钛合金材料在数控加工中的应用和优化方法

韩智勇，于海鹏，王喜军，何刚
郑州飞机装备有限责任公司　河南郑州　450005

摘要：通过对钛合金机械加工特性的介绍，针对钛合金材料典型零件拥有较大去除率的特点，从刀具选用、加工策略制定及参数选择3个方面进行切削优化，达到了较好的应用效果，延长切削刀具寿命的同时减少成本，实现加工效率的提高。

关键词：钛合金；数控加工；切削参数；刀具寿命

1　序言

钛合金因其特殊属性成为在航空航天领域应用广泛的零件材料，但硬度高、切削性能差，故属于难加工材料，加工中易产生零件表面硬化，给机械加工带来了很大挑战[1]。

通常用于加工钛合金的刀具材料对硬度和耐磨性要求较高，且需要具备极好的耐热性，在高温下仍能保持较高强度、高韧性、一定的抗冲击性和抗破坏性，满足以上要求的刀具有：陶瓷刀具、涂层硬质合金刀具、立方氮化硼（CBN）刀具和金刚石（PCD）刀具等[2]。其中涂层硬质合金刀具价格低，且具有较好的导热性和较高的硬度，虽然其耐热性和化学稳定性较陶瓷刀具、立方氮化硼刀具和类金刚石刀具差一些，但较强的抗冲击性和抗破坏性使其成为加工钛合金的首选刀具[3]。选用刀具的几何角度时，要求具有较小前角、刃倾角负倒棱、主偏角和负偏角同时拥有较大后角。

2　钛合金材料切削参数优化与应用

图1所示零件材料为TC11钛合金，悬臂与接头为一体结构，零件部位划分如图2所示，加工过程实体如图3所示。

加工难点如下所述。

1）毛坯为重型自由锻件，表面有较硬的硬化层，形状不规则，加工完成后材料去除率超过80%，加工余量大、难度高。

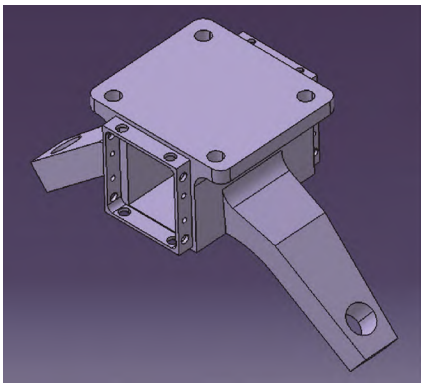


图1　零件

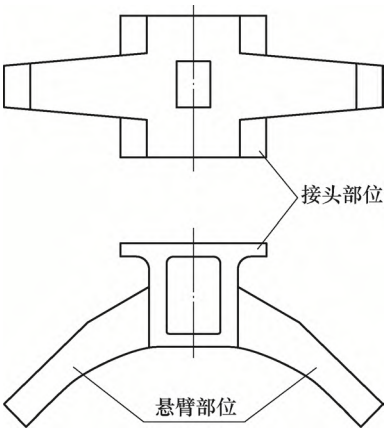
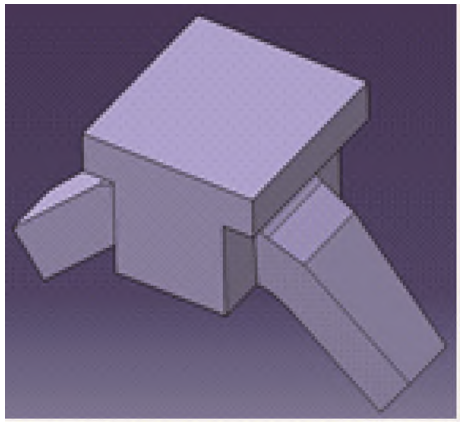


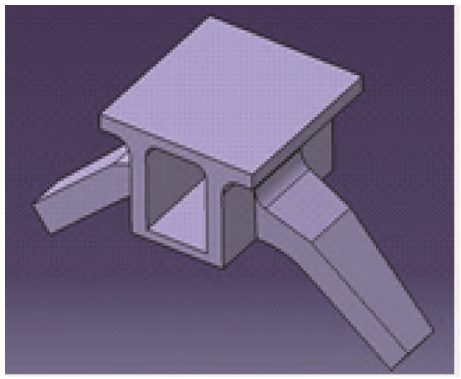
图2　零件部位划分

2）中间槽腔较深，约400mm，且槽腔尺寸精度高，加工中切削参数不合理，无法保证尺寸精度。

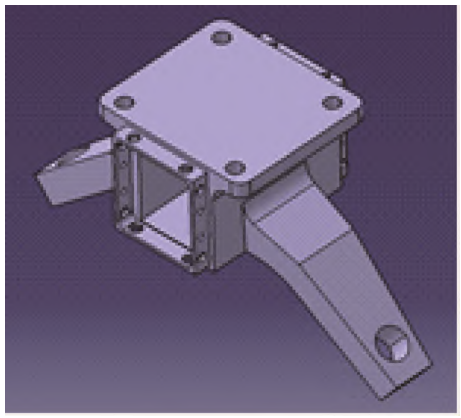
3）悬臂部分悬伸＞600mm，加工中切削参数不合理，易产生振动，影响零件表面质量。



a）毛坯实体



b）粗加工实体



c）精加工实体

图 3　加工过程实体

4）由于是首次加工TC11钛合金材料，加工此类材料的刀具种类和数量有限，同时考虑新进刀具会增加加工成本，导致加工过程中不易设置精加工切削参数，粗加工初始阶段的刀具寿命与加工效率较低。

TC11钛合金属于难加工材料，通过对钛合金材料加工性能的研究，结合零件的结构特征以及较大的去除率，从刀具选用、加工策略选择及加工参数摸索3个方面进行切削优化[4]。

3　刀具选用

结合钛合金机械加工特性，优先使用涂层硬质合金可转位立铣刀加工钛合金材料，去除大部分机械加工余量。由于零件表面有较硬的硬化层，严重影响刀具寿命，因此选择合适的涂层刀具尤为重要，对刀具成本的影响也最大[5]。

在刀具性能的提升策略中，涂层技术无疑占据着至关重要的地位，刀具涂层犹如为刀具披上了一层坚固而精密的“铠甲”，显著增强了在切削过程中的耐磨、耐热和抗腐蚀能力。

目前，先进的涂层工艺层出不穷，常见的涂层材料包括类金刚石（DLC）涂层、氮化钛（TiN）涂层和碳化钛（TiC）涂层等。DLC 涂层具有极低的摩擦系数和出色的耐磨性，能够有效减少刀具与工件之间的摩擦，降低切削力，减少热量产生，从而延长刀具的使用寿命。TiN 涂层以其良好的硬度和化学稳定性，为刀具提供了可靠防护，使其在高速切削中依然能保持优异的性能[6]。TiC涂层虽然硬度略低于DLC涂层，但高温稳定性优于TiN涂层，对高温稳定性要求高以及需要避免切削液污染（如医疗零件加工）的干式切削场景来说，该涂层的应用至关重要。

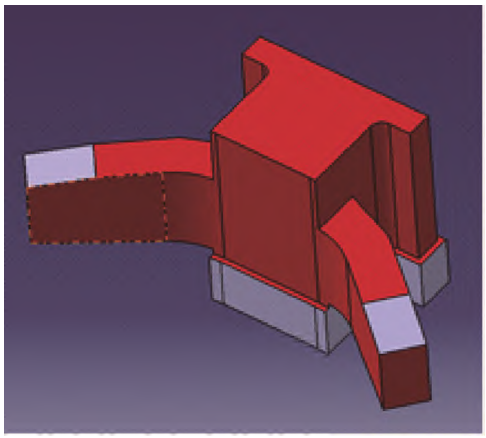
涂层的制备方法也多种多样，如物理气相沉积（PVD）技术和化学气相沉积（CVD）法。PVD技术能够在低温下实现涂层的沉积，有效避免刀具基体高温变形的同时可以精确控制涂层的厚度和成分；CVD 法则适用于制备较厚的涂层，具有较高的沉积率和良好的结合强度。

通过了解不同涂层技术，结合刀具成本分析，最终采用物理气相沉积（PVD）技术制备的氮化钛铝（TiAlN）涂层刀具进行零件的粗、精加工。

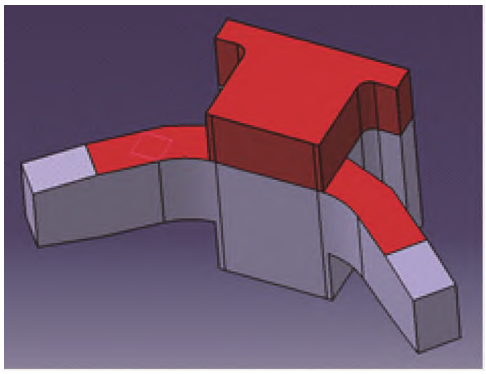
现有能用于钛合金加工的四边形刀片，经尝试发现寿命均较短。通过查阅大量的相关刀具资料，联系相关刀具企业，在粗加工过程中选定了较为适合钛合金加工的圆形刀片（外径12mm）进行尝试，粗加工实体如图4所示，圆形刀片相较之前所选刀片，同样的背吃刀量，切削刃与工件的接触面积更大，相对散热性更好，且此形状刀片每旋转120°

使用1次，1个刀片可旋转3次，即可使用3次，刀具寿命相对提高。

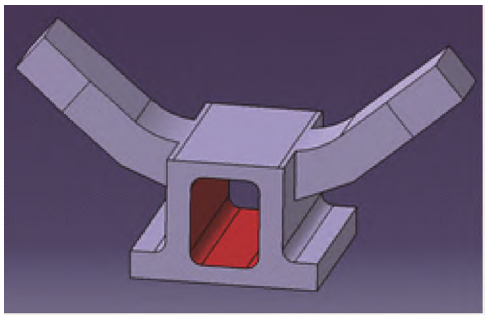
精加工实体如图5所示，图中着色区域代表工序加工内容。精加工过程中，选用高钴类合金钻头，此类钻头与钛合金亲和力小，导热性能良好，强度较高。铰孔时分两部分进行，粗铰选用普通铰刀（留余量0.1mm），精铰选用合金铰刀。铣外形选用ϕ12mm整体硬质合金立铣刀分层加工，该铣刀相比普通立铣刀，具备导热性好、硬度高、不易变形且切削性能稳定等优点，适合加工钛合金材料。



a）工序1

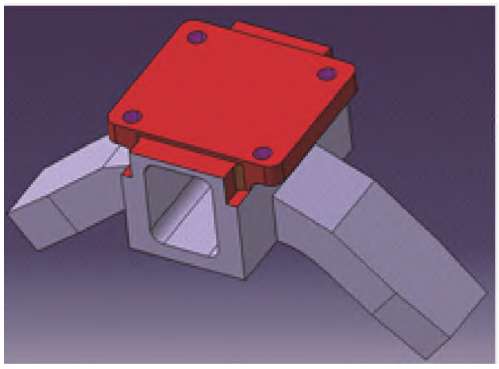


b）工序2

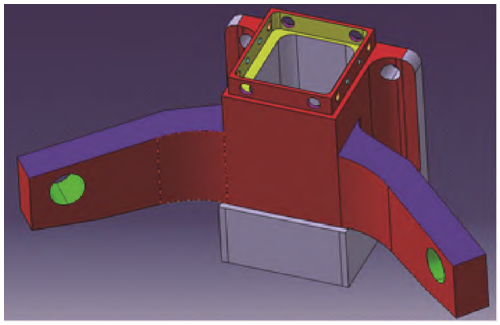


c）工序3

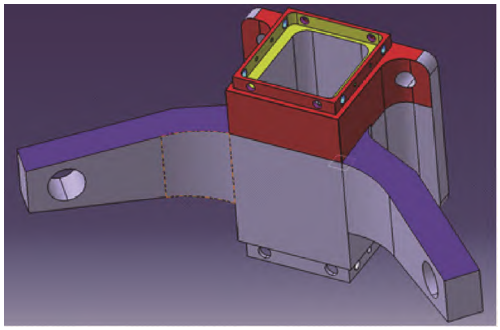
图4　粗加工实体



a）工序4



b）工序5



c）工序6

图5　精加工实体

4　加工策略选择

无论是粗加工还是精加工，在加工悬臂部分（见图4a和图5b红色区域）时，由于刀具悬伸长，刚性下降，故刀具与零件之间极易产生振动，严重时甚至会导致刀具崩刃或损坏，影响零件表面质量，若合理选择加工刀路，就可以避免振动。粗加工阶段采取大直径刀具分层加工，按照一定深度分多个层次、逐层进行铣削，能够有效降低单次铣削的切削力，减小刀具负载，从而延长刀具寿命。对精加工而言，由于悬臂存在多个倾斜平面（见图5b、图5c深蓝色区域），故需采用五轴定平面加工，刀具轴垂直于加工平面，使切削力分布更加均

匀，刀具与工件间的接触更加平滑，减少切削热产生和避免刀具局部过度磨损的同时，降低刀具的热疲劳损伤。五轴加工还能使用更短的刀具，增加刀具的刚性，进一步减少刀具的振动和变形，有助于延长刀具的使用寿命。

中间部位贯通封闭槽腔（见图4c），容易出现刀具因挤屑而损坏的情况，需采取卧式加工方法，切屑在重力作用下能更顺畅地排出，减少切屑堆积对加工的影响，使排屑更为高效，同时也降低了刀具与切屑之间的摩擦和热量，有助于延长刀具寿命。由于槽的深度达到了350mm，因此需先选择悬伸短、再选择悬伸长的刀具进行加工，同时要防止悬伸长的刀具产生振动。粗加工主要考虑加工刀路对表面质量的影响，同样采用分层铣削的方式提高加工表面质量。由于切削力减少，加工过程中的振动和变形也相应减少，因此加工表面会更加光滑。

5　加工参数设置

5.1　粗加工切削参数

试切初期由刀具商提供初始切削参数，刀具寿命不是很理想，技术人员和操作人员通过相关数据分析和摸索，得到加工零件用的合理切削参数，设备选用VMC1700立式加工中心（见图6）。

选用山特维克可乐满刀具，分别为ϕ50mm可转位立铣刀刀片，型号：490R-08T308M-MM/S30T；ϕ 52mm可转位立铣刀刀片，型号：R300-1240E-PMS30T；ϕ80mm可转位立铣刀刀片，型号：R300-1240E-PMS30T。



图6　VMC1700立式加工中心

粗加工过程中，由于零件大部分为毛坯表面，导致刀具磨损进一步加剧，现场测试时刀具切削参数见表1。初始加工时，刀具加工出来的切屑为卷状，表面光滑，仅2h后，切屑变为长条状，表面褶皱似挤压状，加工磨损出现在一瞬间，前一分钟还正常加工，后一分钟刀具已经不能再使用，需要更换刀片。为节约成本、提高效率，将转速、进给速度和背吃刀量进行测试调节，生产效率得到了一定提高，加工寿命由原来的最长2h（同时考虑不可预料的刀具磨损），变为较稳定的3h，加工后换刀的定时损耗让生产不至于停滞。继续调节参数，最终测试出较完善的参数，优化后的刀具切削参数见表2，更换刀片的时间可以延长至6～7h，大大降低了刀具成本。

表1　现场测试时刀具切削参数

刀具直径/mm	刀片类型	加工位置	转速/(r/min)	进给速度/(mm/min)	背吃刀量/mm
80	圆弧	图4红色区域	180	105	2
52	圆弧		200	120	2
50	方肩		300	150	2

表2　优化后的刀具切削参数

刀具直径/mm	刀片类型	加工位置	转速/(r/min)	进给速度/(mm/min)	背吃刀量/mm
80	圆弧	图4红色区域	110	110	2
52	圆弧		150	110	2
50	方肩		150	150	2

5.2　精加工切削参数

相比粗加工阶段，精加工阶段由于加工余量减少，相同直径的刀具，其转速、进给速度和背吃刀量均有所提高，但不能与粗加工一样维持恒定数值，存在一定变化幅度，在加工时需不断调整。精加工阶段还需考虑钻孔、铰孔时刀具的选用，由于切削参数不合理，因此相比铣刀更容易产生硬化现象，导致加工孔径变形，造成零件报废。精加工的槽腔宽度尺寸精度高，还需考虑切削参数对尺寸精度的影响。

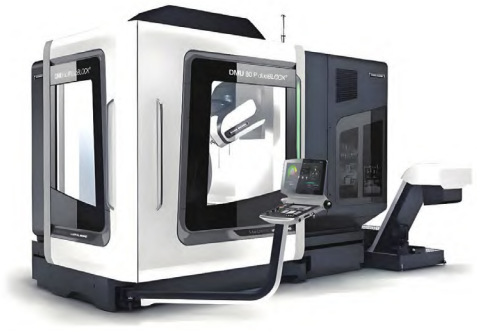


图7　DMU100P 五轴加工中心

DMU100P五轴加工中心如图7所示。以ϕ50mm可转位立铣刀为例，选用瓦尔特刀具，型号WALTER 116166，刀片类型：ADMT120430R-F56 WSM35，加工外形、型腔等。ϕ50mm飞刀部分切削参数见表3，精加工部分刀具切削参数见表4。

在加工过程中，克服加工经验少以及现有刀具

表3 ϕ 50mm飞刀部分切削参数

刀柄型号	加工位置	转速/(r/min)	进给速度/（mm/min）	背吃刀量/mm	切削宽度/mm	刀片寿命/min
HSKA100	图5 红色区域	150～250	130～170	1～3	25～35	450～500
SK40		150～250	130～170	1～3	25～35	400～450
HSKA63		150～250	130～170	1～3	25～35	400～450

表4 精加工部分刀具切削参数

刀具	加工位置	转速/（r/min）	进给速度/（mm/min）	背吃刀量/mm
ϕ25mm飞刀	图5b～图5c深蓝色区域	300～500	100～200	1～3
ϕ12mm立铣刀	图5b～图5c黄色区域	200～500	80～150	3～7
ϕ12mm倒角刀	图5所有孔口倒角	500～800	80～150	1～3
ϕ48mm镗刀	图5b绿色区域	100～250	10～40	1
ϕ52mm飞刀	图5b～图5c深蓝色区域	200～300	150～300	1～3
ϕ25mm合金立铣刀	图5b绿色区域	200～500	100～200	2
ϕ20mm合金立铣刀	图5红色区域	200～500	100～200	10
ϕ10mm立铣刀	图5a橘红色区域	200～500	30～70	5
ϕ80mm飞刀	图5红色区域	100～300	100～300	1～3
ϕ50mm飞刀	图5红色区域	105～300	100～300	1～3
ϕ19.8mm钻头	图5a紫色区域	200～500	10～50	—
ϕ20mm铰刀	图5a紫色区域	50～100	10～30	0.2
ϕ3.3mm钻头	图5c绿色区域	500～800	10～50	—
ϕ5mm合金钻头	图5b浅蓝色区域	200～500	10～50	—
ϕ7.2mm合金钻头	图5c浅蓝色区域	200～500	10～50	—
ϕ8mm合金钻头	图5b橘红色区域	200～500	10～50	—
ϕ10mm合金钻头	图5b紫色区域	200～500	10～50	—
ϕ6.8mm钻头	图5c紫色区域	200～500	10～50	—
ϕ27mm U形钻头	图5b绿色区域	100～300	10～30	—

的不足，通过对粗、精加工刀具参数（转速、进给速度和背吃刀量）的不断尝试和优化，确定出合理的切削参数。

6 结束语

通过介绍钛合金材料机械加工性能，结合关键零件在机械加工过程中的难点问题，不断尝试和优化切削参数，有效提高了数控加工效率、提高了刀具寿命并减少了刀具成本。为公司今后加工此类钛合金材料零件积累了宝贵的机械加工经验，也使公司先进制造技术水平有所提高。

参考文献：

[1] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2013.

[2] 刘鸿文. 材料力学[M]. 6版. 北京：高等教育出版社，2017.

[3] 黄旭，朱知寿，王红红. 先进航空钛合金材料与应用[M]. 北京：国防工业出版社，2012.

[4] 赵永庆. 中国有色金属丛书：钛和钛合金相图谱[M]. 长沙：中南大学出版社，2011.

[5] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2009.

[6] 尹成湖. 机械加工工艺手册[M]. 北京：化学工业出版社，2023.

MW 20250512