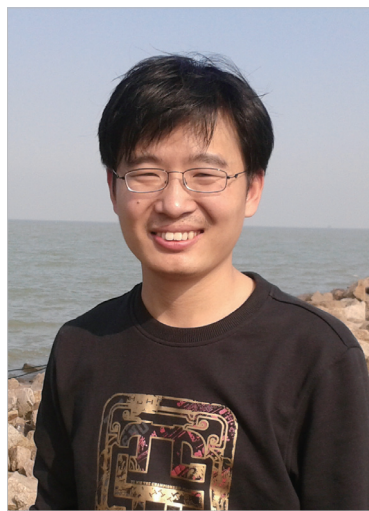


# 蜂窝密封件专用电火花加工 机床研制\*

## Design of Special EDM Machine for Processing of Honeycomb Seal

北京迪蒙数控技术有限责任公司 刘建勇 杨大勇 王荣 任连生 蔡延华  
中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 王德新 王伟



刘建勇

博士,主要研究方向为精密数控电火花加工机床和微细加工技术。

蜂窝密封从20世纪80年代开始就广泛应用于船舶、航空航天等行业<sup>[1-3]</sup>。由于蜂窝密封具有较好的密封特性和较好的转子动力学特性,目前许多先机的叶轮机械都应用蜂窝密封,以提高机组的效率和稳定性,并降低能源消耗。尤其在航空领域,蜂窝密封技术已广泛应用。例如

由于多数蜂窝密封件直径较大,在通用电火花加工设备无法一次性完成全柱面高效率、高精度加工。本文针对蜂窝密封件的结构特点,在结合北京迪蒙数控技术有限责任公司现有技术基础上,研制蜂窝密封件蜂窝群孔外表面加工的专用电火花加工机床。

U-2飞机、F16战机以、歼10战机等飞机的发动机以及很多民用客机的发动机都大量采用了蜂窝密封。应用蜂窝密封后航空飞行器不但增加了推力,降低了燃油消耗,还减轻了振动。

蜂窝密封件的蜂窝群孔(如图1所示)一般是厚度仅为0.05~0.10mm的哈氏耐高温合金薄板在特殊成型设备上制成的正六面体网格型材,再经特殊焊接设备焊接而成,因此材料韧而粘,刚性较差,且蜂窝

密封组件的基体直径大、壁薄。以上这些蜂窝密封件的结构特点使得采用传统的机械切削方法来加工其蜂窝件表面时,被切削的蜂窝孔易因壁厚倒伏而封住或变形,起不到密封的作用。由于电火花加工具有无接触加工的特点,采用电火花加工工艺进行蜂窝群孔外表面加工时,具有加工效率高、蜂窝无变形、无加工毛刺、尺寸精度高等优势。

由于多数蜂窝密封件直径较大,在通用电火花加工设备无法一次

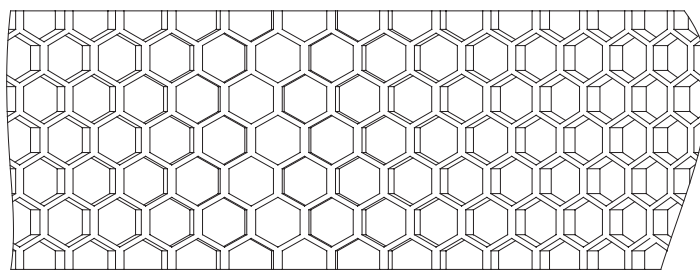


图1 蜂窝密封结构示意图

\* 北京市科学技术研究院科技创新工程项目和2010年度北京市科学技术研究院萌芽项目资助。

性完成全柱面高效率、高精度加工。本文针对蜂窝密封件的结构特点,在结合北京迪蒙数控技术有限公司现有技术基础上,研制蜂窝密封件蜂窝群孔外表面加工的专用电火花加工机床。

### 机床主体结构设计

针对蜂窝密封件结构尺寸较大的技术特点和提高加工效率的需求,本文拟研制的机床主体结构为牛头滑枕式双主轴结构<sup>[4]</sup>,如图2所示。采用该结构可以方便拆卸类似蜂窝密封件这样的大工件,同时双主轴结

制了旋转  $R$  转轴。本文将  $R$  转轴专用附件设计为一体化数控转轴,以方便电极装夹和减少附件更换,进而可提高加工效率。该旋转  $R$  转轴主要有伺服电机、同步带、小同步带轮、背对背角接触球轴承 I、进电环、旋转主轴、轴承支架、大同步带轮、背对背角接触球轴承 II 和  $R$  转轴安装座等组成,如图3所示。该  $R$  转轴结构简单,主轴旋转精度、定位精度和重复定位精度高,能够满足电极的高精度快速旋转加工。

### 一体化精密数控 $R$ 转轴研制

为了充分利用蜂窝群孔外表面加工电极,实现高效精密加工,本文采用了电极高速旋转加工的方式来加工蜂窝密封件。为此,本文专门研

制了旋转  $R$  转轴。本文将  $R$  转轴专用附件设计为一体化数控转轴,以方便电极装夹和减少附件更换,进而可提高加工效率。该旋转  $R$  转轴主要有伺服电机、同步带、小同步带轮、背对背角接触球轴承 I、进电环、旋转主轴、轴承支架、大同步带轮、背对背角接触球轴承 II 和  $R$  转轴安装座等组成,如图3所示。该  $R$  转轴结构简单,主轴旋转精度、定位精度和重复定位精度高,能够满足电极的高精度快速旋转加工。

由于采用了同步带传动形式,本文研制的  $R$  转轴具有以下优点:

- (1) 结构简单、体积小、重量轻,实现了一体化设计,方便了  $R$  转轴的快速安装和拆卸;
- (2) 旋转运动精度高,为蜂窝密封件的精密加工奠定了基础;
- (3) 旋转运动过程中,运动平稳、无冲击、噪声小。

### 高精度旋转工作台设计

为了一次装卡即可实现蜂窝密封件蜂窝群孔外表面的全柱面加工,需要结合蜂窝密封件的结构特点,设计专用的高精度旋转工作台。本文研制的高精度工作台为力矩电机直驱式结构,主要组成部分包括转台转

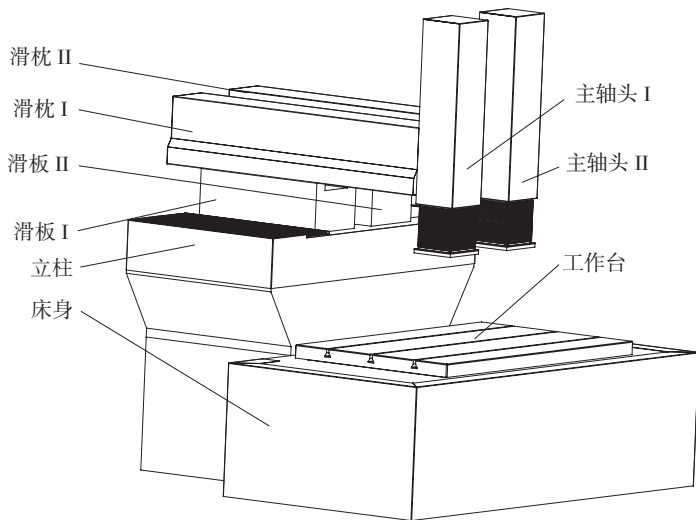


图2 牛头滑枕式双主轴结构机床主体结构

构又可使加工效率高出单主轴机床1倍。

床身和立柱是整个机床的基础支撑件,机床几乎所有零部件的重量,包括立柱、滑座、工作台、主轴头以及外部钣金件等均由床身承载。立柱也承受滑板、滑座和立柱等大构件的重量。作为骨架构件,床身和立柱的主要作用是支撑各运动部件和工作台等,并保证加工时电极和工作台、工件之间的相对位置精度。本文采用的床身和立柱是在北京迪蒙数控技术有限公司现有大型电火花成形加工机床 N218 的基础上研发的。对与该类机床主体构件的结构优化,北京迪蒙数控技术有限公司

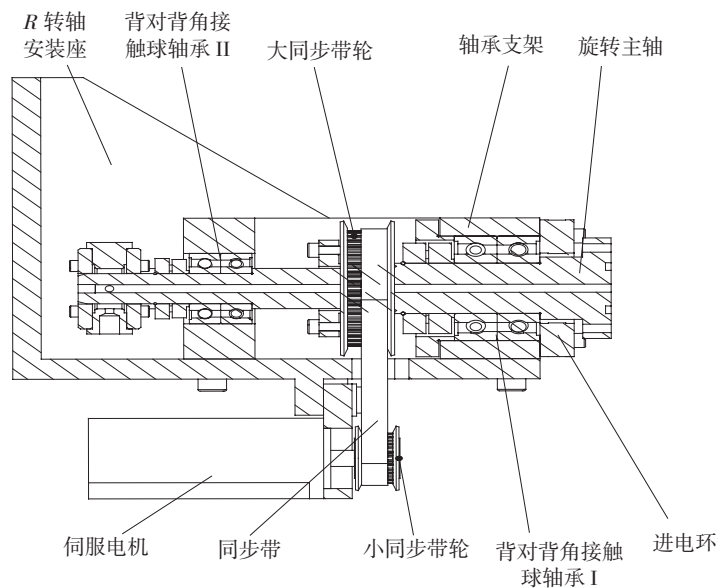


图3 一体化精密数控  $R$  转轴

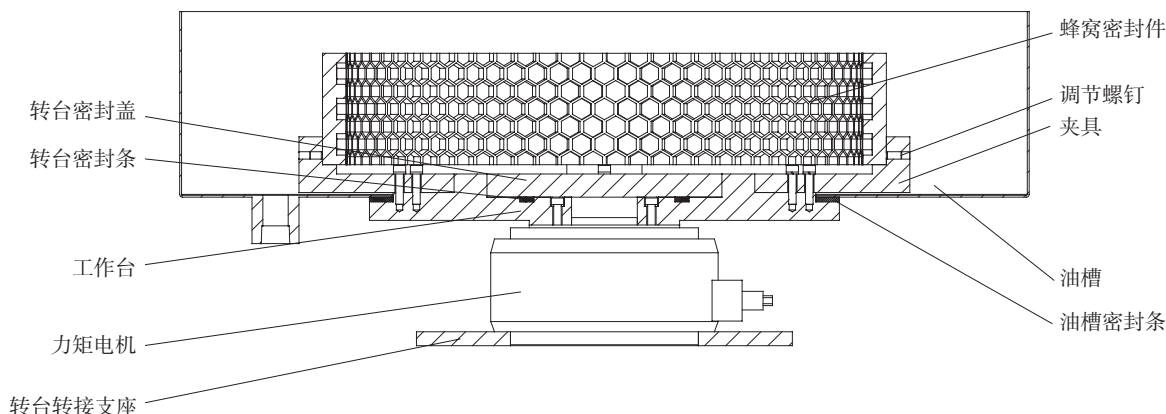


图4 高精度旋转工作台结构示意图

接支座、力矩电机、旋转工作台、转台密封条、转台密封盖、油槽密封条、油槽、夹具、调节螺钉等组成,如图4所示。蜂窝密封件通过夹具固定安装在旋转工作台上,并通过调节螺钉调节其与转台的同心度。通过在工作台面与转台密封盖之间夹持油槽密封条的形式,确保了工作油液与力矩电机的隔离,该密封结构简单,大大降低了旋转工作台的制造难度。作为直驱结构形式的力矩电机,有效保证了旋转工作台的定位精度和重复定位精度。

力矩电机是该机构的核心部件,其旋转精度需要根据蜂窝密封件内圈的加工精度需求确定。由于力矩电机的载荷主要来源于油槽、加工油液、蜂窝密封件、工作台面和转台密封盖,且工作台在工作过程中匀速缓慢运动,因此其承载能力可以通过以下方式进行验算。

设油槽、加工油液、蜂窝密封件、旋转工作台和转台密封盖的质量依次为  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$ 、 $m_5$ ; 转动惯量依次为  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 、 $J_4$ 、 $J_5$ 。

则力矩电机的最大承载载荷为,

$$N_{\max} \geq S_1 g \sum_{i=1}^5 m_i, \quad (1)$$

其中,  $S_1$  为电机承重安全系数;  $g$  为重力加速度,  $9.81\text{m/s}^2$ 。

力矩电机的最大承载转动惯量需满足以下要求:

$$J_{\max} \geq S_1 \sum_{i=1}^5 J_i. \quad (2)$$

本文研制的专用转台采用双位置反馈控制系统,控制系统框图如图5所示。误差控制器  $ER_1$  和  $ER_2$  分别被用于全闭环和半闭环系统中。一阶延时环节的传递函数为  $(1 + \tau_s)^{-1}$ , 可见实际误差  $ER$  主要取决于一阶延时环节中时间常数  $\tau$  的取值: 若  $\tau=0$ , 则  $(1 + \tau_s)^{-1}=1$ ,  $ER=ER_1 + (ER_2 - ER_1) = ER_2$ , 此时该系统处于全闭环控制误差, 从而可以利用全闭环的误差控制方法来消除振动, 提高定位精度; 若  $\tau=\infty$ , 则  $(1 + \tau_s)^{-1}=0$ ,  $ER=ER_1$ , 此时该系统处于半闭环控制误差, 从而可以利用半闭环的误差控制方法来消除振动, 提高系统响应速度。综上所述, 利用双位置反馈可使系统在全闭环和半闭环两种方式下工作, 可大大提高系统的调节范围, 增加系统的调节参数。由时间常数可知, 该系统可在停止状态下进行

全闭环误差调整, 在过渡状态下可进行半闭环调整, 使数控转台既能获得较高的动态响应速度, 又能获得高精度的定位。

### 加工工艺概述

本文研制的蜂窝密封件专用电火花加工机床是将  $R$  转轴 I 和  $R$  转轴 II 分别固定在主轴头 I 和主轴头 II 上, 将电极 I 和电极 II 通过相应的电极夹头固定安装在对应  $R$  转轴的旋转主轴上, 将旋转工作台通过转台转接支座固定在大理石工作台上, 并在旋转工作台下面固定安装接油槽, 接油槽上安装回油管用于将工作液输送到工作液箱内, 在工作台上固定安装进油管用于向油槽内注入工作液。图6是蜂窝密封件专用电火花加工机床布局结构, 图7是实现蜂窝密封件电火花成形加工工艺方法的 N218 双主轴精密数控电火花成形加工机床照片。

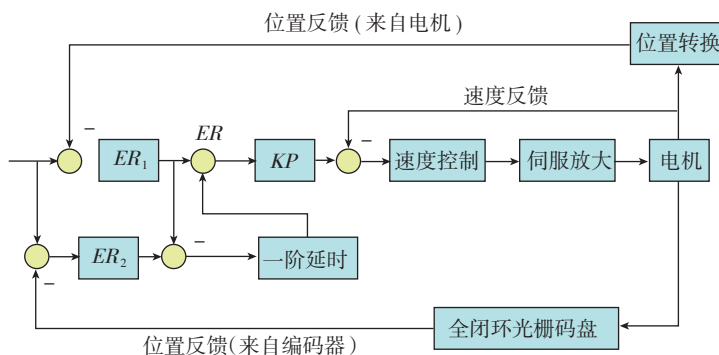


图5 双位置反馈控制原理图

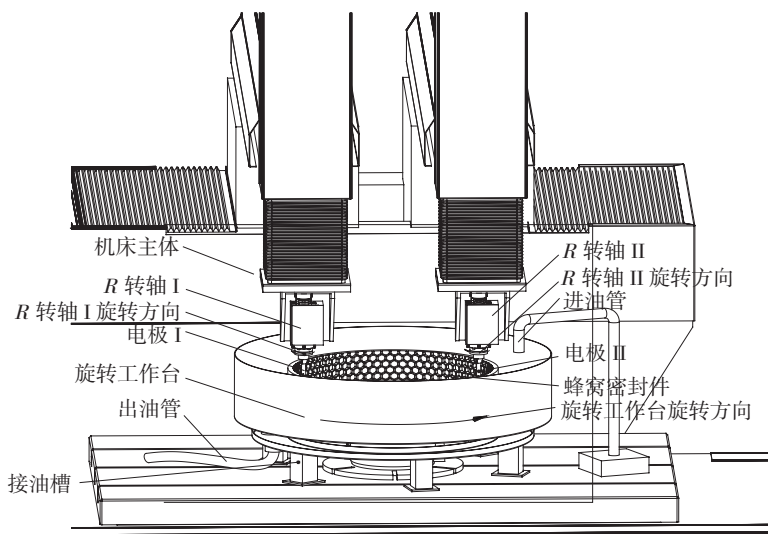


图6 蜂窝密封件专用电火花加工机床布局结构



图7 N218双主轴精密数控电火花成形加工机床

在加工开始前,首先通过夹具将蜂窝密封件固定安装在旋转工作台上,通过调节螺钉将蜂窝密封件与力矩电机的旋转轴线调为同轴状态,随后锁紧蜂窝密封件。然后通过进油管进油,直至蜂窝密封件完全浸没于工作液液面以下给定的距离。随后拧开油槽上的阀堵,让油槽内的工作液注入接油槽,随之工作液通过出油管回流到油箱。在这个工作液循环过程中,须确保工作液液面位置维持不变。

加工程序开始后,主轴头 I 和主轴头 II 通过控制系统运动到相应的加工工位。然后,电极 I 和电极 II 同时对完全浸没于工作液液面以下的蜂窝密封件进行伺服加工。在伺服加工过程中,电极 I 和电极 II 在 R 转轴 I 和 R 转轴 II 的带动下沿图 6 所示的旋转方向匀速旋转,这样可充分利用加工电极并保证加工工况的一致性。在伺服放电加工的同时,旋转工作台沿图 6 所示的运动方向运动,因此而实现了蜂窝密封件蜂窝群

孔外表面的全柱面加工。由于采用了双电极同时加工的加工工艺,使得在旋转工作台旋转 180° 后,即能完成蜂窝密封件的全柱面加工,这使得该机床的加工效率比单主轴头机床提高了 1 倍。在加工过程中,通过进油管不断的将工作液从油箱输送到油槽中,通过出油管将油槽注入到接油槽的工作液不断的输送回油箱,以此确保了加工过程中工作液的流动性,进而可使放电加工始终处于良好状态。

### 结束语

针对蜂窝密封件蜂窝群孔外表面的加工难题,本文研制了其专用电火花加工机床。该机床具有以下技术特点:

(1) 双主轴头同时加工方式,大大提高了加工效率;

(2) 一体化精密数控 R 转轴带动电极旋转加工,有效地改善了排屑条件,提高了加工状态的稳定性;电极旋转加工也使电极损耗均匀,有效地提高了电极使用寿命;

(3) 专用的高精度旋转工作台,密封结构简单、拆装方便,直驱式结构有效保证了加工精度需求。

总之,本文研制的蜂窝密封件专用电火花加工机床结构简单、加工效率和加工精度高,很好地解决了蜂窝密封件蜂窝群孔外部面的加工问题。

### 参考文献

- [1] 何立东,高金吉. 蜂窝密封的封严特性研究. 机械工程学报, 2004, 40(6): 45-48.
- [2] 伍伟,何立东,俞龙,等. 铝蜂窝密封结构设计及性能研究. 中国电机工程学报, 2010, 30(17): 67-73.
- [3] 陈鲜莉. 蜂窝密封的应用. 化工设备与管道, 2009, 46(5): 28-32.
- [4] 曹凤国. 电火花加工技术. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 杨大勇,王大鹏,张海峰,等. 牛头式电火花加工机床重力引发变形的有限元分析. 新技术新工艺, 2011(3): 53-55.

(责编 良辰)