

面向航空结构件的高性能加工 刀具性能评价*

Evaluation of Cutting Performance of High Performance Machining Cutter in Milling Aviation Component

南京航空航天大学机电学院 魏修国 赵威 何宁 史琦 李亮 杨吟飞



魏修国

硕士研究生,研究方向为高性能
铣削加工。

本文针对航空结构件零件结构复杂、特征数量多而导致的加工质量差、加工效率低以及加工成本高等问题,基于国内航空制造企业对铣削刀具的选用现状,提出了一种刀具快速评价方法,从而为航空铝合金结构件高性能加工刀具的优选与切削性能评价提供了一种新的途径。

以保证^[1]。实现航空结构件的高精度、高效率和高可靠性铣削加工是航空制造业面临的重要技术难题之一。在航空整体结构件高速铣削加工中,影响切削加工的最直接因素就是刀具的切削性能,刀具寿命、切削力和工件表面质量等均与刀具的几何参数有关。选择合理的刀具几何参数,不仅能够提高生产效率,还能延长刀具的使用寿命^[2]。如何有效地选择加工航空结构件切削刀具,对实现航空关键结构件的高效精密加工至关重要。

多年来,国内外研究人员对刀具性能进行了大量的研究工作,如Wyen等^[3]研究了刀具刃口半径对切削力的影响;Haci Saglam等^[4]计算

和测量了刀具前角对切削力和切削温度的影响;Gunay等^[5]研究了刀具前角对主切削力的影响规律。然而,目前国内航空制造企业对于刀具性能的优劣仍然缺乏一种有效的预先评估机制,制定的试切规范仅能针对一种或几种零件结构的刀具选择,具有较大的局限性,不能满足大多数航空结构件的刀具试切需求。此外,这种主要由操作者凭经验制定的刀具试切选择基准并不能有效地选择高性能切削刀具,往往造成工件实际加工过程中的刀具成本增加,加工质量不稳定,加工效率低等。为此,本文提出了一种基于特征的航空铝合金复杂结构零件加工刀具性能快速评价方法,即首先根据航空典型铝合金

随着航空业的不断发展,现代飞机和航天器性能要求越来越高,零件外廓尺寸相对截面尺寸较大,铣削加工余量大、加工工艺性差,加工工期长,尤其加工薄壁零件时尺寸更是难

* “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2012ZX04003021)、航空科学基金项目(2010352005)、国防成果推广项目(C152012C002)资助。

零件的结构及其工艺特点进行综合分析,然后设计刀具性能评价基准样件,并建立相应的加工工艺及刀具性能评价指标,最后进行面向航空铝合金结构件的加工刀具性能评价试验与分析。

基准样件的设计

航空铝合金复杂结构件主要有整体壁板类零件、整体框结构类零件以及接头零件等(图1)。该类零件普遍由具有侧壁和腹板结构的诸多框体构成,并具有深型腔槽、拐角、开闭角、复杂曲面以及各类筋结构等典型特征。对该类航空典型复杂结构件的切削加工,主要采用铣削加工方式,可选刀具种类多,但现有试切方法多采用加工块状毛坯材料、简单侧壁或单一槽腔零件等来进行切削刀具的预先评估与选择,因其没有充分考虑零件的结构特征而具有较大的应用局限性。

针对该类零件的铣削加工刀具选择与评估需求,在进行刀具性能评估基准试件的设计时,首先要将这些航空结构件典型特征尽量多的提取出来并适当简化,然后将这些典型特征集中设计到一个或一组标准试件上,即设计包含多个特征的标准试切样件用以满足多种航空整体复杂结构件高性能铣削刀具的评估与选择需求。本文建立的铝合金基准试件

如图2所示,为上下对称结构,总体尺寸为450mm×310mm×50mm,试件涵盖了开口框、闭口框和侧壁(开/闭角)等典型结构。其中,侧壁与腹板的厚度均为2mm,圆角半径均为6.5mm。

加工工艺和评价指标的制定

航空结构件的加工效率和加工质量在很大程度上取决于加工工艺,合理安排加工工艺即是在保证加工精度要求的前提下,尽量减少空行程的时间,有效利用机床资源,节约成本,提高生产效率。针对如图1所示的基准样件,粗加工槽腔一般采用型腔铣,分层环形切削,螺旋下刀,下刀角度 $1.5^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 。半精加工主要使槽周边与转角处的余量分布均匀,从而保证高速精加工时的切削负载稳定。精加工侧壁时,由于侧壁较薄,刚度低和加工变形大,从而影响侧壁的加工质量和效率,因而主要采用分层对

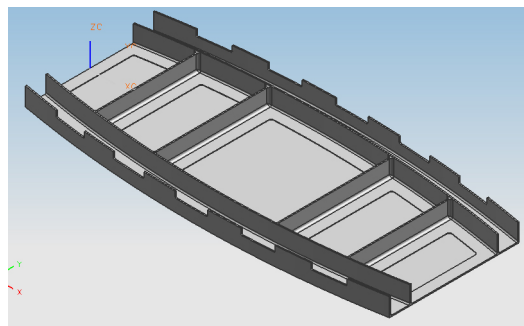


图1 典型航空结构件示意图

表1 试验刀具及其加工特征结构

| 刀具号 | 刀具参数 | | | 加工特征结构 | |
|-----|------|-------------------|---------|---------------|------------------|
| | 齿数 | 螺旋角($^{\circ}$) | 刀尖R径/mm | 正面 | 反面 |
| 1 | 2 | 30 | 0.5 | 框体1,框体2 | |
| 2 | 2 | 45 | 0.5 | | 框体1',框体2' |
| 3 | 3 | 30 | 0.5 | 框体3,框体4 | |
| 4 | 3 | 45 | 0.5 | | 框体3',框体4' |
| 5 | 2 | 30 | 0.5 | 侧壁2,开口框1,开口框2 | |
| 6 | 2 | 45 | 0.5 | | 侧壁2',开口框1',开口框2' |
| 7 | 2 | 30 | 1 | 侧壁1 | |
| 8 | 3 | 30 | 1 | | 侧壁1' |

称铣削加工方式,其加工路径不仅可以最大限度地使应力均匀分布,而且又能充分利用薄壁的刚性,从而达到减小变形的目的。精加工框体时,采用由内向外的环切方式,这种方式可以充分利用未加工部分的刚性,有效控制腹板的加工变形,提高加工精度。在精加工转角时,采用局部附加走刀以及轴向分层切削等。精加工平顶筋时,从开敞的一端进刀,沿筋顶面加工至另一端抬刀。无论什么时候都必须避免类似逆铣的加工方式。精加工斜顶筋时,一般先加工约束面,然后刀具按从低到高的原则进行加工,最后从最低平面处进刀并且沿斜面从低到高加工。精加工曲顶筋时,以从低到高加工的原则逐段进行加工;在加工过渡圆弧的加强筋时,只有一端有过渡圆弧的加强筋,从相反的一侧进刀。两端都有过渡圆弧的加强筋,从中间的地方进刀,分两次从中间向两端进行切削^[6]。

刀具性能的优劣一般通过选取各种指标来进行评价,因此评价指标的选取至关重要,选取的过多会有重复性,选取的过少则会缺乏代表性。每一项的评价指标都是从一个特定的方面反映刀具的某些特定信息。基于所设计的刀具性能评价的基准试件,同时考虑到对铝

合金整体复杂结构的实际评价指标,建立了铝合金加工刀具性能评价指标,一般可以从工件表面粗糙度和尺寸精度来选定考核参数。侧壁具有壁薄、刚度低、长度大等特点,若在加工后表面粗糙度大和尺寸精度低,会大大降低零件性能。表面粗糙度值一般低于 $1.6\mu\text{m}$,侧壁厚度的公差范围为 $\pm 0.1\text{mm}$;因此,侧壁的评价指标主要为表面粗糙度和尺寸精度。腹板结构一般都采取双面槽腔形式进行加工。由于腹板的面积大而厚度薄,加工工艺性很差,这样的零件

结构在加工过程中变形难以控制,并且容易引起振动,形成明显的振纹,往往表现为表面质量较差。精加工表面的粗糙度值一般不超过 $1.6\mu\text{m}$ 。因此,腹板加工测试时主要评价指标为腹板的表面粗糙度和腹板变形大小。框体结构是铝合金零件的通用特征之一,在精加工框体结构件时,将同时形成侧壁和腹板,其加工特性和侧壁类相似,所以在加工整体框体结构件时,其评价指标将综合腹板与侧壁的评价指标。

刀具性能评价试验与分析

1 试验方法

(1)试验条件:所有铣削试验均在瑞士 Mikron 公司生产的 UCP 710

五坐标加工中心上进行,应用 Mahr S3P 测量仪进行表面粗糙度的测量,精加工后应用三坐标测量机进行尺寸精度与变形量测量。

(2)加工工艺:被加工试件毛坯通过螺栓连接固定在机床平台上,粗加工槽腔时采用型腔铣,闭口框分层环形铣削,螺旋下刀,下刀角度 1.5° ,开口框沿零件内侧壁轮廓分层铣削,沿刀具进给方向直线进刀,铣削参数: $n=12000\text{r}/\text{min}$, $f_z=0.15\text{mm}/\text{z}$, $a_e=8\text{mm}$, $a_p=2\text{mm}$ 。精加工腹板采用平面铣,轨迹与粗加工轨迹类似,铣削参数: $n=8000\text{r}/\text{min}$, $f_z=0.15\text{mm}/\text{z}$, $a_p=1\text{mm}$, $a_e=6\text{mm}$ 。精加工框体时使用圆弧进刀方式,轴向分层铣削,转角必须增加圆角,铣削参数: $n=8000\text{r}/\text{min}$, $f_z=0.08\text{mm}/\text{z}$, a_p

$=2\text{mm}$, $a_e=1\text{mm}$ 。最后加工平顶筋、斜顶筋等筋结构的顶面,螺旋下刀,下刀角度 1.5° ,铣削参数: $n=8000\text{r}/\text{min}$, $f_z=0.15\text{mm}/\text{z}$, $a_p=1\text{mm}$ 。

(3)铣削刀具及其加工特征:选用3种参数共8把 $\phi 12$ 整体硬质合金立铣刀进行高速铣削加工试验,刀具参数及加工特征结构如表1所示。

2 试验结果与分析

针对所设计的基准样件进行铣削加工试验,试验结果如表2所示。采用1、2号刀具加工框体1/框体2和框体1'/框体2'时,两组框体侧壁的表面粗糙度平均值分别为 $0.155\mu\text{m}/0.125\mu\text{m}$ 和 $0.125\mu\text{m}/0.117\mu\text{m}$,前者略大于后者。而采用2号刀具加工出的框体1'/框体2'侧壁厚度的平均

表2 铣削加工试验结果

| | 加工特征结构 | 框体1(1号刀具) | | 框体2(1号刀具) | | 框体3(3号刀具) | | 框体4(3号刀具) | |
|--------|--------|------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 测定结果 | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ |
| 正 面 | 1 | 1.9438 | 0.187 | 1.9643 | 0.120 | 2.0093 | 0.394 | 2.0152 | 0.405 |
| | 2 | 1.9460 | 0.154 | 1.9676 | 0.130 | 2.0088 | 0.390 | 2.0181 | 0.453 |
| | 3 | 1.9494 | 0.125 | 1.9696 | 0.124 | 2.0084 | 0.366 | 2.0163 | 0.483 |
| | 平均值 | 1.9464 | 0.155 | 1.9672 | 0.125 | 2.0088 | 0.383 | 2.0165 | 0.447 |
| | 加工特征结构 | 侧壁1(7号刀具) | | 开口框1(5号刀具) | | 开口框2(5号刀具) | | 侧壁2(5号刀具) | |
| | 测定结果 | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | |
| | 1 | 1.9628 | 0.348 | 2.0127 | 0.417 | 2.0124 | 0.428 | 0.469 | |
| | 2 | 1.9655 | 0.345 | 2.0106 | 0.446 | 2.0128 | 0.446 | 0.458 | |
| | 3 | 1.9685 | 0.344 | 2.0149 | 0.438 | 2.0123 | 0.472 | 0.449 | |
| | 平均值 | 1.9656 | 0.346 | 2.0127 | 0.433 | 2.0125 | 0.449 | 0.459 | |
| 反 面 | 加工特征结构 | 框体1'(2号刀具) | | 框体2'(2号刀具) | | 框体3'(4号刀具) | | 框体4'(4号刀具) | |
| | 测定结果 | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ |
| | 1 | 1.9527 | 0.139 | 1.9807 | 0.120 | 1.9969 | 0.397 | 1.9998 | 0.462 |
| | 2 | 1.9554 | 0.094 | 1.9764 | 0.118 | 1.9980 | 0.374 | 1.9970 | 0.399 |
| | 3 | 1.9545 | 0.142 | 1.9803 | 0.115 | 1.9984 | 0.385 | 1.9996 | 0.467 |
| | 平均值 | 1.9542 | 0.125 | 1.9791 | 0.117 | 1.9948 | 0.385 | 1.9988 | 0.442 |
| | 加工特征结构 | 侧壁1'(8号刀具) | | 开口框1'(6号刀具) | | 开口框2'(6号刀具) | | 侧壁2'(6号刀具) | |
| | 测定结果 | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 厚度/mm | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | 表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$ | |
| | 1 | 1.9660 | 0.424 | 2.0292 | 0.456 | 2.0218 | 0.437 | 0.450 | |
| | 2 | 1.9678 | 0.426 | 2.0305 | 0.439 | 2.0212 | 0.432 | 0.414 | |
| 3 | 1.9698 | 0.418 | 2.0307 | 0.443 | 2.0399 | 0.440 | 0.445 | | |
| 平均值 | 1.9679 | 0.422 | 2.0301 | 0.446 | 2.0276 | 0.436 | 0.436 | | |

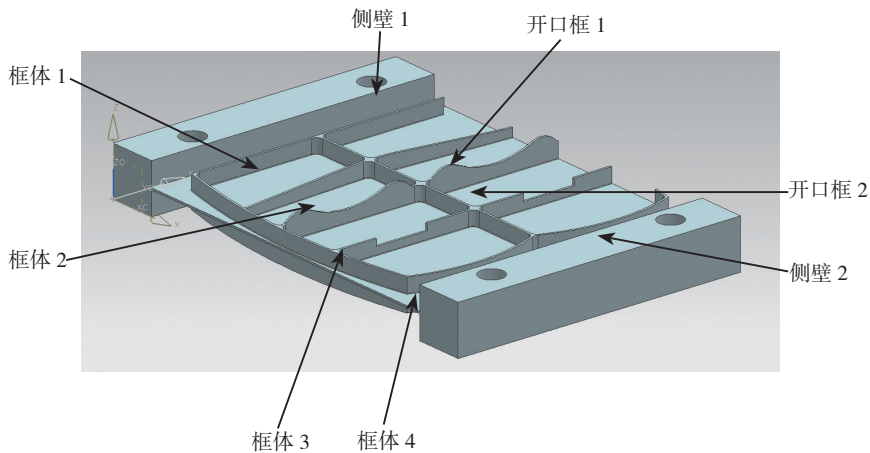


图2 基准样件正面示意图(反面对称布局)

值 1.9542mm/1.9791mm 比 1 号刀具加工出的框体 1/框体 2 的侧壁厚度的平均值 1.9464mm/1.9672mm 大,更接近设计值 2.0mm。此外,采用 3、4 号刀具加工框体 3/框体 4 和框体 3'/框体 4' 时,两组框体侧壁的表面粗糙度的平均值分别为 $0.383\mu\text{m}/0.447\mu\text{m}$ 和 $0.385\mu\text{m}/0.442\mu\text{m}$,二者基本一致。而采用 4 号刀具加工出的框体 3'/框体 4' 侧壁厚度的平均值为 1.9948mm/1.9988mm,比 3 号刀具加工出的框体 3/框体 4 的侧壁厚度的平均值 2.0088mm/2.0165mm 略小,但更接近设计值 2.0mm。由表 1 可知 1、2 号刀具螺旋角分别为 30° 和 45° ,其余几何参数一样;而 3、4 号刀具螺旋角亦分别为 30° 和 45° ,其余几何参数都一样。由此可见,大螺旋角刀具更适合于闭口框的加工,其主要是因为加工闭口框时, 45° 螺旋角的径向切削力相对较小,降低了让刀变形量,从而保证了框体侧壁的尺寸精度。

采用 5、6 号刀具加工开口框 1/开口框 2 和开口框 1'/开口框 2' 时,2 组开口框腹板的表面粗糙度平均值分别为 $0.433\mu\text{m}/0.449\mu\text{m}$ 与 $0.466\mu\text{m}/0.436\mu\text{m}$,2 组数值均较为接近。然而,5 号刀具加工出的开口框 1/开口框 2 侧壁厚度的平均值为

2.0127mm/2.0125mm,比 6 号刀具加工出的开口框 1'/开口框 2' 侧壁厚度的平均值 2.0301mm/2.0276mm 更接近设计值 2.0mm。由表 1 可知 5、6 号刀具螺旋角分别为 30° 和 45° ,其余几何参数都一样。由此可见, 30° 螺旋角刀具更适合加工开口框加工,这是因为 45° 螺旋角刀具整体刚性相对较弱,而开口框的整体刚性亦较低,在双重弱刚性作用下,容易造成开口框侧壁尺寸偏差较大,建议选用高刚性刀具加工弱刚性开口框。

此外,采用 7、8 号刀具加工出的侧壁 1 与侧壁 1' 厚度的平均值分别为 1.9656mm 和 1.9679mm,二者数值非常接近。而 7 号刀具加工出的侧壁 1 的表面粗糙度为 $0.346\mu\text{m}$,比 8 号刀具加工的侧壁 1' 的表面粗糙度 $0.442\mu\text{m}$ 小,表面精度更高。由表 1 可知,7、8 号刀具拥有不同的齿数,分别为 2 齿和 3 齿,其余几何参数都一样。由此可见,齿数较少的刀具更适合加工侧壁,这主要是因为 2 齿立铣刀在高速旋转切削过程中较易达到动平衡,容易避免切削加工过程中颤振的产生,且加工时切屑能够顺利的形成和排出,从而提高零件的表面质量。

综合以上分析可以认为,在加工闭口框时, 45° 螺旋角立铣刀比 30° 螺

旋角铣刀更有利于提高尺寸精度,而在加工开口框时结果相反。在加工侧壁时,2 齿立铣刀比 3 齿立铣刀更利于降低表面粗糙度数值。

结论

本文针对航空结构件零件结构复杂、特征数量多而导致的加工质量差、加工效率低以及加工成本高等问题,基于国内航空制造企业铣削刀具的选用现状,提出了一种刀具快速评价方法,从而为航空铝合金结构件高性能加工刀具的优选与切削性能评价提供了一种新的途径。

针对航空结构件零件不同的典型特征,建立了基准样件与评价指标,基于高速铣削试验快速评价了不同几何参数下刀具的切削性能。结果表明,在加工闭口框时, 45° 螺旋角立铣刀比 30° 螺旋角铣刀更有利于提高尺寸精度,而在加工开口框时结果相反。在加工侧壁时,2 齿立铣刀比 3 齿立铣刀更利于降低表面粗糙度数值。

参考文献

- [1] 武凯,何宁,廖文和,等.基于薄壁件变形分析的铣削加工瞬态力学模型研究.应用科学学报,2005,23(6):631-634
- [2] 吴红兵,刘刚.刀具几何参数对钛合金 Ti6Al4V 切削加工的影响.中国机械工程,2008,19(20):2019-2022.
- [3] Wyen C F, Wegener K. Influence of cutting edge radius on cutting forces in machining titanium. CIRP Annals- Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 93- 96.
- [4] Saglam H, Yaldiz S, Unsacar F. The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tooltip temperature. Materials and Design, 2007, 28(1): 101-111.
- [5] Gunay M, Aslan E, Korkut I, et al. Investigation of the effect of rake angle on main cutting force. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(9): 953- 959.
- [6] 龚清洪,夏雪梅,牟文平,等.基于加工特征实例的零件工时预测评估.工具技术,2009(3):58-61.

(责编 良辰)