

# 复合加工技术在航空复杂零件加工中的应用

## Application of Complex Machining Technology in Aircraft Complicated Part

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 赵明 王兴林 金耀兴



赵明

高级工程师,任职于中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司科研试制快速反应中心,担任机匣专业技术带头人,现从事航空发动机机匣等零件加工工艺研究,主要研究方向为机匣等零件高效加工、变形控制、在线测量等技术。

随着新一代飞机对航空发动机性能要求的不断提高,国外有关资料介绍第五代飞机发动机推重比将达到15~20,涡轮前温度超过1700℃以上,高性能发动机大量采用了复杂整体薄壁结构、难加工材料,如整体叶盘、化学铣结构的机匣、盘轴一体化转子、单晶定向叶片、钛铝合金及陶瓷基复合材料等。航空发动机复

合加工技术在航空发动机制造领域广泛应用,解决了复杂结构零件、难加工材料加工难题,如:采用振动钻孔、振动攻丝解决了细长孔加工难题,采用振动光饰解决叶片表面抛光难题;采用镗铣、车铣复合多功能加工中心实现了多工序集中复合加工,减少了工序周转和辅助加工时间,减少了人为干预,提高了自动化加工水平,为加工过程全程序化控制奠定了基础,保证了零件加工质量的稳定性和可靠性。

杂整体薄壁结构、难加工材料零件加工成为发动机制造的关键所在,采用传统的单一加工方法已经难以解决航空发动机复杂机匣、整体叶盘、整体叶环和盘轴一体化结构复杂零件的加工难题。航空难加工材料的广泛应用给传统的加工方法带来了严峻的挑战,传统的去除材料机械加工方法难以满足工艺要求,特种加工方法、复合加工技术在航空难加工材料加工中起了重要作用。复合加工技术不再局限于冷热加工方法的划分、去除材料方式的加工,而是综合利用多种能量,如机械能、热能、电能和化学能等,实现难加工脆硬材料的高精度、高效率加工。现代化装备制造业

的发展,使得大量多功能、复合加工机床在各行业广泛应用,镗铣、车铣加工中心实现了多工序的复合,大幅提高了加工效率和自动化加工水平,实现了航空发动机典型零件高效、精密、柔性化、自动化加工。

### 复合加工技术的内涵

#### 1 复合加工技术的定义

复合加工技术是将多种加工方法融合在一起,充分发挥各自的优势,互为补充,同时在加工过程起作用,能够在一道工序内、使用1台多功能设备,实现多种加工方法的集成加工。一方面,基于电场控制、溶解与切削相结合的复合加工技术可以

实现高效光整、高效精密模具成形加工或光整及精密模具成形的一体化加工。另一方面,复合加工技术依托强大的设备功能,将多种加工工序合并在一起,不仅能够实现不同机械加工方法的复合加工,而且还能够实现机械加工方法与特种加工方法的复合加工。复合加工技术包括电化学机械复合加工技术,化学机械加工技术,超声放电复合加工技术,时变场控制、磁场辅助的电化学及电化学机械复合加工技术,时变场控制的电解在线修整砂轮磨削加工技术,时变场控制电化学及磁粒研磨的复合加工技术等。

## 2 复合加工技术的种类

(1) 传统机械加工方法的复合加工。

· 钻、镗、铣复合加工。

镗铣复合加工中心是集钻、镗、铰、攻丝和铣加工功能为一体的高精度、多功能加工中心,不仅具有坐标镗的高精度,而且具备较高的刚性和主轴转速,能够实现航空发动机机匣类零件外型铣削和定位孔的钻镗复合加工。

· 卧式车铣复合加工。

车铣复合加工中心是集车削和镗铣加工为一体多功能复合加工中心,旋转工作台不仅具有车加工需要的高转速、高扭矩,而且具备铣加工要求的高精度分度功能,配备刚性铣头,能够安装车刀、铣刀、镗刀和测头的多种工具,能够实现自动换刀车铣复合加工。车铣复合加工中心以车加工为主,在进行零件主要型面车加工的同时,辅助完成定位孔、安装孔、键槽和凸台的镗铣加工,实现工序集中、保持较好的加工一致性,有利于提高加工效率,实现加工过程自动化。

· 立式铣车复合加工。

铣车复合加工中心是以铣加工功能为主的铣、车一体结构的复合加工中心,该设备采用高速直线驱动电

机,具有较高的主轴刚性和转速,旋转工作台具有较高的定位精度,并且具备大扭矩和高转速的特点,不仅能进行航空难切削材料高速、高效铣削加工,而且能够进行内、外圆车加工,适合航空发动机机匣等零件铣车复合集约式加工。

(2) 特种加工方法的复合加工。

· 电火花铣复合加工。

电火花铣是在电火花放电产生的高能热的基础上,采用铣削加工刀具运动方式,以去除材料为目的加工方法。电火花铣加工工具是管状电极,电极高速旋转,进行直线或圆弧插补运动,能够实现复杂曲面仿型加工。与传统铣加工相比,电火花铣没有切削力,适合薄壁零件加工;没有刀具消耗,电极损耗费用比刀具消耗费用小得多,节约大量刀具费用;电火花铣机床与加工中心设备费用相差很多,使用电火花铣会大幅降低加工成本。

· 电火花磨复合加工。

电火花磨削实质上是运用磨削加工的形式进行电火花加工,工具电极和工件各自作回转运动,使工具电极与工件有相对回转运动。电极局部放电,径向进给实现磨削方式的加工,电极损耗可以通过进给予以补偿。对放电间隙进行伺服控制,保持加工间隙。如 REDM-100 型电火花磨床,主轴头沿垂直方向或水平方向作单轴伺服进给,而工件安装在水平工作台上作定速旋转来实现电火花磨削加工。

· 化学铣复合加工。

化学铣是将金属坯料浸没在化学腐蚀溶液中,利用溶液的腐蚀作用去除表面金属的工艺方法<sup>[1]</sup>。化学铣切已经成为现代航空航天工业中广泛应用的一种特种加工工艺。化学铣切工艺过程是:将金属零件清洗除油,在表面上涂覆能够抵抗腐蚀溶液作用的可剥性保护涂料,经室温或高温固化后进行刻形,然后将涂覆

于需要铣切加工部位的保护涂料剥离。

(3) 传统加工方法与特种加工方法的复合加工。

· 化学机械复合加工。

化学机械复合加工是指化学加工方法与机械加工方法的综合,利用化学腐蚀机理,结合机械振动、磨削、铣削等机械加工方法,实现脆硬难加工材料、薄壁复杂结构零件,高效、高精度加工。包括:化学铣、化学机械振动抛光等。

· 加热辅助切削复合加工。

加热辅助切削是通过对加工零件表面局部瞬间加热,改变零件加工部位局部表层材料物理、力学性能,降低加工表面机械强度、表层硬度,改善零件加工性能,降低刀具磨损,延长刀具使用寿命,提高加工效率,保证加工质量<sup>[2]</sup>。

· 超声振动辅助切削复合加工。

超声振动辅助切削复合加工是难加工材料、细长孔等复杂结构零件加工的一种有效加工方法,其机理是加工刀具或工具以适当的方向、一定的频率和振幅振动,以脉冲式进给方式切削零件,从而改善加工工况及断屑条件,通过连续有规律的脉冲切削减少切削力、降低切削变形、消除加工自激振动,达到提高加工精度,延长刀具使用寿命的目的。

## 3 复合加工技术的应用范围

复合加工技术在航空发动机零件加工领域主要应用于两个方面:(1) 难加工脆硬材料和复杂薄壁弱刚性结构零件加工,如:陶瓷基复合材料、超硬合金材料、蜂窝结构薄壁零件、化学铣结构机匣等零件;(2) 多工序集成、自动化加工,航空发动机机匣、整体叶盘等零件结构复杂、加工特征多、加工余量大,高压压气机前机匣有数百个叶片安装孔,采用普通的钻、扩、镗、铰分工步加工方法,存在加工效率低、一致性差等问题。可以采用复合刀具实现钻、扩、

镗、铰多工步复合加工,节省安装调试刀具等辅助加工时间,能够提高加工效率,提高加工自动化程度。

## 复合加工技术在航空复杂零件加工中的应用

### 1 车铣复合加工技术的应用

航空发动机轴类及盘轴一体化零件有许多键槽、孔、花边等加工特征,不仅需要车加工,而且还需要镗铣加工,传统的加工方法采用车加工和镗铣加工分工序独立完成,存在二次装夹找正定位误差,影响加工精度和效率,车铣复合加工如图1所示。

#### (1) 传统加工工艺路线。

毛料图表→修前端基准→粗车后端→粗车前端→超声波检查→半精车后端→半精车前端→热处理→修前端基准→细车后端→细车前端→清洗→腐蚀检查→清洗→精车后端→精车前端→镗后端孔并铣键槽→镗径向孔并铣键槽→中间检验→喷丸强化→喷涂→车磨涂层→平衡→最终检验。

#### (2) 车铣复合加工工艺路线。

毛料图表→修前端基准→粗车后端→粗车前端→超声波检查→半精车后端→半精车前端→热处理→修前端基准→细车后端→细车前端→清洗→腐蚀检查→清洗→精车后端并镗孔→精车前端并镗孔→中间检验→喷丸强化→喷涂→车磨涂层→平衡→最终检验。

#### (3) 车铣复合加工的优势。

与传统加工方法相比,车铣复合加工工艺工序更为集中,加工自动化程度更高,减少工序间周转时间,降低了重复装夹找正时间,提高了加工效率,同时避免了重复装夹定位的精度误差,有利于保证加工精度。

### 2 铣车复合加工技术的应用

铣车复合加工技术常用于机匣等大型薄壁壳体类零件(如图2所示),该类零件因尺寸大、壁厚薄,车加工后零件容易产生变形,通常机匣

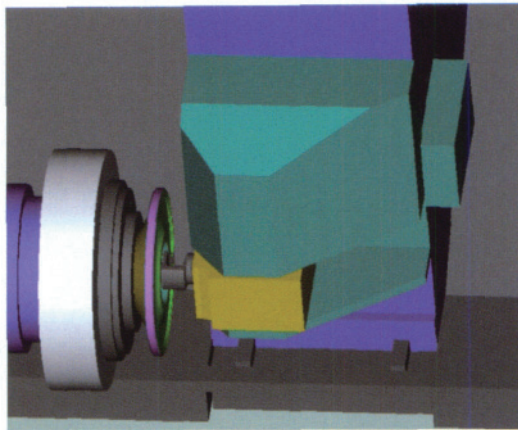


图1 盘轴一体结构零件车铣复合加工

外型铣加工和孔加工安排在车加工后进行,但是因薄壁机匣变形,二次装夹、找正极为困难,采用内涨夹具,效果也不理想,并且存在加工成本高、加工效率低、加工质量难保证等问题。



图2 铣车复合加工机匣

在薄壁机匣加工中,采用立式铣车复合加工中心设备,将薄壁机匣内型车削加工、外型铣削加工、导向叶片安装孔、探视孔和安装边定位连接孔钻、扩、镗、铰,多种加工工序合并在一道加工工序,实现车、铣、钻镗复合加工,能够达到节省刀具、夹具,提高加工效率,保证加工质量等目的。具有如下优点:

(1) 采用铣车复合加工方法合并加工工序,缩短工艺路线,提高加工效率。

(2) 将机匣内腔车加工、外型铣加工和孔加工合并为一道加工工序,能够节省2套夹具。

(3) 消除二次装夹、找正误差,有利于保证机匣壁厚尺寸和孔位置度合格。

(4) 在机匣内腔车削加工中,利用五轴加工刀具摆动功能,实现一把刀加工多表面,消除接刀痕迹,提高表面质量,节省专用刀具,降低刀具消耗。

(5) 将机匣内腔车加工、外型铣加工和孔加工合并为一道加工工序,减少了

装夹、找正等辅助加工时间和人工干预程度,有利于通过数控程序控制,提高加工过程自动化水平。

### 3 电火花铣复合加工技术的应用

电火花铣常用于机匣、整体叶盘类零件粗加工,零件特点是毛坯余量大、材料难加工,采用数控铣加工加工周期长、刀具消耗大。采用电火花铣加工方法,能够节省较高的刀具费用,并且因电火花铣加工几乎没有切削力,不需要复杂的夹具支撑,通常结构简单、凸台较少的机匣更适合电火花铣加工,如图3所示。

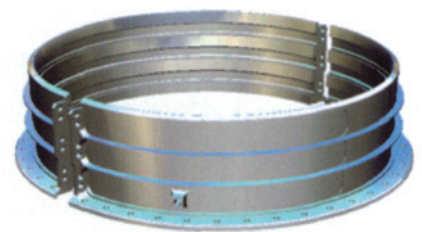


图3 电火花铣复合加工机匣

电火花铣加工路线与数控铣有较大的差别,编制机匣电火花铣加工程序需注意铜管电极端部放电造成零件根部过切,通常在零件根部和拐角处留有适当的余量;在电火花铣加工中,电极的损耗是必须考虑的事情,需要及时电极补偿,否则会造成加工余量不均等问题;电火花铣参数设置是电火花铣加工工艺的关键,合理的设置电火花铣参数能够保证加工质量、减少电极消耗,通常



图4 化学铣结构零件特征

需要针对不同材料进行充分的试验,才能合理设置电火花铣工艺参数。

#### 4 化学铣加工技术的应用

化学铣复合加工技术常用于薄壁、带有多重筋肋的弱刚性机匣等结构件加工。化学铣结构零件特征见图4,该类零件壁薄、易变形,材料去除量大,加工周期长,刀具消耗大。采用化学铣加工方法,涂覆抗腐蚀可剥落涂料,将零件非加工表面保护起来,利用化学腐蚀液去除零件材料。化学铣的优点是一次加工面积大,加工效率高;化学铣加工几乎没有加工应力,加工变形小;化学铣加工不需要加工刀具,节省大量刀具费用;化学铣设备小时费用远远小于五坐标加工中心,能够节省大量工时费用。一般而言,采用铣削、磨削等机械加工方法,加工切削力大,被加工表面易产生变质层,影响零件的表面质量;相比之下,化学铣加工效率高,不存在工具损耗且无切削力,被加工零件表面质量好。

#### 5 电火花磨复合加工技术的应用

导向器组件都是大尺寸的薄壁件,刚性很差,其蜂窝内表面的粗糙度和尺寸要求较高。采用车削和磨削加工,加工表面的蜂窝孔壁翻卷,产生大量毛刺,将孔眼堵塞难以清除,不能满足零件表面的要求,针对蜂窝件结构的特点采用电火花磨削和电解磨加工工艺最适宜<sup>[3]</sup>。

导向器蜂窝件待加工面为大直

径孔或阶梯孔,加工余量小于3mm,且沿圆周各处加工余量分布不均匀,有时相差较大,在径向进给电火花磨削加工时零件作自主转动,电极沿零件作全孔深径向进给。加工时,电极与零件间的放电间隙通过伺服控制保持相对稳定,这种方式类似仿形车、磨加工,在加工中仿照被加工孔原有的形状,作径

向跟踪仿形扩大加工。

#### 6 电火花打孔加工技术的应用

航空发动机燃烧室火焰筒类零件带有许多气膜孔,多达数百上千个,并且都是直径1mm左右的微小孔,采用传统机械加工方法很难加工。火焰筒内壁为薄壁易变形机匣零件,属于航空发动机高温部件,采用高温合金材料,零件最大外径 $\phi$ 为740.7mm,高为92mm,最小壁厚为1~0.25mm,零件分布气膜孔为空间斜孔,包括:532处 $\phi$ 1+0.1mm、196处 $\phi$ 1.1+0.1mm、336处 $\phi$ 1.2+0.1mm的空间孔。采用机械加工的方法加工孔径在 $\phi$ 2mm以下的小孔时,加工过程中钻头容易断裂,很难保证技术要求,特别是在机匣斜壁处钻孔,由于切削力的作用,钻头往往偏离实际加工位置。采用电火花设备加工孔,加工直径最小达到0.3mm,而且可以采用多轴同时加工,大幅度提高加工效率。

### 复合加工技术的发展趋势

随着科学技术的发展,新产品、新材料不断推出,为适应新型复杂结构、难加工材料加工的需求,现代加工技术已经不是单一的学科技术,现代加工技术逐渐趋向于多元化、多功能、自动化、柔性化方向发展。绿色环保是现代加工技术的基本要求,现代加工技术更关注于加工精度、加工效率、加工质量和加工成本。而实现

高精度、高效率、低成本的途径就是多种加工技术综合和集成,现代许多先进加工技术是多学科、不同加工方法复合的结果,包括:传统加工技术中不同加工方法的复合、机械加工与电加工的复合、化学加工与电加工的复合等。复合加工技术已经成为解决航空难加工材料、复杂薄壁结构零件加工,实现加工过程自动化,提高加工效率的重要途径。航空发动机制造技术被称为制造技术的明珠,航空发动机零件加工中采用了大量复合加工技术,复合加工技术的发展不断追求高精度、高效率、低成本的目标,复合加工技术不再局限于特种加工技术的复合,已经发展到不同种类加工技术的复合,复合加工技术的发展体现在以下几个方面:趋向于多元化和多样性、精密加工和超精密加工、多功能和自动化方向发展、绿色和环保方向发展、多学科技术方向发展,冷热结合、去除材料和增加材料相结合、多工序复合加工是复合加工技术的发展趋势。

### 结束语

复合加工技术在航空发动机制造领域广泛应用,解决了复杂结构零件、难加工材料加工难题,如:采用振动钻孔、振动攻丝解决了细长孔加工难题,采用振动光饰解决叶片表面抛光难题;采用镗铣、车铣复合多功能加工中心实现了多工序集中复合加工,减少了工序周转和辅助加工时间,减少了人为干预,提高了自动化加工水平,为加工过程全程序化控制奠定了基础,保证了零件加工质量的稳定性和可靠性。

### 参考文献

- [1] 张建华,张勤河,贾志新.复合加工技术.北京:化学工业出版社.2005.
- [2] 左敦稳,黎向锋,赵剑峰.现代加工技术.北京:北京航空航天大学出版社.2009.
- [3] 王聪梅.现代加工技术.北京:科学出版社出版.2002.

(责编 小城)