

整体叶盘加工技术 探索与实践

Exploration and Practice of Blisk Machining Technology

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 杨金发 张军 李家永
卢成玉 杨万辉 赵天杨



杨金发

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心工艺所高级工程师。主要从事高性能数控加工技术、整体叶盘加工技术、切削数据库开发等研究工作。发表科技论文 10 余篇。

整体叶盘是 20 世纪 80 年代中期西方发达国家在航空发动机设计中采用的最新结构和气动布局形式,是高性能航空发动机实现结构创新与技术跨越的核心部件。与传统的装配结构相比,整体叶盘(见图 1)将叶片和轮盘设计成一个整体结构,省去了传统联接用的榫头、榫槽和锁紧

我们需结合整体叶盘车、铣加工特点,针对钛合金、高温合金材料,系统地优化加工参数,通过工艺试验固化工艺参数;开展整体叶盘柔性快换工装系统研究,实现零件快速定位装夹;从刀具磨损控制、程序防错技术开发等方面开展整体叶盘数控加工质量控制工艺研究,形成整体叶盘精加工过程控制指导规范,保证产品的稳定批量生产。最终实现整体叶盘的高效率、高质量和低成本加工。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.12.070

装置,减少了结构重量和零件数量,避免了榫头气流损失,使发动机结构大为简化。整体叶盘是航空发动机的关键部件,发动机的快速发展要求航空叶盘转速更高、工作温度与工作

压力更高,从而要求叶盘从几何结构、材料性能到制造精度方面进行大幅提升^[1-2]。在整体叶盘制造工艺过程中,近成形技术与精确成形技术相互渗透,形成整体叶盘复合制造工艺,各工艺技术有其优越性和局限性,无法以一

种方法替代其他所有工艺方法。

整体叶盘难加工材料特性

整体叶盘大多采用高温合金和钛合金等难加工材料,轮盘辐板、叶



图1 整体叶盘

片较薄,叶片悬臂长,是典型的弱刚性零件,在加工中具有轮盘和叶片两种工艺特点,容易产生振动和变形。高温合金、钛合金有其特殊的切削加工特点。

(1) 高温合金的切削加工特点。

- 加工硬化性强,高温强度高,切削温度高,切削力大。

- 高温合金中强化元素含量较高,形成的硬质点使刀具容易磨损。

- 易产生积屑瘤,从而降低刀具的切削性能,影响零件表面质量。

- 切屑不易卷曲和折断,排屑不畅,易使刀具崩刃,破坏零件表面。

- 导热系数小,导热性差,切削热不能及时传出,刀具容易磨损。

(2) 钛合金的切削加工特点。

- 导热系数小于不锈钢和高温合金,切削温度高,刀具易磨损;

- 刀尖附近应力集中,刀尖或切削刃容易磨损甚至损伤;

- 化学活性高,容易与刀具材料产生化学作用,使刀具磨损;

- 弹性模量较小,受力变形较大。

在高温合金中,镍基高温合金高速铣削过程中呈现大应变、高应变率、高温、高压及循环加载等显著特点,容易产生锯齿形切屑,会造成切削载荷的周期性波动,从而加剧刀具磨损并引发切削过程颤振。

目前,国内外许多学者针对难加工材料(如钛合金、高温合金)开展了大量试验与理论研究,然而这些研究工作绝大部分集中在单次切削过程中材料的变形机理及刀具的磨损机理,忽略了零件几何特征而孤立地考虑材料本身的切削机理。这些研究工作能够对实际生产加工起一定的指导作用。对于空间曲面复杂、加工精度与表面质量要求高的镍基高温合金、钛合金整体叶盘,需要针对性地开展基于工艺特征与几何结构的高效切削机理研究。钛合金、镍基高温合金加工硬化与残余应力分布状态决定了整体叶盘加工质量,这方

面的研究工作目前鲜有报道。

整体叶盘对数控加工设备的特殊需求

国外整体叶盘制造技术主要包括五坐标数控铣削加工技术、精密电解加工技术、线性摩擦焊加工技术等。其中,等温模锻+五坐标数控铣削加工是一种研制周期短、见效快的工艺方法。

整体叶盘制造主要涉及两大类设备:数控车床和五坐标加工中心。数控车床用于加工轮盘部位,加工中心用于加工叶片部位,并且需要五坐标加工中心完成叶片的加工。整体叶盘辐板两面跳动公差为0.02mm,辐板厚度公差一般为 $\pm 0.05\text{mm}$,叶片扭曲公差为 $\pm 5' \sim \pm 15'$,各加工表面对设计基准面的跳动公差 $\leq 0.05\text{mm}$ 。叶盘表面质量要求严格,表面粗度值较低,例如:叶片表面粗糙度值 R_a 为 $0.4\mu\text{m}^{[9]}$ 。由于叶盘几何尺寸精度高、技术条件要求严,在机械加工中,除了粗开毛料阶段采用普通设备外,为保证精加工余量均匀,在半精加工阶段就开始采用数控加工中心加工叶片部位。由于其结构的特殊性,需要5个轴的复合运动来完成叶片的加工。

机械加工通用设备应具备的基本功能和精度:定位精度和重复定位精度较高;强力内部冷却和外部冷却功能;机载在线刀具测量(车加工中心);五坐标加工中心主轴上仰角摆动功能等。

难加工材料整体叶盘刀具技术

1 车削加工刀具

整体叶盘的结构复杂,存在许多难加工区域,如薄壁辐板型面、封严蓖齿等结构,给车削加工造成一定的困难。整体叶盘车削加工刀具通常可根据材料及结构特点选用相应牌号的硬质合金刀具(见图2)和可转

位机夹刀具。



图2 机夹式切槽刀具

陶瓷刀具材料具有硬度高、耐磨性能和耐热性能好、化学稳定性优良、不易与金属产生粘结的特点,已成为高速切削高温合金的主要刀具材料之一。应用陶瓷刀具实现高速切削的核心就是要充分利用陶瓷材料的高温特性,提高切削速度,使切削热量不断累积,切削区温度升高,软化切屑,使切削变得很容易。尽管陶瓷材料与硬质合金材料相比韧性与其耐磨性相差很多,但其高温稳定性是硬质合金刀具远远达不到的。

一般陶瓷刀具不在零件的精车工序使用,以免高切削热影响零件变形。

在陶瓷刀片的应用过程中需要注意以下几点:

(1) 刀片寿命的长与短,速度是关键。一定要转变观念,大胆提高切削速度。

(2) 陶瓷材料耐磨性不如硬质合金,如果采用等切深、多次切削,势必在刀刃与零件的接触点处出现垂直于刀刃的沟状磨损。因此,一定要想方设法不断改变刀刃与工件的接触点,此方法对延长刀刃的使用寿命非常有效。

(3) 与硬质合金相比,陶瓷材料较脆,因此在切削过程中坚决杜绝振动现象。要求机床有足够大的功率,主轴转动平稳,进给均匀。在车削加工时,无论何时都要保证充足的冷却液,冷却液不会降低切削区域的温度,却可以大大提高刀具寿命,冷却液必须浇注在切削面上。

(4)在下次切削前,应检查是否需要更换刀片,粗加工时应充分利用已“崩刃”的刀片,不要匆忙决定放弃该刀片。可以继续使用已“崩刃”刀片,直到确认不能切削为止。

2 铣加工刀具

(1)刀具结构的选择。在整体叶盘的粗加工中,应尽可能地选取直径较大的刀具,不但确保刀具的刚性,而且有利于提高加工效率,刀具直径要小于加工区域的整体流道的最小宽度,刀具长度要适当,避免与叶片型面产生干涉。

(2)刀具类型选择。整体叶盘的叶片由于悬臂长、扭曲大,加工过程中叶片间加工区域狭窄,刀具可移动范围小,加工区域约束条件复杂,使得加工过程中刀具矢量方向变化剧烈;同时由于叶片较长,增加了刀具的长径比,加工应力引起的变形和振动问题较难解决,严重影响了加工效率和表面质量。从提高刀具每齿进给量和提高总切削进给率,进而提高加工效率出发,在叶片精加工阶段采用6刃刀具,有利于提高加工效率。

(3)刀具参数的选择。由于受到通道的限制,要求刀具直径小且刀杆长,受到切削力时会产生振动。这种刀具及叶片的耦合共振严重影响叶片的表面加工质量,使叶片表面出现鱼鳞状缺陷,容易使叶尖加工不到位。解决问题的方法是:根据刀具受力情况,进行刀轴矢量优化,使优化后刀轴在沿叶身变化过程中均匀过渡,切削位置最佳,保证切削过程平稳。根据不同的结构及零件的刚性,确定加工参数,使叶片和刀具的刚度协调;刀具一般都工作在刚度控制区和共振区域。当刀具的长度较短,刀具的刚性较强的时候,刀具工作在刚度控制区。而随着刀具长度变大,其刚性就越差,系统的振幅就慢慢朝着共振区域移动,产生颤振,这就是为何长径比较大的刀具容易产生颤振而无法重新回到稳定的原因^[4]。

在实践中,采用热胀刀柄可以减小刀柄直径及刀具长径比,提高刀具刚性;采用带锥度球头铣刀,可以有效提高铣刀刚性,进而实现对刀具系统振幅的控制,减小铣削颤振。在确定铣刀几何角度时,应考虑铣刀结构参数对残余应力的影响,优化的刀具结构参数应能保证铣加工低残余应力的要求,针对难加工材料,刀具前角可以选择 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 。

多轴联动数控铣削技术

1 多轴联动数控铣削技术的优点及应用

多轴联动数控铣削技术具有快速反应、可靠性高、加工柔性好、工装相对简单及生产准备周期短等优点,是各国整体叶盘制造行业新产品研制首选加工方法,并得到广泛的应用。美国GE和P&W、英国R·R、法国SNECMA、德国MTU、俄罗斯SALUT等公司,在整体叶盘研制初期和除高温合金以外的叶盘批量生产阶段,广泛采用该项技术。国内铣削效率和国外差距较大。叶片的加工难度大,主要是加工过程中的加工应力变形和加工振动问题较难解决,如果再采用针对整体叶盘的方式进行加工,加工应力和加工过程中的振动会显著提高,因此在整体叶盘的加工过程中,降低加工应力和减小加工振动成为加工的关键。

2 铣削工艺

整体叶盘通道狭窄而复杂,叶片扭曲,粗加工材料去除率大,传统加工常用可转位铣刀进行槽铣开粗,这一加工方式对于铝合金、不锈钢乃至钛合金叶盘都非常有效。近年来,Z轴铣削法,即插铣加工方法,在整体叶盘的加工中得到应用。插铣加工方式(见图3)改变了主切削力方向,使得最大切削力沿刀具系统刚性最大的主轴方向。插铣加工中依然有一部分切削力会沿刀具的径向,在切入、切出过程中刀具径向力由于切宽

变化而波动较大,易造成动态径向力冲击下的插铣刀杆失稳。随着机床、刀具及工艺技术的进步,侧铣开始在叶片的精加工中应用。叶片在精加工过程中,厚度处于动态变化之中,此类弱刚性、变刚度的叶片侧铣加工,稳定性不易保证。加工过程稳定性建模既要考虑机床与刀具的刚性,又要考虑工件的动态刚性,而在弱刚性的叶片侧铣加工中,变刚度叶片侧铣的稳定性建模是叶片精加工成功的关键。目前,整体叶盘高效去除叶盘流道大余量技术的研究实现了钻铣-插铣-层铣3个阶段的跨越,效率不断提高。国内自适应加工技术已有研究。自适应加工技术通过数控加工过程中加工区域提取、工件装夹定位、余量优化和变形误差的自适应控制,实现发动机整体叶盘的高效精密加工^[5]。

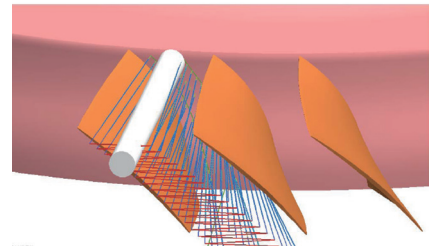


图3 插铣模拟图

3 加工质量的控制

(1)采取有效措施控制加工变形。国际上通用的方法是在叶片通道间填充材料,减小切削弹性变形。针对叶盘的特殊结构,控制叶盘叶片加工变形,可以采取工艺填充法,即减振填充。在叶片通道间填充相应的材料,常用的填充材料有松香、石蜡、低熔点合金等。叶片通道填充材料后,可提高叶片刚性,在铣削时减少加工变形和振动,提高叶片的加工精度和表面质量。

(2)选择合适的刀具和切削参数。如果切削参数选择不当,可能会导致切削力过大,产生较大的弹性变形,不仅降低叶片加工的尺寸精度,还会降低叶片的表面质量。可以通

过优化并固化叶片的数控铣加工切削参数来解决问题。

(3) 采用变形补偿技术。这种数控补偿加工,可以提高叶片的加工精度,而且能提高加工效率。对变形采取预补偿技术,对指定的精加工余量进行修正。采用高速、适合薄壁叶片的精铣加工方式可有效减少变形。

(4) 优化叶片铣削加工的余量分布和加工顺序。通过优化叶片半精铣加工的余量分布和加工顺序,能够有效抑制叶片加工的颤振现象。在叶片数控铣削加工时,通过改变余量分布,从加工切削力优化和工件刚性优化两个方面入手,可有效提高切削过程的稳定性。

整体叶盘全加工过程虚拟仿真技术的研究

整体叶盘的仿真主要是对数控程序进行翻译,将机床、夹具、毛坯、刀具、零件等装配一体,进行加工过程仿真,检查零件的过切与欠切情况,解决了刀具与零件、刀具与夹具、主轴与零件碰撞干涉问题,可以减少工艺试切时间,实现了叶盘铣、车削加工无试切,以及加工程序的优化。

VERICUT 软件是专用的数控加工仿真软件,可以在 VERICUT 环境下实现加工全过程的系统动态模拟仿真,刀具轨迹优化;有效避免零件表面过切、零件、夹具与刀具碰撞和刀具与零件干涉;实现无试切件的工艺验证。

整体叶盘叶型与流道三坐标快速测量与自动分析技术可以实现数据自动采集、测量、分析、快速评定自动化。

全过程无人干预数控加工技术

全过程无人干预数控加工技术是指在零件加工过程中将加工刀具、加工参数、走刀路线在程序中设定并固化,以达到整个加工过程不

需人为调整就能加工出合格零件的加工方法。这种加工方式在国外的发动机制造行业以及国内其他行业的机械加工中已得到广泛应用,但在国内发动机制造行业中还处于尝试阶段。

(1) 整体叶盘加工用刀具的选择应尽可能选择少的种类,要保证机床刀具库刀位数量够用。加工时,程序根据加工需要自动从刀具库中调用所需刀具。

(2) 整体叶盘加工路线的选择:在零件的模型中要建立余量图,将余量均匀的拆分,拆分余量以刀具的切削用量为标准。以拆分余量线路为走刀路线,选择合适的刀具编程,实现均匀去除余量。同一种刀具去除余量过程中,如果路线过长,刀具磨损严重,无法用一把刀走完整条路线,可在路线中适当位置安排暂停指令,在此处更换新刀片,此后继续完成整条路线的加工。走刀路线的安排是整个加工过程中最重要的部分,走刀路线要确保每刀的切削深度都在刀具的承受范围之内,刀具的切削过程最好是均匀的去除余量,编程时还须特别注意进、退刀位置。

(3) 程序中换刀、对刀、加工参数的设置。“无人干预数控车加工”这种加工方式的换刀及对刀均是在程序中设定好的,选定刀具后进行对刀,把刀长和刀具半径输入到相应的地址中后,将每把刀具放在刀库中指定的位置,用程序自动调用。“无人干预数控车加工”这种加工方式,通过细化余量及走刀路线,尽可能地减少空走刀路线,在空走刀时程序中加大进给率;同时在余量骤增骤减处,程序中自动降低增加进给率。这样,工人在整个加工过程中就不需要参与进给率的调整工作了。

整体叶盘的测量(见图4)具有一定的难度,要实现在线测量难度更大。理想的无人干预加工方式采用机内对刀及测量仪器在线测量来消

除人为因素对加工造成的干扰。目前,在线测量技术已有应用。粗加工完成后程序暂停,机内测头对加工尺寸进行在线测量,程序中将测量实际值与理论合格尺寸进行比较,若合格,则进行下一个尺寸加工;若不合格,则根据两者比较差值继续上刀加工,直到加工尺寸合格为止。



图4 整体叶盘的测量

结束语

整体叶盘加工技术的提高任重道远。我们需结合整体叶盘车、铣加工特点,针对钛合金、高温合金材料,系统地优化加工参数,通过工艺试验固化工艺参数;开展整体叶盘柔性快换工装系统研究,实现零件快速定位装夹;从刀具磨损控制、程序防错技术开发等方面开展整体叶盘数控加工质量控制工艺研究,形成整体叶盘精加工过程控制指导规范,保证产品的稳定批量生产。最终实现整体叶盘的高效率、高质量和低成本加工。

参考文献

- [1] 陈光. 新型发动机的一些新颖结构. 航空发动机, 2001(3):3-10.
- [2] 胡晓煜. 波音 7E7 的发动机将采用已验证的先进技术. 航空周刊, 2003(36):13-14.
- [3] 王聪梅. 航空发动机典型零件机械加工. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- [4] 郭伟清. 刀具颤振与动力减振浅析. 工具技术, 2010(11):78-81.
- [5] 张定华, 张莹, 吴海宝, 等. 自适应加工技术在整体叶盘制造中的应用, 航空制造技术, 2008(12):51-55.

(责编 玲犀)