

# 复杂型面钛合金薄壁盘环数控加工工艺研究

伍燕 韩冬 任长洁 杨雄伟

(西安航天动力机械厂, 西安 710025)



**摘要:** 通过设计、使用简易工装, 优化走刀路径, 选择标准刀具, 编制系列数控程序, 完成了复杂型面 TC11 钛合金盘类薄壁件小批量加工。实测加工工件的尺寸公差及形位公差一致性及互换性好, 满足设计需求。

**关键词:** 复杂型面; 钛合金; 薄壁数控加工

## NC Process Research of Complex Surface Titanium Alloy Thin-wall Disc Ring

Wu Yan Han Dong Ren Changjie Yang Xiongwei

(Xi'an Aerospace Power Machine Factory, Xi'an 710025)

**Abstract:** Small batch machining of complex surface TC11 titanium alloy disc thin-wall pieces were accomplished through using NC technique, designing and applying simple tooling, optimizing tool path, selecting standard tooling and programming series of NC programs. Coherence and interchangeability of dimension and geometric tolerance of real measured workpiece can meet the designing requirement.

**Key words:** complex surface; titanium alloy; thin-wall NC machining

### 1 引言

数控加工技术越来越多地应用于各类复杂内外型面、薄壁工件、高精度加工以及超难加工的材料领域, 尤其是在航空航天制造工业上的应用非常广泛。而对于不同零件选取不同加工工艺方法和工艺路线是完成数控加工的关键, 数控加工首先应该考虑可实现性, 在保证制造精度的前提下, 通过优化工艺实现加工的低成本和高效率。

随着数控加工技术的发展, 具有各种优越性能的钛合金在航空制造领域的应用空间在不断扩展, 而钛合金加工的最大难度就是控制加工变形, 对于薄壁部位控制失稳保持加工精度是关键加工技术。钛合金复杂型面薄壁加工通过控制变形热, 增加加工零件刚度

等方面采取一系列有效的办法, 最终实现高精度成型的批量生产。

### 2 零件特点及加工要求

该产品是用于航天某飞行器主要工件之一, 材料为 TC11 钛合金, 见图 1。零件外端部位为薄壁筋板, 最小加工壁厚 1.70mm。属于典型的复杂型面薄壁盘结构件, 加工过程中产品的精度较难保证, 极易产生尺寸超差和变形等引起的形位精度, 满足不了设计需要。

该类零件的加工一般采用数控车削和数控铣削结合的方式进行复合加工, 为此要对工件的工装夹具、刀具选用、切削几何参数、程序的编制等方面进

作者简介: 伍燕 (1976-), 工程师, 机械制造及自动化专业; 研究方向: 固体火箭金属件数控编程及工艺。

收稿日期: 2010-12-05

行模拟试验,有效地减少薄壁零件加工过程中出现的变形等质量问题,保证产品的加工精度。从 TC11 钛合金的加工特点以及该工件的内型面复杂架构考虑,影响其加工精度的因素有很多,归纳起来主要有以下三个方面: 受力变形: 由于其筋槽多处为壁薄结构,如果夹紧力或者夹具位置选择不当都很容易产生变

形,从而影响工件的尺寸精度和形状精度; 受热变形: 钛合金导热性差,局部切削热得不到及时散发会引起工件热变形而导致工件尺寸失控; 振动变形: 在切削力(特别是径向切削力)的作用下,很容易产生失稳振动,影响工件的尺寸精度、形位精度和表面粗糙度。

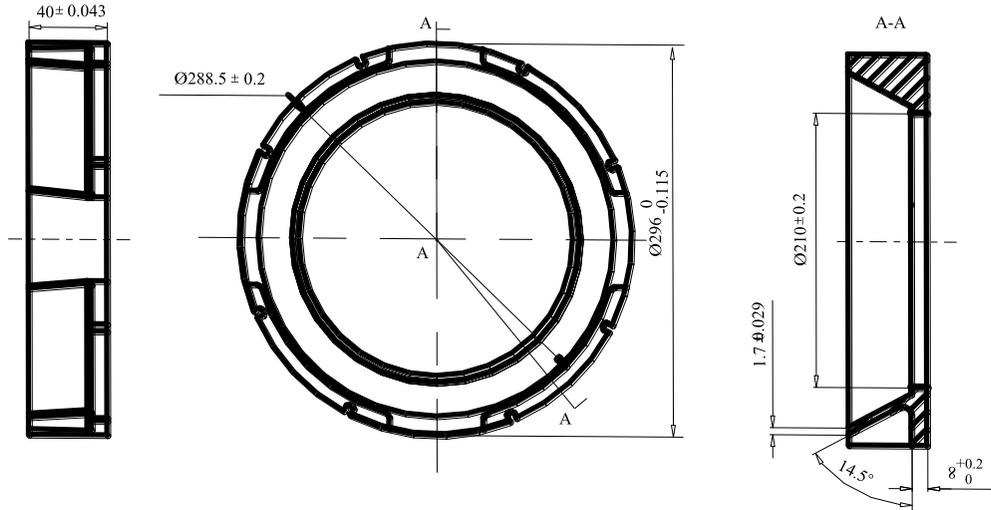


图1 零件示意图

### 3 工艺方案设计及工艺参数选择优化

#### 3.1 铣削工艺方案及参数选择原则

切削工艺主要用于内外圆的加工以及回旋型腔体槽的加工。在 CAM 软件中与切削相关的参数主要有主轴转速、进给速率、刀具切入时的进给速率、行距宽度和切削深度等。

切削加工参数的选择原则是: 粗加工时,以提高生产率为主,考虑经济性和加工成本; 半精加工时和精加工时,应在保证零件加工精度、表面粗糙度和加工质量的前提下,兼顾切削效率、生产经济性和加工成本,尽可能发挥刀具和机床切削效用。

切削工艺参数主要由以下三个公式计算获得;  $S=1000Vc/\pi d$ , 式中  $d$  为刀具直径, mm;  $Vc$  为切削速度, m/min。  $F=Szf$ , 式中  $S$  为主轴转速, r/min;  $z$  为铣刀齿数;  $f$  为每齿进给量 (mm/齿)。  $L=(0.6-0.9)d$ , 式中  $L$  为吃刀量,吃刀量  $L$  一般与刀具直径  $d$  成正比,与切削深度成反比。

在实际加工过程,可以通过倾听刀具声音,目测刀具与零件材料切削状态等,适时调整工艺,根据具体情况将  $\Phi 12/R6$ 、 $\Phi 10/R5$  和  $\Phi 6/R3$  三把刀的精密切

削参数分别调整为  $S400$ 、 $F800$ 、 $L1.5$ ;  $S500$ 、 $F700$ 、 $L0.5$ ;  $S700$ 、 $F500$ 、 $L0.5$ 。

加工方式可分为顺铣和逆铣两种。考虑到相对运动面的摩擦系数、传动部件间隙、运动惯量以及阻尼比的关系,可以采用顺铣的加工方式利于提高工效。试验证明,采用顺铣工艺较逆铣刀具寿命要提高 1 倍多。

#### 3.2 标准刀具选择及切削量

钛合金材料属于典型的“难加工”材料,切削过程中产生的较大的热量,如果不及时散去,就会造成切削刀具磨损比较严重,最终将会导致产品加工精度的降低。对于该零件刀具的磨损包括以下两种形态: 由于机械作用而出现的磨损,如崩刃或磨粒磨损; 由于热及化学作用而出现的磨损,如粘结、扩散、腐蚀、切削刃钝化、热疲劳、热龟裂等。

因此,根据工件的材料及加工特点,制定出选择刀具的原则: 安装调整方便,具有较高的刚性和精度。刀具材料要求抗振好、热变形小,能减少切削变形。为此我们将含钨涂层刀具作为首选刀具。为了降低加工过程的切削热,粗车时选用较大的切削量。精车时为了减少变形以小进刀量为主。

## 4 外型面数控加工工艺实现

### 4.1 数控加工设计及加工程序

把工艺流程分为普通车削和数控车、铣结合完成。 $\Phi 296$  尺寸通过线切割完成,圆周的键槽采用费用相对较低的数控铣 XK5032 加工完成,而  $14.5^\circ$  面、左右耳部及清根处使用五坐标六连动的数控加工中心加工完成。加工中心加工时由于工序集中的原因,对零件进行定位、夹紧等问题要全面考虑,特别是当产品批量较大、加工精度要求高时应设计专用夹具,零件精度相对较低时考虑能否多工件同时进行加工。完成多零件的大部分加工,通过一次装夹实现对加工工艺的综合应用,减少工件的安装次数,有效缩短搬运和装夹的辅助时间。

### 4.2 五坐标六连动数控加工中心机床

此设备是德国 BoKo 公司进口五坐标六连动数控加工中心 (VH2/10),机床特点是:加工范围广 ( $1500\text{mm} \times 1500\text{mm} \times 975\text{mm}$ ),精度高 ( $0.001\text{mm}$ ),可集铣、镗、钻等多种功能于一体,可实现一次装夹完成多工序加工操作。 $X/Y/Z$  行程分别为  $1800\text{mm}/1000\text{mm}/600\text{mm}$ , $A、C$  轴摆角范围分别为  $-90^\circ \sim 45^\circ; \pm 360^\circ$ 。

### 4.3 工装设计

加工中心连接工装定位及工作原理:

为实现装夹一次完成工件外斜面、平面、两侧加强筋及倒角处的加工。选择了 VH2/10 镗铣加工中心 (主轴的立卧转换)。但由于该设备主轴卧轴后,主轴距工作台面的安全距离至少为  $150\text{mm}$ 。所以用  $160\text{mm}$  高圆台工装 (如图 2) 垫起工件。

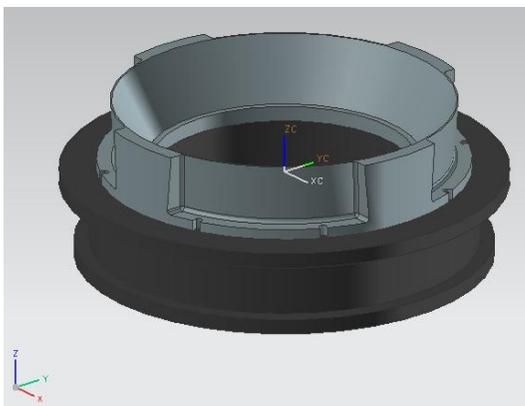


图 2 工装图

圆台工装圆心与设备台面回转中心保持同心,只需首件找正。提高效率,节约工期。利用机床台面中心槽装拉杆,利用工件四个象限处的加厚处再加十字形盖板,直接用螺帽紧固在拉杆上,装夹方便快捷。

### 4.4 数控编程

首先使用 UG NX5.0 进行三维实体建模,因为 UG NX5.0 支持传统的显示几何建模及基于约束的草绘和参数化特征建模,所有工具无缝地集合在单一的建模环境内。本课题首先构建完全约束的草图,并结合参数化特征建模通过旋转拉伸等完成零件的 CAD 部分。

建模完成后,进行 CAM 部分还是选用 UG,首先确定工作坐标系在工件回转中心上,接着按 Part 几何体、Cut Area、检查几何体逐一选定。在创建副节点组时 CREATE TOOL 对话框中刀具选择  $\Phi 10$  球头刀。创建加工方法选择固定轴曲面轮廓铣,其默认的驱动方法为 Area Milling,切削方法为 Zig-Zag,经过反复选择加工工艺参数和修改、优化走刀路径,最后创建了标准 G 代码程序。

用  $\Phi 20$  立铣刀去大量,均匀去量,采用顺铣,释放应力后,使用整体硬质合金立铣刀  $\Phi 10/R5$  和  $\Phi 6/R3$  球头刀进行精加工,采用逆铣,见图 3。

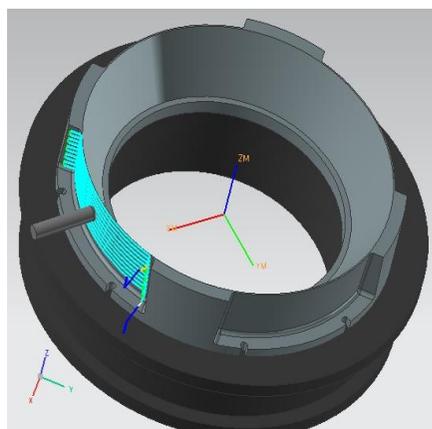


图 3 数控加工模型

### 4.5 检测结果分析

实际加工出来的工件共八件,经检验实测,尺寸均合格,且一致性较好。 $R3$  不规则是刀具让刀引起的,安排在钳工序做抛磨清理即可。主要尺寸见表 1。

表1 工件主要加工尺寸检验结果

mm

零件号	设计值	$\Phi 296_{-0.115}^0$	$14.5^\circ$	$1.7 \pm 0.029$	$8_0^{+0.20}$	质量评价
1	实测值	$\Phi 295.990$	$14.5^\circ$	1.71	8.10	合格
2		$\Phi 295.980$	$14.5^\circ$	1.72	8.12	合格
3		$\Phi 295.980$	$14.5^\circ$	1.71	8.15	合格
4		$\Phi 295.940$	$14.5^\circ$	1.71	8.14	合格
5		$\Phi 295.950$	$14.5^\circ$	1.70	8.14	合格
6		$\Phi 295.950$	$14.5^\circ$	1.71	8.12	合格

从加工后检测结果分析,钛合金零件主要尺寸精度符合设计要求,加工效率较高,满足使用需要,薄壁部位采用顺铣逆铣相结合的方式尺寸精度均可控制在设计精度之内。

### 5 结束语

数控加工复杂型面钛合金盘环,采用车铣结合方式,铣削采用顺铣逆铣相结合。通过制定合理加工工艺手段,优化工艺流程,尤其在薄壁内型面控制颤刀,提高加工工件的刚度等工艺过程,采取有效的控制办法,最终可实现该零件的高效和高精度的小批量生

~~~~~

(上接第28页)

### 3.3 平面熔覆影响基板变形的因素

激光平面熔覆基板的变形严重影响产品的精度,大多数学者在减小基板变形的研究方面主要通过优化工艺参数<sup>[6]</sup>。本文通过实验观察,发现基板的变形不仅受熔覆工艺参数的影响,还与扫描路径和搭接率有关。

在进行激光平面熔覆时,采用短路径进行熔覆,基板变形量显著减小。同时,基板的变形量随搭接率的增加而增加。

### 4 结束语

a. 激光平面熔覆基板变形不仅受熔覆工艺参数的影响,还与扫描路径和搭接率有关。

b. 激光平面熔覆基板产生较小变形的扫描路径为短路径扫描。在本文给定的实验条件下,采用短路径扫描基板的变形减小了40.8%。

c. 激光平面熔覆无论是采用长路径还是短路径,

产,优质地完成了科研生产任务。这种方法在同类型工件及材料方面积累了一定的技术经验可供参考。

### 参考文献

- 1 于骏一. 典型零件制造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 2 严烈. 最新Mastercam 8模具设计教程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- 3 贾沛泰, 等. 国内外常用金属材料手册[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1999
- 4 陈为, 等. 数控铣床及加工中心编程与操作[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- 5 (美) Unigraphics Solutions Inc 著. UG 高级铣加工应用培训教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002

基板变形均随搭接率的提高而增加,且二者的变化规律相同。

d. 当搭接率小于等于1/3时,基板变形随搭接率的增加变化比较平缓;当搭接率大于1/3时,基板变形随搭接率的增加迅速增加。

### 参考文献

- 1 Li Baoling, Wen Zongxin, et al. An experimental study of laser cladding technology applied for axle surface repair. Applied Laser, 2007, 27(4): 290~294
- 2 Liu Jichang, Li Lijun. In-time motion adjustment in laser cladding manufacturing process for improving dimensional accuracy and surface finish of the formed. Optics and Laser Technology, 2004, 36(6): 477~483
- 3 周笑薇, 王小珍. 激光加工技术——激光熔覆. 现代物理知识, 2005, 17(4): 45~48
- 4 高士友, 威士玉. 激光直接沉积过程中基板变形分析. 塑性工程学报, 2007, 14(5): 57~61
- 5 Nickle A H. Analysis of thermal stresses in shape deposition manufacturing of metal parts. Ph.D. Thesis, Stanford University at Stanford, 1999: 50~67
- 6 Guo Yongli, Liang Gongying, Li Lu. Laser cladding reparation of aluminum alloy. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(2): 402~403

