

侧铣削参数对 TC4 钛合金表面粗糙度及材料去除率的影响

王奔^{1,2}, 赵家兴¹, 张秀云³, 张棋¹, 庄鑫¹

¹沈阳航空航天大学机电工程学院; ²中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司;

³沈阳飞机工业(集团)有限公司

摘要: 侧铣采用铣刀侧刃对工件进行铣削,是一种重要的数控加工方式,常用于直纹面零件。针对 TC4 钛合金的侧铣削加工,开展了主轴转速、进给速度、切削深度、切削宽度的四因素三水平正交试验,分析侧铣削参数对切削力、表面粗糙度及材料去除率的影响。试验结果表明,切削深度和主轴转速对切削力和表面粗糙度的影响较大,进给速度次之,切削宽度最小。切削深度和切削宽度的增大会显著提高材料去除率,在主轴转速为 600r/min,进给速度为 220mm/min,切削深度为 5mm,切削宽度为 0.4mm 时,侧铣 TC4 钛合金的表面粗糙度质量较好且材料去除率较大。

关键词: TC4 钛合金;侧铣削参数;表面粗糙度;材料去除率

中图分类号: TG146.23;TH161;TG506

文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2021.12.002

Effect of Side Milling Parameters on Surface Roughness and Material Removal Rate of TC4 Titanium Alloy

Wang Ben, Zhao Jiaying, Zhang Xiuyun, Zhang Qi, Zhuang Xin

Abstract: Side milling is milling the workpiece with the side edge of the milling tool. It is an important CNC machining method commonly used for ruled surface parts. Based on the side milling TC4 titanium alloy, the orthogonal tests of four factors and three levels including spindle speed, feed speed, cutting depth and cutting width are carried out to analyze the effects of side milling parameters on cutting force, surface roughness and material removal rate. The test results show that the cutting depth and the spindle speed have great effects on the cutting force and surface roughness, the feed speed is the second, and the cutting width has the least effect. The increase of cutting depth and cutting width can significantly improve the material removal rate. When the spindle speed is 600r/min, the feed speed is 220mm/min, the cutting depth is 5mm and the cutting width is 0.4mm, the surface roughness quality of side milling TC4 titanium alloy is better and the material removal rate is higher.

Keywords: TC4 titanium alloy; side milling parameters; surface roughness; material removal rate

1 引言

钛合金材料强度高,具有良好耐热性、耐腐蚀性、耐低温性等特点,在航空、航天、石油、化工、机械、医疗等众多领域得到广泛应用^[1]。但由于钛合金导热系数低、弹性模量小、化学活性大,使得钛合金切削加工性较差,主要表现在切削温度高、变形系数小和单位面积切削力大等方面,在切削刃附近冷硬、粘刀现象和刀具磨损都很严重,因此,钛合金是一种典型的难加工材料^[2]。难加工材料在加工中会出现加工效率低、加工质量难保证等问题,严重阻碍了其在航空航天等领域的应用^[3]。侧铣加工因加工效率高和适用范围广等特点成为工业上常用的金属去除工艺之一,广泛用于槽、模具的生产,在航空航天工业中起着非常重要的作用^[4]。因此,本文

对 TC4 钛合金的侧铣削参数进行了研究,重点研究了侧铣削参数对表面粗糙度和材料去除率的影响。

国内外学者对优化钛合金铣削参数进行了许多研究。孙鹏程等^[5]用正交试验方法分析铣削深度、铣削速度、每齿进给量以及主轴转速对切削力的影响,得出每齿进给量对轴向力影响最大,铣削深度和铣削宽度次之,主轴转速影响最小。杨慎亮等^[6]采用单因素实验法对比分析侧铣削参数对 TC4 钛合金表面粗糙度的影响,指出表面粗糙度随每齿进给量和径向切深的增加而增大。周子同等^[7]对侧铣后的 TB6 钛合金表面完整性进行研究,得出每齿进给量对表面形貌影响最明显,随着每齿进给量增大,表面粗糙度会显著提高。赵永娟等^[8]用单因素试验法分析高速铣削 Ti6Al4V 过程中各切削要素对切削力的影响,得出切削力随切削速度的增加先增大后减小,随每齿进给量和切削深度的增加而增大。鄢国洪等^[9]分析侧铣削参数对 TC4 钛合金表面粗糙度的影响,得出径向切削深度对表面粗糙度的影

基金项目:国家自然科学基金(51875367,51505302);中国博士后科学基金(2020M670790);辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2007011)
收稿日期:2021年5月

响最大,铣削速度的影响最小。

Wang F. 等^[4]研究了高速侧铣削钛合金(Ti-6Al-4V)时切削参数对切削力和表面粗糙度的影响,得出三个方向上的切削力均随着切削速度、每齿进给量、切削深度的增大而增大,表面粗糙度在切削速度为200m/min时最小,随后随切削速度的增大而增大。Yahya Hişman Çelik 等^[10]研究切削参数对Ti-6Al-4V 铣削过程中切削力、表面粗糙度的影响,得出随着进给速度的增加;切削力和表面粗糙度均增加,随着切削速度的增加,切削力和表面粗糙度均减小。

可以看出,国内外学者针对铣削钛合金切削参数对切削力和表面粗糙度的影响做了广泛研究,但对侧铣削参数对材料去除率的影响研究还较少。本文以TC4钛合金作为研究对象,通过正交试验方法分析侧铣削参数对切削力、表面粗糙度和材料去除率的影响,为合理选择侧铣加工TC4钛合金时的铣削参数提供依据。

2 切削试验设计

2.1 试验工件及刀具

本次试验所用工件材料为TC4钛合金,尺寸为200mm×150mm×40mm,化学成分见表1。试验所用刀具信息如表2所示。

表1 TC4钛合金元素成分表

| 元素 | Al | V | Fe | C |
|----------|---------|---------|-------|-------|
| 百分比(wt%) | 5.5~6.8 | 3.5~4.5 | ≤0.30 | ≤0.10 |
| 元素 | H | N | O | Ti |
| 百分比(wt%) | ≤0.015 | ≤0.20 | ≤0.20 | Bal. |

表2 刀具信息表

| 刀具材质 | 螺旋角(°) | 刀具直径(mm) | 刀尖圆弧半径(mm) |
|------|--------|----------|------------|
| 硬质合金 | 30 | 9.8 | 3 |

2.2 试验设备

加工设备选用VMC-850B立式加工中心,侧铣削过程中切削力的测量与记录由KISTLER9257B三向压电陶瓷测力仪完成。选用TR240便携式粗糙度仪测量侧铣加工后的钛合金的表面粗糙度。加工过程使用乳化液冷却。试验中所使用的设备和加工工件见图1。

2.3 试验方案

本次试验采用正交试验法研究侧铣削参数对TC4钛合金铣削力、表面粗糙度和材料去除率的影响。正交试验是一种高效、快速、经济的试验设计方法。根据正交性在全面试验中挑选部分有代表性的点进行试验,显著减少试验工作量。本次侧铣试验选用主轴转速、进给速度、切削深度和切削宽度四要

素进行试验,侧铣正交试验方案见表3。

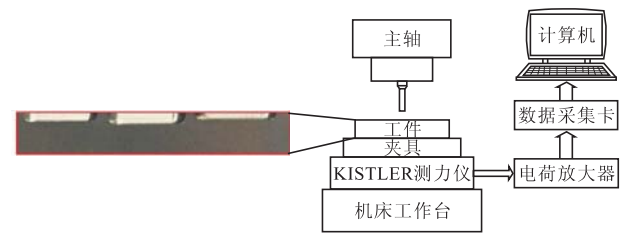


图1 试验设备和加工工件

表3 正交试验方案

| 试验编号 | 主轴转速 S (r/min) | 进给速度 v_f (mm/min) | 切削深度 a_p (mm) | 切削宽度 a_c (mm) |
|------|------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 600 | 120 | 3 | 0.2 |
| 2 | 600 | 170 | 4 | 0.3 |
| 3 | 600 | 220 | 5 | 0.4 |
| 4 | 750 | 120 | 4 | 0.4 |
| 5 | 750 | 170 | 5 | 0.2 |
| 6 | 750 | 220 | 3 | 0.3 |
| 7 | 900 | 120 | 5 | 0.3 |
| 8 | 900 | 170 | 3 | 0.4 |
| 9 | 900 | 220 | 4 | 0.2 |

3 试验结果分析

3.1 切削力

切削力是切削过程中的重要物理量,切削力的大小影响了切削热的产生、刀具的磨损和切屑的形成,决定了切削过程消耗的功率大小和切削加工系统的变形,研究切削力的大小及切削参数对切削力的影响规律有助于分析研究切削过程^[11]。通常我们把切削力分为 F_x 、 F_y 、 F_z 三个方向的力进行衡量。本次试验以TC4钛合金为研究对象进行侧铣削试验,分析侧铣削参数对 F_z (轴向力)的影响。

侧铣削参数对 F_z (轴向力)的正交试验分析计算如表4所示。通过正交试验结果可以计算出相应的极差参数,极差参数的大小能够表明各加工参数对各切削性能影响的主次顺序。 R 值越大表示该列的加工参数对切削性能的影响越明显。

表4 F_z 正交试验分析计算表

| 极差参数 | F_z | | | |
|-------------|------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| | 主轴转速 S (r/min) | 进给速度 v_f (mm/min) | 切削深度 a_p (mm) | 切削宽度 a_c (mm) |
| K_1 | 59.07 | 63.378 | 29.19 | 53.823 |
| K_2 | 85.44 | 73.098 | 91.383 | 74.529 |
| K_3 | 34.716 | 42.75 | 58.653 | 50.871 |
| \bar{K}_1 | 19.69 | 21.126 | 9.73 | 17.941 |
| \bar{K}_2 | 28.48 | 24.366 | 30.461 | 24.843 |
| \bar{K}_3 | 11.572 | 14.25 | 19.551 | 16.957 |
| \bar{R} | 16.908 | 10.116 | 20.731 | 7.886 |
| 优水平 | 3 | 3 | 1 | 3 |

由表4可知,侧铣加工参数对 F_z 的影响由大到

小依次为:切削深度 > 主轴转速 > 进给速度 > 切削宽度。以 F_z 最小为优化目标获得的各工艺参数优化水平为: $S = 900\text{r/min}$, $v_f = 220\text{mm/min}$, $a_p = 3\text{mm}$, $a_c = 0.4\text{mm}$ 。

各加工参数对轴向力的影响趋势如图2所示。可以看到随着主轴转速、进给速度、切削深度、切削宽度的增加,轴向力均先增大后减小,原因是随着切削速度和进给量的增大,切削厚度增大,切削面积变大,所以切削力增大;而当切削深度和进给量继续增大,摩擦系数变小,剪切角增大,变形系数减小,使得切削力减小^[12]。根据试验结果,侧铣削加工时,选择较大的加工参数产生的轴向力较小。

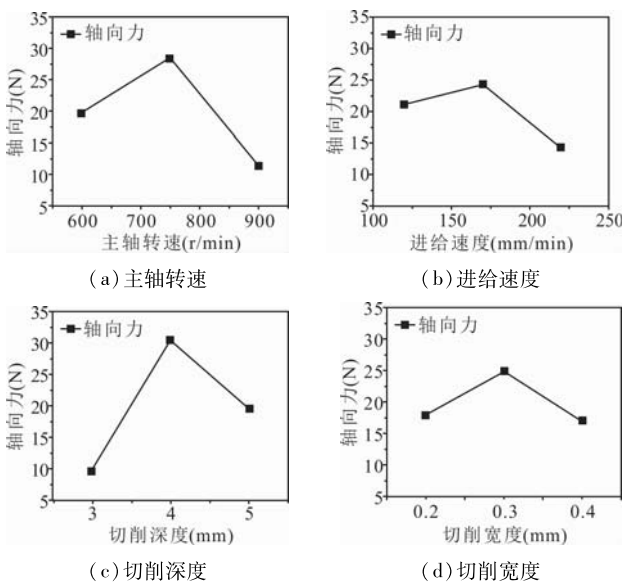


图2 各加工参数对轴向力的影响

3.2 表面粗糙度

表面粗糙度是描述和评价零件表面质量的重要特征,其质量对工件的耐磨性能、抗疲劳性能、抗应力腐蚀性能等具有重要的决定作用^[13]。本次试验对侧铣后的TC4钛合金表面进行了粗糙度的测量,为保证准确性,对每组加工的不同位置进行六次测量后,取平均值作为试验数据。侧铣削加工对表面粗糙度的正交试验分析见表5。

表5 表面粗糙度正交试验分析计算表

| 极差参数 | F_z | | | |
|-------------|------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| | 主轴转速 S (r/min) | 进给速度 v_f (mm/min) | 切削深度 a_p (mm) | 切削宽度 a_c (mm) |
| K_1 | 2.8671 | 5.1099 | 3.9411 | 4.572 |
| K_2 | 4.6791 | 4.3209 | 5.2989 | 4.4949 |
| K_3 | 6.5859 | 4.701 | 4.8921 | 5.0649 |
| \bar{K}_1 | 0.9557 | 1.7033 | 1.3137 | 1.524 |
| \bar{K}_2 | 1.5597 | 1.4403 | 1.7663 | 1.4983 |
| \bar{K}_3 | 2.1953 | 1.567 | 1.6307 | 1.6883 |
| \bar{R} | 1.2397 | 0.2630 | 0.4527 | 0.1900 |
| 优水平 | 1 | 2 | 1 | 2 |

由表5可得,侧铣时各加工参数对表面粗糙度的影响由大到小依次为:主轴转速 > 切削深度 > 进给速度 > 切削宽度。表面粗糙度最小时,选取最优水平参数为: $S = 600\text{r/min}$, $v_f = 170\text{mm/min}$, $a_p = 3\text{mm}$, $a_c = 0.3\text{mm}$ 。

侧铣削参数对表面粗糙度的影响见图3,随着主轴转速增大,表面粗糙度近似正比例增大,这是由于当转速增加到一定值之后,机床和刀具之间的作用力与反作用力增大,使得振动加强,刀具在铣削加工过程中运行不稳定,从而导致表面粗糙度值不断增大^[14]。随着切削深度的增加,表面粗糙度先增大后减小,其原因在于随着切削深度的增加,刀具受力增大、振动加强,所以表面粗糙度值增加^[14]。而后减小是因为随着切削力变小,振动变小,使得表面粗糙度变小。随着切削宽度的增大,表面粗糙度呈增大趋势,其原因在于随着切削宽度的增加,刀具与工件表面接触面积增大,刀具受力增大、振动加强,所以表面粗糙度值增加^[14]。试验结果表明,为保证得到较好的表面粗糙度,应选择较小的主轴转速和切削深度以及较大的进给速度。

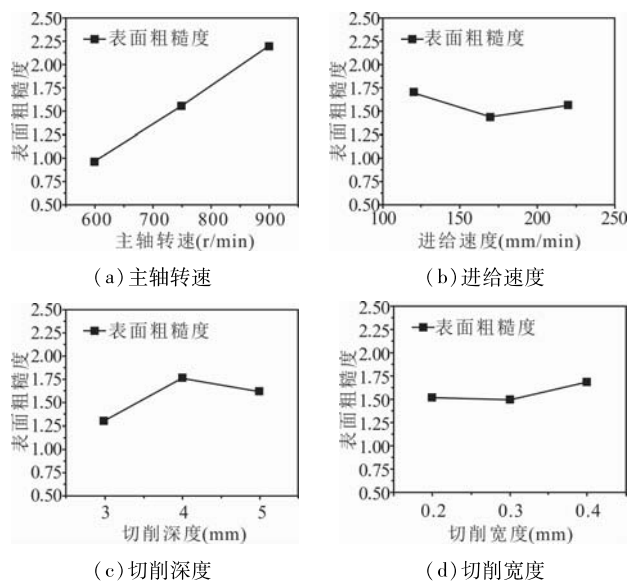


图3 各加工参数对表面粗糙度的影响

3.3 材料去除率

材料去除率是指单位时间内刀具切除金属材料的体积,因此提高材料去除率就是提高加工效率。加工效率的提高往往会降低刀具的耐用度从而降低加工表面精度,选择合适的加工参数可以在提高生产效率的同时获得良好的表面粗糙度。

由图4可得,随着进给速度、切削深度和切削宽度的增大,材料去除率随之增大。原因是进给速度增大,降低了切除材料的单位时间,从而增大了材料

去除率;增大切削深度和切削宽度,增加了单位时间内去除的材料体积,从而增大了材料去除率。因此,为了能有较大的材料去除率,应增加进给速度、切削深度以及切削宽度。通过试验可知,当主轴转速为600r/min,进给速度为220mm/min,切削深度为5mm,切削宽度为0.4mm时,所得到的材料去除率较高且能够保证较好的表面粗糙度。

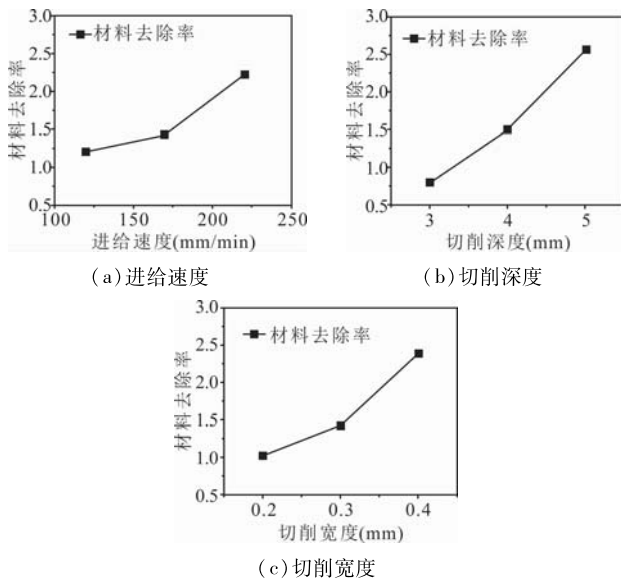


图4 各加工参数对材料去除率的影响

4 结语

以TC4钛合金为试验对象,采用正交试验方法进行侧铣削参数试验研究,得出以下结论:

(1)对正交试验结果进行极差分析得出,侧铣削参数中切削深度和主轴转速对轴向力的影响较大,进给速度次之,切削宽度影响最小。

(2)主轴转速和切削深度对表面粗糙度的影响较大。在不影响加工效率的同时,为保证能有良好的表面粗糙度,应选择较小的主轴转速和切削深度。

(3)进给速度、切削深度、切削宽度对材料去除率的影响趋势近似呈正比,在实际生产中,为保证较好的表面粗糙度和较高的材料去除率,应选择较小的主轴转速,较大的进给速度、切削深度和切削宽度。

参考文献

[1] Chen G, Ren C Z, Yang X Y, et al. Finite element simulation of high speed machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V) based on ductile failure model [J]. The International Journal of

Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56: 1027 - 1038.

- [2] 杨振朝,张定华,姚倡锋,等. 高速铣削速度对TC4钛合金表面完整性影响机理[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5): 644 - 648.
- [3] 向业,许磊,廖鹏飞,等. 航空难加工材料超声振动辅助切削技术现状及发展趋势[J]. 工具技术, 2018, 52(8): 8 - 11.
- [4] Wang F, Zhao J, Li A, et al. Experimental study on cutting forces and surface integrity in high-speed side milling of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. Machining Science & Technology, 2014, 18(3): 448 - 463.
- [5] 孙鹏程,许小雷,张征,等. 钛合金TC4高速铣削参数对铣削力的影响研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(14): 37 - 40.
- [6] 杨慎亮,李勋,王子铭,等. TC4侧铣表面完整性对试件疲劳性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 372 - 380.
- [7] 周子同,陈志同,熊曦耀,等. 钛合金TB6侧铣表面完整性实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(6): 849 - 854.
- [8] 赵永娟,武文革,肖田. 高速铣削加工钛合金Ti6Al4V的切削力和表面粗糙度试验[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(5): 125 - 127.
- [9] 鄢国洪,张华贵,刘浩. 侧铣削参数对TC4钛合金表面粗糙度影响的试验研究[J]. 机械制造, 2011, 49(9): 72 - 75.
- [10] Yahya Hişman Çelik, Ahmet Karabiyik. Effect of cutting parameters on machining surface and cutting tool in milling of Ti-6Al-4V alloy [J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2016, 23: 349 - 356.
- [11] 胡敏敏,张宇,李照山,等. 钛合金TC4铣削力的建模及试验研究[J]. 机械制造, 2016, 54(9): 58 - 61.
- [12] 谭靓,张定华,姚倡锋,等. 刀具几何参数对钛合金铣削力和表面完整性的影响[J]. 中国机械工程, 2015, 26(6): 737 - 742.
- [13] 姚倡锋,武导侠,靳淇超,等. TB6钛合金高速铣削表面粗糙度与表面形貌研究[J]. 航空制造技术, 2012(21): 90 - 93.
- [14] 王晓明,韩江. TC4钛合金高速铣削表面粗糙度研究[J]. 机械设计与制造, 2019(5): 232 - 240.
- 第一作者:王奔,博士,教授,沈阳航空航天大学机电工程学院,110136 沈阳市
- First Author: Wang Ben, Ph. D., Professor, School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China