

(1) 当道间温度从 80 ℃ 升高到 150 ℃, 平均冲击吸收能量先增大后减小。较高的道间温度使  $M-A$  岛中的马氏体含量减少, 韧性提高。过高的道间温度会使组织粗化, 碳化物析出, 导致韧性降低。

(2) 随着焊接道数的增加, 熔敷金属组织中  $M-A$  岛的尺寸减小, 含量减少, 而且层间热影响区所占的比例增大, 这些都使得韧性提高。

(3)  $M-A$  岛的大小、含量和分布是影响冲击韧性的重要因素, 但  $M-A$  岛中马氏体与奥氏体所占的权重也会对韧性产生较大的影响。

#### 参考文献

- [1] 牛全峰. 自保护药芯焊丝的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2005.
- [2] 蒋旻, 栗卓新, 蒋建敏. 自保护药芯焊丝的国内外研究进

展[J]. 焊接, 2003(12): 5-8.

- [3] 余圣甫, 李志远, 王杰, 等. 药芯焊丝焊缝中的夹杂物对针状铁素体形成的影响规律[J]. 应用科学学报, 2000, 18(3): 192-196.
- [4] 徐祖耀, 刘世楷. 贝氏体相变与贝氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [5] 汪凤, 范玉然, 张希悉, 等. 自保护药芯焊丝中 Cr 含量对钢管焊缝冲击性能及组织的影响[J]. 焊管, 2014, 37(5): 58-61.
- [6] 于庆波.  $M/A$  岛对粒状贝氏体钢冲击韧性的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(24): 41-42.
- [7] 于庆波, 段贵生, 孙莹, 等. 粒状贝氏体组织对低碳钢力学性能的影响[J]. 钢铁, 2008, 43(7): 68-71.

作者简介: 张学杰, 1991 年出生, 硕士研究生。主要从事焊接材料的研究, 已发表论文 2 篇。

## 航天器空间曲线焊缝 VPPA 自动化 焊接装备开发和应用

章朋田<sup>1,2</sup> 黄宁<sup>1,2</sup> 张所来<sup>1,2</sup> 张玉良<sup>1,2</sup> 陈树君<sup>3</sup>

(1. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094; 2. 北京市航天器焊接技术与装备工程技术研究中心, 北京 100094;  
3. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

**摘要** 为研制满足空间曲线焊缝的 VPPA 穿孔立焊的自动化焊接装备, 采用大负载高精度的 2 自由度转台变位机, 高精度的三维直线导轨以及 6 自由度焊接机器人, 组成多轴联动的焊接机器人系统。通过对 6 自由度关节机械臂、双自由度转台变位机系统以及三维移动装置的集成, 提出一种机器回路控制与人在回路控制并存的空间曲线焊缝焊接系统的宏微控制策略, 实现对焊枪与焊缝相对位置的实时控制, 使 VPPA 焊枪与焊缝的相对位置在空间曲线焊缝焊接过程中, 始终处于垂直立向上的关系, 实现穿孔立向上焊接。在大型铝合金密封舱体焊接生产中实现应用, 替代进口, 填补中国空白, 意义重大。

**关键词:** 空间曲线 自动化 焊接装备

**中图分类号:** TG432

### 0 前言

在大型铝合金航天器结构中, 存在大量复杂形式的焊缝, 如球形、圆柱形、圆台壳体与圆形、异形法兰形

成的相贯线等。载人飞船、目标飞行器、军用卫星、月球探测飞行器等舱体结构都不同程度地涉及到这类形式焊缝的焊接问题<sup>[1]</sup>。目前大多靠手工钨极氩弧焊来完成这类曲线焊缝的焊接。手工钨极氩弧焊生产过程中存在的问题主要有: ①反复补焊影响产品研制进度。手工焊容易出现缺陷, 排除缺陷和补焊的效率往往牵

收稿日期: 2017-12-26

制结构的研制进度;②热输入量大,焊接残余应力水平高,容易导致产品尺寸超差;③新一代长期在轨航天器密封舱体要求在轨寿命十五年以上。手工钨极氩弧焊工艺焊接热输入量大,焊缝显微组织粗大,焊缝残余应力较大,应力腐蚀倾向严重,该工艺已不适应航天器结构长寿命、高可靠的制造需求。

变极性等离子弧(Variable Polarity Plasma Arc, VP-PA)焊接方法在 20 世纪 70 年代由波音公司的 Van CLEAVE 采用西亚基公司制造的变极性方波电源开发出来,被誉为“零缺陷”的焊接方法,并在国外航天工业取得了成功应用<sup>[2]</sup>。上世纪 90 年代初,美国 Marshall 制造中心针对空间站舱体结构,最先开展了复杂曲线焊缝的 VPPA 自动化焊接工艺技术的研究工作,研究内容涉及了工艺装备、工艺技术、送丝机构、焊缝跟踪传感、焊接过程仿真及离线编程等方面。随后,采用 6 自由度机械臂配合 2 自由度转台焊接了空间站结构近 1/3 的焊缝,取得了良好的效果。但欧美国家的 VPPA 焊接设备核心技术、工艺及成套装备对中国进行了严密的封锁。VPPA 焊接方法只在部分航天器结构中得到了应用<sup>[3]</sup>。

国内在机器人智能化焊接方面开展了部分探索<sup>[4-7]</sup>,北京工业大学较早的开展了对 VPPA 焊接电源的研制,并在自动化焊接中进行了等离子焊接专用机头和控制系统的研究<sup>[8-9]</sup>。

随着中国载人航天、深空探测工程的发展,天地往返和在轨长期飞行试验任务逐年增加,对铝合金密封舱体焊接结构的研制任务量逐年增加,必须实现批量或小批量自动化焊接生产模式,大幅度缩短焊接生产周期,因此急需研制一套高效的空曲线焊缝自动化焊接通用设备。文中开发的空曲线焊缝 VPPA 穿孔立焊机器人焊接系统,解决大型薄壁壳体结构的空曲线焊缝焊接的关键技术,研制一套大型变极性等离子弧自动化焊接装备样机,在航天飞行器密封舱体制造领域实现应用,替代进口,填补中国空白,意义重大。

## 1 多自由度专用装备设计

### 1.1 双轴变位机设计

为实现焊接过程中被焊工件焊接姿态的实时调整,需要设计高精度大负载的双轴变位机,变位机采用每轴可以单独旋转设计,主要由基座、L 形臂、回转机构、导电机构及电控系统等组成。压缩空气及控制管

线通过面板的空心轴导入,由齿圈和行星齿轮带动旋转,保证无间隙动力传输。在水平位置装夹,工作时翻转变位,使被焊工件的焊缝位置处于与地面垂直姿态,实现对被焊工件的双自由度翻转变位,结构示意图如图 1 所示。

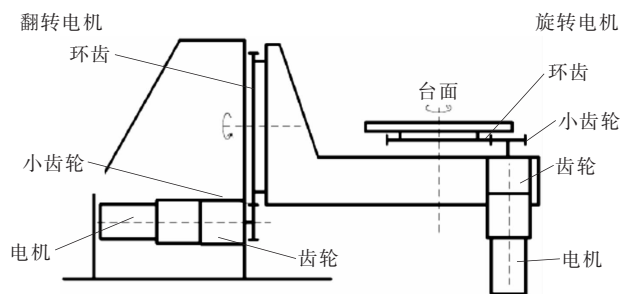


图1 双轴变位机系统示意图

### 1.2 落地式三维移动装置设计

落地式三轴移动装置,由底座、各轴移动组件及各轴驱动部等组成,用于安装工业机器人,进行高精度直线位移,弥补机器人运动范围不足的问题。该项目采用的 KUKA KR30 机器人,要求移动装置升降托架搭载 1 t 以上,为了满足产品 VPPA 焊接需求,移动装置如图 2 所示。

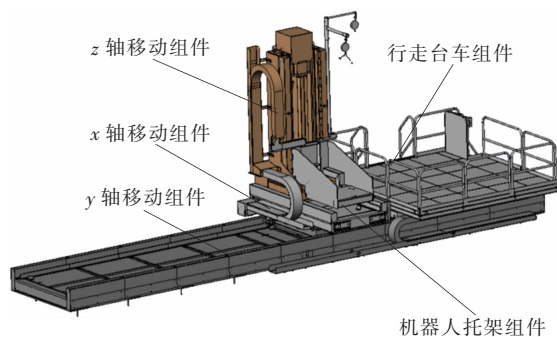


图2 三维移动装置图

该移动装置主要用于搭载焊接机器人,以扩展焊接机器人的工作区域,满足焊接要求。主要由 y 轴移动组件、x 轴移动组件、z 轴移动组件、机器人托架组件、行走台车组件等组成,以实现焊接机器人在指定坐标系下沿着各轴的直线运动。

## 2 VPPA 焊接装备开发

### 2.1 专用焊接机头研制

目前通用等离子焊枪焊接铝合金空曲线焊缝时仍然存在着很多问题,主要表现在:

(1)等离子焊枪的喷嘴、钨极在焊接过程中烧损引

起等离子弧偏转导致穿孔圆度变形。

(2) 焊接变形引起弧高变化导致小孔两侧受热不均匀从而产生焊缝咬边、切割等缺陷。需要人工对焊枪调节和对设备进行调整。

(3) 由于外部工装或者被焊工件的设备公差以及安装精度的问题,焊接过程中引起等离子弧焊接设备不能对中焊缝。

现有的焊接方案不能实时对相应的设备进行调节,完成效率高自动化高质量高精度的焊接生产任务。为此,为进一步保证和提高 VPPA 空间曲线焊缝的焊接质量,研制了一种体积、重量 ( $< 15 \text{ kg}$ ) 合适、精度高、自动化程度高的等离子焊接机头。等离子焊接机头能在视频监控下完成焊枪的姿态以及送丝角度、送丝速度的调节。焊枪姿态调节包括焊枪伸缩机构,焊枪轴向旋转机构,焊枪平移机构。

通过专用焊接机头(图3)的控制实现对焊接过程中的熔池状态、电弧形态进行精细的调整,机头的机械定位精度可以达到  $\pm 0.1 \text{ mm}$  的水平。这个过程可以通过焊接参数统计分析、焊接过程图象处理及人工智能技术进行自动控制。由于焊接过程的精细调整对控制速度的要求并不高,也可以通过操作者对视频监控和焊接工艺参数监控的观察,人工调整焊接机头的操作(即系统的人在回路控制)。

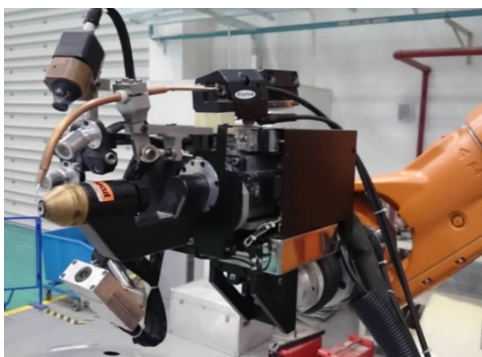


图3 专用机头实物图

等离子机头主要包括:等离子弧焊接机头本体、送丝、视频监控以及控制四大部分。通过焊枪自转解决焊接过程中出现的电弧偏斜问题;通过焊枪平移解决不等厚板焊接及错边焊接时焊接位置改变问题;并通过焊枪和送丝系统的分别控制实现焊枪运动和焊丝运动的解耦,实现厚板焊接的起弧穿孔控制;能够实时准确的控制等离子弧的长度和等离子弧穿孔的圆度问题。通过激光测距,进行调节焊枪轴向伸缩机构,通过调整后可以使等离子弧实时处在一段合理的长度范围

内。

## 2.2 三位一体控制系统开发

为建立空间曲线焊缝变极性等离子弧焊接工艺及装备,首先要设计工业机器人与 VPPA 焊接电源的数据通信接口,实现工业机器人系统对焊接电源的控制,从而使得焊接过程的运动参量与焊接工艺参数控制结合起来,为空间曲线焊缝的焊接提供硬件基础。该项目设计变极性等离子弧焊接电源的 DeviceNet 现场总线接口,通过 RS-485 接口的变极性等离子弧焊接电源与 DeviceNet 总线主站进行通信的功能,使变极性等离子弧焊接电源连入 DeviceNet 现场总线网络中,达到控制目的,控制系统硬件系统平台如图4所示。

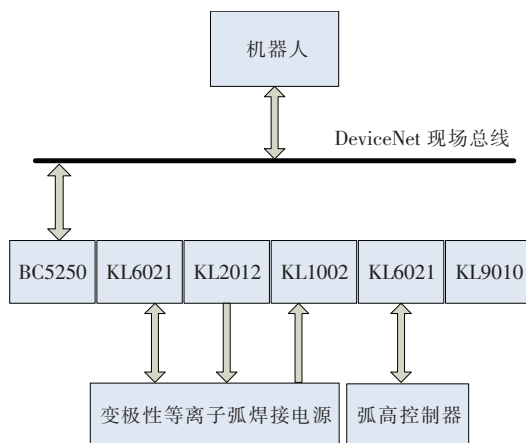


图4 系统硬件平台结构图

以工业机器人作为 DeviceNet 现场总线主站,采用德国 BECKHOFF 总线端子模块控制器 BC5250,串行端子接口模块 KL6021、数字量输出端子模块 KL2012、数字量输入端子模块 KL1002 组成端子式总线系统,作为 DeviceNet 现场总线从站,现场层以变极性等离子弧焊接电源和弧高控制器为主。

## 2.3 多轴联动 VPPA 焊接装备系统集成

采用站立式机器人焊接工作站系统。6 轴机器人安装于三维移动装置上,工件安装于 2 轴变位机。三维移动装置可实现高向( $z$  轴)、横向( $x$  轴)、纵向( $y$  轴)的独立调节,增加机器人移动范围,使其有效焊接范围能够满足产品焊接的要求。通过对 6 轴机器人 + 三维移动装置 + 双轴变位机系统的集成,实现对焊枪与焊缝相对位置的实时控制,使 VPPA 焊枪与焊缝的相对位置在复杂曲线焊缝焊接过程中,始终处于垂直向上的关系。研制完成的多轴联动变极性等离子弧大型自动化焊接装备如图5所示。



图5 多轴联动变极性等离子弧大型自动化焊接装备

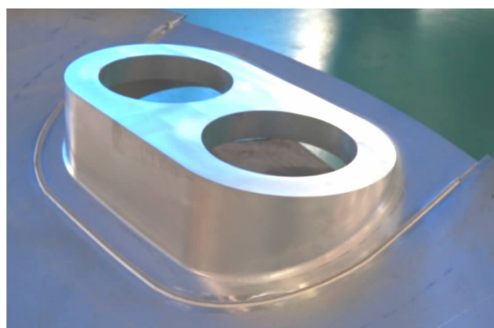


图7 法兰空间曲线焊缝

### 3 实际产品的焊接

#### 3.1 法兰结构产品特点

金属大底是飞船的重要部件,为球冠形结构,其上有两个较大的法兰框,与球形蒙皮焊接连接,焊缝为空间曲线焊缝,在该项目研究之前一直采用手工氩弧焊。焊缝区壁厚 5 mm,手工氩弧焊无法一次焊透,需要双层焊接。焊接容易出现气孔缺陷;热输入大,焊接变形大,难以保证法兰框的形位精度。

#### 3.2 焊接过程

焊接电源为北京工业大学研制的 VPPA-500 变极性等离子弧焊接电源,焊枪为 PWM-300 型等离子弧焊枪,保护气和离子气均为氩气。

钨极内缩量 4 mm,喷嘴口径 3 mm。焊接过程中保证电弧长度 4 mm,焊接速度 0.15 m/min,保护气流量 15 L/min,反极性电流值比正极性电流值大 30 A,正反极性时间比为 21:4。

采用优化后的工艺参数进行焊接试验验证,如图 6 所示。焊接完成后的法兰焊接结构的产品如图 7 所示。焊后,对焊缝进行了外观、漏率和 X 射线无损检测,焊缝内、外部质量应满足航天中 I 级焊缝的要求,焊接接头抗拉强度达到母材强度 96% 以上,焊缝漏率  $< 1.3 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ ,焊缝内部无超标缺陷。

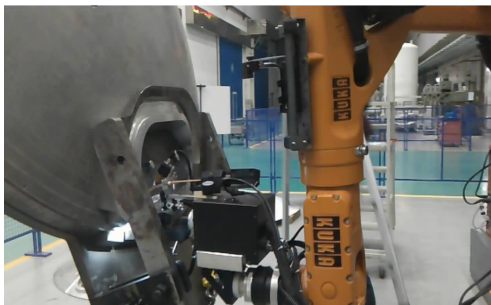


图6 法兰空间曲线焊缝焊接过程

### 4 结论

文中研制了多轴联动变极性等离子弧大型自动化焊接装备,采用现场总线技术完成了 VPPA 焊接控制系统集成,实现了封闭曲线焊缝的全程 VPPA 穿孔焊接;研制了开发变极性等离子弧专用焊接机头,实现自动化焊接过程中“宏观自主,微观可控”的机器回路和人在回路相结合的控制策略。空间曲线焊缝变极性等离子弧机器人焊接系统,能够成功应用于飞船金属密封大底空间曲线焊缝的焊接。

#### 参考文献

- [1] 王继长, 向彦军. 5A06 铝合金薄壁贮箱焊接[J]. 火箭推进, 2010, 36(5): 50-53.
- [2] 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, 42.
- [3] 宋天虎, 刘永华, 陈树君. 关于机器人焊接技术的研发与应用之探讨[J]. 焊接, 2016(8): 1-10.
- [4] 陈利军, 余勇. 基于改进型神经网络的焊接机器人焊枪控制算法研究[J]. 焊接, 2016(6): 56-58.
- [5] 侯仰强, 王天琪, 李天旭, 等. 焊接机器人系统标定技术研究现状[J]. 焊接, 2017(12): 17-22.
- [6] 蒋凡, 李元锋, 陈树君. 焊接电弧监测技术研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 16-26.
- [7] 陈树君, 赵昀, 肖珺, 等. 铝合金电弧熔积成形机器人增材制造系统[J]. 焊接, 2016(4): 9-12.
- [8] 卢振洋, 刘西伟, 陈树君, 等. 复杂空间曲线焊缝 VPPA 专用焊接机头设计[J]. 焊接, 2016(6): 8-12.
- [9] 陈树君, 雷戛, 卢振洋, 等. 基于软 PLC 的变极性等离子弧焊接控制系统[J]. 焊接, 2017(7): 9-12.

作者简介: 章朋田, 1985 年出生, 硕士, 工程师。主要从事自动化焊接装备开发和焊接工艺工作。