

航空发动机难加工材料 关键数控技术及装备

Key NC Technologies and Equipment for Difficult-to-Machine Materials of Aeroengine

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 张森棠



张森棠

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司数字仿真专业首席技术专家,一直从事精密加工工艺、高效数控加工技术、数字化制造技术方面的研究工作。

新型航空发动机零件的特点

新型航空发动机关重零件越来越多地采用整体结构设计,并大量采用钛合金、高温合金等难加工材料。这些零件大多采用基于锻造毛坯的整体式加工方式,零件数控加工过程呈现出加工精度要求高、切削过程材料去除量大、加工变形控制难度大等

随着航空发动机的材料性能不断提高,加工技术及装备的改进和提升是必然趋势,难加工材料数控加工技术及其装备已成为航空发动机制造业广为关注的问题。关注难加工材料数控加工技术及其装备的发展,不仅是航空发动机制造业发展战略的需要,更是航空发动机制造业技术能力快速提升的关键。

特点,对加工质量、变形控制和加工效率提出了很高的要求。

新型航空发动机零件的特点突出体现在以下几个方面:

(1) 零件的结构特点。

随着新型航空发动机推重比的提高,航空发动机产品的结构越来越复杂,技术要求越来越高,零件的壁厚设计得越来越薄。机匣、压气机风扇、整体叶盘等作为现代航空发动机的关键零件,越来越多地采用整体结构设计,零件的外廓尺寸也越来越大。

(2) 零件的材料特点。

航空发动机机匣、盘轴等关重件大量采用钛合金、高温合金等难加工材料,材料变形屈服极限高,切削变

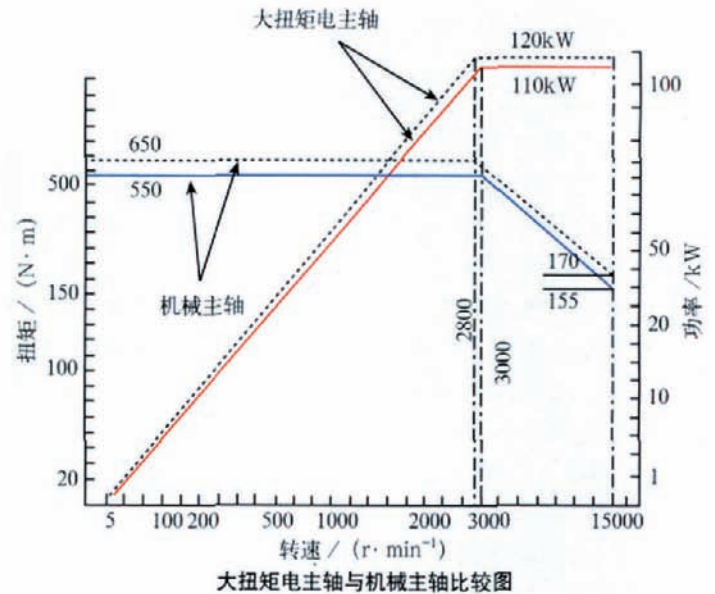
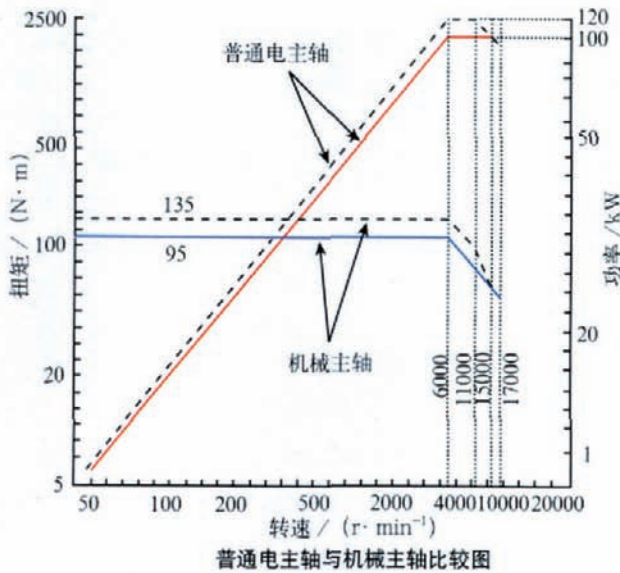
形抗力大,导致切削力大、切削功率高,需要机床主轴有更大的扭矩和功率。

(3) 零件的毛坯特点。

航空发动机机匣、压气机风扇、整体叶盘等关键零件毛坯均为整体模锻件,由于零件外表面形状复杂、结构特征较多,使得零件外轮廓极其复杂,目前的锻造技术还无法达到小余量精化料的水平,造成锻造毛坯余量大,而且余量分布极不均匀,材料切除率高达 60% 以上。

(4) 零件的加工特点。

为满足航空发动机长寿命、高可靠性要求,产品精度和表面质量控制要求极为严格。



机匣、压气机风扇、整体叶盘等航空发动机关键件均采取了基于锻造毛坯的整体式加工方式，加之设计精度和表面质量要求很高，导致加工周期较长。零件材料多为高温合金、钛合金等难加工材料，铣削后零件表面残余应力较大，加工变形较为严重，对数控机床的精度和使用寿命影响极大。目前采取的数控加工方式大量占用关键数控设备，生产周期长，而且加工成本非常高。

面向航空难加工材料的数控加工技术及装备

数控设备是生产工具，讲究实用和经济效益，机床的刚性、稳定性决定着机床的精度、持久性和可靠性等综合技术指标，也决定着数控设备的适用范围。从某种意义上讲，基体不稳固、受环境因素影响较大的数控设备的精度不会维持太长的时间，尤其是加工航空难加工材料，数控设备精度的稳定性、可靠性和刚性极为重要。面向难加工材料的数控设备的主要要求如下：

(1) 多轴联动。

多轴联动通常指的是四轴以上的机床运动方式，引入复合旋转轴，即A轴、B轴和C轴。双双组合的多轴联动可方便地解决复杂结构和

型面的加工问题，如复杂空间曲面、复杂结构型腔以及多面体等的加工；在多轴联动基础上实现的复合数控加工可以大大缩短工件定位装夹等辅助工作时间，能够有效提高产品的加工效率，多轴联动和复合加工在航空发动机整体叶盘、机匣、盘环等关键件生产中得到了广泛应用。

(2) 大扭矩电主轴。

近年来，高速切削机床在航空制造领域的应用越来越广泛。电主轴的特点在于随着转速的提高，电主轴的扭矩和功率逐渐增大，直到达到最大扭矩值和最大功率，当转速达到极限值后，主轴扭矩和功率反而开始下降；总体来说，高速范围内的电主轴扭矩和功率较大。对航空难加工材料来说，由于材料切削性能较差，切削抗力较大，目前切削速度一直处于低速水平，切削线速度通常介于20~80m/min之间，在这个范围内，电主轴的扭矩远远小于机械主轴，电主轴没有任何优势。为突破在中低速范围内高速电主轴功率和扭矩稍显不足这一技术难题，德马吉公司研制开发了专门面向难加工材料的航空大扭矩电主轴，配合高性能刀具系统，可以实现难加工材料高速切削加工，使得高速切削技术在航空难加工材料领域得到了有效突破。

(3) 高刚度。

主轴系统、进给系统和机床结构应具有良好的静态刚度、动态刚度和热稳定性。足够高的静态刚度可以抵抗由于机床零部件重力和零件加工时的切削力引起的机床变形，保证刀具与工件在切削过程中的静态位移；优良的动态特性可防止和减小切削过程中由于动态切削过程产生的强迫振动和自激振动，以满足刀具与工件在切削过程中的动态位移要求；良好的热稳定性使机床在加工过程中受到切削热、环境温度变化等作用时，热变形尽量小。机床的高静动态刚度和热稳定性技术指标确保零件加工能够获得更好的表面质量和较高的材料去除率。

(4) 智能化。

智能化是新一代数控机床的重要特征。智能化主要表现在两个方面，一方面是机床控制的智能化，如在机床轴运动控制中引入前馈控制、预测控制、约束控制等先进控制策略，在加工过程控制中引入自适应控制、学习控制等。另一方面是将专家系统、自动检测及自动补偿功能等嵌入数控系统，例如在数控系统中配备自动编程与仿真、机床状态监测、故障诊断、刀具自动管理及补偿、机床热变形/振动监测与补偿等功能，使

数控机床具有更多的“智能”。

(5) 自适应技术。

自适应技术已经逐渐用于数控机床,使得数控机床具备一定的智能性。具体表现就是,当切削余量大时,进给速度会自动减慢;当切削余量小时,进给速度会自动增快;带来的好处是,不仅提质增效,而且保护机床。原理其实很简单,在主轴电机上安装电流侦测传感器,将侦测信号实时反馈给数控系统,由数控系统依据电流状况实时决定驱动轴速度的快慢。

近年来,各数控系统制造商推出的系统都具有较好的刀具监控功能。如在西门子 810/840D 系统内就可以集成以色列 OMAT 公司的 ACM 自适应监控系统或德国的 Artis 自适应系统,能够实时采样机床主轴负载变化,记录主轴切削负载,进给率变化、刀具磨损量等加工参数,并输出数据、图形至 Windows 用户图形界面。

面向航空难加工材料的数控特种加工技术及装备

航空发动机机匣、压气机风扇、整体叶盘等关键零件大量采用粘性强、硬度高的高温合金和钛合金材料,往往需要去除较多的余量,由于金属切削机床加工这些材料难度很大,效率低,刀具消耗大,设备昂贵,加工成本大,成为难加工材料制造中的“瓶颈”问题。如高温合金整体机匣,加工余量多达几十公斤,刀具费

用高达数万元,而且需占用价值上千万的加工中心长达数十小时,生产周期长,制造成本高。

随着数控技术和特种加工技术的有机结合,多轴联动数控电火花成型加工技术和电弧放电加工技术取得了重大突破,特种加工技术在航空制造业中凸显出明显的优势。

特种加工技术能够解决一些采用金切机床等其他传统加工方法难以加工的技术难题。如电加工无切削力,可以进行微细加工,可对硬度高、韧性大、粘性大的材料进行加工,如高温耐热合金、钛合金等航空难加工材料,还可进行复杂型面的加工等。

(1) 多轴联动数控电火花成型加工技术和电弧放电加工技术。

航空航天制造领域的很多零件加工不仅需要解决难加工材料的加工问题,而且要求能够完成空间复杂结构和复杂型面的加工。

多轴联动数控电弧放电加工技术采用简单的管状电极,可以对难加工材料进行高效放电数控铣削加工。这种技术大大降低了难加工材料的加工成本,与刀具费用相比,损耗的电极费用只需几十分之一。如某零件采用加工中心加工,刀具费用要 3 万元左右,而采用该种高效放电铣削加工,电极费用只需 500 ~ 600 元。多轴联动数控电火花成型加工技术采用成型电极对零件加工盲区进行精细放电铣削加工,完成零件复杂型腔和复杂曲面的加工,解决机械加工无法完成的技术难题。

(2) 精细电解技术。

数控电解加工技术综合了计算机数控和电解加工两者的技术优势,具有多轴联动数控加工的优点,适用加工范围广,可用于加工各类复杂结构、多品种、小批量、甚至单件试制产品的生产。精细电解作

为一门崭新的技术,加工原理有别于传统的电化学加工技术。精细电解过程是增强型的 ECM 技术,通过减少工件和电极之间的距离和精密控制工件和电极之间的间距尺寸,有效提高了电极定位的准确性。为了保持电解质在狭窄的空隙中不断更新流动,电极不断颤动,电流以时钟频率计。与电解技术相比,材料去除率明显减少,具有其他加工工艺无法比拟的技术优势。

精细电解技术的特点是,与电极加工相比具有非常小的加工尺寸偏差,能更大限度地去除材料。这样在使被加工工件的形状与阴极形状保持一致性的同时也提高了加工精度。精细电解加工过程中不产生任何磨损电极的现象,由于间隙空间狭窄,必须保证交换电解质只提供电极,随着同步振荡运动,直流电脉冲即材料去除脉冲是叠加的,能够去除零件表面材质最细微的余量。精细电解的另一突出特点是电解去除量很少,并通过电解液循环处理器解决了电解液的污染问题,在难加工材料精细加工领域具有非常广泛的应用前景。

面向航空难加工材料的先进制造技术

(1) 虚拟加工技术。

在实际零件加工之前,在虚拟环境中考虑机床运动学、动力学、数控系统、空间精度、切削力、主轴转矩 / 功率、加工误差等,实现对加工过程的仿真和优化,从而可以正确、经济和高效地加工出首件合格零件。虚拟加工的本质可以认为是对数控加工过程进行几何仿真和力学仿真,并在两个仿真的基础上优化数控加工切削参数和过程。CAM 仿真软件、虚拟机床和切削过程动力学是虚拟加工的重要支持工具。

采用 CAM 仿真软件对 NC 程序进行走刀轨迹仿真校验、干涉校验等的几何仿真软件已商品化,并在国



内制造企业大量应用。当前,虚拟数控加工研究的重点是对切削过程中“机床+工件+工艺(切削过程)”系统中的力学仿真问题。

(2) 高速切削技术。

高速切削(HSM或HSC)是20世纪90年代迅速走向实际应用的先进加工技术。高速铣削一般采用高的切削速度、适当的进给量、小的径向和轴向铣削深度,铣削时大量的铣削热被切屑带走,因此,工件的表面温度较低。随着铣削速度的提高,铣削力略有下降,表面质量提高,加工生产率随之增加。但在高速加工范围内,铣削速度的提高会加剧刀具的磨损。

从理论上讲,高速切削技术可用于钛合金、高温合金等航空难加工材料,但由于难加工材料的切削抗力远远大于其他材料,常规意义上的高速切削技术到目前为止还很难在难加工材料领域得到普及。国外采用韧性好的刀具,通过消除加工硬化现象的加工工艺有效地解决这一难题。随着这一全新切削方法的出现,通过系统地改进刀具、加工工艺和机床的性能,可以有效解决难加工材料高速切削应用的技术瓶颈。

(3) 插铣工艺。

插铣是实现高去除率金属切削最有效的加工方法之一,插铣加工的进给速度相对较低。对于航空难加工材料零件的曲面加工、深槽加工,以及由于结构复杂刀具悬伸较长的零件加工,插铣法的加工效率要远远高于常规的铣削方法,采用插铣法可使加工时间至少缩短一半以上。

(4) 摆线加工工艺。

在高速设备上采用摆线加工是一种很好的方法,尤其对于难加工材料的航空产品,摆线加工有着其他工艺方法无法替代的优势。摆线加工的优点表现在以下几个方面:

- 能够大范围地去除毛坯材料,大大缩短粗加工用时,提高机床切削



效率;

- 经过圆角化处理的整个刀轨变成一条一阶导数光滑连续的曲线;
- 对于高硬材料的窄槽和型腔加工,有较大优势。

采用摆线式的高速加工过程,刀具始终处于动态的全方位切削状态,刀体沿周边受力均匀,因此,刀具疲劳破坏的可能性就非常小;刀具向前切削材料的同时也伴随着向后的空走刀,这样刀具具有充分的时间冷却,同时,还能自动带走切屑,从而大大改善切削条件,提高刀具寿命。

(5) 高性能刀具。

航空航天及军工产品类零件广泛采用难加工材料,在过去的几年中,随着航空材料的价格飞涨,使得材料成本在“利-损”方程中占据越来越大比例。为降低成本并保持竞争力,必须更快速地切削那些难加工材料以加快生产速度,这就意味着除了加工设备的高速化、工艺的优化以外还需要更为耐用和更为适合加工难加工材料的刀具。如刀具采用变螺旋角设计来打破加工中产生的谐振现象,刀具表面采用特殊涂层来分散热量;使用该刀具结合仿形铣加工和薄化切削减轻切削刃与工件的接触获得了较大的切削深度,突破了高温合金材料切削速度无法突破

中低速的限制,进给速率达到了800~1000m/min,刀具耐用度远远优于其他相同规格的硬质合金刀具。

(6) 智能化网络控制技术。

智能化网络控制技术,提供了基础的数据和数据传输通道,加上专门开发的软件,对各个加工设备实时动态数据的收集和分析,为管理者提供了科学准确的决策依据,从而对生产过程中的设备、人员、刀夹具、程序和计划等要素进行实时调度和控制,同时发现和解决生产中的各种问题。当生产线中的设备出现问题的时候,管理人员可以通过网络第一时间得到设备故障信息,迅速准确地处理问题。采集加工过程中与切削有关的各种参数,建立切削参数数据库,方便共享经验资源。

结束语

随着航空发动机的材料性能不断提高,加工技术及装备的改进和提升是必然的趋势,难加工材料数控加工技术及其装备已成为航空发动机制造业广为关注的问题。关注难加工材料数控加工技术及其装备的发展,不仅是航空发动机制造业发展战略的需要,更是航空发动机制造业技术能力快速提升的关键。

(责编 晓霏)