

5A06 铝合金 TIG 悬空焊接参数及接头组织性能研究

姜玉恒, 张 海, 任海玢, 杨文博

(兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 采用无衬底填丝 TIG 悬空焊接方法进行厚度 6.5 mm 的 5A06 铝合金环缝焊接试验。通过焊接参数的优化, 焊缝成型良好, 并对不同焊接参数下焊接接头的金相组织、力学性能和显微硬度进行分析。结果表明, 母材为原始轧制态组织, 焊接接头为柱状树枝晶, 枝晶间和晶界处分布着析出的 β 相块状沉积物, 焊缝组织较为均匀。焊接接头平均屈服强度、抗拉强度及伸长率分别为 151.11MPa、374.59MPa 和 18.28%, 分别达到母材的 82.3%、98.7% 和 63.6%。对比接头各区域金相组织、力学性能和显微硬度发现, 在焊接热输入较低的位置, 焊缝组织更加均匀, 力学性能更好, 显微硬度略高。

关键词: 铝合金厚板; 填丝 TIG 悬空焊; 金相组织; 力学性能; 显微硬度

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20201668

中图分类号: TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)09-0056-04

Parameters and Properties Analysis of 5A06 Aluminum Alloy without Substrate TIG Welding Joint

JIANG Yuheng, ZHANG Hai, REN Haibin, YANG Wenbo

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Girth welding experiment of 5A06 aluminum alloy with thickness of 6.5 mm was carried out by filler wire and without substrate TIG welding process. Through the optimization of welding parameters, the appearance of weld was well, meanwhile, the microstructure, mechanical properties and microhardness analysis of the welding joint under different welding parameters were analyzed. The results show that the base metal is the original rolled structure, the welding joint is the dendrite structure of the β distributed on the solid α -Al solution grain boundary. The average yield strength, tensile strength and elongation of the welding joint is 151.11MPa, 374.59 MPa, 18.28%, which is 82.3%, 98.7% and 63.6% of the base metal. Compared with the microstructure, mechanical properties and microhardness of the different welding joint area, it is found that the microstructure is more uniform, the mechanical properties are better and the microhardness is slightly higher at the position with lower welding heat input.

Key words: aluminum alloy thick plate; filled wire and without substrate TIG welding; microstructure; mechanical properties; microhardness

近年来, 防锈铝由于其优异的性能, 已经被广泛地应用于航天、航空、航海、轨道交通、压力容器等多个领域。5A06 铝合金为典型的 Al-Mg 系防锈铝, 具有强度较高、抗腐蚀性稳定和焊接性能良好等优点^[1]。但铝及其合金具有导热性能强、线膨胀系数大、熔点低及高温强度小等特点, 使得该类合金的焊接难度较大^[2]。

国内相关研究者对铝合金的焊接方法及焊接性能等开展了大量的分析研究。经调研发现, 铝及其合

金氩弧焊多采用衬底结构或反面封底焊接的方法, 以确保焊缝背面成型良好^[3]。航天某球形压力容器由于结构限制, 无法采用常规的氩弧焊焊接方法进行焊接。本文针对 5A06 防锈铝合金, 采用无衬底填丝 TIG 悬空焊接的方法, 单面施焊双面成型, 分析焊接参数对焊缝成型的影响, 并对材料及焊接接头的金相组织、力学性能及显微硬度进行分析。

1 试验材料及设备

采用美国 Miller 公司的焊接电源和艾美特精密环缝行走机构 (CWL-10-1800), 设计不带衬底的 TIG 悬空焊焊接工艺。焊缝采用环材结构, 开坡口对

收稿日期: 2020-07-08

作者简介: 姜玉恒(1987-), 男, 甘肃人, 工程师, 硕士, 主要从事宇航产品制造工作; 电话: 18919874407; E-mail: 631911876@qq.com

接焊。环材由 5A06 铝合金板材卷制而成,规格 $\phi 420\text{ mm}\times\phi 407\text{ mm}\times 40\text{ mm}$,壁厚为 6.5 mm,实测母材屈服强度、抗拉强度分别为 183.6、379.5 MPa,断后伸长率为 28.73%。焊丝为 ER5356 焊丝,直径 $\phi 1.6\text{ mm}$ 。母材及焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 母材及焊丝的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of base metal and filler wire (wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	其它	Al
5A06	0.40	0.40	0.10	0.50~0.80	5.8~6.8	0.20	0.02~0.10	0.12	余量
ER5356	0.25	0.40	0.10	0.05~0.20	4.5~5.5	0.10	0.06~0.20	0.25	余量

2 焊接工艺试验

2.1 接头坡口及焊接方法设计

在焊接过程中,打底焊能否焊透且背面成型良好是保证焊接质量的关键。为保证焊接质量同时减少填充金属量,试验设计 Y 形坡口,坡口角度 60° ,钝边 2 mm,零间隙,坡口尺寸及焊接顺序如图 1 所示。

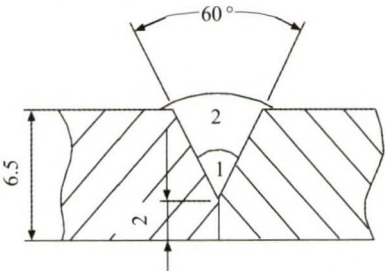


图 1 焊接坡口尺寸及焊接顺序示意图(mm)
Fig.1 Schematic of welding groove dimensions and welding sequence (mm)

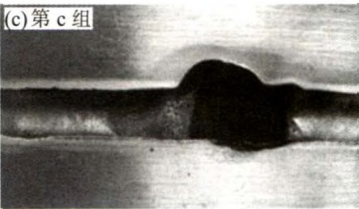
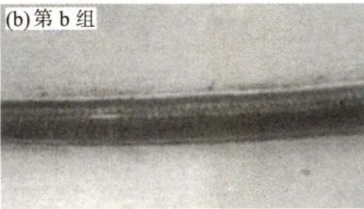
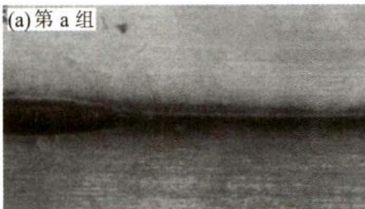


图 2 焊接接头外观形貌
Fig.2 Appearance of welded joints

SA-D30140A 红外测温仪实时监控焊缝熔池温度变化,焊接过程的参数变化如图 3 所示,图中 0s 的位置为焊接起弧点。从图中明显看出,熔池温度和焊接电流均按“W”型趋势变化,每阶段持续时间约 100s。这是由于为了保证焊缝背面的成型良好,焊接过程中对焊接电流进行实时调整,焊接过程中当熔池温度达到 740°C 以上时,若持续采用单一高电流进行焊接时,热输入量较大,由于重力、表面张力及保护气体等的作用,熔池金属不能及时成型而出现

示。第 1 道为打底焊道,第 2 道为盖面焊道,打底焊不进行填丝,实现焊缝背面无衬底成型。由于打底焊接未填丝,焊缝正面焊肉不足,为保证焊缝正面成型,盖面焊需进行填丝。

2.2 焊接工艺试验

焊接前,将预先准备的环材坡口及其附近区域打磨,以去除表面的氧化物,处理至表面露出金属光泽为止,并用丙酮去除待焊区域表面油污。焊前对环材进行预热,预热温度 100°C ,保温时间 3h。采用脉冲 TIG 焊技术进行打底焊,再进行填丝盖面焊,焊接过程中焊枪保持不动,环材以固定转速逆时针旋转,纯氩气进行保护(纯度 $\geq 99.99\%$)。分 3 组参数进行打底焊焊接,以探寻最佳工艺参数,工艺参数见表 2。

表 2 焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

编号		基值 电流 I_B/A	峰值 电流 I_P/A	脉冲 电流幅 值 I_{PP}/A	电弧 电压 U/V	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	气体流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
打 底 焊	a	120	200	80	8	1.9	20
	b	150	220	70	8	1.9	20
	c	160	250	100	8	1.9	20
盖面焊		180	260	105	8	1.9	20

分别对这 3 组焊接参数进行验证,获得的接头外观形貌见图 2。结果显示,第 a 组焊接参数,存在未焊透情况;第 b 组焊接参数,焊缝背面成型良好;第 c 组焊接参数,存在塌陷。经 X 射线探伤检测,不存在未熔合、未焊透、裂纹、气孔、夹杂等缺陷。

以第 b 组焊接参数进行整圈环缝焊接,采用

焊穿现象,因此当熔池温度达到一定数值后,需降低焊接电流,减少热输入量,确保焊缝成型。同时当熔池温度低于 720°C 时,需提高焊接电流,增加热输入量,确保熔池深度满足要求。根据熔池温度与焊接电流的变化趋势,对焊接过程中焊接电流与持续时间精确编程进行控制,确保焊缝熔透、背面成型良好。即熔池温度高于某一温度后减小焊接电流,防止焊缝塌陷;当熔池温度低于某一温度后增加焊接电流。因此,采用焊接电流分区调整的方法,可以保证打底

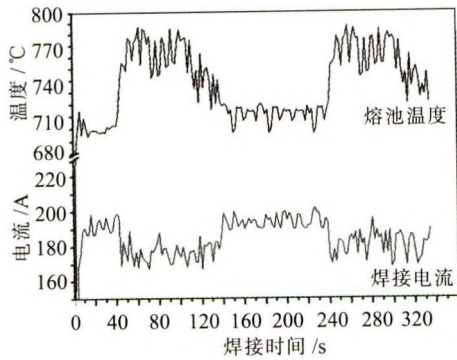


图3 焊接参数变化

Fig.3 Change of welding parameters

焊缝成型良好。但焊接过程中焊接电流高低相差约 30 A, 焊缝熔池温度高低相差约 80 °C。

为进一步研究焊缝性能, 焊接参数稳定后, 从焊缝温度低于 720 °C 的低温区 (取样位置对应的时间位于焊接开始后 140~240 s 内) 和焊缝温度高于 740 °C 的高温区 (取样位置对应的时间位于焊接开始后 240~340 s 内) 进行取样, 对高温区和低温区接头显微组织、力学性能及显微硬度进行分析。

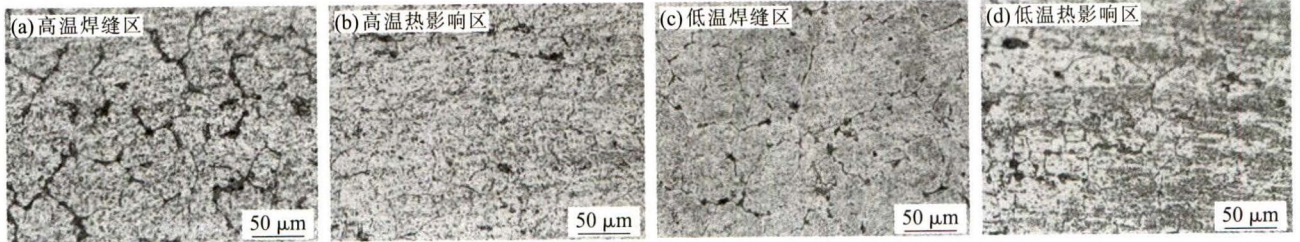


图5 打底焊接头显微组织

Fig.5 Microstructure of bottom welding joint

为柱状树枝晶, 枝晶间和晶界处分布着析出的块状沉淀物, α 固溶体晶界存在复熔现象, β (Mg_2Al_3) 相大部分聚集于晶界处, 呈块状分布^[5-6]。这是由于随着温度升高, β 相逐渐增大, 存在明显的聚集和过烧, 逐步形成复熔球和晶界复熔。同时可以明显看出, 高温区形成的复熔球和晶界复熔现象更为明显。

盖面焊采用同一焊接参数进行焊接, 焊接基值电流 180 A, 峰值电流 260 A, 焊接电流高于打底焊接电流, 热输入更高, 晶界复熔现象更为明显, 盖面焊缝组织如图 6 所示。

在焊缝取样前进行 100% X 射线无损探伤, 焊缝满足航天工业行业标准 QJ2698-95 《铝及铝合金熔焊通用技术要求》I 级标准要求。

3.2 拉伸性能分析

为模拟实测航天某球形压力容器焊缝的力学性能, 对焊接接头不去除焊缝余高, 沿垂直焊缝方向分

3 试验结果及分析

3.1 显微组织分析

沿焊缝横截面从焊缝取样, 经磨制、抛光后, 采用 Keller's 试剂进行腐蚀后, 通过金相显微镜观察金相组织。由于母材未受到焊接热循环的影响, 其组织为原始纤维状轧制态, α 固溶体基体上均匀分布着 β (Mg_2Al_3) 相质点, 块状物主要为 Al_6Mn 与 $Al_6(FeMn)$ 相^[4], 见图 4。打底焊缝区和热影响区的金相组织如图 5 所示, 高温、低温区焊缝和热影响区域组织均

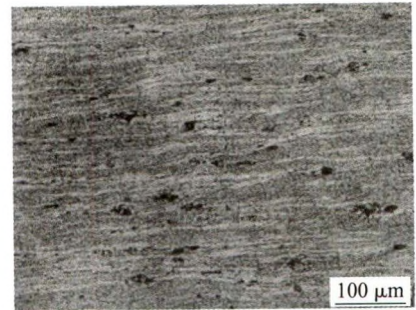


图4 母材显微组织

Fig.4 Microstructure of base metal

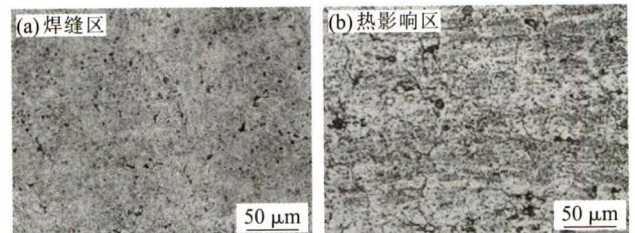


图6 盖面焊焊接接头显微组织

Fig.6 Microstructure of top welding joint

别从高温区和低温区取拉伸试样, 每个区各取 3 个试样, 在 MTS-CMT 5105 万能试验机上进行拉伸试验。焊接接头拉伸试验结果见图 7。高温区和低温区这两个区域的拉伸试样均断于热影响区域, 高温区试样的平均抗拉强度为 373.13 MPa, 平均屈服强度为 151.85 MPa, 平均断后伸长率为 17.98%; 低温区试样的平均抗拉强度为 376.04 MPa, 平均屈服强度为 150.36 MPa, 平均断后伸长率为 18.58%。接头的平均抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 374.59

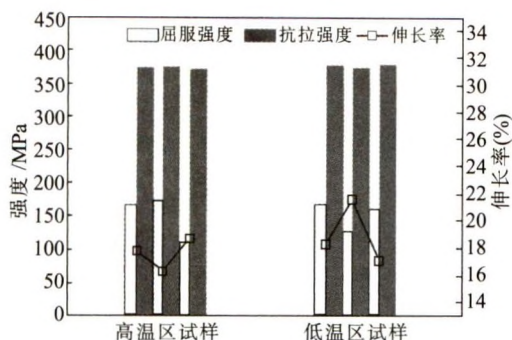


图7 焊接接头拉伸试验结果

Fig.7 Tensile test results of the welded joint

MPa、151.11MPa 和 18.28%，分别达到母材的 98.7%、82.3%和 63.6%。从图中可以看出，低温区的力学性能优于高温区的，这是因为低温区焊接热量输入较小，焊缝组织均匀。

3.3 显微硬度分析

利用 THV-1D 自动转塔显微硬度计进行焊接接头显微硬度测量。焊接接头高温区与低温区的上、中、下三个区域的显微硬度变化如图 8 所示。从图中可以明显看出，焊缝中心填丝区硬度最低；高温区最

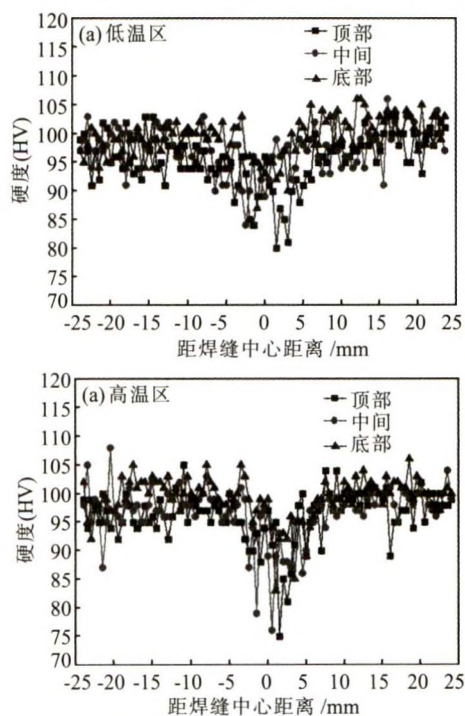


图8 接头显微硬度分布

Fig.8 Microhardness distribution of the welded joint

小硬度为 75HV，低温区最小硬度为 80HV，母材区硬度值最高，约 97HV，焊缝热影响区硬度值介于二者之间，且填丝区硬度小于打底焊区域的。这是由于 ER5356 焊丝合金成分低于 5A06 铝合金母材的，且填丝区域热输入较大导致的。同时，从两个区域曲线对比分析可以看出，高温区由于热输入较大，熔池凝固时间较长，凝固速度较慢，焊接接头硬化倾向下降，故焊缝热输入较大的高温打底区硬度值略低于低温打底区的。

4 结论

(1) 进行了厚度为 6.5mm 的 5A06 铝合金无衬底填丝 TIG 焊接，焊缝背面成型良好，获得了优质的焊接接头。

(2) 通过焊接接头金相组织分析发现，焊缝和热影响区组织均匀一致， $\beta(\text{Mg}_2\text{Al}_3)$ 相大部分聚集于 α 固溶体晶界， α 相存在晶界复熔现象，母材仍保持原始轧制态纤维状组织。焊接接头力学性能优良，平均抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 374.59 MPa、151.11MPa 和 18.28%，达到母材的 98.7%、82.3%和 63.6%。

(3) 焊接接头性能受热输入的影响，热输入较小的低温区焊缝组织更加均匀，力学性能更好，该区域的焊缝和热影响区显微硬度略高。

参考文献:

- [1] 路全彬,龙伟民,钟素娟,等.铝合金焊接材料制备研究现状与发展[J]. 焊接,2016(2):6-9.
- [2] 张红霞,刘晓晴,闫志峰,等. 5A06 铝合金焊接接头裂纹失效分析[J]. 材料工程,2013(3):18-21.
- [3] 中国机械工程学会. 焊接手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001:507-529.
- [4] 杨嘉佳,王克鸿,曹慧,等. 5A06 铝合金厚板双丝 PMIG 焊接接头组织与性能[J]. 焊接学报,2015,36(6):23-26.
- [5] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京:机械工业出版社,1996.
- [6] 陈澄,薛松柏,孙平浩,等. 5083 铝合金 TIG 焊接接头组织与性能分析[J]. 焊接学报,2014,35(1):37-40.

(上接第 55 页)

- [2] 陈汉杰,朱正龙. 真空热压一体式激光拼焊门环轻量化设计[J]. 锻造与冲压,2020(8):31-35.
- [3] 王晓光,宇慧平,陈树君,等. 超高强钢焊点的强度与寿命研

究[J]. 焊接技术,2016,45(11):71-74.

- [4] 白韶军,王超,陈树君,等. 热冲压 22MnB5 硼钢中频电阻点焊接头组织及力学性能研究[J]. 北京工业大学学报,2013,39(5):666-670.