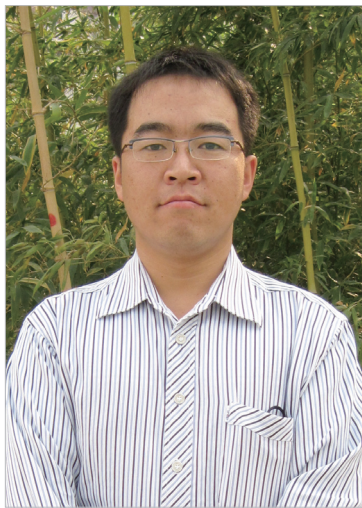


# 大型碳纤维复合材料壁板轮廓 数控铣削工艺技术

## NC Milling Technology for Large Carbon Fiber Composites Panel Contour

中航工业北京航空制造工程研究所 康永峰 陈树巍 袁士平 邵坤 安铮



康永峰

工程师, 现于北京航空制造工程研究所数字化与柔性装配研究室从事航空数控加工技术研究。

碳纤维复合材料(CFRP)是以碳或者石墨纤维为增强体的树脂基复合材料,具有比强度高、比刚度大、可设计性强及良好的抗疲劳损伤性能和耐腐蚀性能的优点。碳纤维复合材料与钢材相比其质量减轻75%,而强度却提高4倍,其卓越的性能带来了其在航空航天领域的大量应用。碳纤维增强复合材料在大型民

随着碳纤维增强复合材料在大型零部件上的应用不断增加,使得该类构件的铣削加工已经不能局限于制孔,零部件在装配前需要进行精确的轮廓及局部型面加工、特殊槽加工、孔加工,大型碳纤维增强复合材料构件如此系统的高要求的机械加工不可避免的需要专业有效的数控加工技术。

机机体结构上的大量应用已经是现代大型民机的显著特点之一,复合材料用量占机体结构重量的百分比从空客A380的22%(另有GLARE材料占3%)到波音787的50%,再到空客A350XWB的53%,这标志着复合材料已成为现代大型民机首要结构材料,结束了以铝合金为主的机体结构选材时代。同时在碳纤维复合材料在战机上的应用也已经步入新的时代,“阵风”战机用量为40%,JAS39战机占30%，“台风”战机EP2000大于40%,B-2轰炸机占到50%,F-22占到24%。

碳纤维复合材料的大量应用及新型飞机性能要求的不断提高,特别是新一代隐身战机对碳纤维复合材

料蒙皮及零件的高轮廓精度要求,使得碳纤维复合材料的机械加工已经从单纯的制孔转变为高精度的精准加工。虽然碳纤维增强复合材料零部件的加工与传统金属加工比起来加工量很少,但是其机加工却富有挑战性:基材由于过热而易熔化,碳纤维易折断,CFRP的分层结构在机加工时很容易崩裂分离。如果可以进行加工,如何保证这种昂贵的工件确实可用呢?深入、系统地研究碳纤维增强复合材料高效、可行、无缺陷、精准的数控加工技术具有重要的意义。

### 大型碳纤维复合材料壁板 轮廓数控铣削特点

碳纤维增强复合材料是由质软

而粘性大的基体和强度高、硬度大的纤维混合而成的二相或多相结构,其力学性能呈各向异性,机械加工条件比较恶劣,是典型的难加工材料。碳纤维增强复合材料铣削加工的主要特点如下:

#### (1) 材料产生分层破坏。

分层是复合材料铺层之间脱胶而形成的一种破坏现象,当铣削参数不合理时会使层间受力过大而导致分层。分层会严重降低材料的性能甚至使零件报废,即使是微小的分层也是非常严重的安全隐患。由于复合材料呈现各向异性、层间强度低,铣削时在铣削力的作用下容易产生分层、撕裂等缺陷,加工质量难以保证。

#### (2) 刀具磨损严重,耐用度低。

铣削区温度高且集中于刀具铣削刃附近很窄区域内,纤维的回弹及粉末状的切屑又加重了擦伤刃口和后刀面,加之碳纤维的硬度非常高,故刀具磨损严重,后刀面产生沟状磨损,耐用度低。

#### (3) 铣削温度高。

碳纤维复合材料切屑形成过程是一个基体破坏和纤维断裂相互交织的复杂过程,在此过程中,碳纤维作为铣削硬质点连续磨耗刀具,因碳纤维断裂和基体剪切,以及切屑与前刀面、后刀面与已加工表面之间的摩擦而产生大量的铣削热,加之碳纤维复合材料导热性差等原因,铣削热主要传向刀具和工件,导致刀具的快速磨损。

#### (4) 零件刚性差。

碳纤维增强复合材料优异的结构性能,给壁板的设计带来了巨大的变革,在满足强度要求的情况下大大减小了壁板厚度与重量,因此大型碳纤维增强复合材料壁板的刚性较差,对零件的合理支撑与定位来消除刚性较差带来的误差将直接影响到最终轮廓加工精度。

#### (5) 精度要求高。

新型飞机对零件结构性能有了更高的要求,因此零件的精度及部件装配精度也有了相应的提高,特别是新的碳纤维增强复合材料构件精度要求等级比传统要求上升了一个数量级,已经开始趋向于金属构件。

碳纤维增强复合材料的结构特点及性能特性决定了他的难加工性,其铣削加工性能与金属加工截然不同。而随着碳纤维增强复合材料在大型零部件上的应用不断增加,使得该类构件的铣削加工已经不能局限于制孔,零部件在装配前需要进行精确的轮廓及局部型面加工、特殊槽加工、孔加工,大型碳纤维增强复合材料构件如此系统的高要求的机械加工不可避免的需要专业有效的数控加工技术。

## 大型碳纤维复合材料壁板轮廓数控铣削工艺

### 1 刀具

影响碳纤维增强复合材料的铣削加工效率及加工质量的瓶颈就是刀具的选择,刀具的耐磨性决定了铣削加工状态。针对碳纤维复合材料制件的铣削加工特点,采用了“以磨代铣”的加工工艺方法,“以磨代铣”刀具见图1。

所谓的以磨代铣就是采用磨削砂轮的形式代替铣刀进行铣削加工,这

主要依赖于金刚石砂轮的耐磨性。常用的有以下3种:用于快速去除余量的金刚石锯片、用于轮廓及型面加工的金刚石砂轮棒。以磨代铣的方式成本较低,刀具耐磨性较好,具有较高的经济效益。

### 2 铣削参数与工艺方法

碳纤维增强复合材料壁板轮廓加工虽然在工艺流程上要比金属加工简单,但是复合材料结构的特殊性决定了其加工过程中的不确定性,加工过程中容易发生糊刀现象、表层分层等。如何降避免局部温度较高带来的糊刀现象及复合材料层间约束力较低带来的表层分成现象决定了工艺细节的重要性。

对于以磨代铣的加工方式,其加工一般参数如表1所示。金刚石颗粒锯片一般直径较大,在某一时刻参与铣削的部位只占很小的比例,其他部分可以在间歇周期内进行充分的

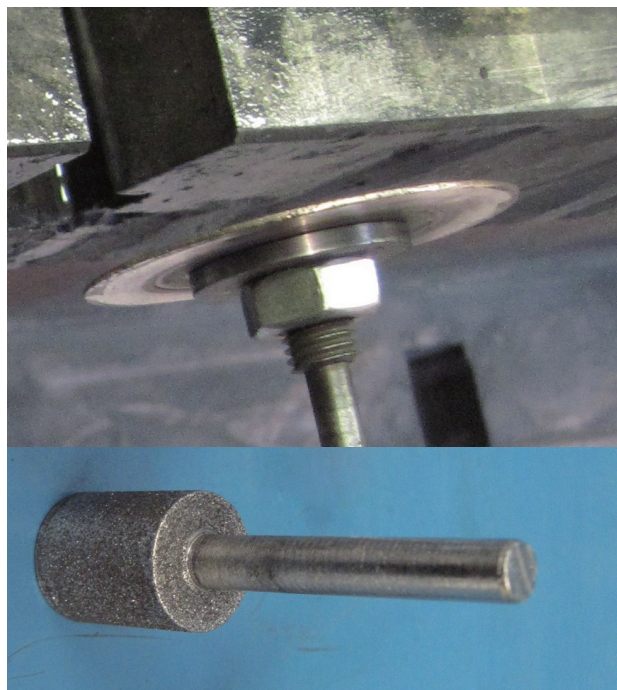


图1 “以磨代铣”刀具

表1 金刚石锯片及磨棒铣削参数

特征	刀具	规格/mm	线速度 / ( $m \cdot \min^{-1}$ )	进给速度 / ( $mm \cdot \min^{-1}$ )	切宽 / mm	切深 / mm
轮廓	金刚石颗粒锯片	$\phi 60 \times 2$	1500~2500	1500	2	10
	金刚石颗粒磨棒	$\phi 10$	500~1000	1200	3	7

冷却,同时充裕的空间可以大大减少切屑堵塞刀具的几率,因此只要在线速度和进给速度在合理范围内时其加工状态较好。为了完成零件空间轮廓的加工,金刚石颗粒磨棒直径较小,这也导致了其在某一时刻参与铣削的部位较多,碳纤维复合材料粉末

性切透碳纤维复合材料零件,铣削过程中通过水基铣削液雾冷。这种加工方式主要用于直线轮廓铣削,可实现直线精加工与曲线轮廓粗加工。

对于曲线轮廓与局部较厚的轮廓则需要采用金刚石颗粒磨棒以仿形铣削的方式进行加工。层间力较

足够的强度避免分层。

另外,在使用金刚石颗粒磨棒进行轮廓铣削时需要对顺逆铣进行控制,金刚石颗粒磨棒没有铣刀那么大的容屑空间,因此顺铣过程中切屑在刀具旋转带动下进入刀具与工件的接触区域,造成局部切屑过多,切屑会在刀具与材料侧壁间发生碾压,粘附在侧壁上,如图4所示,这样不利于刀具的长时间工作,容易在接触区域因高压、高温使得碳纤维切削与树脂糊结刀具,造成刀具失效。逆铣的过程恰好与顺铣是一个反过程,有利于排屑,因此在沿长宽方向铣削时推荐使用逆铣。但逆铣过程中震动及对刀具的冲击较顺铣要大一些,因此在沿筋条厚度方向切削时,因铣削距离较短,排屑较为流畅,推荐使用顺铣。

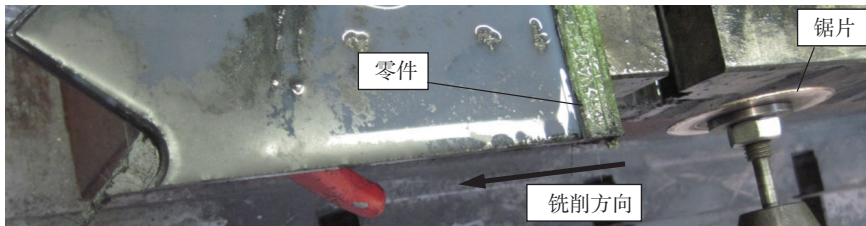


图2 金刚石颗粒锯片铣削方法

切屑容易堵塞在铣削部位,在高温下发生糊刀现象,导致刀具失效,因此要严格控制刀具铣削参数,特别是切宽和切深,直接影响到铣削过程中的排屑能力。为了更好的冷却,在条件允许的情况下尽量加水基冷却。

碳纤维复合材料壁板零件的壁厚一般不超过10mm,锯片铣削良好的排屑及冷却性能使得它成为直线轮廓铣削的最佳选择,如图2所示,一般铣削方式为顺着铣削方向一次

性是碳纤维复合材料的特点之一,为了防止零件分层的出现必须最大限度减小轴向力,因此轮廓铣削是采用径向分层的方式,轴向一次性铣削到位,尽量要使刀尖部分伸出零件底面,如图3所示为径向分层轨迹。对于厚度超过10mm的零件,轴向一次性铣削时切削深度太大,切削量较大,因此需要必要的轴向分层,此时需要保证分层的最后一层厚度不小于2mm,且底面要有支撑以保证足

### 3 装夹定位

大型的碳纤维复合材料壁板在热固成型后,零件的曲面特征及厚度基本都已经达到了设计要求,但轮廓边缘都留有较大余量,需要进行轮廓的数控加工来实现精确外形,提高与其他零部件的装配精度。为了达到轮廓与曲面特征,首先需要解决的问题就是零件的装夹定位。该类零件一般情况下呈现的特点为:薄壁、特殊曲面、结构大。其主要的曲面结构在成型过程中完成,但是对于碳纤维复合材料热固成型的方式,零件在脱离模具后都存在一定的变形,同时大结构薄壁的特点导致零件结构刚性较差,因此需要进行专门的工装设计。

为了消除热成型带来的零件变形对最终精度的影响,零件的固持需要在曲面内部进行多点甚至全范围内的支撑与固持,而介于该类零件内部基本不存在可以用来进行夹持的通孔,因此采用真空吸附工装进行支撑与固持。

真空吸附工装主要有两种类型,一种是通过多个具有3自由度的吸

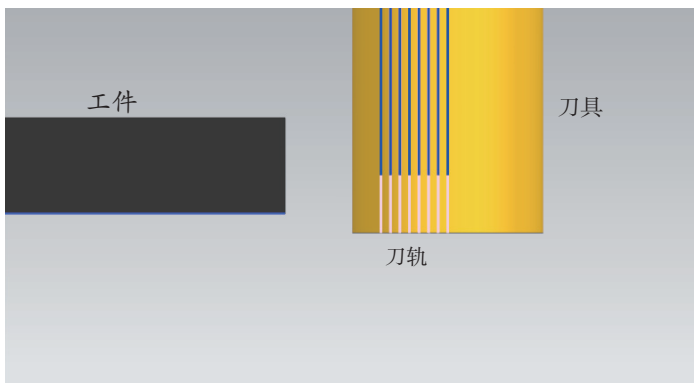


图3 金刚石颗粒磨棒铣削方法



图4 顺铣带来的碾屑

附单元组成的柔性工装,另外一种就是针对特定零件设计的带有真空吸附功能的专用模具。

柔性工装通过多点支撑实现工件的支撑与固持,能够快速灵活的实现不同曲面零件的装夹定位,但是因其为点支撑方式,所以只适合于刚性较好的带筋壁板。通过一个或者多个带有定位装置的支撑点及多点拟合而成的与零件理论曲面相符的曲面特征实现零件定位,并消除零件变形,实现精确的轮廓铣削。

具有真空吸附功能的专用模具适合于批量较大且刚度较差的蒙皮类零件,与零件相符的曲面特征可以很好地实现零件的全面积支撑,同时在真空吸附作用下实现均匀固持,通过1个或者多个定位孔及模具的曲面特征实现零件在模具上的定位,并可以消除刚度较差带来的变形,实现精确的轮廓铣削。

#### 4 工艺流程

大型碳纤维复合材料壁板整体制造过程有别于金属,也决定了其加工工艺的特殊性,壁板成型后只需完成轮廓加工即可,其一般流程如图5所示。

#### 应用实例

基于大型碳纤维复合材料壁板轮廓数控铣削工艺,对某型号大型

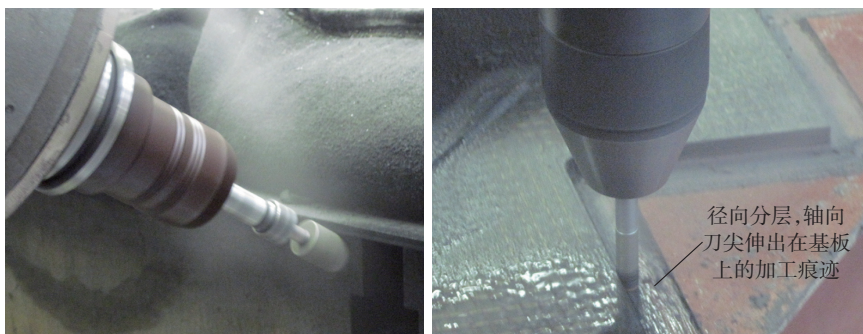


图6 轮廓数控铣削过程



图7 轮廓与筋条顺逆铣

碳纤维复合材料壁板零件轮廓数控铣削。该零件为长度约5m的典型大型碳纤维复合材料薄壁壁板类零件,同时零件外形轮廓精度要求达到 $\pm 0.25\text{mm}$ 的全新要求,根据零件接头特点,依据大型碳纤维复合材料壁板轮廓数控铣削工艺合理安排了零件轮廓铣削工艺,在加工过程中同时使用了锯片及金刚石颗粒磨棒,合理安排了工艺方法与切削参数,最终完

成该零件的轮廓加工,经过检验充分满足了设计要求。

#### 结束语

碳纤维增强复合材料以其优异的结构性能博得了飞机设计人员的厚爱,成为新一代飞机构件材料中的宠儿,但是其典型的难加工特性给加工制造带来的较大的难度,特别是大型碳纤维增强复合材料壁板,其结构大、刚性差、精度要求高等难点使其轮廓加工难度远远高于同类金属零件。本文对其轮廓加工刀具、工装、工艺、铣削参数等因素进行了阐述,并最终在某碳纤维复合材料壁板轮廓数控铣削中得到了应用,实践证明本文中阐述的工艺方法突破了现有碳纤维复合材料壁板轮廓加工精度不高的限制,实现了大型碳纤维复合材料壁板轮廓数控铣削加工,有效可行。

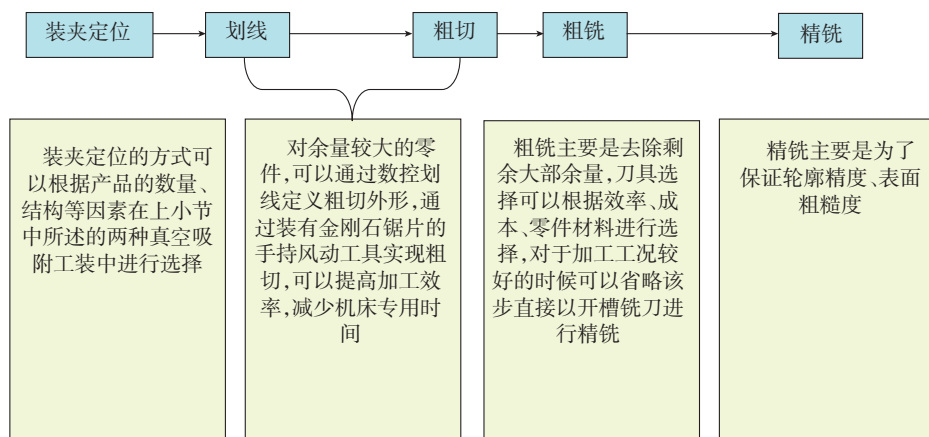


图5 轮廓铣削工艺流程

(责编 良辰)