2018年9月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)

Sep. 2018

三明治铝合金结构激光焊接工艺研究

任德亮',曹振飞2,万 朋2,赵衍庆2,齐海波2

(1.河北大学党政办 河北保定 071002; 2. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院 河北 石家庄 050043) 摘要: 针对激光焊接 6082 三明治铝合金结构 ,系统地研究了 T 型接头组织特征及力学性能。实验结果表明: 从焊缝中心区 ,到热影响区 ,最终到达母材硬度逐渐升高 ,焊缝中心硬度最小; 不同实验条件下 ,焊缝到母材过程中组织变化显著 ,且存在各种不同的缺陷。

关键词: 6082 铝合金; 激光焊接; 微观组织特征; 力学性能

中图分类号: G456.7 文献标志码: A 文章编号: 2095 - 0373(2018)03 - 0104 - 07

0 引言

全焊接三明治铝合金是一种由上下两层薄铝面板与中间的铝芯板通过焊接而形成的新型夹芯式结构,上下两块面板承载弯曲和面内荷载,中间芯板承受剪切载荷,具有高强度和高刚度,因而在船舶、飞机、列车、汽车等行业得到了广泛的关注[1-2]。

由于三明治铝合金的面板及芯板的厚度较薄,传统的 MIG 焊热影响区大、热变形大,无法满足要求^[2]。激光焊具有焊接速度快、焊接变形小的优点恰好可以应用于此类结构^[3]。英国焊接研究所采用激光电弧复合焊为日本高铁制造商开发出了高速列车三明治铝合金车墙板结构,实现了铝合金板各种接头的焊接^[2]。本研究以中低速磁悬浮列车三明治铝合金车体为研究对象相比于高速列车,板材厚度仅为1.5 mm,车身长达10多米,激光电弧复合焊引起的变形也不可忽视。为此,采用纯激光焊对WEB-CORE形式的三明治铝合金结构进行焊接工艺实验。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验所用材料为 6082 铝合金 供货状态为 T6 ,主要化学成分如表 1 所示。试验中每块 T 接 6082 铝合金板的尺寸为 $120~\text{mm} \times 60~\text{mm} \times 1.5~\text{mm}$ 。

 表 1 6082 铝合金化学成分质量分数									
Si	Ti	Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Cr	Al	
0.7 ~ 1.3	0.10	0.20	0.6 ~ 1.2	0.1	0.5	0.4~1.0	0.25	余量	

1.2 试验方法

在焊接前对铝合金进行化学清洗: 用 10% 的 NaOH 溶液浸泡 ,清水冲洗 ,之后用 30% 的 HNO $_3$ 溶液进行中和清洗。取出板材 ,再次用清水冲洗 $2\sim3$ min ,丙酮擦拭 ,用吹风机冷风吹干 ,密封保存。

激光器选用美国 IPG 公司生产的 YLS-4000 型光纤激光器作为能量输出装置 ,最大输出功率为 4~300~W ,机器人手臂选用的是德国 KUKA 公司生产的 KUKA-3HA 型机器人。保护气体为 99.999% 氩气。焊后沿焊缝横截面制备金相试样 ,经打磨抛光后用腐蚀液进行宏观形貌和微观组织分析 ,腐蚀液为: 4~mL 氢氟酸(HF) + 10~mL 浓硝酸(4~mL 积 4~mL 积 4~mL 次 4~mL 4~mL

收稿日期: 2017 - 03 - 24 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10. 13319/j. cnki. sjztddxxbzrb. 2018. 03. 17

作者简介: 任德亮(1964—) 男 教授 .研究方向为材料焊接。E-mail: rendeliang12@163. com

任德亮 曹振飞 万朋 等. 三明治铝合金结构激光焊接工艺研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版 2018 31(3):104-110.

GX51 型奧林巴斯显微镜观察显微组织; 使用 HVS-1000 型数显显微硬度计对焊接接头进行显微硬度测 试 施载力为 100 g。

试验内容 2

2.1 焊接工装的设计

本试验的试样为 T 型结构 由 3 块铝合金板组成 ,所焊 部位为上面两块铝板的对接部分。面板水平放置,芯板垂 直于面板固定以及三板紧密对接成为新的问题。此外,进 行工字型焊接(反焊)及目字型扩展焊接工装设计,才真正 实现"三明治铝合金结构"要求。经过反复思考,更改工装 图形,设计出的固定装置如图1所示。



图 1 固定装置

本装置设计综合考虑了焊接位置需求、耐热高强、使

用寿命及经济要求,有如下特点:(1)能满足正反焊接,预留焊缝区域充足;(2)对于封闭空间,可方便固定 拆卸;(3)为避免板件加工误差 面板、芯板均可在一定范围内调解固定;(4)材料强度高 耐热并方便铝板散 热 \mathcal{P} 来整美观 价格适当 方便组装; (5) 装置方便移动 小巧多功能; (6) 不仅适用于 $120 \times 60 \times 1.5$ 铝合金板 件,还适用于能三维方向适当扩大及缩小的板件。

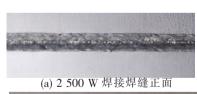
2.2 焊接工艺试验

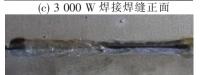
在焊接速度为 35 mm/s、离焦量 0 mm、保护气体流量 15 L/min 时,首先进行了激光功率为 2 000 W、2 500 W、3 000 W、3 500 W 的焊接试验。然后,在激光功率为 3 000 W、离焦量 0 mm、保护气体流量 15 L/min 时 进行了焊接速度从 40 mm/s 到 70 mm/s 的焊接试验。

3 试验结果及分析

3.1 不同激光功率下焊缝形状及微观组织分析

图 2 为不同激光功率焊接三明治铝合金结构的焊缝形貌。当激光功率为 2 000 W 时 表面平整光滑 , 无鱼鳞状波纹 但面板与芯板未焊接在一起。当激光功率为2500 W 时 此时热输入可以焊透1.5 mm 厚 的母材并与芯板焊接在一起 焊缝表面光滑 鱼鳞状波纹连续美观。当激光功率为 3 000 W 时 熔宽和熔 深逐渐增加 同时飞溅物也开始变多 焊件的反面出现部分塌陷。当激光功率为3500 W 时 ,飞溅严重 焊 接过程不稳定 焊缝表面成形粗糙 母材多处被烧穿 塌陷严重。





(e) 3 500 W 焊接焊缝正面





(d) 3 000 W 焊接焊缝背面



(f) 3 500 W 焊接焊缝背面

图 2 不同激光功率的焊缝形貌

激光焊接铝合金时 热量输入比较快 冷却所用时间也短 相当于空冷淬火 从而使焊缝中晶粒得到

细化 晶界增多 析出相较少 来不及长大 游散地分布在晶界和晶粒中 $^{[4]}$ 。从焊缝中心到融合线再到热影响区 晶粒的成长具有各向异性 这是由温度梯度大小决定的。当焊缝结晶时 由于熔合线附近的温度梯度较大 从而形成粗大的柱状晶。而焊缝中心区域温度梯度较小 形成均匀细密的等轴晶和树枝晶的混合区 局部有团簇细小的树枝晶团 而黑色组织为 Mg_2Si 强化相 $^{[5]}$ 。图 3 为激光功率为 2 500 W 和 3 000 W 的 T 型焊缝截面及微观组织。

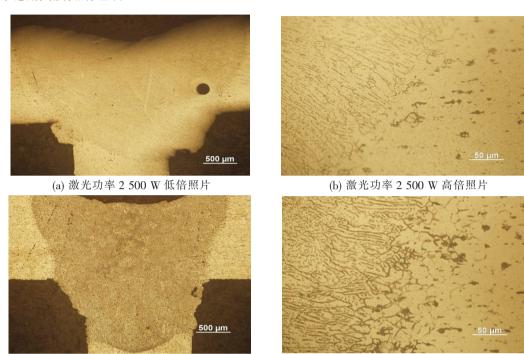


图 3 不同焊接功率下焊缝形貌及微观组织

(d) 激光功率 3 000 W 高倍照片

3.2 不同焊接速度下焊缝形状及微观组织分析

(c) 激光功率 3 000 W 低倍照片

当激光功率为 2 500 W 时 焊缝美观,飞溅小,并且塌陷较浅,因此,选择在该功率下进行不同焊接速度的试验。当焊接速度为 25 mm/s 时,能量过高,变形增大,焊缝表面成形粗糙,飞溅颗粒大,母材部分烧穿,塌陷严重,熔宽较大;焊接速度为 35 mm/s 时,焊缝表面鱼鳞状波纹整齐连续,飞溅物较少,塌陷小;当焊接速度为 45 mm/s 时,热输入较小,焊缝表面连续平整光滑但焊缝不连续。图 4 为不同焊接速度下的焊缝正面形貌。

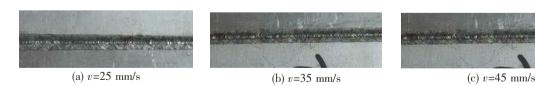


图 4 不同焊接速度下的焊缝正面形貌

焊接速度越大 晶粒主轴的成长方向越垂直于焊缝的中心线;相反 焊接速度越小时 晶粒主轴的成长方向越弯曲。当焊接速度为 25 mm/s 时 能量密度过高 熔宽较大 熔池深度较大 T型焊缝深度和宽度都较大 存在较多的夹杂;焊接速度为 35 mm/s 时 能量密度适中 熔宽、熔池深度足以保证焊接牢固 ,且组织内部缺陷较少 ,有利于发挥 T 型结构的优点;当焊接速度为 45 mm/s 时 ,能量密度较小 ,熔宽较大 ,熔池深度较小 ,焊缝不连续 ,结构不能保证使用要求 ,结晶速度过快 ,导致微观组织中存在较多的气孔和裂缝^[6]。图 5 为不同焊接速度下的 T 型焊缝截面及显微组织。

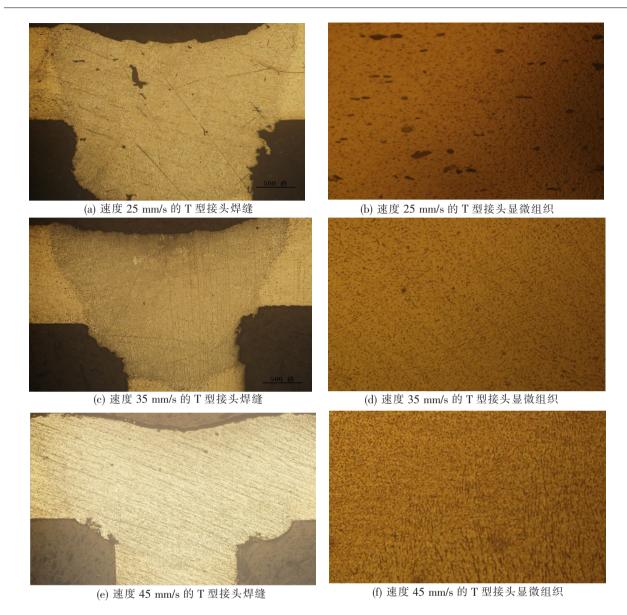
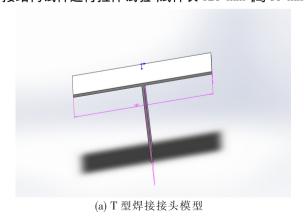


图 5 不同焊接速度下的 T 型焊缝及显微组织

3.3 焊接接头拉伸性能分析

焊接速度分别是 25~mm/s、35~mm/s、45~mm/s 试验条件下得到的三明治铝合金结构进行切割 得到 T 型焊接结构试样进行拉伸试验 ,试样长 120~mm ,高 60~mm ,宽 25~mm 厚度为 2~mm ,拉伸试样如图 6~mm ,。



(b) T型焊接接头实体

图 6 T型焊接接头结构

为避免试验数据的随机误差 因此在不同试验条件下各选择 $3 \land T$ 型接头结构进行拉伸 得到各组拉伸试验结果见表 2。

·	/目 		亚柏体 MD		
实验组数	焊接速度/(mm • s ⁻¹)	1	2	3	— 平均值/MPa
1	25	124.83	130.70	110.27	121.93
2	35	181.09	199.84	203.11	194. 68
2	45	166.72	147.91	138.79	151.14

表 2 不同速度下焊接接头拉伸试验结果

焊接之后的试样接头应该满足 GB15614-2-2005 的规范 实际抗拉强度

$$R_m(w) = R_m(pm) xT \tag{1}$$

式中 $R_m(w)$ 是焊接之后的抗拉强度值; $R_m(pm)$ 是国标中母材抗拉强度的最低规定值; T 是接头效率系数 $p^{[7]}$; 国标中 $p^{[7]}$ 300 MPa 因此得到抗拉强度最小值为 $p^{[8]}$ 。

本试验数据前两组数据均小于最低规定值,即T型接头结构不能满足使用要求,第2组试验数据满足最低要求,第2组试验中稀释率较为适中,接头部位结合较为牢固,且显微组织无明显缺陷,组织均匀没有明显的异相分布。

3.4 焊接接头显微硬度分析

对焊接功率 2 500 W、焊接速度 35 mm/s、离焦量 0 mm、保护气体流量 15 L/min 的 T 型焊缝进行硬度检测 横向焊缝测试点从焊缝左侧分别经历母材、热影响区、焊缝一直延伸到右测的母材,两点间隔为 0.25 mm; 纵向焊缝测试点从焊缝表面一直延伸到铝合金芯板,两点间隔也为 0.25 mm。硬度检测结果如图 7 所示。

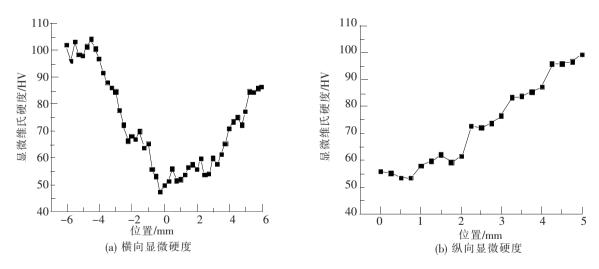


图 7 焊接接头显微硬度分布图

从图 7(a) 可以得知 6082 铝合金母材的硬度最高 约为 100~HV 焊缝硬度明显小于母材 焊缝中心处硬度最低 约为 45~HV; 从焊缝中心的位置到母材的区域 硬度逐渐增加 但在热影响区存在硬度降低的区域。从图 7(b) 可以得知 "从焊缝表面到焊缝底部显微硬度呈上升趋势 "这可能与焊缝上层与下层所经历的不同的热循环温度有关[9]。

母材硬度明显高于焊缝是由于母材在加工过程中经过形变热处理和时效产生了强化作用,而激光焊接过程中的热循环过程会使这种强化作用消失导致强度降低。热影响区软化现象的形成主要是由于激光焊接过程速度非常快,焊接过程中热量的循环会使铝板的温度在短时间内快速升高,在温度到达最大

值之后又会下降[7]。

3.5 焊接实物

在激光功率为 2 500 W、焊接速度为 35 mm/s、离焦量为 0 mm、保护气体流量为 15 L/min 时 ,所焊的三明治铝合金结构如图 8 所示 ,变形较小 ,塌陷程度轻 ,表面几乎无飞溅物 ,焊缝表面光滑。

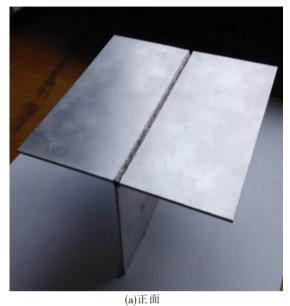




图 8 三明治结构

4 结论

本试验铝合金板材焊接为应用背景,以中低速磁悬浮列车三明治铝合金车体为研究对象,利用光纤激光器,采用预置不同试验条件对6082 铝合金激光焊接工艺进行了研究,通过分析焊接接头的组织和性能,得出的主要结论如下:

- (2) 当焊接速度过低时 ,焊缝容易塌陷 ,但当焊接速度过大时则可能无法焊透母材或焊缝断断续续 , 最好焊缝成形的焊接速度为 35 mm/s。
- (3)6082 铝合金激光焊焊接接头的硬度明显小于母材。从焊缝中心区域到母材区域,硬度会逐渐增加,但在热影响区内存在硬度降低的区域。
- (4) 气孔是 6082 铝合金激光焊接接头的缺陷之一,影响焊接接头的使用性能,焊接前需对铝板进行焊前处理,并控制焊接参数。控制好其它焊接参数,随着激光功率的增加,气孔量也增加,当焊接的速度增大时,气孔的数量也会增多。

参 考 文 献

- [1]杨橄生. 高强钢三明治板的激光焊接及其接头性能研究[D]. 上海: 上海工程技术大学 2013.
- [2] 蒋小霞. 激光焊接全钢三明治结构板的力学行为研究及结构设计[D]. 兰州: 兰州理工大学 2014.
- [3]王旭跃. 吊车梁上翼缘 T 型焊缝的焊接质量及其控制 [J]. 山西建筑 2002 28(2):117-118.
- [4]陈永. 三明治板 T 型接头激光焊接工艺以及力学性能研究[J]. 热加工工艺 2014 43(1):173-478.
- [5]赵海滨. 异厚度铝合金激光拼焊工艺及组织性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学 2008.
- [6]孙华银. 不同边界及加载条件下激光焊三明治板弯曲性能有限元分析[J]. 工业建筑 2015 45(3):745-748.

- [7] Zink W. Welding FUSELAGE shells [J]. Industrial Laser Solutionsfor Manufactuaring 2001, 16(4):7-408.
- [8] 刘春宁 涨艳辉. 不同保护气体对 6082 铝合金焊接接头性能影响的研究[J]. 焊接 2015 』(15):22-25.
- [9] 周维莉. 激光焊接全钢型三明治板的研究与发展 [J]. 热加工工艺 2015, 14(19): 46-47.

Study on Laser Welding Process of Sandwich Aluminum Alloy Structure

Ren Deliang¹, Cao Zhenfei², Wan Peng², Zhao Yanqing², Qi Haibo²

(1. Party Office , Hebei University , Baoding 071002 , China;

2. School of Materials Science and Engineering , Shijiazhuang Tiedao University , Shijiazhuang 050043 , China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of 6082 alloy sandwich structure were studied systematically in this article. The experimental results showed that the hardness of material gradually increased from the weld , to heat-affected zone , and then to base metal , and the hardness of weld center was minimal. From the weld to the base metal in the process the structure changed significantly under different experimental conditions , and there were different kinds of defects.

Key words: 6082 aluminum alloy; laser welding; microstructure; mechanical properties

(上接第91页)

- [8] James Reason. Human Error [M]. Cambridge: Cambridge University Press , 1990.
- [9] Jakub Montewka, Floris Goerlandt, Pentti Kujala. On a systematic perspective on risk for formal safety assessment (FSA) [J].
 Reliability Engineering and System Safety 2014, 127 (127): 77-85.
- [10]朱云斌, 黄晓明, 常青. 模糊故障树分析方法在机场环境安全中的应用[J]. 国防科技大学学报 2009 31(6):126-131.
- [11] Hollands J G , Wickens C D. Engineering psychology and human performance [M]. New Jersey: Prentice Hall ,1999: 314-320.

Study on the Safety Risk of Train Receiving-departure Based on Fuzzy Set Theory

Xu Min

(Department of Transport and Trade , Chongqing Vocational College of Public Transportation , Chongqing 402247 , China)

Abstract: The safety risk factors of train receiving-departure were completely analyzed with the suggestions of scene experts to quantify safety risk of railway train receiving-departure. The causality network was constructed, and the probability of a priori occurrence of the node was calculated by fuzzy mathematics. The dynamic evolution model of the accident factor network was established by using the Bayesian conditional probability as the dynamic mechanism, and the solution algorithm was given. The computer simulation results show that the probability of all factors leading to accident is tending to be stable as the number of experiments reached 1 000 000. Incomplete regulatory rules and the aging of equipment are the two most important safety factors. There is a mutated point in the influence of safety factors on the probability of the final accident.

Key words: train receiving-departure; safety risk; Fuzzy Set; Bayesian network