

# 钛合金型腔圆角高速铣削特征研究

刘三军

厦门金鹭特种合金有限公司

**摘要:** 钛合金型腔圆角加工容易发生切削负载增大和颤振等现象,导致圆角表面质量较差,难以实现钛合金高效加工。通过钛合金型腔圆角铣削试验,基于铣削力和圆角表面质量检测,分析内圆角铣削特征和原理,并优化铣削参数。试验表明:采用小切削宽度的高速加工,可实现钛合金内圆角的高效加工;在  $V_c = 90\text{m}/\text{min}$ ,  $f_t = 0.06\text{mm}/\text{t}$ ,  $a_p = 20\text{mm}$ ,  $a_e = 1\text{mm}$  切削参数组合下,切削力相对较小,加工效率高,切削表面质量高。

**关键词:** 钛合金;内圆角铣削;切削力

**中图分类号:** TG54;TH162

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.03.005

## High Speed Corner Milling of Cavities on Titanium Alloys

Liu Sanjun

**Abstract:** For corner milling in titanium alloy cavity, the cutting load increase and chatter are easy to occur, resulting in poor quality of the corner surface, and it is difficult to achieve high-efficiency processing of the titanium alloy. The milling experiment of titanium alloy cavity is carried out, the milling characteristics and principle of inner corner milling are analyzed, and the milling parameters are optimized based on the test of the milling force and the surface quality. The results show that high performance machining of corner processing titanium alloy can be resolved by the high speed machining with small cutting width, and the cutting force is relatively small, the quality of surface is high in  $V_c = 90\text{m}/\text{min}$ ,  $f_t = 0.06\text{mm}/\text{t}$ ,  $a_p = 20\text{mm}$ ,  $a_e = 1\text{mm}$ .

**Keywords:** Titanium alloy; corner milling; cutting force

## 1 引言

钛合金具有比强度高、热强度高、耐腐蚀、良好的低温性能等一系列优点,是用于制作飞机机身和发动机的主要构件<sup>[1]</sup>。在钛合金整体框架和大型

整体壁板制造过程中,由于加工量较大,亟需解决钛合金整体框架和大型整体壁板的加工效率和加工质量问题。钛合金框、梁等型腔结构件存在大量内圆角,内圆角的加工效率和方法直接影响钛合金结构件切削加工质量<sup>[2,3]</sup>。内圆角加工相对直线加工,刀具切削接触弧长增大,导致切削力急剧变化,刀具易振动,导致加工表面质量差,甚至产生刀具崩刃、折断等情况发生<sup>[4]</sup>。

**基金项目:**“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2018ZX04042-001)

**收稿日期:**2019年9月

[2] 贾成厂,李尚劼. 聚晶金刚石复合片[J]. 金属世界,2016(3):18-23.

[3] 郭世杰. 高速切削镍基合金热力耦合有限元建模及分析[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2013.

[4] 姜芙林. 高速断续加工过程工件及刀具瞬态切削温度的研究[D]. 济南:山东大学,2015.

[5] 张静婕. 涂层刀具切削热传导和切削温度的研究[D]. 济南:山东大学,2017.

[6] 姚炀. PCD 刀具高速车削高强度铝合金切削力仿真[D]. 镇江:江苏大学,2019.

[7] 陈雯柏. 神经网络原理与实践[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2016.

[8] 张均良. 神经网络实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[9] 韩力群,施彦. 神经网络理论及应用[M]. 北京:机

械工业出版社,2016.

[10] 程珉. BP神经网络的算法改进与应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2011.

[11] 陈明. MATLAB神经网络原理与实例精解[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

第一作者:马殿文,硕士研究生,江苏大学机械工程学院,212013 江苏省镇江市

First Author: Ma Dianwen, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

通信作者:沈春根,博士,副研究员,江苏大学机械工程学院,212013 江苏省镇江市

Corresponding Author: Shen Chungen, Doctor, Associate Researcher, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

常规内圆角加工采用降低进给速度的方法,加工效率较低。采用型腔圆角插铣方法可以使用较高的切削速度和进给率,获得高效的圆角粗加工和半精加工,特别是应用在深型腔圆角的高效加工,避免了因刀具悬深长、刚性差,加工易变形而不得不降低切削速度和切削宽度的问题<sup>[5]</sup>。

目前,钛合金型腔圆角加工特征研究多集中于内圆角的加工策略,通过编程优化切削路径等,对钛合金型腔圆角加工的切削力和加工表面质量的研究较少<sup>[6,7]</sup>。为此,本文以 TC4 钛合金的型腔圆角铣削为对象,研究了钛合金内圆角加工切削力和切削参数的变化规律,以及内圆角加工表面质量,进而分析内圆角的铣削特性和原理。

## 2 内圆角铣削力测试

铣削试验采用 TV - 116B 立式加工中心,最高转速为 6000r/min,功率为 18.5kW。试验材料为 TC4 钛合金(Ti6Al4V),化学成分为 Al6%,V4%,Ti 为余量,其力学性能见表 1。将 TC4 材料制成尺寸为 200mm×300mm×60mm 的长方体试件。

表 1 TC4 钛合金力学性能

抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	延伸率 $\delta$ (%)	收缩率 $\Psi$ (%)
$\geq 902$	$\geq 824$	$\geq 10$	$\geq 30$

铣削刀具选用直径  $\Phi 20$ ,圆角半径  $R_3$ ,刃长 40mm,全长 110mm 的 5 齿硬质合金涂层立铣刀,刀具参数见表 2。试验切削参数见表 3。铣削力测量采用 Kistler 9257B 型测力仪,粗糙度测量仪采用 MahrMarsurf PS10。铣削为顺铣,内圆角为  $90^\circ$  直角,试验方案如图 1 所示。

表 2 整体硬质合金刀具参数

规格	齿数	螺旋角( $^\circ$ )	前角( $^\circ$ )	后角( $^\circ$ )	基体牌号	涂层
$\Phi 20R3$	5	40	6	8	K40	AlCrN

表 3 试验切削参数

水平	切削速度 $v_c$ (m/min)	每齿进给量 $f_t$ (mm/t)	切削宽度 $a_c$ (mm)	内圆角半径 $R$ (mm)	切削深度 $a_p$ (mm)
1	60	0.06	0.5	14	20
2	75	0.08	1	16	
3	90	—	1.5	—	

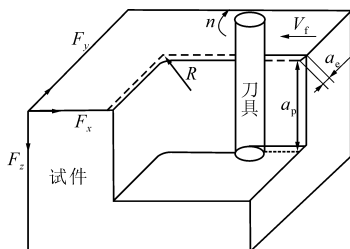


图 1 铣削加工示意

## 3 试验结果与分析

### 3.1 铣削速度与铣削力分析

切削力测试结果见图 2,可知,最大切削力为  $F_y$  ( $y$  向切削力), $F_x$ 、 $F_z$  在同一每齿进给量  $f_t$  时,随切削速度  $V_c$  变化不明显;三向切削力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  随  $f_t$  的增大而明显增大,特别是  $F_x$  和  $F_y$ 。 $F_x$  随  $V_c$  的增大而增大; $F_y$  随  $V_c$  增大,增大量不明显; $F_z$  随  $V_c$  的增大而降低。

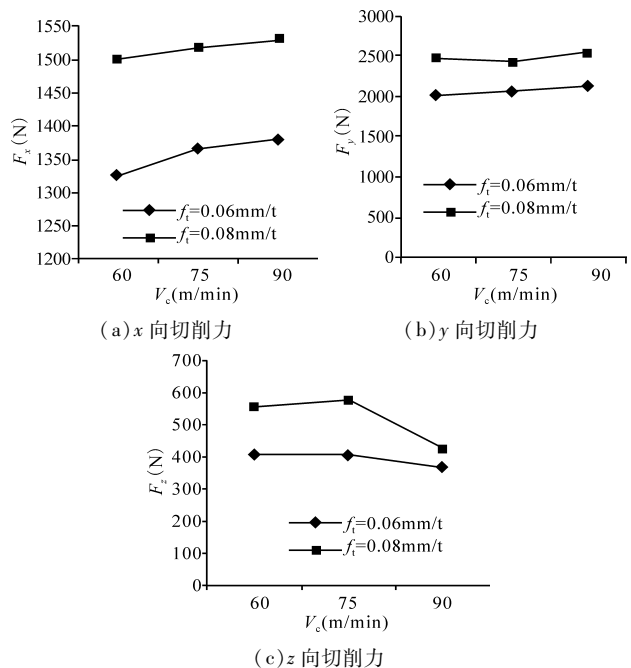
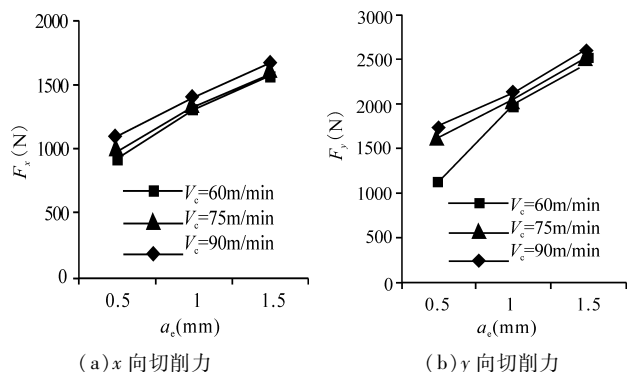
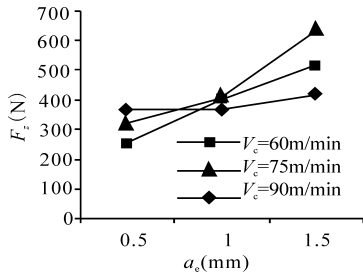


图 2 切削力随切削速度和进给速度的变化趋势 ( $a_p = 20\text{mm}$ ,  $a_e = 1\text{mm}$ ,  $R = 14\text{mm}$ )

### 3.2 铣削宽度与铣削力分析

切削力随不同切削速度和切削宽度变化曲线见图 3。由图可见,三向切削力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  随切削宽度的增大而明显增大,同一切削宽度时, $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$  随切削速度变化不明显。在同一切削速度时, $F_x$  和  $F_y$  随切削宽度的增大而明显增大; $F_z$  随切削宽度变化, $V_c = 90\text{m/min}$  时增大不明显, $V_c = 60\text{m/min}$ ,  $75\text{m/min}$  时增大较明显。



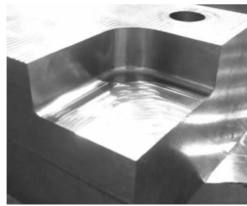


(c) z向切削力

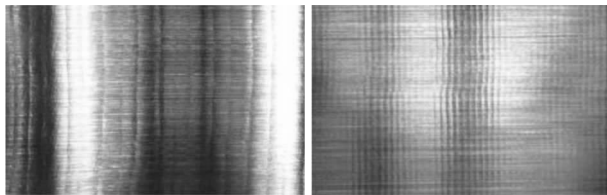
图3 切削力随切削速度和切削宽度的变化趋势  
( $f_t = 0.06\text{mm/t}$ ,  $a_p = 20\text{mm}$ ,  $R = 14\text{mm}$ )

### 3.3 铣削表面质量研究

通过切削力与切削速度、进给量、切削宽度综合分析,采用切削参数  $V_c = 90\text{m/min}$ ,  $f_t = 0.06\text{mm/t}$ ,  $a_p = 20\text{mm}$ ,  $a_c = 1\text{mm}$ ,  $R = 14\text{mm}$ , 铣削后的工件表面形貌见图4,圆弧段和直线段的加工表面分别达到  $R_a 0.489\mu\text{m}$  和  $R_a 0.37\mu\text{m}$ 。直线段由于刀具切削的恒定接触角度<sup>[4,5]</sup>,表面为等距规则刀痕;而圆弧段由于刀具接触角的变化,表面为不等距刀痕。图5为切削表面粗糙度。



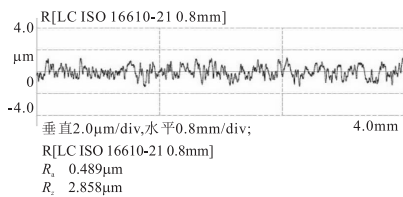
(a) 总体形貌



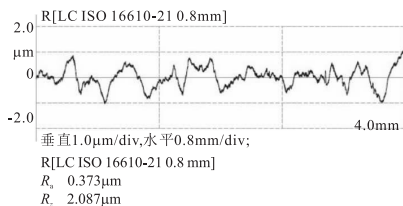
(b) 圆弧表面

(c) 直线表面

图4 工件切削后形貌



(a) 圆弧面粗糙度(竖直方向)



(b) 直线段粗糙度

图5 工件表面粗糙度

### 3.4 试验分析

金属切削过程中,切削力与切削面积成正比。切削刃  $x$  处微元长度  $dx$  上的主切削力微元为<sup>[8]</sup>

$$dF_{ex} = K_c dA_x = K_c h_{DX} dx \quad (1)$$

式中,  $K_c$  为单位切削力;  $A_x$  为切削微元面积;  $h_{DX}$  为切削厚度。

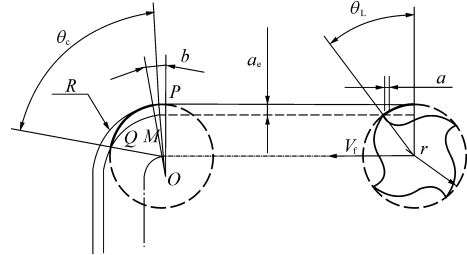


图6 接触角与铣削层

如图6所示,铣削圆角和直线加工过程中,直线段加工过程,刀具接触角  $\theta_L$  恒定,切削负载不变。内圆角加工过程中,刀具接触角增大( $\theta_C > \theta_L$ ),参与切削弧长变长,切削面积和切削负载增大,容易产生振动。

直线段加工时,有

$$\theta_L = \arccos(1 - a_c/r) \quad (2)$$

内圆角加工时,有

$$\theta_C = \arccos[1 - a_c/r - a_c(r - 0.5a_c)/rR] \quad (3)$$

式中,  $a_c$  为切削宽度;  $r$  为刀具半径;  $R$  为铣削圆角半径。

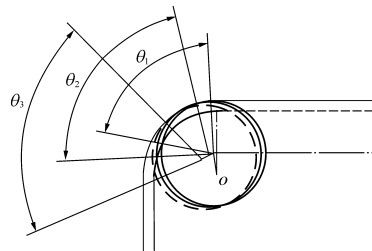


图7 内圆角铣削的接触角

如图7所示,在内圆角加工中,刀具沿中心  $O$  点做圆周运动,刀具接触角不断变化,根据 Wu Qiong 等<sup>[9]</sup>的研究,接触角呈先增大后减小的趋势。

由图6可知,内圆角切削区域为阴影部分。刀具实际沿  $OM$  为半径的圆弧运动,每齿切削转过的弧度为  $b$ ,  $M$  点的速度  $V_f$  与直线速度相同。对应  $I$  处,  $PMQ$  组成的夹角  $\theta_I$  为铣削接触角。

直线段切削时,每齿切削厚度  $a$  为

$$a = f_t = V_f \Delta T$$

内圆角切削时,有

$$V_f = \omega(R - r)$$

圆弧转过的弧度  $b = \omega \Delta T$ , 有

$$b = f_i / (R - r) \quad (4)$$

式中,  $\omega$  为该处角速度。

在 I 处, 有

$$S_1 = b(R - r)r(1 - \cos\theta_1) \quad (5)$$

该处最大切削厚度  $h_D$  为

$$h_D = f_i \sin\theta_1^{[10]}$$

$$h_{DX} = f_i \sin\theta_x$$

式中,  $\theta_x$  为该处的切削厚度。

该处铣削层面积为

$$S = \int_0^{\theta_1} r f_i \sin\theta d\theta \quad (6)$$

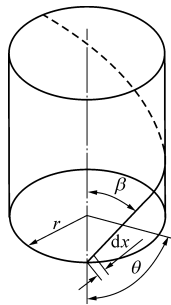


图8 螺旋角  $\beta$  单切削刃

如图8所示, 切削刃是螺旋曲线, 由螺旋线原理有

$$dx = rd\theta / \sin\beta \quad (7)$$

由式(1)和式(7)可知切削力为

$$dF_i = K_c f_i \sin\theta rd\theta / \sin\beta = K_c r (1 / \sin\beta) f_i \sin\theta d\theta$$

$$F_i = K_1 K_c S_1$$

式中,  $K_1$  为常数。

总切削力为

$$F = \sum_1^j F_i = K S_1$$

式中,  $K$  为常数。

由式(3) - 式(5)有

$$S_1 = f_i a_c [1 + (r - 0.5a_c) / R] \quad (8)$$

切削力与  $S$  相关, 影响  $S$  的主要因素有  $f_i$ 、 $a_c$ 、 $R$ 、 $r$ , 且各参数有一定的取值范围, 由式(8)可知其变化规律。

从试验观测得到的切削力随切削速度、切削宽度、进给变化曲线(见图3和图4)和切削表面形貌(见图5)可以看出: 高线速度、小切削宽度和合适的进给切削力相对合理, 可获得较高的加工表面质量。试验观测与理论分析结果一致。

## 4 结语

通过试验研究测试了 TC4 钛合金  $90^\circ$  内圆角在不同切削速度、进给速度、切削宽度、内圆角半径时对切削力和加工质量的影响。由试验可知: 直内圆角切削中, 切削宽度对切削力的影响较大, 采用较小的切削宽度可明显降低切削阻力; 在合适的切削宽度和进给量条件下, 采用高速切削加工是内圆角加工的首选。

## 参考文献

- [1] 赵永庆, 奚正平, 曲恒磊. 我国航空用钛合金材料研究现状[J]. 航空材料学报, 2003(10): 215 - 219.
- [2] 韩世波, 徐冰, 廖善联, 等. 飞机用钛合金结构件高效精密加工技术[J]. 钛工业进展, 2015, 32(3): 35 - 38.
- [3] 高鑫, 李迎光, 张臣, 等. 飞机结构件内型转角一体加工刀轨生成方法[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2660 - 2671.
- [4] H S Choy, K W Chan. Enhanced strategy for milling corners [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2002, 8: 1135 - 1154.
- [5] 秦旭, 冀晓来, 滑松, 等. 钛合金插铣过程刀具切削性能的模糊综合评价[J]. 航空制造技术, 2009(13): 55 - 57.
- [6] Wu Baohai, Yan Xue, Luo Ming, et al. Cutting force prediction for circular end milling process [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(4): 1057 - 1063.
- [7] 杨晓勇. 钛合金铣削刀具磨损及表面完整性研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [8] 周泽华. 金属切削原理(第2版)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993: 214 - 222.
- [9] Wu Qiong, Zhang Yidu, Zhang Hongwei. Corner-milling of thin walled cavities on aeronautical components [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22: 677 - 684.
- [10] 关立文, 赵肖, 王立平. 基于次摆线轨迹的铣削层厚度模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(11): 1185 - 1189.

作者: 刘三军, 工程师, 厦门金鹭特种合金有限公司, 361006 福建省厦门市

Author: Liu Sanjun, Engineer, Xiamen Golden Egret Special Alloy Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361006, China