

飞机钛合金连接框全数字化高效加工

■ 中航工业沈阳飞机工业集团有限公司数控加工厂（辽宁 110850） 张 伟

摘要：主要针对框类零件的典型结构的工艺性分析及加工方案的论证，根据TC4材料的加工特点，合理选择切削参数和刀具规格，全面阐述了在数字化加工中的具体实施过程，从而总结并提炼出指导性工艺生产资料。

随着飞机制造业的飞速发展，很多薄壁钛合金零件大量出现在了飞机结构中，某型号飞机上零件材料多采用高强度钛合金，且框类零件均为薄壁件。该连接框是飞机结构上的典型零件，通过此次加工该钛合金连接框的同时，也开展钛合金零件高效铣切加工技术的研究，在加工过程中使用插侧刃渐进插补法技术，以此解决变形及加工效率问题，建立钛合金高效加工工艺参数库，为未来机型研制提供技术基础和技术支持。

1. 零件分析

连接框是飞机重要连接受力构件之一，具有安全传递载荷和实现飞机各部位连接之功用。内外缘均有装配关系，其零件形状较为复杂，内形槽窄且深。外缘条多为变角度曲面结构（见图1），毛料状态为钛合金板材。



图1 连接框结构

为了更加合理有效地控制加工方案的全过程，在零件工艺准备进行之前必须进行周密严谨的零件分析，找到影响零件加工的关键环节及难点所在。

（1）零件毛料信息：毛料为钛合金板材，材料牌号TC4-DT-M（退火），毛料外廓尺寸分别为460mm×410mm×44mm，毛料质量为36.9kg。

（2）零件材料特点：TC4高强度钛合金在切削时产生的热量大，切削区温度高，摩擦系数大，导热性差，这样很容易导致刀具材料过烧、加速刀具磨损，钛合金这个特点是影响其机械加工的一个最主要因素。

钛合金化学活性高，亲合力强，在较高的切削热作用下，钛合金中的钛元素极易与刀具中的碳，空气中的氢、氧、氮发生化学作用，或与刀具中的钛元素发生亲合作用，生成难加工的硬皮或产生粘结，加速刀具磨损，不利于切削加工。

加工过程中刀尖应力大，后刀面热量高，钛合金的切削变形系数小（ $\xi \approx 1$ ），切屑在前刀面上的流速快且接触面小，刀具

前刀面与切屑和刀具后刀面与已加工面之间的摩擦大，再加上钛合金不易散热，所以刀尖处受力大，特别是刀具的后刀面温度高，甚至高于切削面，钛合金的这个特点是其加工刀具选择和切削用量选择的重要依据之一。

（3）零件加工容差及检测方法：连接框外形曲面轮廓度的加工容差为 ± 0.2 mm，缘条和腹板壁厚公差 ± 0.2 mm，基于数字化加工特点，零件的理论外形曲面轮廓度均采用数控测量机检测。

2. 加工方案论证

零件从毛料加工到成品的整个过程中，合理的工艺过程设计是非常必要和重要的一个环节。而工艺过程设计则主要从零件分析、加工过程分析、刀具分析入手。其中每一个步骤都是相互关联、相互制约的，都对最终成品的质量以及生产效率产生直接影响。

在工艺过程设计的初期阶段必须要经过至关重要的环节之一是加工方案的论证阶段，其中要考虑的侧重点主要有零件分析的结果、加工单元的实际生产能力与技术水平、工装系数设定、加

工设备精度与状况等方面。

加工方案设计最终要实现的目标主要包括以下几方面：①工装系数降到最低。②五坐标数控机床占机率降到最低。③加工周期降到最少。④加工过程完全实现全数字量传递，数字化加工，数字化检测。⑤无常规补加工工序。⑥数控加工程序优化设计，运行时达到无人干预状态。

影响零件加工的主要因素有加工余量非常大、壁厚薄、内形为大角度闭角、内形变角度曲面光滑过渡，加工方案的设定必须围绕这些主要因素进行。

(1) 加工设备的选择。在充分考量生产单元的机床现状与现阶段的生产剩余能力前提下，得到如下结论：三坐标机床有一定的剩余加工能力，五坐标机床生产任务非常饱满，短期内没有剩余加工能力。三坐标机床的刚性及主轴功率基本上能满足加工要求，五坐标机床原始机械精度普遍不够，需要加以维护方能满足加工精度要求。

经过权衡利弊做出如下选择：粗加工选用三坐标LANCER2000，去除绝大多数余量。内形精加工选用五坐标卧式机床ML100，机床结构为A、C摆角（摆角行程为 $\pm 95^{\circ}$ ~ 360° ）。

(2) 加工余量的分配。该连接框最终零件质量为1.55kg，金属去除率高达96%，如此大的切削余量，必须合理地安排切削过程，有效地控制零件变形。同时考虑到经济性、可行性、现实性，必须利用三坐标机床去除绝大多数余量，能用三坐标机床加

工绝对不用五坐标机床加工，在加工方案的设计过程中这方面特点显得尤为突出。

(3) 侧刃渐进插补法加工理论外形缘条曲面。该连接框零件理论外形曲面形成的缘条高度为44mm，按照常规思维方式，曲面的加工大多数倾向于用球头刀具行切方法，但是行切加工不可避免地也带来一些先天的弊端，那就是在切削过程中刀具始终在局部区域与切削区接触，结果造成了刀具切削刃上局部区域磨损严重，使得刀具寿命因此而下降，此外行切法加工后的零件表面一般都需要进行钳工打磨修整，增加了多余的工作量，对于钛合金零件特点，打磨温度受到了严格的限制，不得高于 54°C ，否则会产生表层组织过烧现象，影响零件的使用功能，因此必须提出更加合理有效的加工方法。针对该缘条曲面我们大胆地提出采用侧刃渐进插补加工方法来加工。对这两种方法加以比较如表1所示。

从比较结果不难得到结论，侧刃渐进插补法的确有一定的优势，下面就详细地介绍这种加工方法的原理与应用。侧刃渐进插补法的原理如图2所示。

所谓侧刃渐进插补法原理，是利用刀具侧刃在被加工曲面上沿着即定的程编轨迹“滑动”，刀具的侧刃在切削过程中始终与曲面保持相切（也可偏移等距离），按曲面的加工容差来分配轴向偏移量的大小（见图2中左图），最终实现曲面的加工。

显然，侧刃渐进插补法只能进行凸曲面的加工，对凹曲面加工一定要慎重使用，再者对凸曲面曲率半径的限制一定不要过大，不然就会出现轴向偏移量减小、侧刃插补次数过多现象，导致零件的加工效率下降。

从图2中右图可以看出，实际加工曲面轮廓不完全与理论曲面一致，存在一定的偏差，在数控程序编制之前，首先要依据加工容差分配实际插补理论偏差，进而计算出轴向偏移量，控制刀具侧刃按照曲面的切矢方向运动。此方法只适合于本零件在较小的曲率时使用，在外形曲率过大处还需行切加工。

(4) 刀具的选择及切削参

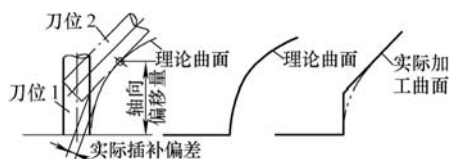


图2 侧刃渐进插补法原理

表1 行切法与侧刃渐进插补法的比较

加工方法	行切法	侧刃渐进插补法
考查点		
加工效率	低	高
加工后表面质量	低	高
加工后钳工打磨	需要	不需要
数控程序编程难度	易	难
加工曲面类型	凸或凹	凸
加工选用刀具品种	球头刀（多数情况）	任意刀具
刀具切削点与零件表面接触面	点或局部球头曲面	侧刃
刀具刚性提高可能性	小	大

数。如图3所示,该连接框内形整体由五坐标机床去除,环形槽深度31mm,同时缘条内形的转接半径圆角为R6mm,极大地限制了加工中刀具的选择,连接框环形槽宽度最小处仅12mm,内侧底角均为R3mm,且零件背面为R7mm大圆角,需要行切加工,这是加工的难点。

加工中选择国产焊接式硬质合金刀具加工。由于受到零件内形面的影响,不宜选择过大直径的刀具加工。粗加工、半精加工和精加工大多数都选择的刀具直径为 $\phi 40\text{mm}$ 。由于内形深度较深,所以在粗加工内形时刀具选用长短搭配方式进行,浅切削深度时选用短刃长刀具加工,提高刀具的刚性,使得加工线速度尽量提高,进而提高加工效率。

切削参数的选择需要综合考虑,对于不同的刀具材料加工不同的零件材料时选用的切削参数不同。另外,对于不同的加工目的,选取的切削参数也不同,

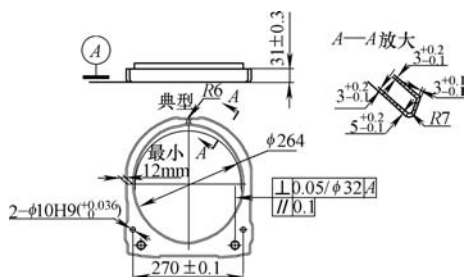


图3 连接框尺寸精度

粗加工是为了去除大部分余量,因此,切削参数要尽可能地选取上限值,精加工为了保证零件的尺寸,则需要选取合适的加工参数。

对于侧刃加工的形式,可以按照等截面积方式换算切削深度与切削宽度。粗加工选择较大的参数,精加工选取较小的参数。由于钛合金材料本身变形系数小,所以刀具的每齿进给量不宜选择过大,否则会加剧刀具的磨损,使刀具寿命下降。粗加工每齿进给量一般选择 $f_z=0.13\sim 0.20\text{mm}$,半精加工每齿进给量一般选择 $f_z=0.1\sim 0.13\text{mm}$,精加工每齿进给量一般选择 $f_z=0.06\sim 0.10\text{mm}$ 。在精加工中主要通过切削速度的提高来弥补每齿进给量的不足,最终达到表面的光整加工。此外,切削钛合金材料刀具线速度一般选择 $v_c=20\sim 60\text{m/min}$ 。

表2列出了加工中所使用的刀具和相对应的切削参数。

实际在粗加工过程中,严格限制了轴向切深,每层最大深度10mm,避免因切削深度过大产生过多的切削热,导致零件变形。此外切削过程中的切削液一定要充分供给,切屑的清理要及时,否则会对刀具的切削性产生不利影响,严重时会影响到已加工表面的表面质量。

3. 该连接框的仿真加工

依据预先设定的加工方案编制数控加工程序后,必须经过的一个关键环节是程序的校验与仿真工作,它可以使程序问题提前暴露出来,不至于把问题带到生产线中,仿真实现过程如图4所示。

图4表示了数控加工程序设计的主要流程,从中可以看出VERICUT仿真软件的接口文件可以是后置程序(NC-CODE),还可以是前置程序(APTSOURCE),前置程序是纯粹的刀具几何运动描述语句,后置程序是控制机床运动的接口文件。在VERICUT仿真过程中对于前置程序兼容性极强,而对于后置程序则必须正确地加载机床结构和对应的控制系统,才能保证仿真结果与实际加工状况一

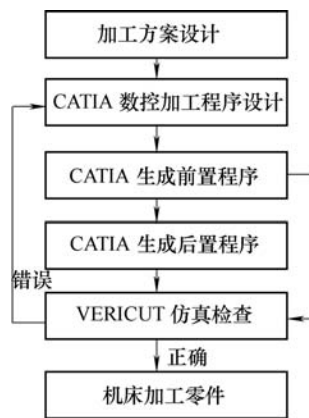


图4 数控加工程序仿真主要流程

表2 加工刀具选择及切削参数数值

刀具及切削参数	刀具规格		切削参数						
	直径和底R	齿数	刃长/mm	线速度 / (m·min ⁻¹)	每齿进给 / (mm·z ⁻¹)	主轴转速 / (r·min ⁻¹)	切削深度 /mm	切宽	进给速度 / (r·min ⁻¹)
粗加工 (焊接式硬质合金)	$\phi 40\text{R}3$	4	45	25.1	0.11	200	5	30	88
粗加工 (焊接式硬质合金)	$\phi 30\text{R}0$	4	45	28.26	0.15	300	3	2	180
(半) 精加工 (焊接式硬质合金)	$\phi 20\text{R}3$	4	40	37.68	0.08	600	20	1	192
精加工 (整硬式铣刀)	$\phi 16\text{R}3$	4	40	50.24	0.08	1000	2	0.5	320
精加工 (整硬式铣刀)	$\phi 12\text{R}3$	4	40	45.2	0.05	1200	2	1.6	480

航空超越离合器预紧弹簧压弯模具改进设计与加工

■ 洛阳轴研科技股份有限公司（河南 471039） 高 飞 宗晓明 陈怀刚 梁兴江 王永平

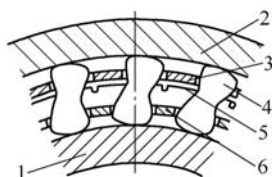
摘要：预紧弹簧是航空离合器的关键部件，对尺寸精度与表面质量均有较高的要求，其加工过程需要经过下料、钻孔、线切割成形、压弯、修长度五个工序，其中压弯工序一直是行业的技术难题。本研究通过对产品特点及原压弯模具结构进行分析研究，确定凹模形式、凸模精度及凸模高度调整问题为造成产品质量差的原因，并对模具结构进行了改进设计与加工，经生产验证，产品尺寸精度良好，合格率由60%提高到了90%，有效地提升了产品质量。

1. 斜撑式超越离合器

斜撑式超越离合器在航空领域有着广泛的应用（见图1），其中最典型的应用是直升机主减速器与航空涡轮起动机。预紧弹簧是斜撑式超越离合器的关键部件，在离合器处于楔合状态时，由于楔块承受的载荷很大，离心力和弹簧力相对而言可以忽略，而离合器处于差速超越和全速超越时，离合器不承受转矩，预紧弹簧对楔块产生作用力，使楔块贴在离合器外环和内环上，保证楔块的接触位置不变，使得离



(a) 斜撑式超越离合器产品



(b) 斜撑式超越离合器工作示意图

图1 斜撑式超越离合器

1.内环 2.外环 3.外保持架 4.异形滚子
5.波形弹簧 6.内保持架

器随时都能进入楔合状态。预紧弹簧的制造水平，直接影响离合器的响应速度与工作稳定性。

目前，航空离合器用预紧弹簧多采用线切割与冲压复合方式加工，尺寸精度不高，此外压弯部位易出现微裂纹缺陷，亟须开发一种尺寸精度高，表面质量好，生产效率高的预紧弹簧加工方法。预紧弹簧的生产的工艺流程是：下料、钻孔、线切割成形、压弯及手工修长度（见图2），在生产中难度最大的当属压弯工序，目前，预紧弹簧压弯

致，因此习惯上经常用后置程序仿真验证程序的正确性。

VERICUT仿真手段之所以被工程技术人员认同和认可，很大程度上取决于其强大的分析及比较功能，由于VERICUT可同时加载毛料模型和设计模型信息，所以经过仿真切削后，过切和残余检查的结果直接反映到大家面

前，使大家很清晰地掌握零件程序编制的质量。

4. 结语

连接框零件的数字化加工过程中，我们采取了有效的工艺方法，防止了零件变形，对外缘条双曲面的加工采用侧刃渐近插补法；对大闭角区的加工采取有效的编程方法，避免了由于带刀

铣伤腹板。而在整个零件的编程过程中，我们采用了清转角处理法，保证了零件的加工质量。实践证明，该工艺方案能够加工出合格产品，产品质量稳定，表面质量好。这一类零件的加工，为我们以后生产大尺寸多型面薄壁零件提供了经验。MW

（收稿日期：20170514）