

# 薄壁弱刚性钛合金结构件制造工艺

陈宏亮,赵柳敬,苏晓,解占平,蔡娜

首都航天机械有限公司

**摘要:** 随着新材料冶金技术的发展与进步,钛合金作为“崛起的第三代金属”已完全替代了铝镁合金和钢构件,成为航天飞行器上应用范围最广的材料之一。从某新研制航天飞行器外部结构件用钛合金材料的特性及切削特点入手,针对薄壁弱刚性钛合金结构件在实际加工过程中遇到的诸多难点,提出了相应的解决办法,并重新设计了零件工装。结果表明,改进措施不仅保证了零件质量,而且提高了零件加工效率,使单件零件的生产周期缩短了近 10h。

**关键词:** 弱刚性结构件;钛合金加工;效率提升

**中图分类号:** TG51;TH161.1;TH162 **文献标志码:** B **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.02.016

## Machining Technology of Weakly Rigid Thin-walled Titanium Structural Member

Chen Hongliang, Zhao Liuqing, Su Xiao, Xie Zhanping, Cai Na

**Abstract:** With the progress of new material metallurgy technology, titanium alloy as the third-generation rising metal has completely replaced the aluminum magnesium alloy and steel members, and become one of the most widely used alloys in aerospace. The characteristics of titanium alloys used by one aircraft are studied, the corresponding solutions are put forward, the new product tooling is designed. The practical applications show that, the measures can ensure product quality and enhance production efficiency, and the single part production cycle time is reduced by about 10 hours.

**Keywords:** weakly rigid structural member; titanium alloy processing; efficiency improvement

## 1 引言

在航天飞行器外部设计过程中,为了提高飞行器的推重比,在满足安全使用的前提下尽可能将零件设计成薄壁结构。由于薄壁零件结构的特殊性,其刚度较低,在机械加工过程中受切削力、切削热以及装夹等因素的影响,极易产生加工变形。此外,由于钛合金导热性较差,切削部位的温升较大,导致刀具磨损加剧,难以保证加工尺寸,加工后零件超差或者废品较多,极大地制约了钛合金薄壁回转件的应用范围和薄壁回转件的优质交付。

由于钛合金薄壁件形状复杂、刚度差,在装夹与切削过程中容易产生变形并影响加工精度,因此,钛合金薄壁件的加工稳定性预测与变形控制是我国航空航天业急需解决的问题。壳体类零件是构成航天飞行器外部支撑结构的典型结构件之一,其结构复杂、工艺难度大、制造风险高且在飞行器结构中数量众多,是影响型号研制进程的关键环节之一。对于钛合金框类零件,由于钛合金数控切削加工中大切削力、高切削温度、小弹性模量以及不均匀的初始残余应力等因素,导致数控加工变形、切削加工困难和表面质量差等技术难题亟待解决,严重影响了最终

产品精度<sup>[1]</sup>。

本文针对大型钛合金回转体零件在数控加工研制过程中存在的工艺过程稳定性差、效率低、质量风险高、难以适应大批量专业化生产的状况,针对以往研制中工艺过程过于复杂、加工资源占用多、零件尺寸一致性差等问题,提出了工艺流程和毛坯结构优化的思路,建立了大型钛合金回转体类零件标准工艺流程。分别从加工设备、工装两方面入手,逐一进行优化改进。通过对大型钛合金零件工艺设计、切削试验、切削技术和加工设备等方面的研究,初步实现了稳定、高效和专业化的工艺流程。经过大量生产验证,证明了技术措施的有效性。

## 2 加工现状

尽管钛合金在加工时切削力不大,但由于材料自身的物理性质,导致实际加工面临巨大的困难,切削热的影响是最重要的因素之一。由于钛合金的导热率只有钢的 1/7、铝的 1/6,大量切削热聚集在刀尖范围内不易散发,造成严重的粘刀现象,使刀具的刃口迅速磨损和崩裂。同时,切削生成的积屑瘤使刀刃磨损加速,进一步缩短了刀具寿命,并破坏了零件的表面完整性<sup>[2,3]</sup>。加工薄壁或环形零件时,该问题加剧。

外壳体属于典型的航天整体锥形壳段,材料牌号为 TC4,毛坯为铸造钛合金,见图 1 和图 2。该零件外形呈回转结构,其主要加工难点及瓶颈工序在车工工序。零件轴向长度为 859mm,大端直径为  $\phi 698$ mm,整体呈锥壳状,壳体壁厚仅为 3mm。由于该零件轴向、径向尺寸较大且壁厚较小,零件整刚性较差,在切削过程中极易产生切削振动,不仅影响切削效率的提高,更对加工精度和表面质量产生了严重影响。在首批次试加工过程中,圆度和壁厚尺寸出现批次性超差。采用现有工艺对大尺寸钛合金薄壁回转件零件进行加工,对刀具、机床和工装等均提出了挑战。

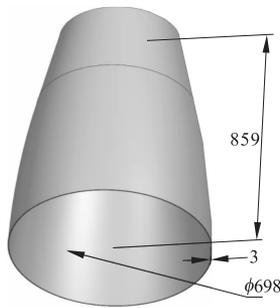


图 1 零件结构

### 3 方案改进

针对上述零件的加工难点,从全流程中的零件原材料、结构及工装等环节在 4 个方面进行改进。

#### 3.1 毛坯结构优化

按照传统车削加工方法,零件毛坯由零件最终尺寸均匀留余量,见图 2。零件毛坯由铸造加工完成,通过粗、精车的方法去除零件余量。但是该方法应用于 TC4 薄壁深腔零件时,会因切削热的堆积和残余应力的释放而导致零件产生不可预见的加工变形或其他影响。

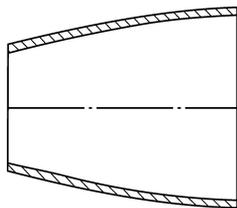


图 2 零件毛坯

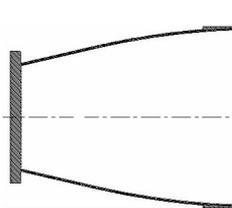


图 3 改进后毛坯结构

该零件毛坯复杂,不同于传统规则筒状。其大端内形为球面,小端内形为锥面,连接部分为圆滑过渡。前后无封闭端框,内形无支撑环筋,整体刚性极差,且无较好的装夹基准,显著增加找正误差。针对该问题,对铸造毛坯结构进行改进(见图 3)<sup>[4]</sup>。在小端面留出余量,进行增厚;外锥靠近大端处留出

约 150mm 直线段,可增加零件刚性,还可提高装夹找正的精度;其余部分内外侧均匀留 2mm 余量,可避免大量去除余量时由残余应力释放导致的零件严重变形。

#### 3.2 机床改造

由于加工钛合金极易产生热量,机床的冷却系统尤为重要。传统的浇注法因流量小、压力低,无法满足加工要求。在螺纹铣削加工中,由于孔深较大,加工时冷却不足且冷却液无法充分流入刀孔中,造成刀尖磨损较快,孔表面粗糙度较差,切屑无法有效排出,零件质量精度较低。高压冷却法能通过瞬时的高压大流量冷却液,提高冷却和润滑效果。但大量切削液带来的挥发和飞溅,不仅是重要的污染源,还会腐蚀机床、污染润滑油,甚至危害健康。相比而言,喷雾冷却技术以其高效节能环保等优点,在近年来得到了迅速发展,尤其适合于加工钛合金等难加工材料<sup>[5]</sup>。

喷雾冷却技术将气液两相流的混合物以压力雾化的方式喷射到切削区,雾化的油液颗粒在切削区的高温作用下发生相变和汽化现象,吸收切削热从而达到冷却效果。此外,喷雾冷却中气液两相流的流速较高,能够将粘附在刀具切削刃上的切屑吹掉;雾化后的流体能更好地吸附在切削区域表面而形成润滑薄膜,起润滑效果。为了更好地应用喷雾冷却技术,在查阅相关文献后,对机床冷却模块进行改造,设计了雾冷装置<sup>[6]</sup>(见图 4)。该装置利用特殊喷嘴将压缩处理后的油水混合切削液以雾状高速喷射到刀尖上,油膜水滴受热后汽化,实现对刀具的降温冷却。

#### 3.3 工装设计

由于钛合金薄壁零件刚性较差,在受到切削力、装夹和内部残余应力的影响后,加工过程中会产生变形。定位精度差、局部压紧力不均会使零件相对理论位置发生变动,造成特征尺寸及形位公差严重超差。据不完全统计,近半数的车削加工误差由装夹不当引起。因此,优化装夹方式对控制薄壁零件变形具有至关重要的作用。

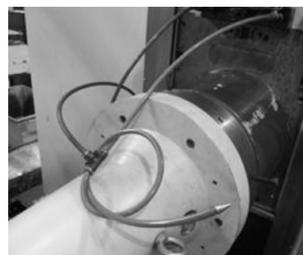


图 4 喷雾装置



图 5 工装实物

针对零件在车削后圆度变形严重的问题,重新设计了组合嵌套式车削工装(见图5和图6)。为了保证零件壁厚,工装结构采用内胀式,即利用内形定位<sup>[7]</sup>。其主体结构采用ZL114A铸铝材料,极大地减轻了整体重量。

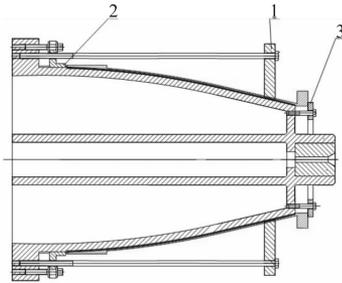


图6 工装结构

在以往锥形薄壁壳段车铣加工时,受结构限制,工装在定位装夹后不易拆卸,极大地增加了零件的加工周期。为了防止该零件出现锥面自锁而导致拆卸过程中的受力变形,利用流体静压平衡原理,在工装锥段沿母线方向设计了宽2mm、深2mm的通槽。四处通槽沿周向呈90°均布,以保证工装内外气压平衡,防止出现真空自锁现象,有效改善装夹压紧力不均的缺点,降低装夹变形带来的风险。同时设计了2号件顶环镶嵌入胎具表面,并通过顶大端台阶将零件卸出。工装具体实施步骤如下:

①拆卸1号件,从小端锥面开始向大端方向车削外形;

②安装1号件,拆卸3号件。车小端锥面,并利用零件自身R500过渡作为接刀处,车削小端面 $R_1$ 。

整个工装设计简单,构思巧妙。加工结果表明,使用该工装可有效保证零件壁厚及外形尺寸精度。

### 3.4 刀具材料及切削参数选择

由于钛合金的化学活性较高,极易在高温环境下形成一定深度的硬化层,粘刀现象严重。传统刀具的车削速度和刀具耐用度较低,加工质量难以控制,加工效率较低,零件表面质量较差。

考虑到钛合金导热性较差,刀具材料选择导热性较好的YG类硬质合金优于YT类硬质合金。由于切削时产生单元切削,刀-屑接触长度短,切削力集中在极小的刃口附近,单位受力大、易崩刀,需选用韧性较好的刀具材料( $\sigma_{bb} > 130\text{kg/mm}^2$ ),以保证刀片刃口锋利,避免热集结和磨损导致刀具失效。同时,考虑到钛与刀具中的元素的亲和性较强,加工钛合金时应尽量选用少钛或无钛元素的材料<sup>[8,9]</sup>。常用的YG类硬质合金刀具材料见表1。

表1 YG类硬质合金刀具材料

牌号	ISO	HRA	$\sigma_{bb}$
YG3X	K01	91.5	110
YG6X	K10	91	140
YG6A	K10	92	140
YG8	K30	89	150
YG8W	K25	92	200
YG643	K05	93	150
YG813	K20	91	160
YG10HT	K30	92	220

加工采用正角型几何形状刀片,能有效降低切削力,减少切削热。同时使用较大的倒角或刀尖圆弧半径切入,能减少单位面积的切削受力和热量产生,提高表面质量和加工效率,减轻崩刃磨损。在车削过程中,刀具要始终保持恒定的小进给速度,避免工件表面硬化和粘刀产生积屑瘤<sup>[10]</sup>。

考虑到粗车和精车的不同加工需求,应优化加工参数。粗车的目的是快速去除大量的钛合金余量,并尽可能地提高刀具的耐用度。当切削速度 $v \leq 35\text{m/min}$ 、切削深度 $a_p \leq 3\text{mm}$ 、进给量 $f \leq 0.3\text{mm/r}$ 时,刀具的耐用度通常可达到70min;精车钛合金薄壁壳体的目的则是保证零件尺寸精度,提高表面质量。当切削速度 $v \leq 140\text{m/min}$ 、切削深度 $a_p \leq 1\text{mm}$ 、进给量 $f \leq 0.15\text{mm/r}$ 时,刀具的耐用度通常可达到30min。采用上述嵌套式工装和喷雾冷却装置,可极大地降低刀-屑间的摩擦系数。经过多次试验,优化后零件的最佳切削参数为:

①粗车。切削速度 $v = 30\text{m/min}$ ,切削深度 $a_p = 2.5\text{mm}$ ,进给量 $f = 0.2\text{mm/r}$ ,刀具耐用度提升至90min;

②精车。切削速度 $v = 110\text{m/min}$ ,切削深度 $a_p = 0.1\text{mm}$ ,进给量 $f = 0.1\text{mm/r}$ ,刀具耐用度提升至40min。

在精车过程中,可形成连续柔软的切屑,有效抑制零件振动,减轻已加工表面的加工硬化和残余应力,使外圆表面粗糙度达 $R_a 0.8\mu\text{m}$ ,解决了钛合金薄壁壳体的车削加工变形问题。

## 4 结语

针对外壳体在实际生产中存在尺寸精度差、加工效率低、一次加工合格率低及劳动强度大的问题,开展了全流程的改善,包括工艺流程优化、机床改造、工装设计、刀具选用及参数优化。加工出的零件壁厚均匀,外形轮廓度及圆度均满足设计要求,实现了零件的高效、高精度生产。

# 基于动力学约束的端面铣削工艺参数优化

冯伟<sup>1,2</sup>, 王建军<sup>1</sup>, 梅雪松<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国一拖集团有限公司; <sup>2</sup>西安交通大学

**摘要:** 工艺参数优化对提高切削过程的加工效率和加工成本具有重要意义。将铣削系统动力学作为主要约束条件,提出端面铣削工艺参数的多目标优化模型。基于铣削系统动力学分析,得到了综合切削稳定性、工件表面粗糙度、主轴转速、切削力、切削功率等约束的工艺参数多目标优化模型。通过调节权重系数实现优化方向的控制,并采用快速粒子群算法对工艺参数进行优化计算。工艺优化实例及试验表明,采用基于动力学约束的工艺参数优化方法可以获得较好的工艺参数优化结果。

**关键词:** 铣削动力学;工艺参数优化;粒子群算法;端面铣削

**中图分类号:** TG501;TH162

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2020.02.017

## Optimization of Face Milling Parameters Based on Constrain of Milling Stability

Feng Wei, Wang Jianjun, Mei Xuesong

**Abstract:** Milling parameters optimization plays a great role in improving machining efficiency and cost. An multi-objective optimization model including cutting stability, workpiece surface roughness, spindle speed, cutting force and cutting power based on milling system dynamic is proposed. The weight coefficients are used to adjust the optimized direction and the adaptive particle swarm optimization is adopted to perform the optimization calculation of milling parameters. Example and experimental results show that the optimization of milling parameters based on the constrain of milling stability can obtain good optimization result.

**Keywords:** milling dynamic; parameters optimization; particle swarm optimization; face milling

## 1 引言

提高生产率和降低加工成本是切削加工行业不断追求的目标,工艺参数优化是实现这一目标的有

效途径。目前的工艺参数优化研究是在已有经验数据的基础上,以加工效率、加工成本和加工质量中的一个或多个为目标建立数学模型,然后通过合适的算法寻优得到一组最佳的工艺参数,主要优化的参数包括切削深度、主轴转速和进给量等切削参数<sup>[1]</sup>。S. Aykut等<sup>[2]</sup>以最小切削力和最大材料去除率作为优化目标,对钴基合金铣削参数进行了优化。

**基金项目:** 2016年工信部智能制造综合标准化与新模式应用项目(2016-213)

**收稿日期:** 2019年8月

实际应用效果表明,本方法不仅能够解决零件加工中面临的诸多难题,而且对类似零件的工艺流程设计具有重要借鉴价值,对新型号研制和批量化生产有较重要的意义。

### 参考文献

- [1] 黄如林,汪群. 金属加工工艺与工装设计[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [2] 张利军,申伟,刘涛. 钛合金薄壁零件加工工艺技术研究[J]. 现代制造工程,2012(11):69-71.
- [3] 崔建民. 航空发动机钛合金薄壁回转件车削工艺研究[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [4] 张峰,李兆前,黄传真. 参数化设计的研究现状及发展趋势[J]. 机械工程师,2002,5(1):13-15.
- [5] 李君. 切削液雾化装置的应用研究[J]. 机床与液压,

2015,43(20):16-17.

- [6] 周雄辉,彭颖红,等. 工装设计制造理论与技术[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000.
  - [7] 孙光华. 工装设计技术基础[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
  - [8] 张佳木,杨玉海,赵权捆,等. 钛合金薄壁件车削加工的研究[J]. 机械设计与制造,2006(1):140-141.
  - [9] 蹇悦. 航天钛合金整体结构件高效加工工艺研究与工程应用[D]. 上海:东华大学,2016.
  - [10] 陈爽,张葆青,闫石. 钛合金加工特性分析及刀具选择[J]. 工具技术,2011,45(4):58-61.
- 第一作者:陈宏亮,工程师,首都航天机械有限公司,100076北京市  
First Author: Chen Hongliang, Engineer, Capital Aerospace Machinery Co., Ltd. Beijing 100076, China