

# 钛合金飞机结构件切削技术发展趋势

## Cutting Technology Development of Titanium Alloy Aircraft Structural Part

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 熊青春  
 山东大学机械工程学院 宋戈  
 南京航空航天大学机电学院 赵威



熊青春

高级工程师,中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂机加工工艺主管师,主要研究方向为高性能数控加工技术。

为满足隐身、长寿命以及结构轻量化等方面的性能要求,钛合金结构件在现代飞机设计中被大量应用(如图1所示)。钛合金飞机结构件主要包括框、梁、壁板等,主要有轮廓尺寸大、槽腔多、槽腔深、壁薄且通常具有变斜角理论曲面等结构特点,数控加工时材料去除率高达90%~95%,薄壁、深槽腔特征占80%以上,为典型

的弱刚性结构,加工状态极不稳定。由于钛合金材料本身弹性模量低、弹性变形大、切削温度高、导热系数低、高温时化学活性高,使得切削粘刀现象严重,容易加剧刀具磨损甚至破损,导致钛合金切削加工性较差。

我国航空制造企业近年来通过加强产学研合作,以及引进吸收国外先进制造技术,对钛合金结构件的加工工艺方法进行了系统研究,大幅度提高了钛合金航空结构件的加工效率与加工质量。

在钛合金飞机整体框、梁及大型壁板制造过程中,由于零件结构形状

象严重,容易加剧刀具磨损甚至破损,导致钛合金切削加工性较差。

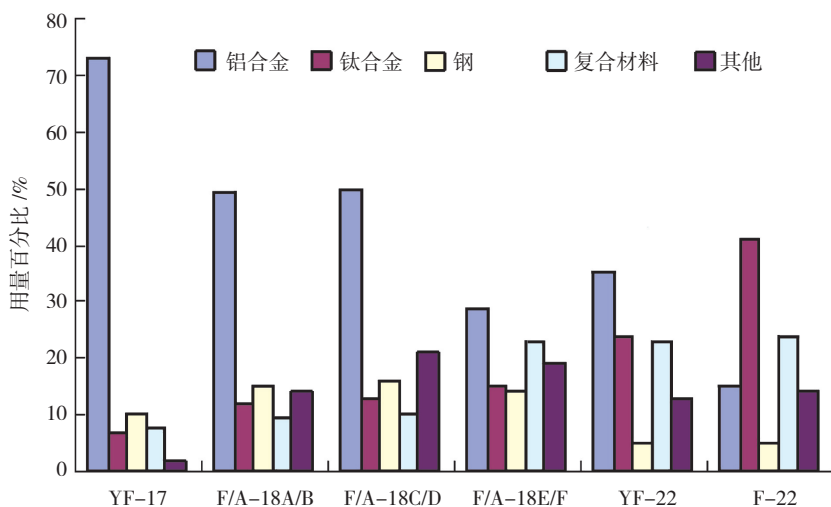


图1 国外战斗机结构材料组成比例演化

复杂,外形协调性要求高,零件装配协调面、交点孔等数目多,零件制造精度要求高,加工过程中金属去除量大、相对刚度较低、加工工艺性差,在切削力、切削振动、切削热等多种因素的影响下,导致在加工中容易出现让刀、变形、振动等问题,加工质量很难控制。而钛合金本身作为一种典型的难加工材料,对机床、刀具、加工工艺等要求极高。因此,上述诸多因素导致传统的钛合金航空结构件加工只能在低切削用量水平上进行,生产周期长,加工成本较高,钛合金航空结构件的加工已成为航空制造业中复杂的制造工艺难题。

## 关键技术及其发展趋势

### 1 钛合金零件工装装夹技术

钛合金零件装夹原则是:(1)粗加工阶段夹紧力要大,防止在大切削力加工过程中零件松动;精加工阶段夹紧力要小,防止装夹变形。(2)夹紧力作用在刚性好的地方,且施力点尽可能多。(3)对于刚性较差的薄壁结构零件应增加适当的辅助装置,增加整个加工工艺系统的刚性<sup>[1]</sup>。

国外大量采用了自动化程度较高的专用夹具,如采用液压可调整工装,在加工零件外轮廓中当切削刀具接近压紧点时压板自动让开,刀具切削后压板立即返回原位压紧零件。还有一些公司采用与被加工零件相同的材料制造夹具、压板,装夹时与零件形成一体,切削过程中不必考虑避让夹具压板,加工效率明显提高<sup>[2]</sup>。

国内对钛合金航空结构件数控加工中的工装夹具缺少较为深入的研究和开发,更多的是采用简单机械装夹方式。简单机械装夹方式受人为因素影响,夹紧力不容易控制。还有一些平面型单面结构、厚度较小结构件的夹紧采用真空吸附方式,而真空吸附方式对于厚度较大、双面结构

的结构件吸附效果较差<sup>[2]</sup>。

对于刚性较低的工件,夹紧力是引起零件变形的一个重要因素。在加工中,夹紧力与切削力间的波动效应产生耦合作用,引起加工残余应力和工件内部残余应力的重新分布,影响工件的变形。特别是薄壁零件刚性差,加工时夹、压的弹性变形将影响表面的尺寸精度和形状、位置精度。因夹紧力与支承力的作用点选择不当,也会引起附加应力<sup>[2]</sup>。对于此类零件的数控加工,在装夹方面可采用“基于加工过渡外形的柔性装夹”方法,即通过测量自由状态下的过渡外形并调节凸台高度和顶部斜率,使得装夹系统的柔性凸台外形与零件过渡外形在自由状态下完全贴合,避免装夹变形。柔性凸台的分布可根据实际情况进行调整,使得装夹力分布均匀(如图2所示)。

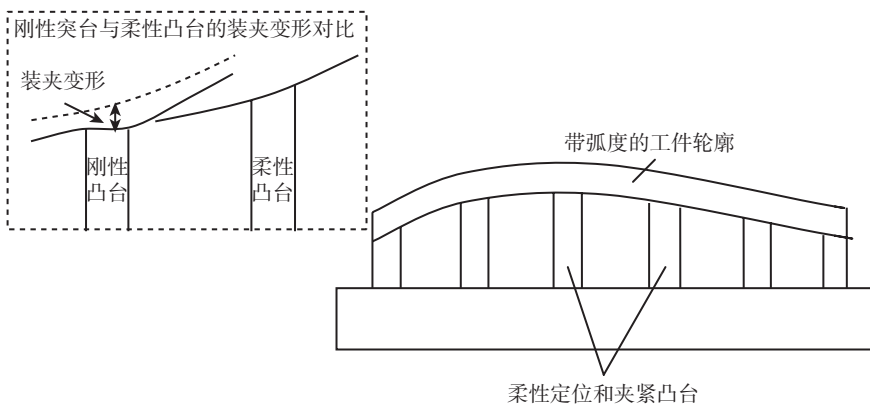


图2 基于加工过渡外形的柔性装夹示意图

中航工业成飞与清华大学合作,针对柔性工装以及柔性支撑部件的设计制造进行了探索。但是,柔性工装的制造成本和制造周期较长,在实际大型钛合金结构件加工装夹中,通常通过采用“无应力装夹”方式,即在刚性凸台上加垫片来避免装夹变形,取得了较好的应用效果。

钛合金结构件装夹布局优化等方面的许多理论和实际应用问题有待进一步研究和解决,未来主要的研究和发展趋势包括以下两个方面:

一是合理装夹方案的设计,通过合理的装夹方案设计有效地增加工艺系统的刚度,减少工件的变形,提高切削加工的稳定性;二是新的辅助支承装夹方式的研究,对于薄壁复杂结构钛合金零件而言,传统采用辅助支承以增加结构刚性的工艺手段,难以满足高精度的加工要求,且操作复杂、效率低,需突破一些新的辅助支承装夹方法。

### 2 钛合金加工刀具技术

随着高速切削技术的发展,高速切削刀具材料和刀具制造技术都发生了巨大的变化,新材料、新涂层、新技术不断涌现。然而,目前刀具技术仍是限制钛合金等难加工材料加工效率提高的一个技术瓶颈。由于钛合金弹性模量低、弹性变形大、切削温度高、导热系数低、高温时化学活性高,使得切削粘刀现象严重,容易

加剧刀具磨损甚至破损,导致钛合金切削加工性较差。因此钛合金加工刀具技术成为制约钛合金高效加工的关键技术之一。

从提高金属去除率的角度出发,目前钛合金航空结构件高效粗加工刀具主要有玉米铣刀、插铣刀、大进给铣刀以及组合刀具等(如图3所示)。其中,采用玉米、插铣刀以及组合刀具等对机床功率和扭矩有一定的要求,而大进给铣刀对机床功率和扭矩以及刚性无特殊要求。已有加



(a)玉米铣刀

(b)大进给铣刀

图3 钛合金航空结构构件高效切削刀具

工应用表明,采用大进给铣刀,切削效率可有效提高 50% 以上。

从控制零件的加工精度出发,钛合金航空结构件高效精加工刀具主要为整体螺旋立铣刀,如图 4 所示。采用密齿刀具(5~10 齿)可以显著改善加工表面粗糙度,而采用不等齿距立铣刀,可有效提升极限切深。

随着新型刀具材料的出现和新型刀具的不断发展,国内外针对钛合金切削加工刀具方面,做了大量的研究工作。如 T. Kitagawa 等对硬质合金刀具加工钛合金切削机理进行了研究,表明硬质合金刀具的晶粒大小

以及 Co 元素含量的高低直接影响其切削钛合金时的性能,并指出 YG 类硬质合金刀具更适合加工钛合金<sup>[3]</sup>。J. Vigneau 研究了涂层刀具切削钛合金的切削性能,传统的涂层多为 TiC 和 TiCN 涂层,在切削过程中 Ti 元素易与工件发生亲和而加快刀具磨损速度<sup>[4]</sup>。CBN 由于具有硬度高,耐热性好而且有很高的稳定性,是高速切削钛合金的良好刀具,这种刀具价格比较昂贵,国内有关机构还没有进行深入的研究<sup>[5]</sup>。在刀具结构设计方面,G. D. Vasilyuk 通过增大刀尖圆弧半径来增加切削阻尼,从而消除颤振<sup>[6]</sup>;C.R.LIU 在切削过程中通过在线控制刀具前角、后角、刃倾角来抑制颤振<sup>[7]</sup>;德国学者 V. Sellmeiert 对不等齿距立铣刀稳定性进行实验和理论研究<sup>[8]</sup>等。

国内针对钛合金切削加工刀具也进行了大量研究。在多项国家基础科研项目的支持下,成飞公司数控厂与多家国内高校合作,在钛合金高速、高效切削刀具方面,研究了刀具与工件的组成成份之间的元素扩散、化学反应以及相互粘结和熔解,并建立

了切削刀具与钛合金材料力学、物理和化学性能的合理匹配关系模型和匹配设计理论;研究了高速切削条件下的刀具磨损与破损机理,以及不同冷却方式对钛合金加工切削性能及刀具寿命的影响,建立了钛合金高速加工刀具寿命模型;基于刀具和工件刚度匹配关系的多自由度非线性动力学模型,以无颤振稳定切削下的高材料切除率和高加工表面质量为优化目标,建立刀具刚度与工件刚度的匹配关系模型<sup>[9]</sup>;通过对硬质合金立铣刀螺旋角及齿间角对高速加工振动的影响研究,发现采用非对称结构的变齿间角及变槽深结构,可有效提高钛合金切削稳定性,并自主设计了适合钛合金高效加工的整体硬质合金刀具<sup>[10-13]</sup>。

综合成飞公司数控厂在钛合金高速、高效加工方面的技术积累与经验总结,实现钛合金高速、高效与高精度加工所需突破的关键技术包括以下几个方面:钛合金高速切削加工刀具,减小敏感方向切削力,保证切削加工过程中刀具足够的刚度,满足抑制切削颤振要求;钛合金刀具材料、结构需降低钛合金高速加工过程中的粘结、扩散磨损,提高刀具寿命;钛合金高速加工刀具冷却需充分,降低切削温度以提高刀具寿命。

总之,钛合金等难加工材料的高速、高效与高精度切削加工对刀具材料与结构提出了特殊的要求,发展新型刀具关系着切削生产率的进一步提高。发展新型钛合金高速、高效切削刀具,在材料方面最主要的性能要求应是具有更高的强度、硬度、化学稳定性、耐热性、耐磨性以及抗涂层破裂性能等;在结构设计方面应增强刀具的减振、抗振性能,通过刀具结构的优化与改进能保证更充分的冷却,降低切削加工时的温度,提高切削速度和刀具寿命。

### 3 加工表面质量控制技术

钛合金零件表面质量的优劣关



图4 立铣刀

系到其使用寿命和性能,是高速高效切削的重点关注领域。飞机零件由于设计结构的要求,常需要多种刀具进行切削加工,刀具之间的接痕使得零件加工表面质量不稳定,同时由于对切削参数缺少系统的研究也对零件表面加工质量产生较大影响。针对表面粗糙度、硬度和残余应力的研究是表面质量研究的重要内容。

表面粗糙度研究方面:在切削过程中,不仅刀具工件相对运动、刀具几何参数对粗糙度具有影响,振动、刀具磨损、切削变形、切削热等因素也不可忽视。H. Parisn<sup>[14]</sup>考虑加工系统的动力学特点,建立了高速铣削表面粗糙度的预测模型。山东大学陈建岭<sup>[15]</sup>等通过试验研究了铣削参数对粗糙度、表层微观组织的影响。综合工件与刀具相对运动的几何特征,建立了钛合金铣削加工表面粗糙度的理论模型,揭示了其形成机理。

加工硬化研究方面:在切削加工中,由于材料塑性变形强化和热软化的综合作用,使已加工表面产生加工硬化现象。加工硬化对材料疲劳强度和耐磨性具有影响。20世纪50年代, Oxley<sup>[16]</sup>等学者就开始了加工硬化研究,在直角切削模型中考虑了加工影响现象。C. R. Li<sup>[17]</sup>应用有限元方法研究了低速加工工件表层硬度分布,建立了以剪切面长度为已加工表面变形参数的模型。

残余应力研究方面:切削加工引起的残余应力对零部件变形、应力腐蚀和疲劳寿命具有重要影响。N. Fang<sup>[18]</sup>等研究了刀具几何形状对残余应力的影响。日本学者米谷茂<sup>[19]</sup>对车削加工工件已加工表面残余应力产生机理进行了研究。国内华南理工大学<sup>[20]</sup>在20世纪80~90年代较早地开始了切削加工残余应力产生机理的理论和试验研究。

此外,山东大学孙杰<sup>[21]</sup>建立了基于刀具和工件刚度匹配关系的多

自由度非线性动力学模型,通过模态试验等手段分析了不同条件下刀具和工件的刚度状况,以及不同刚度条件下刀具和工件各自对铣削稳定性的影响,并绘制了铣削稳定性极限图。基于多自由度动力学模型,分析了刀具和工件模态耦合对铣削稳定性的影响,获得了典型钛合金薄壁件高速切削过程不同切削加工工艺、不同工件剩余壁厚等多变量对切削稳定性的影响,以无颤振稳定切削下的高材料切除率和高加工表面质量为优化目标,建立刀具刚度与工件刚度的匹配关系模型。

总之,钛合金结构件表面质量控制技术涉及机床、刀具、切削参数、走刀路径、冷却润滑以及装夹等诸多方面。目前,成飞在进行钛合金结构件表面质量控制技术研究方面,主要通过采用高性能整体硬质合金刀具、控制精加工切削余量、采用物理仿真手段优化减小切削力等方法,以保证零件的表面粗糙度、加工硬化以及残余应力等满足设计要求。但是,针对钛合金尤其是Ti6Al4V高速铣削切削加工的表面完整性研究,如在粗糙度、加工硬化和残余应力的形成机理以及它们之间内在联系方面,还需要深入研究。

#### 4 薄壁件加工及让刀控制

弱刚性零件加工是复杂的制造工艺难题,而钛合金弱刚性零件除了钛合金材料本身所具有的难加工特性外,其薄壁的结构特点给加工带来了更大困难,主要表现在:(1)加工尺寸精度难以控制。大量薄壁件的使用,特别是大尺寸薄壁件具有壁厚、腔深的特点,易产生加工变形,零件的尺寸精度难于保证;(2)表面质量难以保证。深腔薄壁的结构特点及钛合金自身材料特点导致钛合金整体结构件加工过程中极易产生颤振,使表面质量恶化;(3)加工效率难以提高。工件刚性弱,易产生颤振等特点导致传统的钛合金整体结构

件加工只能在低切削用量水平上进行,生产周期长,成本高。

薄壁件加工过程中,由于切削力的作用,刀具和工件均会产生一定的弹性变形。CAD/CAM系统在规划刀具轨迹和选取工艺参数时,基于零件的理想几何形状,不考虑诸如工件、刀具变形等因素,导致实际加工表面与理论值存在偏差。因此加工让刀是薄壁类零件的加工中最为突出的工艺问题,国内外科研机构及有关企业均投入大量精力对薄壁件的让刀进行预测与控制。

国外的研究主要集中在,以三维铣削力建模为基础进行让刀量的分析与预测,其中开展研究较早、影响较为广泛的是Yusuf Altintas<sup>[22]</sup>,他在建立铣削三维切削力模型的基础上,借助有限元分析计算方法,研究了整体铣刀加工薄壁件所产生的让刀及其在工件表面的分布。法国的Philippe Depince<sup>[23]</sup>利用刀具与工件的接触点关系,对刀具在加工过程中所表现出的弹性变形特征对工件表面几何加工精度的影响进行了研究,发现借助接触点分析获得的让刀量比传统的只考虑刀具让刀所产生的让刀量更符合实际情况。

国内近年来在薄壁件切削力建模、切削过程稳定性、工件表面几何精度预测与控制、刀具弹性变形等方面,均开展了较为深入的研究。其中,中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司通过整合机床、工装、刀具及加工工艺成为高性能的切削工艺系统,使钛合金薄壁件的加工效率在近5年内提高了20%,是国内极少数具有大尺寸钛合金薄壁类结构件生产能力的航空企业之一。由国家863“钛合金薄壁类零件高速切削技术及应用”项目资助,成飞公司与山东大学合作建立了基于石蜡基复合材料辅助加固钛合金薄壁件高效加工的系统工艺方法,形成了包括石蜡基复合材料配方、石蜡基复合材

料融化、填加、回收等在内的整套工艺,开发研制的新型钛合金薄壁件石蜡辅助加固装置,已申请国家发明专利,能有效解决钛合金结构件加工难题,实现加工成型,减小钛合金薄壁件切削加工过程中的振动。试验数据表明:采用石蜡基复合材料辅助加固钛合金薄壁件加工振动加速度比不采取加固措施条件下的振动加速度减小 86.4%,腹板让刀变形减小 58.6%,有效提高了超小尺寸薄壁结构的加工能力。

尽管国内外均针对薄壁件铣削加工的切削力、稳定性及让刀等方面展开了较为深入的研究,但基于单因素的研究成果往往受到其它因素的制约而不能在工程应用上发挥其效能。缺乏综合考虑工艺系统、加工参数、加工刀具、工装夹具的钛合金薄壁件高效加工系统理论来指导企业工程实际应用。因此,综合考虑加工工艺系统的钛合金薄壁件高效加工技术将是今后的主要研究方向。

### 5 变形控制技术研究与应

航空结构件加工变形可分为两大类:结构局部变形和外形轮廓整体变形。结构局部变形主要出现在切削加工过程中,通常表现为让刀、局部弯曲等,其尺度局限在刀具与工件的接触区域附近。整体轮廓变形主要表现为切削加工完成后(如卸除工装夹具后)的整体弯曲、扭曲以及零件放置过程中的伸长和缩短等,其变形量与结构件外形轮廓尺寸成正比。大尺寸整体结构件加工后往往表现为外形轮廓的整体变形,主要由材料大量去除后内应力再平衡分布引起,温度变化导致的热胀冷缩和放置过程中的自然时效也是引起整体轮廓变形的重要因素。

在美国、西欧和日本,对钛合金结构件的加工变形控制已积累一定的经验。法国巴黎航空工业学院与国家宇航局针对飞行器整体结构件设计与制造问题,联合建立了专门的

强度实验室,深入研究加工变形的工艺控制和安全校正等问题。日本的岩部洋育等针对切削力引起的薄壁零件的“让刀”变形,提出平行双主轴加工方案<sup>[24]</sup>。Nervi Sebastian建立了毛坯初始残余应力引起加工变形的数学预测模型,指出零件的最终变形情况与毛坯初始应力的分布状态,零件在毛坯中的位置和形状密切相关<sup>[25]</sup>。

国内有关航空整体结构件的加工变形预测及控制方面的研究主要集中在南京航空航天大学、北京航空航天大学、西北工业大学、浙江大学和山东大学等院校。南京航空航天大学武凯、何宁等采用数值模拟技术研究了框体结构零件的腹板、侧壁加工变形规律及其变形控制方案,提出了大切深法和分布环切法充分利用薄壁件自身刚性以减小加工变形,提高加工精度<sup>[26]</sup>。并且考虑到内应力的释放导致变形,通过应力检测系统实时监测加工过程中内应力的变化,据此制定优化的工艺路径控制工件变形<sup>[27]</sup>。山东大学路冬等建立了基于系统刚度变化的工件变形控制模型,采用遗传算法与有限元方法相结合的优化方法优化夹紧点数目及位置来控制加工过程中工件变形<sup>[28]</sup>。对加工后仍然存在变形的零件采用变形校正工艺。山东大学孙杰通过仿真和试验手段系统地研究了航空结构件安全校正理论,提出了复杂变形的校正方法,通过机械方法对已变形零件进行校正<sup>[29]</sup>。

鉴于钛合金整体结构件变形问题的复杂性,后续研究有以下问题需要注意:

(1) 钛合金航空整体结构件的变形是多因素综合作用的结果,包括毛坯初始残余应力、工件结构特点、材料特性、工艺过程等,对不同结构零件应进行系统分析,找出导致加工变形的关键因素,有针对性地采取控制措施。

(2) 大多数薄壁件变形的研究都是在有限元的基础上,得到了薄壁结构件加工变形的一些规律,从而提出相应的变形控制工艺措施,缺少系统的理论依据,并且在分析过程中往往只考虑引起变形的单因素,具有一定的片面性。

### 6 冷却润滑技术研究与应

在钛合金结构件数控加工过程中,刀/工摩擦接触区的高温、高压、高频冲击等对刀具性能提出了严峻考验,刀具的急剧磨损往往是制约切削效率提高的关键因素。面对现代制造技术在“高效、低能耗、环保”等方面的高要求,如何选用合理有效的冷却润滑方式,以改善刀/工摩擦状态和抑制刀具磨损,从而提高加工质量和加工效率,同时加工过程环境友好,是钛合金航空结构件数控加工冷却润滑方式优化选择时必须考虑的重要技术要素。

解决钛合金材料的切削问题需要采用耐高温的高性能刀具,并对切削过程中的刀具进行有效冷却润滑。在钛合金常规速度切削加工中,一般采用湿式切削,如图 5 所示,以达到降低切削区温度,进而达到延长刀具使用寿命的目的。但切削液的制造、使用、处理及排放要消耗大量的能源和资源,且对环境造成污染。若采用乳化液等高速湿式切削钛合金,由于热疲劳破损等反而使刀具寿命极低。目前,在钛合金高速加工中,主要采用常温或低温条件下的风冷和微量润滑等冷却润滑方式,气体介质主要有空气、N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>等。此外,采用液氮冷却高速加工钛合金,亦可有效延长刀具寿命,但对刀具冷却装置要求较高,不易推广应用。

针对钛合金等难加工材料冷却润滑方式的研究,国内外诸多刀具生产厂家和高等院校均开展了大量的试验研究工作。在德国,特别是诸如达姆施塔特工业大学、亚琛工业大学、布伦瑞克工业大学以及多特蒙德工

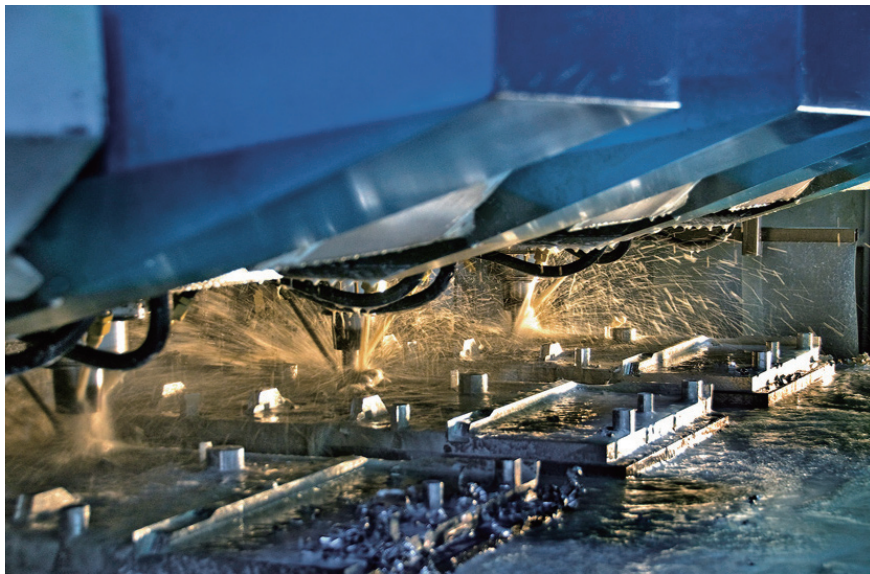


图5 钛合金加工湿式冷却切削

业大学等院校,在钛合金切削机理、有限元模型分析、仿真、切削试验和采用不同冷却方式等方面均开展了一系列研究,其中,亚琛工业大学的机床实验室(WZL)还与伊斯卡(Iscar)、肯纳金属(Kennametal)、山高刀具(Seco Tools)和山特维克(Sandvik)等刀具厂,密切合作开展了包括高压冷却等技术的研究。从Iscar公司提供的资料可以了解到在不同冷却润滑压力下车削钛合金时切屑成形的情况。在采用2MPa的压力进行大流量外冷却时,产生成长条缠绕形的切屑;当采用8MPa压力的内冷却时,切屑在高压冲击下被折断成小的弧形切屑;如果采用30MPa超高压进行内冷却,这时就变成了针状形切屑。从上述实例不难看出,通过高压冷却可以控制切屑的成形,提高切削过程的可靠性,并提高切削用量<sup>[30]</sup>。

我国近年来在钛合金冷却润滑领域的理论研究以及应用上取得了长足进步。已有研究表明,在钛合金高速切削过程中,采用普通切削液会加剧钛合金材料在刀具表面粘结层的剥落频率,加重刀具涂层的粘结剥离,因而普通切削液有加重复合涂层刀具磨损的趋势<sup>[31-32]</sup>,而传统切削液在钛合金加工过程中,还会造成铣削

刀具空行程骤冷,从而加剧刀具热应力梯度,在刀具表面形成热裂纹加剧刀具磨损破损,故而在使用金刚石刀具切削钛合金零件时,可使用一种新型的以二氧化碳、水及植物油雾化后的雾状混合物作为冷却介质的加工技术,达到冷却、润滑及保护金刚石刀具的目的<sup>[33]</sup>。此外,采用低温氮气射流结合微量润滑高速铣削钛合金时能够较为有效地降低铣削力、抑制刀具磨损,在低温氮气射流条件下,只要热裂纹的形成与扩展未引起刀具的崩刃及刀面的剥落,进一步降低低温氮气的温度将提高刀具的使用寿命<sup>[34]</sup>。

近年来,微量润滑切削以其良好的冷却、润滑、排屑以及低污染等综合性能而受到了工业界的普遍关注,是高速、高性能切削加工采用的主要冷却润滑方式之一。目前,国内工业企业和科研院所已采购了大量的可配备微量润滑功能的高速切削机床,微量润滑或低温微量润滑切削随着现代高速切削机床的普遍使用而得到了一定程度的推广应用。成飞公司的数据统计表明,相对于湿式切削,采用低温微量润滑高速切削钛合金等难加工材料,刀具寿命提高30%以上。

目前,国内钛合金高效切削专用冷却介质的研究与应用还与国外存在较大差距,在生产中大规模应用的国产冷却介质相对缺乏。在航空制造企业,钛合金冷却润滑介质主要采用进口产品(如辛辛那提米拉克龙、嘉实多等),不仅增加了生产成本,而且对我国航空制造企业生产的稳定发展存在一定的隐患,急需在钛合金高效切削专用冷却润滑介质领域进行深入系统的研究,充分利用高效、低污染、可持续发展的新型冷却润滑介质,加强产学研合作及科研成果的转化,争取早日实现优质冷却润滑介质的国产化。此外,切削加工现场环境质量安全与切削介质的环境污染问题一直是困扰机械制造业的难题之一。如何在推广应用高性能冷却润滑技术的同时,有效监测和控制切削现场的空气质量,使其对人体健康的影响降低至安全可靠的标准之下,同时又能有效地提高金属切削加工质量与切削加工效率,则是我国工业界和机械制造技术领域所必须重点关注的问题。

## 结束语

我国航空制造企业近年来通过加强产学研合作,以及引进吸收国外先进制造技术,对钛合金结构件的加工工艺方法进行了系统研究,大幅度提高了钛合金航空结构件的加工效率与加工质量。但我国大型飞机钛合金结构件的数控加工仍处于起步阶段,加工效率及质量都还明显落后于发达国家,已成为制约整个飞机研制和生产的“瓶颈”之一,急需通过更为深入的产学研合作提高科研水平与生产效率,加大科研成果转化为实际生产力的力度。

本文共有参考文献34篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 深蓝)