

高速铣削速度对 TC4 钛合金表面完整性影响机理

杨振朝 张定华 姚倡锋 任军学 田卫军

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安,710072)

摘要:通过 TC4 钛合金的高速铣削加工实验,研究了铣削速度对钛合金已加工表面完整性的影响规律。利用专业金属切削加工有限元软件 AdvantEdge,对 TC4 钛合金高速铣削过程进行了二维模拟仿真,获得了在不同铣削速度下的温度场分布以及铣削速度对刀具前后刀面切削温度的影响规律。基于仿真结果,分析了 TC4 钛合金高速铣削速度对表面完整性的影响机理。结果表明:切削区最高温度位于刀-屑接触面上,距离刀尖 0.01~0.02 mm 的位置。铣削速度对切削温度影响显著,切削温度整体上随铣削速度增加而升高,但当铣削速度为 301 m/min 时,切削温度有所下降。

关键词: TC4 钛合金;高速铣削;表面完整性;温度场;影响机理

中图分类号: TG54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2009)05-0644-05

Influence Mechanism of Milling Speed on TC4 Titanium Alloy Surface Integrity in High-Speed Milling

Yang Zhenchao, Zhang Dinghua, Yao Changfeng, Ren Junxue, Tian Weijun

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China)

Abstract By the experiments of high-speed milling of TC4 titanium alloy, the influence of the milling speed on machined surface integrity is investigated. The two-dimensional simulation of TC4 titanium alloy high-speed milling process is carried out by AdvantEdge, which is a professional metal-cutting processing finite element software. The temperature field distribution at different milling speeds and the effect of the milling speed at the cutting temperature on the rake and relief faces are obtained. Based on the simulation results, the influence mechanism of the milling speed on the surface integrity in the high-speed milling of TC4 titanium alloy is analyzed. Results show that the highest temperature in the cutting zone locates on the tool-chip interface at a distance of 0.01~0.02 mm from the tool tip. Generally, the influence of the milling speed at the cutting temperature is significant. The cutting temperature increases with the milling speed, but the cutting temperature decreases when the milling speed reaches 301 m/min.

Key words TC4 titanium alloy; high-speed milling; surface integrity; temperature field; influence mechanism

钛合金以其密度小、强度高、耐高温、抗腐蚀性好等特点,在航空、航天、航海、汽车及其他行业得到了广泛的应用。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、单位面积切削力大,在切削刃附近,冷硬、粘刀现象和刀具磨损

基金项目:国家科技支撑计划重点(2008BAF32B10)资助项目;教育部重大(309026)资助项目;航空科学基金(2007ZE53061)资助项目;西北工业大学科技创新基金(2008KJ02018);2008全国博士学术论坛推荐优秀论文。

收稿日期:2008-11-04;修订日期:2009-05-04

作者简介:杨振朝,男,博士研究生,1982年7月生;张定华(联系人),男,教授,博士生导师,E-mail: dhzhang@nwpu.edu.cn

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

都很严重^[1-2]。在常规切削速度下加工钛合金,已加工表面存在微观组织变化和显微硬度的增加,当刀具长时间处于磨损状态加工时,已加工表面存在严重的塑性变形和硬化,尤其在干切削的条件下更为突出^[3-4],而这些势必对零件疲劳性能造成不利影响。

高速加工凭借其高的材料去除率、低切削力,以及加工工件精度高、表面质量高等优点,在钛合金的切削加工中显现出了明显的优越性。大量实验表明:钛合金高速加工获得的表面,具有表面粗糙度低、硬化层深度小、残余应力小等特点^[5-7],因此,高速加工是提高钛合金加工效率、改善表面质量、控制钛合金整体薄壁件变形和延长钛合金构件疲劳寿命的理想加工方法。

整体叶盘是发展高推重比航空发动机的关键技术,目前钛合金压气机整体叶盘主要采用五坐标加工中心直接铣削成型,而最后一道铣削工艺决定了工件最终的表面质量和加工精度,所以本文模拟整体叶盘加工最后一道的铣削环境,采用相关的加工参数进行实验,并着重研究铣削速度对 TC4 钛合金高速铣削已加工表面完整性的影响规律,并借助专业切削加工有限元软件 AdvantEdge,对钛合金高速铣削过程中的温度场进行了仿真,进而分析了铣削速度对表面完整性影响机理,以期优化钛合金整体叶盘高速铣削工艺参数、进行表面完整性控制提供相关的实验基础与理论依据。

1 实验条件及过程

1.1 试件材料

试件材料为 TC4 钛合金,其组成为 Ti-6Al-4V,属于 (Ti-Al) 两相钛合金,化学成分组成如表 1 所示。TC4 钛合金凭借其高强度、可淬火性以及良好的高温力学性能,使其在航空工业中得到了广泛应用,其在室温、高温下的力学性能如表 2 所示,试件尺寸为 90 mm×20 mm×7 mm。

表 1 TC4 钛合金的化学成分								%
Al	V	Fe	N	C	O	H	Ti	
6.0	4.0	0.3	0.05	0.1	0.2	0.012	5 余量	

表 2 TC4 钛合金的力学性能							
室温力学性能 ≥					高温力学性能 ≥		
抗拉强度	屈服强度	伸长率 W	收缩率 j	冲击韧性	试验温度	抗拉强度	持久强度
$\sigma_b /$	$\sigma_{0.2} /$			$a_k /$	$^{\circ}\text{C}$	$\sigma_b /$	$\sigma_{100} /$
MPa	MPa	%	%	(J·cm ⁻²)		MPa	MPa
902	824	10	30	39.2	400	618	569

1.2 实验条件

实验所用机床为 Mikyon UCP1350 五坐标高速数控加工中心;刀具采用整体硬质合金四刃立铣刀,直径 12 mm,螺旋角 30°,前角 10°,后角 12°;铣削方式为顺铣,采用乳化液冷却。切削用量根据整体叶盘最后一道加工时所用的参数进行选择,铣削速度 v_c 依次选择 113, 226, 301, 377 m/min,轴向切深 a_p 恒为 0.25 mm,每齿进给量 f_z 恒为 0.05 mm/z,径向切深为 12 mm。

1.3 表面完整性测试

表面粗糙度测量采用英国 Taylor-hobson 粗糙度仪,在铣削表面上沿工件进给方向取 10 个点测量取平均值,取样长度为 0.8 mm,评定长度为 5.6 mm。表面形貌采用 AMRAY-1000B 的扫描电子显微镜观察。

采用电火花线切割将已加工试样沿垂直进给方向切割,制备金相试样。将切割断面研磨、抛光后进行腐蚀,腐蚀剂配比为硝酸:氢氟酸:水等于 1:1:10。采用型号为 AMRAY-1000B 的扫描电子显微镜对断面微观组织进行观察。

显微硬度的测量采用斜切面法,在已加工表面上距端面 5 mm 利用电火花线切割法切割出一个 3° 的斜角,切割路线如图 1 所示,然后对斜切面进行研磨、抛光。在斜切面上逐点测量显微硬度,直到出现基体材料的硬度为止,从而求出硬度程度及其深度。显微硬度的测量采用 450SV D 维氏硬度计,试验力选择 9.81 N,保持载荷时间 10 s。

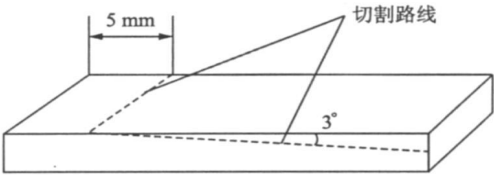


图 1 测量显微硬度试件切割方法

2 实验结果及分析

2.1 实验结果

2.1.1 表面粗糙度及表面形貌

图 2 为表面粗糙度 R_a 的测量结果。可见,铣削速度较低时,表面粗糙度较高,随着铣削速度的升高, R_a 呈下降趋势。特别是当铣削速度从 113 m/min 升高到 301 m/min 时, R_a 明显下降,但是当铣削速度升高到 377 m/min 时, R_a 略有升高。最佳表面粗糙度为 0.365 μm ,此时铣削速度为 301 m/min。

图 3 为不同铣削速度下铣削表面中心位置的

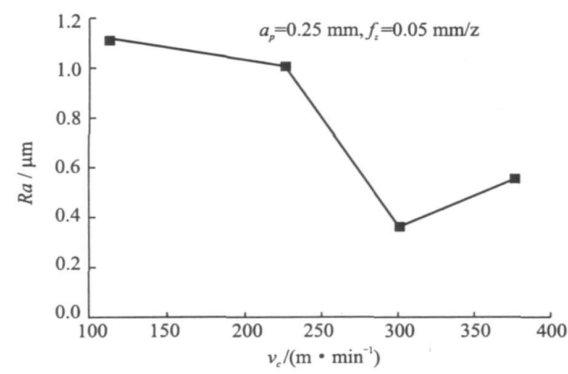


图 2 表面粗糙度变化曲线

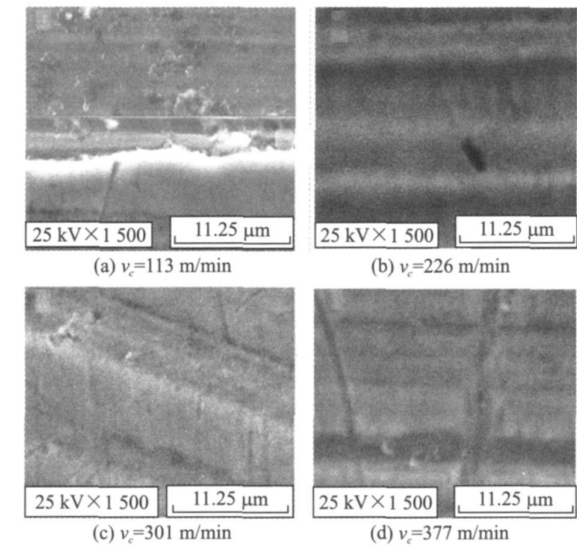


图 3 不同铣削速度下的表面形貌

表面形貌照片。可见,当铣削速度从 113 m/min 增加到 301 m/min 时,表面形貌越来越好;而当铣削速度增加到 377 m/min 时,表面形貌变差。表面形貌的观察结果和表面粗糙度的测量结果一致。

2.1.2 微观组织

图 4 为不同铣削速度下铣削表面中心位置表层微观组织照片。从图中可以看出,随着铣削速度的升高,铣削表面表层微观组织基本无变化,没发现明显相变及晶粒歪扭。

2.1.3 显微硬度

图 5 为不同铣削速度下,显微硬度 H 随表面下深度 h 的变化曲线。从图中可以看出,最大显微硬度都出现在已加工表面上,而在表面下 0.02 mm 左右深度处时,显微硬度急剧下降,然后再次升高,最后呈下降趋势,趋于材料基体硬度值。4 块试件的平均基体材料硬度为 505 HV 左右,但是由于国产钛合金与国外同类合金相比,力学性能不够稳定所致^[8]。

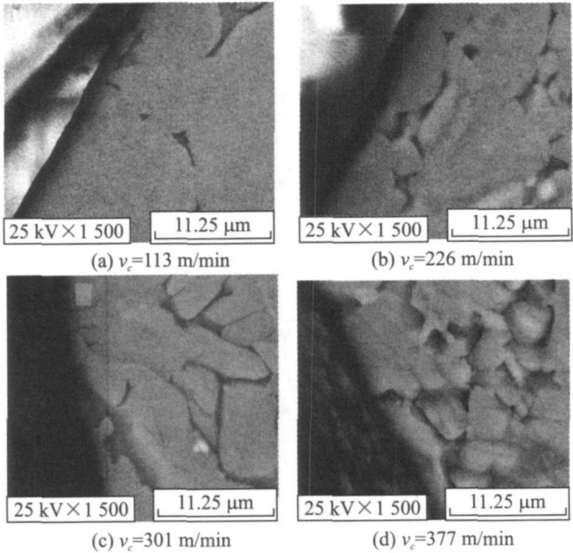


图 4 不同铣削速度下的表层微观组织

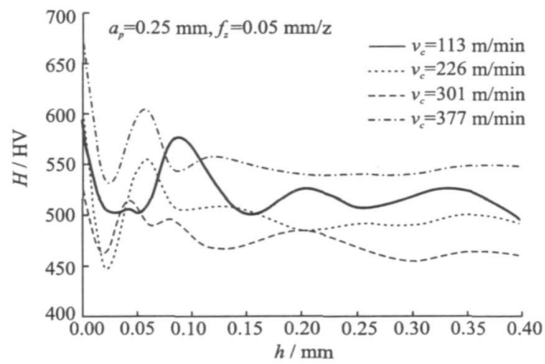


图 5 不同铣削速度下显微硬度变化曲线

图 6, 7 分别为硬化程度 N 和硬化深度 h 随铣削速度的变化曲线。从图中可以看出,硬化程度随铣削速度升高而增大。当铣削速度从 113 m/min 增加到 301 m/min 时,硬化深度随着铣削速度的升高而减小,而当铣削速度升高到 377 m/min 时,硬化深度略有增大。

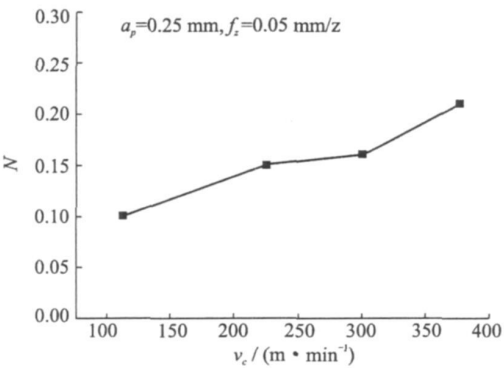


图 6 硬化程度随铣削速度变化曲线

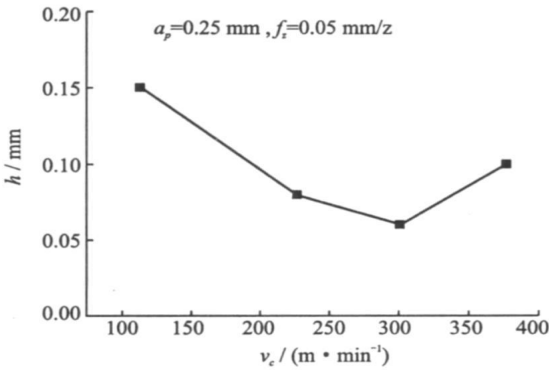


图 7 硬化深度随铣削速度变化曲线

2.2 切削过程有限元仿真

采用美国 Third Wave Systems 公司的 Advant Edge™ FEM 专业金属切削有限元仿真软件, 对不同铣削速度下高速铣削 TC4 钛合金的过程进行二维模拟仿真。由于表面粗糙度、微观组织和显微硬度主要是由于切削区的温度造成的, 因此主要对切削区温度场以及最高温度进行仿真。

图 8 为不同铣削速度下切削区温度场分布图。从图中可以看出, 随着铣削速度的增加, 切削区温度升高, 而当铣削速度升高到 301 m/min 时, 切削区温度有所下降。

图 9 为不同铣削速度下刀具前后刀面温度示意图。从图中可以看出, 不同铣削速度下, 切削区最高温度不是发生在刀尖位置, 而是发生在刀屑接触面上, 距离刀尖 0.01~0.02 mm 的位置。切削区最高温度总体上随铣削速度增加而升高, 而当铣削速度为 301 m/min 时, 切削区最高温度有所下降。4 种铣削速度下, 切削区最高温度为 1 116℃。

2.3 影响机理分析

从切削区温度场分布以及最高温度的仿真结果来看, 随着铣削速度的增加, 切削区产生的总热量以及最高温度急剧上升。大量实验表明, 高速切削过程中, 切削区产生的大部分热量被切屑带走, 传递给工件和刀具的热量并不多, 而且铣削速度愈大, 切屑带走的热量愈多, 传入工件的热量愈少, 相应的已加工表面切削温度升高很少。加上高速切削时, 随着铣削速度提高, 工件材料塑性变形减小, 使得表面缺陷减少, 因此, 随着铣削速度的升高, 试件表面粗糙度降低, 表面形貌变好。但随着铣削速度的升高, 切削温度升高, 使得刀具后刀面剧烈磨损, 从而导致当铣削速度升高到一定数值后, 表面粗糙度有所提高, 表面形貌变差。

虽然当铣削速度为 377 m/min 时, 切削区最高温度为 1 116℃, 但是高速切削过程中, 产生的热量,

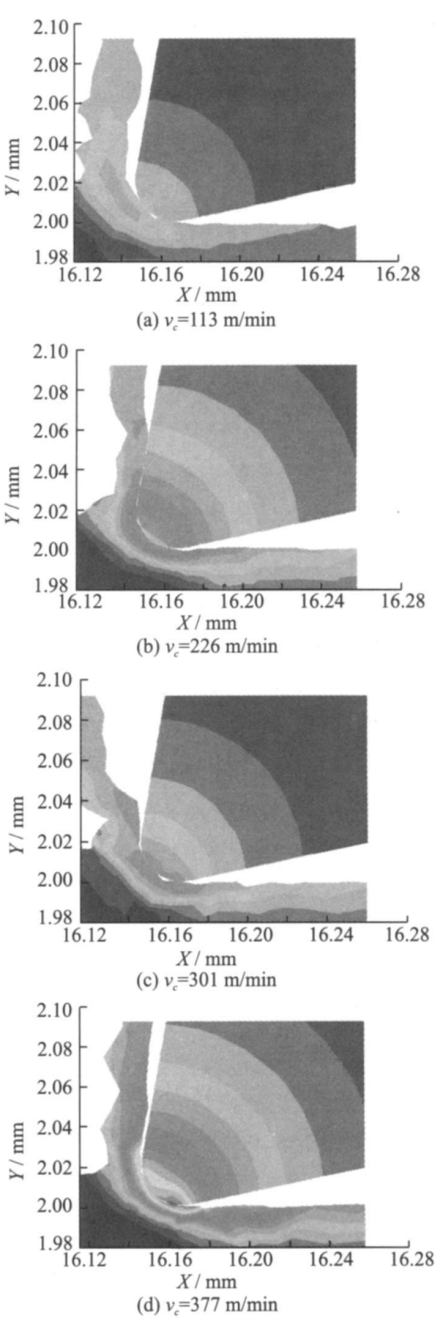


图 8 不同铣削速度下切削区温度场分布图

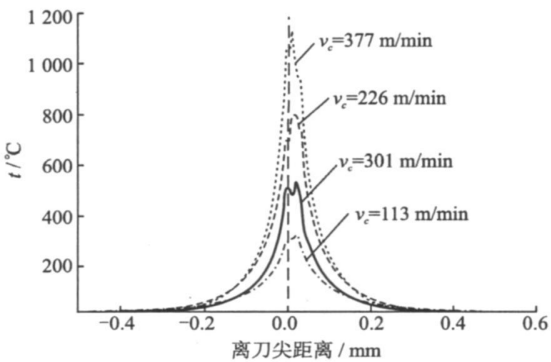


图 9 不同铣削速度下刀具前后刀面温度图

绝大多数被切屑带走,传递到工件表面的热量很少,而 TC4 的相变温度为 980~ 990 °C,因此不会发生相变。

切削钛合金时,已加工表面的加工硬化是由于切削过程变形引起的硬化以及由于钛吸收大气中的氧、氢等元素引起的脆化两种现象共同作用的结果。根据仿真结果,随着铣削速度的提高,切削区温度随之升高,表层金属脆化程度增大,引起硬化程度的增加。另一方面,随着铣削速度的升高,剪切角增大,剪切面积的缩小,硬化深度也将减小,而当铣削速度升高到一定数值,刀具后刀面磨损严重,又会使剪切面积增大,导致硬化深度有所增大。

3 结 论

通过对 TC4 钛合金高速铣削实验与仿真的研究,可以得出以下结论:

- (1) 表面粗糙度随铣削速度升高整体呈下降趋势,而当铣削速度升高到 377 m/min 时,略有升高,微观组织基本无变化。硬化程度随铣削速度升高而增大。硬化深度随着铣削速度升高先减小,当铣削速度为 377 m/min 时,略有增大。
- (2) 切削区最高温度不是发生在刀尖位置,而是位于刀屑接触面,距离刀尖 0.01~ 0.02 mm 的位置。
- (3) 刀具前后刀面的温度及最高温度随铣削

速度的升高,整体呈升高趋势,但是当铣削速度为 301 m/min 时有所降低。

参考文献:

- [1] 张春江. 钛合金切削加工技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1986 22-24.
- [2] 陈克越. 钛、钛合金与钛合金制品生产新技术新工艺流程及质量检验新标准实用手册 [M]. 银川: 宁夏大地音像出版社, 2005 229-265.
- [3] Che-Haron C H. Tool life and surface integrity in turning titanium alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1/3): 231-237.
- [4] Che-Haron C H, Jawaid A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(2): 188-192.
- [5] Ge Yingfei, Fu Yucan, Xu Jiahua. Experimental study on high speed milling of V-TiAl alloy [J]. Key Engineering Materials, 2007, 339 6-10.
- [6] Mantle A L, Aspinwall D K. Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 118(1/3): 143-150.
- [7] 史兴宽,杨巧凤,蔡伟,等. 钛合金 TC4 高速铣削表面完整性的研究 [J]. 航空制造技术, 2001(1): 30-35.
- [8] 耿国胜. 钛合金高速铣削技术的基础研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学机电学院, 2006.