

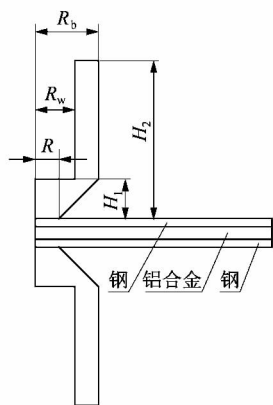


图1 电极尺寸

Figure 1 Dimensions of electrode

网格划分对有限元计算精度和计算效率有重要影响,本文采用SYSWELD下专用网格划分子模块visual-mesh进行有限元网格划分。对结构采用规则的

六面体单元,由于接触区附近温度梯度较高,故增加接触区的网格密度;为提高运算速度,远离接触区则相对减少网格数量,网格模型如图2所示。

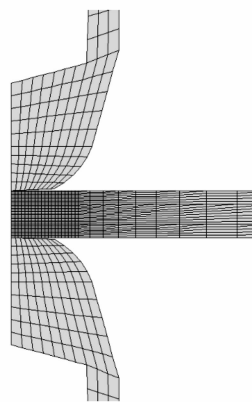


图2 点焊轴对称有限元模型

Figure 2 Axially-symmetric FEM of spot welding

2 试验参数

在电阻点焊中,由公式 $Q = I^2 Rt$ 可以得知,焊接所需的热源是由电流流过焊接区产生的电阻热来提供的,焊接中热量 Q 的大小主要由焊接电流 I 、电阻 R 和焊接时间 t 共同决定的,而电极压力的变化影响电阻 R 的大小。因此,基于SYSWELD有限元软件设置了4组焊接工艺参数组合(焊接电流、焊接时间、电极压力以及焊件厚度),研究参数对钢板焊后变形量的影响。点焊仿真参数组合如表2所示,其中焊接电流的频率为50 Hz。

表2 点接仿真参数组合

Table 2 Spot welding parameters combination of FEM

组别及 序号	预压 时间/s	电极压 力/kN	焊接电 流/kA	通电时 间/s	保压时 间/s	焊件厚 度/mm
A 1	0.2	3.8	9.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
A 2	0.2	4.3	9.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
A 3	0.2	4.6	9.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
A 4	0.2	5.0	9.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
B 5	0.2	3.8	8.5	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
B 6	0.2	3.8	9.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
B 7	0.2	3.8	9.5	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
B 8	0.2	3.8	10.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
C 9	0.2	3.8	9.0	0.2	0.2	1.0/1.5/1.0
C 10	0.2	3.8	9.0	0.3	0.2	1.0/1.5/1.0
C 11	0.2	3.8	9.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
C 12	0.2	3.8	9.0	0.5	0.2	1.0/1.5/1.0
D 13	0.2	3.8	9.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.0
D 14	0.2	3.8	9.0	0.4	0.2	1.0/1.5/1.5
D 15	0.2	3.8	9.0	0.4	0.2	1.5/1.5/1.5
D 16	0.2	3.8	9.0	0.4	0.2	1.5/1.5/1.0

3 试验结果与分析

3.1 试验验证

焊接形式采用2层钢板和1层铝板^[11],如图3所示。在电极压力为3.8 kN,焊接电流为9 kA,焊接总时间为0.8 s条件下,对点焊过程进行模拟,熔核半径达到3.79 mm,最大热影响区半径为4.27 mm。同时,将试验得到的点焊接头制成金相试样,并将焊核图与仿真结果进行比较,结果如图4所示。由图显示,焊核实测尺寸与仿真结果基本一致,因此,SYSWELD软件能够准确模拟点焊过程,一定程度上验证了本文研究内容的可靠性。

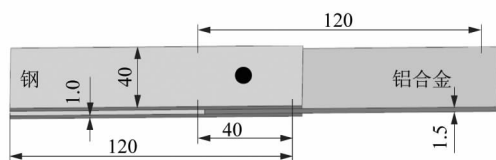


图3 钢/铝焊接试样模型

Figure 3 Welding sample model of steel/aluminum

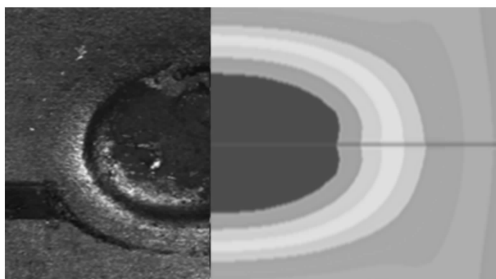


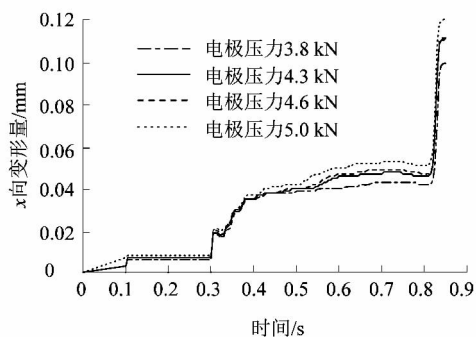
图4 实测尺寸与仿真结果对比

Figure 4 Comparison value of modeling result and measured result

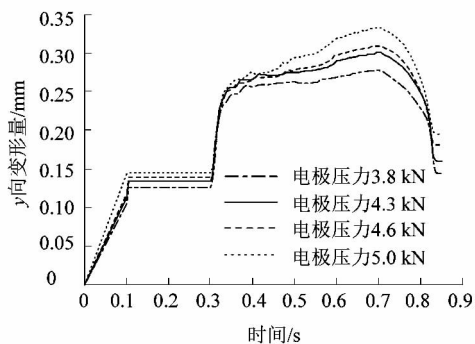
3.2 电极压力对变形量的影响

在焊接电流为9 kA,通电时间为0.4 s,焊件厚度分别为钢1.0 mm,铝1.5 mm,钢1.0 mm时,对不同焊接压力的电阻点焊过程进行模拟,分析焊接压力对焊件变形量的影响。图5表示不同时刻 x (横向)方向、 y (纵向)方向焊接变形量大小的分布趋势。

由图5可知:在一定的参数条件下,随着电极压力的增加, x 方向焊接变形量逐渐增加, y 方向变形量先增加之后逐渐下降,这主要是焊后冷却回弹量的影响。同时, x 方向变形量远小于 y 方向,这是因为工件在 y 方向能收缩且限制较少,在热应力的长时间作用下,工件受热不均带来的变形量不断增加,产生变形量的极大值,之后趋于稳定。可见车身3层异种金属薄板件焊接,在满足焊接条件的前提下,尽量选用小的压力,从而减少焊接变形。



(a) 电极压力对 x 向焊接变形量的影响



(b) 电极压力对 y 向焊接变形量的影响

图5 电极压力对 x 和 y 方向焊接变形量的影响

Figure 5 Influence of electrode pressure on welding deformation in the x and y direction

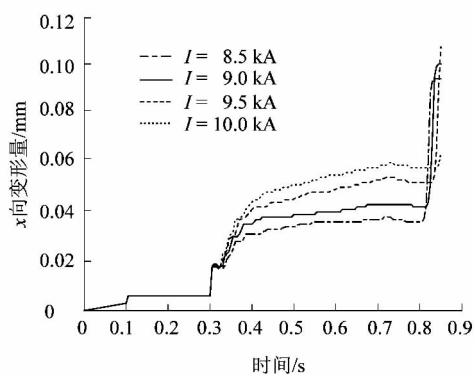
3.3 焊接电流对变形量的影响

在焊接压力为3 800 N,通电时间为0.4 s,焊件厚度分别为钢1.0 mm,铝1.5 mm和钢1.0 mm时,对不同焊接电流的电阻点焊过程进行模拟,分析焊接电流对焊件变形量的影响。图6表示不同时刻 x 方向、 y 方向焊接变形量大小的分布趋势。

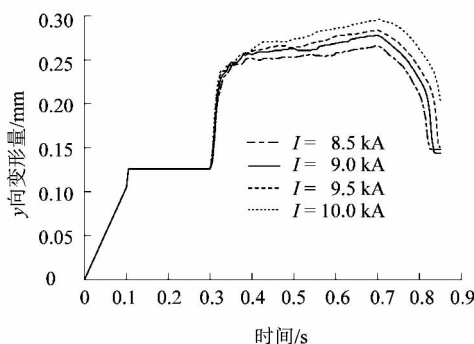
由图6可知:在一定的参数条件下,随着焊接电流的增加, x 方向的焊接变形量逐步增加,而 y 方向的变形量达到最大值后逐渐下降,且 y 方向的增长速度远远大于 x 方向。时间为0.0~0.3 s时,焊接过程处于预压阶段,焊接变形量基本一致。随着通电加热,变形量的分布区域越来越大这是因为该时刻工件其他部分连接最少,可以进行大幅度的自由变形, y 方向的最大变形量接近0.26 mm,且为 x 方向的2倍,因此,可以着重考虑 y 方向的变形量。冷却至50 s时,焊接变形的总体特征基本上没有发生改变,趋于稳定。可见,在满足焊接电流的前提下,选用较小的焊接电流可以减少焊接变形量。

3.4 通电时间对变形量的影响

在焊接压力为3 800 N,焊接电流为9 kA,焊件厚



(a) 焊接电流对x向焊接变形量的影响



(b) 焊接电流对y向焊接变形量的影响

图6 焊接电流对x和y方向焊接变形量的影响

Figure 6 Influence of welding current on welding deformation in the x and y direction

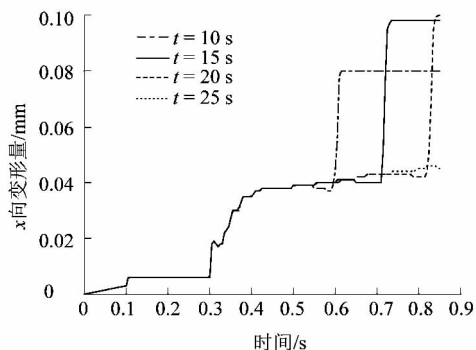
度分别为钢1.0 mm,铝1.5 mm和钢1.0 mm时,对不同通电时间的电阻点焊过程进行模拟,分析通电时间对焊件变形量的影响。图7表示不同时刻x方向、y方向焊接变形量大小的分布趋势。

由图7可知:在一定的参数条件下,随着焊接时间的增加,x和y方向焊接变形量变化趋势总体一致。随着焊接时间的增加,产热也稳步增加,使得焊核逐渐形成,焊接变形量逐步增大,达到极大值后趋于稳定。同时,焊接时间越长,达到变形量极大值的速度越慢。因此,选用合适的通电时间对焊接变形量达到极大值产生重要影响。

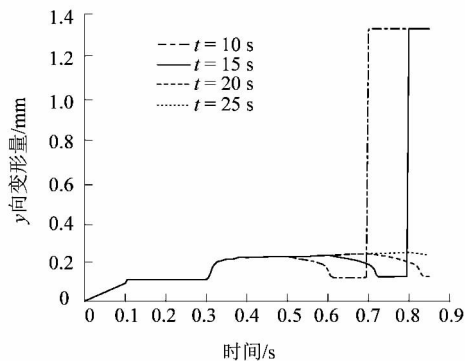
3.5 焊件厚度对变形量的影响

在焊接压力为3 800 N,焊接电流为9 kA,通电时间为0.4 s条件下,对不同焊件厚度的电阻点焊过程进行模拟,分析焊件厚度对焊件变形量的影响。图8表示不同时刻x方向、y方向焊接变形量大小的分布趋势。

由图8可知:钢/铝异种金属焊接在0.3 s左右(即预压之后),x和y方向焊接变形量发生明显变化,且总厚度越小变形量反而越大。3层相同厚度的板材



(a) 焊接时间对x向焊接变形量的影响



(b) 焊接时间对y向焊接变形量的影响

图7 焊接时间对x和y方向焊接变形量的影响

Figure 7 Influence of welding time on welding deformation in the x and y direction

焊接变形量最小,且1.0 mm(钢)/1.5 mm(铝)/1.5 mm(钢)比1.5 mm(钢)/1.5 mm(铝)/1.0 mm(钢)变形量要小。因此,采用工艺垫片法时,选用相同厚度的焊件或者将较薄的板件放在上层,可以减小变形量,提高焊接质量。

4 结论

焊接变形量的控制是车身焊接过程中重要的一环,对汽车焊接质量具有重大的影响。本文通过对钢/铝3层异种金属薄板件焊接热变形进行模拟,分析了焊接工艺参数和焊件厚度对焊接热变形的影响规律,并得到以下结论:

- 1) SYSWELD点焊软件模拟出的焊核大小与试验结果较好的吻合,验证了本文研究内容及数据的可靠性。
- 2) 随着电极压力的增加,x方向焊接变形量逐渐增加,y方向变形量先逐渐增加之后逐渐下降,这主要是焊后冷却回弹量的影响。可见车身3层异种金属薄板件焊接,在满足焊接条件的前提下,尽量选用小的压力,从而减少焊接变形。
- 3) 随着焊接电流的增加,x方向的焊接变形量逐

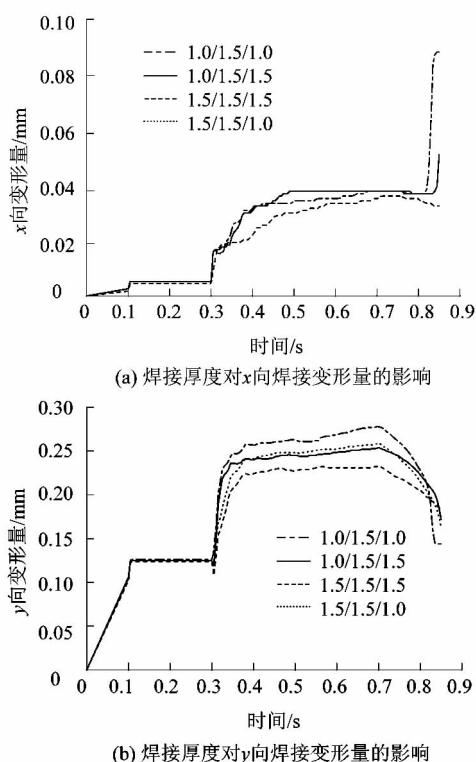


图8 焊件厚度对x和y方向焊接变形量的影响

Figure 8 Influence of welding parts thickness on welding deformation in the x and y direction

步增加,而y方向的变形量达到最大值后逐渐下降,且y方向的增长速度远远大于x方向。可见,在满足焊接电流的前提下,选用较小的焊接电流可以减少焊接变形量。

4) 随着焊接时间的增加,焊核逐渐形成,焊接变形量逐步增大,达到极大值后趋于稳定。同时,焊接时间越长,达到变形量极大值的速度越慢。可见,选用合适的通电时间对焊接变形量达到极大值产生重要影响。

5) 钢/铝异种金属焊接在0.3 s左右(即预压之后),x和y方向焊接变形量发生明显变化,且总厚度

越小变形量反而越大。3层相同厚度的板材焊接变形量最小,且1.0 mm(钢)/1.5 mm(铝)/1.5 mm(钢)比1.5 mm(钢)/1.5 mm(铝)/1.0 mm(钢)变形量要小。因此采用工艺垫片法时,选用多层等厚的焊件(一般不超过4层)或者将较薄的板件放在上层,这样可以减小变形量,提高焊接质量,对车身整体装配质量产生重大意义。

参考文献:

- [1] 王春生,陈勇,韩凤武,等. 三层不锈钢板电阻点焊温度场数值模拟[J]. 机械工程学报,2004,40(1):191-194.
- [2] 陆昌进,唐虹,姚其伟,等. 镀锌三层板电阻点焊的数值模拟[J]. 焊接学报,2013,34(6):105-108.
- [3] 李娅娜. 焊接变形预测与控制的数值方法研究及工程应用[D]. 大连:大连交通大学,2010:7-10.
- [4] 王楠楠,邱然锋,石红信,等. 铝合金与低碳钢的夹层电阻点焊接头特性[J]. 材料热处理学报,2015,36(1):70-74.
- [5] 薛忠明,曲文卿,柴鹏,等. 焊接变形预测技术研究进展[J]. 焊接学报,2003,24(3):87-90.
- [6] 郭保平,王博,王宏,等. 残余应力对焊接动态变形的影响[J]. 石油化工设备,2015(2):27-31.
- [7] TERASAKI T. Effect of welding conditions on residual stress distributions and welding deformation in welded structures materials [C]//The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan: International Society of Offshore and Polar Engineers Welding Society, 2002.
- [8] 蔡志鹏. 大型结构焊接变形数值模拟的研究与应用[D]. 北京:清华大学,2001:1-3.
- [9] 华鹏,孙俊生. 有限元软件 SYSWELD 在焊接数值模拟中的作用[J]. 山东机械,2005(1):10-12.
- [10] 王苹,方洪渊,韩德成,等. 基于热-力耦合的高速车地板焊接变形数值模拟[J]. 焊接学报,2012,35(6):15-18.
- [11] 陈洪容. 超高强热成形钢电阻点焊温度场数值模拟研究[J]. 热加工工艺,2015,44(5):196-199.
- [12] 田荣璋,王祝堂. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南大学出版社,2000.
- [13] 卢晶晶,邢彦峰. 6061-T6 铝合金和钢电阻点焊变形研究[J]. 电焊机,2015,45(11):117-121.

[信息·简讯]

· 产品介绍 ·

西门子推出 MindSphere 开放工业云

继成功完成内部测试之后,西门子现面向市场推出“MindSphere-西门子工业云平台”。作为公共测试版本,该平台接下来还将得到进一步的开发和完善。MindSphere 被设计为一个开放的生态系统,工业企业可将其作为数字化服务——譬如预防性维护、能源数据管理以及工厂资源优化——的基础。特别是,机械设备制造商及工厂建造者可以通过该平台监测其设备机群,以便在全球范围内有效提供服务,缩短设备停工时间,并据此开创新的商业模式。MindSphere 还为西门子的工厂数字化服务奠定坚实的基础,譬如对数控机床以及驱动链的预防性维护(Machine Tool Analytics & Drive Train Analytics)。

为了能够让来自不同制造商的机械设备和工厂连接至 MindSphere,基于试用阶段的反馈及后续开发,西门子还推出了一款名为“MindConnect Nano”的数据接入网关。此外,更多可选的数据接入方案也将逐步推出,或使用软件开发套件(Software Development Kit)、或通过软件代理、或借助 Simatic 集成,方式丰富且灵活。

(汪 郡)