

超声纵-扭复合铣削钛合金刀具磨损特性研究

童景琳, 封志彬, 焦锋, 赵波

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: **目的** 采用超声纵-扭复合振动加工方法, 获得较长的刀具使用寿命。**方法** 采用理论建模与不同铣削振动方式, 研究刀具磨损特性。通过超景深电子显微镜和粗糙度测试仪, 分别对刀具微观形貌、工件表面粗糙度进行了分析; 通过不同铣削方式加工钛合金材料, 对刀具磨损特性进行了系统分析。**结果** 与普通铣削和超声纵振铣削相比, 超声纵-扭铣削方式下, 刀具后刀面磨损减小, 工件表面粗糙度降低。经测试, 当去除面积为 6356 mm^2 时, 超声纵-扭复合加工刀具后刀面磨损量 VB 为 $103 \mu\text{m}$, 分别比普通和超声纵振加工时降低了 $38 \mu\text{m}$ 和 $36 \mu\text{m}$ 。当去除面积为 4530 mm^2 时, Ra 为 $1.2 \mu\text{m}$, 普通铣削和超声纵振铣削的 Ra 则分别为 $1.62 \mu\text{m}$ 和 $1.38 \mu\text{m}$ 。由于超声纵振加工仅仅是在轴向方向实现了分离, 后刀面时刻冲击着已加工表面, 当去除面积为 6356 mm^2 时, 刀具后刀面磨损量反有超出普通铣削的趋势。**结论** 超声纵-扭复合加工从旋转方向内实现了刀-屑分离, 在铣削过程中, 极大地减少了刀具后刀面对已加工表面的冲击, 从而使得刀具寿命有所延长, 为高效加工、难加工材料提供了一种加工方法。

关键词: 超声纵-扭复合铣削; 钛合金; 球头刀具; 刀具磨损

中图分类号: TG506.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0297-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.040

Tool Wear in Longitudinal-Torsional Ultrasonic Vibration Milling of Titanium Alloys

TONG Jing-lin, FENG Zhi-bin, JIAO Feng, ZHAO Bo

(School of Mechanical and Dynamic Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain longer tool life in ultrasonic longitudinal-torsional vibration milling. The tool wear characteristics were studied by theoretical modeling and different milling vibration modes. The surface topography of the tool and surface roughness of the workpiece were analyzed by the electron microscope (VHX-2000) and surface profiler. Titanium alloys materials were processed by different milling methods and the wear characteristics of tool were analyzed systematically. Compared with the ordinary and ultrasonic longitudinal vibration milling, the ultrasonic longitudinal-torsional vibration milling reduced the wear on the flank surface of tool and improved the roughness of workpiece surface. Through the test, when the removal area was 6356 mm^2 , the flank wear under the ultrasonic longitudinal-torsional vibration milling was $103 \mu\text{m}$, respectively dropping by $38 \mu\text{m}$ and $36 \mu\text{m}$ than that under ordinary and longitudinal ultrasonic milling. When removal area was 4530 mm^2 , the roughness Ra was $1.2 \mu\text{m}$ and Ra for the ordinary and the longitudinal vibration were $1.62 \mu\text{m}$ and $1.38 \mu\text{m}$ respectively.

收稿日期: 2018-04-27; 修订日期: 2018-06-23

Received: 2018-04-27; Revised: 2018-06-23

基金项目: 河南省自然科学基金 (162300410120); 河南省基础与前沿技术研究计划 (152300410102)

Fund: Supported by Henan Natural Science Foundation (162300410120) and Technical Research Plan of Henan Foundation and Preface (152300410102)

作者简介: 童景琳 (1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。

Biography: TONG Jing-lin (1972—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: precision ultra-precision machining technology and equipment.

通讯作者: 焦锋 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。邮箱: jiaofeng@hpu.edu.cn

Corresponding author: JIAO Feng (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision ultra-precision machining technology and equipment. E-mail: jiaofeng@hpu.edu.cn

Due to the axial separation of ultrasonic longitudinal vibration, the flank continuously impacted the processed surface. The ultrasonic longitudinal vibration method caused more flank wear than the ordinary when removal area reached 6256 mm^2 . Ultrasonic longitudinal-torsional vibration machining realizes the actual separation of tool and chip in rotation direction and greatly reduces the impact to the processed surface by flank, thus extending the tool life and providing a new machining method for high-efficient processing and difficult-to-machine-material.

KEY WORDS: longitudinal-torsional ultrasonic milling; titanium alloy; ball-end cutter; tool wear

钛合金具有比强度高、耐腐蚀和耐高温等优异特点,因此广泛应用于国防科技、航空航天和医疗科技等高端领域^[1-2]。钛合金切削加工时,由于其导热系数较小、冷硬现象严重和变形系数小,加剧了刀具的磨损程度,属典型的难加工材料。使用钛合金加工复杂的曲面时,对工件的表面质量和刀具的使用寿命则提出了更高的要求。

球头刀进行铣削加工时,由于切入角是连续变化的,几乎没有突变的现象,因此球头刀具斜面或曲面加工过程较为平稳。为此,许多学者对球头刀具展开了大量研究。文献[3]采用球头刀具斜面铣削钛合金,对刀具磨损进行了优化;文献[4]通过对球头刀具铣削的数值模拟,得到了不同倾角对表面粗糙度影响的规律;文献[5]通过构建球头刀具加工水平面的接触区域解析模型,进而得到了复杂曲面接触区域的半解析模型。

超声辅助切削作为一种精密切削加工方法,能有效改善工件表面质量和延长刀具使用寿命,因此越来越受到有关学者的关注。文献[6]研究了立铣刀超声纵振平面铣削钛合金,得到了振幅对表面质量的影响。文献[7]通过对钛合金施加超声轴向振动铣削,得到了进给量由小变大时,表面粗糙度分别受超声振幅和切削去除率的影响。文献[8]通过对复合材料施加超声振动,研究了超声纵振铣削对表面微观形貌的影响。

相对于车削纵振加工过程的刀-屑周期分离,斜面铣削施加的纵振由于不是施加在刀具的旋转方向上,实际并不是真正意义上的“刀-屑”周期分离。长时间的纵振斜面铣削(尤其振幅过大时),极有可能加剧刀具后刀面的磨损,甚至会影响工件的表面质量。为此,许多学者开展了复合振动切削加工来提高零件加工质量和效率^[9-12]。皮钧等^[13-14]研究了纵-扭共振旋转超声端铣复合材料,由于主、副切削刃扭振的存在,进而产生强大的冲击力,使得复合材料极短时间内达到强度极限,结果表明刀具磨损和表面质量优于普通铣削和纵振铣削。Wang J 等^[15]研究了旋转超声纵-扭复合振动切削石英玻璃,相对于单一的纵向振动切削,复合振动加工获得的表面质量较好。Zhao G 等^[16]研究了旋转超声纵-扭复合振动钻削 AISI1045,相对于超声纵振钻削,刀具的使用寿命进一步延长。

为了进一步提高钛合金的加工表面质量和延长刀具的使用寿命,本文提出一种小纵振、大扭振的纵-扭复合切削方法,在旋转方向上实现刀-屑分离,进而降低刀具后刀面对工件已加工表面的冲击,提高加

工表面质量。这为球头刀具斜面铣削精密加工提供了方法,也为球头刀具高效加工复杂曲面提供了可能。

1 球头刀具超声纵-扭动力学模型

1.1 球头铣刀有效半径的求解

球头铣刀铣削加工和立铣刀铣削加工有所不同,其切削刃每一点的线速度是不一样的。回转轴线处切削刃的线速度为0,距离轴线越远,线速度也就越大。图1是球头铣刀加工倾角为 θ 的姿态图,图2为球头刀具与工件接触区域的放大图。

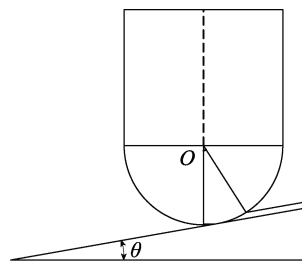


图1 球头铣刀加工倾角为 θ 的姿态图
Fig.1 Attitude map of the ball end milling cutter to the angle of θ

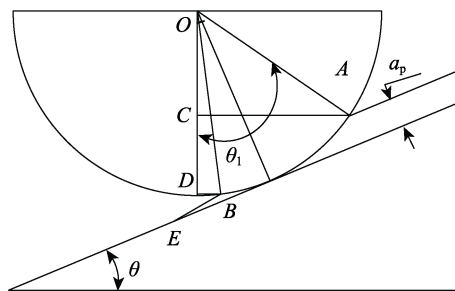


图2 球头刀具与工件接触区域的放大图
Fig.2 Magnifying map of the contact area between ball end tool and workpiece

在图2中, O 为球刀的球心,半径为 R ,刀-工接触区域为 \widehat{AB} 弧, \widehat{EB} 弧为上一刀残留段, a_p 为切削厚度, C 、 D 两点为点 A 和 B 在轴线的投影。由文献[3]可得式(1)和式(2)。

$$v_{\max} = v_A = \frac{2\pi R \sin\left(\theta + \arccos \frac{R - a_p}{R}\right)}{1000} \quad (1)$$

$$\theta_1 = \theta + \arccos \frac{R - a_p}{R} \quad (2)$$

1.2 球头刀具超声纵-扭切削运动学模型

球头铣刀超声纵-扭铣削加工时, 刀具既要沿轴线方向纵向振动, 还要沿轴线旋转方向做扭转振动。根据文献[17-18]可得铣削模型, 如图 3 所示。

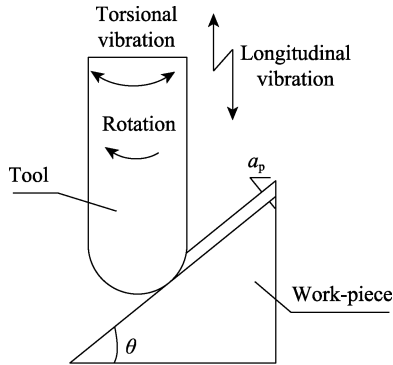


图 3 球头刀具超声纵-扭铣削机理模型

Fig.3 Mechanism model of ultrasonic longitudinal-torsional milling of ball head cutter

具体就是, 在球头刀具的轴线和旋转两个方向同时施加纵振和扭振两种振动模式。由于球头刀具的纵振和扭振来源于同一振动的分解, 因此可以认为两种

振动模式的频率相等。球头刀具任意一点的纵振位移可以表示为:

$$z = A \sin(\omega t) \quad (3)$$

式(3)两边同时对时间求导, 可以求得球头刀具任意一点的轴向速度:

$$v_z = A\omega \cos(\omega t) \quad (4)$$

球头刀具任意一点的角速度可表示为:

$$\omega_1 = \omega_2 + \delta\omega \cos(\omega t) \quad (5)$$

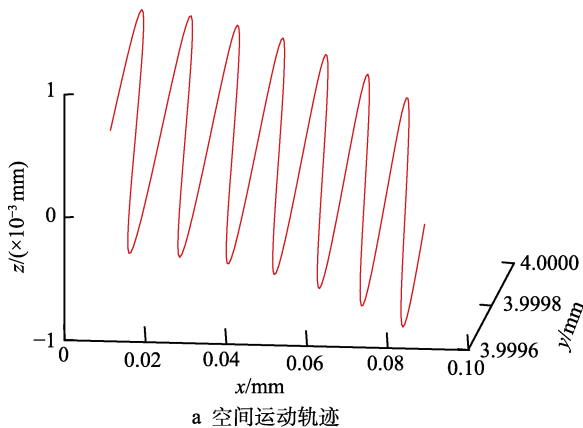
进给方向的位移可以表示为:

$$x_1 = vt \quad (6)$$

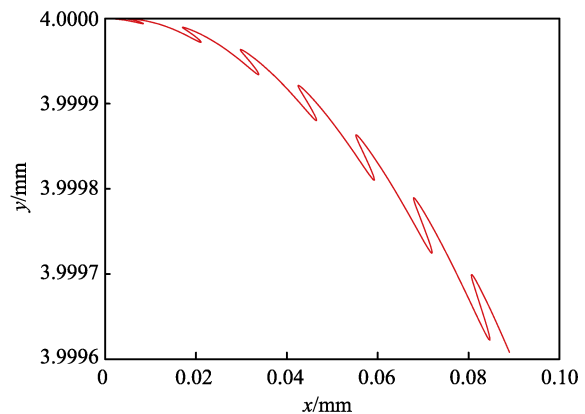
球头刀具切削刃任意一点的空间轨迹可以表示为:

$$\begin{cases} x = vt + R \sin(\omega_2 t + \delta \sin(\omega t)) \\ y = R \cos(\omega_2 t + \delta \sin(\omega t)) \\ z = A \sin(\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

以上各式中: ω 为圆频率 ($\omega = 2\pi f$); f 为超声振动的频率; ω_2 为球头刀具的转动角速度; A 为超声振幅; δ 为超声扭振振幅; v 为刀具进给速度; R 为半径。当 $\delta\omega > \omega_2$ 时, 扭转振动方向所在平面内就会出现刀-屑周期分离的现象 (图 4b), 这是超声纵振铣削和普通铣削所不具备的 (图 5 和图 6)。



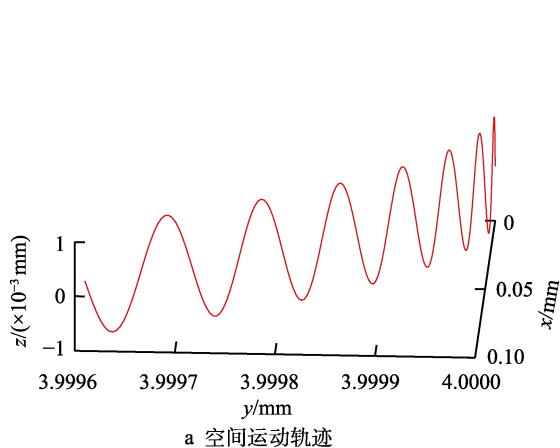
a 空间运动轨迹



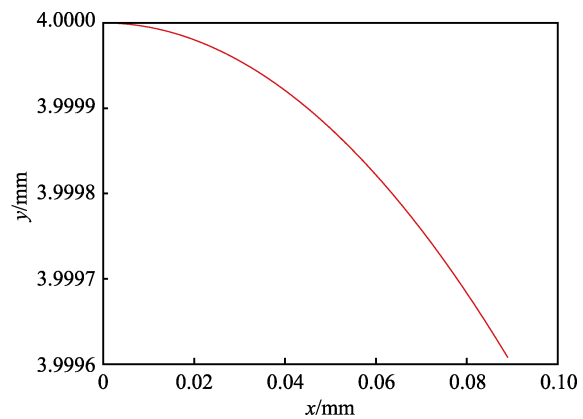
b 在旋转平面内(x-y)的轨迹

图 4 球头刀具圆弧切削刃任意一点的纵-扭复合振动轨迹图

Fig.4 Trajectory diagram of the longitudinal-torsional vibration of any point in circular cutting edge of ball end milling cutter: a) track of tool at any point in three-dimensional space, b) track of tool at any point (x-y) in rotating plane



a 空间运动轨迹



b 在旋转平面内(x-y)的轨迹

图 5 球头刀具圆弧切削刃任意一点的纵振运动轨迹图

Fig.5 Trajectory diagram of the longitudinal vibration of any point in circular cutting edge of ball end milling cutter: a) track of tool at any point in three-dimensional space, b) track of tool at any point (x-y) in rotating plane

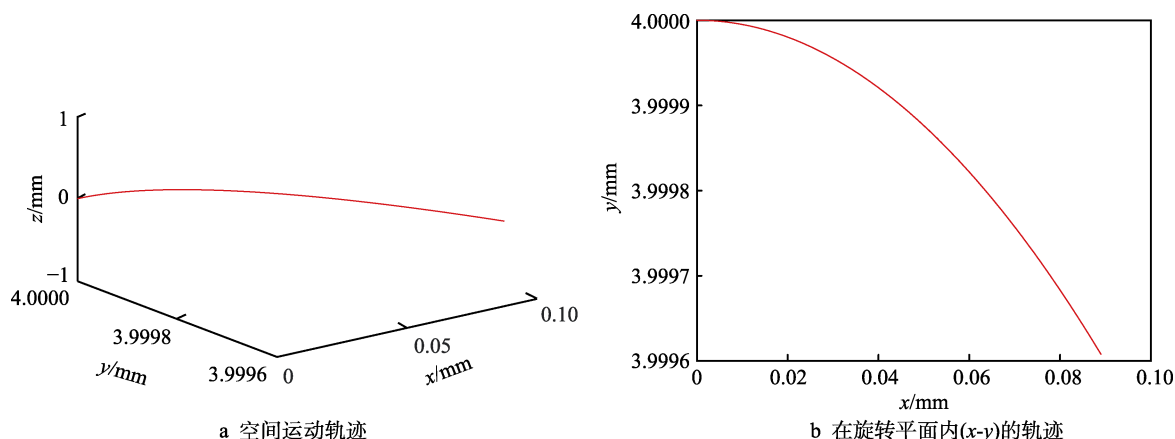


图 6 球头刀具圆弧切削刃任意点的普通铣削运动轨迹图

Fig.6 Trajectory map of ordinary milling of any point in circular cutting edge of ball head cutter:
a) track of tool at any point in three-dimensional space, b) track of tool at any point (x - y) in rotating plane

球头刀具后刀面与切屑的“接触—铣削—分离”周期铣削情况,不仅能顺利断屑,而且降低了平均切削力。尤其是在扭转振动时施加了较大的扭振,轴线施加了较小的纵振,真正实现了刀具在切削方向上刀屑的周期分离,避免了刀具后刀面不必要的振动和冲击,对延长刀具使用寿命和降低零件表面粗糙度有着重要的意义。

2 试验研究

2.1 试验条件

分别在三轴数控加工中心对钛合金进行普通铣削、纵振铣削和纵-扭铣削试验。利用 TIME3221 粗糙度仪和超景深三维显微镜对加工后的工件和刀具表面进行微观分析。拟采用的切削参数见表 1。

表 1 不同加工方式下的切削参数
Tab.1 Cutting parameters of different processing methods

	Ordinary milling	Longitudinal vibration milling	Torsional vibration milling
Machine model	VMC850	VMC850	VMC850
Tool model	TiAlN Coated, $\phi 8$, Helix Angle of 35° , 2 teeth		
Milling method	Climb milling, unidirectional cutting		
Liner velocity/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	50.625	50.625	50.625
Feed per tooth/($\text{mm} \cdot \text{z}^{-1}$)	0.0525	0.0525	0.0525
Normal cutting depth /mm	0.35	0.35	0.35
Step distance/mm	0.35	0.35	0.35
Inclination angle/($^\circ$)	10	10	10
Frequency/kHz	0	35	35
Longitudinal vibration amplitude/ μm	0	1	1
Torsional vibration amplitude/rad	0	0	0.001

2.2 试验结果与分析

球头刀具铣削过程中,使用过的刀具各表面和新刀有任何不同,从理论上讲均属于刀具磨损的范围^[19]。图 7b 为球头刀具超声辅助加工钛合金的刀具表面形貌,对照新刀具(图 7a)可以看出,磨损的位置主要有后面和顶点这两个区域。

当切深较大或者加工倾角为 0° 时,刀尖区域相对磨损较大,但在实际加工中,倾角为 0° 的球头刀具也极少用到。同时由于超声辅助加工主要用于精密加工,切深一般较小,研究刀具顶点磨损的意义相对较小。为了便于分析,将刀具后刀面磨损区域的最大宽

度值定义为磨损量 VB。后刀面磨损量 VB 的大小直接影响到已加工表面的质量,同时后刀面磨损也是目前通用的评价铣刀磨损的方式,因此将刀具后刀面磨损量 VB 作为评估的主要方式。

2.2.1 不同振动模式下刀具后刀面磨损的变化趋势

球头刀具后刀面磨损量 VB 通过超景深显微系统 VHX-2000 测得,图 8 为刀具磨损量 VB 随去除面积的变化趋势图。从图 8 中可以看出,三种加工方式的刀具磨损量均随去除面积的增加而增大。但在同等去除面积情况下,超声纵-扭铣削方式下的刀具后刀面磨损量要小于其他方式,此外,超声纵振的后刀

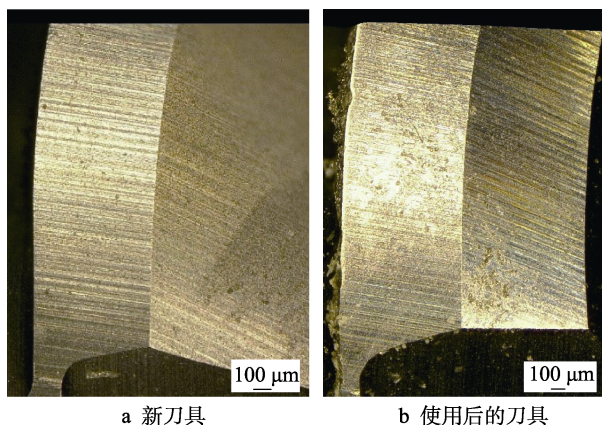


图 7 超声辅助铣削钛合金的刀具表面微观形貌

Fig.7 Microstructure of titanium alloy tool surface in ultrasonic assisted milling: a) new cutting tool, b) cutting tool after use

面磨损量由起初的小于普通铣削,变为随着切削面积的增加有超出其的趋势。这是因为平面铣削中施加超声纵振,刀具时刻不停地以高频振动方式冲击工件加工表面,势必会加大刀具后刀面的磨损。

图 9 为不同去除面积时纵振铣削的刀具后刀面磨损出的“凹坑”。可以看出,随着铣削去除面积的

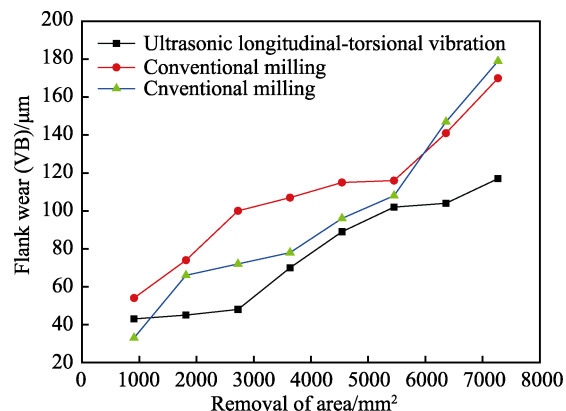


图 8 刀具后刀面磨损量随去除面积增加的趋势

Fig.8 Tendency of tool flank wear to increase with the removal area

增大,这些“凹坑”的数量由少变多,而且其“孔径”也在增加。相对于其他两种加工方式,这种现象并不显著,如图 10 和图 11 所示。此外,从图 11 还可以看出,从球刀顶点轴线方向来看,磨损和未磨损区域所对应的弦长分别约为 1632 μm 和 322 μm,磨损区域对应的角度约为 5°~28°(以顶点为 0°来衡量),这

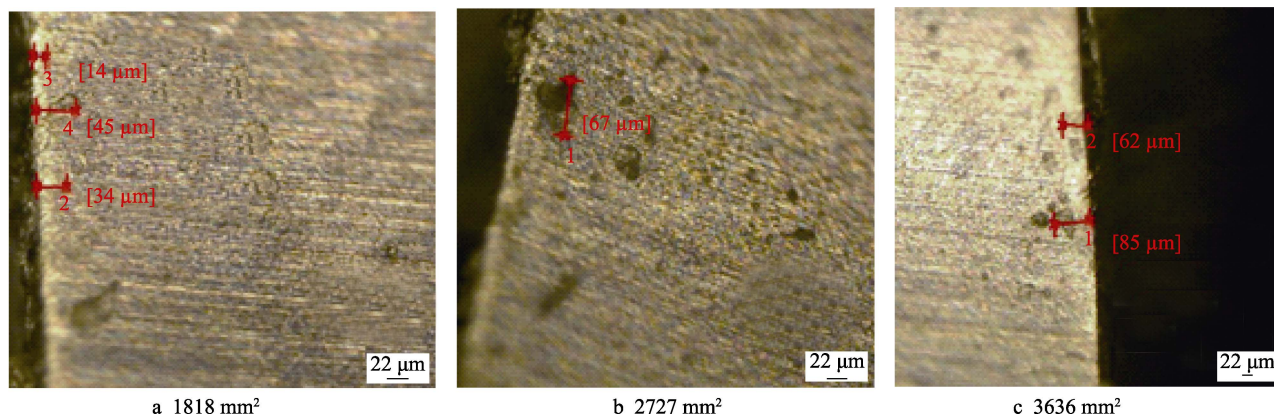


图 9 不同去除面积时纵振切削的后刀面磨损量

Fig.9 Flank wear by longitudinal vibration cutting with different area removal

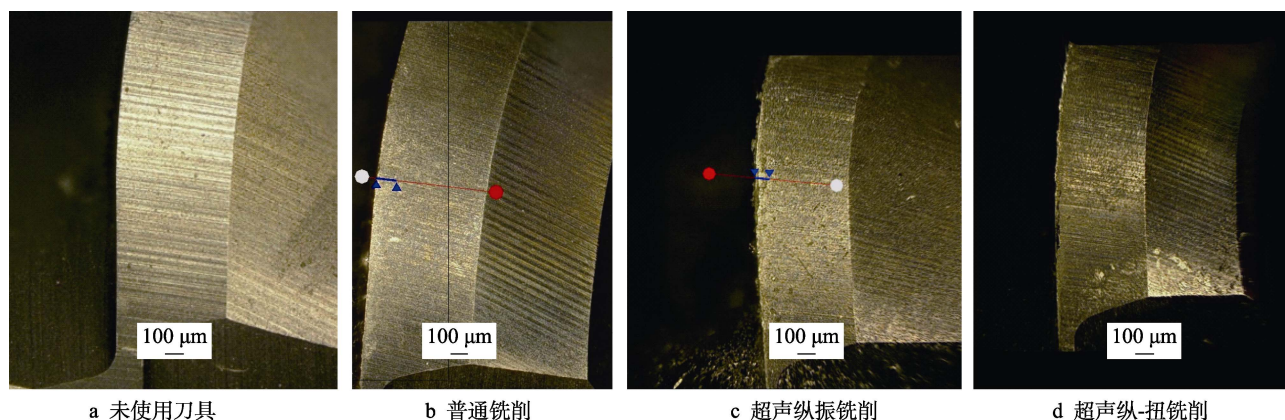


图 10 几种不同铣削方式时刀具后刀面的微观形貌

Fig.10 Micromorphology of flank by several different milling methods: a) new tool, b) cutting tools after ordinary milling, c) cutting tool after ultrasound longitudinal vibration milling, d) cutting tools after ultrasound longitudinal and torsional milling

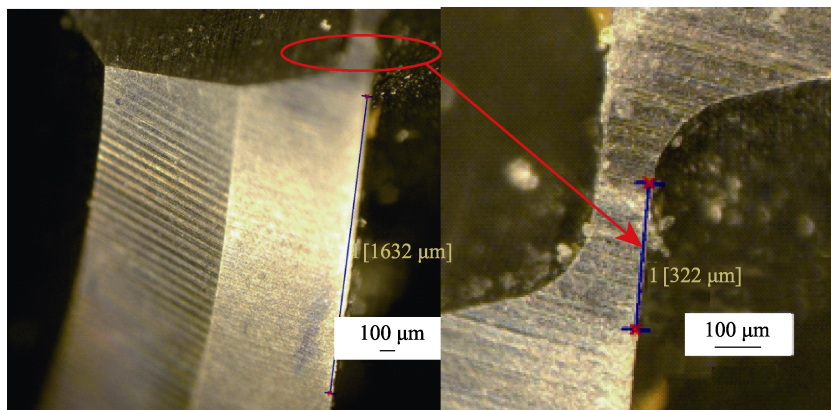


图 11 普通铣削磨损图

Fig.11 Wear map of cutting tool under ordinary milling

和式(2)计算得到的接触区域较为一致。该区域内后刀面磨损量 VB 随着角度的增加而增大,这主要取决于接触区域内刀具有效半径的变化规律。

2.2.2 刀具磨损对工件表面粗糙度的影响

利用 TIME3221 粗糙度仪测试工件加工后的表面粗糙度(垂直进给方向)。图 12 为不同振动模式下,刀具磨损对表面粗糙度的影响。其中,柱形图的高度代表后刀面磨损量 VB ,其上方的数值代表去除面积值;折线图表示表面粗糙度的变化趋势。由图可以看出,随着刀具磨损的不断增大,三种不同振动模式下表面粗糙度值均在增加,但超声纵-扭铣削加工后的表面粗糙度整体要优于其他方式。这主要是因为,该种加工方式中采用了纵-扭复合变幅杆,纵振幅较小,扭转振幅较大,刀-屑的周期分离更主要是从扭转方向来实现,一方面缓解了后刀面不断冲击工件已加工表面这一不利情况,另一方面,对于铣削而言,旋转方向的“刀-屑”周期分离才是“真正”的刀-屑分离。此外,刀具前刀面与切屑之间的摩擦力方向的“反转特性”,抑制了积屑瘤的产生,延缓了刀具的磨损,这对降低工件表面粗糙度起到了积极的作用。

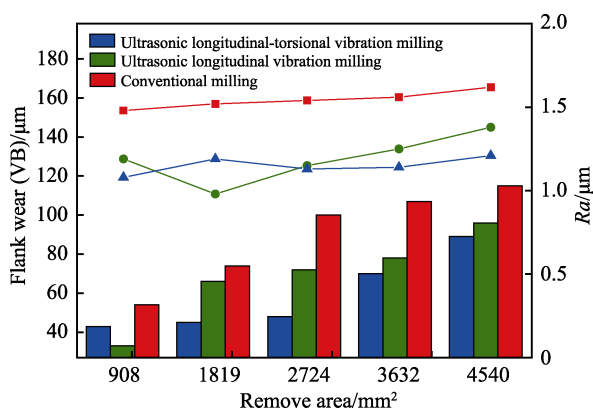


图 12 表面粗糙度随去除面积变化的趋势图
Fig.12 Trend diagram of the surface roughness with the removal of the area

3 结论

1) 通过对超声纵-扭复合振动刀具轨迹的分析,在旋转方向内实现了“刀-屑”的周期分离,避免刀具后刀面过度冲击已加工表面,有助于延长刀具使用寿命。

2) 不同振动方式的钛合金斜面铣削试验表明,超声纵-扭复合加工的刀具磨损量和工件表面质量均小于普通铣削和超声纵振铣削。

3) 斜面铣削试验中球头刀具的磨损区域所对应的弧度,与理论计算得到的结果较为一致。磨损区域内后刀面磨损量 VB 随着角度的增加而增大,这主要取决于接触区域内有效半径的变化规律。

参考文献:

- [1] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的形状与前景[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 1-26.
WANG Qing-jiang, LIU Jian-rong, YANG Rui. High temperature titanium alloys: status and perspective [J]. Journal of aeronautical materials, 2014, 34(4):1-26.
- [2] 郑超, 魏世丞, 梁义, 等. 钛金属材料干摩擦磨损特性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(4): 44-50.
ZHENG Chao, WEI Shi-cheng, LIANG Yi, et al. Dry friction wearing characteristics of titanium materials[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(4): 44-50.
- [3] 冯闯. 基于钛合金切削的硬质合金球头刀具磨损研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
FENG Chuang. Research on the tool wear mechanism of cemented carbide ball end milling machining titanium alloy[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [4] 郑勐, 董永亨. 球头铣刀倾角对硬铝合金工件表面形貌的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(4): 36-41.
ZHENG Meng, DONG Yong-heng. Effect of inclination-angle of ball-milling cutter on surface morphology of

- hard aluminium alloy work-piece[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(4): 36-41.
- [5] 魏兆成, 王敏杰, 王学文, 等. 球头铣刀曲面多轴加工的刀区半解析建模[J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 198-205.
WEI Zhao-cheng, WANG Min-jie, WANG Xue-wen, et al. A semi-analytical cutter workpiece engagement model for ball end milling of sculptured surface[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(1): 198-205.
- [6] 张习芳, 郑侃, 廖文和, 等. 超声振动辅助铣削钛合金的表面完整性研究[J]. 工具技术, 2017, 51(9): 12-16.
ZHANG Xi-fang, ZHENG Kan, LIAO Wen-he, et al. A semi-analytical cutter work-piece engagement model for ball end milling of sculptured surface[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 51(9): 12-16.
- [7] 马超, 张建华, 陶国灿. 超声振动辅助铣削加工钛合金表面摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 115-119.
MA Chao, ZHANG Jian-hua, TAO Guo-can. Wear and friction properties of titanium alloy surface subject to ultrasonic vibration assisted milling[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 115-119.
- [8] 高国富, 马星辉, 董小磊. 超声振动铣削碳纤维复合材料表面特征研究[J]. 现代制造工程, 2009(9): 86-89.
GAO Guo-fu, MA Xing-hui, DONG Xiao-lei. Research on the surface characteristics in ultrasonic milling of CFRP[J]. Modern manufacturing engineering, 2009(9): 86-89.
- [9] PAKTINAT H, AMINI S. Numerical and experimental studies of longitudinal and longitudinal-torsional vibrations in drilling of AISI 1045[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 94(5-8): 2577-2592.
- [10] LI Z, ZHANG D, JIANG X, et al. Study on rotary ultrasonic-assisted drilling of titanium alloys (Ti6Al4V) using 8-facet drill under no cooling condition[J]. Journal of advanced manufacturing technology, 2017, 90(9-12): 3249-3264.
- [11] AMINI S, KHOSROJERDI M R, NOSOUHI R. Elliptical ultrasonic-assisted turning tool with longitudinal and bending vibration modes[J]. Journal of engineering manufacture, 2017, 231(8): 1389-1395.
- [12] AMINIS S, KHOSROJERDI M R, NOSOUHI R. Elliptical ultrasonic-assisted turning tool with longitudinal and bending vibration modes[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part B: journal of engineering manufacture, 2017, 231(8): 1389-1395.
- [13] 皮钧, 徐西鹏. 纵扭共振超声铣削研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(10): 1163-1169.
PI Jun, XU Xi-peng. Research on longitudinal-torsional resonance ultrasonic milling[J]. China mechanical engineering, 2009, 20(10): 1163-1169.
- [14] 童志强, 皮钧. 纵扭共振旋转超声端铣碳纤维复合材料的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(3): 425-430.
TONG Zhi-qiang, PI Jun. Experimental study on longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic face milling of CFRP[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2016, 35(3): 425-430.
- [15] WANG J, ZHANG J, FENG P, et al. Feasibility study of longitudinal-torsional coupled rotary ultrasonic machining of brittle material[J]. Journal of manufacturing science & engineering, 2018, 140(5): 051008.
- [16] ZHAO G, LIU L, WANG D, et al. Mechanical properties of AISI 1045 steel subjected to combined loads of tension and torsion[J]. Experimental techniques, 2018, 42(4): 393-406.
- [17] 唐军, 赵波. 单激励纵-扭复合超声铣削系统研究[J]. 振动与冲击, 2014, 34(6): 57-62.
TANG Jun, ZHAO Bo. A new longitudinal-torsional composite ultrasonic milling system with a single excitation[J]. Journal of vibration and shock, 2014, 34(6): 57-62.
- [18] 唐军, 赵波. 一种新型纵-扭复合超声振动系统的研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(5): 742-747.
TANG Jun, ZHAO Bo. Study on a new type of longitudinal-torsional composite ultrasonic vibration system[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2015, 34(5): 742-747.
- [19] 胡林华. 钛合金超精切削金刚石刀具磨损及其超声振动抑制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
HU Lin-hua. Research on diamond tool wear and its ultrasonic vibration suppression in ultraprecision cutting of titanium alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.