

飞机结构件的高速铣削工艺

High-Speed Milling Process of Aircraft Structural Part

南昌航空大学航空制造工程学院 王细洋



王细洋

南昌航空大学航空制造工程学院教授,工学博士。主要研究方向为数控加工及过程监控。

飞机结构件是构成飞机机体骨架和气动外形的主要部件,功能重要。高速铣削是该类零件机械加工的最主要方法。高速数控加工中心和高速铣床已在航空制造企业中广泛应用。有关飞机结构件及航空铝合金的高速数控加工工艺,工艺人员及研究者已多有论述。本文总结归纳其中的若干关键问题,并评述其发展动态。

高速铣削优越性

飞机结构件的材料主要有3类:航空铝合金、钛合金和复合材料,其

飞机结构件是构成飞机机体骨架和气动外形的主要部件,功能重要。高速铣削是该类零件机械加工的最主要方法。高速数控加工中心和高速铣床已在航空制造企业中广泛应用。有关飞机结构件及航空铝合金的高速数控加工工艺,工艺人员及研究者已多有论述。本文总结归纳其中的若干关键问题,并评述其发展动态。

中航空铝合金所占比重最大^[1]。铝合金切削性能好,但切削时容易粘刀、产生积屑瘤。随着铝合金硅含量的增加,加工难度在增大。钛合金切削性能差:切削温度很高、单位面积上切削力大、加工冷硬现象严重、刀具易磨损。

从结构上看,飞机结构件壁薄、尺寸大、加工余量大、相对刚度较低。图1所示零件为壁板。为了减轻重量,进行等强度设计,往往在结构件上形成各种复杂槽腔、筋、凸台和减轻孔等要素。整体结构件尺寸更大,结构更复杂壁薄、易变形,零件槽间距离可能仅为2~5mm,腹板厚度也仅有2~4mm,筋顶形状复杂,切削时很容易产生变形。

飞机结构件(尤其是整体结构件)的复杂型腔是用数控铣削方法由整块毛坯件逐步挖制而成。图1所示零件的加工工艺过程为:下料

→铣平面→粗铣槽→精铣槽→加工孔→铣外轮廓→去毛刺。切削加工时间占飞机结构件的总加工时间的比例最大。常规速度切削时,加工效率非常低下。大型整体结构件(如整体壁板)的切削加工需要几天时间。切削加工时的材料利用率也非常低,整体结构件平均只有2%~10%。

切削效率低和切削易变形是制约铝合金结构件加工的主要问题^[2]。钛合金结构件的主要问题是切削温



图1 飞机壁板结构件

度高,刀具磨损严重。高速铣削可以较好地解决这些问题^[3]。

首先,由于高的切削速度,单位时间内的材料切除率(切削速度、进给量和背吃刀量的乘积, $v \times f \times a_p$)增加,切削加工时间减少,切削效率大幅度提高,从而加工成本也降低。

同时,在高切削速度范围内,切削力降低,减少了切削变形引起的加工误差,从而有利于薄壁件或刚性差零件的切削加工。

此外,高速切削时,切屑以很高的速度排出,带走大量的切削热。切削速度提高愈大,带走的热量愈多(大约在90%以上),传给工件的热量大幅度减少,有利于减少加工零件的内力和热变形,提高加工精度。

高速切削时,工作平稳、振动小,零件的加工表面质量高。原因有2个方面:高速切削时,机床的激振频率高,远离了工艺系统的固有频率,避免了颤振;切削力是切削过程中的主要激励源,高速切削时切削力降低,使得激励源减小。

高速切削也可有效地减少刀具磨损,提高零件加工的表面质量。

高速切削的理论基础与常规速度的切削有很大不同,有关高速切削的理论最早源自于萨洛蒙假说,相关理论目前仍在探索完善中。

刀具及刀具材料

1 刀具材料

高速铣削刀具应具有高耐磨性、高抗弯强度和冲击韧性、良好的耐热冲击性能,同时要求刀具表面的粗糙度低,以减小与铝合金的摩擦和粘结。

目前,航空结构件高速切削中普遍采用超细晶粒的硬质合金刀具、涂层的硬质合金刀具^[4],精加工时也常采用聚晶金刚石(PCD)刀具,但成本高。

超细晶粒硬质合金的含钴量在10%~12%左右,WC晶粒的平均粒

度在0.2~0.5 μm 之间。具有高硬度、高强度和高韧性。刀尖可以刃磨得非常锋利,能够降低切削力和振动。对于表面粗糙度要求不超过 $R_a 3.2$ 、尺寸精度在0.2mm左右的航空结构件具有良好的适应性。

硬质合金涂层刀具基体采用硬质合金材料,表面采用先进的涂层材料。既具有高强度、高韧性及抗冲击能力,又具有更高的硬度、耐磨性和抗月牙洼磨损的能力,摩擦系数小,抗粘结和抗扩散能力强。应用于切削铝合金的刀具涂层材料有TiC、TiN、TiCN、TiAlN、DLC、CrAlN、TiB₂等。

根据刀具直径和加工部位的不同,可分别选用可转位式铣刀和整体式铣刀。整体式硬质合金刀具具有良好的刚性和切削稳定性,加工效果好,应用广。但由于制造难度大,对材质要求高,整体式硬质合金铣刀目前主要依赖进口。国外品牌有Fraisa、Hanita、Sandvik、SGS等。正在努力实现国产化的厂家有厦门金鹭特种合金有限公司、自贡硬质合金有限公司等。

可转位刀具一般为大直径($\geq \phi 25$)刀具,刀片与刀体的连接方式正在由单螺钉式向双螺钉式演化,从而提高了连接刚度。未来,可转位刀具所占比重将会提高。

PCD刀具耐磨性、导热性及刀刃锋利性均较好,硬度高,非常适合于高速加工铝合金。根据铝合金中含硅量的不同,选用不同粒度的PCD刀片。加工硅含量 $< 12\%$ 的铝合金,选择PCD刀片的粒径为8~9 μm ;而加工硅含量 $> 12\%$ 的高硅铝合金,PCD粒径为10~25 μm 时效果最好。

PCD材料在铝合金高速、高精度切削中的应用在扩大,同时,随着钛合金材料在结构件中比例的提高,PCD刀具也已开始应用于高速切削钛合金。PCD也是干式绿色高速切削的理想材料^[5]。

需要特别指出的是,正如不用金刚石刀具加工铁基材料一样,一般不用氧化铝基陶瓷刀具加工铝合金,因为铝与氧化铝基陶瓷的化学亲和力强,易产生粘结现象。

2 刀具角度

对高速铣削质量和成本影响较大的刀具角度有前角、后角和螺旋角等。

刀具前角决定切削刃的锋利程度和强度。增大前角,能够减小切屑变形和切削力,降低切削温度,抑制积屑瘤的产生,提高刀具的寿命,但前角过大会使楔角减小,降低刀刃强度,造成崩刃,致使切削温度升高,刀具寿命下降。研究表明,刀具前角是影响高速切削铝合金刀具寿命的主要因素。高速铣削铝合金时,刀具前刀面温升高,一般,前角应比常规切削时的前角小约 10° ,一般来讲,高速铣削航空铝合金时的前角范围在 $12^\circ \sim 25^\circ$ ^[3]。

刀具材料的抗弯强度和冲击韧性大,前角可以取得大些。如超细晶粒硬质合金比普通硬质合金的前角大。粗加工时,切削力比较大,切削温度高,冲击载荷大,应适当减小前角以提高刀具寿命。精加工时,切削力比较小,为使切削刃锋利,减小工件变形或得到较高的表面质量,前角可以取大一些。

后角主要影响表面粗糙度。增大后角可以减少后刀面与过渡表面之间的接触面积,减少摩擦,并使刃口锋利而减轻刃口对金属的挤压,有利于提高刀具的寿命和加工表面质量。若后角过大,刃口强度和散热条件变差,反而会降低刀具寿命。如果后角过小,摩擦严重,刀刃变钝,切削温度升高。

后角的选择主要按轴向切深与径向切深比值(a_p/a_e)选取, a_p/a_e 的值越大,切削力大,切削温度也高,则后角减小。一般高速铣削刀具的后角在 $6^\circ \sim 18^\circ$ 之间^[4]。

在PCD刀具超高速切削铝合金时,切削厚度较小,属于微量切削,后角及后刀面对加工质量的影响较大,刀具最佳前角为 $12^{\circ}\sim 15^{\circ}$,后角为 $13^{\circ}\sim 15^{\circ}$,以减小径向切削力^[4]。

钛合金塑性低,切屑与前刀面的接触长度短,应选用小前角,以增加切屑与前刀面的接触面积,改善散热条件,加强切削刃,一般取 $\gamma_0=5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。从提高刀具寿命和切削加工的表面质量考虑,钛合金加工应尽可能选用大后角 $\alpha_0=8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ^[5]。当然,具体的角度值与刀具材料有关。

整体式铣刀的螺旋角对刀具的切削性能和寿命有一定的影响。当螺旋角较大时,刀具参加切削的刃较长,作用在单位切削刃上的切削力减小,刀具的切入切出比较平稳,有利于提高刀具寿命。粗加工时选用较小的螺旋角,有利于排屑;精加工时选用较大的螺旋角,可提高表面加工质量。

薄壁腹板铣削加工时应尽量选择刀具圆角半径为零、小螺旋角、齿数少的刀具。

此外,刀尖圆弧半径的选择应适当,圆弧半径过大或过小都会降低刀具使用寿命。刀齿不能太密,刀齿较密,刀具容屑空间小,切削易堵塞,限制了进给量的提高,容易产生冷作硬化层,加剧刀具的磨损。

3 刀具破损、刀具寿命与切屑

高速切削时,刀具在比普通切削加工更为恶劣的条件下工作,具有不同的失效机理,切削温度及热应力对刀具磨损破损的影响最为显著。

高速铣削航空铝合金时,在刀具磨损初期以刀具微崩刃为主,后期以前刀面的片状剥落为主。粘结磨损和扩散磨损是高速铣削航空铝合金时的主要失效机理^[3]。

相比普通铣削,高速铣削时刀具的破损更加严重。这是因为,高速铣削时刀具承受更高的切削温度和热应力冲击,热疲劳造成热裂纹,而高

周循环的机械载荷使裂纹扩展,造成刀具的崩刃与剥落。

切屑形态对切屑排出和断屑、刀具磨损方式有直接的影响。工件材料及其热力学性能对切屑形成的形态起着决定性作用。航空铝合金在很大的切削速度范围内容易形成连续带状切屑,而钛合金更容易产生集中剪切滑移(或绝热剪切),从而产生锯齿状切屑。

铣削参数与铣削方式

1 铣削参数

高速铣削参数主要包括铣削速度、铣削深度(包括轴向铣削深度和侧面铣削深度)、进给速度(每齿进给量)以及铣削刀具的悬伸长度等。影响高速铣削参数的因素非常多,其中最主要的是工件材料和铣刀材料的匹配关系。选择合理的切削用量可以提高刀具的寿命,发挥刀具的最佳潜能。一直有相当多的研究者关注高速切削用量的选择问题^[6]。

通常采用的切削方案为:高切削速度、中进给量和小切削深度。但实际加工中,并不是切削速度越高,效果越好,要对工件、刀具以及设备综合考虑,制订合理的加工方案。

(1) 铣削速度。

高速切削铝合金的速度范围一般为 $1000\sim 7000\text{m}/\text{min}$ 。这一速度值越过了萨洛蒙曲线的波峰,能获得高速切削的效益,即切削力和切削温度降低或不显著升高,避开了机床颤振区。

工件和刀具性能的不同,切削速度也不同。使用涂层硬质合金刀具时,高速切削铝合金的切削速度范围一般在 $1000\sim 5000\text{m}/\text{min}$ 。铝合金含硅量越高,切削速度越低,加工高硅铝合金时切削速度在 $300\sim 1500\text{m}/\text{min}$ 时效果较好。

(2) 径向切深和轴向切深。

从切削力、残余应力、切削温度等方面考虑,采用较小的轴向切深和

较大的径向切深是有利的。通常粗加工时,轴向切深 $a_p=(0.1\sim 1)D$,径向切深 $a_e<0.5D$, D 为刀具的直径。

(3) 每齿进给量。

一般,在粗加工时取 $0.3\sim 0.5\text{mm}$,精加工时取 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ ^[4]。

2 铣削方式

一般采用顺铣方式铣削。刀具缓慢切入工件,以降低切削热并减小径向力。大切量的整体结构件加工(如大型件的槽加工)时,一般采用分层切削、小切深、中进给。在加工内部型腔时,当刀具进到拐角处时,采用摆线切削,可避免切削力突然增大,否则产生的热量会破坏材料的性能。

在铣削钛合金结构件时可采用不对称顺铣法,使刀齿前面远离刀尖部分首先接触工件,刀齿切离时的切屑很薄,不易粘结在切削刃上。而逆铣则相反,容易粘屑,当刀齿再次切入时切屑被碰断,造成刀具材料的剥落崩刃。

走刀路径

高速铣削均为数控铣削。走刀路径(或称刀轨)在很大程度上影响加工效率、工件变形和表面质量。

高速铣削时,走刀路径应尽可能简化,少转折点,路径尽量平滑,减少急速转向。在保证加工精度的前提下,应减少空走刀时间,尽可能增加切削时间在整个工件中的比例,以提高加工效率。进、退刀位置应选在不太重要的位置,并且使刀具沿零件的切线方向进刀和退刀,以免产生刀痕。先加工外轮廓,再加工内轮廓。

飞机结构件上的加工特征主要有轮廓、槽腔、曲壁、筋、孔、下陷和凸缘、凸台、面、开口等。以下简单讨论槽腔和筋的高速铣削走刀路径。

1 槽腔走刀路径

槽腔是周边封闭、有底的一种结构。槽腔特征是飞机结构件最主要的加工特征,占整个飞机结构件特征

的80%以上。直壁槽腔最常见。按底面形状槽腔可以分为平底槽、斜底槽和曲底槽。槽腔内可以有子槽和岛屿等子特征,如图2所示。

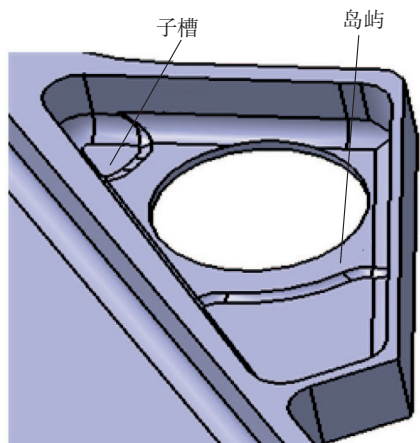


图2 槽腔特征

槽腔包含底面、侧面、转角3个加工要素。底面精度要求较高,为槽腔的主要加工要素。

底面加工一般采用平底铣刀,也可用圆角铣刀(如圆角加工和精加工)。走刀路径有行切、环切和混合切3种方式。通过分层铣削实现最终的加工要求。

行切法的走刀路径短,但在每次进给的起点与终点间留下残留面积,表面粗糙度高。环切法则反之。混合法的走刀方法是,先用行切法切去中间部分余量,最后用环切法切一刀,既能使总的走刀路径较短,又能获得较好的表面粗糙度。3种走

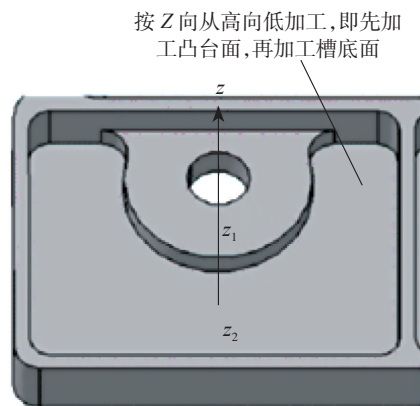


图3 槽腔底面刀轨生成顺序

刀方法在槽腔加工中都有采用。斜底槽腔一般采用行切加工。对于整体结构件中常见的薄壁框体零件,采用单一的环切、螺旋切削时,腹板变形很难控制,而采用分步环切法走刀后,通过零件未加工部分自身的刚性,可达到减小腹板变形的目的。

槽腔子特征按其底面在加工坐标系的Z坐标大小由高向低加工,如图3所示。

先将各子特征的底面按Z坐标值从高到低排列,得到有序Z向底面队列;再通过识别系统按底面Z的大小依次调用队列中的底面,从而按照由高到低的顺序生成底面刀轨^[7]。图4为含半岛的槽腔底面的走刀路径。

进刀点的选取与槽腔的类型有关,重点考虑进刀点位置的开敞性、对侧面的无干涉要求。有以下重要原则^[8]:

- (1)从槽中心进刀。
- (2)开口槽从槽腔开口处轮廓外进刀。

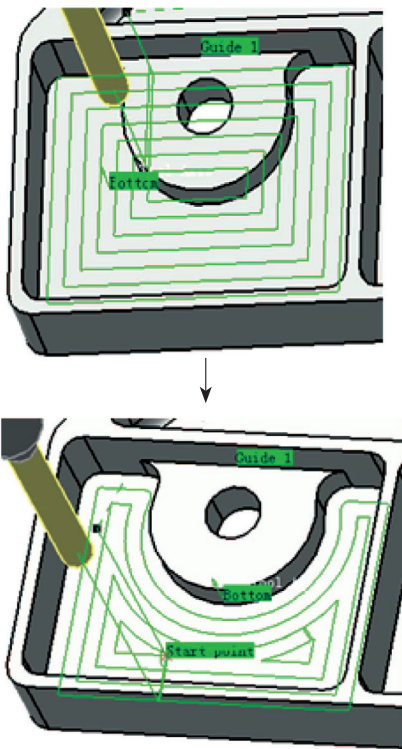


图4 含半岛的槽腔底面走刀路径

(3)有岛屿的槽从槽侧面与岛屿侧面之间进刀。

(4)有孔的槽在孔中心进刀。

进/退刀方式的选择是影响加工质量的另一个重要因素。槽腔加工主要采用直线、折线及圆弧3种进刀方式。

直线进刀的路径最短;折线进刀可实现进刀的切削力最小;圆弧进刀一般不用于封闭的槽腔加工进刀,而是通常用在工件外进刀。直线进刀时刀具垂直切入工件中,刀具的轴向负载瞬间变大,会导致刀具偏斜,影响加工质量,另外,刀具磨损也很大,尤其是高速加工时。一般优先选择折线和圆弧进刀方式。薄壁件选择圆弧进刀方式,因为轴向载荷最小。开口槽或有狭长空间的封闭槽腔可用折线进刀方式。当槽腔为开口槽腔时可以在零件外部进刀,或在毛坯上预先钻好进刀孔,选用加工效率更高一些的垂直进刀方式。

下刀角度影响切削平稳性及加工效率,相对小一些的下刀角度会使切削加工较平稳但效率低。

退刀时应使刀具平缓离开工件以防止在已加工表面产生刀痕,一般采用直线及圆弧两种退刀方式。在加工独立槽特征时一般优先选用直线退刀;在加工含孔和子槽的槽加工时一般在孔处直线或圆弧退刀;在加工含凸台的槽时一般优先在凸台和槽之间的位置直线或圆弧退刀。

在槽腔加工过程中要注意岛屿的避让。槽腔铣的刀轨规划实际上主要是解决如何生成等距线以及等距线的自交、轮廓等距线和岛屿等距线相交以后重新组环的问题。对于有岛屿的薄壁腹板的加工可以通过控制加工顺序和切削用量来防止弹刀现象的出现。在加工槽腔转角时也可以采用插铣方式和控制残留余量防止弹刀现象的发生,而且可以提高加工效率。

2 筋的走刀路径

筋是飞机结构中另一种常见的加工特征。筋通常起加强结构件强度的作用,一般位于槽腔、轮廓之间,或位于槽腔内部。如图5所示,筋有开口筋、耳片筋、曲顶筋等。一般筋宽只有3~4mm,属于一种薄壁结构。高速铣削时应重点考虑变形对加工质量及精度的影响。

筋特征主要是由筋顶面、筋侧面和约束面3部分组成,如图6所示。筋顶面的加工是筋加工的主要部分。大部分的筋侧面在铣槽腔的内壁面或飞机结构件的外轮廓面时被顺带加工完成。小部分的开口筋或者独立筋中,若加工时筋的强度不够,此时筋侧面需要进行绕圈铣的单独加工,但当筋位于飞机结构件的轮廓时开口筋和独立筋一般不采用单独绕圈进行加工。

若筋顶面、筋侧面和约束面都要加工,则各部分的加工顺序为:约束面→筋顶面→筋侧面。

筋顶面多为平面,也有斜面和曲面。筋顶面加工时多采用圆角刀3轴侧刃加工,一般选择合适的刀具半径使筋顶面尽量一次加工完成。影响加工质量的主要因素是加工刀轨及刀轨之间的行距。筋顶面加工一般采用等高铣削,顺铣、行切的走刀方式,刀轴方向为Z向,通常采用斜线进刀或圆弧进刀,如图7所示。

筋的约束面大部分为平面,也有小部分靠近轮廓的约束面为直纹曲面。一般多用圆柱形的平底刀对约束面进行侧铣加工。对于平面型的约束面,常用平底刀三坐标加工,刀轴方向为Z向,通常采用圆弧进退刀,如图8所示。对于直纹面型的约束面,常用五坐标加工,加工时刀具

的刀轴方向相对于工件的方向在一定的角度范围内摆动。

筋侧面多采用圆鼻刀侧铣。筋属于薄壁结构,加工侧面时由于受力不均匀易发生变形,应采取适当的措施。当筋是一端无连接支撑的开口筋,或是两端无支撑连接的独立筋的侧面时,一般会采用绕圈铣逐层加工方式,以减少变形,如图9所示。

筋顶面加工的刀轨计算是筋顶面加工的一个重要部分,以一端有过渡圆弧面的筋顶面加工为例,如图10所示。其中, O 点是圆角刀的刀尖点, O' 是圆角刀的倒角圆心点。 ABC 为加工过程中刀触点的轨迹, $A'B'C'$ 为加工过程中倒角圆心点的轨迹, $A''B''C''$ 为刀尖点加工时形成的刀轨线。

筋顶面加工的进刀点与筋约束面和筋顶面的形状有关,其中,待加

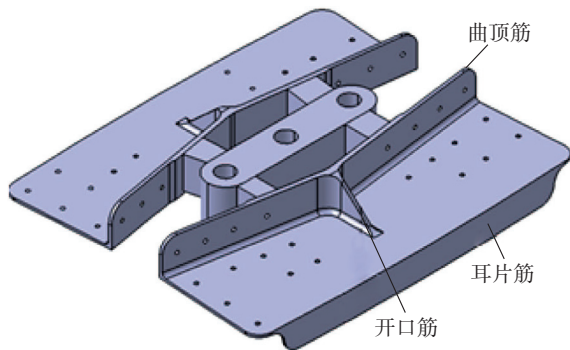


图5 筋特征

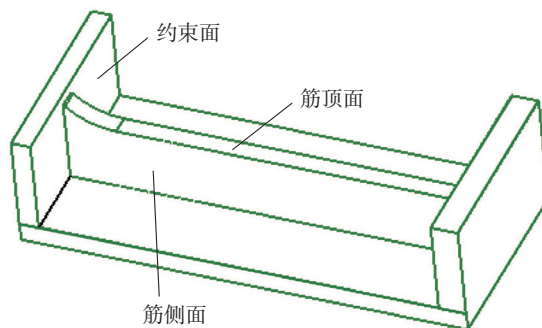


图6 筋特征的组成

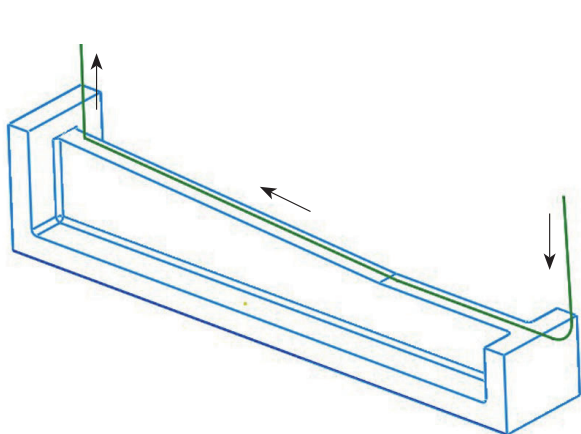


图7 筋顶面走刀路径

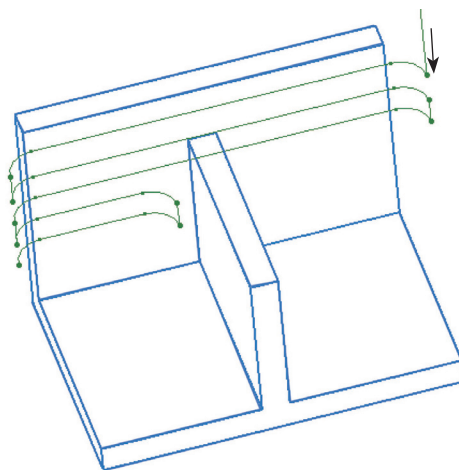


图8 约束面走刀路径

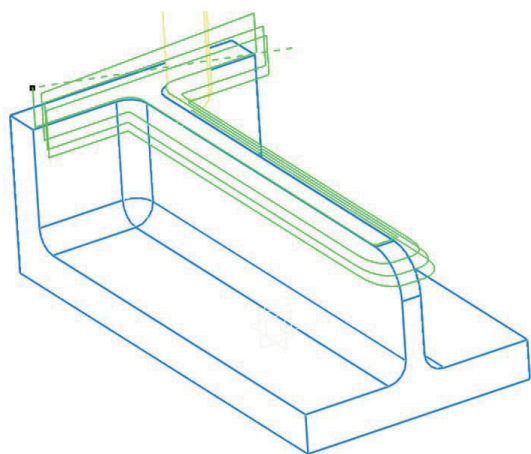


图9 开口筋侧面走刀路径

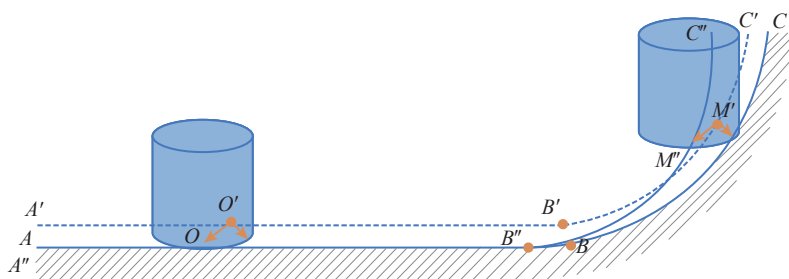


图10 含过渡圆弧面的筋顶面走刀路径

工的筋顶面的类型是确定进刀点的重要因素,重点考虑进刀点位置的开敞性、对约束面无干涉的要求。在确定进刀点时下列原则:

- (1) 从筋开敞的一端进刀;
- (2) 从筋顶面的平面处进刀;
- (3) 从筋顶面的最低处进刀;
- (4) 一端有过渡圆弧的筋顶面从无过渡圆弧的另一端进刀;
- (5) 两端有过渡圆弧的筋顶面从顶面的中间进刀。

装夹方式

飞机结构件大多为表面由数个槽腔和孔组成的双面结构,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。在夹具设计时应考虑到如下要求: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。

目前,普遍采用的装夹方式有机

械、液压可调夹具、真空吸附装夹、电控永磁吸盘等几种。

夹具元件可能会与走刀路径干涉。利用液压可调夹具,即压板在零件加工过程中可以松开,并可移出刀具加工区,保证刀具切削轨迹的连续性。刀具切过压紧位置后,夹具系统再使压板返回原来的压紧位置。

由于结构件大多是薄壁件,确定夹紧力非常重

件位置以适应不同零件的装夹要求,如可换基础垫板、组合夹具等。

结束语

切削效率高和切削变形小是飞机结构件采用高速铣削方法并取得较好效益的主要原因。在刀具材料、刀具几何角度、铣削参数、铣削方式、走刀路径以及夹具设计等各方面,虽然各航空厂积累了丰富的经验,但仍然存在较多问题需要解决。目前,面临的主要问题包括减小加工变形、夹具柔性化、切削参数优化、刀具材料国产化等。

参考文献

- [1] 张新明,刘胜胆. 航空铝合金及其材料加工. 中国材料进展, 2013, 32(1):39-55.
- [2] Alberti M, Ciurana J, Rodriguez C A. Experimental analysis of dimensional error vs. cycle time in high-speed milling of aluminium alloy. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007(47): 236-246.
- [3] 王细洋. 现代制造技术. 北京: 国防工业出版社, 2010: 8-9.
- [4] 万熠. 高速铣削航空铝合金刀具失效机理及刀具寿命研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [5] Zaghbani I, Songmene V. A force-temperature model including a constitutive law for dry high speed milling of aluminium alloys. Journal of Materials Processing technology, 2009(209): 2532-2544.
- [6] Lua H S, Chang C K, Hwanga N C, et al. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling. Journal of Materials Processing Technology, 2009(209): 3808-3817.
- [7] Eun Y H, Dong W K, Jong Y L, et al. High speed pocket milling planning by feature-based machining area partitioning. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011(27): 706-713.
- [8] 李立玉. 基于模型定义的飞机结构件数控编程技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- [9] 王细洋. 飞机结构件机械加工柔性夹具系统. 航空制造技术, 2012(17):45-49.

(责编 深蓝)