

ZTA15 钛合金薄壁壳体加工工艺试验研究

侯亚娟,董礼,王维暄,张彦明,赵桂庆

首都航天机械有限公司

摘要: 钛合金的难加工性极大地制约了航空航天钛合金薄壁结构件的应用。通过分析钛合金材料特点及切削特性,选取合适的车削刀具提高刀具耐用度,采用设计合理工装改善了工艺系统刚性。利用正交试验法,对干式断续车削工况下 ZTA15 钛合金薄壁壳体的切削参数进行研究,分析了加工过程中切削速度、进给量和背吃刀量对刀具磨损及壳体变形的影响,并得到最优的切削参数。本研究结果为钛合金薄壁壳体的车削工艺优化奠定了基础,对提高钛合金薄壁结构件的制造水平具有重要意义。

关键词: ZTA15 钛合金;薄壁壳体;干式断续车削;刀具磨损;切削参数

中图分类号: TG506.7;TH162

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.09.015

Experimental Study on Processing Technology of ZTA15 Titanium Alloy Thin-walled Shell

Hou Yajuan, Dong Li, Wang Weixuan, Zhang Yanming, Zhao Guiqing

Abstract: The difficult processability greatly restricts the application of thin-walled structural parts of titanium alloy in the aerospace field. The characteristics of material and cutting of titanium alloy are analyzed, and the suitable turning tool is selected to improve the durability. The rigidity of process system is improved by designing reasonable tooling. The orthogonal cutting tests are conducted to study the cutting parameters of ZTA15 titanium alloy thin-walled shell under dry intermittent cutting conditions. The influences of the cutting speed, feed rate and back-feeding on deformation and tool wear are analyzed, the optimal cutting parameters are obtained. The experimental research laid the foundation for the optimization of the turning process of titanium alloy thin-walled shell, which is of great significance for improving the manufacturing level of titanium alloy thin-walled structural parts.

Keywords: ZTA15 titanium alloy; thin-walled shell; dry intermittent cutting conditions; tool wear; cutting parameter

1 引言

钛合金具有比强度高、热强度高、抗断裂性高和抗腐蚀性好等优点,特别是精密铸造件,具有热成型件无可比拟的复杂零件成型优势,因此,ZTA15 钛合金被广泛应用于航空航天、汽车和核工业等领域。薄壁零件具有重量轻、结构紧凑和节约材料等特点,随着航空航天技术的发展,为了提高推重比,在满足安全的前提下,尽可能将零件设计成薄壁结构^[1,2]。

钛合金导热性差,化学活性高,弹性模量低,导致其加工性能差。由于薄壁零件结构的刚度较低,机械加工过程中受切削力、切削热及装夹等因素的影响极易变形,无法保证工件尺寸,极大制约了钛合金薄壁结构件的应用。因此,薄壁钛合金的高效、绿色切削加工成为研究热点^[3,4]。

本文主要从研究 ZTA15 钛合金的材料特点及切削特性入手,结合薄壁壳体结构特点及尺寸要求,对 ZTA15 钛合金薄壁壳体车削工艺进行研究。根据现

有车削工况,选取合理切削刀具;利用正交试验法对加工过程中切削速度、进给量和背吃刀量进行试验研究,分析其对切削力的影响,选出最优的切削参数组合;为提高工艺系统的刚性,设计了合理的装夹工装,得到了合理的车削工艺方案,对提高钛合金薄壁壳体制造技术水平具有重要意义。

2 零件分析

2.1 结构特点

某钛合金薄壁壳体如图 1 所示,车削加工区域为两端与外形面,产品总高度 600 ± 0.1 mm,外圆直径 $\Phi 500 \pm 0.1$ mm,两止口直径 $\Phi 490 \pm 0.1$ mm,深度 10 ± 0.1 mm,两端面平行度 0.1,外形面圆度 0.4,直线度 0.1。该结构为典型的薄壁回转件,壁厚不均匀,整体为 2~4 mm。

如图 2 所示,将壳体分 A、B、C 三区域,A 区域为开口区域,刚性差;B 区域为窗口区域;C 区域为连续区域。

由于壳体结构不规则,导致切削过程中同时存在

断续切削与连续切削,切削工况复杂,切削参数选择难度大;另外,开口区域大,结构刚性差,使切削过程中振动变大,不仅会加剧刀具磨损,而且无法保证尺寸精度。

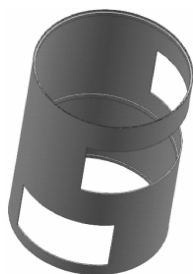


图1 壳体结构

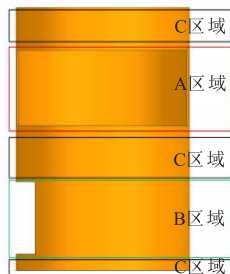


图2 加工区域

2.2 材料特点

壳体材料为 ZTA15 精铸钛合金,化学成分见表 1,主要成分为 Ti, Al, Zr, Mo, V。热处理状态为真空退火,主要力学性能见表 2^[5]。ZTA15 钛合金具有比强度高和热强度高优点,但化学活性大、导热性差和弹性模量小,是典型的难加工材料,其显著特点包括:①变形系数小于 1,在切削过程中零件与刀具前刀面的接触面积大,大幅增加了刀刃磨损速度;②钛合金的导热性差,在加工过程中,切削热聚集在刀尖上,无法通过零件散热,切削温度过高,加剧刀具磨损;③钛合金具有较高的化学活性,特别是在高温下,极易与大气中的氧气、氮气和氢气等发生化学作用,形成硬化层,由于加工过程中产生塑性变形,导致加工面形成一定深度的硬化层,冷硬现象严重,增大加工难度;④钛合金的亲合性高,在较高的切削温度下,刀-屑压力增大,加工钛合金时,切屑及零件与刀具易发生贴合,出现粘刀现象,进而导致刀具发生粘结磨损。

表1 ZTA15 主要化学成分 (%)

合金元素	Al	V	Zr	Mo
含量	5.5~6.8	0.8~2.5	1.5~2.5	0.5~2.0
合金元素	Fe	Si	C	其他总和
含量	≤0.25	≤0.15	≤0.13	≤0.50

表2 ZTA15 主要力学性能

性能	硬度 HBS	抗拉强度 σ_b (MPa)	比例极限强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	延伸率 δ (%)	断面收缩率 (%)
参数	255~341	930~1130	855	10	25

3 车削工艺方案

在车削加工过程中,切削力、夹紧力和切削热等均会引起壳体变形,与此同时,薄壁壳体加工中易产生振动,刀具易发生磨损,会导致零件发生不可预见的变形或影响,因此,若要保证零件的尺寸精度,需综

合考虑以上不利因素,改善切削加工性,制定合理的车削工艺方案。切削力是导致零件变形的主要原因,其来源主要有两个方面:一是切削层金属、切屑和工件表面层金属的弹性变形、塑性变形所产生的抗力;二是刀具与切屑、工件表面间的摩擦阻力。由此可见,切削力主要源于变形和摩擦,影响切削力的主要因素是刀具及切削用量。

在数控立式车床上进行车削加工试验,冷却方式采用空气油雾冷却,毛坯为精铸件,加工余量约 5mm,即在此工况下进行刀具与切削参数的选择。

3.1 车削刀具选择

(1) 刀具材料选择

硬质合金刀具的硬度高,耐磨性和耐热性较好,分为 YT 类和 YG 类两种。由于钛合金中的铁元素与 YT 类硬质合金中的铁元素间会产生亲和力,易发生粘刀现象,加速切削部位温度升高,导致刀具磨损加大或崩刃。因此在切削钛合金零件时,通常选用不含铁元素的 YG 类硬质合金刀具,但硬质合金的缺点是抗弯强度低、冲击韧性差和刀刃刃磨锐利度不够。随着难加工材料的出现,产生了涂层刀具,涂层刀具具有一定的耐磨性和切削性能,又具有良好的强度和韧性,刀具涂层表面摩擦系数小,抗粘结能力较强,可显著提高刀具耐用度和零件加工质量。试验选用硬质合金涂层刀具。

(2) 刀具角度选择

前角对切削力影响最大,直接关系到切削变形与刀具磨损程度。选用大刀具前角,可以减少刀具前刀面与切削面的摩擦,降低切削力,但刀具前角过大会增加切削刃的弯曲应力,易产生崩刃现象。由于钛合金变形系数小,刀具前刀面与切削面接触面积大,为减小刀具磨损,试验选取较大刀具前角;同时,不规则薄壁壳体工艺系统刚性差,宜选取较大前角;但由于钛合金硬度高,刀具前角不易过大,刀具前角应为 5°左右。

刀具后角的主要作用是减少切削过程中刀具后刀面与零件产生的摩擦以及硬化和鳞次等现象。选取较大的刀具后角可以使刀尖更锋利,降低刀具磨损,提高产品加工质量。但刀具后角过大会影响刀具刚度,降低刀具耐用度。根据以上分析,推荐刀具后角为 10°左右。

刃倾角的主要作用是控制切屑流出方向,当刃倾角为“+”时,切屑流向待加工表面;当刃倾角为“-”时,切屑流向已加工表面;选用负的刃倾角可增加刀头强度,提高刀刃抗冲击能力,但负值过大,会增大背

吃刀量,产生强烈的振动。为兼顾刀具锋利度与强度,刃倾角应为 10° 左右。

根据 ZTA15 钛合金的切削特点与切削工况,选择 SUNROXM MCLNL3232P 19 的车削刀具(见图3),刀具几何参数见表3。



图3 车削刀具

表3 刀具主要参数

参数	前角($^\circ$)	后角($^\circ$)	刃倾角($^\circ$)	圆弧半径(mm)
值	5	10	10	0.2

3.2 切削参数研究

在确定壳体材料和刀具参数的前提下,根据金属切削原理,影响切削力 F 的3个主要因素是背吃刀量 a_p 、进给量 f 、切削速度 v ^[6-9]。

(1) 背吃刀量

选取较大的背吃刀量 a_p 可减少刀具进给次数,进而提高切削效率,但切削力会随着背吃刀量的增加而增加,导致产品变形和加工振动。选用原则是在保证产品精度的条件下,尽可能选取较大的背吃刀量。由于钛合金为难加工材料,且试验铸件余量为5mm,因此加工余量较少;其次壳体为薄壁结构,且含多处窗口,因此工艺系统刚性差。综上分析,在合理分配加工余量并保证产品尺寸的基础上,初选背吃刀量为0.3~2mm。

(2) 切削速度

切削速度 v 对切削力的影响最大,直接决定加工过程中产品的切削热和变形量的大小,最终影响产品尺寸精度与刀具寿命。经研究发现,随着切削速度的增加,切屑状态由带状切屑转变成锯齿形切屑,切削力增加;而切削热虽随着切削速度的增加而增加,但切削力先变大后变小,在温度增加到一定程度后,金属出现热软化现象,切削力开始减小^[7]。

切削速度由零件结构、零件材料和刀具材料等切削条件来确定。试验零件材料为 ZTA15 钛合金,切削速度过大会导致刀具直接崩刃或磨损严重,且切削方式为断续干式切削,尺寸精度要求高,因此选用切削速度应小于50m/min。

(3) 进给量

研究表明,切削力随进给量 f 的增加而增加。由于计算合成进给速度的过程比较繁琐,通常凭实践经验或通过试切确定进给速度。粗车时,进给量一般为0.3~0.8mm/r,精车时,进给量一般为0.1~0.3mm/r,进给量选取0.1~0.6mm/r进行试验。

利用正交试验法,对 ZTA15 钛合金薄壁壳体切削参数进行研究,最终得到最优的加工参数组合。根据以上切削参数分析结果,每个因素选定4个水平值,如表4所示。选取 $L_9(4^3)$ 正交表安排试验,设计方案如表5所示。

表4 3因素4水平的正交试验设计

水平	切削速度 v (m/min)	进给量 f (mm/r)	背吃刀量 a_p (mm)
1	50	0.6	2
2	40	0.3	1
3	30	0.2	0.5
4	20	0.1	0.3

表5 L_9 正交试验设计方案

方案	切削速度 v (m/min)	进给量 f (mm/r)	背吃刀量 a_p (mm)
1	50	0.6	2
2	50	0.6	1
3	50	0.3	1
4	40	0.3	1
5	30	0.3	1
6	30	0.3	0.5
7	30	0.2	0.5
8	20	0.1	0.5
9	20	0.1	0.3

切削试验结果见表6。研究表明:①车削端面时,以方案1切削参数加工,零件表面质量和刀具状态均良好;②车削外形时,以方案1~6切削参数加工,零件表面质量和刀具状态逐渐改善;③车削外形开口区域A和连续区域C时,采用方案7~9的切削参数均可达到良好状态;④车削外形圆柱区域B时,以方案7切削时,刀具磨损较严重,以方案8~9切削均能使零件表面质量和刀具达到良好状态。

加工过程中发现,开口区域A虽为断续切削,但刀具因得到充分散热,刀具切削性能良好,最优切削参数组合为:切削速度30m/min,进给量0.2mm/r,背吃刀量0.5mm;连续区域C为连续切削,刀具切削性能良好,最优的切削参数组合为:切削速度30m/min,进给量0.2mm/r,背吃刀量0.5mm;圆柱区域B为含圆孔与方窗口区域,由于切削方式为断续切削,且刀具不能充分散热,刀具切削性能最差,最优切削参数组合为:切削速度20m/min,进给量0.1mm/r,背吃刀量0.5mm。由于背吃刀量对切削力影响最小,因此粗加工时可通过适当增大背吃刀

量而提高切削效率。

表6 切削试验结果

方案	切削速度 v (m/min)	进给量 f (mm/r)	背吃刀量 a_p (mm)	刀片	零件表面质量
1	50	0.6	2	车端面良好 外形 1min 刀片磨损	端面良好 外形粗糙
2	50	0.6	1	外形 5min 刀片磨损	外形粗糙
3	50	0.3	1	外形 10min 刀片磨损	外形粗糙
4	40	0.3	1	外形 30min 刀片磨损	外形粗糙
5	30	0.3	1	外形 2h 刀片磨损	磨损处粗糙
6	30	0.3	0.5	外形 3h 刀片磨损	外形良好
7	30	0.2	0.5	A/C 区域刀片良好 B 区域刀片磨损	A/C 区域良好 B 区域粗糙
8	20	0.1	0.5	B 区域刀片良好	B 区域良好
9	20	0.1	0.3	B 区域刀片良好	B 区域良好

3.3 提高工艺系统刚度

由壳体结构可知,壳体壁厚仅为 2~4mm,开口区域大且不对称,尤其局部无支撑,结构刚性太差,若用传统拉杆与压板的方式装夹,会因加工过程中振动过大而加速刀具磨损,增加产品变形,最终无法保证产品尺寸精度。

为提高工艺系统刚度,设计合理的装夹工装如图 4 所示。利用毛坯余量,给壳体装上“假肢”,解决壳体开口区域大、局部无支撑的问题,增强结构刚性,完成重要结构加工后拆掉该工装,去除未加工部位;利用壳体止口特征,设计整体工装压板,装夹时压在壳体上端,与壳体止口配合,同时保证轴向与径向力均匀,增强整体刚性。在该装夹方式下加工,壳体无振动,产品尺寸均满足设计要求。

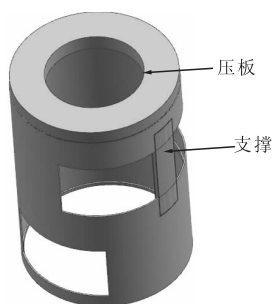


图4 合理的装夹工装

4 结语

薄壁钛合金以其优良的综合性能被广泛应用于

航天航空等各工业领域,但因切削变形大、加工难度大,导致现有钛合金薄壁结构件不能完全满足制造和装配要求,极大地制约了其发展与应用。

本文以 ZTA15 钛合金薄壁壳体为例,进行了车削工艺试验研究,结论如下:切削钛合金材料应选择硬质合金涂层刀具,几何角度范围宜为前角、后角、刃倾角;切削开口区域和连续区域时,最优切削参数组合为:切削速度 30m/min,进给量 0.2mm/r,背吃刀量 0.5mm;切削断续区域时,最优切削参数组合为:切削速度 20m/min,进给量 0.1mm/r,背吃刀量 0.5mm;背吃刀量对切削力影响最小,粗加工时可通过适当提高背吃刀量来提高切削效率。

参考文献

- [1] 吕杨. 航空航天用钛合金的切削加工现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2012(14): 3.
- [2] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属, 2000(5): 218-223.
- [3] Xu J H, Geng G S. Experimental study on the milling of Ti beta 21S[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 190-192.
- [4] 刘鹏, 徐九华, 冯素玲, 等. PCD 刀具高速铣削 TA15 钛合金切削力的研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 224-229.
- [5] 李兴无, 沙爱学, 张旺峰, 等. TA15 合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. 钛工业进展, 2003, 20(5): 90-94.
- [6] 周培培, 李金泉, 张蕊, 等. 车削 TA15 切削力的试验研究与分析[J]. 工具技术, 2016, 50(7): 44-47.
- [7] 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.
- [8] Alauddin M, Mazid M A, El Baradi M A, et al. Cutting forces in the end milling of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 77: 153-159.
- [9] Wang Z G, Rahman M, Wong Y S, et al. A hybrid cutting force model for high-speed milling of titanium alloys[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 71-74.

第一作者: 侯亚娟, 工程师, 首都航天机械有限公司, 100076 北京市

First Author: Hou Yajuan, Engineer, Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China