

# 航空材料高速高效加工方法

## High-Speed and High-Efficiency Machining Method of Aeronautical Materials

中国人民解放军海军装备部 杨 薇  
中航工业西安航空动力股份有限公司 赵 赟 张新冬 马 辉 江 波

**[摘要]** 高速高效加工是航空制造领域的重要发展方向,已广泛应用于飞机与航空发动机等复杂整体结构零件的加工,显著提高了生产效率、降低了生产成本。主要阐述了典型航空材料的高速高效加工方法及航空产品加工应用实例,同时指出了高速高效加工技术未来的发展方向。

**关键词:** 航空材料 高速加工 高效加工 特种加工

**[ABSTRACT]** High-speed and high-efficiency machining is an important development direction in the field of aviation manufacture. This technology is widely used in machining complex integrated structure of aircraft and aircraft engine etc, which improves the production efficiency and reduces production costs significantly. The high-speed and high-efficiency machining method of typical aviation materials and product processing application examples are illustrated. The development direction of high-speed machining technology is proposed.

**Keywords:** Aeronautical material High-speed machining High-efficiency machining Non-traditional machining

航空制造业的发展水平和能力是衡量一个国家制造业实力和国防科技工业水平的重要标志。为了进一步提高飞机等航空器的机动性能、负载能力和远距离飞行能力,飞机设计中采用了大量复杂整体结构以降低机身总重量;与此同时,由于飞机发动机时刻处于高温、高压、高转速等复杂的运行环境中,这就要求航空发动机关键部件大量采用高温合金、钛合金等高性能材料以保证其良好的使用性能。

高温合金、钛合金等航空材料具有高比强度、高硬度、耐腐蚀等优良特性,在航空发动机压气机盘、涡轮盘、叶片、机匣等复杂薄壁结构中获得了广泛的应用。但由于高温合金、钛合金等航空材料属于典型的难加工材料,传统切削加工由于切削区域温度过高、切削力大以及刀具磨损迅速等特点,造成这类材料及相应的零件

加工效率低、加工质量差,零件的表面完整性也难以保证,严重阻碍了我国飞机、发动机的制造水平与服役寿命的提升。因此,迫切需要发展和探索新的制造工艺技术,实现钛合金、高温合金等航空难加工材料的高速、高效加工。

高速高效加工是指在确保零件加工精度、加工质量、设备利用率的前提下,通过提高切削速度、进给速度以及单位时间内材料去除量的一种高性能加工技术。目前,实现航空材料高速高效加工的技术手段中,除了利用数控装备和刀具的优越性能外,也涌现出了通过综合利用热能、电能、声能以及化学能等辅助加工的工艺技术,使得材料的切除速度、加工效率以及表面质量得以显著提升。

### 1 高速高效切削加工方法

实现航空材料的高速高效加工涉及高性能数控装备、高精度刀柄结构、高速刀具、切削加工工艺参数优化以及冷却润滑等多个方面。通常来说,高速加工是指采用超硬材料的刀具,通过高的切削速度、进给速度来提高单位时间的金属去除率以及加工精度和加工质量的一种现代加工技术。而高效加工的内涵则更为丰富,它通常是指在保证零件精度和质量的前提下,通过对加工过程的优化和提高单位时间材料切除量来提高加工效率和设备利用率、降低生产成本的一种高性能加工技术。

从切削机理角度分析,在高速切削加工条件下,刀具单位时间内在切削区域产生大量切削热,瞬时温度急剧升高,这就使得切削区域高硬度难加工材料局部硬度下降,待加工区域塑性变形抗力减小,有利于切削加工。同时,由于高速切削时切屑流出较快及时带走大量热量,避免了大量热量传入刀具和工件,从而提高工件加工质量和加工效率、降低刀具磨损。与传统切削加工相比,高速切削加工发生了本质性飞跃,其单位功率的金属切除率明显提高,切削力大大降低,刀具的切削寿命大幅度延长,传递到工件的切削热大幅度降低,低阶切削振动几乎消失。可见,高速加工特别适合于航空复杂

薄壁零件的精密加工。

目前,在航空发动机领域,多数复杂薄壁零件采用高温合金、钛合金等高性能材料。极端的服役环境对这类零件的表面完整性水平提出了苛刻的要求,因此如何平衡其加工效率和加工质量成为制造过程中的一个难题。在这种背景下,难加工材料的高速、高效加工技术为这类零件提供了良好的解决方案。以整体叶盘为例,如图1所示,这类零件通常采用钛合金、高温合金等难加工材料,而且从结构上来说流道窄而深、开敞性差,叶片薄而且扭曲严重,加工过程中极易发生切削变形和振动,加工效率低、加工精度难以满足设计要求是这类零件制造中面临的两大问题。西安航空发动机集团在长期的探索研究与工程实践中,采用高速高效加工技术较好地解决了该问题。



图1 航空发动机整体叶盘  
Fig.1 Aeroengine blisk

在整体叶盘的加工中,70%~90%的材料在粗加工阶段被切除,因此提高粗加工过程的材料去除效率是提高整体叶盘加工效率的关键。由于材料难加工、加工余量大,导致切削加工过程的切削抗力大,很难采用高速加工的方式,而插铣加工作为一种高效的粗加工工艺则为此提供了解决方案。如图2所示,与侧铣加工相比,插铣加工刀具连续地沿Z轴方向上下运动,其主切削力方向与刀具轴线一致,使得刀具与叶片在主切削力方向上的刚性显著增强,从而可以大幅提高材料的切除效率。对于机床而言,插铣加工属于一种定轴加工方式,与联动加工相比机床的刚性与稳定性也得以有效提升;另外,从加工成本的角度考虑,整体叶盘的插铣粗加工也可以在四轴甚至三轴机床上进行。

相对于粗加工提高材料去除效率而言,整体叶盘的精加工则更加倾向于保证型面几何精度及表面完整性



图2 整体叶盘插铣加工  
Fig.2 Plunge milling of blisk

水平。因此,高速加工成为保障叶盘精加工质量的有效手段。与常规加工相比,整体叶盘高速加工的关键是如何保证加工过程的连续性和光顺性。如图3所示,在数控编程方面,采用螺旋铣加工工艺,以保证加工轨迹光滑、连续,并尽可能减少了进退刀次数;在不同加工部位的刀轨转接处,采用无尖角光滑过渡的刀具轨迹分布形式。与轨迹分布相对应,刀轴矢量的变化也要均匀,必须杜绝刀轴矢量的突变以避免高速加工过程中由于机床加减速过大导致的失稳。另外,余量的分布状态对高速加工尤为重要,尽可能保证加工余量分布均匀;同时切削参数的选取与优化也要与余量分布密切结合,当余量较大时应适当降低进给速度。

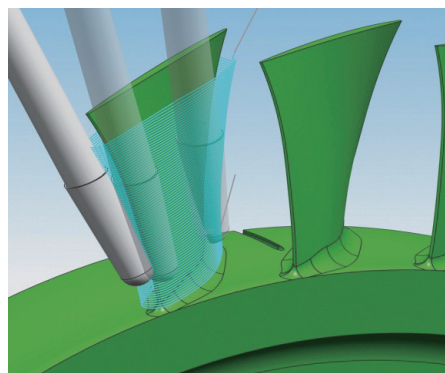


图3 整体叶盘螺旋铣加工  
Fig.3 Spiral milling of blisk

## 2 高速高效磨削加工

风扇叶片、整体叶盘和整体机匣等作为航空发动机中的关键零部件,具有几何结构复杂、加工余量大、加工精度高等特点。目前,该类零部件主要通过多轴切削加工得到,然而切削加工技术无法使得零部件的加工精度和加工质量达到设计要求,往往还需要人工进行抛光打磨,从而大大降低了加工效率。因此,在传统切削加工

方法无法满足现阶段复杂零部件高效精密加工技术要求的前提下,需要发展新的高效精密加工技术。

高速高效磨削加工属于高效精密加工技术范畴,指通过增大切除深度或工件进给速度而达到提高材料去除率的磨削技术。它在保证加工质量的前提下,还可以达到和车削、铣削同样的材料去除率甚至更高。目前高速高效磨削加工已经在航空发动机零部件生产领域进行了应用,如叶片、涡轮盘等典型零件。然而,在钛合金、镍基高温合金的高速磨削加工中,磨削温度高、磨削力大、砂轮易粘附、磨削表面质量难以控制是现阶段普遍存在的现象,由此导致的磨削效率低、工具寿命短、质量稳定性差是目前航空发动机零件高效精密磨削加工所面临的共同问题。

高速磨削加工能实现现代制造技术所追求的两大目标,即提高生产效率和改善产品质量。实践证明:若将砂轮速度由 35m/s 提高到 80m/s 时,生产效率可提高 30%~60%,砂轮耐用度提高 0.7~1 倍,工件表面粗糙度降低 50% 左右。欧洲的高速超高速磨削技术起步最早。1996 年由德国 Schaudt 公司生产的高速数控曲轴磨床,是具有高效深磨特性的典型产品,它能把曲轴坯件直接由磨削加工到最终尺寸。德国 Bremen 大学、Achen 工业大学在高效深磨技术研究上取得了世界公认的高水平成果。据 Achen 工业大学宣称,该校已经采用了圆周速度达到 500m/s 的超高速砂轮,此速度已突破了当前磨床与砂轮的工作极限。我国的高速超高速磨削研究起步较晚,相关工作主要集中在南京航空航天大学、西北工业大学、东北大学、湖南大学、郑州磨料磨具磨削研究所等科研院所。南京航空航天大学采用单颗磨粒磨削与超硬砂轮磨削相结合的方法,通过试验研究与物理仿真揭示了高速超高速磨削过程中的材料去除行为、切削屑形成机制、力-热耦合作用等,为高速超高速磨削的砂轮设计、强化换热、工艺优化、生产应用等提供了理论依据和基础数据。西北工业大学针对整体叶盘抛光研究了五轴联动柔性抛光系统,建立相应的试验平台,通过磨头机构的柔性作用可以很好地拟合磨削过程中的叶片型面,能够对叶片表面质量及微变形量进行自适应控制和补偿,实现了叶盘表面的精密抛光。

### 3 复合高效加工方法

复合加工是数控加工技术的重要发展趋势之一,近年来在航空制造领域得到了较为广泛的应用。除了常见的车铣复合加工外,超声辅助切削加工、电加工+切削加工等复合加工工艺技术也取得了长足进步,并得到了初步应用。

#### 3.1 超声辅助高速切削加工

发动机机匣、叶片、叶盘等均属于型面结构复杂、使用性能要求高的精密零件。目前,此类零件多采用高温合金、钛合金等难加工材料,常规的铣削加工容易造成大的切削变形、切削振动等缺点。为了避免这些缺陷,数控加工设备只能在较低的效能下运行,导致高端设备的加工能力不能得到充分发挥。

超声振动切削技术是利用刀具或工件以适当的方向高频振动,刀具和待加工工件周期性的接触和分离,改变加工状态以获得良好加工性能的一种新型的高效切削加工方法。在超声振动作用下,刀具与待加工工件之间的接触状态和交互作用机理发生变化,利用刀具的高频冲击作用、超声空化作用去除材料。超声振动加工方法不依赖加工材料的导电性,加工过程切削力小、刀具磨损量小,适合加工深小孔、薄壁件、细长杆等低刚度零件,还可以克服高温合金、钛合金等难加工材料的关键加工工艺问题实现高速高效加工,大大提高加工效率,改善工件加工质量。超声加工和传统机械加工或特种加工方法相结合形成了各种超声复合加工工艺,如超声电解抛光加工、超声电火花加工、超声振动磨削加工等,其加工原理如图 4 所示。

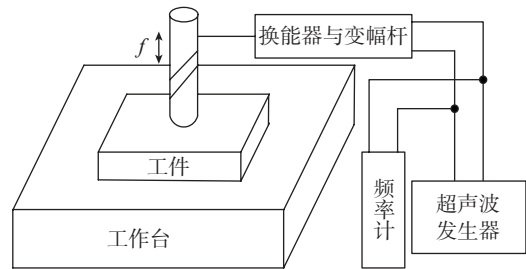


图4 超声辅助切削加工原理图

Fig.4 Principle diagram of ultrasonic assisted machining

目前,超声加工技术在航空制造领域的应用刚刚起步,主要集中在各种孔类零件的加工,其主要原因是超声数控加工装备的开发研制较为缓慢、机床稳定性难以精确控制等。因此,为了满足航空领域难加工材料的加工需求,应结合典型航空零件和材料的结构工艺特点,开发专用的高效精密超声加工数控装备;同时,还需要开展大量的超声振动辅助加工的基础理论与工艺试验研究,改进和完善现有高效精密超声加工技术,进一步提高该技术在高温合金、钛合金等难加工材料中的应用水平。

#### 3.2 电火花铣削加工技术

电火花加工是一种利用电能、热能进行加工的新工艺。电火花加工与切削加工的区别主要是电火花加工时,工具与工件并不接触,仅依靠工具与工件间不断产生的脉冲性火花放电,利用放电时产生局部瞬时高温把

金属材料逐步蚀除下来,然后经过一段时间间隔,排除电蚀产物和介质恢复绝缘,再在两级间加电,如此连续的重复放电,工具电极不断地向工件进给就可将工具的形状复制在工件上,加工出所需要的零件。综合考虑电火花成形加工和铣削加工运动方式的优势,将电火花成型加工与铣削加工运行形式相结合形成一种电火花铣削加工工艺,这种加工工艺拥有铣削加工具有的加工速度快、柔性程度高等优点,同时又具有电火花成型加工更适用于精密型腔及高硬材料加工的优点。其加工原理如图5所示。

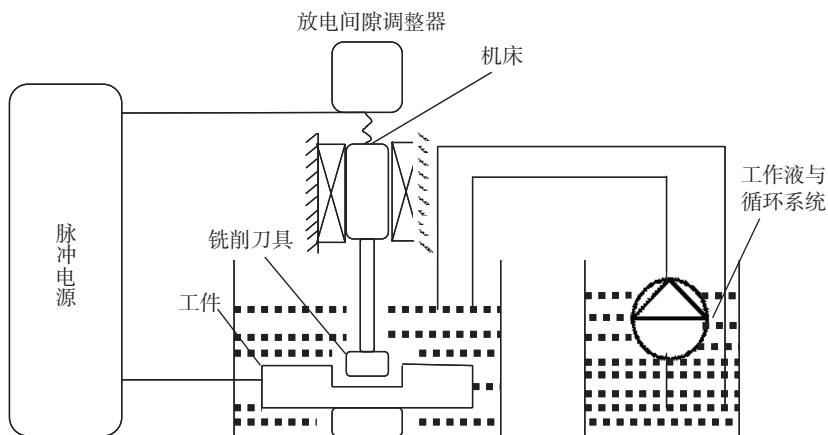


图5 电火花铣削加工技术原理图

Fig.5 Principle diagram of electrical discharge milling technology

电火花铣削加工技术采用简单形状

电极取代复杂的电极复制加工方法,为电火花三维型面加工开辟出一条新的有效途径,从而充分发挥其加工超硬金属材料和低刚度零件的优越性。这对于实现面向复杂结构零件的三维型面加工意义重大,并在加工效率和经济性等方面显示了其突出的优越性。以高温合金整体叶盘为例,西安航空发动机集团公司运用四轴电火花铣削加工技术实现了高温合金整体叶盘的高效粗加工。与常规五轴数控铣削粗加工相比,在相同的加工余量下,电火花铣削的加工效率提升一倍而加工成本降低了60%。可见,电加工与切削加工相结合的复合加工工艺是实现航空难加工材料高效加工的一种有效途径。

### 3.3 其他高速高效复合加工技术

除了上述几种复合加工工艺外,其他特种高速高效复合加工技术在航空零件的加工中也表现出独特优势,比如,利用线性摩擦焊接技术完成整体叶盘的精密制坯过程。另外,如电化学机械复合加工技术、超声电火花复合加工技术、电解电火花复合加工技术、电液束加工、超声电解复合加工等高效加工工艺也是将几种加工方法融合在一起的高效的复合加工工艺。各种加工方式发挥相应的加工优势,相辅相成,可以有效提高加工精度、加工表面质量和加工效率,同时扩大加工应用的范围。难加工材料复杂薄壁结构是航空零件加工的关键和难点,复合加工工艺可以打破传统加工工艺的局限,通过机械能、热能、电能和化学能等多种能量的综合运用,有望实现航空零件的高效率、高精度加工。

## 4 结束语

高温合金、钛合金等难加工材料在航空制造领域得到广泛应用。本文总结了这类材料及其典型结构采用传统加工工艺时存在的不足,阐述了目前航空材料和航空产品中所使用的多种高速高效加工方法。为了进一

步发挥高速高效加工工艺的优势,提高我国航空产品的制造水平,尚需要在以下几个方面进行更为深入的研究:

(1) 高速高效加工条件下难加工材料的去除机理及工艺方法。

目前,航空行业难加工材料的高速高效加工工艺参数多依赖工艺人员和操作人员的经验,缺乏科学、有效的理论依据。因此,针对难加工材料的高速高效加工,利用加工仿真及工艺试验等手段研究切削力、切削温度以及力热耦合作用及其对表面完整性的影响机理,形成工艺参数积累机制和专家数据库系统,是实现航空材料高速高效加工必须突破的基础科学问题。

(2) 高速高效加工专用工艺装备研发。

专用工艺装备是实现航空典型结构零件高速高效加工的硬件保障,欧美等发达国家为此投入了大量的人力物力财力进行研发。因此,应针对航空复杂结构的材料工艺特点,研发相应的功能部件、专用工具以及装备集成技术;同时,还应配套开发与装备配套的软件系统,提高工艺和操作人员的编程与操作水平,以充分发挥高速高效加工装备的加工效能,提高我国航空产品的制造水平。

(3) 高速高效加工过程的自适应监控与自主优化。

加工过程的智能调控是目前智能制造背景下的关键技术之一。通过力、温度、扭矩等传感器的使用与信息融合处理,实现加工过程中几何与物理量的在线感知,并以此为依据实现工艺参数和工艺过程的自主优化,是实现航空产品高速高效加工以及提高工艺稳定性的有力保障手段。虽然目前高端装备具备部分感知功能,但如何与具体零件的工艺过程相结合仍然需要开展大量的研究与试验。

(责编 小城)