

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.01.011

# 铝钢异种金属 CMT 焊接变形研究

焦志远, 邢彦锋, 王芳

(上海工程技术大学汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:**针对目前使用冷金属过度焊(CMT)对铝钢异种金属薄板进行焊接时,存在焊接质量差,焊接热变形及使用性能低等缺点,对薄板件焊接过程采用 SYSWELD 软件进行模拟。通过不同的试验参数进行组合,得出金属薄板在 X, Y 以及整体方向上的焊接变形量,分析不同焊接参数对焊接热变形的影响规律。结果表明:在达到焊接要求的前提下,应尽量减少焊接时间和焊接电流;在一定焊接电压范围内,焊接电压越大,相同时间内焊接变形量就越大, Y 方向焊接变形值约为 X 方向的 1.5 倍;为了避免焊接变形量过大,宜选用相对较大的焊接速度。

**关键词:**异种金属;焊接变形;冷金属过度焊(CMT);有限元分析

中图分类号: TG407 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2018)01-0053-05

## Welding Deformation Study of Steel and Aluminum Metal Plate Using CMT

JIAO Zhiyuan, XING Yanfeng, WANG Fang

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

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the aluminum steel dissimilar metal sheet in the use of CMT (Cold Metal Transfer) welding, such as the welding heat deformation, poor welding quality, performance etc., SYSWELD was used to simulate the welding process of sheet metal. Through the combination of different parameters, the welding deformation of thin plate in X, Y and the overall direction was obtained. The results showed that: in the premise of welding requirements, the welding time and welding current should be minimized; in a certain range of welding voltage, the greater the welding voltage, the greater the welding deformation during the same time, the value is about 1.5 times of the X direction of the welding deformation of Y direction; in order to avoid excessive welding deformation, relatively large welding speed should be selected.

**Keywords:** dissimilar metal welding; welding deformation; CMT (Cold Metal Transfer) welding; FEA (Finite Element Analysis)

为了节能环保,汽车车身轻量化已经成为世界汽车工业发展的新方向<sup>[1]</sup>。在众多实现车身轻量化的方法中,异种材料焊接代表了未来汽车车身发展的新趋势<sup>[2-3]</sup>。由于钢和铝合金本身具有较高的强度和较好的耐腐蚀等特点,目前汽车制造商多选用钢铝合金作为车身材料替代品,以求达到降低汽车自身质量的目的<sup>[4]</sup>。由于铝钢之间的物理及化学性能差异,铝钢易发生化学反应生成界面金属间化合物,造成铝钢异种金属焊接难的问题。CMT 焊接工艺可以实现短路

过渡、超低热输入及无飞溅的焊接等,正逐渐地应用于汽车等薄板制造业中<sup>[5-6]</sup>,成为车身焊接最常用的方法之一。CMT 焊接过程中,在焊接参数的共同作用下形成点焊接头,接头的质量好坏,直接关系到车身焊接的整体质量<sup>[7]</sup>。长久以来,焊接过程中焊接变形的控制主要依靠工人的经验。但经验法适用范围窄,且经验的积累往往要依靠大量的试验积累,不仅耗时而且耗资,难以满足现代制造业的需要。应用焊接分析软件 SYSWELD 进行 CMT 焊接有限元仿真<sup>[8-9]</sup>,采用电-热

收稿日期:2017-05-24;修回日期:2017-10-25

基金项目:国家自然科学基金(51575335);上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划”资助(16SG48)。

第一作者简介:焦志远(1993),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要研究方向为焊接热变形。E-mail:593511032@qq.com

和热-力耦合的方法,对温度场、应力应变场和变形位移场进行分析,通过对整个焊接过程典型时刻的云图的分析,将焊核形状、大小与试验板件进行对比,可验证仿真分析的正确性,缩短研发周期,节省成本,为生产实践提供相关参考。

### 1 试验的材料和方法

试验的材料是汽车车身用的 6061 铝合金和 Q235 镀锌钢,填充的焊丝为直径 1.2 mm 的 4043 铝硅焊丝。6061 铝合金、Q235 镀锌钢和焊丝的化学成分如表 1~3 所示。

表 1 6061 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminium alloy %

Si 质量分数	Fe 质量分数	Cu 质量分数	Mn 质量分数	Mg 质量分数	Zn 质量分数	Cr 质量分数	Ti 质量分数	Al 质量分数
0.40~0.80	0.70	0.15~0.40	0.15	0.80~1.20	0.25	0.04~0.35	0.15	余量

表 2 Q235 镀锌钢的化学成分

Table 2 Chemical composition of Q235 galvanized steel %

C 质量分数	Mn 质量分数	Si 质量分数	P 质量分数	S 质量分数
0.140~0.220	0.300~0.650	≤0.300	≤0.045	≤0.050

表 3 填充焊丝化学成分

Table 3 Chemical composition of filler wire %

Si 质量分数	Fe 质量分数	Cu 质量分数	Mn 质量分数	Mg 质量分数	Zn 质量分数	Ti 质量分数	Al 质量分数
4.5~6.0	0.80	0.30	0.05	0.05	0.10	0.20	余量

考虑到铝和钢的化学性质活泼程度和熔点等差异,采用上层铝板+下层钢板的搭接法,焊件搭接量为 40 mm×40 mm,选用铝板打孔形式,其中打孔板件的孔径为 8 mm。

如图 1(a)所示,焊枪垂直于板件,呈 90°。模拟中所用到的不同温度下 6061 铝合金和 Q235 镀锌钢材料的参数调用 SYSWELD 软件里的材料库。提前设定边界条件以及初始条件,循环冷却水温度为 25 °C,流量为 3 L/min,换热系数为 3 500 W/(m<sup>2</sup>·K),周围环境温度为 20 °C,与空气总热交换系数设定为 40 W/(m<sup>2</sup>·K)。焊接时,焊枪喷嘴距板间距离为 12 mm,焊丝干伸长 10 mm,采用纯度为 99.999% 的 Ar<sub>2</sub> 作为保护气,流量设定为 15 L/min,提前/滞后送气时间为 0.3 s。

课题组采用了 SYSWELD 软件的网格划分模块 Visual-mesh,对薄板结构进行网格的划分,如图 1(b)所示。试验中采用六面体单元进行网格划分,考虑焊枪和薄板件接触区域附近温度梯度较大,网格划分时保证了接触区域的网格密度大,远离接触区域网格粗糙,以此提高运算速度。

### 2 试验参数

对 CMT 焊接工艺性有影响的参数主要有:焊接电流、焊接时间、焊接电压、焊接速度和送丝速度等,这些因素影响点焊过程的稳定性和焊接质量,并对焊后板

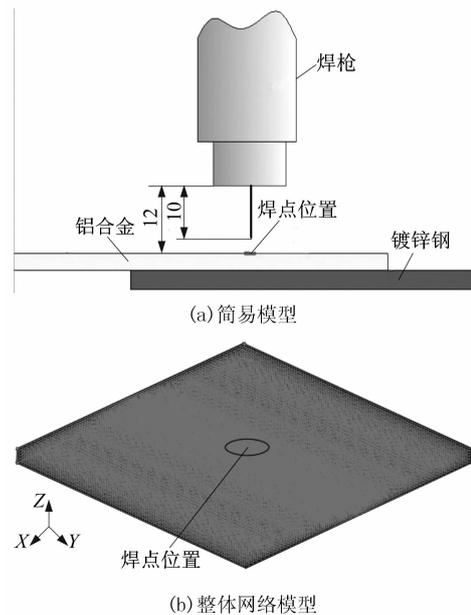


图 1 有限元仿真板件简易模型

Figure 1 Simple model of FEM

件的热变形有一定的影响。由于保护气流量和送丝速度为焊接变形的次要因素,设置如表 4 所示的 4 组焊接仿真工艺参数组合,保护气体流量均为 18 L/min,起弧时间均为 0.01 s。通过控制变量法分别研究了各主要参数对焊接变形的影响,其中焊接电压即弧长修正。

表4 点焊仿真试验的参数组合

Table 4 Spot welding parameters combination of FEM

组别	序号	焊接时间/s	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	送丝速度/ (m·min <sup>-1</sup> )
A组	1	0.3	87	16.2	0.58	7.1
	2	0.4	87	16.2	0.58	7.1
	3	0.5	87	16.2	0.58	7.1
	4	0.6	87	16.2	0.58	7.1
B组	5	0.5	75	16.2	0.58	7.1
	6	0.5	80	16.2	0.58	7.1
	7	0.5	87	16.2	0.58	7.1
	8	0.5	95	16.2	0.58	7.1
C组	9	0.5	87	10.0	0.58	7.1
	10	0.5	87	13.0	0.58	7.1
	11	0.5	87	16.2	0.58	7.1
	12	0.5	87	19.0	0.58	7.1
D组	13	0.5	87	16.2	0.35	7.1
	14	0.5	87	16.2	0.45	7.1
	15	0.5	87	16.2	0.58	7.1
	16	0.5	87	16.2	0.65	7.1

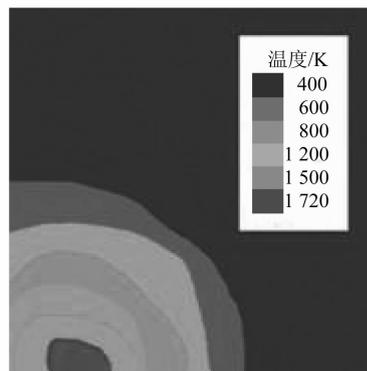
### 3 试验结果及分析

#### 3.1 试验验证

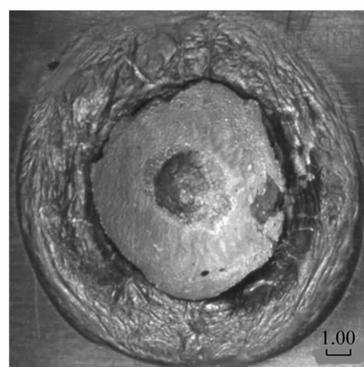
图2所示为温度场模拟结果与实测结果对比,通过对钢、铝焊接试样焊接过程的模拟,发现在焊接过程中最大熔核半径达到5.00 mm,最大热影响区半径为5.52 mm。

由图2可以发现焊接过程中熔池的最高温度达到1720 K。由温度云图可以看出,在焊枪通电后,由于高温融化焊丝接触板件的作用,导致工件贴合面及焊点位置处温度率先上升。随着加热时间增加,工件焊接贴合面处由于散热缓慢,导致温度快速上升,熔核不断增大。图2(b)中熔核的实测尺寸和仿真的结果基本一致,所以 SYSWELD 软件可以准确模拟点焊的过程,

从而验证了本文研究内容的可行性。



(a)温度场模拟结果



(b)实测结果

图2 温度场模拟的结果和实测结果对比  
Figure 2 Comparison of modeling result and measured result for temperature field

#### 3.2 不同焊接时间的变形结果与分析

设定焊接电流87 A,焊接电压16.2 V,焊接速度0.58 m/min,送丝速度7.1 m/min,对焊接时间点分别为0.3,0.4,0.5和0.6 s的点焊过程进行相关模拟,分析对比不同的焊接时长对于焊件的变形量影响,变形的结果如图3所示。

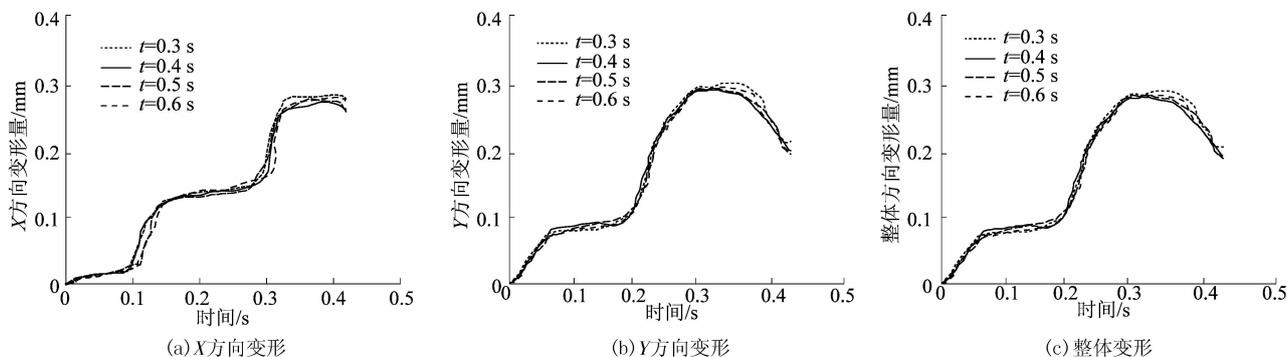


图3 不同焊接时长对焊接变形量的影响

Figure 3 Influence of different welding time on welding deformation quantity

图3中在其他焊接参数一定的条件下, X方向变形持续增加, Y方向上先急剧增加后略减小。随着焊接进行, 产热基本呈线性增长, 促使焊核逐渐形成, 致使变形值也越来越大。X方向变形量增长幅度: 焊接阶段 > 起弧阶段 > 预压阶段。Y方向变形量, 先发生急剧变形, 达到屈服极限之后趋于稳定。整体方向变形趋势基本与Y方向变形趋势保持一致。综上所述, 随着焊接时间的增长, 焊接变形量越大, 但是变化范围

相对较小。对于车身的钢铝异种金属薄板件的焊接, 不影响焊接质量的条件下, 应尽量选用较短的焊接时间, 从而减少焊接变形。

### 3.3 不同焊接电流下的变形结果和分析

设定固定值为焊接时间 0.5 s, 焊接电压 16.2 V, 焊接速度 0.58 m/min, 送丝速度 7.1 m/min, 对焊接电流分别为 75, 80, 87 和 95 A 的点焊过程进行了模拟, 分析不同焊接时间对焊件的变形量影响, 结果如图4所示。

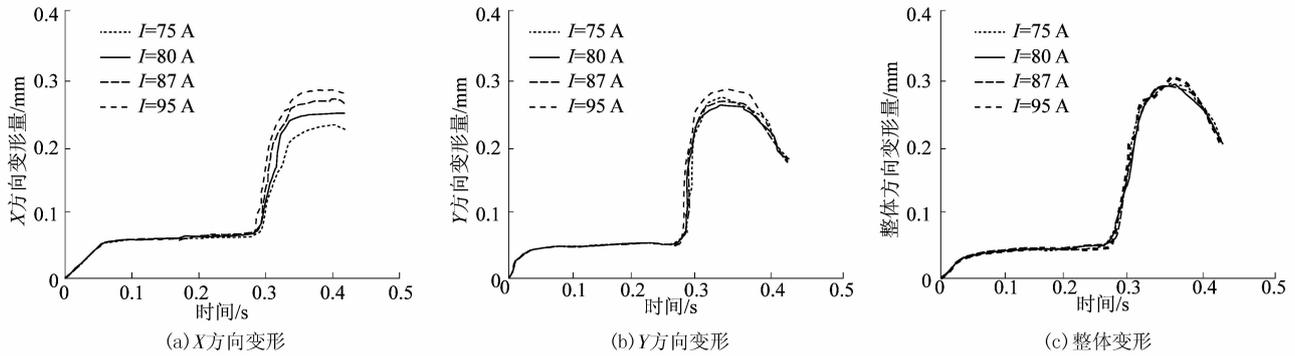


图4 不同焊接电流对焊接变形量的影响

Figure 4 Influence of different welding current on welding deformation quantity

图4中其他焊接参数固定, 随着焊接电流的不断增加, X方向焊接变形量不断增加, 起弧开始后, 变形量急剧地增加, 这是因为焊件受热不均的原因。由于板件在Y方向受焊后回弹影响较大, 整体方向变形量与Y方向基本一致, 最大变形量接近 0.28 mm。综上所述, 对于异种金属薄板的焊接, 在不影响焊接质量的条件下, 应选用较小的焊接电流, 可减少焊件的焊接变

形量。

### 3.4 不同焊接电压下的变形结果与分析

设定固定值为焊接时间 0.5 s, 焊接电流 87 A, 送丝速度 7.1 m/min, 焊接速度 0.58 m/min, 对焊接电压分别为 10.0, 13.0, 16.2 和 19.0 V 的点焊过程进行模拟, 分析焊接电压对焊件变形量的影响, 模拟变形结果如图5所示。

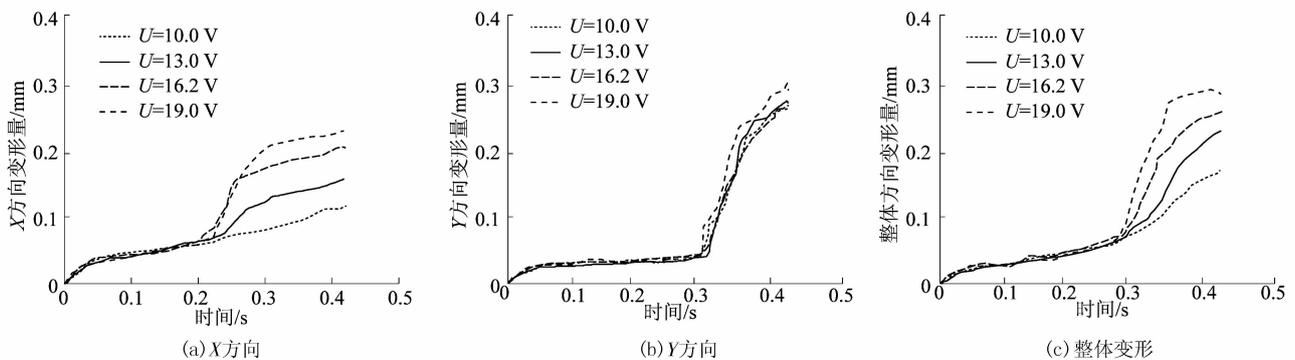


图5 不同焊接电压对焊接变形量的影响

Figure 5 Influence of different welding voltage on welding deformation quantity

图5中在其他焊接参数一定的条件下, 随着焊接电压的增大, 焊接变形量在X和Y方向上的变化趋势基本一致, 焊接产热呈线性增加, 有利于焊核的形成。焊件的焊接变形量和变形速度与焊接电压成正比。但如果焊接时间过长, X方向的变形量则会渐趋于平缓,

这可能是焊件本身发生了一定破坏。并且X方向的变形量受焊接电压变化影响较大, Y方向在不同焊接电压下的变形量没有太大波动, 由图可大致看出, Y方向变形值约为X方向的1.5倍, 整体方向变形总趋势与X方向基本一致。综上所述, 对于铝钢异种金属薄

板件焊接,选用合适的焊接电压对焊接变形量达到极大值产生重要影响。

### 3.5 不同焊接速度下的变形结果和分析

设定焊接时间为 0.5 s,焊接电流为 87 A,焊接电

压为 16.2 V,送丝速度 7.1 m/min,在此条件下,对焊接速度分别为 0.35,0.45,0.58 和 0.65 m/min 的焊接过程进行模拟,分析不同焊接速度对焊件变形量的影响,模拟变形结果如图 6 所示。

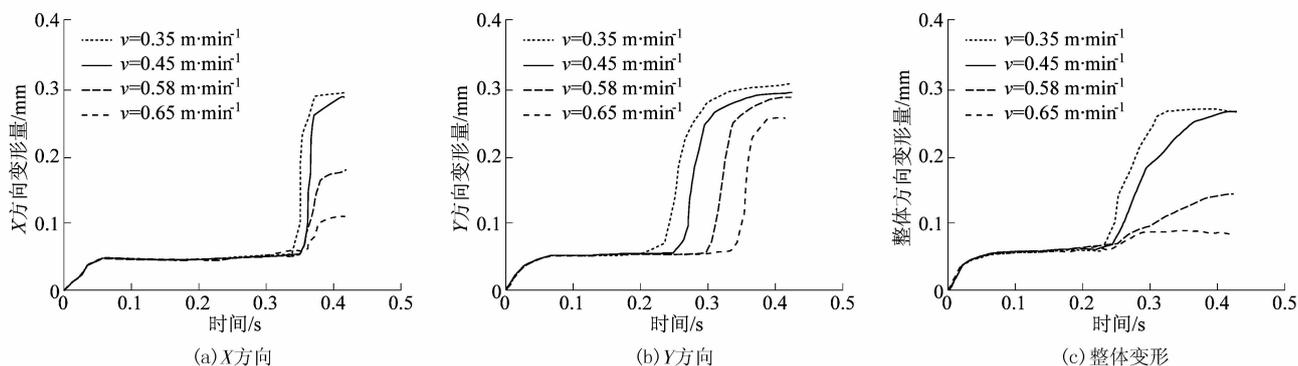


图 6 不同焊接速度对焊接变形量的影响

Figure 6 Influence of different welding speed on welding deformation quantity

图 6 中在其他焊接参数一定的条件下, $X$  方向受焊接速度的影响远大于  $Y$  方向。从图中可看出,变形量与焊接速度成反比关系,因为焊接速度越慢,焊枪正前方处焊丝填充物就越多,局部温度迅速上升,散热越慢,致使焊件变形量变大。反之,焊接速度越大,焊接变形越小。从图 6 看出焊接速度为 0.65 m/min 时板材焊接变形量最小。整体方向总趋势与  $X$  方向基本一致。综上所述,选用相对较大的焊接速度,可以减小变形量,提高铝钢异种金属薄板件焊接质量。

## 4 结论

课题组基于焊接有限元软件仿真软件 SYSWELD 模拟铝钢异种金属薄板件的 CMT 点焊过程,得到了不同焊接工艺参数对  $X$ 、 $Y$  和整体方向焊接变形量影响的关系,并在此基础上得出了各焊接工艺参数对焊接变形的影响规律。

1) 随着焊件焊接电流和时间的变化,焊件  $X$  方向上的焊接变形量呈逐步增加,焊件  $Y$  方向上的焊接变形量在达到最大值后呈逐渐下降,这 2 个方向上的焊接变形增长速度基本趋于一致,这主要是因为板件受焊后回弹,焊接变形量与焊接电流成正比。因此,在满足焊接条件的前提下,选用较小的焊接时间和电流,可减少焊接变形量。

2) 焊接电压越大,相同时间内焊接变形量就越大,达到变形量极大值的速度也越快。当焊接电压超出某个范围时, $X$  方向的变形量渐趋于平缓,焊件本身发生了一定破坏。 $Y$  方向焊接变形值为  $X$  方向的 1.5 倍。因此,在一定焊接电压范围内,焊接变形量随焊接电压

的增大而增大,超过某一临界值,焊件遭到破坏。

3) 对于车身铝钢异种金属薄板 CMT 焊接,在夹具施压阶段,焊件发生剧烈的变形,达到材料的屈服极限后,变形量趋于稳定。焊件起弧后,焊件发生剧烈的焊接变形,直至焊接结束。焊接速度对焊接变形的影响在  $X$  方向更加能体现出来,这是由于局部温度迅速上升,散热慢,致使焊件变形量大。总体比较,焊接速度越大的焊接变形量反而越小。因此为了避免焊接变形量过大,宜选用相对较大的焊接速度。

## 参考文献:

- [1] 贾宝栋. 汽车新材料的应用与发展趋势分析[J]. 时代农机, 2016, 43(8): 22-23.
- [2] 常素云. 影响未来汽车的十项高新技术[J]. 轻型汽车技术, 2007, 9(3): 29-32.
- [3] GOEDE M, STEHLIN M, RAFFLENBEUL L, et al. Super light car-lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration[J]. European transport research review, 2009, 1(1): 5-10.
- [4] 汤东华. 白车身焊装顺序规划与评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007: 10-12.
- [5] 余刚, 陈剑虹, 曹睿, 等. 铝钢异种金属冷金属过渡技术焊接性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012: 33-35.
- [6] 杨修荣. 超薄板的 CMT 冷金属过渡技术[J]. 焊接, 2005, 12(8): 52-54.
- [7] 汪建华. 焊接变形和残余应力预测理论与计算—发展及应用前景[C]. 第三届计算机在焊接中的应用技术交流会议论文集. 上海: 中国焊接学会, 2000: 13-19.
- [8] 侯志刚. 薄板结构焊接变形的预测与控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 22-23.
- [9] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.