

# 复合加工技术在航空发动机 零件制造中的应用

## Application of Complex Machining Technology in Aeroengine Part Manufacturing

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 胡晓群 李家永 韩德印 刘丹



胡晓群

研究员级高级工程师,先后主持和参与多项航空发动机零部件研制、高效数控加工技术和数控设备改造科研课题。主要研究方向为航空发动机零件精密加工工艺、数控高效加工技术研究。

航空发动机制造是一个国家制造业的典型代表。它集制造业的设计、工艺、材料、加工、质量控制等领域的高、精、尖技术为一体,具有承受载荷大、结构形状复杂、数量种类多、制造精度高、质量要求严、加工难度大等特点。其中的重要零部件制造是集新材料切削技术、适应新型结构零件的新工艺、刀具制造技术、多轴数控编程及优化处理技术、虚拟仿真

复合加工技术为保证航空发动机复杂结构零件的加工质量、提高加工效率、降低生产成本、简化工艺流程、缩短新产品的研制周期,提供了一个切实可行的方法。但是复合加工,应综合考虑零件的精度、结构复杂性和加工成本的性价比,毕竟具有复合加工功能的机床目前仍属于高端设备,资源较少。

技术、切削变形控制技术、型面精确检测技术和无损探伤等前沿技术于一体的多方位、多种技术的交叉综合研究与应用。

复合加工技术主要解决2方面的问题:特殊结构与复杂结构的加工、难加工材料及脆硬材料的加工。复合加工的主要特点是综合应用机械、光学、化学、电力、磁力流体和声波等多种能量进行综合加工,在提高加工效率和生产效率的同时,兼顾加工精度、加工表面质量及工具损耗等,具有常规单一加工技术无法比拟的优点<sup>[1]</sup>。

### 航空发动机制造对复合加工 技术的需求分析

目前航空发动机制造工艺过程中应用较为广泛的复合加工技术有

以下2种:(1)基于工序集中原则,以多种机械加工工艺为主的复合加工技术。例如:车削、铣削、磨削、钻削、镗削和绞削等工艺,其中的部分工艺可以一次性装夹完成。(2)特种加工方法与切削、磨削组合,去除材料工艺方式的复合。例如:激光、电火花和超声波等特种加工方法与切削、磨削的组合。

以机械加工工艺为主的复合加工,是指零件在机床上仅用一次装夹便可完成多种机加工工艺的加工。特别适用于零件进入精加工阶段后,在一个工位上完成精车、精铣、钻、镗、绞、攻丝多工序的连续加工。这种加工具有消除重复装夹定位误差、提高加工精度、缩短零件的生产周期、减少工装数量、简化工艺流程等优越性,这是单一功能机床加工无法实现的。

对实现工序集中复合加工技术,应用较多的有五轴车铣复合加工中心和五轴铣车复合加工中心 2 种典型的机床。五轴车铣加工中心以车削功能为主,同时集成了铣削和镗削等功能。机床有 3 个直线运动轴 X、Y、Z 和 2 个圆周旋转轴 A、B 或 B、C,配有刀具自动交换装置和刀库<sup>[1]</sup>。在车削中心基础上增添用于回转刀具的切削装置发展而成,其功能相当于 1 台车削中心和 1 台加工中心的复合,典型代表有奥地利 WFL 卧式车铣复合加工中心。适合加工航空发动机盘、轴和中小结构类零件,这类零件以车削为主导工艺、车削部位形位公差精度高,车削去除材料量大。

五轴铣车复合加工中心则以铣削功能为主,除了具备加工中心原有的五轴运动功能外,在加工中心的基础之上又增加了使工件回转的驱动装置。相当于 1 台加工中心和 1 台车削中心的复合。适合加工航空发动机零件中的机匣、叶盘类零件。这类零件以铣削为主导工艺,铣削工艺去除材料量大于车削工艺,铣削工艺比车削工艺复杂程度高。零件结构复杂,使得对机床的铣削功能要求较高。例如第五轴(A 或 B)要有较宽的摆动范围;主轴可以立式、卧式转换,不仅可以加工轴向端面孔,也可以加工与发动机轴线垂直的径向孔或成一定角度的斜孔。较为典型的有德国 DMG 铣车复合加工中心。

## 复合加工技术在航空发动机部分零件中的应用

航空发动机零件的整体化、结构化、轻量化是大推比发动机的重要设计特性之一。整体结构件具有减重、减级、增效并提高可靠性的优点,符合航空发动机零部件易维护、高可靠性和长寿命的服役需求。例如将压气机盘和轴颈设计为一体的压气机盘,将转子叶片和压气机盘设计为一体的整体叶盘等。整体结构零件结构复杂,

和原单体零件相比装夹定位效果明显削弱,使得零件刚性减弱,加工中容易产生振颤。因而加工中零件个别部位容易产生变形,几何尺寸和表面质量受到一定程度影响。单体叶片加工时可以夹紧叶片的轴颈部位,同时用顶尖顶住叶冠,一个方向夹紧,一个方向支撑。整体叶盘铣削叶片时只能以夹紧轮毂的前后缘板,叶冠无支撑,叶片在悬臂状态下加工,工艺性明显劣于单体叶片。因此整体结构零件基本上融合了原来两个单体零件,盘和叶片的加工难度。

整体叶盘和机匣类零件是公认的航空发动机制造中难度最大的零件之一。其工艺流程复杂既包含常见的机械加工车、铣、钻、镗、绞、磨,又包括了特种加工如喷涂、喷丸、热处理等,工艺流程长达几十或数百道工序,如图 1 所示。

整体叶盘类零件可以应用铣车复合加工中心,叶身型面铣削加工,轮盘表面的精车加工,以及进、排气两端的精密连接孔加工可以同时集中在一台机床上加工。同理,机匣类零件也可以将机匣外型面铣削和内

型腔的车削以及前后端面精密连接孔钻、镗加工,同时在铣车复合加工中心上集中完成。加工结束后,可以应用机床上配备的在线测量功能,检查加工结果,形成加工、测量一体化。这类机床应该具备立式、卧式转换功能,其中铣削以卧式加工为主,车削则以立式加工为主。

由若干级压气机盘装配而成的转子,可以在配备了动力磨削头的车加工中心上,精修圆周径向基准后,在车削装夹定位基础之上,立即磨削各级叶片叶冠端面,是应用复合加工的又一实例。

车铣复合加工中心适合加工以车削工艺为主,铣削工艺为辅的零件。五轴车铣复合加工中心的 B 轴摆头车削技术,对于加工航空发动机零件中一些形状复杂的半封闭型腔凸显出相当大的优势,是近年来发展较快的新技术。一些机床厂家已经将该项功能作为出售机床的标准配置之一。图 2 所示为车铣加工中心 B 轴。

B 轴摆头车削特别适合加工压气机盘、轴颈一体结构盘类零件和

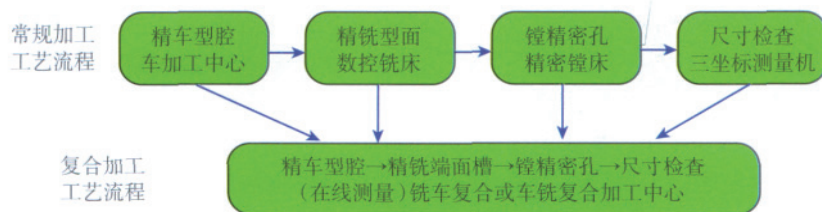


图1 常规加工与复合加工工艺流程对比

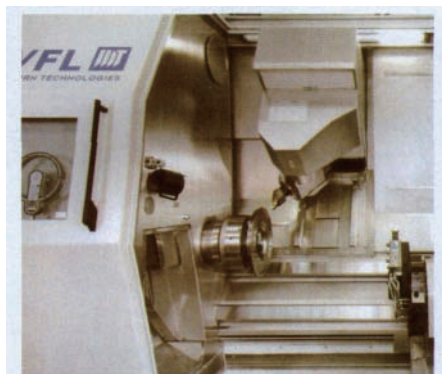


图2 车铣加工中心B轴

进、气排边双侧带篦齿环的整体叶盘类零件。这类零件的结构特点是:辐板长、型腔狭小、盘心孔部位刀具入口处狭窄、内腔底部变宽,辐板与盘心孔的高度差较大。加工难点在于薄壁结构加工中容易受切削力影响产生变形,且封闭腔切削中刀具和内腔型面容易产生碰撞、干涉。特别是干涉的处理,成为能否加工出完整、准确型腔的重要前提。通常要请刀

具制造工程师设计特殊形状的非标刀具,致使刀具成本几乎增加一倍,对企业来说是一个不小的负担。封闭内型腔结构在常规车加工中心上加工,需要3把非标刀具才能将型面全部加工完成,其运动方向和切削区域如图3所示。应用了车铣复合加工中心B轴摆头车功能后,型腔用如图4所示的2把刀具加工就可以完全覆盖整个区域。

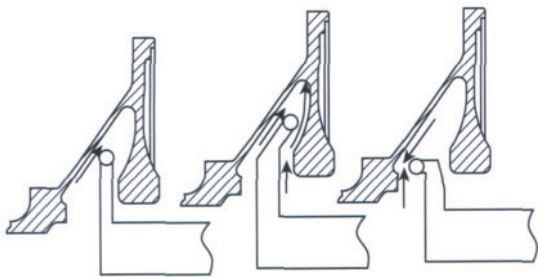


图3 常规车加工中心车削封闭腔

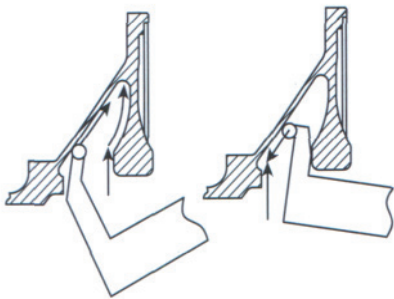


图4 车铣复合B轴摆头车削封闭腔

当引入B轴车削加工技术时,利用B轴在车削中可以摆头的功能,使铣削主轴头带动刀具同步摆动,使得车刀杆轴线随着加工部位的变化逐渐地调整其与型腔之间的角度,最大限度利用型腔的有限空间,拓展了每一把刀的运动方位,弥补了常规车削中刀杆固定不动的不足,减少了不同刀具换刀加工所产生的接刀痕,改善了表面质量,这一点在发动机零件的加工中尤为重要。

从某种意义上说,数控车床的诞生使得车削非线性曲面变得轻而易举,而B轴摆头车削技术的诞生使得复杂结构零件的车削工艺能力得到极大的提升。

以能量复合为基础的复合加工技术应用了多种形式的能量综合作用来实现材料的去除<sup>[1]</sup>,提高了难加工材料、难加工结构的加工效率和加工质量。

高温合金属于难加工材料,也是航空发动机零件常用材料之一。高温合金切削时产生的切削力大、切削温度高,造成工件热变形,使尺寸和形状精度发生变化。同时加工中冷硬现象严重,导致刀具磨损加剧。高温合金零件的加工普遍存在加工成本较高、加工周期较长的特点。特别是高温合金材料的整体叶盘,加工中需要切削掉的材料占整体毛坯锻件的90%左右。当刀具直径小于 $\phi 8\text{mm}$ 时,刀具系统刚性迅速减弱,进

给降幅较大,加工中容易出现断刀现象,影响零件的表面质量。我公司针对难加工材料的开展了特种工艺加工研究。对高温合金材料的整体叶盘和机匣,采用电火花仿型铣工艺进行粗加工,取代数控铣削的方法去除流道部位大部分材料。以叶盘为例,粗开槽加工时,采用棒状电极,分别给叶盆和叶背预留一定余量。然后进行五坐标铣削,即将电火花加工后的叶片进行光整加工,使叶身各处余量均匀,给后续精铣加工奠定基础。同直径电极的造价远远低于硬质合金刀具,其价位还不到硬质合金刀具的十分之一。与加工中心相比,电火花机床小时折旧费用也低。

复合加工工艺注意要点:(1)防止加工中出现干涉。由于车铣复合加工中心增加了铣削加工时的主轴刀具回转功能,使其不同于原来车床的滑枕加刀夹结构,显得较为庞大。在加工零件时,必须要考虑是否会与零件、夹具、机床工作台(或转盘)产生干涉与碰撞。解决的方法是,应用几何虚拟仿真技术,虚拟仿真软件环境建立零件、夹具、机床工作台(或转

盘)和机床铣削主轴准确的三维数据模型,运行数控加工程序,检查刀具轨迹是否过切,判断铣削主轴是否与零件、夹具以及工作台干涉,并根据干涉具体情况采取有效措施予以调整,通过加长刀具刀杆的长度,抬高夹具的高度,使铣削主轴有足够的运动行程空间。(2)工艺路线编排合理。车铣复合或铣车复合工序尽量安排在零件的精加工阶段,也即零件的最终成形加工阶段。粗加工或半精加工工序安排在常规设备上进行。这样既可以规避高端设备资源紧张的情况,又最大化的将车、铣、钻、镗等多个工艺集中,一次性加工完成工件大部分加工,提高零件的加工精度。

## 结束语

复合加工技术为保证航空发动机复杂结构零件的加工质量、提高加工效率、降低生产成本、简化工艺流程、缩短新产品的研制周期,提供了一个可行的方法。但是复合加工,应综合考虑零件的精度、结构复杂性和加工成本的性价比,毕竟具有复合加工功能的机床目前仍属于高端设备,资源较少。展望国家航空业的发展前景,加快研制民用大飞机、大推比发动机步伐,实现航空发动机行业长期可持续发展,是企业追求的重要战略目标。在市场竞争日益激烈的今天,一个新产品研发周期的长短,是衡量企业综合实力的体现,因此复合加工技术具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] 王焱. 复合加工制造技术在航空结构件制造中的应用. 航空制造技术, 2009(12): 40-43.
- [2] 李德珍, 李宪凯. 五轴车铣复合加工技术的现状与发展趋势. 航空制造技术, 2009(12): 47-50.
- [3] 韩荣第, 王扬, 张文吉. 现代机械加工新技术. 北京: 电子工业出版社, 2003.

(责编 三丰)