

# 数字化复合加工技术在复合材料构件制造中的应用

## Application of Digital Complex Machining Technology in Composites Structure Manufacturing

中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 张永岩 方 芳



张永岩

研究员级高级工程师,长期从事企业数字化设计制造技术研究,在复合材料构件的工艺设计/制造相关数字化技术应用以及数控加工软件技术研究方面有一定的经验。

随着复合材料在航空制造领域军民用飞机产品上的大量应用,国内外各主要飞机制造商都对自身复合材料构件研制过程中如何改进工艺方法、提升制造效率、提高制造质量以及降低综合制造成本等方面提出了更高的要求,特别是在自动化制造技术迅猛发展和广泛应用的背景下,复合材料构件的加工制造设备和制

当前,复合材料构件制造领域的数字化复合加工技术正在蓬勃地发展,正是有这些先进的复合加工技术的革新和应用,推动了传统的复合材料构件的生产制造模式和手段都发生了巨大的变化,基本形成了全数字化的复合材料构件的加工制造体系装备,体现出了数字化条件下的复合加工技术在传统制造领域创新应用的巨大潜力和优势。

造手段更加趋向于自动化及数字化,向多种技术、多种工艺、多种加工方法融合的数字化复合加工方向发展。

王焱<sup>[1]</sup>对复合加工技术的主要特点进行了一定的描述:复合加工是综合应用机械、光学、化学、电力、磁力、流体和声波等多种能量进行综合加工。复合加工在加工效率、加工精度、加工质量等多方面都具有常规单一加工技术无法比拟的优点。其对复合加工技术的含义论述为,复合加工包含两种含义:一种是以能量或运动方式为基础的不同加工方法的复合;另一种是以工序集中原则为基础的机械加工工艺为主的复合。而当前在复合材料构件制造领域的复合加工技术的应用和发展特点,正

充分体现了以上关于复合加工技术的特点和含义的论述,而且更多地体现出了数字化技术、机械加工技术、超声加工技术等深度结合和融合,使复合材料构件制造技术产生了巨大的改变和深刻的变革。本文结合实际工作中接触的几种最新的复合材料构件数字化复合加工技术的应用情况,概括论述此类关键工艺技术及装备的技术特点以及应用情况。

### 几类典型的先进复合材料构件复合加工工艺技术及装备

#### 1 数字化自动铺放工艺技术及装备

铺放工艺技术的发展经历了样板下料+手工样板铺放、自动套裁下料+手工铺放、自动套裁下料+手工

激光投影辅助铺放并最终实现了集下料、精确定位铺放于一体的单工序自动铺放工艺的典型的复合加工工艺方法,而自动铺带技术是我国能够引进的,并已在我国航空制造领域开始逐步应用最先进的铺放技术。

自动铺带技术是欧美国家广泛发展和应用的自动化成形技术之一,是一种高度复合的集成化工艺制造技术,它集预浸带剪裁、加热、定位、铺叠、压实、切割、缺陷检测、参数及功能控制等于一体,将铺放工人从繁重的手工铺放工作中解脱出来,只需像操作普通数控加工设备一样,铺放出精准的复合材料构件。它涉及自动铺放装备技术、材料技术、预浸料切割技术、铺放 CAD/CAM 技术、自动铺放工艺技术、铺放质量监控、模具设计制造技术等多方面技术。从以下单项描述可见其复合程度(以工序最集中的单工序自动铺放设备为例):

(1) 自动铺放装备技术: 机械系统及数控系统,多轴的自动铺放头、可压力控制调节的灵活的压实组件。

(2) 预浸带预切割技术: 数控超声切割刀片轨迹控制技术。

(3) 铺放 CAD/CAM 技术: 与 CATIA V5 紧密集成,进行铺层设计、铺放编程、废料回收优化、铺放动作控制及优化、多种控制代码生成等。

(4) 自动铺放工艺技术: 与具体产品相关的铺放间隙控制、压力控制以及其他工艺要求。

(5) 铺放工装设计技术: 适于自动铺放的工装设计方法,如边界要求、抗压要求、精确度要求、定位基准要求及是否需要预加热和真空吸附等。

(6) 自动铺放材料体系: 自动铺放一般要求单向预浸带,对材料的可铺放性、粘结性等要求较高。

另外,根据工艺要求的不同,有些自动铺放设备还会附加单独的超声轮廓切割装置,用于对最后铺放完

成的产品进行净切边,自动铺放设备工作状态见图 1。



图1 自动铺放设备

自动铺放技术目前由于单台设备成本昂贵、对铺放材料特性要求特殊以及对铺放产品的形状要求较高等局限,还无法取代激光投影等铺放方式,但其在大型复合材料构件如机翼外蒙皮、垂尾外蒙皮、方向舵外蒙皮等大型产品的制造上还是具有巨大的优势和潜力,必将在我国的航空航天领域发挥巨大作用。

## 2 超声波数控加工技术及装备

我国航空制造企业对于一般纸蜂窝的加工普遍采用依据手工样板用壁纸刀或带锯切割,对于较为复杂的蜂窝产品,开始采用数控五坐标铣削设备进行加工,但仍存在切削效果不稳定,切削效率低,材料易变形、烧蚀及压扁等问题。近几年,多家航空制造企业引进 GFM 公司的超声波数控加工设备,并应用于型号研制中。GFM 典型的超声加工设备为 RMT-50 6 轴超声波振动切削机床,使用硬质合金尖刀和圆片刀等切割刀片,主要用于复合材料铺设时预浸纤维材料的裁剪和下料以及蜂窝(纸蜂窝和铝蜂窝等)结构复合材料的切割和复杂型面加工等。设备配有刀库、激光对刀装置及零件定位和测量装置,主要由床身、工作台、真空平台、3 个直线轴、3 个旋转轴、真空泵、自动刀库、对刀仪、安全护板、数控系统、工

件测量等组成。X、Y、Z、A、C 轴与五轴数控加工中心机床的坐标轴一样,但增加了 B 轴,其为刀具轴(超声头),仅用于刃式刀具角向定向,用刃式刀具加工时, B 轴不旋转仅振动;用盘式刀具加工时, B 轴旋转且振动,设备加工实例见图 2。其多项技术特点体现了其技术和工艺的复合性,主要有:



图2 NOMEX蜂窝构件数控超声加工应用实例

(1) 超声加工是一种集数控机床切割加工和超声振动为一体的复合加工方法,机械刀具铣削及切割为主、超声振动为辅。与普通切割相比,采用超声辅助切割时,切削力小,材料不易变形,可提高切割精度;可以采用高进给速度大幅度提高加工效率;可以减小刀具与工件间的摩擦力,降低切割温度,减小刀具磨损;可解决普通切割加工中粘刀等问题。

(2) 在该类设备上可以配备超声主轴头、气动主轴头,可以安装超声定向切割用刀片、超声旋转切割刀片以及气动切割刀具,能够完成轮廓切割(各种典型倒角面、曲线、圆等)、不等厚度铣、铣台阶及下陷、打磨圆角等,实现工序集中和加工复合。

(3) 配备了专用的真空平台装

置,真空平台为铝质3层结构,台面为4mm左右厚的NOVO材料,能有效实现对展开蜂窝加工的真空吸附。

该类设备已经过工程应用,在针对纸蜂窝及铝蜂窝的加工上与传统的手工带锯切割以及普通数控加工机床都具有无可比拟的优势,加工效率和质量明显提高,产品质量稳定性高,具有独特的技术优势。

### 3 与五轴数控机床组合应用的柔性夹持加工技术及装备

大型复杂飞机复合材料构件外形复杂、尺寸变形大、刚度底、生产批量小。传统的切钻制造方法是固定在切边模具上,手工操作切割设备根据样板及钻模进行切边钻孔,也有制造企业为提高制造质量及效率,而专门设计制造切钻工装并使用数控加工设备进行切钻。前一种制造方式工作劳动强度大,切边精度低,而后一种制造方式需要专用切钻工装,制造成本高、周期长、装夹定位困难。

为实现大型复合材料蒙皮类构件的精确高效切边钻孔,大幅度减少切钻工装的数量,提高制造质量,降低生产准备难度和周期,提高型号研制进度,国外飞机制造商逐渐采用了基于柔性夹持系统的数控切边工艺,该技术的最新发展是基于真空吸盘的可重构柔性夹持系统,并与五轴数控加工设备结合,形成了一套高效的大型蒙皮类复合材料构件的复合式柔性夹持切钻制造系统。典型的产品是西班牙M.Torres公司的M.Torres Tools+M.Torres mill组合,其技术设备特点是:实现工装夹持技术与数控技术的结合,能够通过数字控制和定位模块化、成组的真空吸盘立柱装置,通过编程数据驱动形成与被加工零件型面控制特征点一致的分布点阵,当零件产品发展变化时,通过编程控制吸盘装置即可调整重新形成新的型面布局,能够实现完全数字化的数控切边钻孔功能,对于一些形状相对复杂的部件,M.Torres公司还开

发了多种规格的特殊转换支撑部件,如吸盘能倾斜 $\pm 45^\circ$ 角,实现复杂零部件的吸附定位(图3)。



图3 柔性夹持+数控加工设备

国内多家航空主机厂已引进了M.Torres公司该套加工设备,并在产品研制中得到了应用,该类设备的引进大大提高了我国飞机研制中大型复合材料构件的制造能力和工艺水平。从中航工业哈飞对该设备应用的情况来看,设备能够大量节省夹持吸附工装成本,快速调整夹持方案,保证产品切割质量,对型号的研制起到了至关重要的作用。存在的不足之处是,目前该设备由于采用柔性夹持和数控设备双控制系统设计,无法实现加工过程中的吸盘随动避让,编程及仿真环境也有待进一步提升。另外,大型部件的加工过程中及加工后的检测问题也是今后要结合该设备要开展研究的课题方向。

### 4 其他复合材料构件数字化复合加工技术及装备

除了以上详细讨论的3种复合加工技术和装备外,在当前复合材料构件制造领域,还有如复合材料型材类构件通用加工数控机床、数控缝合机设备、常规复合材料构件数控加工中心等技术和设备用于复合材料型材构件、复合材料编织物缝合成型、板材构件等的铣削钻孔和铈

等。这类数控加工设备通过对常规数控机床加工技术和设备进行必要的改进以适应复合材料构件特点

及加工需要,如对于切削类加工设备,大多增加了灰尘吸附装置、取消了液体冷却装置;对缝合类设备,实现了编织物缝纫机与多轴数控机床运动结构的紧密结合,具备了空间三维的多种缝合方式(暗缝、双面双锁、临缝)能力。通过相关关键技术和装备的研制和工程化应用,使复合材料构件的研制能力得到突

破,整体制造水平显著提高,实现了大型复杂复合材料构件的高速度、高精度和高效率制造。

## 结束语

当前,复合材料构件制造领域的数字化复合加工技术正在蓬勃地发展,正是有这些先进的复合加工技术的革新和应用,推动了传统的复合材料构件的生产制造模式和手段都发生了巨大的变化,基本形成了全数字化的复合材料构件的加工制造体系装备,体现出了数字化条件下的复合加工技术在传统制造领域创新应用的巨大潜力和优势。今后,复合材料构件的加工制造技术和装备将朝着更大工艺范围、更加工序集中、更快制造效率和更高制造质量方向发展,应该积极开展相关关键技术装备的引进、研究和消化吸收工作,进一步推进我国航空制造业复合材料构件制造水平的能力提升。

## 参考文献

- [1] 王焱. 复合加工的常见形式及其典型应用. 航空制造技术, 2012(16):40-43.

(责编 良辰)