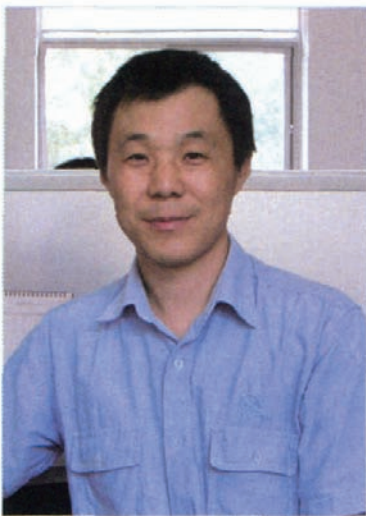


复合加工技术在航空结构件制造中的应用

Application of Complex Machining Technology in Structural Component Manufacturing of Aviation Industry

北京航空制造工程研究所 王 焱



王 焱

北京航空制造工程研究所研究员。一直从事切削加工技术、数控工艺技术、数字化集成制造技术等方面的研究,曾参加或主持完成多项科技预研、型号攻关、型号零件生产等工作。

随着科学技术的进步和社会工业化进程的迅猛发展,对产品功能与性能的要求日趋多样化,使得产品结构越来越复杂,特别是在汽车、航空、航天、原子能、兵器等领域,各种新结构、新材料及复杂形状的精密零件层出不穷,对于产品零件的制造精度和质量要求日益提高。采用一般机械

航空产品制造领域一直是先进制造技术发挥作用的重要舞台,如今的航空产品已经步入了数字化样机、数字化制造的时代,产品更新换代速度日益加快,工序分散的加工设备已开始部分地被工序集中的柔性自动化装备所取代,使复合加工技术具备了较好的发展环境。

加工方法往往难以满足其结构形状的复杂性、材料的可加工性以及加工精度和表面质量方面的要求,这就不断地向加工技术提出新的挑战。复合加工技术就是在这种背景下逐步形成的一门综合性制造技术。

复合加工技术主要解决两个方面的问题: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、磁力和声波等多种能量进行综合加工,提高了加工效率,生产效率往往远远高于单独使用各种加工方法的生产效率之和,在提高加工效率的同时,兼顾了加工精度、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。

复合加工技术已经在航空、航天、兵器和原子能等工业领域难加工材料的高效加工中广泛应用。特别是近代精密机械和电子工业迅猛发展,大量使用硬脆材料(如硬质合金、陶瓷、光学玻璃和宝石等)和晶体材料(如半导体晶片、单晶体和蓝宝石晶体),使复合加工技术更有了新的用武之地,可以对陶瓷、玻璃和半导体晶片等硬脆性材料以经济、可靠的方法实现较高的成形精度和极低的表面粗糙度,并可使表面及亚表面层晶体结构组织的损伤程度减至最低。

复合加工技术的特点

复合加工是指工件在机床上一次装夹后,能够进行同一类工艺方法的多工序加工(如同属切削方法的

车、铣、钻、镗等加工) 或者不同类工艺方法的多工序加工(如切削加工和激光加工), 从而能在 1 台机床上顺序地完成工件的全部或大部分加工工序。

复合加工技术目前有两种含义, 一种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、以机械加工工艺为主的复合, 这是数控加工领域近年来快速发展的高效加工方式。

1 以能量复合为基础的复合加工技术

以能量为基础的复合加工技术是应用多种形式能量的综合作用来实现材料的去除^[1], 是为提高难加工材料、难加工结构的加工效率和加工质量, 应用多种形式能量的综合作用、多种加工工艺的协同工作来实现零件材料去除的加工方法。

复合加工技术可以分为机械复合加工、电化学复合加工、电火花复合加工、超声复合加工、磨料水射流加工和化学机械抛光^[2]等, 根据目前已经出现和生产实践中采用的形式, 复合加工方法概括如表 1 所示。

在普通精度机械制造领域, 以常规机械加工、电化学加工、电火花加工为主的复合加工方法最为常用。

2 以工序集中原则为基础的复合加工技术

在机械加工领域中, 以工序集中原则为基础的复合加工技术是指在 1 台设备上完成车、铣、钻、镗、攻丝、铰孔、扩孔等多种加工要求, 这样的机床称为复合加工机床。复合加工机床最突出的特点是工件工序集中、一次装夹实现多工序复合加工, 可以大大缩短工件的生产周期, 提高工件加工精度。

在复合化机床上可以实现完全不同性质加工过程的加工, 机床功能范围随着时代变化而变化。人们曾经把加工中心称为复合加工机床, 但是, 一般的加工中心不能超出某种类别切削加工范围(如铣削、车削、磨削)。现代的复合加工机床更进一步实现切削工艺复合化的开发, 如在车削中心上装载有回转刀具的铣削功能, 在加工中心上有车削功能等, 进一步提高机床的复合化程度。

以工序集中原则为基础的复合加工技术一直与机床结构发展密切相关。19 世纪 40 年代转塔车床、20 世纪初期组合机床的广泛应用, 以及 20 世纪 50 年代出现的三轴数控铣床、带有刀具自动交换装置的加工中心的出现, 有力地推动了工序集中的复合加工方法的发展。20 世纪 80 年代中后期, 随着加工中心功能和结构的完善, 显示了以工序集中原则为基础的数控机床的优越性, 开始

出现车削中心、磨削中心等, 使复合加工方式得到扩展。20 世纪 90 年代后期开始出现了车铣中心、铣车中心、车磨中心等以及配有夹持工件机械手的多动力头加工单元(如瑞典 Transflex 型机床, 加工过程中以工件送进方式到达配有不同刀具的动力头处进行加工, 实现多工序“复合”), 使复合加工技术成为推动机床结构和制造工艺发展的一个新热点。

航空复杂结构件的制造需求

航空产品中的复杂结构件占有较大的数量, 往往是构成飞机结构、航空发动机结构的关键零件, 承受复杂形式载荷作用、维持结构的空气动力形状、抗击各种破坏或腐蚀等, 通常采用铝合金、钛合金、高温合金、不锈钢等多种特性的材料。航空复杂结构零件加工过程重点关注两个方面: 加工质量和生产效率, 复合加工技术为保证航空复杂结构零件加工质量、提高零件的生产效率提供了有效手段。本文重点讨论航空复杂结构零件的切削加工过程。

零件的整体化设计是现代飞机、航空发动机结构设计的重要理念, 整体结构件不仅能满足飞机与发动机结构轻量化的设计追求, 而且能满足航空产品易维护、高可靠性、长寿命

表1 各种基础加工方法与复合加工方法

基础加工方法	加工机理	典型复合工艺	复合特点	加工应用范围
机械加工 (机械去除)	机械能驱动工具 或工件去除材料	电解磨削、电火花磨削、超声振动切削、超声磨料加工、激光辅助加工、磁力研磨、机械化学研磨、电解电火花磨削、车铣复合、铣车复合等	能量综合、表面 形成方法综合	高精表面加工; 难加工金属材料; 脆硬材料及非金属难加工材料加工; 复杂结构加工
电化学加工 (化学腐蚀)	电能作用下金属 腐蚀溶解	电解磨削、电解铣削、电解电火花、电解超声加工等	能量综合	高硬度、高韧性导电材料加工; 小孔、深孔加工; 薄壁结构精密加工
电火花加工 (放电熔蚀)	电极放电致热 局部熔蚀金属	电火花磨削、电火花超声加工、电火花展成加工	运动方式组合、 能量复合	硬质合金、聚晶金刚石和导电陶瓷; 高温合金; 双金属复合材料
超声加工 (机械去除)	连续冲击、抛磨、 空化	超声波旋转加工、超声分层仿铣加工	运动复合 + 切 削作用	玻璃、陶瓷、石英、宝石以及半导体等脆硬材料
磨料水射流加工 (流体去除)	高速流动磨料对 物体表面研磨	高压水射流切割	水射流与磨料 射流复合	热敏、硬质和高脆材料及大厚度不能采用激光和等离子加工的材料
化学机械抛光 (复合去除)	化学成膜, 机械去 膜	硅晶片化学机械抛光	化学作用 + 机 械摩擦	半导体、陶瓷、光学玻璃、单晶蓝宝石。在微电子机械系统、半导体制造应用较广

服役需求,零件主要特征包括:结构壁厚尺寸只有主规格尺寸的1/10~1/1000;有多方向结构需要切削加工;结构复杂导致加工时装夹困难、加工过程中易产生加工变形、表面加工质量难以稳定控制。

航空产品零件在制造过程中面临的主要问题是制造周期长(目前国内大中型飞机隔框、发动机整体叶盘和机匣等零件切削加工周期达数百h)、加工效率低(依材料不同,单位时间金属去除率约从几kg/h到

化、检测探伤等多个工种几十道工序;飞机机身整体框大多以铣削加工为主,工艺流程通常要经过下料/毛坯制备、基准加工、粗加工内形、粗加工外形、精修基准、半精及精加工内形、半精加工外形、过渡部位补加工、孔加工、钳工修整、检测等数十道工序、多次翻转装夹,有些整体框甚至要经过机加、焊接、热处理等多种类型工序才完成整框的制造。上述这些类型零件加工一般都需要使用多台数控机床与数量不等的一批刀具以

数,尽可能提高切削速度和进给速度。另一方面,为了缩短非加工时间,则依赖于更多的技术措施和装备,包括工艺过程优化、自动化、柔性化的机床与生产线(制造系统)和正在蓬勃发展的数控复合加工机床等。

“集中工序、一次装夹实现多工序复合加工”的理念为航空复杂结构零件的制造提供了新途径,针对产品结构特点,进行复合加工、在线检测,不仅消除重复定位误差,也通过工序集中提高了加工效率。如航空发动机整体叶盘零件,可以使用铣车复合加工机床完成主要的切削加工工作,减少加工过程中变换装夹的次数,更有利于提高这类零件的加工精度和加工效率。

复合加工技术在航空产品典型零件制造中的应用方案

以能量复合为基础的复合加工技术在航空产品零件加工中已经有较多的研究和应用,主要是针对钛合金、高温合金、不锈钢等难加工材料零件的加工。在航空产品加工中的典型应用是整体叶轮/叶盘的电火花展成加工、电解电火花加工、电解磨削^[4],但由于加工设备、加工精度和加工效率的限制,尚难以满足零件批量生产和大尺寸零件制造的需求,研究与应用工作仍然在进行中。

超声振动切削是针对钛合金、不锈钢、复合材料、微晶玻璃等难加工材料加工而采用的能量复合加工方法,主要作用是消除刀具积屑瘤、减少刀具磨损。超声振动切削在车削加工中的研究与应用较多,也用于钻削加工过程(如深孔、小孔的钻孔、铰削、攻丝)。近年来,带有超声振动的铣削主轴已经成熟,开始进入实用状态,如德马吉的ULTRASONIC系列铣削加工中心,高速主轴上复合了振动频率为16.5~30.5kHz的超声激励系统。超声振动铣削具有更广泛的应用前景,如可以应用于飞机



北京第一机床厂
CHA564立式车铣复合加工中心

二十几kg/h)、几何尺寸与表面质量不稳定(主要表面需要钳工修整、微观裂纹缺陷影响零件使用寿命、重量误差大)、工艺过程复杂(分阶段加工、冷热工艺交叉)、制造成本高(刀具消耗量大、占机时间长),航空零件的切削加工过程对于高效、精确加工有着极为迫切的需求。

航空产品零件大多需要经过比较复杂的工艺流程、数十至数百道工序才能完成加工。整体叶盘是现代航空发动机的新型结构部件,已经形成了较多的制造方法^[3],采用锻造毛坯、切削加工方法时,就需要经过车削、铣削、磨削抛光、表面处理及强

及其他设备才能完成加工,产生的加工误差不仅影响零件的尺寸精度,也影响零件的重量参数,进而影响到整机的性能指标。产品加工质量的提升,主要取决于加工设备精度、加工过程中消除误差的工艺措施。

提高生产效率是零件切削加工过程的一个永恒主题。生产效率主要由零件从毛坯到成品的制造周期来衡量,制造周期包含直接用于去除毛坯多余材料、形成零件设计形状所需的时间和非加工时间(如工件加工过程中所需的装夹、检测、等待、传送等时间)两大部分组成。为了减少切削加工时间,关键是优化工艺参

钛合金结构件、复合材料构件、航空激光陀螺光学零件及其金属结构件(如套筒、支架)等加工过程。

以工序集中原则为基础的复合加工技术更侧重于切削加工过程不同加工成形机理(即切削工具与工件相对运动形式)的复合,为避免设备过于复杂及保证加工精度,一般不采用能量复合的方式。在航空结构件加工中,以工序集中原则为基础的复合加工具有更重要的意义,可以将一组工序集中在1台设备上,一次装夹完成尽可能多的加工。车铣复合技术近年来逐步成熟,实用型的设备已经大量出现,为航空产品复杂结构件加工精度提高和加工效率提升提供了更好的手段。

整体叶盘、机匣是航空发动机制造难度最大的零件之一,锻造毛坯、切削加工是该类零件目前常用制造方法,按常规加工方法,立式车床、带转台的五轴加工中心是加工该类零件的主要设备,在车床上完成回转体部分(盘、叶片轮廓、机匣安装边等)的加工后,再转移到铣削加工中心上完成叶身、安装座、花边等部位的加工,然后再转入后续工序。车铣复合加工技术是优化这类零件加工工艺的较好方案,其优点是在车削加工完成后,不改变定位状态即可进入铣削加工工序,减少和消除因改变机床、调整装夹而带来的时间损失和精度损失,也减少夹具的数量。加工这类零件使用的车铣复合机床应是立式结构,转台直径为800~1500mm,转台及主轴扭矩应不能低于1000N·m。

常规的铣削加工中按粗加工、半精加工、精加工顺序多次翻面装夹,加工周期往往达数百小时,其中的转角、狭窄区、薄壁腹板、薄壁筋都是加工中精度难以控制的部位,目前主要采用余量细分、对称加工、泡沫填充等方法来保证这些难加工部位的精度。这类零件应采用功能复合机床(工件送进、多动力头、超声波振动

等),实现以“一次装夹,多面加工”为主导思想的工艺优化。

复合加工技术应用评价

航空复杂结构零件制造有不同的工艺方法和途径,特别是复合加工技术的应用,由于涉及的技术基础广泛,设备工作原理和复杂程度差异大,维护和使用成本各不相同,零件制造过程中选择复合加工技术应首先对使用的技术经济性做出评估,选择出合适的复合加工工艺满足零件高精度、低成本、高效率、绿色环保的制造需求。下面给出进行这种评价的基本思路。

零件制造过程所遵循的基本原则是保证质量、降低成本、提高效率,对于工艺方案的评价,可以通过工件/工序加工周期、加工成本、工件加工结果、资源消耗综合进行。根据决策论的基本理论^[5],选择零件加工过程中最富于变化且易于统计测量的工件加工时间效率、工具/刀具成本效率、表面质量效率、设备成本效率、能源效率5个因素作为状态变量,建立工艺方案优化评估模型(未考虑设备成本):

$$E = p_t (B_t/T) + p_c (B_c/C) + p_q (B_q/Q) + p_s (B_s/S)$$

式中, E 为期望效率损益值, p_t 、 p_c 、 p_q 、 p_s 为相应参数量的状态概率(参数量的重要程度,其值为0~100%); B_t 、 B_c 、 B_q 、 B_s 为相应参数量的基准值; T 为零件加工周期,用 \min (或 h) 表示; C 为工具/刀具成本; Q 为表面质量,可用表面粗糙度简化表示; S 为能源消耗,可用消耗的电能简化表示。目标评估分为单项评定(目标项状态概率为100%,其余为0,此时 $E=1$),可求得相应参数量基准值 B_t 、 B_c 、 B_q 、 B_s 、综合评定(状态概率可按不同参数量影响程

度给出,等概率时可各取1/4)。 E 值越大,工艺方案越优。

利用上述公式给出的评估模型,可以对确定的工艺方法、加工效果做



出定量的比较性评估,从而选择出最优的工艺方案进行工件制造。

结束语

采用复合加工技术可以有效解决难加工材料、复杂结构的可加工性问题,也可以减少工件定位次数、缩短工件加工过程路线,提高工件加工质量和效率。航空产品制造领域一直是先进制造技术发挥作用的重要舞台,如今的航空产品已经步入了数字化样机、数字化制造的时代,产品更新换代速度日益加快,工序分散的加工设备已开始部分地被工序集中的柔性自动化装备所取代,使复合加工技术具备了较好的发展环境。

虽然复合加工技术是制造技术的一个发展方向,但从装备结构设计和加工经济性的角度看,复合加工技术的应用还应该考虑经济性、设备复杂程度、技术相关性等方面,而不能一味追求过多技术的复合或集成。

本文有参考文献5篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请与本刊编辑部联系。

(责编 金卯)