

新型复杂航空结构件数控加工技术

NC Machining Technology of New Type Important Aircraft Structure Part

中航工业北京航空制造工程研究所 王文理 陈树巍 康永锋 袁士平 梅贵才 邵坤 安铮



王文理

中航工业北京航空制造工程研究所数字化制造与柔性装配技术研究室高级工程师。长期从事航空产品数控加工工艺技术、集成制造技术与数字化制造技术研究,以及型号任务攻关。主持和参与了多项重大课题和多项军品型号任务攻关,曾2次获得集团科技进步一等奖,发表论文20余篇。

数控加工与其他专业的复合加工技术,在新型航空结构件的生产中大量出现,例如复合材料构件、超塑成形钣金件、蜂窝芯体、焊接结构件,也要求其具有精确的曲面外形及孔系。

新型飞机为了达到优异的机动性能、飞行性能、轻量化、长寿命、低成本制造等技术指标,对机身结构及发动机提出了更高的要求,并采用最先进、最前沿的设计技术与设计理念使飞机结构件向整体化、薄壁化、结构承载与功能综合等方向发展,要求零件重量轻、加工精度高、加工效率高,大量采用了整体结构、薄壁结构及整体结构件,截面复杂、装配协调面多、精度要求高、外形尺寸大、壁薄、非对称与变截面等结构特征,加工精度比上一代机型明显提高。许多关键件的结构形式、设计精度、材料都是首次应用,数控加工是机体结构件制造的主要方式,是新一代装备

性能的重要保障基础,我国航空工厂对这些新型零件的加工经验十分有限,数控加工面临着极大的挑战。

数控加工与其他专业的复合加工技术,在新型航空结构件的生产中大量出现,例如复合材料构件、超塑成形钣金件、蜂窝芯体、焊接结构件,也要求其具有精确的曲面外形及孔系。以前都是采用手工切边、制孔或者普通机加方式加工,但为了满足新一代飞机设计的精度要求,必须采用数控加工技术。如图1所示,飞机钣金件的外形及孔也需要数控精加工。

数控加工必须直面这些挑战,在设计数控工艺中有正确的思路,抓住重点,突破关键工艺技术,才能保证

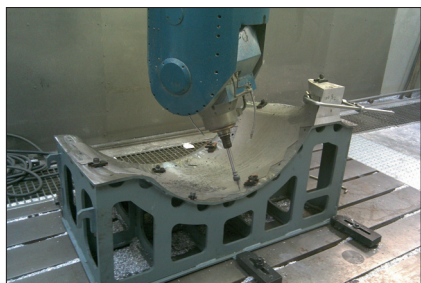


图1 钛合金蒙皮钣金件五坐标加工

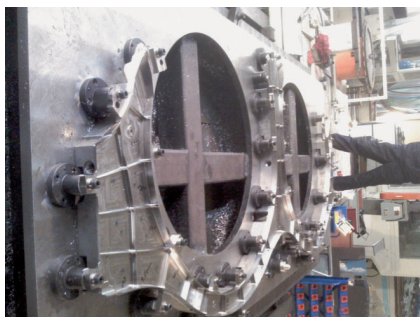


图2 大型钛合金整体框

这些关键件的复合加工质量和效率。

几种新型航空结构件的数控加工技术探索

1 大型、难切削材料航空关键结构件的高效数控加工技术

航空结构件向着进一步整体化、零件大型化方向发展,以达到大幅度减少零件数量,从而减少零件之间连接所增加的重量,避免由于连接带来的应力集中,还可以大量减少工装的数量和加工工装的工时,从而大幅度降低制造成本。例如,F-22后机身钛合金隔框精密模锻件投影面积达 5.53m^2 。大型难切削材料结构件体积大、硬度高、壁薄、刚度差、易变形、切削量大、加工周期长、加工成本高、切削力大、切削温度高、弹性模量小,造成刀具磨损严重,加工效率低,加工质量和精度难以控制。此外,大型难切削材料航空结构件多数都涉及焊接及热处理工艺,造成加工过程中零件变形情况更加复杂。大型难切削材料航空结构件实现高效率、高精度和高可靠性的切削加工是航空制造业面临的一个重要课题。

图2所示的某大型钛合金整体框,长度超过3m,双面薄壁槽腔和加强筋,两边有耳片,中间有开口,外形为机身变斜角,还有深孔、深槽。粗加工后焊接,焊后最终精度由数控加工来保证,此类框不但为难切削材料,而且尺寸巨大、结构复杂、精度要求高、数控程序量巨大,这些特点决定了该框数控加工强度极大、难度大、风险大、效率低、难以测量。

图3为某大型超高强度钢零件,有多个重要尺寸或形位公差,它们具有原子密度大、滑移系数高的面心立方晶格的奥氏体组织结构。因此在切削时,表现出极大的变形抗力,具有高硬度、高强度等特点,是典型的难加工材料。淬火后强度达 1600MPa ,硬度大于HRC47,并且长度方向缩短超过1mm,表面有约0.5mm的脱碳层。此类零件在加工过程中由于焊接热处理工序导致不断变形,重要尺寸及形位公差难以保证,切削效率低、加工周期长。数控加工工艺设计必须紧紧围绕控制变形、提高效率这个主题进行。



图3 大型超高强度钢零件

此类大型难切削材料航空结构件数控加工关键技术是数控加工工艺设计技术。数控加工工艺的设计要以加工变形控制和精度控制为主线,合理划分粗精加工工序,合理设计加工基准及变形后加工基准的修复,合理设计加工顺序,尽量消除焊接和热处理对加工的影响。在主要控制变形的同时,兼顾切削效率,在工艺与程序中,结合所采用的刀具,选择切削参数。难切削材料最适合的刀具是整体硬质合金带涂层刀具。

精加工阶段要主要关注加工表面质量。此外,上千条数控程序的编制技术、仿真与校验技术也十分重要,要对巨量的程序进行认真仿真,确保刀具轨迹的正确性,严格控制下刀位置,余量分配要均匀,否则刀具会直接崩碎。在加工过程中,必须严格监控刀具状态,及时更换已磨损的刀具,仔细控制进刀切入方式。工装设计一定要牢固可靠,要能够抵御数千牛的切削力。由于零件巨大,工装还要考虑抵消机床台面的误差。大型难切削材料结构件的数控加工工艺要综合考虑上述关键技术,忽略任何一点都将造成无法挽回的后果。

2 宽弦空心叶片发动机整体叶盘高精度数控加工技术

在第4代战斗机的动力装置F119和EJ200发动机均采用钛合金宽弦风扇叶片,风扇、压气机和涡轮均采用了整体叶盘结构,可减轻重量30%。宽弦、无凸台、空心叶片的整体叶盘是高性能发动机风扇和第一级压气机叶片的发展方向。

叶盘毛坯一般采用高强度难加工材料。叶片薄见(见图4)、扭曲度大、叶展长、刚性极差,且叶片间的通道深而窄、开敞性很差、材料切除率很高,严重影响了数控铣削的可加工性。尤其是宽弦空心叶盘(图5),叶片的扭曲度更大,刚性更弱,叶盘加工刀具长径比大,造成刀具刚性极差,切削过程中表现出很高的动态切变强度,降低工件表面的加工质量和表面完整性,无法与已成型的空心叶片曲面光滑相接。整体叶盘材料、结

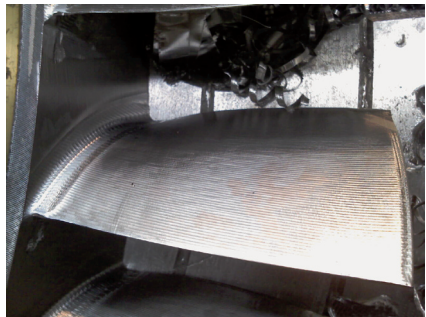


图4 叶片加工



图5 宽弦整体风扇叶盘

构和工艺的复杂性与其高精度制造之间形成了一对尖锐的矛盾,而保证航空发动机核心转子部件整体叶盘的加工精度、加工效率以及表面完整性又至关重要。整体叶盘类零件的数控加工是航空制造业面临的另一个重要课题。

整体叶盘五坐标数控铣削加工的关键技术包括叶盘通道与刀轴矢量的控制、刀具轨迹设计及光顺处理、通道的高效粗加工技术、叶片型面的精确加工技术、加工变形控制和叶片与刀具减振技术、薄弱结构加工颤振抑制工艺、切削参数优化技术。采用变形补偿、自适应加工、抗疲劳制造等上述各项基础技术的系统集成,刀具要选择刚性好的整体硬质合金刀具和高刚性高精度延长杆。工程经验的积累对于提高加工效率、质量也非常重要。对于刚性很差的叶片的精加工,在叶片通道内填充能够快速凝固的具有一定强度的填充物,可以有效增加叶片的刚性,减少加工振动。

整体叶盘数控加工程序编制时首先要考虑的是控制刀轴方向,因为通道太窄、叶片扭曲、盘体是锥形等因素,所以刀轴控制稍有差错就会干涉。此外退刀、空刀快速移动一定要控制幅度。粗加工可以采用定摆角等高线行切,或五坐标侧刃铣削,所有刀具轨迹应实现顺铣。精加工刀位轨迹设计要流畅、光顺,行距要小,才能保证行切出的曲面光顺。清根程序要留少许余量,避免刮伤叶片型面。采用高转速小切深的类似高速加工的策略,降

低切削力。整体叶盘的精加工必须选用精度很好的五坐标加工中心,设备的刚性也要好,最好是转台、摆头结构,便于周向分度加工。

3 大型薄壁复杂结构类零件的高速加工技术

航空结构件大型薄壁结构件的典型代表是整体壁板、货舱地板。其面积大、薄壁、刚性差,有些长达10多米,并且结构复杂、加工精度要求高、切除率高。大型薄壁结构件加工颤振抑制(见图6)、加工变形控制、尺寸精度控制、提高加工效率是数控加工的关键技术。

大型整体薄壁结构件(图7)最有效的加工方式是采用高速切削技术,高速加工的切削随着切削速度增大,切削温度反而下降,切削力也会大幅度下降。要充分发挥高速切削加工优势,必须要有合适的高速加工的加工策略用于指导高速加工,尽量采用高的切削线速度,高的进给速度和小的切深,把进给速率的变化降到最低,避免刀路轨迹转弯处的尖角,采用顺铣方式。

在数控程序编制过程中,根据不

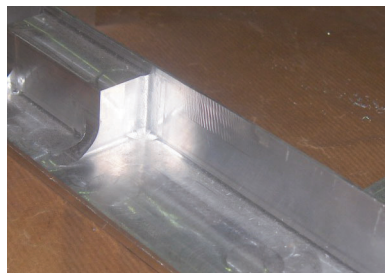


图6 高速加工1mm薄壁结构时振动造成振纹

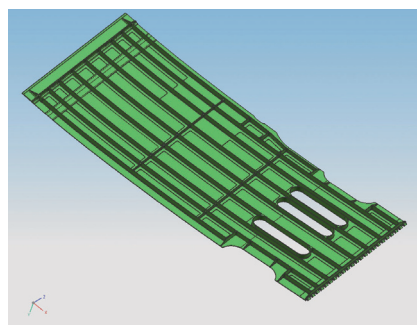


图7 大型薄壁壁板

断变化的切削状态,应及时调整其它参数,尽可能按最佳切除率进行编程,并且应尽量保持常量切除率,这样才能最大效率地进行高速加工。同时,常量切除率又能保持基本一致的切削状态,避免有时切多有时切少导致的切削力的剧烈变化,使加工质量保持一致。在粗加工工序中,为了能够确保最大的切削效率,所规划的刀轨应适应恒速进给;在精加工工序中,为提高加工表面质量,所生成的刀轨应保持刀具以恒力切削。进给量与径向切深应尽可能均匀,有利于延长刀具寿命,减少噪声污染。在加工过程中保持切屑等厚度,保持切屑厚度为最大允许的常量,可以保持高的切削效率,基本一致的切削条件也有利于保持切削力和切削状态的一致,使加工表面质量得到保证。

4 大型复合材料构件的精确数控加工

新型飞机复合材料用量大幅度上升,以前采用手工钻孔、切边的复合材料构件现在必须采用数控加工才能达到精度要求。数控加工是最后工序,一旦出现问题,将损失严重。因此,设计合理的加工工艺,选择合适的刀具、加工参数对复合材料零件的加工尤为重要。

碳纤维复合材料构件一般尺寸较大,形状结构复杂,硬度和强度都很高,属于难加工材料。切削过程中切削力较大,切削热不易传出,严重时会使树脂或使树脂软化,刀具磨损严重,因此刀具是碳纤维加工的关键,其切削机理更接近于磨削而非铣削,所以,切削线速度通常要大于500m/min,采用高转速小进给策略。切边加工刀具一般选用整体硬质合金滚花铣刀、电镀金刚石颗粒砂轮、镶金刚石铣刀、铜基金刚石颗粒锯片。图8中的3类新型整体硬质合金复合材料加工专用铣刀的切削效果更好,它们都有一些共同特点:刚性高,螺旋角小,甚至是0°,专门设



图8 已破损的碳纤维加工专用刀具

计的人字形刀刃,都可以有效减小轴向切削力,减少分层,其加工效率与效果都很好。

碳纤维复合材料层间强度低,易在切削力的作用下产生分层,因此钻孔或切边应减小轴向力。钻孔要求高转速、小进给,转速一般在 3000~6000r/min,进给量达到 0.01~0.04mm/r,钻头选用三尖两刃或两尖两刃形式较好,锋利的刀尖可先将碳纤维层划断,两刃对孔壁起到了修补作用,镶金刚石的钻头锋利与耐磨性俱佳。复合材料与钛合金夹层的钻孔是个难题,一般采用整体硬质合金钻头,按钻削钛合金的切削参数进行钻削,从钛合金侧先钻,直至钻通,钻削时加润滑剂,缓解复合材料烧伤。波音公司专门研制了 PCD 组合钻头用于夹层的钻孔。

复合材料切屑为粉状,对人体健康危害大,应采用大功率吸尘器吸尘,采用水冷也可有效降低粉尘污染。

5 钛合金/高温合金蜂窝芯体的高精度数控加工技术

钛合金、高温合金蜂窝是一种新型性能优良的航空材料,影响蜂窝芯零件最终加工质量的主要因素是固持方法,因为蜂窝芯沿六方孔格纵向有一定的强度,其横向伸缩性大,碰伤或压倒后难以修复,正是由于蜂窝材料的这种结构特殊性,它的加工成形不能简单沿用传统的加工工艺和装夹方法。

由于钛合金、高温合金强度高、韧性好,数控切削时切削力比传统铝蜂窝要大很多,因此不仅需要更大的固持力,而且蜂窝芯格壁加工过程中

由于切削力大及材料特性更容易出现倒边现象(图9),所以钛合金、高温合金蜂窝芯高速铣削加工固持方法更加困难,且后续的钎焊工艺要求窝芯加工尺寸误差很小,对清洁度要求也很严格,所以对后续清理工作也要求很严,这对固持填充物的要求又更加严格,困难更进一步。采用高速铣削方式,能有效抵抗切削力减小倒边现象。

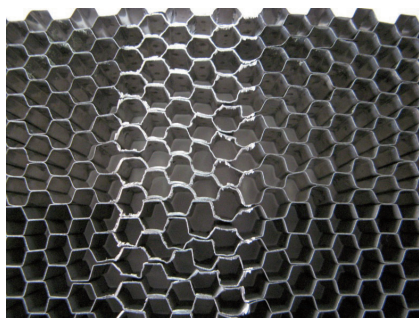


图9 蜂窝芯格壁数控加工出现倒边现象

国外有将超声加工应用于对蜂窝芯的切割加工,其切割力小,切割精度高、切割边缘平滑、无破损碎屑,该技术还有待于我们探索。

6 高强度钢民机起落架高效数控加工技术

起落架材料大量采用超高强度的 300M 钢。300M 钢添加镍、硅等元素,强度可达 2000MPa,其内外圆表面、凸台、孔等均需要进行数控加工,且几何和形位公差要求较高。民机起落架(图10)体积庞大,安全系数高,现在面临的突出问题就是超大型 300M 钢件的数控切削加工效率和质量。

300M 高强钢加工刀具寿命是加工的瓶颈所在,尤其是淬火后其硬度强度大增,刀具的耐用度急剧降低。先进刀具具有三大技术基础:材料、涂层和结构创新。刀具的刚性应该是高强钢加工中被重视的主要问题。刚性不足会引起刀具的振动或发生刀具倾斜,影响加工精度、加工效率。并且因为刀具的振动会加快刀具的磨损,甚至影响刀具及机床



图10 波音787主起落架

设备的寿命。在满足加工要求的前提下,要尽量选择较短的刀柄,以提高刀具加工 300M 钢的刚性。高强度钢的高效粗加工属于典型重型切削,对数控机床的最基本要求是高刚性与高功率。起落架零件的高精度加工对机床的加工精度和精度稳定性提出了越来越高的要求。

300M 高强钢加工刀具寿命是加工的瓶颈所在,新型涂层刀具材料及刀具结构设计已成为起落架加工的重要关注,在刀具没有突破性进展的情况下,切削参数优化技术和加工工艺设计是研究的重点。

超高强度钢加工需要严格控制表面不被烧伤,表面局部烧伤将严重影响其疲劳寿命。在切削加工阶段,甚至在钳工打磨阶段,使用不当的打磨工具,例如电动角磨机,都会造成局部烧伤。因此此类零件的加工必须严格控制切削参数,确保大流量水冷,采用合适的打磨工具,确保表面质量的完整性。

结束语

上述几类新型复杂航空结构件都是飞机关键承力件,其数控加工技术体现了我国航空制造业数控加工的技术水平。近年来中航工业北京航空制造工程研究所 105 室对这些飞机关键部件的数控加工工艺进行了卓有成效的探索与实践,突破了很多关键技术,积累了一定的数控实践经验与切削参数,提升了我国航空制造业的数控加工工艺技术水平。(责编 深蓝)