

## 5A06 铝合金超快变换极性 VPTIG 焊接工艺

## Ultrafast-Convert Polarity VPTIG Welding Process for 5A06 Aluminum Alloy

北京航空航天大学机械工程与自动化学院 从保强 齐铂金 周兴国 罗 军

**[摘要]** 研发了一种适用于铝合金材料的新型超快变换变极性焊接工艺,以 5A06 为焊接对象,通过 X 射线探伤、拉伸试验、金相分析以及扫描电镜等手段对超快变换 VPTIG 焊接工艺进行了试验研究。试验结果表明,超快变换变极性 TIG 焊接工艺能够显著改善和提高 5A06 铝合金的焊接质量。

**关键词:** 超快变换 变极性 5A06 铝合金 焊接工艺

**[ABSTRACT]** A novel ultrafast-convert high-frequency variable polarity welding for aluminum alloy is developed. With X-ray inspection, tensile tests, metallographic analysis and SEM, the ultrafast-convert frequency VPTIG welding process for 5A06 Al alloy is researched. The results show that the welding quality of 5A06 Al alloy is improved obviously by the ultrafast-convert frequency VPTIG welding technology.

**Keywords:** Ultrafast-convert Variable polarity 5A06 Aluminum alloy Welding process

铝及铝合金以其独特、优良的物理化学性能广泛应用于国防和航空航天等诸多领域,尤其在航天运载器上。焊接加工技术作为其关键制造工艺之一,直接影响和制约着航天运载器的发展,因此开展铝合金结构材料的先进焊接技术研究是我国航天事业发展的必然要求<sup>[1]</sup>,具有极其重要的意义和应用价值。

铝合金的变极性焊接工艺是近些年发展起来的一种替代正弦波交流和方波交流焊接的新型焊接技术,能够实现电流极性变换频率与正反极性电流幅值、持续时间比的独立调节。研究表明:电流极性的变换频率和电流上升沿、下降沿的变化速率是重要的特征参数<sup>[2]</sup>,提高电流极性的变换频率和变化速率将会对焊接电弧产生影响,有利于改善和提高铝合金的焊接质量。传统的变极性电弧焊一般处于较低频率,同时受电源硬件电路设计原理的制约,其输出电流上升沿和下降沿的变化速率仅能达到  $5\sim 10\text{A}/\mu\text{s}$ 。为此,需要研究开发一种新型的超快变换变极性电弧焊接技术工艺,实现变极性电流过零无死区时间的超

快速变换,电流极性变换频率达 kHz 以上,可对铝合金的电弧焊接过程产生特殊作用,明显改善和提高铝合金的电弧焊接质量。

## 1 超快变换变极性弧焊电源

基于现代电源变换技术,设计开发了一种新型的超快变换变极性方波弧焊电源,可实现具有过零无死区时间且具有快速电流上升沿和下降沿变化速率 ( $50\sim 100\text{A}/\mu\text{s}$ ) 的变极性方波电流输出<sup>[3]</sup>。以铝合金 TIG 电弧为负载,利用数字式示波器和霍尔电流传感器采集获得实际焊接回路输出的变极性方波电流波形(如图 1 所示),变极性电流频率为 5kHz,正、反极

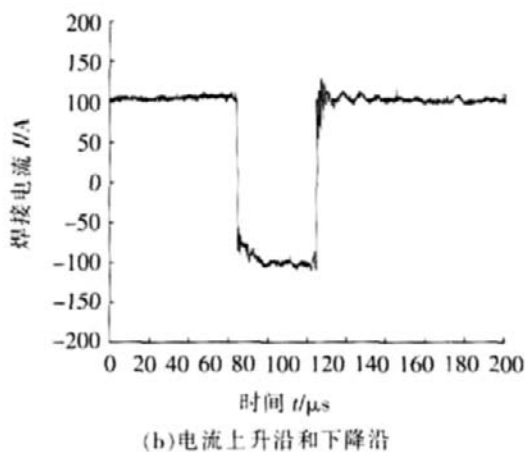
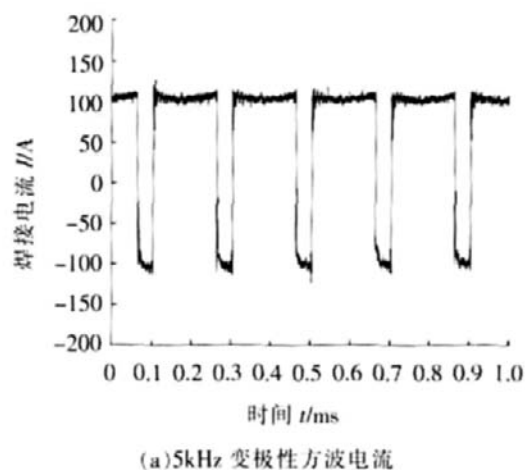


图 1 变极性方波电流

Fig.1 Variable polarity square wave current

性电流幅值均为 100A,正、反极性电流持续时间比为 4:1。从图中变极性方波电流的变化曲线可明显看出:电流从+100A 下降至-100A 以及从-100A 上升至+100A,其持续时间均不超过 4 $\mu$ s,且电流过零无死区时间。

## 2 试验材料及方法

焊接母材选择 3mm 厚的 5A06-O 铝合金平板,填充焊丝选用  $\phi$ 2.4mm 的 ER5356,母材及填充焊丝的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 5A06 及 ER5356 主要成分 w/%

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
5A06	0.4	0.4	0.1	0.5~0.8	5.8~6.8	余量
ER5356	0.25	0.4	0.1	0.05~0.2	4.5~5.5	余量

基于研制的超快变换变极性方波弧焊电源,建立 VPTIG 电弧焊接试验平台,采用不开坡口平板对接 VPTIG 焊接工艺,实现 5A06 的单面焊双面成形,并分别采用 X 射线检测、接头拉伸试验、金相组织分析及扫描电镜等多种手段对 5A06 铝合金焊接接头的组织和性能进行综合分析评定。

## 3 焊接工艺试验

### 3.1 焊前准备

5A06 铝合金焊接试件尺寸为 200mm $\times$ 100mm $\times$ 3mm,焊接长度 200mm,不开坡口。焊前先用丙酮去除铝合金表面的油污,再采用化学清理方法(10% NaOH+15% HNO<sub>3</sub>)去除铝合金表面的氧化膜,干燥待用。填充焊丝 ER5356 采用机械清理的方法去除表面氧化膜<sup>[4]</sup>。

### 3.2 焊接工艺参数

为了考察超快变换变极性方波电流对铝合金焊接接头性能的影响作用,保持其他焊接工艺参数不变,分别选取 3 组不同的变极性方波电流频率值,其他各主要的焊接工艺参数如表 2 中所列。此外,保护气体 Ar 流量为 15L/min,电极顶端距离焊接试件高度为 3mm。

## 4 试验结果与分析

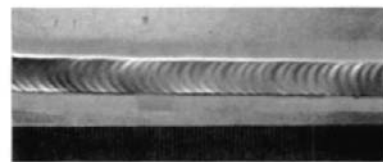
### 4.1 焊缝成形外观

采用表 2 中所列的 3 组工艺参数均可获得满意

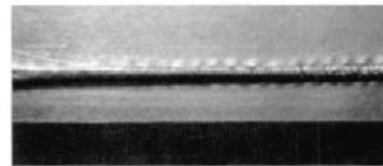
表 2 5A06 平板对接 VPTIG 主要焊接工艺参数

工艺参数	变极性频率/Hz	电流持续时间比	正极性电流/A	反极性电流/A	焊接速度/(m $\cdot$ min <sup>-1</sup> )
工艺 1	100	4:1	100	120	0.14
工艺 2	500	4:1	100	120	0.14
工艺 3	1 000	4:1	100	120	0.14

的焊缝成形,实现不开坡口单面焊双面成形的焊接工艺。通过观察 5A06 铝合金焊接接头可以看出:焊缝成形良好,正面焊缝表面非常光亮,且呈鱼鳞状分布;同时获得了满意的氧化膜清理效果,氧化膜清理宽度超过正面焊趾 1~2mm。图 2 所示为采用工艺 1 获得焊缝的正、反面成形外观。



(a) 焊缝正面



(b) 焊缝反面

图 2 5A06 平板对接焊缝正、反面成形(工艺 1)

Fig.2 Front and back formation of butt weld of 5A06 plate

### 4.2 焊缝 X 射线检测

为分析和检验采用超快变换 VPTIG 焊接工艺获得的铝合金焊缝中是否存在缺陷及其种类,对试验获得的焊缝需要进行 X 射线检测。分别对工艺 1~3 获得的铝合金对接焊缝进行了 X 射线检测,在焊缝中未发现有任何气孔、裂纹以及夹渣等焊接缺陷。图 3 所示为工艺 2 条件下获得的焊缝 X 光检测照片。



图 3 5A06 焊缝 X 射线检测照片(工艺 2)

Fig.3 X-ray inspection of 5A06 weld

### 4.3 焊缝拉伸试验

为了考察铝合金超快变换 VPTIG 焊接接头在常温条件下的力学性能,按照相关国家标准,将工艺 1~3 铝合金焊接接头分别加工成拉伸试样,并去除焊缝正反面余高,每组工艺取 3 个试样,取其平均值作为

焊接接头性能的评定数据,同时对 5A06 铝合金母材进行拉伸测试。拉伸设备是型号为 DWD-50E 的电子式万能拉伸试验机,拉伸速度 2mm/min。铝合金母材和工艺 1~3 焊接接头的力学性能数据见表 3。

比较和分析表 3 中焊接接头的性能数据,可以明

表 3 5A06 母材及焊接接头拉伸性能

性能参数		母 材			工 艺 1			工 艺 2			工 艺 3		
		试样 1	试样 2	试样 3	试样 1	试样 2	试样 3	试样 1	试样 2	试样 3	试样 1	试样 2	试样 3
抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	测试值	354	353	351	320	332	326	333	336	330	329	342	346
	平均值	353			326			333			339		
伸长率 $\delta_s$ /%	测试值	22.3	21.0	23.5	17.4	19.4	18.7	17.6	20.4	18.6	17.4	22.8	20.4
	平均值	22.3			18.5			18.9			20.2		

显看出,采用超快变换 VPTIG 焊接工艺,5A06 焊接接头抗拉强度  $\sigma_b$  和伸长率  $\delta_s$  能够分别达到母材的 92.3%和 85%以上,工艺 3 条件下最高,分别达到母材的 96%和 90.6%。图 4 所示为 5A06 铝合金母材以及工艺 1~3 焊接接头拉伸试样拉断后的外观照片,从图中可清晰看出:母材金属沿 45°方向被拉断,而焊接接头均在焊缝中心或热影响区被拉断,母材金属和焊接接头断口附近均有较明显的塑性变形。

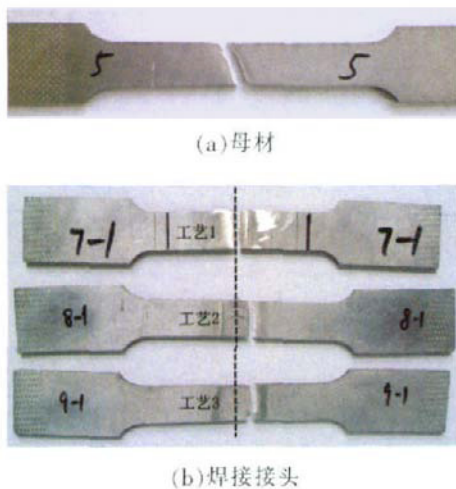


图 4 5A06 母材及焊接接头拉伸外观  
Fig.4 Appearance of 5A06 base metal and weld joint after tensile

### 4.4 焊缝显微组织

为考察不同超快变换 VPTIG 焊接工艺参数条件下 5A06 铝合金焊缝显微组织的变化情况,分别制备工艺 1~3 焊接接头的金相试样,并采用 Keller 试剂

(HF 1mL;HCl 1.5mL;HNO<sub>3</sub> 2.5mL;H<sub>2</sub>O 95mL)浸蚀接头试样,在光学显微镜下进行对比分析并照相<sup>[5]</sup>。图 5 所示分别为工艺 1~3 铝合金焊缝热影响区(Heat Affected Zone,HAZ)和焊缝中心区(Weld Zone,WZ)的显微组织。对比图中各工艺条件下焊缝显微组织的变化,可以发现,随着变极性电流频率的提高,焊缝中心

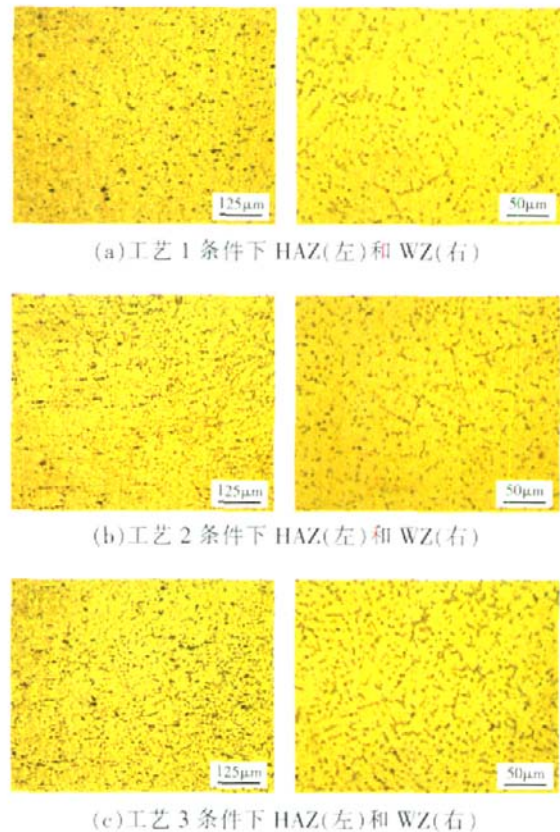
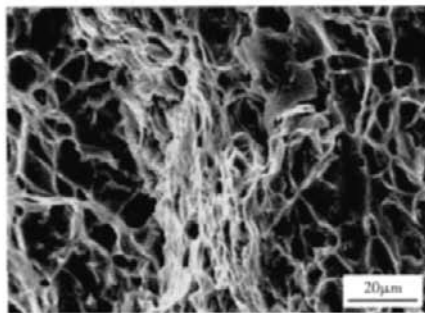


图 5 5A06 焊缝热影响区和中心区显微组织  
Fig.5 Microstructures of 5A06 at weld HAZ and WZ

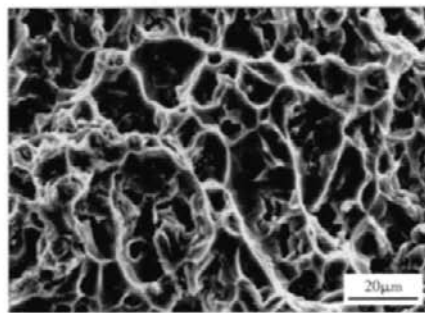
区组织明显细化,且各晶粒分布更加均匀,同时,焊缝热影响区的晶粒组织也得到一定程度的细化,有利于提高焊接接头的性能。铝合金焊缝显微组织的细化使得焊接接头的力学性能也得到了不同程度的改善和提高,工艺3条件下接头的抗拉强度和伸长率均为最大。

#### 4.5 拉伸断口形貌

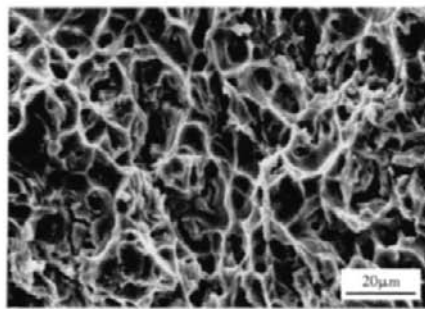
为了更清晰地观察5A06铝合金焊接接头的断裂情况,分别截取工艺1~3铝合金焊接接头的拉伸断口试样,利用扫描电镜(SEM)观察各个拉伸断口处的显微结构并照相,如图6所示。对比分析图中不同工艺条件下各焊接接头拉伸断口的微观形貌可以看出:3种不同工艺参数获得的焊接接头的断裂主要是延性断裂,断口处均存在有大量的韧窝;同时,随着变极性



(a)工艺1



(b)工艺2



(c)工艺3

图6 5A06焊接接头拉伸断口形貌

Fig.6 Tension fracture morphology of 5A06 weld joint

电流频率的提高,断口处韧窝的数量明显增多,且韧窝的大小及其分布更趋于均匀。工艺3条件下断口处韧窝密度大且分布更为均匀,因而其焊接接头被拉断所需的拉力也就更大。

## 5 结论

(1)超快变换VPTIG焊接工艺用于5A06-O铝合金平板的焊接,可获得满意的焊接质量,接头成形良好,内部无缺陷。

(2)采用超快变换VPTIG焊接工艺,5A06-O铝合金焊接接头抗拉强度 $\sigma_b$ 和伸长率 $\delta_5$ 分别可达到母材金属的92%和85%以上。

(3)在一定范围内提高电流极性的变换频率,能够细化焊缝显微组织,有利于改善和提高5A06-O铝合金的接头性能,在变极性频率为1kHz时,接头抗拉强度 $\sigma_b$ 和伸长率 $\delta_5$ 分别达到母材的96%和90.6%。

## 参 考 文 献

- [1] 姚君山,周万盛,王国庆,等. 航天贮箱结构材料及其焊接技术的发展. 航天制造技术,2002(5):17-22.
- [2] Zeng X M, Lucas J, Ren Y Y, et al. Welding with high-frequency square-wave AC arcs. IEE Proceedings A, 1990, 137(4): 193-198.
- [3] 齐铂金,从保强,黄松涛. 超快变换变极性方波电流弧焊电源装置. 中国,200710120833.1. 2008-02-20.
- [4] 姚君山,周万盛. 铝及铝合金的焊接. 北京:机械工业出版社,2006.
- [5] 屠海令,干勇. 金属材料理化测试全书. 北京:化学工业出版社,2007.

(责编 悠然 金卯)

## 波音交付卡塔尔航空第2架777-200LR ——中东的卡航总共订购了27架777飞机

2009年2月25日,波音向卡塔尔航空公司交付了该公司订购的8架777-200LR(远程型)飞机中的第2架。这架飞机于清晨飞离埃弗雷特佩恩机场,经过14个小时的飞行后抵达其新运营基地多哈国际机场。卡塔尔航空订购了17架777-300ER(延程型)飞机,其中5架已交付。此外卡航还订购了两架波音777货机。

卡塔尔航空公司最新的这架777-200LR于2月初在华盛顿州埃弗雷特的佩恩机场进行试飞,卡航首架波音777-200LR飞机已于2月8日飞抵多哈并加入公司机队。(本刊记者 七丁)