

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.02.001

基于 CMT 技术的镀锌钢-铝合金板焊接变形研究

王夏杰, 邢彦锋, 金光灿

(上海工程技术大学 汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为了研究镀锌钢和铝合金边塞焊变形问题,应用冷金属过渡(CMT)技术,采用五因素(送丝速度、焊接时间、铝板厚度、开孔直径和弧长修正)三水平(低、中、高)的正交试验方法。通过对焊接件变形量分析,得到最佳焊接工艺参数组合,并通过拉伸试验和金相试验考察了最佳工艺参数下的焊接件的连接强度和焊接质量。研究表明:送丝速度、铝板厚度、开孔直径对焊接变形的影响最大;最佳焊接工艺参数组合为送丝速度 5 m/min,开孔直径 6 mm,铝板厚度 1.5 mm,弧长修正 5%,焊接速度 1.6 m/min。经方差分析所得到的最佳焊接参数组合,不仅使焊接薄板变形量较小,而且能够达到所需的连接强度。

关键词:异种金属焊接;焊接变形;冷金属过渡;边塞焊;正交实验法

中图分类号:TG453.9

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)02-0001-05

Deformation Analysis of Welding of Galvanized Steel-Aluminum Alloy Sheet Based on CMT Welding Technology

WANG Xiajie, XING Yanfeng, JIN guangcan

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

Abstract: Cold metal transfer (CMT) technology was applied for galvanized steel and aluminum alloy edge plug welding deformation problem, using the five factors (wire feeding speed, welding time, aluminum plate thickness, hole diameter and arc length correction) three levels (low, medium and high) orthogonal test method. Through the analysis of deformation quantity, the optimum welding parameters were obtained. The connection strength and welding quality of the weldment under the optimum technological parameters were investigated by tensile test and metallographic test. The results show that wire feeding speed, aluminum plate thickness and opening diameter have the greatest influence on welding deformation. The optimal process parameters are combined with wire feeding speed of 5 m/min, opening diameter of 6 mm, the aluminum sheet thickness 1.5 mm, arc length correction 5%, and welding speed of 1.6 m/min. The best combination of welding parameters obtained by variance analysis not only makes the deformation of welding sheet smaller, but also achieves the required connection strength.

Keywords: welding of dissimilar metals; welding deformation; CMT (cold metal transfer); orthogonal experiment method; edge plug welding

汽车排放作为环境污染的主要源头之一,其节能减排问题急需解决。采用轻量化车身的汽车可以有效地减少能源的消耗,从而达到降低污染物排放的目的。有统计表明,汽车整车质量每下降 10%,相应的燃油效率可提高 6%~8%^[1]。车身焊接过程中铝合金和

钢的混合结构可以明显降低汽车的质量,因此铝合金和钢的有效连接受到高度重视^[2]。铝、钢因其热物理参数差异较大,尤其随着温度的增加焊接处易形成铝铁金属间化合物,使得焊接品质难以把控^[3]。

拥有广泛交叉性的铝-钢异种金属结构,如何高效

收稿日期:2017-07-31;修回日期:2017-11-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51105241);上海工程技术大学研究生科研创新基金项目(E3-0903-17-01084)。

第一作者简介:王夏杰(1994),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究方向为汽车装配质量控制。通信作者:邢彦锋(1978),男,山东聊城人,博士,主要研究方向为车身制造质量控制。E-mail:xiajie_yun0118@hotmail.com

优质的连接是制约其在工程上广泛应用的重大难题^[4-5]。当前,铝合金和钢连接的方式有很多种,例如:冷压焊、爆炸焊、摩擦焊、超声波焊以及磁脉冲等。但冷压焊焊接效率低,焊接质量不易控制^[6];爆炸焊在炸药量、爆炸速度、以及界面间隔等工艺方面难以把控^[7];摩擦焊对焊接接头形状有严格的要求,接头一般成棒状^[8-9];超声波和磁脉冲焊接设备复杂,对焊接件形状和尺寸有严格限定,且焊接结构受限多、加工成本大,不适合推广应用^[10]。冷金属过渡焊接技术作为一种新型的焊接方式,因在工作过程中能够将送丝与熔滴过渡过程进行数字化协调、热量输入小、无起弧飞溅和焊件背面不需气体保护等优点使得其在异种金属连接尤其是铝-钢薄板件焊接领域被广泛应用,故此次焊接方式选用冷金属过渡焊。

目前对焊接的研究多集中在焊接处组织成份分析以及连接质量分析,对焊接变形的研究较少,利用正交试验分析边塞焊^[11]变形的研究更少。课题组选用的

材料是车辆行业广泛应用的 DP590 镀锌钢和 AA6061-T6 铝合金,边塞焊试验仪器配备了 Fronius transpuls 协同 4000 焊枪焊机的机器人焊接系统。课题组首先依据 $L_{18}(3^7)$ 正交表进行焊接试验,通过方差分析得出焊接变形的主要影响因素,并筛选出最优工艺参数组合;其次,针对筛选出的最佳工艺参数组进行多次重复性焊接,通过拉伸实验和金相实验分析焊接件的力学性能和微观组织,以考察其焊接质量的可靠性。

1 实验材料及流程

1.1 实验材料

本次研究的材料分别是 1.2 mm 厚 DP590 镀锌钢板和厚度分别为 1.0, 1.2 和 1.5 mm 的 AA6061-T6 铝合金薄板,填充材料为直径 1.2 mm 4043 铝硅焊丝,它们的化学成分和材料特性如表 1~2 所示。AA6061-T6 铝合金比热容为 $0.896 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$,电阻率为 $3.99 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,导热系数为 $167 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

表 1 实验金属的化学成分

Table 1 Chemical composition of the experimental metals

材料	Mg	Si	Cu	Mn	Zn	Ti	C	S	P	Fe	Al
AA6061-T6	0.800 ~ 1.200	0.400 ~ 0.800	0.150 ~ 0.400	0.150	0.250	0.150	0.250	0.150			剩余
4043	≤0.100	≤5.000	≤0.050							≤0.040	剩余
DP590		≤0.800		≤2.200			≤0.180	≤0.030	≤0.035	剩余	≥0.020

表 2 AA6061-T6 铝合金和 DP590 镀锌钢力学性能

Table 2 Mechanical properties of AA6061-T6 aluminum alloy and DP590 galvanized steel

材料	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
AA6061-T6	285	72	13
DP590	316	219	23

铝合金薄板和钢板的尺寸均为 $130 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$,焊接前用砂纸抛光铝板上的氧化膜,并用丙酮清洗所有表面杂质。焊接样品示意图如图 1 所示。焊丝伸出焊枪枪头长度是 13 mm,焊接保护气体为 99.99% 的纯氩气,以 $20 \text{ L}/\text{min}$ 的流速工作。

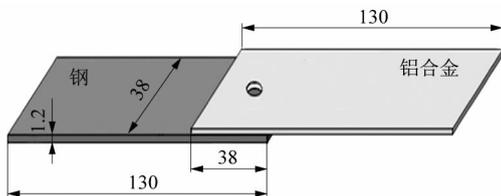


图 1 焊接样品示意图

Figure 1 Sketch map of welding sample

1.2 焊接及焊件变形测定

1.2.1 边塞焊流程

焊接过程所需仪器包括机械臂、焊枪、CMT 焊接系统以及基于双目立体视觉测量标记点设备,如图 2 所示。边塞焊沿焊丝与圆孔外切位置顺时针进行,起弧位置处于圆孔外边缘,收弧位置位于圆孔正中央,焊枪在整个焊接过程中始终垂直于焊接件表面,如图 3 所示。



图 2 CMT 焊接系统

Figure 2 CMT welding system

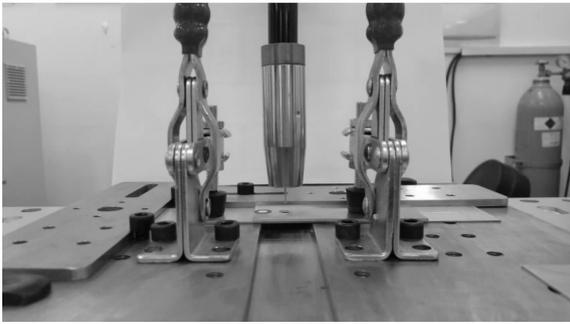


图3 焊接局部

Figure 3 Welding details

为了确定合适的铝合金薄板厚度及开孔直径,在焊接过程中需不断更换不同厚度及开孔直径的焊接件。同样,为了满足送丝速度、焊接速度、弧长修正的不同搭配需通过机器人和 CMT 焊接系统的控制器不断调节相应的参数。

1.2.2 焊接变形的测定

变形测量采用如图 4 所示的基于双目立体视觉测量标记点设备,主要设备包括工业相机和光源,且计算机安装有自主开发的 Welding Detection 软件。因为焊接开始和结束时机械臂处在同一位置,所以可以在焊接原点处采集焊接前后的对比位置数据,测量界面如图 5 所示。

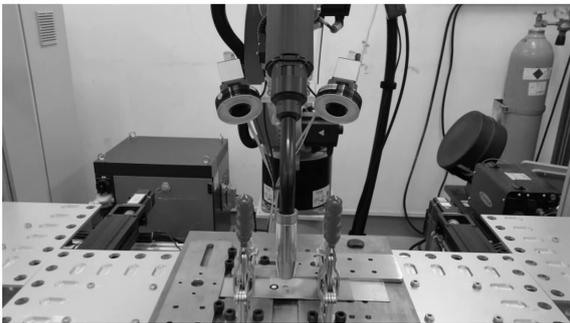


图4 双目立体视觉测量标记点设备

Figure 4 Binocular stereo vision measurement of mark point device

1.3 拉伸实验

拉伸实验使用型号为 MJDW-200B 的微机控制电子万能试验机。在控制界面试验曲线种类选择处选择试验力-时间曲线和试验力-位移曲线,拉伸速度选用 0.1 mm/min。把在最佳焊接参数下焊接得到的样品的两端夹在拉伸机上下两夹头处,点击试验开始按钮,拉伸机持续工作直至焊接位置被拉断,拉伸机自动停止为止。

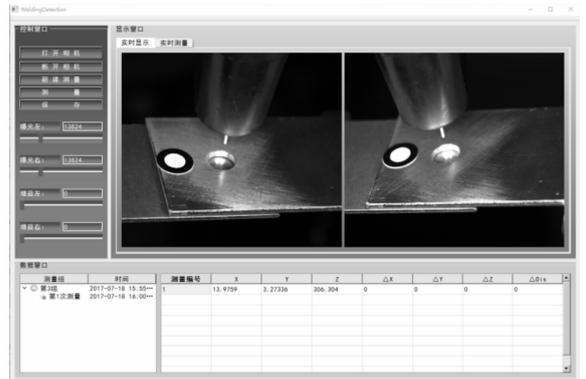


图5 测量系统界面

Figure 5 Measuring system interface

1.4 金相试验

对在最佳工艺参数下焊接得到的样品进行切割、镶嵌和抛光,再使用体积分数为 4% 的硝酸酒精侵蚀。金相试验选用型号为 DM4M 的莱卡半自动智能数字式正置金相显微镜,将上述过程处理过的样品固定在载物台上,调整位置进行观测。

2 试验结果及分析

2.1 正交试验下的变形量分析

依照正交试验表进行焊接试验,焊后试样的宏观组织如图 6 所示。结合表 3~4 中各试验参数可以发现,7 号、16 号和 18 号焊接件因送丝速度最大、铝板厚度相对较小或开孔直径相对较大所以焊点附近的铝板烧灼严重,而且变形相比其他焊接件更加明显。对比分析正交试验表 4 中每组焊接参数及焊后的变形量,能够得出,焊后试样的变形随着送丝速度的增大呈现出上升的趋势;在相同送丝速度的情况下,铝板开孔直径越大试样焊后变形量越大;送丝速度、铝板开孔直径不变时,焊后试样的变形量随着铝板厚度的减小而显

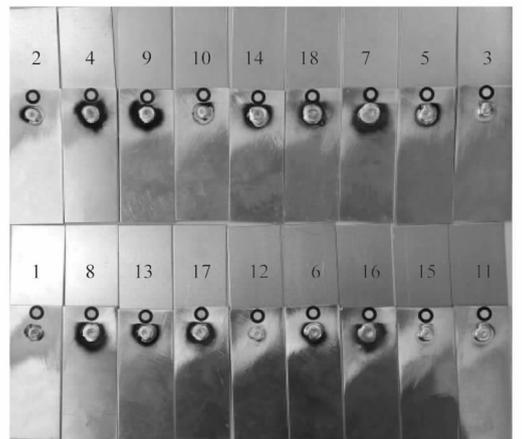


图6 焊后试样

Figure 6 Samples after welding

现出上升的趋势。这是因为,相同的焊接速度下,送丝速度越大,单位时间内从焊点位置输送到试样上的热量越多,而铝板越薄,焊点附近板材单位面积传导的热量就越多,所以变形就越大。

表3 实验因素及水平

Table 3 Experimental factors and levels

水平	送丝速度 A/ (m·min ⁻¹)	焊接速度 B/ (m·min ⁻¹)	铝板厚度 C/mm	开孔直径 D/mm	弧长修正 E/%
1	5.0	1.0	1.0	6.0	-5.0
2	5.4	1.3	1.2	7.0	0.0
3	5.8	1.6	1.5	8.0	5.0

表4 正交试验方案

Table 4 Orthogonal test scheme

编号	A	B	A×B	C	D	C×D	E	P ₁ /mm	P ₂ /mm	P _i /mm
1	1	1	1	1	1	1	1	0.200	0.212	0.412
2	1	2	2	2	2	2	2	0.230	0.234	0.464
3	1	3	3	3	3	3	3	0.124	0.100	0.224
4	2	1	1	2	2	3	3	0.160	0.174	0.334
5	2	2	2	3	3	1	1	0.222	0.230	0.452
6	2	3	3	1	1	2	2	0.140	0.122	0.262
7	3	1	2	1	3	2	3	0.444	0.430	0.874
8	3	2	3	2	1	3	1	0.240	0.248	0.488
9	3	3	1	3	2	1	2	0.340	0.300	0.640
10	1	1	3	3	2	2	1	0.154	0.200	0.354
11	1	2	1	1	3	3	2	0.272	0.266	0.538
12	1	3	2	2	1	1	3	0.111	0.095	0.206
13	2	1	2	3	1	3	2	0.140	0.150	0.290
14	2	2	3	1	2	1	3	0.294	0.300	0.594
15	2	3	1	2	3	2	1	0.212	0.232	0.444
16	3	1	3	2	3	1	2	0.524	0.514	1.038
17	3	2	1	3	1	2	3	0.216	0.212	0.428
18	3	3	2	1	2	3	1	0.511	0.497	1.008

不同参数组合下重复2次试验得到焊接件变形结果 P_1 和 P_2 , 并求得2次变形总和 P_i , 即 $P_i = P_1 + P_2$, 如表4所示。因 $L_{18}(3^7)$ 的7列因子都已放满, 不存在第一类偏差, 故只能用第二类偏差 S_{e2} 作为误差检验因子的显著性, 第二类偏差计算公式为:

$$S_{\text{总}1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n P_i^2 - C_T f_{\text{总}1} = n - 1; S_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m P_{ik}^2 - C_T f_{\text{总}1} = nm - 1; S_{e2} = S_{\text{总}} - S_{\text{总}1}, f_{e2} = n(m - 1), S_e = S_{e1} + S_{e2}, \text{其中 } C_T = \frac{G^2}{n \times m}.$$

式中: $S_{\text{总}1}$ 为第一类偏差的平方和; $f_{\text{总}1}$ 为第一类偏差的自由度; $S_{\text{总}}$ 为试验总平方和; $f_{\text{总}}$ 为试验总自由度; S_{e2} 为第二类误差的平方和; f_{e2} 为第二类误差的自由度; S_e 为误差平方和; n 为非重复性试验次数, m 为重复试验或

重复取样数; G 为所有数据总和。方差分析表如表5所示。

表5 方差分析

Table 5 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	显著性
A	0.268	2	0.134	33.50	***
B	0.012	2	0.006	1.50	
C	0.071	2	0.036	9.00	***
D	0.110	2	0.055	13.75	***
E	0.016	2	0.008	2.00	
A×B	0.011	4	0.003	0.75	
C×D	0.013	4	0.003	0.75	
误差	0.072	18	0.004		
总和	0.573	36			

通过表4极差分析和表5中因子均方与误差均方的比值 F , 可以看出, F_A, F_C 和 F_D 分别都大于 $F_{0.99}(2, 18) = 6.01$, 说明 A (送丝速度)、 C (铝板厚度) 和 D (开孔直径) 对实验的结果的影响高度显著。 $F_B, F_{A \times B}$ 和 $F_{C \times D}$ 小于 $F_{0.99}(2, 18) = 2.62$, 可以断定: 因子 B (焊接速度)、因子 A 和因子 B 的交互作用、因子 C 与因子 D 的交互作用对试验结果没有明显的影响, 试验误差是导致试验结果波动的主要原因。

综上所述, 最佳的焊接参数为: 送丝速度 5.0 m/min, 开孔直径 6 mm, 铝板厚度 1.5 mm, 弧长修正 5%, 焊接速度 1.6 m/min。由于正交试验中没有此最优方案, 故依据最优方案计算的变形量为:

$$P_{\text{变}} = \bar{y} + (\bar{K}_{A1} - \bar{y}) + (\bar{K}_{B3} - \bar{y}) + (\bar{K}_{C3} - \bar{y}) + (\bar{K}_{D1} - \bar{y}) + (\bar{K}_{E3} - \bar{y}) = 0.006 \text{ mm}.$$

式中: \bar{y} 表示 36 组试验变形的平均值; \bar{K}_{A1} 表示 A 影响因素下 1 水平对应的平均值; $\bar{K}_{B3}, \bar{K}_{C3}, \bar{K}_{D1}$ 和 \bar{K}_{E3} 含义与 \bar{K}_{A1} 相似。

依据最佳焊接参数进行焊接试验, 经检测焊后变形量为 0.006 mm, 与计算相符, 说明该正交试验数据精确度处在合理的范围之内。

2.2 最佳工艺参数下的组织及力学性能

通过以上试验分析可知, 最佳的工艺参数组合为 $A_1 B_3 C_3 D_1 E_3$, 该工艺参数下的焊点样貌及焊缝位置致密度如图7所示。图7(a)中焊点表面形状整齐, 焊核尺寸较大, 无明显烧灼现象; 经金相组织分析可知, 焊缝明显且厚度均匀, 焊缝周围和熔融处无裂缝及气泡产生, 说明焊点是在稳定的焊接过程下产生的, 焊接性能可靠。图7(b)所示的焊接件焊缝上侧为钢, 下侧为铝。

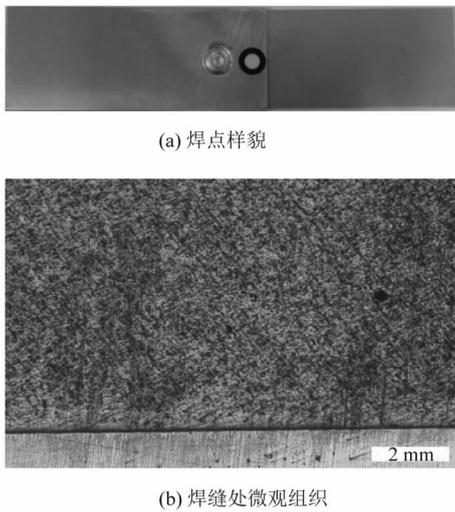


图 7 焊点样貌及焊缝微处观组织

Figure 7 Weld appearance and microstructure at weld gap

经拉伸实验得到了试验力-时间曲线和试验力-位移曲线,如图 8 所示。分析可知,试验力随位移、时间的增大而增加,当试验力达到 5 080 N 时,焊接处发生轻微塑性变形,后发生断裂,试验力急剧下降。连接强度最大为 5 080 N,符合汽车车身焊接的强度要求。

3 结论

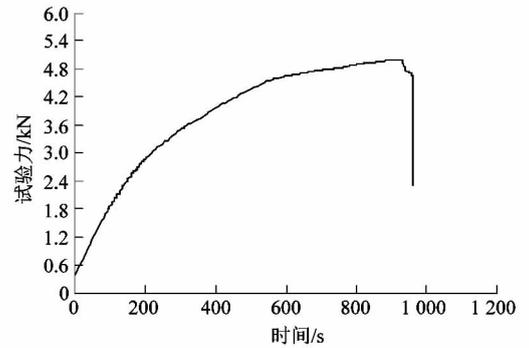
1) 针对 DP590 低碳钢和 AA6061-T6 铝合金边塞焊接变形问题,得到焊接变形 3 个重要影响因素,变形影响从大到小依次为:送丝速度,开孔直径,铝板厚度。焊接速度和弧长修正对焊接变形影响相对较小。

2) 经统计学分析,焊接因素最优搭配为送丝速度 5.0 m/min,开孔直径 6 mm,铝板厚度 1.5 mm,弧长修正 5%,焊接速度 1.6 m/min,且最优焊接参数下的理论焊接变形值与实际所测得的焊接变形数据一致。

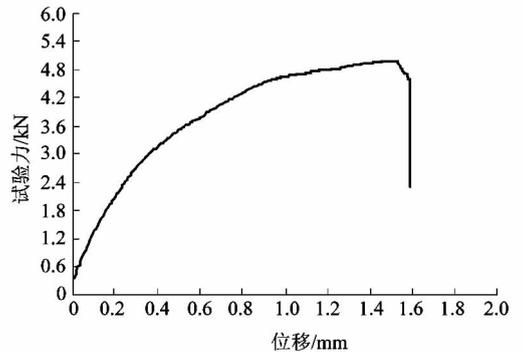
3) 在分析所得的最佳焊接参数组合下,焊点处形状规则、组织致密,无裂纹和气泡产生,且连接强度符合使用要求。

参考文献:

- [1] SENUMA T. Physical metallurgy of modern high strength steel sheets [J]. ISIJ international, 2001, 41(6): 520 - 532.
- [2] 刘茜. 满足汽车发展要求的零部件材料:塑料、铝和钢的应用状况 [J]. 天津汽车, 1997(3): 29 - 34.
- [3] CAO R, YU Gang, CHEN J H, et al. Cold metal transfer joining aluminum alloys-to-galvanized mild steel [J]. Journal of materials processing technology, 2013, 213(10): 1753 - 1763.



(a) 试验力与时间关系



(b) 试验力与位移关系

图 8 试验力与时间、位移之间的关系
Figure 8 Relationship among test force, time and displacement

- [4] 李亚江,吴娜. 钢/铝异种金属焊接的研究现状[J]. 焊接, 2010(3): 5 - 12.
- [5] 张洪涛,何鹏,孔庆伟,等. 铝钢异种材料焊接研究现状与发展[J]. 焊接, 2006(12): 7 - 11.
- [6] ACHAR D R G, RUGE J, SUNDARESAN S. Joining aluminum to steel with particular reference to welding [J]. Aluminum, 1980, 56(4): 291 - 293.
- [7] RATHOD M, KUTSUNA M. Laser roll bonding of A5052 aluminum alloy and SPCC steel [J]. Quarterly journal of the Japan Welding Society, 2005, 21(2): 282 - 294.
- [8] FUJI A. Friction welding of Al-Mg-Si alloy to Ni-Cr-Mo low alloy steel [J]. Science and technology of welding and joining, 2004, 9(1): 83 - 89.
- [9] ARITOSHI M, OKITA K. Friction welding of dissimilar metals [J]. Welding international, 2003, 17(4): 271 - 275.
- [10] 王希靖,商献伟,张昌青. 大截面钢/铝异种金属摩擦焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2010, 40(7): 45 - 48.
- [11] LEI Haiyang, LI Yongbing, CARLSON B E, et al. Cold metal transfer spot joining of AA6061-T6 to galvanized DP590 under different modes [J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2015, 137(5): 1 - 10.