

2219 铝合金变极性等离子弧穿孔立焊工艺研究

VPPA Keyhole Vertical Welding Process of Al- Alloy 2219

上海航天设备制造总厂 刘 杰 姚君山 郭立杰

[摘要] 通过典型不等厚度 2219 铝合金变极性等离子弧 (VPPA) 穿孔立焊焊接工艺试验, 研究了 VPPA 立焊工艺特性和工艺参数对焊缝成形的影响, 并评定了接头的综合性能, 确定了接头的最佳焊接工艺。试验表明, 采用匹配的工艺参数进行 VPPA 立焊, 可形成稳定穿孔效应和良好成形, 其焊缝无任何气孔、夹杂, 力学性能和接头质量高于 TIG 焊缝。

关键词: 2219 铝合金 变极性等离子弧 穿孔立焊

[ABSTRACT] The technical characteristic and the effect of technical parameters on welding formation and the solidification characteristic of weld are discussed in detail by Al-alloy 2219 with unequal thickness VPPA vertical welding experiments. The comprehensive properties of the joint are assessed and the optimal welding process of the joint is obtained. The test results show that the good matching of VPPA parameters is the key to obtain stable arc keyhole and weld shaping. And its weld has no porosity and inclusion. The outstanding mechanical properties and joint quality exceed the weld quality by traditional TIG.

Keywords: Al-alloy 2219 VPPA Keyhole vertical welding

目前在航空、航天领域逐渐得到应用的 2219 铝合金, 相对于 2A14 铝合金来说, 它的裂纹倾向低, 低温断裂韧性好, 具有更好的综合性能优势。但研究表明, 传统的钨极氩弧焊方法(如方波交流 TIG 等)焊接 2219 铝合金存在明显缺点, 主要表现为: (1) 气孔倾向性很大, 尤其在熔合区, 密集的气孔是影响接头性能的主要缺陷; (2) 接头强度系数低, 小于 0.7。这些缺陷极大地限制了 2219 铝合金在工业领域尤其是在航天领域的应用。

美国 NASA 为解决 2219 铝合金常规熔焊气孔发生率高、效率低下、焊接变形大的问题开发了变极性等离子弧(VPPA)穿孔立焊工艺, 有效解决了上述焊接难题, 这项焊接工艺已经成为美国航天运载工具的

首选焊接方法^[1-2]。

本研究对典型厚度 2219 铝合金试件进行 VPPA 工艺试验, 探讨 2219 铝合金应用此工艺的焊接性, 综合评定接头性能, 并依据某型号构件的需要, 确定了典型不等厚接头的工艺规范。

1 VPPA穿孔立焊工艺试验

根据某型号构件待焊部位的厚度尺寸, 进行典型厚度 2219 铝合金 VPPA 穿孔立焊平板焊接试验研究, 确定最佳工艺容限, 为 VPPA 焊接工艺应用于正式产品做好准备。

1.1 焊前准备

试验材料是厚度为 4mm、7mm 国产 2219-T6 铝合金平板, 焊前对工件进行化学清洗, 试板装配要保持压紧状态均匀一致, 装配间隙小于 0.5mm, 对接坡口阶差小于 0.5mm。铝合金焊丝为进口的焊丝 2319 ($\phi 1.6\text{mm}$); 离子气和保护气均为 99.9% 的氩气。

焊接电源为采用 IGBT 高速功率开关器件的二次逆变技术的 VPPA-400A 转移型变极性等离子弧焊电源, 额定电流 350A。

由于试板厚度不等, 装配时正面存在阶差, 影响等离子弧的正常起弧、成孔和小孔熔池的稳态发展, 在焊接过程中还容易导致切割等缺陷, 因此在 7mm 平板坡口处加工一个过渡段来满足实际的焊接需要, 接头形式及焊枪位置如图 1 所示。

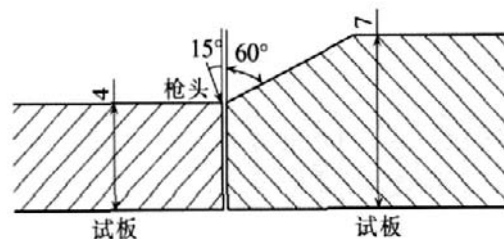


图 1 接头形式及焊枪位置

Fig.1 Shape of prepared joint and torch position

1.2 试验过程

焊接时采用立向上焊工艺, 如图 2 所示。



图2 VPPA 立焊工艺系统
Fig.2 VPPA vertical welding system

熔化金属在重力作用下向下流动结晶成形,本焊接试验要求保证在建立稳定的穿孔熔池的前提下进行,因此采用直流预热后进入直流电流缓升程序来建立穿孔熔池。穿孔建立后,电流转换为变极性电流,步进电机启动,焊枪行走,进入正常焊接阶段。在焊接收弧阶段,采用正、反极性电流同步衰减的方式进入收弧程序。

由于焊接电源采用了基于 IGBT 高速功率开关器件的二次逆变技术,从根本上解决了 VPPA 焊接过程中电弧过零引燃的问题。维弧只在焊接开始时起到引燃主弧形成转移型变极性等离子弧的作用,进入主焊接过程后关闭维弧,因此,在焊接过程中维弧不存在。这就从根本上消除了维弧对焊接转移弧的干扰,保证了 VPPA 工艺的稳定性^[3]。

试验中,正、反极性的时间比为 19ms 4ms,焊接平均电流按下式计算:

$$I_m = \sqrt{\frac{I_+^2 \cdot 19 + I_-^2 \cdot 4}{23}}$$

焊接完成后,对接头表面成形、内部质量以及力学性能进行检测。

2 试验结果与讨论

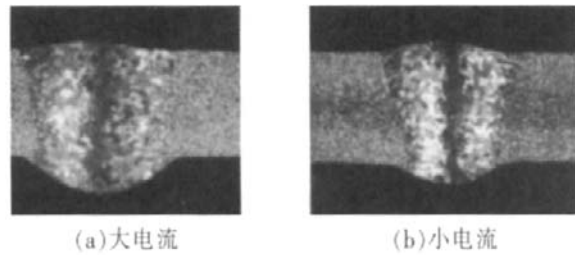
经过反复试验,最终确定 2219 铝合金 7mm-4mm 不等厚平板 VPPA 穿孔立焊最佳工艺参数,同时研究了工艺参数对焊缝成形的影响规律。

2.1 工艺参数对焊缝成形的影响

2.1.1 焊接电流对焊缝成形的影响

保持其他参数不变,分别选取高于最佳焊接电流和低于最佳焊接电流的电流值进行焊接试验。焊缝的

截面形状如图 3 所示,焊缝的几何形状特征参数如表 1 所示。



(a)大电流 (b)小电流
图3 焊接电流对焊缝成形的影响(x4.5)

Fig.3 Effect of welding current on weld shaping (x4.5)

表 1 焊缝的几何形状特征参数

焊接电流 I/A	增高量/mm		宽度/mm	
	正面	背面	正面	背面
大电流	0.48	1.90	8.5	8.0
小电流	0.75	1.15	7.85	6.2

由图 3 可以看出,电流大,焊缝正反面宽度大,正面焊缝增高量小,背面焊缝增高量大;电流小,焊缝正反面宽度小,焊缝正面增高量大,背面增高量小。这是因为电流大,电弧的热功率及电弧吹力均增大,从而导致熔宽及熔池体积增大,在较大的电弧吹力作用下,液态金属被吹到背面的较多。

试验表明,焊接程序转入到正常变极性焊接阶段,当正极性电流较小时,会出现两种现象:(1)出现焊缝正面余高很高,焊缝背面余高很低的现象;(2)焊接过程不能够产生连续的小孔,导致出现切割或焊不穿的现象。当反极性电流较小时,焊缝宽度变窄,并且不能形成连续穿孔;反极性电流较大,焊缝宽度较宽,熔池向背面塌陷。

2.1.2 离子气流量对焊缝成形的影响

在保持其余参数不变的条件下,分别选取高于和低于最佳离子气流量的流量值进行施焊,其结果见表 2。

由上面的试验结果可以看出,离子气流量较大

表 2 焊缝的几何形状特征尺寸

离子气流量/ (L·min ⁻¹)	增高量/mm		宽度/mm	
	正面	背面	正面	背面
高离子气流量	1.05	1.32	7.92	5.92
低离子气流量	0.93	1.42	8.06	6.02

时,焊缝正反面宽度较小,离子气流量较小时,焊缝正反面宽度较大。这是因为离子气流量大,电弧挺度大,能量也较为集中;而离子气流量小时,电弧挺度低,电弧易发生波动,导致电弧电压的波动,使得电弧功率有所增加,因而焊缝宽度有所增加。离子气流量的变化对焊缝正反面增高量的影响不大,对焊缝成形的影

响也不大。

2.1.3 焊接速度对焊缝成形的影响

保持其余参数不变,分别选取3个依次增大的焊接速度 v_1 、 v_2 、 v_3 施焊(即 $v_1 < v_2 < v_3$),焊缝截面形状如图4所示,焊缝的几何形状特征尺寸如表3所示。

由图4可以看出,随着焊接速度的增加,焊缝正

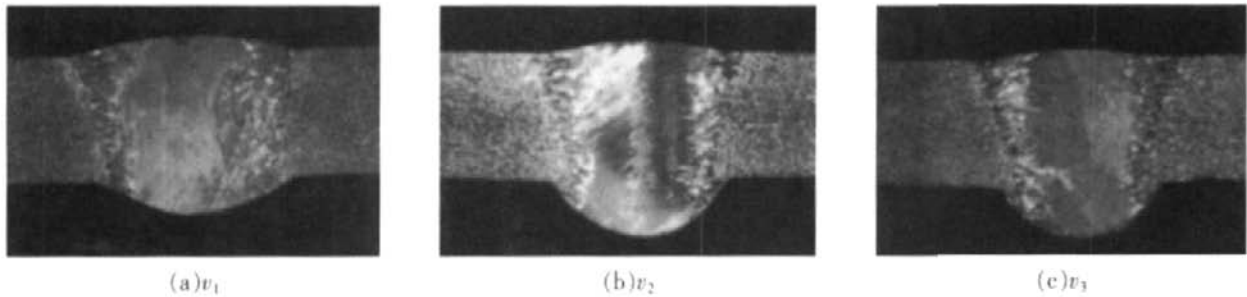


图4 焊接速度对焊缝成形影响(x4.5)

Fig.4 Effect of welding speed on weld shaping (x4.5)

表3 焊缝的几何形状特征尺寸

焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	增高量/mm		宽度/mm	
	正面	背面	正面	背面
v_1	0.82	1.58	9.28	7.12
v_2	0.67	2.16	8.02	6.76
v_3	0.60	2.52	7.74	5.43

反面宽度降低,焊缝正面增高量降低(变化不大),背面焊缝增高明显。这是因为焊接速度的变化对电弧力没有影响,随着焊接速度的增加,焊接线能量降低,穿孔直径减少,焊缝变窄,电弧后拖,熔化的焊丝则集中在较小的焊缝宽度上,在电弧吹力的作用下,熔化金属大部分被吹到焊缝的背面,使焊缝背面高度显著增加。

2.1.4 起弧过程研究

等离子弧立焊起弧过程是形成稳定穿孔和成形的前提,它直接影响到立焊过程能否顺利进行。根据VPPA穿孔立焊原理,要使穿孔熔池动态稳定存在,穿孔下部收缩闭合时所需的液态金属必须得到及时补充,影响起弧过程的因素有以下几个:

(1) 离子气起弧方式。

采取离子气流递增方式起弧,不仅可以延长工件的熔透时间,使工件充分预热,而且使起弧熔池周围的温度场形成较小的温度梯度,降低散热速度。这样,在穿孔熔池形成后既可以使熔池具有足够的液态金属,又可以使液态金属不至于散热过大而导致流动能

力降低,从而形成稳定的穿孔熔池。

(2) 预热时间。

预热时间太短,会造成起始穿孔电流上升阶段完成后仍然不能形成初始穿孔,产生焊接起始阶段切割现象,其根本原因是两块试板在短时间内难以达到温度均匀;预热时间太长,会使工件在进入正常变极性程序之前产生穿孔,使得穿孔熔池尺寸较大,造成小孔在焊接过程中不能闭合而发生切割现象,即使小孔在后续焊接阶段闭合,也会使焊接初始阶段熔池较宽,造成背面焊瘤很大。

(3) 预热电流。

当预热电流太小时会产生两种现象:第一,进入穿孔阶段后不能形成焊接熔池或焊接熔池比较小,不能够形成穿孔,焊接初始阶段没有小孔效应,仅仅成为非穿孔型熔入焊接;第二,在穿孔阶段形成小孔,但是由于预热电流小,造成熔池温度低及两测试板温度不均匀,焊缝正反面形成皱褶,这主要是由于热量不够,流动性不好所致。如果预热电流太大,会造成在预热阶段焊接熔池尺寸较大,在进入到正常变极性焊接程序前形成较大的穿孔,以至于在正常焊接过程中熔池不能够闭合,初始焊接阶段形成切割现象。

(4) 电流上升时间。

当预热电流和正极性电流确定后,形成稳定穿孔的主要影响因素就是电流上升时间。

当上升时间偏小时,电流上升迅速,电弧的穿透能力也增长迅速,造成焊接熔池向外翻,即使焊接过

程可以顺利过渡到正常焊接阶段,由于电流上升时间短,在变极性阶段开始时不能形成穿孔,会造成切割现象的产生,或者焊接一段距离后才转入到正常穿孔焊接阶段。当上升时间偏大时,电流上升缓慢,电弧的穿透能力增长缓慢,而由于对焊接熔池加热的时间比较长,熔池比较大,使熔池向焊缝背面凹陷,焊缝起始阶段背面焊瘤很大,如果小孔形成后送丝不能快速跟上,熔池向两侧流动,造成切割。

2.2 接头性能综合判定

2.2.1 接头质量

在优化的焊接参数下,焊缝的外观如图5所示,整条焊缝均匀、美观,优于采用TIG焊的外观质量。

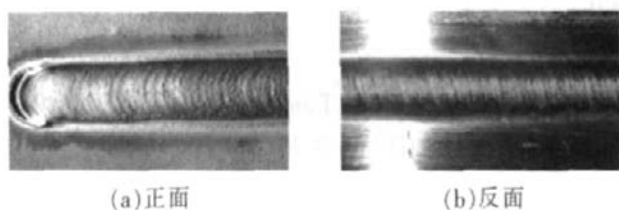


图5 2219铝合金VPPA对接焊缝外观($\times 4.5$)

Fig.5 Appearance of VPPA butt weld of Al-alloy 2219 ($\times 4.5$)

焊后经射线检验内部质量,彻底排除气孔缺陷,并且无熔化型焊接常出现的气孔、钨夹杂、未焊透、裂纹等缺陷,焊缝冶金质量优于TIG焊。

2.2.2 力学性能

在优化工艺下完成的2219铝合金VPPA接头的常温力学性能如表4所列。2219铝合金VPPA接头强度系数达到0.7(高于TIG焊的0.6),接头延伸率为4.67左右。从表4中可看出,几组接头的抗拉强度和延伸率数据波动较小,表明VPPA穿孔立焊的工艺过程稳定,接头质量一致性好。

2.2.3 显微组织

对VPPA焊缝进行纵向和横向剖切,制备金相试样,考察其焊缝结晶特点,接头宏观形貌和焊缝显微组织如图6所示。由图可知,焊缝区为无明显结晶方向的细小铸造组织,从冶金组织的角度保证了接头性能的一致性。

3 结论

(1) 试验验证了采用VPPA穿孔立焊实现2219铝合金焊接工艺的可行性和优越性。

(2) 与钨极氩弧焊相比,VPPA焊接工艺具有去除

表4 2219合金VPPA接头力学性能

试件号	抗拉强度 σ_b /MPa	延伸率 δ_5 /%
1	305.0	4.5
2	291.0	4.0
3	295.0	4.5
4	285.0	4.5
5	305.0	4.5
6	295.0	5.0
7	289.0	5.0
8	296.0	5.0
9	305.0	5.0
10	302.0	4.5
11	295.0	4.5
12	300.0	5.0
平均值	296.9	4.67
接头强度系数	0.68~0.72	

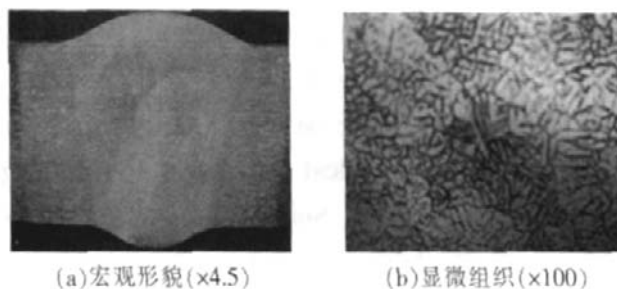


图6 2219铝合金接头宏观形貌和焊缝组织

Fig.6 Macro appearance of VPPA welding joint and metallurgical structure of weld of Al-alloy 2219

焊缝气孔能力强、一次焊透、焊缝成形美观,生产效率高、力学性能好、接头质量一致性好等优点。

(3) VPPA工艺参数的良好匹配是获得稳定穿孔和焊缝成形的关键,其中起弧阶段、焊接电流、离子气流量、焊接速度等参数是主要影响因素。

参 考 文 献

- [1] Tomsic M, Barhorst S. Keyhole plasma arc welding of aluminum with variable polarity power. *Welding Journal*, 1984, 63(2): 25-32.
- [2] Nunes A C, Bayless E O. Variable polarity plasma arc welding in space external tank. *Welding Journal*, 1984, 63(9): 27-35.
- [3] 吕耀辉,陈树君,殷树言. 铝合金变极性等离子弧焊接电源的研制. *航天制造技术*, 2003(1): 3-5. (责编 钟元)