

航空整体结构件加工技术^{*}

Machining Technology for Aviation Integrated Structures

山东大学机械工程学院 杨 勇 李剑峰



杨 勇

2007年获浙江大学博士学位,现为山东大学博士后研究人员,主要研究方向为高效切削加工技术、CAD/CAM/CAE。

随着航空领域竞争的愈益激烈,对飞机性能提出了更高的要求。就现代飞机结构设计的特点是重量轻、结构强度高,降低飞机的自身结构重量,就意味着提高了飞机的机动性、增强了携带负载的能力,并能获得更远的飞行距离;而且,随着重量的降低、结构强度的提高,还可以延长飞机的服役寿命。为此,在飞机结构设计和制造中,一些大型复杂结构零

本文以航空整体结构件为研究对象,在分析各个加工关键技术的研究现状、存在问题和发展趋势的基础上,提出了相应的解决策略和可行的技术方法,力求为实现航空整体结构件的高效、高精度加工提供理论依据。

件,尤其是主承力结构件(如飞机大梁、隔框、壁板等)普遍采用了整体化结构设计。整体结构不但可以减少零件数目,降低结构重量,而且使飞机的结构效率和可靠性成倍甚至数十倍地提高,可以说整体结构件在现代飞机上的应用是制造技术的一大进步^[1]。然而,在整体结构件的数控加工过程中,常由于毛坯的初始应力、结构的不对称性及加工工艺的不尽完善等原因导致工件弯曲、扭曲以及弯扭组合等加工变形;薄壁结构还会产生失稳现象,严重影响了航空整体结构零件的生产效率和最终产品精度。

同时,随着材料科学与制造技术的发展,在航空整体结构件中越来越广泛地采用许多新型难加工材料,如钛合金、镍基合金以及超耐热合金等,这些材料具有强度和硬度高、塑性和韧性好、导热性差、存在微观硬质点、化学性质活泼等特性,在切削

加工过程中刀具所受的切削力和切削热明显升高,导致了严重的加工矛盾,使其成为典型的难加工材料,严重制约着加工效率和产品质量的提高。航空整体结构零件的加工精度和加工效率是制约现有先进机型批量化生产和新机型研发进度的瓶颈,特别是大飞机的研发,使得这一关键工艺问题显得尤为突出。

航空整体结构件的加工制造是一个系统工程,机床、刀具、装夹和工艺等都是这个系统中的关键技术环节。这中间的任何一环都将影响产品的加工质量。本文以航空整体结构件为研究对象,在分析各个加工关键技术的研究现状、存在问题和发展趋势的基础上,提出了相应的解决策略和可行的技术方法,力求为实现航空整体结构件的高效、高精度加工提供理论依据。

大型结构件加工对机床功能的需求

航空钛合金等难加工材料加工

* 国家自然科学基金重点项目(50435020)和山东省博士后创新专项资金(200703080)资助。

过程中切削力大、切削温度高,容易产生振动,因此在航空整体结构件加工制造中,要求机床具备高刚度、大功率和大扭矩的特性,同时具备更好的抗振能力。机床的主轴在加工过程中直接支持工件或刀具的运动,主轴的性能对工件的加工质量和机床生产效率均有重要影响,提高主轴刚度将是保证机床加工航空整体结构件精度的重要环节之一。机床的导轨和支撑件的联接部件,对工件加工质量和机床加工特性影响也很大,联接部件往往是局部刚度最弱的部分,联接方式对其刚度影响很大,如果导轨的尺寸较宽时,应用双壁联接型式,导轨较窄时,可用单壁或加厚的单壁联接,或者在单壁上增加垂直筋条以提高局部刚度^[2]。

目前高刚度、大功率和大扭矩特性的机床设计和开发,主要采用优化设计方法和有限元仿真分析方法。优化设计是优化理论在机械设计领域的移植和应用,其基本思想是根据机械设计的理论、方法和标准规范等建立一个反映工程设计问题和符合数学规划要求的数学模型,然后利用数学规划方法和计算机计算技术自动找出设计问题的最优方案^[3]。

基于物理仿真的有限元方法是近几年来研究系统结构动力特性的有效手段,通过机床加工动态过程有限元分析能够预先观察机床的承力性能以及主轴部位载荷和应力的变化情况,从而可以利用有限元分析结果对机床动态特性进行优化设计。在有限元分析中可用“粘合”方式来模拟机床零部件之间的固接关系,动平台与挡板之间的接触是滑动接触,并用油进行润滑,其滑动摩擦系数相对较小,可近似视为无摩擦滑动,在分析中可用“无摩擦接触”方式来模拟这种连接关系。对于主轴承载情况,可通过对主轴、刀具、工件施加位移、速度等边界条件,构建真实的主轴、刀具、工件作用过程^[4]。通过对

机床不同部位的动态特性进行有限元仿真分析,对机床各个系统结构进行优化设计,最终开发出能够高效加工航空整体结构件的机床系统。

随着许多新型航空材料的应用和航空整体结构件的几何形状及结构不断改进更新,对加工此类零件的机床特性要求更高,除刚度、功率和扭矩等特性外,还需要对机床的机械部分、冷却系统、工作空间以及机床联动性等进一步设计,开发适合航空整体结构件结构特点和材料特性的数控加工机床,实现航空整体结构件的高效高精度加工。

高性能切削刀具设计

针对航空整体结构件加工的刀具设计主要是开发专用高性能精密刀具,开发低切削力、低振动新型高速高效切削刀具,提高航空整体结构件的加工技术水平。所涉及的关键技术主要包括刀具材料开发、刀具涂层技术、刀具结构优化设计以及刀具制造工艺等。

1 刀具材料开发

难加工材料在航空整体结构件中的应用对刀具材料提出了新的挑战,这些材料具有较特殊的物理力学和机械性能,要求刀具材料在开发时应具有更高的抗冲击韧性、红硬性和耐磨性能,以提高刀具的可靠性和延长刀具的使用寿命。到目前为止,针对航空整体结构件的切削加工,国内外科研机构和刀具生产商已经开发了许多新型高效刀具材料,如针对航空铝合金结构件加工开发的高性能高速钢、金刚石和人造聚晶金刚石,针对钛合金结构件加工开发的超细微粒硬质合金、立方氮化硼(CBN)和聚晶立方氮化硼(PCBN),针对复合材料结构件加工开发的立方氮化硼和聚晶金刚石刀具等超硬刀具材料^[5]。

在研发刀具材料时,不但要关注提高其某几项性能的绝对值,而且还

要了解切削时刀具材料与航空材料的相互作用以及某一项性能的相对值。例如,刀具材料与航空材料的化学相互作用要小,要有足够的相对硬度(包括高温硬度)、相对韧性和相对强度;除此之外,还必须达到刀具材料与航空零件材料之间在物理、化学、力学性能等方面的合理匹配,满足切削性能稳定可靠、加工效率高、加工精度高、经济效益好和有利于环境保护的要求。

在刀具材料开发方法方面,除了按常规设计方法外,山东大学提出以切削加工可靠性为优化目标,采用基于切削可靠性、融合刀具切削理论和刀具材料设计开发于一体的刀具开发研究新体系,并在开发系列陶瓷刀具中进行了应用。

2 刀具涂层技术

钛合金等航空整体结构件可切削加工性很差,单纯用刀具基体材料进行切削已难以达到加工要求,在刀具基体上施加涂层,进行涂层刀具的设计和开发,将是解决航空难加工材料整体结构件加工矛盾的有效途径。实践证明,涂层刀具将使航空难加工材料的加工效率和加工质量大大提高。

目前,针对航空难加工材料的加工,材料科学家和国内外各个刀具生产厂家已开发出多种类型的涂层刀具。山高刀具公司针对航空不锈钢难加工材料,开发出Duratomic涂层,使刀具的耐磨性和韧性提高80%;三菱株式会社开发出切削淬硬钢用的超级涂层硬质合金刀片UE6110,它在车刀的前刀面与后刀面分别涂不同的涂层,在前刀面上涂有抑制结晶生长的TiCN与Al₂O₃构成的纳米结构涂层,可获得极高的韧性,在后刀面上涂黑色超平滑涂层,可以确保磨损的稳定性;山特维克可乐满公司在开发涂层刀具中采用了无应力涂层技术,该技术形成的刀具强度远远超过标准

CAD 涂层方法产生的刀具刃口强度; 伊斯卡公司展出了新一代涂层: α -IC9150、 α -IC9250、 α -IC9350 和 α -IC4100 从涂层工艺和涂膜厚度上对原 CVD 进行了提升, 采用的 MTCVD (中温化学涂层) 以较低的工艺温度和较快的沉积速率实现涂层与基体分界面上的脆性 η 相最少, 同时减少了在高温 CAD 涂层中常见的因高温导致的拉伸裂纹; 另外, 三菱还开发了 CVD 涂层 US905, 由强韧纤维状 TiCN、微粒 Al_2O_3 、TiN 三层组成, 涂覆在专用硬质合金基体上, 膜层硬度达 HRA92.2, 在切削经时效处理的 Inconel 718 时隔热效果好, 耐高温, 在高的切削速度下也能够保证切削稳定^[6-7]。

涂层技术在现代刀具生产中的重要作用无疑已被公认, 但当前刀具涂层技术存在涂层易剥落、工艺复杂昂贵等缺点, 更重要的是关于涂层的性能、涂层是如何应用到特定领域或如何弥补刀具外形的不足以提高刀具的切削性能等方面仍存在疑问, 有待进一步深入探索和分析。

3 刀具结构优化设计

刀具材料和涂层技术的发展为提高航空难加工材料切削效率打下了基础, 但是只有通过先进的刀具结构才能充分发挥刀具材料和涂层的优势, 提高刀具的整体切削性能。

目前, 针对航空难加工材料加工的切削刀具结构设计主要包括两方面: 一方面是刀具宏观外形结构优化设计, 另一方面是刀具微观结构优化设计。在刀具宏观外形结构优化设计方面, 许多科研机构 and 刀具生产厂家已经取得了丰硕的研究成果, 如结构新颖的铝合金高速加工面铣刀和立铣刀; 多功能、多盘、多工位可变角、快换微调的机夹梅花刀; 用于车削的高效刮光刀片; 形状复杂的带前角铣刀刀片, 球头立铣刀刀片, 防甩飞的高速铣刀刀片。此外, 一些创新的刀具结构还可产生新的切削

效果, 如不等螺旋角立铣刀与标准立铣刀相比可有效遏制刀具的振动, 降低加工表面粗糙度值, 增大刀具的切削深度和进给速度; 硬质合金丝锥及硬质合金螺纹铣刀的开发将螺纹加工效率提高到高速切削的水平, 尤其是硬质合金螺纹铣刀, 不仅加工效率高, 而且通用性好; 在防振型多功能铣刀的设计中采用了独特的 4 刃槽型截面和具有防振功能的外刃, 能有效降低加工中的振幅, 特别适用于刚性较弱的航空薄壁结构件加工^[8-9]。

在刀具微观结构优化设计方面, 目前研究较少, 这方面的研发主要包括减振韧带、刃口强化和钝化结构及其参数设计等。国外研究者对刀具微观结构设计较为重视, Shintani 等人^[10]研究了采用 CBN 刀具切削淬硬钢时刀具刃口形状对切削力、热等切削物理量的影响规律; Jeffrey 等人^[11]研究了切削刀具刃口钝化对加工表面粗糙度的影响情况; Jiang Hua 等人^[12]研究了多种刀具刃口形状(锐刃、圆弧刃、倒刃等)对车削残余应力的影响情况, 得出采用圆弧刃和倒刃刀具将使加工表面残余应力更加复杂, 应力影响域更大。此外, 美国的 Conicity Technologies 公司对刀具刃口钝化结构、几何参数以及钝化方法等方面进行了长期的研究并取得了大量的研究成果。国内研究者在刀具微观结构与几何参数设计方面起步较晚, 研究也少, 成都工具研究所和刀具行业的专家桂育鹏在这方面开展了工作。

航空整体结构件材料硬度高, 零件形状复杂, 在刀具结构方面不断进行改进和创新设计, 将是高效高精度加工该类零件的重要环节。其中, 刀具刃口部分的微观结构设计是影响加工效率和刀具寿命的关键因素之一。今后, 刀具微观结构及其参数优化设计将是进一步深入研究的重点课题。

4 刀具制造工艺

航空铝合金、钛合金、高温合金、耐热合金钢以及复合材料等材料品种牌号很多, 性能差异极大。针对这些航空材料结构件的加工, 当前除了在刀具材料、涂层技术、刀具结构优化设计等方面开展研究外, 还要对制造工艺进行深入研究, 如刀具钝化工艺远落后于其他刀具制造工艺, 使刀具在磨损阶段产生的微裂纹、裂缝等不能很好地消除, 以至于后期刀具磨损较快。另外, 开发刀具设计与制造软件系统也是一个重要的研究内容, 国外已出现针对刀具制造工艺的参数化设计、制造软件系统, 而国内在该方面差距较大, 尚未开发出专用的刀具辅助设计与制造软件系统。

航空整体结构件加工过程中的装夹布局优化技术

航空整体结构件大多为表面由数个槽腔和孔组成的双面结构设计, 机械加工时装夹困难, 易产生加工变形, 表面加工质量很难控制。在实际装夹时应考虑满足翻面加工时能提供较好的定位和支撑、较薄的结构能提供辅助支撑、外轮廓加工时能连续进行切削等要求。从压紧调整、结构调整、定位调整几个方面考虑, 航空制造业普遍采用的装夹方式有机械、液压可调夹具、真空吸附装夹等几种。

目前, 国内航空结构件的装夹存在凭经验来确定装夹力大小、位置及作用顺序, 没有考虑高速切削热力耦合对工件变形的影响等问题, 很难保证工件的加工精度, 并给加工后的工件校形带来很大的困难。夹紧力是影响航空整体结构件变形的重要因素之一, 随着对航空整体结构件加工精度要求的提高, 装夹布局优化研究逐渐受到重视。

文献 [13] 研究了航空结构件装夹布局中的装夹部位、装夹顺序, 对于这些因素对结构件加工变形的影

响进行了定量和定性分析,并结合有限元仿真分析进行了方案优选;文献[14]叙述了拉伸装夹方式对航空框类零件加工变形的影响,从控制薄壁件加工变形的角度出发,对拉伸装夹方案进行了优化;文献[15]以减少加工中工件最大弹性变形为目标,叙述了建立弧形件铣削加工装夹布局的优化模型,基于有限元方法对薄壁弧形件装夹布局进行了优化;文献[16]针对航空框类结构件,叙述了建立结构件加工变形有限元分析模型,以及预测加工过程中和夹具释放后结构件的变形,并采用基于遗传算法的夹紧点位置及夹紧点数目递推优化的方法,对航空整体结构件进行装夹布局优化;Yan Wang^[17]建立了参数化有限元仿真分析模型,从控制薄壁结构件加工变形的角度,对装夹方案进行了优选研究;K. Kulankara^[18]结合理论和实验研究,采用遗传算法对装夹布局和夹紧力进行了优化。

尽管以上研究在装夹位置、装夹元件数目、装夹顺序以及装夹布局方面进行了深入的研究,但是主要集中在结构件局部装夹系统的研究方面,而对随刀具加工路径移动的动态装夹系统很少涉及。整体结构件的加工变形是多方面影响因素导致的,是动态的变形过程,特别对于弱刚度薄壁结构件来说是如此,因此,今后需要进一步开展跟踪刀具加工路径的动态柔性装夹系统的布局优化研究,同时,在试验研究的基础上,采用有限元方法对整个复杂装夹系统进行仿真分析将是优化装夹布局的一个有效方法。

航空整体结构件数控加工变形预测与控制技术

1 航空整体结构件数控加工变形预测

航空整体结构件尺寸大(可大至数米甚至二三十米),结构复杂,形

状精度要求很高,其外形多数与飞机的气动外形有关,周边轮廓与其他零件还有复杂的装配协调关系。在采用薄蒙皮和铆接骨架的分散结构情况下,与飞机承力骨架贴合的是刚性很差的薄蒙皮。骨架和蒙皮的配合允许有较大容差,如某类歼击机为 $\pm 0.25\text{mm}$,在装配应力不是很大的情况下,可以装配出合格的产品。但是,相对于骨架和蒙皮均为大厚度的整体结构来讲,同样的装配间隙就会产生很大的装配应力,从而产生应力腐蚀,导致飞机强度和寿命的降低,因此,必须成倍地提高结构件的加工精度才能满足装配要求。然而,由于整体结构件具有面积大和结构与壁厚变化复杂等特点,在零件加工过程中很容易发生或弯或扭或弯扭组合的变形,加工精度得不到保证。

目前,国内航空结构零件加工制造原则性工艺是:粗加工(一般数控切削)+精加工(高速数控切削)和分步高速切削加工。对于结构件中存在的加工变形问题,主要从几何补偿角度进行了一些研究,通过数控补偿来修正一部分零件的加工变形。事实上,根据设计工艺加工出的工件,一般来说,只要这个零件不离开机床,即处于正常装夹状态下,其尺寸精度基本上都会符合设计要求。但是,一旦卸掉装夹,让工件自由停放一段时间后工件就会产生新的变形。很明显,这种几何修正操作往往需要分步进行多次,稳定性差,而且多次修正要以牺牲(放大)加工余量为代价,导致加工效率大大降低。因此,可以说几何修正只是工厂处理加工变形问题的一种权宜的措施,不是解决大型结构件加工精度控制问题的根本有效方法。

整体结构件的数控加工变形是航空制造业面对的最突出问题之一,因此,对数控加工变形进行预测并加以控制对实现航空整体结构件的高精度加工具有重要的意义和工程价

值。

针对航空结构件的加工变形问题,国内外学者采用数值模拟技术开展了关于精度保障的研究。在薄壁件的弹性变形或静态表面误差预测方面,国内外学者主要在几何仿真方面展开了系列研究,国内有南京航空航天大学、北京航空航天大学和西北工业大学的相关研究者^[19-21],国外有 Ratchev、Nikov 等^[22-23]。

零件切削加工几何仿真的主要思想是:按是否考虑刀具、工件变形以及工件刚度变化对切削力的影响,分别采用刚性预测模型和柔性预测模型,进而研究薄壁件的弹性变形或静态表面误差。采用刚性预测模型时,直接采用名义铣削深度、铣削宽度和每齿进给量预测弹性变形和表面误差,不考虑材料去除引起的工件刚度变化对变形计算的影响;采用柔性预测模型时,综合考虑刀具、工件变形以及材料去除引起工件刚度变化对加工变形的影响和耦合效应。这种方法的切削力是作为已知量施加到模型当中的。然而切削力是刀具和工件材料相互物理作用的结果,因为这种结果的存在才导致薄壁件的变形。虽然文献中施加的切削力是随着刀刃的切入长度变化的,但是将切削力通过边界条件施加到单元节点的过程是一个静态过程,而切削实际是一个动态的热-力耦合过程,材料在该过程中产生较大的塑性变形,伴随着高温和高应变率的发生,上述方法是无法仿真这一物理过程的。

在结构件整体变形预测研究方面,美国有限元软件公司 MSC 对结构件整体加工变形进行了初步研究,并在其开发的商业有限元软件 Marc 中首次集成了该项研究成果,但是他们主要考虑了毛坯内初始应力对零件整体变形的影响,通过读取 CAM 系统生成的 APT/CL 数据来指引单元去除的前进方向,所考虑的零件整

体尺寸也较小; A strom P^[24] 采用单元生死技术研究了零件在初始内应力作用下的整体变形, 刀轨路径通过参数方程给定, 零件整体尺寸也较小; 国内武凯等人采用数值模拟技术研究了薄壁腹板、侧壁加工变形规律, 指出大切深法以及分步环切法可以充分利用薄壁件自身的刚性, 减小加工变形, 提高加工精度; 王志刚等人分析了薄壁零件的加工变形, 其分析过程假设材料始终处于弹性范围, 数值模拟时考虑了切削力作用下侧壁的弹性变形, 但没有考虑初始残余应力和切削热对变形影响; 王运巧、梅中义等人采用数值模拟技术分析弧形结构件的加工变形, 分析过程考虑了工件初始残余应力、切削力、装夹等因素; 尹桂萍等人采用数值模拟技术分析了数控加工中弧形零件的变形, 在分析初始阶段没有考虑切削热、材料初始内应力等的影响; 王兆峻等人研究了薄壁零件的整体加工变形, 引起变形的因素主要考虑毛坯初始残余应力的影响而没有考虑切削载荷的影响^[25-27]; 浙江大学在国内率先采用有限元方法, 开展了航空整体结构件加工过程的物理建模和仿真研究, 对毛坯初始残余应力、材料本构模型、航空整体结构件加工过程变形预测、加工变形校正等方面进行了深入研究^[28-31], 所建立的有限元模型和仿真后结构件加工变形情况如图 1 和图 2 所示。

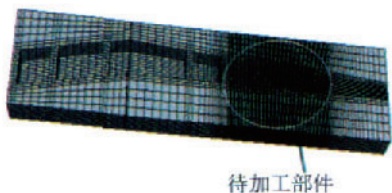


图 1 梁类结构件有限元仿真模型

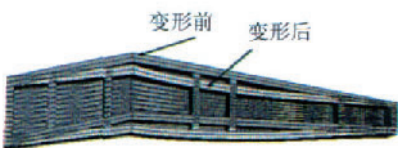


图 2 梁类结构件加工变形仿真结果

2 航空整体结构件数控加工变形控制

为了对航空整体结构件的加工变形进行控制, 需要认知结构件的加工变形规律和准确预测加工变形量, 在工艺规程的制定及数控加工程序的编制过程中采取相应的工艺措施, 对整体结构件加工工艺进行优化, 从根本上提高航空整体结构件的加工精度。

在整体结构件数控加工过程中, 刀具参数、切削参数、加工方式以及加工路线等都会对工件的加工精度会产生影响。但目前工艺规程制定中由于没有变形控制的科学理论和方法指导, 工艺人员只能凭经验和试验来获取比较合理的制造工艺路线, 带有很大的主观性。对工件的加工变形情况无法事先预测, 变形控制方案的确定不是建立在科学计算的基础上, 带有很大的主观性和随机性, 因此需要结合大量试验和计算机数值模拟, 通过对加工参数、工艺等进行优化, 对整体结构件的数控加工变形进行控制。基于工程计算可视化技术, 形象、直观显示模拟得到的工件内部残余应力和变形, 将整体结构件按照其结构特点进行分类, 对不同类型的工件采用不同的加工工艺方案, 考虑走刀路径、装夹方案、一定类型工件不同部位的加工顺序等因素, 以加工变形最小为目标函数进行工艺方案优化, 获得优化的不同类型整体结构件数控加工指导性工艺原则。

尽管采用有限元方法能够对航空整体结构件加工变形进行预测, 并能够在仿真分析的基础上开展加工工艺优化研究, 辅助制定控制加工变形的最佳工艺规程, 但是, 由于航空整体零件结构复杂多样, 材料可加工性差, 同时切削加工本身是一个复杂的动态非线性和强热力耦合过程, 因此, 对航空整体结构件加工过程的有限元仿真分析还不能同实际加工情

况完全一致, 许多建模环节如材料弹性本构模型、切削摩擦模型、材料断裂准则等还有待深入研究, 另外, 实际加工中的机床振动、刀具磨损等现象也应该加以考虑。今后, 随着切削加工过程物理建模环节的完善和计算机数值仿真技术的发展, 有限元模拟实际加工过程的精度将会得到较大的提高, 使有限元仿真分析对实际生产的指导进入应用阶段。

结束语

(1) 航空钛合金等难加工材料在加工过程中产生较大的切削力, 并且容易产生振动, 为实现难加工材料航空整体结构件的高精度加工, 需要开发高刚度、大功率和大扭矩特性的机床。

(2) 针对航空整体结构件材料的物理力学特性, 需要设计和开发专用高性能精密刀具, 其中刀具材料开发、刀具涂层技术、刀具结构优化设计以及刀具制造工艺是高性能刀具设计的关键技术环节。

(3) 夹紧力是影响航空整体结构件变形的重要因素之一, 装夹布局优化是实现航空整体结构件高精度加工的重要工艺环节。今后, 需要进一步开展跟踪刀具加工路径的动态柔性装夹系统的布局优化研究。

(4) 加工变形预测与控制是航空整体结构件制造工艺研究的关键问题之一。利用有限元仿真技术研究 and 解决整体结构件数控加工变形问题已成为当前研究工作的热点。在利用有限元仿真方法对加工变形进行预测的基础上, 结合刀具参数、切削参数、加工方式以及加工路线进行工艺参数优化, 实现航空整体结构件加工变形的有效控制是一个重要研究课题。

注: 本文有参考文献 31 篇, 因篇幅所限, 未能一一列出, 读者如有需要, 请向编辑部索取。(责编 微凉)