

# 专题讨论——变极性焊接工艺及设备

## 铝合金变极性 TIG/PAW 焊接技术及其应用

张宏光,魏铀泉

(艾美特焊接自动化技术(北京)有限公司,北京 102202)

**摘要:**通过对厚大铝合金焊接技术发展历史的介绍,进一步了解了变极性焊接技术原理、焊接工艺以及变极性焊接电源的特点;并重点说明了艾美特变极性焊接工艺的技术优势和 DSP 控制技术的关键所在;同时列举了不同领域厚大铝合金构件实现高质量、高效柔性的变极性等离子焊接的应用。

**关键词:**铝合金;变极性 TIG/PAW;DSP 控制技术;焊接应用

**中图分类号:**TG444+.73 **文献标识码:**C **文章编号:**1001-2303(2006)02-0001-06

### Welding application for aluminum-alloy of variable polarity TIG/PAW

ZHANG Hong-guang, WEI You-quan

(AMET Welding Automation Technology Beijing Co., Ltd., Beijing 102202, China)

**Abstract:** By introducing the developing history of Variable Polarity TIG/PAW process of huge aluminum welding, it makes us know further principle of VP technology, process and its characteristics. Especially for AMET's advantages and key technologies in VP power supply and controllers, and some good examples of VP TIG and welding application of VPPAW.

**Key words:** aluminum-alloy; variable polarity TIG/Plasma arc welding; DSP technology; welding application

### 前言

在高质量的厚大铝合金弧焊应用方面,传统的交流 TIG 工艺需要进行多道焊。由于铝合金焊接的敏感性,往往存在着检验工序多、气孔率高、焊接变形大以及接头强度系数低(只达母材的 60%~80%)等缺点。而采用变极性 TIG 焊接工艺,可以一次焊透至少 6 mm 厚度的铝合金;采用变极性等离子弧焊接工艺时,则可以一次焊透至少 16 mm 的铝合金(对某些铝合金,如采用 He 或 He+Ar 气体,一次可焊透 25 mm),并能实现双面成形,具有焊缝气孔少、焊接变形小和接头强度高(达到母材的 0.8~1.0)等优点。对铝合金的变极性焊接,国外已经在不少高精度焊接场合得以成熟地应用,国内亦进行了不少的研究。

收稿日期:2006-01-17

作者简介:张宏光(1979—),男,辽宁朝阳人,学士,主要从事国际先进焊接专机系统在亚太地区的推广和应用工作。

## 1 变极性焊接技术发展历程

### 1.1 铝合金的交流 TIG 焊接

对于铝合金交流 TIG 焊接,目前国内最常用的是交流方波工艺。即用电源输出的交流负半波对铝合金氧化膜进行破碎处理(也称为阴极清理过程),正半波实现对铝合金的熔化焊接。普通交流焊接电源波形如图 1 所示。随着技术的发展,较好的方波电源能调节正负半波的比例,尽量减少负半波的时间。图 2 是交流平衡焊接电源波形。

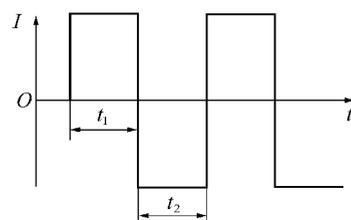


图 1 普通交流焊接电源波形



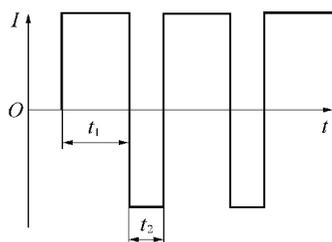


图 2 交流平衡焊接电源波形

破碎工件表面氧化膜的过程实际是比较短暂的,但由于受到交流 TIG 电源的结构限制,阴极清理时间不能根据需要缩小。即便是带有交流平衡功能的电源,其负半波的时间仍然至少为整个波长的 30%以上。另外,受交流原理的影响,实际阴极清理的频率或密度也是不可调整的。所有的限制实际增加了电流在负半波的时间,而阴极清理过程产生的热量不但不能用来支持焊接,反而导致工件热影响区加大,电极寿命缩短。那么,有没有一种弧焊方式能按照实际需要的阴极清理强度和密度进行铝合金焊接,从而在保证最佳焊接质量的同时,提高焊接效率、降低焊接变形呢?答案就是变极性焊接工艺。

## 1.2 铝合金的变极性 TIG 焊接

变极性电源可以分别设置正向焊接电流、反向清理电流和清理密度。变极性区别于交流的最大特点是:变极性的电源是直流,而不是交流。变极性控制部分只是在程序设定的时段内将焊接电流迅速反向,并同时定义其输出的大小,使之具备反向阴极清理的功能。图 3 是变极性焊接电源波形图。在反极性阶段,电源可以采用更高的电流迅速破碎铝合金表面的氧化膜。这一点如今国外有些电源已经能够做到,正反向时间也可以缩短,表明电源和变极性部分的响应速度也提高了。这些电源清理密度(或者变极性频率)至少是方波交流的 2~5 倍以上。在是否可以按照任意比例设置正反向工作时间内,有些厂家的电源在负半波工作时间内设置上还有一些限制。

随着 IGBT 电源响应能力的提高和大功率元器件的成功面市,变极性电源的能力又有了新的提高。艾美特公司生产的 VPC-450 变极性电源,100% 负载时的输出能力已经达到 450 A。同时,阴极清理密度(或者变极性频率)已经突破 1 000 Hz,相当于普通交流方波电源的 5~10 倍。为了厚大铝合金焊接的需要,将更多热量输入破除氧化膜后的工件焊缝,以获得大的熔深,介于直流和变极性模式的混合极性

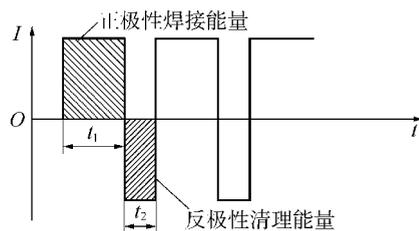


图 3 变极性焊接电源波形

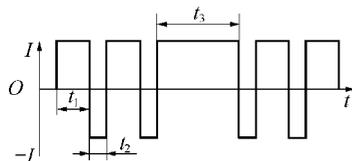


图 4 混合极性焊接电源波形(VPM)

焊接模式也在 VPC-450 变极性电源上实现,并且在多个用户上成功应用。图 4 是 AMET 混合极性焊接电源波形(VPM 模式)。应用变极性 TIG 电源焊接铝合金可以充分利用焊接电弧的能量,设置焊接的最优弧焊工艺,达到理想的焊接效果。

在焊接过程中,由于钨极的烧损情况与钨极正向电流的时间和大小有关,变极性电源通过短时间和大电流来满足阴极清理,使得钨极端头能保持锥状,有利于电弧能量集中。为了保证钨极承受大电流的能力,交流 TIG 焊时钨极则需要被预制成滴球状,降低了电弧能量的集中程度。由于电源良好的输出特性,采用变极性焊接电源进行铝合金焊接,可以获得焊接熔深大、热影响区窄、接头的强度和塑性指标高等焊接效果。图 5、图 6 分别是两道连续焊接完成的 12 mm 铝合金角焊缝和对接环焊缝。

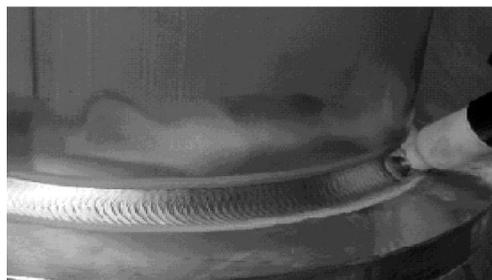


图 5 12 mm 铝合金角环缝

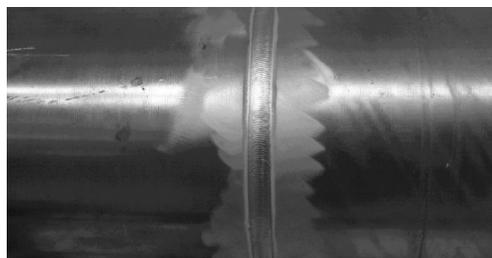


图 6 12 mm 铝合金对接环焊缝



### 1.3 铝合金的变极性等离子焊接

铝合金变极性等离子焊接技术是在变极性 TIG 焊接的基础上发展起来的,可以一次焊透中厚铝合金的一种先进焊接工艺。众所周知,铝合金作为一种特殊材料,多道焊对其接头强度减弱几乎很难避免。尤其是高强度铝合金,焊后强度损失严重,对航空航天的发展带来了限制。开始于 1968 年的变极性等离子焊接工艺,到变极性焊接工艺成熟地应用于美国的航空航天工业,焊接工作者们持续了近 30 年的研究和实践历程。

哈伯特兄弟公司是这一领域的佼佼者,他们先后开发了 VP 300 和 VP 500 晶闸管焊接电源,以及 HAWCS II 控制器。最早应用于美国的航空航天工业,使变极性等离子工艺发展到了一个稳定的台阶。作为哈伯特技术的继承者,艾美特为变极性等离子焊接技术的发展做出了不断的努力。并于 1998 年,会同美国洛克希德-马丁公司联合研制了采用 DSP 技术控制的双逆变变极性等离子焊接设备。VPC-450 的研制成功,不但标志着大功率变极性等离子焊接时代的到来,也创建了一个稳定、精密输出的变极性等离子焊接新标准。

变极性等离子焊接的优点:等离子弧柱挺度好,热量集中,因而可以得到很好的熔深;等离子焊缝窄,热影响区小,铝合金接头强度高;正面焊接和阴极雾化的时间可以以 0.1 ms 设置,加大清理和焊接的密度,容易保证焊接的质量和效率;可以采用混合气体作为保护气,并可以加大等离子电弧的穿透能力;小孔效应变极性等离子可以同时清除焊缝正面、坡口钝边和焊缝背面的氧化膜,保证更好的焊接效果;小孔效应变极性等离子能最大程度地将焊缝杂质排除到焊缝外表面;更好地延长钨极的使用寿命,降低焊缝夹钨风险。

图 7、图 8 分别是 AMET 变极性等离子铝合金焊缝正面图片和焊缝背面图片。

## 2 艾美特变极性等离子焊接技术的特点

变极性等离子焊接工艺曾一度在国内被认为是一种不稳定的技术,原因是相对于 TIG 焊,等离子焊接需要控制的参数多,变极性过程不稳定、在焊接过程中各种参数的交互影响作用十分明显。而提供给我国焊接工作者的变极性焊接电源也相对落

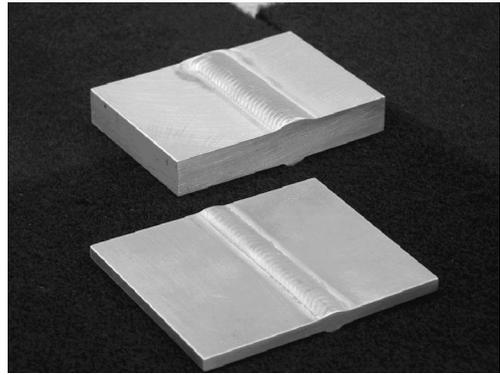


图 7 变极性等离子铝合金焊缝正面



图 8 变极性等离子铝合金焊缝背面

后,辅助的控制手段不多。这也正是艾美特开始研究变极性等离子焊接设备时面对的状况。

### 2.1 设计思路

变极性技术的核心是一套能实现稳定变极性输出的电源。艾美特公司的研究表明,提高焊接电源本身的输出稳定性、快速进行变极性动作和采用高速控制系统抑制尖刺波是变极性电源稳定输出的关键。因此,具有快速响应大功率 IGBT 直流电源、大功率 IGBT 极性切换桥和 DSP 高速控制器成为艾美特变极性焊接电源的核心技术和配置。

如何把焊接电源输出的直流电高速反向,同时保证稳定的输出是变极性技术的核心问题。尤其在反向的开始阶段,抑止和控制尖刺波是关键。为了更清楚了解变极性过程中的尖刺问题,我们采用普通变极性电源和 VPC-450,同时进行了 50~5 A 的斜坡衰减输出试验。图 9、图 10 分别表示普通变极性焊接电源和 VPC-450 变极性焊接电源的实际输出测量图,图 11、图 12 分别表示普通变极性电源以及 VPC-450 变极性电源的电流输出实时波形。通过对比,可以看到 VPC-450 输出过程中的尖刺波被很好地抑止了。这是因为双逆变变极性电源在切换极性之前进行了电流输出的干预和控制。



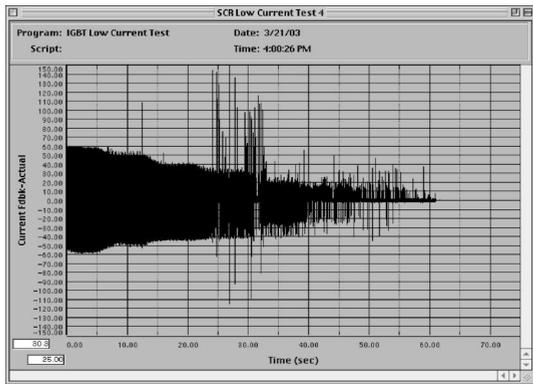


图 9 普通变极性电源电流实际输出

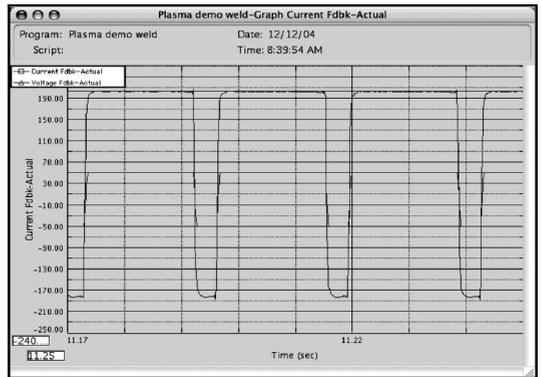


图 12 VPC-450 变极性电源电流输出实时波形

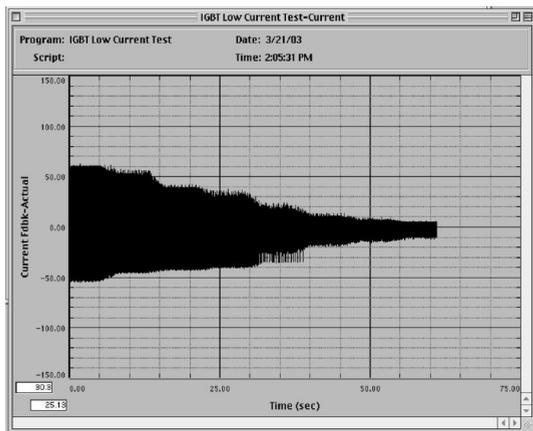


图 10 VPC-450 变极性电源电流实际输出

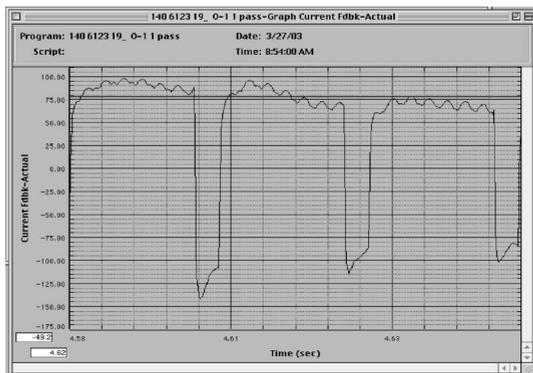


图 11 普通变极性电源电流输出实时波形

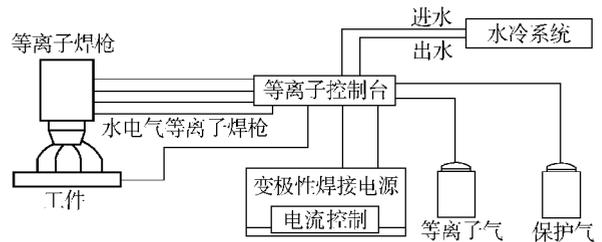


图 13 变极性等离子焊接系统典型结构原理

和监视所有的系统外设及传感器。计算机系统对所有外设和传感器的控制和监视是循环进行的,因为每次它只能处理一个对象。一旦系统中加入更多的外设和传感器,计算机的控制时间就被更多的外设分配,针对某个外设和传感器的控制时间更短。显然,这种控制方式已经很难精确地同步控制变极性焊接过程。

艾美特则采用分布式控制,多个 DSP 处理器同时应用到一个系统中,用于一对一控制和监视每个外设和传感器。在焊接过程中,每个 DSP 处理器专注于一个外设,相互之间通过网络进行通信,就像很多公司的网络系统一样。由于所有的 DSP 内部时钟是同步的,因此,对它们的控制和监视也是同步的。也就是说,系统控制器是同时对所有 DSP 控制的外设进行控制和监视。由于每个外设被一个处理器控制,在网络中增加 DSP 处理器不会对系统本身的控制和工艺过程监视的能力有影响,因而系统对外设的增加和减少是不敏感的。图 14 是分布式控制检测模式。

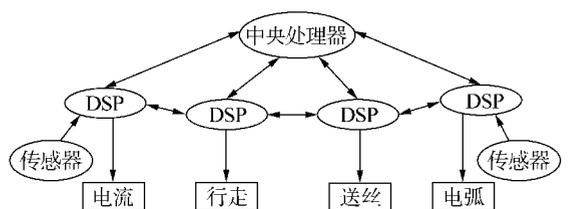


图 14 分布式控制检测模式

## 2.2 DSP 分布式控制器

事实上,变极性等离子焊接过程是一个复杂的控制过程。除了控制变极性电源的输出、极性切换、抑制尖刺波以外,对等离子非转移弧、等离子气、电弧电压、焊接速度、送丝速度等的控制也关系到最终的焊接效果。如何同步对所有关键因素进行精确控制,对等离子焊接质量的好坏有直接的影响。图 13 是变极性等离子焊接系统典型结构原理。

传统的循环控制方法是采用一套计算机控制

专题讨论——变极性焊接工艺及设备

艾美特公司自 1995 年开始, 率先把 DSP 应用于焊接自动化的过程控制, 研发了一系列适合焊接应用的高速、实时精密过程控制器, 至今已经在焊接领域被应用了 16 年。DSP 技术应用于焊接领域的优点是: 利用数据传输技术, 显著提高焊接过程的检测和控制频率, 提高系统稳定性, 并减少杂波干扰。结合 MCU 并行控制技术, 艾美特的 DSP 控制系统可以随时被扩展, 系统的设备可以被编程工作, 或不工作, 这为系统控制的柔性化和可扩展能力提供了技术基础。图形编程能力、数据采集和自动控制能力等是艾美特控制器的附加功能, 也是基于 DSP 数字信号处理技术开发的、方便操作和质量控制的先进手段。

艾美特公司基于 DSP 技术开发适合变极性电源的主要控制系统有: QII 控制系统见图 15, XM 控制系统见图 16, ADVENT 控制系统见图 17。



图 15 QII 控制系统



图 16 XM 焊接控制系统

### 3 变极性焊接应用

变极性 TIG 焊接需要控制的焊接参数较少, 而对变极性等离子焊接系统相对变极性 TIG 需要控制的焊接参数较多, 并且控制精度和响应速度要求更加严格。能够实现变极性等离子焊接的变极性焊接电源与控制系统, 可以轻松实现变极性 TIG 焊接。



图 17 ADVENT 焊接控制系统

变极性 TIG 的焊接位置不受过多限制, 例如纵缝可以采用卧式焊接位置, 环缝可以在 12 点钟位置焊接。

变极性等离子焊接工件时, 根据工件厚度的不同, 纵缝采用立式焊接位置, 环缝在 3 点钟位置焊接。图 18、图 19 分别是变极性等离子纵缝和环缝焊接件。



图 18 纵缝变极性等离子焊接件



图 19 环缝变极性等离子焊接件

#### 3.1 在医疗器械上的应用



图 20 是立式变极性等离子焊接系统,用来制造核磁共振系统的铝合金舱体。设备构成为 Advent DSP 控制器、艾美特变极性等离子电源、等离子焊枪、伺服控制系统、机械摆动系统、集成弧长控制 3 米立式纵缝焊机以及数据采集和过程控制系统等。



图 20 立式变极性等离子焊接系统

### 3.2 在航天工业中的应用

图 21 是铝合金变极性等离子焊接专机系统,用来制造铝合金航天部件。主要由 Advent DSP 控制器、艾美特变极性焊接电源、等离子焊枪、6 轴伺服控制系统、机械摆动系统、积木式 AVC(X 轴或 Z 轴)、带翻转功能的变位机、集成摄像监视系统、操作机、导轨带有机动地盘车以及数据采集和过程控制系统等组成。



图 21 变极性等离子焊接 ADVENT 专机系统

图 22 是纵环缝铝合金变极性等离子焊接系统,用来制造铝合金航天部件。主要由 Advent DSP 控制器、艾美特变极性焊接电源、水冷等离子焊枪、机械摆动系统、积木式弧长控制器(x 轴或 z 轴)、数字气体混合系统、集成摄像监视系统以及精密操作机和立式纵缝焊机数字采集和质量监视系统等组成。

### 3.3 在 GIS 铝合金筒型壳体上的应用

图 23 是 GIS(Gas Insulated Switchgear)铝合金壳体焊接变极性等离子焊接。系统主要由立式纵缝



图 22 纵环缝铝合金变极性等离子焊接系统

焊机、XM 系统控制器、自动弧长控制器、自动四轮送丝机构、精密机械摆动系统、摄像监视系统,以及艾美特等离子焊接电源、等离子焊接组件等构成。XM 采用数据总线和 DSP 技术对系统各部分进行实时的、精密的焊接过程控制。



图 23 GIS 铝合金壳体焊接变极性等离子焊接

## 4 结束语

a. 在美国、加拿大、欧洲,变极性 TIG/PAW 焊接已经是非常成熟的工艺,被广泛应用于对于焊接质量有严格要求的厚大铝合金件的精密焊接。

b. 变极性 TIG/PAW 焊接系统需要高速响应能力的直流焊接电源、高速变极性桥和快速精密的控制系统,而这些正是艾美特变极性焊接电源和 DSP 控制系统的优势所在。

c. 现在艾美特变极性 TIG/PAW 焊接设备也已经成功地被引进中国,对铝合金材料的精密焊接已经应用于企业的生产中。

d. 先进的生产技术,必将制造出高标准的产品。产品质量、效率等方面优势源于精良的制造设备,变极性 TIG/PAW 焊接工艺必将在铝合金的精密焊接领域里发挥它的优势。

