

某机型钛合金承力框加工工艺优化研究

于 鑫,刘胜男

(驻沈阳地区航空军事代表室,沈阳 110034)

[摘要] 通过分析某机型钛合金承重框机械加工中的各个工段以及操作者所反馈的信息,找出了在技术上制约加工效率的生产因素,在此基础上对该零件的工艺流程和数控程序进行了优化,从而显著提高了加工效率。在处理转角加工工艺中,通过多次试验得到了加工转角的插铣编程方法,该方法解决了在加工转角过程中频繁出现的折刀问题。通过使用玉米铣刀解决了在加工基准面时由于余量不均引起的刀齿断裂问题,同时提高了加工效率,为今后类似零件的加工提供了宝贵的经验。

关键词: 钛合金; 数控程序优化; 插铣; 玉米铣刀; 切削参数

Machining Process Research on Titanium Alloy Load-Bearing Frame for a Certain Type of Aircraft

YU Xin, LIU Shengnan

(Aviation Military Representatives in Shenyang Region, Shenyang 110034, China)

[ABSTRACT] By analyzing the information obtained from the operators and each processing stage of the load-bearing frame made of titanium alloy for a certain type of aircraft, we optimize the machining process and NC programs of the part on the base of the factors which restrict processing efficiency. When dealing with the process of machining the fillets of the part, we get the plunge milling method with numbers of tests, which solves the problem of breakage of the milling cutter. By the use of indexable end milling cutter, we get the recipe for the trouble of fracture of cutting tools by the reason of uneven allowance when machining the reference surface and improve the efficiency at the same time. All of these will offer valuable experience for the machining process of similar parts.

Keywords: Titanium alloy; NC program optimization; Plunge milling; Milling cutter; Cutting parameter

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.100

钛合金所具有的强度高、耐腐蚀和密度低的特点很好地满足了航空航天技术的要求,因而得到了广泛的应用。钛合金相对一般合金钢具有以下优点^[1-2]:(1)密度小、比强度高。钛合金的密度大约为 $4.51\text{g}/\text{cm}^3$,为钢的60%,钛合金的抗拉强度一般在1100MPa以上,比强度明显高于钢。(2)热强度高。钛合金的热稳定性好,高温强度高。工作温度可达 500°C ,在 $300\sim 500^\circ\text{C}$ 温度下,其强度约比铝合金高10倍。(3)抗腐蚀性好。钛合金在潮湿大气和海水介质中工作,其抗腐蚀性优于不锈钢,对点蚀、酸蚀的抵抗力很强。(4)导热性差。钛的导热系数低,仅为 $15.25\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,约为铁的1/5,铝的1/14,同时相比于纯钛,钛合金的导热系数要下降50%。

但是,钛合金材料的切削加工性能很差,其原因是:

钛合金材料的弹性模量小,在切削力作用下容易产生变形,容易造成工件尺寸误差;导热性差,造成切削过程散热性差,切削温度高,致使刀具材料软化,加快刀具的磨损;冷硬、黏结、扩散等现象严重,化学活性大,与刀具材料“亲和”,增大了切削加工的困难;塑性低、硬度高,切削时刀刃易“崩齿”。针对钛合金切削加工的困难性,提高钛合金的加工效率,是制造行业需要迫切解决的问题^[3]。

孙明杰^[4]采用单因素铣削试验,总结了在不同铣削转速、进给速度以及进给量的情况下对普通退火TC4钛合金、 β 退火TC4钛合金以及WQ退火TB6钛合金加工后的表面的材料微观组织、加工硬化、表面粗糙度以及表面残余应力的影响。李富长等^[5]通过研究钛合金摇臂的加工工艺,得到了在进行钛合金铣削加工中的

一般解决措施。

为解决钛合金的机械加工工艺性差的问题,对钛合金的加工引入了一些特殊加工的方法。较为成熟的为电火花加工;另外一种为低温切削技术, Machai 和 Biermann^[6] 的传统切削液冷却和液态二氧化碳冷却的车削对比试验表明,以液态二氧化碳为冷却液不仅可以大幅提高刀具寿命,而且可以减少钛合金加工后的边缘切削毛刺。此外钛合金等难加工材料的超声加工工艺也得到了发展, Singh 等^[7] 综述了超声加工钛合金的工艺范围及其特点。本文以某机型钛合金承力框为研究对象,根据生产中反馈的信息对其进行工艺改进及参数优化。结合国外相关零件的先进加工工艺,合理安排工艺流程,通过采用不同铣削策略及刀具加工轨迹,以达到高效加工的目的,获得了较好的经济效益,同时具有实际推广应用意义。

1 承力框结构特征及存在的加工问题

该钛合金承力框的锻件毛坯如图 1 所示。该零件是某型飞机后机身重要的钛合金承力框之一。此零件外缘面为机身理论外缘,是变角度直纹面,内缘面为发动机舱外形。此零件是大型的钛合金整体框,其锻件毛坯的加工余量大,材料去除率高,加工周期长,切削效率低,严重影响了生产进度。

1.1 结构特点

(1) 零件结构复杂,工艺性差,加工过程中易产生变形。

(2) 材料为 TA15M,切削加工困难。

(3) 毛坯至成品的金属切削量大,锻件毛坯的重量为



图1 某机型钛合金框锻件图

Fig.1 A model box of titanium alloy forgings

100kg,最终成品的重量为 11kg,材料去除率达到 89%。

(4) 零件的外形尺寸为 1580mm × 1200mm × 195mm,体积较大,并且存在较深的型腔。

(5) 加工的精度要求高。

1.2 优化前的工艺流程及过程中存在的问题

在进行优化之前的工艺流程如图 2 所示。

1.2.1 单件工艺周期长

由图 2 可以看出,无论是在粗加工还是在精加工的过程中,零件都要进行多次装夹,由于零件尺寸较大,刚度较低,在每次装夹中的找正过程要耗费大量的机床等待时间。在精加工的过程中,由于多次装夹而产生基准转换误差较大,必须对各个半精加工后的外形进行测量,由于测量和加工分离,需要大量的加工现场和测量现场的周转时间,大大降低了加工效率。在实际的加工中,按照该流程加工单个零件的加工周期为 15 天。

1.2.2 多槽面精铣内形折刀

多槽面内形采用 $\phi 30R3$ 刀具精加工腹板和轮廓,在四周轮廓留 1mm 余量,再用 $\phi 16R3$ 刀具精加工轮廓。由于刀具较长,折刀现象频繁出现,加工效率也随之下降。而且是精加工,严重影响产品的质量。

一般的加工方法是用大直径刀具精铣腹板后,用小直径刀具精加工内形侧面和转角。此项零件优化前采用传统的加工方法,用 $\phi 30R3$ 刀具精加工腹板,侧面留 1mm 余量,再用 $\phi 16R3$ 铣刀精加工内形侧面。切深为 22mm,切宽为 1mm,转角处最大切宽为 4.3mm。根据文献 [8],为保证刀具具有足够的刚度,刀具的直径大小与被加工特征的深度要满足一定的关系,经验式为 $R < 0.2H$,在该零件转角加工的过程中,该条件显然不满足,同时这种加工方法切削余量大,容易出现折刀问题。

1.2.3 加工基准平面效率低

该锻件在零件两侧余量非常大,金属去除率达到整体去除率的 40% 以上。在加工这两个平面时,采用机夹面铣刀加工。受刀具最大切深的限制,要采用分层加工的方法,在加工第 1 层时,由于锻件余量不均匀,经常出现刀体“研刀”和刀齿断裂的问题。

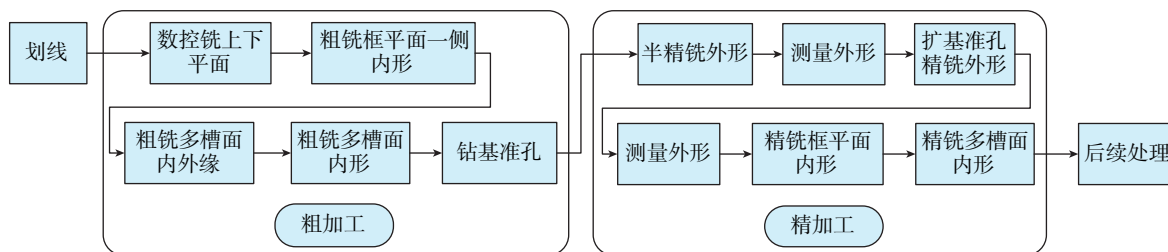


图2 优化前的工艺流程

Fig.2 Process flow before optimization

2 加工工艺优化关键技术

通过生产跟踪及现场试加工,对此零件在生产中出现的问题进行梳理,针对以上出现的问题,在技术上采取措施,提高生产效率。最终该零件的单件生产周期缩减到了10天,而且解决了加工转角和基准平面过程中频繁出现的折刀和刀齿断裂问题。

2.1 优化工艺流程

优化后的工艺流程如图3所示。

此零件的结构特点为单面槽腔,剖面结构为“U”形。加工时零件存在微小变形,加工内外形最好在一次装夹下完成。这样有利于保证产品质量。而且此零件在固定机床上加工,加工程序已经固化,可以将测量外形工序后移到数控加工结束,这样可以减少周转和机床等待时间。优化后的零件加工周期仅为10天。

2.2 插铣转角

为了解决在加工转角过程中出现的频繁折刀的问题,试验了插铣转角的加工方法。用 $\phi 30R3$ 刀具精加工腹板,侧面仍留1mm余量,再用 $\phi 16R3$ 铣刀插铣转角。

插铣转角有多种编程方式。在优化此零件转角程序时尝试了两种方法。第一种应用钻孔命令,零件侧面不留余量,转角处直接插铣到位。应用这种方式编程,不需要做辅助线,编程工作量相对较少。但是在试切后发现插铣转角处由于刀具的旋转方向和切削方向相同,零件转角处出现不同程度的切伤,转角处缘条和筋条有大约0.2mm的接刀痕。零件数控加工后非常不美观,零件转角处尺寸接近下偏差。这既影响零件质量,又增大钳工后续打磨的工作量。此方法编程方式如图4所示。

应用 Profile Contouring 命令,可实现插铣转角的目的。选择零件轮廓,通过设定与轮廓的偏置和与检查面的偏置,实现去除转角余量,解决转角切伤问题。然后对刀具轨迹进行编辑,达到钻孔的效果。应用这种方式编程,虽然不用做辅助元素,但是需要对刀具路径进行修改,编程的工作量非常大。但是应用这种编程方式处

理转角后,经过试加工,零件在转角处基本看不到接刀痕迹,转角处表面光洁度较高,零件尺寸接近理论值,基本不需钳工接平就能满足图纸要求。编程方式如图5所示,刀具路径修改如图6所示。通过处理转角后,再进行内形精加工,切削量均匀,都是1mm,在转角处不需减速处理,通过首件试加工试验,结果表明切削速度快,同时大幅减弱了刀具振动,表面粗糙度得到了提高,而且避免了加工转角过程中的多次折刀问题。切削效果非常好。在精加工内形时,切削非常轻快,而在未作转角处理前,切削时产生较大振动,表面粗糙度很差,而且多次出现折刀。

2.3 内形的处理

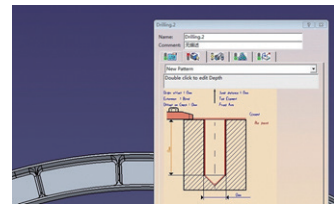


图4 钻孔命令的插铣转角编程方式

Fig.4 Plunge angle programming of drill commands

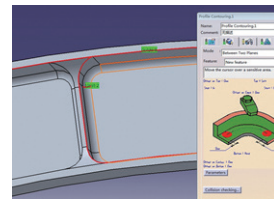


图5 轮廓命令的插铣转角编程方式

Fig.5 Outlines command how to insert milling angle programming

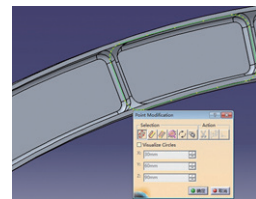


图6 刀具路径修改

Fig.6 Modification of the tool path

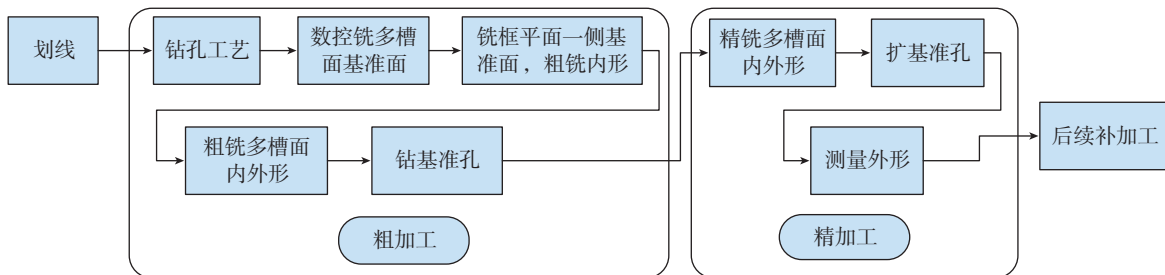


图3 优化后的工艺流程

Fig.3 Optimized process flow

该零件在优化前内形的精加工采用传统的加工方法,通过对国内及国外一些制造业的了解,在精加工时 a_e 一般在 $0.25 \sim 0.5\text{mm}$ 之间,而该零件实际的精加工中 a_e 在 1mm 左右,而且习惯于加工一遍之后,为保证零件尺寸需要进行“光一遍”加工。这种加工过程中的多次走刀大幅降低了加工效率,因而要对其进行优化改进。优化后,在使用 $\phi 30R3$ 刀具精铣腹板的同时对侧面也进行精铣,为 $\phi 16R3$ 刀具的精加工留 0.3mm 余量。这样在使用 $\phi 16R3$ 刀具精加工侧面时,尺寸一次加工合格,无须再进行不必要的“光一遍”加工。

2.4 切削参数优化

刀具是钛合金加工中最重要的因素之一,直接影响着加工效率、制造成本和产品的加工精度。在加工钛合金的过程中,一般采用红硬性好、导热性好、抗弯强度高,对钛合金亲和力差的刀具材料。因而,钛合金加工的刀具材料一般为YG类硬质合金。其他较为理想的刀具材料为金刚石和立方氮化硼,另外,涂层刀具以其在加工钛合金时所具有的高性价比而被广泛接受。

该零件整个加工过程主要采用铣削加工完成,铣削加工中使用的工艺参数为^[3]: V_c 为铣削速度(m/min); D_c 为铣刀直径(mm); N 为铣刀转速(r/min); F_z 为每齿进给量(mm/z); V_f 为进给速度(mm/min); Z 为铣刀齿数; A_e 为切削宽度(mm); A_p 为切削深度(mm)。这些参数中相互关系为: $V_f = F_z \times N \times Z$ 。通过查阅相关文献并结合实际加工得到的切削优化后的参数见表1。

2.5 基准平面的优化加工

由于在加工基准平面时加工余量不均匀产生刀体“研刀”和刀齿断裂问题,在优化加工时结合毛料数模,将可能产生撞刀的进刀位置逐一调整,并仔细检查安全平面,保证进刀高度不会撞到毛坯表面。其次将加工基准平面的刀具改为玉米铣刀,这样增大了刀具的最大切深,大大提高了零件的加工效率。

表1 优化后的切削参数
Table 1 Optimized cutting parameters

加工部位	刀具规格	转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	切深 a_p/mm	切宽 a_e/mm	每齿进给量 f_z/mm	进给速度 $V_f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
粗铣外形	$\phi 40R3$	300	25	5	0.1	180
精铣腹板	$\phi 30R3$	320	20	3	0.1	200
精铣缘条	$\phi 16R3$	1200	30	1	0.05	400
精铣R10	$\phi 25R10$	600	8	5	0.08	200

3 结论

在本零件的加工工艺优化工作中,采用玉米铣刀进行粗加工,提高了刀具的最大切深,有效防止了采用盘铣刀出现的刀齿断裂问题,而且提高了加工效率;采用插铣处理进行转角处理,使精加工内形时的加工余量均匀,得到较好的加工质量;加工多槽内形时,预留较小的加工余量,单次走刀即可满足要求。这些工艺优化均大幅提高了加工效率,具有较高的实际应用价值。

参考文献

- [1] 赵炳桢. 切削技术的进步与制造业的发展[J]. 航空制造技术, 2004, 47(8): 38-41.
ZHAO Bingzhen. Cutting advances in technology and manufacturing development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(8): 38-41.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 第2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
The China Aviation Materials Handbook Editorial Board. China aviation materials handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Standard Press, 2002.
- [3] 陈日曜. 金属切削原理(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
CHEN Riyao. Metal cutting theory[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [4] 孙明杰. 多种钛合金铣削加工工艺研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
SUN Mingjie. A variety of study on milling machining of titanium alloys[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [5] 李富长, 宋祖铭, 杨典军. 钛合金加工工艺技术研究[J]. 新技术新工艺, 2010(5): 66-69.
LI Fuchang, SONG Zuming, YANG Dianjun. Study on the processing technology of titanium alloys[J]. New Technology and New Process, 2010(5): 66-69.
- [6] MACHAI C, BIERMANN D. Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: cooling with carbon dioxide snow[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(6): 1175-1183.
- [7] SINGH R, KHAMBA J S. Ultrasonic machining of titanium and its alloys: A review[J]. Journal of Materials Processing Technology 2006, 173: 125-135.
- [8] 王国彪, 刘中. 钛合金壳体件数控加工工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2012(2): 34, 43.
WANG Guobiao, LIU Zhong. Study on NC machining process of titanium alloy shell [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2012(2): 34, 43.

通讯作者: 于鑫, 工程师, 研究方向为航空机械, E-mail: 61082980@qq.com.
(责编 大漠)