

## 工艺参数对铝镁合金 VPPA 焊焊缝成形的影响

曹磊<sup>1</sup>, 张亮<sup>1,2</sup>, 蒋凡<sup>3</sup>

(1.河北省材料近净成形技术重点实验室,河北石家庄 050018;2.河北科技大学材料科学与工程学院,河北石家庄 050018;3.汽车结构部件先进制造技术教育部工程研究中心,北京 100859)

**摘要:**为了探明变极性等离子电弧焊方法对 5A06 铝合金焊缝成形的影响规律,采用单因素控制对比试验对变极性等离子弧焊缝成形进行了测量分析,研究正负极性电流、离子气流量、正负极电流持续时间和送丝速度 4 个焊接工艺参数对焊缝成形的影响规律。研究表明,随着焊接电流的增大,焊缝正面熔宽和余高呈现先增加后减小的趋势,而背面焊缝的余高增大明显,但背面焊缝熔宽变化不是很明显;随着离子气体流量的增加,等离子电弧力增加,液态金属流动性增加,背面焊缝余高呈明显的增加趋势,而焊缝正面余高则呈下降的趋势;在负极性电流持续时间增加的情况下,焊缝正面余高和熔宽增加幅度较小,焊缝背面余高和熔宽呈减小的趋势;随着送丝速度的增加,焊缝余高显著增加,熔宽也小幅度增加。研究结果可为铝合金 VPPA 焊提供工艺支持。

**关键词:**焊接工艺与设备;变极性等离子弧焊;焊缝成形;工艺参数;铝镁合金

**中图分类号:**TG456.2 **文献标志码:**A

## Influence of welding parameters on weld forming appearance in VPPA welding of Al-Mg alloy

CAO Lei<sup>1</sup>, ZHANG Liang<sup>1,2</sup>, JIANG Fan<sup>3</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing Technology for Automotive Components, Ministry of Education, Beijing 100859, China)

**Abstract:** In order to reveal the influence of VPPAW on the weld appearance of 5A06 aluminum alloy, the weld appearance is measured and analyzed by single factor control comparison test. Four parameters including positive and negative current, plasma gas flow, positive and negative current duration and wire feed speed are tested and analyzed for their influence on the weld forming. The experiment results show that with the increase of welding current, the reinforcement and width of top weld increases first and then decreases, while the reinforcement of back weld increases dramatically, but the changes of back weld width are not obvious; as the plasma gas flow rate increases, the plasma arc force and the fluidity of weld metal both increase, the reinforcement of back weld increases obviously, while that of top weld decreases; in the case of increasing the duration of the negative current, the reinforcement and width of top weld increase slightly, and the reinforcement and width of back weld

收稿日期:2019-03-21;修回日期:2019-04-22;责任编辑:陈书欣

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51575012);河北科技大学五大平台开放基金

第一作者简介:曹磊(1969—),男,河北无极人,高级工程师,主要从事电弧焊工艺、焊接设备和搅拌摩擦焊等方面的研究。

通信作者:张亮博士。E-mail:hebustzhangliang@163.com

曹磊,张亮,蒋凡.工艺参数对铝镁合金 VPPA 焊焊缝成形的影响[J].河北科技大学学报,2019,40(3):265-272.

CAO Lei,ZHANG Liang,JIANG Fan.Influence of welding parameters on weld forming appearance in VPPA welding of Al-Mg alloy[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2019,40(3):265-272.

decrease; as the wire feed speed increases, the reinforcement of weld increases dramatically and the width of weld increases slightly. The research results may provide some welding process support for VPPA welding of aluminum alloys.

**Keywords:** welding process and equipment; variable polarity plasma arc welding process(VPPAW); weld appearance; welding parameters; Al-Mg alloy

随着工业制造的快速发展,低密度、高强度的金属材料得到越来越多的应用,铝及其合金由于具有高的比强度、比模量、断裂韧度、疲劳强度和耐腐蚀稳定性以及导电导热性能好等优点,已经成为航空航天、化学工业、交通运输、机械制造等工业重要的结构材料<sup>[1-4]</sup>。

焊接是铝合金零部件生产的重要加工制造方法之一,由于铝合金热胀系数大、热导性好、易氧化等特性,传统熔化焊接接头存在气孔、夹杂、裂纹等缺陷,容易造成产品失效。因此,提高铝合金焊接生产率和焊接质量、减少焊接缺陷的高效焊接方法已成为实际生产的迫切需求<sup>[5-6]</sup>。

变极性等离子弧(variable polarity plasma arc,VPPA)焊是美国 NASA 针对铝合金焊接气孔倾向大的问题推出的新型焊接方法,电弧具有能量密度高、挺度大、穿透深度大等特点,在保证铝合金阴极清理作用的基础上可获得熔深大、无气孔的焊缝,被称为“零缺陷”焊接方法<sup>[7-10]</sup>。1978年美国马歇尔宇航中心的航天飞机外置贮箱生产中采用了大功率变极性等离子弧焊系统<sup>[11]</sup>。VPPA 焊作为一种极具发展前景的焊接铝合金方法,国内外学者进行了大量研究,北京工业大学吕耀辉等<sup>[12]</sup>和韩永全等<sup>[13]</sup>在 2003 年研制出中国第一台实用化的 VPPA 焊接电源,并成功应用于铝合金焊接。韩永全等<sup>[14-15]</sup>从铝合金变极性等离子焊接电弧物理特性出发,研究了铝合金变极性等离子焊接电弧产热机理,分析了焊接参数对电弧热的影响规律。SHINO-DA 等<sup>[16]</sup>使用大电流等离子弧焊接设备,对 10 mm 厚 A5052 铝合金进行立焊工艺研究。

变极性等离子弧焊采用不对称方波交流等离子电弧,如图 1 所示,负极性状态下的电弧具有阴极清理作用,清理铝合金表面氧化膜,但钨极受热量大,烧损严重,采用大的负极性电流、短的负极性持续时间有利于减小钨极烧损。铝合金焊接采用立向上的焊接工艺,电弧在工件上形成匙孔,熔池热量熔化焊丝形成焊缝。在铝合金焊接工艺中,VPPA 焊电弧可调参数众多,参数对焊接电弧和焊接质量产生重要影响<sup>[17-18]</sup>。本文试验研究分析焊接电流、离子气流量、正负极电流持续时间和送丝速度 4 个工艺参数变化对焊缝成形的影响规律,实现焊接工艺参数对焊缝成形的控制。

## 1 试验方法

### 1.1 试验设备及材料

试验采用北京工业大学 VPPA-300 变极性等离子弧焊接系统,焊枪采用飞马特 Thermacut PWM-300 型等离子焊枪,焊接方式为立向上焊(焊枪向上移动),如图 2 所示。材料选择尺寸为  $50 \times 400 \times 3.5$  mm 的 5A06 铝镁合金平板,焊缝形式为对接,其主要化学成分(GB/T 3190—1996)如表 1 所示。为了保证焊缝成形,选用直径 1.6 mm 的 ER5183 焊丝,焊丝在熔池上方恒速送进。

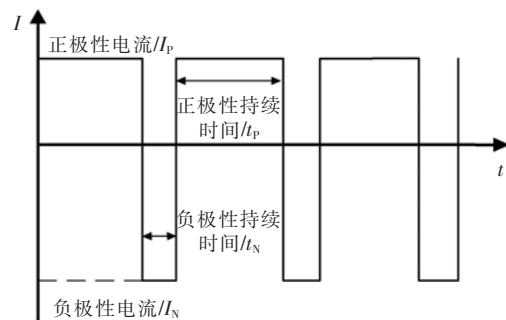


图 1 变极性等离子弧焊电流波形图

Fig.1 Current waveform of VPPAW



图 2 VPPA 焊接电源

Fig.2 VPPA welding power source

表 1 5A06 铝镁合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition content of 5A06 Al-Mg alloy

$w(\text{Si})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Mg})$	$w(\text{Zn})$	$w(\text{Be})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{Al})$	其他
0.40	0.40	0.10	0.50~0.80	5.8~6.8	0.20	0.001~0.005	0.02~0.10	余量	0.10

## 1.2 焊接工艺参数

焊缝的表面成形表征了焊缝的成形状态,反映了焊接过程的稳定性,并且对焊接质量产生重要影响。焊接工艺参数影响了电弧状态,改变了焊接过程的稳定性、熔池金属的流动性,并影响焊缝成形。在变极性等离子弧焊接过程中,可调焊接参数众多,采用单因素控制对比试验进行分析,各个焊接参数均独立调整,试验研究正负极性电流、离子气流量、正负极电流持续时间和送丝速度4个参数对焊缝成形的影响规律,试验焊接参数如表2所示。为了减小其他参数对焊缝成形的影响,焊接速度和焊枪喷嘴到工件距离分别控制在0.13 m/min和5 mm,等离子焊枪的钨极内缩量 and 喷嘴孔径都选取3.5 mm。

表2 试验工艺参数表

Tab.2 Table of weld processing parameters

组别	正极性电流/A	负极性电流/A	离子气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	正负极电流持续时间	送丝速度/(m·min <sup>-1</sup> )
I	85	115	2.7	21:4	1.2
	90	120			
	95	125			
	100	130			
II	100	130	2.2	21:4	1.2
			2.5		
			2.7		
			2.9		
III	100	130	2.7	15:2	1.2
				15:4	
				17:4	
				21:4	
IV	100	130	2.7	21:4	1.0
					1.2
					1.4
					1.6

## 2 变极性等离子弧焊缝成形

变极性等离子弧焊接不同于传统弧焊,在铝合金焊接过程中,采用穿孔立向上的焊接工艺,焊接工件处于垂直状态,焊枪向上(或工件向下)运动,如图2所示,变极性等离子电弧在高拘束状态下,利用强大的电弧力在铝合金工件上形成匙孔,匙孔稳定后焊接开始,焊枪向上(或工件向下)运动时,等离子电弧会将匙孔上方的金属熔化,同时焊丝送入熔池并在熔池热作用下熔化,焊丝和匙孔上部的母材熔化并在重力作用下沿着匙孔壁向下方流动,熔化的金属在流动过程中受到等离子电弧力作用流向匙孔内部,随着焊接进行,工件相对等离子电弧向下运动,匙孔位置上移<sup>[19-20]</sup>,如图3所示。

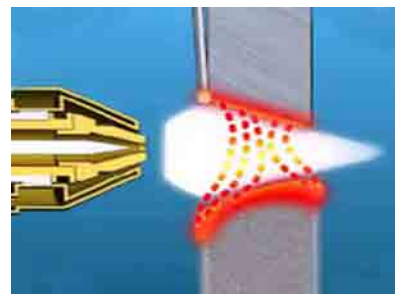


图3 VPPA熔池示意图

Fig.3 Schematic diagram of VPPA weld pool

## 3 结果与讨论

### 3.1 焊接电流对焊缝成形的影响

在变极性等离子弧焊接过程中焊接电流影响焊缝热输入量,对焊缝成形有着最直接的影响,因此不对称方波交流等离子电弧的焊接电流选取尤为关键,电流存在正极性和负极性2个阶段,正极性电弧的电流不仅要直接加热工件,产生足够热量来形成熔池,而且正极性电弧力集中作用在熔池上,形成匙孔,而负极性状态下,电弧的作用主要是清除工件表面氧化膜,因此电弧形态呈发散状态,电弧力减弱。为了保证匙孔的稳定

性,试验中设置的负极性电弧电流要大于正极性电弧电流,焊接电流参数见表2中的试验I组。

试验过程中,当焊接电流较小时,电弧能量和电弧力不足,难以保证熔池和匙孔的热力平衡,造成匙孔稳定性下降,甚至难以产生穿孔。当焊接电流过大时,熔池和匙孔直径增加,在等离子电弧力作用下,熔化的金属被推向熔池背面,造成焊缝宽度增加,背面余高过高,甚至出现咬边缺陷。在调整正极性焊接电流和负极性焊接电流参数时,焊接的焊缝正面和背面的成形如图4所示,在焊缝的起始点,等离子电弧建立后,焊接电流并没有急速上升,而是以缓慢速率上升,此时工件温度较低,熔池还没有达到热平衡状态,电弧热力不足以形成匙孔,在这种情况下容易造成焊缝表面和背面成形不良。当等离子电弧实现穿孔并在匙孔稳定后,等离子弧焊枪以焊接速度运动,焊丝填充,随着焊接电流的增加,焊缝正面熔宽和背面余高均呈增大的趋势。

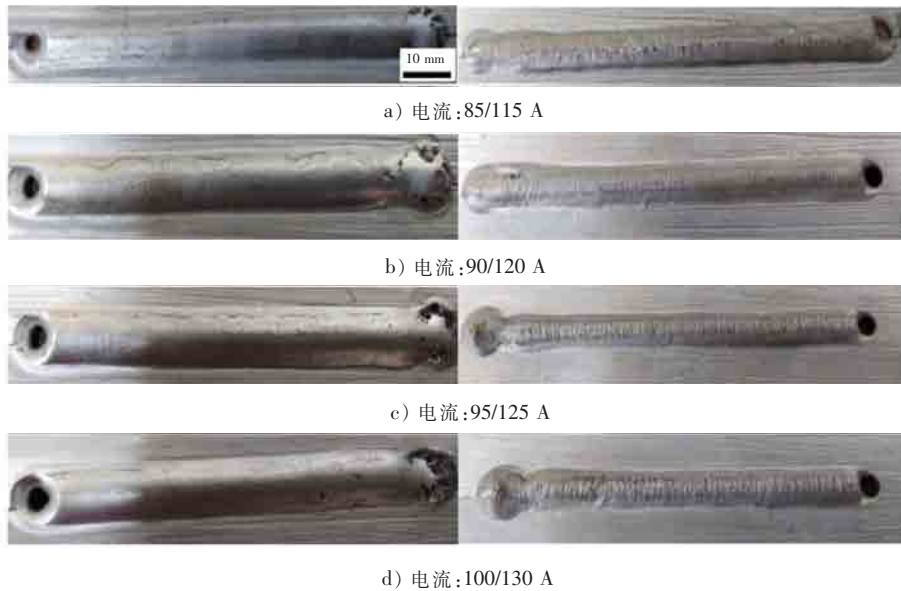


图4 焊接电流对焊缝成形的影响

Fig.4 Appearance of weld in different currents

图5为焊缝正面和焊缝背面尺寸测量数据图,从图5中发现,随着焊接电流的增大,焊缝正面熔宽和余高呈现先增大后减小的趋势,背面焊缝的余高增大明显,但背面焊缝熔宽变化相对不是很明显,主要原因是随着焊接电流增大,电弧对焊缝的热输入量随之增大,伴随着等离子电弧力增加,熔池表面的温度梯度和表面张力开始减小,液态金属流动性增加。当电流增加至100/130 A时,电弧进一步压缩,加大了液态金属向焊缝背面的流动,造成焊缝正面熔宽、背面熔宽和正面余高均减小,而背面余高显著增加。

### 3.2 离子气流量对焊缝成形的影响

变极性等离子弧焊的离子气在焊接过程中主要是提高电弧的热压缩效果,在等离子焊枪内部,少部分气体电离,未电离部分气体介于水冷喷嘴和等离子弧中间,气体吸收电弧热量并从焊枪内部高速逸出,根据最小电压原理,离子气流量增加,迫使电弧带电离子向导电性更好的弧柱中心集中,电弧的弧柱在热压缩作用下进一步收缩,电弧挺度增加,进而增加电弧力。为了验证焊接工艺参数中离子气流量对变极性等离子弧焊缝成形的影响,试验参数见表2中的试验II组。

图6为不同离子气流量下的焊缝外观形貌,从图6中可以看出,当离子气体的流量增加时,气体射流压力上升,背面焊缝成形得到改善,焊缝形貌更加均匀和细腻。随着离子气体流量的增加,匙孔形成更加稳定,等离子电弧力增加,对匙孔的冲刷力增加,造成液态金属向焊缝背面流动性能增加,因而背面焊缝余高呈明显的增加趋势,而焊缝正面余高则呈下降的趋势,其分析结果如图7所示。随着离子气体流量的增加,气体

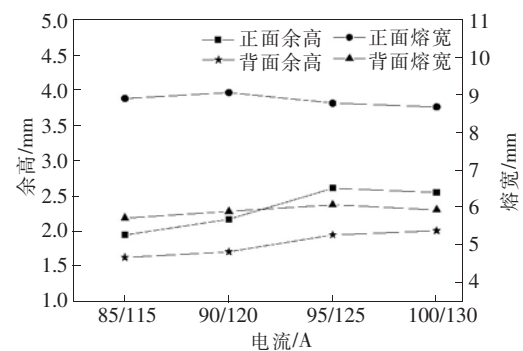


图5 焊接电流对焊缝余高、熔宽的影响

Fig.5 Effect on reinforcement and width by welding current



图 6 离子气流量对焊缝外观形貌的影响

Fig.6 Appearance of weld in different plasma gas flow rates

对电弧压缩效果更加明显,使得等离子电弧直径减小,因而导致焊缝加热宽度相应减小,所以焊缝正面熔宽随着离子气流量增加而呈减小的趋势,但焊缝背面熔宽受到熔池金属流动增加和电弧直径减小双重因素的影响,变化趋势较复杂,离子气流量从 2.2 L/min 增加到 2.9 L/min 后,熔池金属流动增加趋势大于焊缝加热宽度减小趋势,造成焊缝背面熔宽增加,而离子气流量继续增加,等离子电弧热压缩效果增加,使得电弧收缩,焊缝背面熔宽减小,而焊缝正面熔宽随着离子气流量增加,在电弧热压缩效果增加的情况下造成电弧收缩程度增加,使得焊缝正面熔宽呈减小趋势。但如果离子气流量过大,则会产生过大的电弧力,焊接熔池稳定性差,导致直接切割母材,难以形成焊缝,产生切割焊穿的现象。

### 3.3 正负极电流持续时间对焊缝成形的影响

铝合金表面氧化膜易使焊缝产生夹杂缺陷,为了更好地实现铝合金表面氧化膜的破碎,降低氧化膜对焊缝的影响,变极性等离子弧焊接工艺的电流波形采用不对称交流方波形式,而正极性和负极性焊接的电流持续时间会对焊缝产热和焊缝成形产生影响,正极性时,铝合金工件接电源的正极,等离子焊枪接电源的负极,等离子焊枪的钨极发射电子的同时,带走钨极热量,对钨极产生冷却作用,正极性电弧稳定,焊缝成形良好;负极性时,等离子焊枪接电源的正极,铝合金工件接电源的负极,电弧的“阴极雾化”效果显著,氧化膜得以去除,钨极接收大量电子后温度变高,易造成钨极烧损,负极性电弧分散,焊缝加热不集中,易造成焊缝成形差。为了验证变极性等离子弧焊接工艺参数中正负极性电流持续时间对焊缝成形的影响,试验参数见表 2 中的试验 III 组,焊缝成形如图 8 所示。

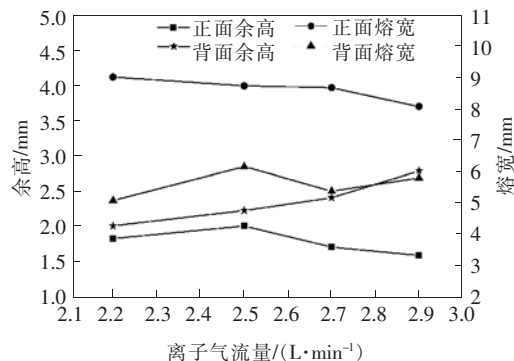


图 7 离子气流量对焊缝余高、熔宽的影响

Fig.7 Effect on reinforcement and width by plasma gas flow rate



图8 正负极电流持续时间对缝外观形貌的影响

Fig.8 Appearance of weld in different duration of positive and negative polarity

正负极电流持续时间对焊缝成形产生影响,焊缝余高和熔宽测量结果如图8所示。在正负极电流持续时间由15:2变为15:4后,焊缝正面余高和熔宽增加幅度较小,焊缝背面余高和熔宽减小幅度较大,因为负极性电弧的持续时间增加后,电弧的“阴极雾化”作用时间增加。等离子电弧在寻找氧化膜过程中,电弧呈跳动状态,电弧加热分散,因而导致焊缝正面熔宽略有增加,而负极性电弧所占比例增加后,电弧正极性状态下的电弧对焊缝匙孔作用时间比例降低,导致焊缝正面余高小幅增加,而焊缝背面成形受正极性电弧穿孔时间比例降低的影响,匙孔发生变化,并对焊缝背面金属流动产生影响,导致焊缝背面余高和熔宽下降幅度较焊缝

正面成形变化幅度大,随着正负极电流持续时间增加,焊缝正面余高呈增加趋势。当正负极电流持续时间变化至21:4后,焊缝正面余高呈下降变化,而背面熔宽呈增加变化状态,由于正极性电弧持续时间增加,导致焊缝正面熔宽增加,而在电弧力作用下,熔池增大,导致背面熔宽增加,而此时焊缝背面余高增加不明显,焊缝正面和背面成形发生变化如图9所示。

### 3.4 送丝速度对焊缝成形的影响

变极性等离子弧焊中焊丝是通过吸收熔池热量而熔化的,焊丝的熔入实现了焊缝中金属的填充,在试验中对比分析了不同的焊丝送进速度对焊缝成形的影响,其结果如图10和图11所示,随着送丝速度的增加,相同焊接时间内焊缝中填充金属量增加,使熔池内液态金属总量增加,导致焊缝成形后焊缝正面余高显著增加,熔宽也小幅度增加;随着熔池中液态金属的增加,在等离子电弧力作用下,焊缝背面流动的金属相应增加,导致焊缝背面余高和熔宽也随之增加。

## 4 结论

对变极性等离子电弧5A06铝合金焊缝成形的规律进行了试验研究,采用单因素控制对比试验对VPPA焊缝成形进行了测量分析,得出以下结论。

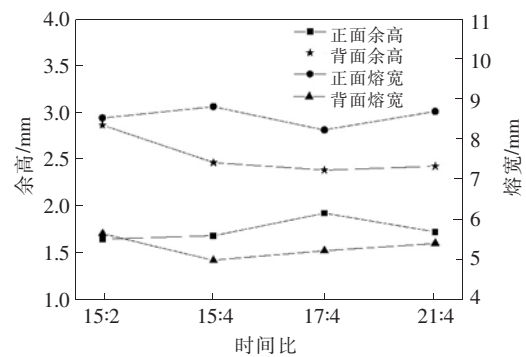


图9 正负极电流持续时间对焊缝余高、熔宽的影响  
Fig.9 Effect on reinforcement and width by welding current duration ratio of positive and negative polarity



图 10 送丝速度对焊缝外观形貌的影响

Fig.10 Appearance of weld in different wire feed speed

1)通过对正面焊缝和背面焊缝的余高和熔宽测量分析,试验结果表明随着焊接电流的增大,焊缝正面熔宽和余高呈现先增加后减小的趋势,而背面焊缝的余高增大明显。

2)随着离子气体流量的增加,等离子电弧力增加,液态金属流动性增加,背面焊缝余高呈明显的增加趋势,而焊缝正面余高则呈下降的趋势。

3)正极性电弧稳定,焊缝成形良好,负极性电弧分散,焊缝加热不集中,成形差,在负极性电流持续时间增加的情况下,焊缝正面余高和熔宽增加幅度较小,焊缝背面余高和熔宽减小。

4)随着送丝速度的增加,熔池内液态金属总量增加,焊缝余高显著增加,熔宽增加不明显。

5)有关 VPPA 熔池金属流动行为的研究还未展开,今后将对此进行探索。

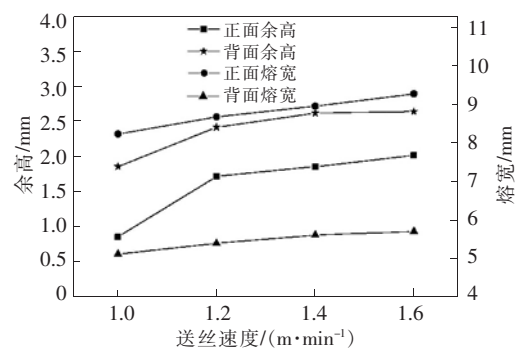


图 11 送丝速度对焊缝余高、熔宽的影响

Fig.11 Effect of feed speed on reinforcement and width

参考文献/References:

[1] 武传松,贾传宝,刘祖明. 穿孔等离子弧焊接过程的检测与控制[J]. 航空制造技术,2011(3): 32-36.  
WU Chuansong, JIA Chuanbao, LIU Zuming. Inspection and control of keyhole plasma arc welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2011(3): 32-36.

[2] 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):3161-3166.  
YAN Dejun,LI Haiyang,LIU Xiaoli,et al. Microstructure and mechanical properties of variable polarity plasma arc welded joints of 5083 aluminum alloy for shipbuilding[J].Rare Metal Materials and Engineering,2018,47(10):3161-3166.

[3] FRIDLANDER I N. Russian aluminum alloys for aerospace and transport applications[J].Materials Science Forum, 2000, 331/337: 921-926.

[4] 刘克文. 焊接工艺参数对铝合金摩擦点焊接头成形的影响[D]. 南昌:南昌航空大学,2007.  
LIU Kewen. Influence of Welding Process Parameters on the Joint Formation in Friction Stir Spot Welding of Aluminum[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University,2007.

[5] 于忠海. 铝合金 VPPA 平焊工艺及稳定性研究[D]. 内蒙古:内蒙古工业大学,2010.  
YU Zhonghai. The Study of the Process and Stability in Aluminum Alloy Variable Polarity Plasma Arc Welding [D]. Inner Mongolia:

Inner Mongolia University of Technology,2010.

- [6] SPINELLA D J, BROCKENBROUGH J R. Trends in aluminum resistance spot welding for the automotive industry[J]. *Welding Journal*,2005, 84(1): 34-40.
- [7] WALSH D W. Examination of the physical processes associated with the keyhole region of variable polarity plasma arc welds in aluminum alloy [C]// 1987 NASA(ASEE Summer Faculty Fellowship Program. San Luis Obispo: NASA Marshall Space Flight Center,1987:2219. N88-15634.
- [8] 陈树君,蒋凡,张俊林,等. 铝合金变极性等离子弧穿孔横焊焊缝成形规律分析[J]. *焊接学报*,2013,34(4): 1-6.  
CHEN Shujun,JIANG Fan,ZHANG Junlin,et al. Principle of weld formation in variable polarity keyhole plasma arc transverse welding of aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*,2013,34(4): 1-6.
- [9] TOMSIC M T, BARHORST S. Keyhole plasma arc welding of aluminum with variable polarity power[J]. *Welding Journal*,1984,63(2): 25-32.
- [10] CRAIG E. The plasma arc process:A review[J].*Welding Journal*,1988,67(2):19-25.
- [11] Jr NUNES AC, Jr BAYLESS E O, III JONES C S,et al. Variable polarity plasma arc welding on space shuttle external tank[J].*Welding Journal*,1984,63(4): 27-35.
- [12] 吕耀辉,殷树言,陈树君,等.变极性穿孔等离子弧焊接系统的研制[J].*电焊机*,2003,33(5):29-31.  
LV Yaohui, YIN Shuyan, CHEN Shujun, et al. Study on the variable polarity plasma arc welding system[J]. *Electric Welding Machine*, 2003,33(5):29-31.
- [13] 韩永全,陈树君,殷树言,等. 大厚度铝合金变极性等离子弧穿孔立焊技术[J].*机械工程学报*,2006,42(9):144-148.  
HAN Yongquan, CHEN Shujun, YIN Shuyan, et al. Variable polarity plasma arc welding process for thick aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,2006,42(9) : 144-148.
- [14] 韩永全,吕耀辉,陈树君,等. 铝合金变极性等离子焊接电源的模块化设计[J]. *电焊机*,2005,35(8):54-56.  
HAN Yongquan, LV Yaohui, CHEN Shujun, et al. Modularized design of variable polarity plasma welding inverter of aluminum alloy[J]. *Electric Welding Machine*,2005,35(8):54-56.
- [15] 韩永全,陈树君,殷树言. 铝合金变极性等离子焊接电弧产热机理[J]. *焊接学报*,2007,28(12):35-37.  
HAN Yongquan, CHEN Shujun, YIN Shuyan. Principle of produced heat by arc properties in VPPA of aluminum alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007,28(12):35-37.
- [16] SHINODA K, OKUBO M, ITO K, et al. The quality evaluation of advanced plasma welding technology[J]. *Selected from Journal of Light Metal Welding and Construction*, 2010, 48(4): 131-134.
- [17] 姜祎,徐滨士,吕耀辉,等. 铝合金变极性等离子弧焊焊接参数对焊缝成形的影响[J].*焊接*,2010(5):39-42.  
JIANG Yi, XU Binshi, LV Yaohui,et al. Effects of VPPA welding parameters on weld shape of aluminum alloy[J]. *Welding & Joining*, 2010(5):39-42.
- [18] KARUNAKARAN N,BALASUBRAMANIAN V. Effect of pulsed current on temperature distribution,weld bead profiles and characteristic of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,2011,21(2): 278-286.
- [19] 雷玉成,郑惠锦. 穿孔法等离子弧立焊焊缝成形机理初探[J]. *江苏理工大学学报(自然科学版)*,2000,21(1):61-64.  
LEI Yucheng, ZHENG Huijin. A preliminary study on the weld formation of keyhole plasma welding in vertical position[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science)*, 2000,21(1):61-64.
- [20] QIU Ling,YANG Chunli,FAN Chenglei,et al. A novel variable polarity welding power based on high-frequency pulse modulation[J]. *China Welding*,2006,15(3): 11-15.