

铝合金变极性等离子弧焊接的工况适应性

徐良^{1,2}, 吕晓春¹, 薛永³, 徐富家¹, 陈晓宇¹

(1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨 150028; 2. 哈尔滨现代焊接技术有限公司, 哈尔滨 150028;

3. 抚顺机械设备制造有限公司, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 以 2A14 和 5A06 两种铝合金为研究对象,进行了铝合金变极性等离子弧焊接的工况适应性研究。结果表明,与 5A06 铝合金相比,2A14 铝合金变极性等离子弧焊接时的工况适应性较强,对间隙、错边等参数的适应范围宽。两种材料的固液相温差、热导率、比热容等热学性能差异是导致工况适应性差异的主要原因。

关键词: 铝合金; 变极性等离子; 工况适应性

中图分类号: TG456.7

0 前言

变极性等离子弧焊 (Variable polarity plasma arc welding, VPPAW) 技术是一种针对铝合金开发的焊接技术。它是利用正极性阶段等离子弧的高能量输入实现焊缝成形,在反极性阶段短时间内可高效清除铝合金表面的氧化膜,同时又能减少钨极的烧损^[1]。由于焊接时形成的穿孔熔池,从根本上改变了焊接熔池的能量传递方式,由传统的导热焊转变为穿孔焊,既有利于焊缝的单面焊双面成形,又有利于熔池中氢的逸出,从而减少气孔缺陷,被称为“零缺陷”的焊接方法^[2]。

国内外专家对铝合金 VPPAW 工艺参数(如焊接电流、焊接速度、起弧穿孔控制等)对焊缝成形的影响、焊接过程各种力对成形的影响等做了较深入的研究^[3-5],但对不同材料焊接工况适应性的系统研究很少,不同材料 VPPAW 的焊接工况适应能力是工程应用面临的重要问题^[6-9]。

2A14 铝合金属于 Al-Cu-Mg-Si 系铝合金,故强度较高、热强性较好、具有良好的可切削性,广泛应用于航空航天制造业。5A06 铝合金属于 Al-Mg 系非热处理强化防锈铝合金,具有较高的强度、塑性、导热率和优良的抗腐蚀性能,用途广泛,大量应用于飞机、船舶、运输等工业。

文中就 2A14 和 5A06 两种铝合金板材 VPPAW 的间隙、错边等工况条件对焊缝成形的影响进行较系统

的对比研究,并分析了其中原因,为工程应用提供基础数据支持。

1 试验方法及材料

1.1 试验设备

变极性等离子弧焊接系统为 VPPAW-300 双逆变型,主要包括双逆变焊接电源、等离子弧焊枪、电动调节机构、送丝机构、弧高控制系统、焊接操作机构等,如图 1 所示。VPPAW-300 变极性等离子弧焊接系统直流直接正接(DCEN)与直流反接(DCEP)的额定电流均为 6~300 A,DCEN 与 DCEP 的时间均为 1~99 ms,正、负半波电流、时间在性能范围内可任意调节。



图 1 VPPAW-300 变极性等离子弧焊接系统

1.2 试验方法

VPPAW 试验采用立(向上)焊模式,如图 2 所示。焊枪水平安置,焊缝垂直放置,焊接方向为自下而上,焊接模式为穿孔型焊接,采用 Ar 气作为离子气源和焊缝保护气。

1.3 试验材料

试验用铝合金为 2A14(H112 态)、5A06(H112 态),

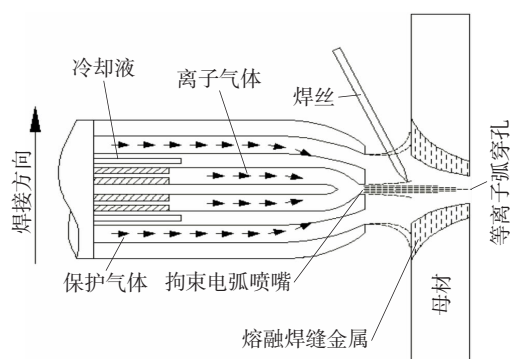


图2 变极性等离子弧穿孔立焊示意图

表1 2A14 板材及 BJ-380A 焊丝、5A06 板材及 ER5183 焊丝的化学成分(质量分数,%)

类别	Si	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Cr	Fe
2A14 板材	0.750	4.19	0.630	0.70	0.034	0.020	—	0.210
BJ-380A 焊丝	5.250	1.83	0.035	<0.001	0.001	0.130	<0.001	0.074
5A06 板材	0.071	0.008 2	6.250	0.61	0.021	0.073	—	0.074
ER5183 焊丝	0.067	0.003 1	4.630	0.75	0.003 2	0.015	—	0.076

2 试验结果及分析

2.1 2A14 材料 VPPAW

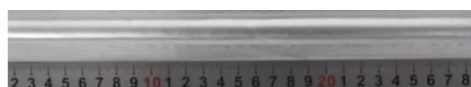
针对 2A14 铝合金材料的焊接,优化后的 VPPAW 焊接工艺参数见表 2。2A14 板材 VPPAW 的焊缝形貌如图 3 所示。采用表 2 所示的焊接工艺参数对

厚度均为 10 mm,两者及其所对应的焊丝成分见表 1。2A14 铝合金属于 Al-Cu-Mg-Si 系铝合金,俗称硬铝,是可热处理强化的铝合金,Cu 与 Mg 是其主要合金元素。BJ-380A 焊丝规格为 $\phi 1.6$ mm,其中的 Si 含量较高,Si 元素的加入能在保证接头强度的同时增强熔池金属的流动性,从而对抑制焊接热裂纹有明显作用。5A06 铝合金属于 Al-Mg 系非热处理强化防锈铝合金,Mg 是其主要合金元素,Al-Mg 合金具有良好的抗腐蚀性能与焊接性。ER5183 焊丝是其配套的焊接材料,规格为 $\phi 1.6$ mm。

2A14 铝合金材料进行焊接,焊接过程稳定,焊缝成形美观,焊缝无气孔、夹杂、未熔合等缺陷,焊缝 X 射线无损检测结果为 I 级。2A14 板材 VPPAW 接头粗晶形貌如图 4 所示,从图中可以看出,焊缝成形规则,焊趾部位过渡圆滑,单道焊接单面焊双面成形效果良好。

表2 2A14 铝合金 VPPAW 焊接工艺参数

DCEN 焊接电流 I_1/A	DCEP 焊接电流 I_2/A	DCEN 时间 t_1/ms	DCEP 时间 t_2/ms	焊接离子气流量 $Q_1/(L \cdot min^{-1})$	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	送丝速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$
260	289	20	4	3.0	150	1.4
钨极内缩量 l/mm	喷嘴距离 s/mm	预热电流 I_3/A	初始气流量 $Q_2/(L \cdot min^{-1})$	收弧气流量 $Q_3/(L \cdot min^{-1})$	焊接保护气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	喷嘴载流量 I/A
4.8	6.0	90	1.2	1.2	15	300



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝背面

图3 2A14 板材 VPPAW 焊缝形貌

对 2A14 铝合金板材的对接坡口分别预留间隙和错边后进行焊接,间隙量 $D = 1.0$ mm、错边量 $H = 1.0$

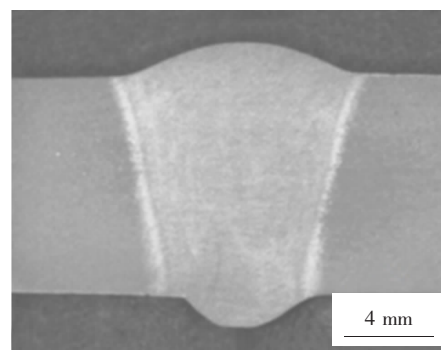


图4 2A14 板材 VPPAW 接头粗晶形貌

mm 和间隙量 $D = 1.5\text{ mm}$ 、错边量 $H = 1.5\text{ mm}$,这两种焊缝成形情况见表 3。

试验结果表明,针对 2A14 铝合金材料 VPPAW,采用优化的固定焊接工艺参数进行焊接,在对接间隙量为 $0 \sim 1.5\text{ mm}$ 、错边量为 $0 \sim 1.5\text{ mm}$ 之间变化时,焊接

过程均较稳定,可满足单道单面焊接双面成形,随着间隙量和错边的增加,焊缝宽度均有所增加,接头正反面均可保持较好焊缝成形,经 X 射线检验均为 I 级焊缝。由此可见,2A14 铝合金材料采用 VPPAW 时,具有较好的间隙、错边适应能力,具有较好的工况适应性。

表 3 2A14 铝合金 VPPAW 焊接不同工况焊缝成形情况

坡口尺寸		焊缝形貌	
间隙量 D/mm	错边量 H/mm	正面	背面
1.0	1.0		
1.5	1.5		

2.2 5A06 材料 VPPAW

针对 5A06 铝合金材料,优化后的 VPPAW 焊接工艺参数见表 4。5A06 板材 VPPAW 的焊缝形貌如图 5 所示。采用表 4 所示的焊接工艺参数对 5A06 铝合金

材料进行焊接,焊接过程稳定,焊缝成形美观,焊缝 X 射线无损检测结果为 I 级。5A06 板材 VPPAW 接头粗晶形貌如图 6 所示,焊缝成形规则,焊缝正反面焊趾部位过渡较圆滑,单面焊双面成形效果良好。

表 4 5A06 铝合金 VPPAW 焊接工艺参数

DCEN 焊接电流 I_1/A	DCEP 焊接电流 I_2/A	DCEN 时间 t_1/ms	DCEP 时间 t_2/ms	焊接离子气流量 $Q_1/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
247	280	20	4	3.3	160	1.4
钨极内缩量 l/mm	喷嘴距离 s/mm	预热电流 I_3/A	初始气流流量 $Q_2/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	收弧气流流量 $Q_3/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	焊接保护气流量 $Q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	喷嘴载流量 I/A
4.8	5.0	80	1.8	1.8	15	300



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝背面

图 5 5A06 板材 VPPAW 焊缝形貌

对 5A06 铝合金板材的对接坡口分别预留间隙和错边后进行焊接,间隙量 $D = 1.0\text{ mm}$ 、错边量 $H = 1.0\text{ mm}$ 和间隙量 $D = 1.5\text{ mm}$ 、错边量 $H = 1.5\text{ mm}$,这两种焊缝成形情况见表 5。

试验结果表明,针对 5A06 铝合金材料 VPPAW,采用优化的固定焊接工艺参数进行焊接,在对接坡口间隙量为 1.0 mm 、错边量为 1.0 mm 时,焊接过程的稳

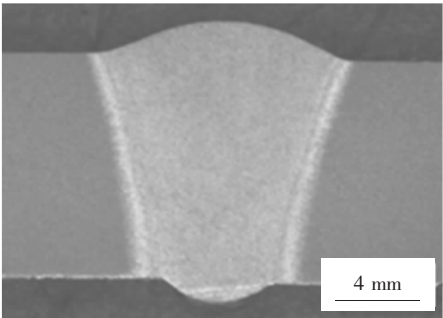


图 6 5A06 板材 VPPAW 接头粗晶形貌

定性变差,焊接过程中等离子弧有所波动,焊缝可实现单面焊双面成形,但焊缝正反面的均匀性变差,经 X 射线检验后,焊缝内部无气孔、夹杂、未熔合等缺陷,判定为 I 级焊缝。在对接坡口间隙量为 1.5 mm 、错边量为 1.5 mm 时,焊接过程中出现失稳,焊缝的正面产生了塌陷,背面呈现间断切割状,无法实现焊缝的成形。

表5 5A06 铝合金 VPPAW 焊接不同工况焊缝成形

坡口尺寸		焊缝形貌	
间隙量 D/mm	错边量 H/mm	正面	背面
1.0	1.0		
1.5	1.5		

2.3 工况适应性分析

通过焊接试验对比 2A14 铝合金与 5A06 铝合金的 VPPAW 工况适应性,可以发现 2A14 铝合金材料的焊接工况适应性较优异,表 6 列举了两种铝合金材料的

热学性能。

从表 6 可以看出,2A14 铝合金固液相温差范围(128 ℃)是 5A06 铝合金(固液相温差范围 40 ℃)的 3 倍,2A14 铝合金的热导率比 5A06 铝合金高出约 36%,2A14

表6 铝合金热学参数表

材料	液相线 $T_1/^\circ\text{C}$	固相线 $T_2/^\circ\text{C}$	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热导率 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
2A14	638	510	840(100 ℃)	160(25 ℃)
5A06	620	580	924(20 ℃)	118(20 ℃)

铝合金的比热容比 5A06 铝合金低约 10%,两者比热容相差不大。

以上数据表明,2A14 材料的固液相温差大,热导率高,比热容与 5A06 接近,说明 2A14 铝合金的抗温度变化能力比 5A06 强,在 VPPAW 时,2A14 铝合金的穿孔时间、焊缝凝固成形时间较充足,对温度的适应范围较 5A06 铝合金宽,抵御间隙、错边等主要工况因素变化引起的熔池波动的能力较 5A06 铝合金强,对间隙、错边等参数的适应性较强。

3 结论

(1)对 2A14 采用 I 形坡口对接 VPPAW,坡口组装间隙量在 0 ~ 1.5 mm,错边量在 0 ~ 1.5 mm 之间变化时,可实现稳定焊接,焊缝正反面均可保持较好成形,焊缝内部质量良好。

(2)对 5A06 采用 I 形对接 VPPAW,坡口组装间隙量在 0 ~ 1.0 mm、错边量在 0 ~ 1.0 mm 之间变化时,可实现焊接成形。

(3)5A06 坡口组装间隙量及错边量超过 1.0 mm 时,VPPAW 焊接过程及焊缝成形稳定性变差。坡口间隙量及错边量达到 1.5 mm 时,焊接过程失稳,焊缝正面塌陷,背面呈现断续切割状,无法实现焊缝成形。

(4)2A14 铝合金 VPPAW 时,穿孔时间、焊缝凝固成形时间较充足,对温度的适应范围比 5A06 铝合金宽,抵御熔池波动的能力较强,对工况适应性比 5A06 铝合金强。

参考文献

- [1] Saad E, Wang H J, Kovacevic R. Classification of molten pool modes in variable polarity plasma arc welding based on acoustic signature [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1-3): 127-136.
- [2] 秦建肖, 昌辉, 黑鹏辉, 等. S30408 等离子焊接接头组织与性能分析[J]. 焊接, 2016(1): 44-47.
- [3] 陈克选, 李鹤岐, 李春旭. 变极性等离子弧焊研究进展[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 124-128.
- [4] 李小宇, 杜兵, 徐良, 等. 2219-T87 铝合金变极性等离子弧焊工艺工程适应性研究[J]. 焊接, 2013(10): 45-47.
- [5] 姜伟, 徐滨士, 吕耀辉, 等. 变极性等离子电弧压力的径向分布[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 17-20.
- [6] 闫德俊, 李海洋, 刘晓莉, 等. 船用 5083 铝合金变极性等离子焊接接头组织和性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(10): 3161-3164.
- [7] 俞逸希, 王继锋. 基于小孔特征图像处理的变极性等离子弧焊接工艺研究[J]. 焊接, 2017(9): 48-51.
- [8] 韩永全, 杜茂华, 陈树君, 等. 铝合金变极性等离子弧穿孔焊过程控制[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 93-96.
- [9] 田志杰, 白景彬, 杜岩峰. 5A06 铝合金薄板 VPPA 焊接工艺研究[J]. 焊接, 2012(11): 52-55.

第一作者简介: 徐良, 1984 年出生, 硕士, 高级工程师; 主要从事激光焊接、激光-电弧复合焊、特种弧焊技术开发方面的研究; 已发表论文 20 余篇。