

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.003

切削参数对 TC11 钛合金曲面铣削性能的影响

蒋志贤, 孙富建

(湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要:利用单因素控制变量法进行 TC11 钛合金曲面铣削实验,研究切削速度、每齿进给量、切削深度和行距 4 个独立因素对曲面铣削的切削力、切削温度、表面质量的影响。试验结果表明:每齿进给量是径向合力的主要影响因素,切削速度影响最小。每齿进给量对切削温度的影响最大,切削深度对切削温度影响最小。表面粗糙度的主要影响因素是行距,采用较小的行距及较大的每齿进给量可获得较低的表面粗糙度值,在切削速度 $V=80\text{ m/min}$,每齿进给量 $f_z=0.04\text{ mm/z}$,切削深度 $a_p=0.25\text{ mm}$,行距 $a_e=0.1\text{ mm}$ 时,铣削的表面质量较好。

关键词:TC11 钛合金;曲面铣削;切削力;切削温度;表面质量

中图分类号:TG506 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0015-04

Influence of Cutting Parameters on Milling Performance of TC11 Titanium Alloy Curved Surfaces

Jiang Zhixian, Sun Fujian

(Mechanical and Electrical Engineering College, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Using the single-factor control variable method, curved surface milling experiments on TC11 titanium alloy were conducted to investigate the effects of four independent factors—cutting speed, feed per tooth, cutting depth, and stepover—on cutting force, cutting temperature, and surface quality during curved surface milling. The experimental results indicate that feed per tooth is the main influencing factor on the resultant radial force, while cutting speed has the least influence. Feed per tooth has the greatest impact on cutting temperature, whereas cutting depth has the smallest influence. The main influencing factor on surface roughness is stepover; a smaller stepover combined with a larger feed per tooth can achieve lower surface roughness. Better surface quality is obtained under the cutting parameters of $V=80\text{ m/min}$, $f_z=0.04\text{ mm/z}$, $a_p=0.25\text{ mm}$, and $a_e=0.1\text{ mm}$.

Keywords: TC11 titanium alloy; curved surface milling; cutting force; cutting temperature; surface quality

0 引言

钛合金因具有低密度、高强度、耐腐蚀等优越性能,被广泛应用于船舶、航空航天、军工等行业。钛合金 TC11 是典型的 $\alpha+\beta$ 相钛合金具有优异的综合力学性能,可在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以下的高温环境中长期工作,常应用于制造航空发动机叶片、叶轮等关键部件^[1]。航空钛合金叶片、叶轮等零部件具有非常典型的曲面,其具有非常高的精度和质量要求,然而,钛合金因具有弹性模量小、低热导率等性能导致其切削加工性能较差,严重影响曲面的铣削加工精度与加工质量^[2]。因此,有必要对钛合金曲面的切削性能开展研究。

目前国内外学者已经对钛合金材料曲面的切削性能进行了研究。Mhamdi 等^[3]研究了切削参

数对 TC4 钛合金凹曲面加工后的表面完整性影响,指出凹曲面的表面粗糙度受切削速度的影响,其值随着进给速度的增加而增大。张海涛等^[4]在 TC4 钛合金曲面铣削仿真和实验中,发现切削速度是影响切削力最重要因素,每齿进给量影响最小。吴泽刚等^[5]探究了工艺参数对 TC11 钛合金整体叶轮表面完整性的影响,得出 4 个工艺参数中行距和每齿进给量对叶片表面粗糙度和表面形貌影响最为明显。解存凡^[6]通过 PCD 刀具对 TC4 钛合金叶片进行铣削加工,叶片的表面粗糙度值随着切削速度增加先减小后增大,当切削速度为 80 m/min 时,可获得最小表面粗糙度值。

切削参数在钛合金曲面铣削过程中对切削性能有着显著影响。为探究切削参数对钛合金曲面的切削性能影响,本文以 TC11 钛合金作为研究对

基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2023JJ30255);湖南省教育厅科研项目重点项目(23A0354)

第一作者简介:蒋志贤(1997—),男,湖南衡阳人,硕士研究生,研究方向为难加工材料高效精密加工技术, lengmeng153@163.com。

象,通过单因素控制变量法分析铣削参数对径向合力、切削温度和表面粗糙度的影响,为 TC11 钛合金的曲面铣削加工提供参考依据。

1 实验设备与实验设计

1.1 实验材料及刀具

实验采用 TC11 钛合金,工件整体尺寸为 40 mm×30 mm×20 mm,其化学成分和力学性能分别如表 1 和表 2 所示。选用直径为 $\phi 6$ mm 的 4 刃整体硬质合金球头铣刀进行铣削加工,球头铣刀型号为 TM-4B-R3.0,涂层材料为 AlTiN。

表 1 TC11 的钛合金主要化学成分

化学成分	Ti	Al	Mo	Zr	Si	Fe	C
质量分数/%	88.042	6.763	3.064	1.412	2.605	0.210	0.082

表 2 TC11 钛合金的力学性能

参数	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	硬度/HV	伸长率/%	泊松比 μ
数值	1 140	1 048	353	9	0.3

1.2 实验方案

加工设备选用为 VMC850LA 立式加工中心,切削力、切削温度、工件表面粗糙度和表面形貌分别采用 spike_mobile 旋转测力仪、FLIR A325sc 长波红外热像仪、SPR2012G-tdo 粗糙度轮廓仪、HM-FD600E 超景深电动显微镜进行测量。

本次实验采用单因素实验法,研究 4 个切削参数(切削速度 V 、每齿进给量 f_z 、切削深度 a_p 、行距 a_e)对 TC11 钛合金铣削过程中的径向合力、铣削温度和表面粗糙度的影响。采用干式顺铣,曲面铣削实验工艺参数如表 3 所示,加工过程如图 1 所示。

表 3 曲面铣削实验参数

切削速度 $V/(m/min)$	每齿进给量 $f_z/(mm/z)$	切削深度 a_p/mm	行距 a_e/mm
40、60、80、100、120	0.02	0.10	0.10
60	0.01、0.02、0.04、0.06、0.08	0.10	0.10
60	0.02	0.10、0.15、0.20、0.25、0.30	0.10
60	0.02	0.10	0.05、0.10、0.20、0.40

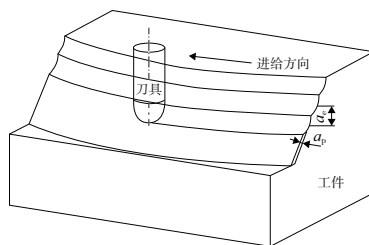


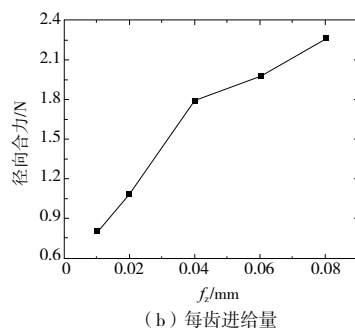
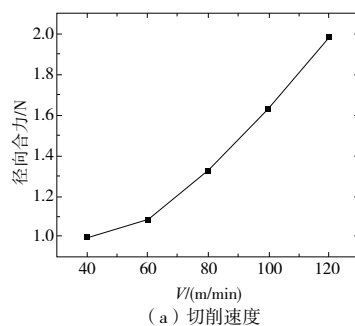
图 1 铣削凸曲面加工过程示意图

2 实验结果分析

2.1 径向合力

TC11 钛合金试样的径向合力随着切削参数的变化趋势如图 2 所示。由图可知,径向合力随着切削参数的增加而增加。这是因为随着切削参数的增加,单位时间内切削量增加,导致的塑性变形和弹性回复变形大,增加了切削变形抗力^[7]。图 2(b)中当每齿进给量大于 0.4 mm/z 时,切削瞬时厚度增加,刀具作用在切屑上的法向力增加,导致刀屑间摩擦因数下降,从而减缓了径向合力的增加趋势^[8]。

图 2(a)中随着切削速度的增加,径向合力变化范围为 1~1.98 N,图 2(b)中随着每齿进给量的增加,径向合力的变化范围为 0.73~2.26 N,图 2(c)中随着切削深度的增加,径向合力的变化范围为 1.08~2.46 N,图 2(d)中随着行距的增加,径向合力的变化为 0.83~1.96 N。因此,径向合力受每齿进给量的影响最大,其次是切削深度和行距,切削速度对径向合力影响最小。



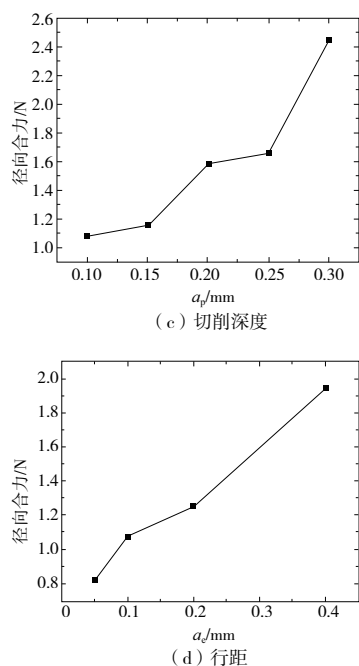


图2 切削参数对径向合力的影响

2.2 切削温度

TC11 钛合金试样的切削温度随着切削参数的变化趋势如图 3 所示。由图 3 可知,切削温度随着切削参数的增加而上升。图 3(a)中随着切削速度的增加,单位时间内材料去除量增加,单位时间内切削变形产生的热量增多,且刀-屑接触面热传导时间缩短,从而提高了切削温度^[9]。图 3(b)—图 3(d)中切削温度随着每齿进给量、切削深度和行距的增加而不断增加。这是因为随着切削量的增加,材料的去除体积增大,使塑性变形量增加,增加了塑性变形切削产生的热量,从而提高了切削温度^[10]。图 3(c)中切削深度从 0.1 mm 增加到 0.3 mm,切削温度上升缓慢,这是因为随着切削深度的增加,刀具参与切削的切削刃长度增加,增加了刀-屑接触面积,散热面积的增加导致切削温度上升缓慢^[11]。曲面铣削过程中切削温度变化区间在 35℃~60℃,每齿进给量和行距是影响切削温度变化的主要影响因素,其次是切削速度,切削深度对切削温度变化影响最小。

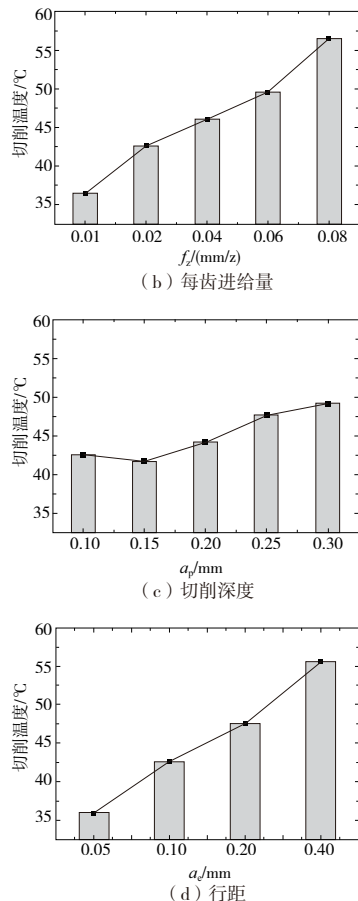
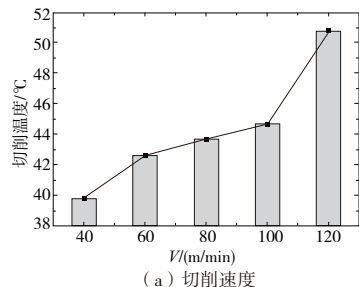


图3 切削参数对切削温度影响

2.3 表面质量

TC11 钛合金试样的表面粗糙度随着切削参数的变化趋势如图 4 所示。图 4(a)中表面粗糙度值随着切削速度的增加呈增大趋势,这是因为随着切削速度的增加,切削力不断增加,使切削过程中断续切削对加工系统的切削力冲击增加,从而导致曲面的表面粗糙度值增大^[12]。图 4(b)中表面粗糙度值随着每齿进给量的增加呈现先减小后增大的趋势。当每齿进给量增加到 0.04 mm/z 时,曲面的表面粗糙度值下降到 0.443 μm ,这是因为每齿进给量进一步增加,改善了刀-屑接触面的作用力分布,从而减小了曲面的表面粗糙度值^[13]。而当每齿进给量增加到 0.08 mm/z 时,较大的切削厚度,使切削所产生的抗力进一步提高,引起的刀具震荡增加,且较大的每齿进给量加剧了刀具排屑干涉,导致曲面的表面粗糙度值增大^[14]。图 4(c)中随着切削深度的增加,表面粗糙度值先增大后减小。随着切削深度的增加,刀具切削刃切削宽度逐渐增大,引发显著的塑性变形,且刀具频繁地切入和切出材料进一步导致切削力的震荡增加,从而增大了曲面的表面粗糙度

值^[15];而随着切削深度的进一步增加,切削过程中振动抑制,使已加工表面形成顺畅,从而减小了曲面的表面粗糙度值^[16]。图 4(d)中表面粗糙度值随着行距的增加成比例增大。这是因为行距越大,相邻刀轨之间曲面的表面残留高度越大,从而导致曲面的表面粗糙度值增大。实验结果表明,通过选择较大的每齿进给量及较小的行距,可获得较小的表面粗糙度值,在切削速度 $V=80\text{ m/min}$,每齿进给量 $f_z=0.04\text{ mm/z}$,切削深度 $a_p=0.25\text{ mm}$,行距 $a_e=0.1\text{ mm}$ 时,铣削的曲面表面粗糙度值较小。

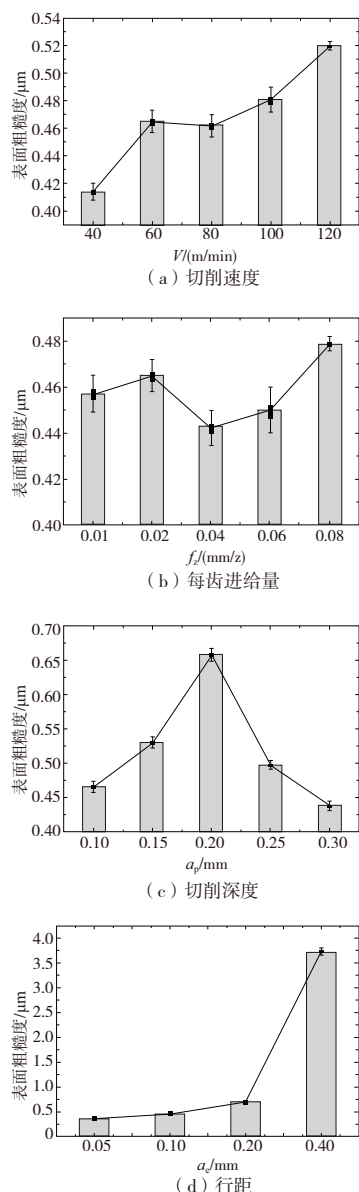


图 4 切削参数对表面粗糙度影响

TC11 钛合金试样的表面形貌如图 5(a)—图 5(h)所示。图 5(a)、图 5(b)分别为 $V=40\text{ m/min}$ 和 $V=120\text{ m/min}$ 时观察的曲面表面形貌,随着切削速度的增加,切削过程中应变与应变率强化增

加,增加了铣削力,使铣削过程中机械载荷增加,从而导致曲面的表面钛合金切屑粘结缺陷增多,切削棱高度增加。图 5(c)、图 5(d)分别为 $f_z=0.01\text{ mm/z}$ 和 $f_z=0.04\text{ mm/z}$ 时铣削的曲面表面形貌,当每齿进给量增加到 0.04 mm/z 时,改善了刀-屑之间的作用力分布状况,减少了表面缺陷,有效改善了表面质量。图 5(e)、图 5(f)分别为 $a_p=0.1\text{ mm}$ 和 $a_p=0.2\text{ mm}$ 时铣削的曲面表面形貌,当切削深度增加到 0.2 mm 时,钛合金切屑粘结体积较大,曲面的表面质量变差。图 5(g)、图 5(h)分别为 $a_e=0.2\text{ mm}$ 和 $a_e=0.4\text{ mm}$ 时铣削的曲面表面形貌,当行距 $a_e=0.2\text{ mm}$ 增加到 $a_e=0.4\text{ mm}$,增加了相邻两刀轨之间的距离,导致已加工曲面表面的残余面积高度明显增加。

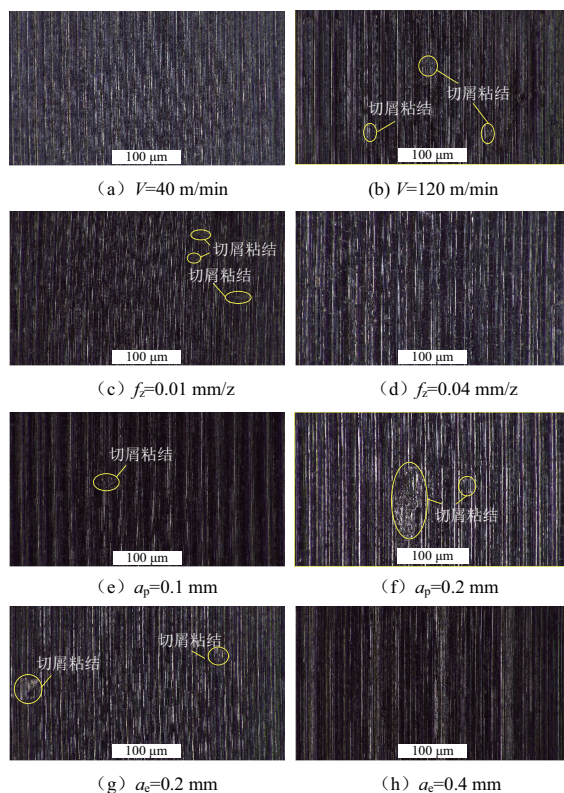


图 5 TC11 钛合金表面形貌

3 结语

以 TC11 钛合金为实验对象,采用单因素控制变量实验方法,进行曲面铣削参数实验研究,得出以下结论。

1)通过对曲面铣削结果分析,曲面铣削参数中每齿进给量对径向合力的影响最大,切削速度对切削力影响最小;每齿进给量对切削温度的影响最大,切削深度对切削温度影响最小。

(下转第 52 页)

传动系统的发展需要,应结合弧齿式尾轴折叠机构的结构特征,进一步开展相关关键技术研究。

针对国内尾轴折叠机构研究基础相对薄弱的现状,可依托现有技术积累,围绕弧齿式构型的受力特性、结构参数和核心技术环节开展系统研究与分阶段验证,逐步形成高可靠性的设计和研制能力。通过完善仿真、试验及工程考核手段提升技术成熟度,为舰载直升机折叠式尾传动轴的后续研发建立必要的技术支撑和能力储备。

参考文献:

- [1] 吴福初,刘卫东,沈培志,等. 舰载直升机远海护航的巡逻警戒时机[J]. 海军航空工程学院学报,2013,28(4):436-440.
- [2] 王威. 21 世纪的海军舰载直升机[J]. 现代舰船,2007(3):35-38.
- [3] 崔翰明,许建华,曾庆吉,等. 世界舰载直升机的现状与发展[J]. 直升机技术,2009(2):68-71.

- [4] 常斌,王海,杨林. 舰载直升机的研究现状与发展趋势[J]. 飞行力学,2016,34(3):7-12.
- [5] 邹小玲. 直升机旋翼/斜梁折叠控制系统原理与改进措施[J]. 直升机技术,2011(3):20-24,19.
- [6] 金立峰. 舰载直升机的技术特点分析[J]. 科技风,2008(17):47,49.
- [7] Finmeccanica S. Releasable coupling for a helicopter tail rotor power transmission line; US6050521 [P]. 2000-04-18.
- [8] 聂慧阳 王希 段铖. 某型直升机尾轴刚性支座振动超限故障分析[J]. 南华动力,2021,(3).
- [9] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册(第13册)[M]. 北京:航空工业出版社,2001.
- [10] 解超,朱如鹏,李苗苗,等. 鼓形齿联轴器在折叠机构中的应用[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):42-44.

收稿日期:2024-03-15

(上接第18页)

2) 铣削时各加工参数对表面粗糙度的影响由大到小依次为:行距>切削深度>切削速度>每齿进给量。实验结果表明,为获得较好的表面质量,应该选择较小的行距以及较大的每齿进给量。

参考文献:

- [1] 石增祥,王哲,蔡帆,等. 球刀铣削钛合金 TC11 切削力建模与分析[J]. 机械设计与制造工程,2023,52(6):48-52.
- [2] Hu X M, Qiao H Y, Yang M Y, et al. Research on milling characteristics of titanium alloy TC4 with variable helical end milling cutter[J]. Machines,2022,10(7):537.
- [3] Mhamdi M B, Boujelbene M, Bayraktar E, et al. Surface integrity of titanium alloy Ti-6Al-4V in ball end milling[J]. Physics Procedia,2012,25:355-362.
- [4] 张海涛,金成哲,战勇. 切削参数对钛合金叶片铣削力的影响分析[J]. 工具技术,2023,57(1):71-76.
- [5] 吴泽刚,侯永峰,苗清,等. TC11 钛合金整体叶轮铣削加工表面完整性研究[J]. 中国机械工程,2023,34(23):2862-2872.
- [6] 解存凡. 薄壁钛合金叶片加工工艺参数均匀设计实验研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2016.
- [7] 杨吟飞,赵威,李亮,等. Ti₆Al₄V 钛合金大进给铣削切削力与切削温度的试验研究[J]. 航空精密制造技

术,2014,50(4):34-37.

- [8] 王奔,赵家兴,张秀云,等. 侧铣削参数对 TC4 钛合金表面粗糙度及材料去除率的影响[J]. 工具技术,2021,55(12):9-12.
- [9] 赵威. 基于绿色切削的钛合金高速切削机理研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
- [10] 张闻捷. 316H 不锈钢大口径管车削加工的基础研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2022.
- [11] 胡忠举,陆名彰. 机械制造技术基础[M]. 2 版. 长沙:中南大学出版社,2011.
- [12] 李佳宏,刘赣华,熊小文. 铣削参数对 316L 不锈钢切削性能的影响[J]. 工具技术,2022,56(5):94-96.
- [13] Guan L, Tang G Y, Chu P K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals [J]. Journal of Materials Research, 2010, 25(7):1215-1224.
- [14] 林海生,王成勇,李伟秋,等. 钛合金绿色切削加工工艺优化研究[J]. 工具技术,2023,57(12):15-20.
- [15] 姜文. 马氏体不锈钢的切削特性及切削参数优化研究[D]. 镇江:江苏大学,2017.
- [16] 杨后川,杨保生,杜晓伟,等. 钛合金 TB6 铣削表面粗糙度与表面缺陷研究[J]. 航空制造技术,2017,60(5):60-66,71.

收稿日期:2024-03-18