

飞机结构零件 数控加工技术研讨

汤立民

成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂

2006年4月

国外数控加工技术应用情况

随着我国航空制造技术的发展,对飞机结构零件的加工要求越来越高,尤其是对于零件的表面质量、深腔和薄壁形状、以及零件的加工精度都提出了更高的要求。目前欧美许多发达国家按照高精度、高效率、高柔性的制造发展方向,已开始普遍使用高速铣削机床,并针对飞机结构零件的特点进行了大量的工艺技术研究。另外通过对难加工材料的加工工艺方法进行研究,大大提高了以钛合金为代表的难加工材料的加工效率,使飞机结构零件的数控加工其不再成为制约整个飞机研制和生产的“瓶颈”。

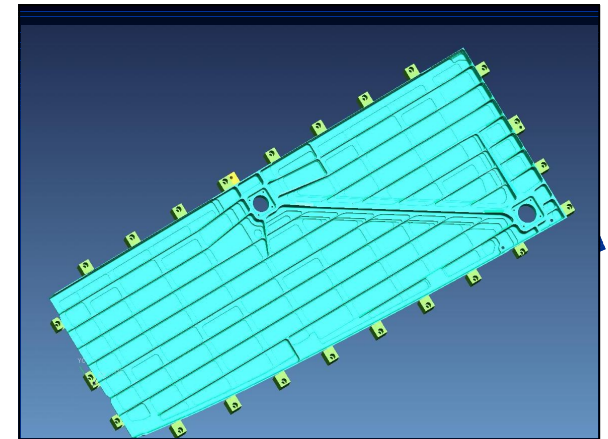
国内数控加工技术应用情况

近年来,为了提高我国航空制造业的整体水平,缩小与国外先进制造技术的差距,我国的部分航空主机厂先后从国外引进了少量的高速铣削机床。随着对高速铣削技术研究的不断深入,各航空主机厂在高速铣削机床的应用方面都取得了一些成果。另外针对先进战斗机结构零件的加工特点,国内航空企业在难加工材料的加工技术方面也进行大量的研究工作,零件的加工效率和加工质量与以前相比得到了明显提高,从而提高了我国航空工业,乃至整个机械制造行业的制造技术水平。

飞机结构零件的特点

目前随着CAD/CAM技术的发展、以及飞机性能和结构的需要,在军用飞机(尤其是国外先进主力战斗机)和民用客机的结构设计中,广泛采用了以薄壁和整体结构为特点的等强度设计技术,主要包括整体框、梁、肋、以及复杂接头和大型壁板等。由于这些零件加工难度大,而且其价值很高,因而对加工中所涉及的刀具、工装、切削参数、编程方法、变形控制、切削效率等技术都提出了更高的要求。对目前的飞机结构零件而言,主要具有以下一些特点:

- ① 形状结构复杂:飞机结构零件的形状结构非常复杂,零件外形多为复杂曲面,薄壁结构、深腔结构零件多,这些都给加工造成困难;
- ② 金属去除比率高:由于飞机重量控制方面的要求,使得飞机结构零件大量采用多槽腔结构,有的零件从毛坯到成品其金属去除率高达90%以上,使得加工量非常大;
- ③ 表面质量及尺寸精度要求高:飞机结构零件对零件表面质量及零件尺寸精度的要求很高;
- ④ 材料品种多:飞机结构零件的材料品种较多,铝合金、钛合金、不锈钢以及各种复合材料等都在使用,给加工造成困难。



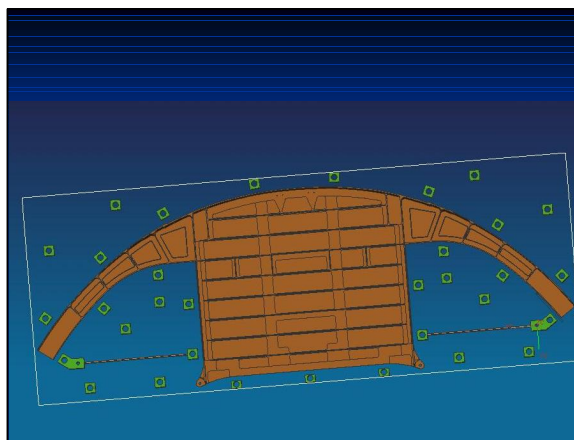
高速加工技术的应用

德国的切削物理学家卡尔·萨蒙(Carl Salomon)认为一定的工件材料对应有一个临界切削速度,其切削温度最高。在常规切削范围内,切削温度随着切削速度的增大而提高,当切削速度达到临界切削速度后,切削速度再增大,切削温度反而下降,切削力也会大幅度下降。

萨蒙的这一假设始终存在争论,1959年美国科伦格(Kronenberg)和前苏联科学家分别用超高速切削试验证明了这一假设但更多的研究者没能证明这一假设如J.F.McGee的研究认为,切削铝时,切削温度会一直随着切削速度提高至铝的熔点。山东大学艾兴院士的研究表明,随着切削速度升高,被切屑带走的热量就越多,而流入刀具和工件的热量则增加很小,这一研究表明:只要工件材料与刀具材料合理匹配,进行高速加工是完全可能的,也是有利的。

所谓高速切削加工,是指切削时主轴高速运转,切削进给高速运动。尽管国际上高速切削的速度范围迄今尚未作出明确统一的规定,但通常情况下,把切削速度高出常规5~10倍的切削加工称作高速切削。高速切削加工不能简单地用某一具体的切削速度值来定义,目前一般可以按材料划定高速切削范围:镍基合金70m/min以上,钛合金120m/min以上,钢材380m/min以上,铸铁700m/min以上,铜材1000m/min以上,铝材1100m/min以上,塑料1150m/min以上。

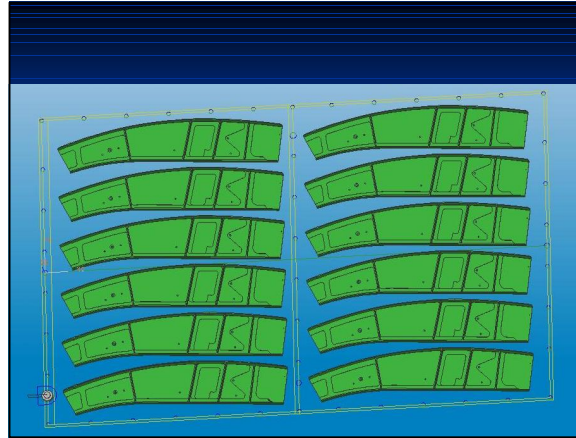
日前在成飞公司数控加工厂配有多台高速数控设备,主轴转速最高可达24000rpm。以前在低速数控铣床上用直径为32mm的刀具进行铝合金零件粗加工时,采用的参数为 $n=3000\text{rpm}$, $f=0.2\text{mm}$, $a_p=15\sim 20\text{mm}$, $a_e=1\text{mm}$;目前在高速设备上采用的参数为 $n=20000\text{rpm}$, $f=0.2\text{mm}$, $a_p=5\sim 8\text{mm}$, $a_e=1\text{mm}$ 。前者(低速加工)切削速度为30m/min;而后者(高速加工)切削速度为2000m/min。实际应用情况表明:采用高速切削后,金属切除率大幅提高,约是低速切削的3~5倍,切削力大幅下降,仅是低速切削的20~30%,切削振动减少,零件表面质量及尺寸精度提高,在常规低速切削中备受困扰的一系列问题(如加工变形等)得到了解决,加工效率和零件质量得到了提高。



薄壁零件的加工工艺探讨

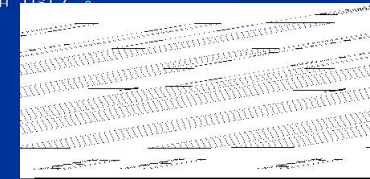
随着飞机性能要求的进一步提高,现代航空工业中大量使用整体薄壁结构零件。其主要结构由侧壁和腹板组成,结构简洁,尺寸较大,加工余量大,相对刚度较低,故加工工艺性差。在切削力、切削热、切削振动等因素影响下,易发生加工变形,不易控制加工精度和提高加工效率。加工变形和加工效率问题成为薄壁结构加工的重要约束。

加工薄壁零件的关键在于切削过程的稳定性。大量的实验工作证明，随着零件壁厚的降低，零件的刚性减低，加工变形增大，容易发生切削振颤，影响零件的加工质量和加工效率。以下是我厂在薄壁零件的加工中所采取的措施和国内外薄壁零件加工的一些方案：



1、对于薄壁侧面的加工

在切削参数允许的范围内采用较大的径向分层和较小的轴向分层加工；对于侧壁两面都需加工时候采取台阶式来回铣削，充分利用零件的整体刚性，可提高加工效率（如下图）。



2、对于腹板为薄壁的加工：

粗加工分层铣削，让应力均匀释放；下刀采取小角度斜线往复下刀，以减小垂直分力对腹板的压力；精铣最后一层时，轴向余量应适中，余量太大则切削力过大，余量过小，则腹板刚性过差；最后一层应从中间下刀逐渐往周边铣削直至周边，以充分利用零件的整体刚性。

3、真空铣夹：

对于腹板面积很大的薄壁零件加工，除了走刀轨迹需要优化以外，还要注意零件的装夹。我们目前认为比较有效的方案是采用真空铣夹。真空铣夹由底板和真空吸管构成，用将吸管管嘴紧贴腹板面并将吸管抽空，利用大气压力将腹板牢牢吸附在底板上，可以大幅减小加工过程中腹板的振动，有利于提高效率和零件表面质量。

4、低熔点合金辅助切削方案：

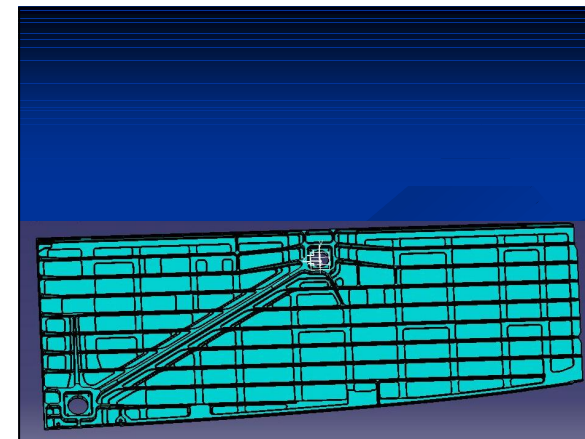
日本科学家Haruki Obara等人提出的低熔点合金（Low Melting Alloy）辅助切削方案可有效解决薄板的加工变形问题。该方案指出，利用熔点低于100℃的LMA“U-ALLOY70”作为待加工薄板的基座，或者将LMA浇注入薄壁结构型腔，也可以将LMA与真空吸管相配合组成真空夹具。通过浇注LMA，填补型腔空间，可大大提高工件的刚度，有效抑制了加工变形。在精铣时可实现加工壁厚达到0.05mm。LMA具有凝固时的膨胀特性，可以起到一定的填充装卡作用；而且其熔点为70℃，可以在沸水中熔融回收再利用。该方案不仅可以加工高精度的薄板，也可以加工高精度的侧壁。

5、刀具偏摆数控补偿技术：

刀具偏摆数控补偿技术是在有限元分析基础上，根据模拟仿真加工变形的大小，在数控编程时让刀具在原有走刀轨迹中按变形情况附加补偿运动补偿因切削力作用而产生的变形。对侧壁加工，通过偏摆刀具进行补偿；对腹板加工，则补偿轴向切深。通过数控补偿可以将因变形而产生的残余材料切除，一次走刀即可保证薄壁件侧壁或腹板精度，从而达到高效、经济、优质加工薄壁零件的目的。

深腔加工的方案

飞机结构零件中经常有深腔结构存在。槽腔过深则需要用到的刀具悬深过大，加工系统刚性很差，容易产生振动，严重影响刀具寿命和零件质量。因此，如何有效的解决切削振动的问题就成了深腔结构零件加工的关键。



对于深腔结构，我们可以采取分段铣削的方式，即采用不同悬伸的刀具对槽腔的不同高度进行分段加工。但当腔槽太深，我们必须采用大长径比的刀具时，即便是采取分段加工，我们的加工效率也将非常低下，零件质量和刀具寿命也将得不到保障。我们认为：对于这样的结构，插铣也许是较为理想的解决方案。

插铣：也称钻入式铣削，使用一个套装铣刀，仿佛沿z轴钻孔一样，由刀具的端齿与侧齿，共同按汇编好的加工程序，进行搭接式加工。由于插铣时，铣削力垂直往上，就避免了常规铣削径向分力所造成的切削振动，提高了加工系统的刚性，所以非常适合于大悬伸刀具的加工。这种方法用于粗加工，因为每两次搭接式加工之间仍都留有一些扇贝状的未加工金属，但经过插铣后，槽腔余量几乎去除，剩下的余量很小，可用一般立铣刀轻松去除。

小半径圆角的精加工

飞机结构件的槽腔中经常出现R6的圆角，这样的圆角必须用直径 $\leq 12\text{mm}$ 的刀具进行加工，而槽腔深度常常超过60mm，所以必须采用大长径比刀具进行圆角的精加工，加工中容易产生振颤，严重降低加工效率，影响零件质量。采用插铣的方法对圆角处进行精加工，可有效解决振颤的问题，提高了加工效率和零件质量。

钛合金材料的切削

当工件材料的强度、硬度等各项指标偏高而导热率低时，这种材料就属于难加工材料。而且难加工材料往往加工硬化趋势强，高温强度高，使得其加工性就变得更差了。如钛合金、镍基高温合金、沉淀硬化不锈钢等。若以45号钢的可切削性为100%，则钛合金的可切削性约为20~40%，其可切削性一般比不锈钢差，但比高温合金稍好。

钛合金的分类

对钛合金而言，通常按使用状态下的金属组织将钛合金分为 α 钛合金(以TA表示)、 β 钛合金(以TB表示)和 $\alpha + \beta$ 钛合金(以TC表示)三类。三种钛合金中最常用的是 α 钛合金和($\alpha + \beta$)钛合金。在钛合金中又按 β 型钛合金、 $\alpha + \beta$ 型钛合金、 α 型钛合金为序其可切削性逐步改善，纯钛的可切削性最好。

由于钛合金材料导热性差，致使切削温度很高，降低了刀具耐用度；600℃以上温度时，表面形成氧化硬层，对刀具有强烈的磨损作用；塑性低、硬度高，使剪切角增大，切屑与前刀面接触长度很小，前刀面上应力很大，刀刃易发生破损；弹性模量低，弹性变形大，接近后刀面处工件表面回弹量大，所以已加工表面与后刀面的接触面积大，磨损严重。根据我们在钛合金加工方面积累的经验，以及参照国外的一些技术资料，在此我们提出以下一些建议与各位专家商榷：

1、切削速度不宜过高：

由于钛合金的强度高、粘性大，切削中更容易在切削区产生和积聚热量，加之导热性差，在大切除量的切削时，如果切削速度过高，有引起燃烧的危险。这就是切削钛合金零件，一定不能选择高切削速度的原因。从目前市面上的刀具来看，钛合金的切削速度根据切削情况一般在30m/min~80m/min之间，很难实现高速加工。

2、尝试较大的切深：

我们可以通过加大切深的办法来提高加工效率，而不是一味追求高的切削速度。在我们钛合金零件的实际生产过程中，这种方法也得到了证实。

3、每齿进给量宜适中：

钛合金切削温度高，同时存在加工硬化的问题。每齿进给量过大，则切削力过大而导致切削温度过高而烧刀；而每齿进给量过小，则因刀刃始终在加工硬化层中工作而磨损过快。就目前我厂所用的一些刀具和一些知名的刀具品牌供应商所提供的参数来看，每齿进给量0.1mm是比较适中的进给参数。

4、尽量采用顺铣:

对顺铣而言,刀齿一开始切入就碰到硬皮而容易导致刀具破损。但由于逆铣切屑是由薄到厚,在最初切入时刀具易与工件发生干摩擦,加重了刀具的粘屑和崩刃,就钛合金而言,后一矛盾显得更为突出。

5、更多的切削刃:

在线速度和每齿进给量均很难增加的情况下,使用更多切削刃的刀具,以提高加工效率。不过一定要考虑主轴功率、机床刚性、刀具刚性以及刀具排屑问题。

6、小径向切入法:

采用一种小径向切入法切削钛合金零件,主要的目的 在于解决钛合金加工中产生的高切削温度的技术难题。其切削原理是在采用小径向切入法切削过程中,选择比刀具的半径小很多的径向切削深度进行径向切入。采用小径向切入法切削钛合金零件,能极好地控制切削温度,同时能实现高速加工。小径向切深不会带来高金属去除率,但在工厂中使用该法,可提高加工精度。

技术应用成效

零件类型	材料体积 (mm ³)	零件体积 (mm ³)	切除量 (mm ³)	主轴切削时间 (min)		切削率 (mm ³ /min)		提高效率百分比
				优化前	优化后	优化前	优化后	
1类	1.915×10 ⁶	1.272×10 ⁶	6.43×10 ⁵	40 低速	13 高速	1.61×10 ⁴	4.95×10 ⁴	208%
2类	1.19×10 ⁷	7.90×10 ⁶	1.11×10 ⁷	1853 低速	289 高速	5.99×10 ³	3.84×10 ⁴	541%
3类	5.65×10 ⁷	2.24×10 ⁷	3.41×10 ⁷	3300 低速	2500 低速	1.03×10 ⁴	1.36×10 ⁴	32%
4类	1.82×10 ⁸	6.89×10 ⁷	1.13×10 ⁸	9980 低速	5988 高速	1.13×10 ⁴	1.89×10 ⁴	67%

谢谢!

