

# 微织构刀具超声铣削航空铝合金的研究

唐军<sup>1</sup>, 陈小静<sup>1</sup>, 赵波<sup>2</sup>

(1.新乡学院, 河南 新乡 453003; 2.河南理工大学, 河南 焦作 454000)

**摘要:** **目的** 为了提高 7075 航空铝合金的使用性能, 将微织构刀具和纵扭复合超声铣削复合, 形成一种微织构刀具超声复合铣削工艺。**方法** 通过微织构刀具铣削和微织构纵扭复合超声铣削两种加工方法, 对 7075-T6 航空铝合金进行切削试验, 分析主轴转速、每齿进给量以及铣削深度对工件表面粗糙度、残余应力、显微硬度和表面织构形貌的影响。**结果** 在切削参数相同的情况下, 微织构纵扭复合超声铣削工艺所获工件表面粗糙度数值相较于微织构刀具铣削工艺加工工件降低了 4.7%~13.2%, 显微硬度增加了 1.13%~2.35%, 工件表面残余应力变为压应力, 最大数值稳定在-10.84 MPa, 加工工件表面形成了较为统一、规整的“鱼鳞网纹”织构形貌。其中, 加工工件表面粗糙度数值与主轴转速成负相关关系, 而与铣削深度、每齿进给量成正相关。加工工件表面显微硬度和残余应力则是随着主轴转速和每齿进给量的增大而增大, 而铣削深度对加工工件的显微硬度和残余应力的影响不显著。**结论** 相比微织构刀具铣削, 微织构纵扭复合超声铣削能有效地改善加工工件表面的完整性。

**关键词:** 微织构刀具; 纵扭复合超声铣削; 表面粗糙度; 显微硬度; 残余应力

**中图分类号:** TG54; TU512 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0356-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.040

## Study on the Ultrasonic Milling Aviation Aluminum Alloy with Micro Texture Cutter

TANG Jun<sup>1</sup>, CHEN Xiao-jing<sup>1</sup>, ZHAO Bo<sup>2</sup>

(1.Xinxiang University, Xinxiang 453003, China; 2.Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**ABSTRACT:** In order to improve the working performance of 7075 aviation aluminum alloy, the micro-texture ultrasonic tool milling process is proposed by combining micro-texture tool and longitudinal-torsional composite ultrasonic milling. The cutting experiments of 7075-T6 aluminum alloy was carried out by micro-texture tool milling and the micro-texture longitudinal-torsional compound ultrasonic milling. The effect of the cutting parameters, such as spindle speed, feed per tooth and milling depth, on the surface roughness, residual stress, microhardness and surface texture of the workpiece was analyzed. The results showed that under the same cutting parameters, the surface roughness of workpiece obtained by microtexture ultrasonic milling was reduced by 4.7%~13.2%, the microhardness is increased 1.13%~2.35%, and the surface maximum residual stress was stabilized at -10.84 MPa. And the “fish scale reticulation” texture was formed on the surface of the machined workpiece. In

收稿日期: 2020-04-25; 修订日期: 2020-07-24

**Received:** 2020-04-25; **Revised:** 2020-07-24

**基金项目:** 河南省高等学校重点科研项目 (21A460022); 河南省科技攻关项目 (202102210113); 国家自然科学基金 (51475148)

**Fund:** Supported by the Key Scientific Research Projects of Higher Education Institutions in Henan Province (21A460022), Henan Province Science and Technology Research Project (202102210113), National Natural Science Foundation of China (51475148)

**作者简介:** 唐军 (1982—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为: 精密超精密加工技术。邮箱: 13782592391@163.com

**Biography:** TANG Jun (1982—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: Fine and ultraprecision technology. E-mail: 13782592391@163.com

**引文格式:** 唐军, 陈小静, 赵波. 微织构刀具超声铣削航空铝合金的研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 356-363.

TANG Jun, CHEN Xiao-jing, ZHAO Bo. Study on the ultrasonic milling aviation aluminum alloy with micro texture cutter[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 356-363.

addition, the workpiece roughness was negatively correlated with spindle speed, and positively correlated with milling depth and feed per tooth. With the increase of spindle speed and feed per tooth, the surface micro-hardness and residual stress of workpiece increased gradually. The effect of milling depth on micro-hardness and residual stress of workpiece was not significant. Finally, compared with micro-texture tool milling, the micro texture longitudinal-torsional compound ultrasonic milling can effectively improve the integrity of workpiece surface.

**KEY WORDS:** micro-texture cutting tool; longitudinal-torsional compound ultrasound milling; surface roughness; micro-hardness; residual stress

7075 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝, 具有良好的抗剥落腐蚀、抗应力开裂和抗疲劳性能等特点, 已广泛应用于航空航天领域, 如用于制造飞行器的整体结构件和减速板等<sup>[1]</sup>。该材料在轻量化、薄壁化的使用过程中, 其性能常会因工件表面的残余应力、粗糙度以及微织构的变化而变化。通常在加工过程中直接改善工件表面质量, 来提高生产效率。目前, 国内外学者提出了许多改善工件表面质量的方法, 包括微织构刀具加工<sup>[2]</sup>、预应力加工<sup>[3]</sup>、插铣加工<sup>[4-5]</sup>、高速加工<sup>[6-7]</sup>、超声加工<sup>[8]</sup>以及复合加工<sup>[9]</sup>等加工工艺。

Olleak<sup>[10]</sup>以三维有限元仿真技术为基础, 研究了无织构、平行沟槽、垂直沟槽、对角沟槽、微坑、斜坑等六种形式对切削力、温度、应力分布及刀具磨损的影响规律, 结果表明, 微织构刀具在降低切削力和切削温度、应力均化、减少磨损等方面具有显著的优势, 其中, 垂直沟槽与斜沟槽的作用效果更加明显。彭锐涛等<sup>[11]</sup>研制了一种轴类零件的预应力车削夹具, 并通过切削试验得出, 较低的切削速度和进给量、较大的背吃刀量对工件表面获取残余压应力是有积极作用的。Yang 等<sup>[12]</sup>对比分析了表面无织构及凹坑、横向、纵向、正交织构五种形式的硬质合金刀具对 TC4 的高速铣削情况, 发现有织构刀具加工的工件, 随切削行程增大, 表面粗糙度呈较缓上升趋势, 表面显微硬化程度整体呈现下降趋势, 表面变质层中的 C 和 O 含量较低。田荣鑫等<sup>[13]</sup>利用硬质合金插铣加工 TC17, 发现工件表面的残余压应力沿深度方向呈先增大、后减小、最后趋于零的趋势。左敦稳、许鸿昊等<sup>[14-15]</sup>将高速切削与预应力加工进行复合, 提出了一种拉伸高速铣削工艺, 通过切削试验发现, 在不影响表面质量的前提下, 可以在工件表面产生有利的残余压应力层, 有效延长了工件疲劳裂纹萌生寿命。刘战强等<sup>[16]</sup>基于热力耦合, 建立了双刃高速切削过程中切屑的温度场, 分析了铝合金工件表面残余拉/压应力的形成机理。Ping Guo 等<sup>[17]</sup>利用两组压电换能器呈 60°布置的方法, 实现了刀尖的椭圆振动, 并对 6061 铝合金进行车削试验, 发现工件表面形成了一致的微织构形貌特征。曹腾<sup>[18]</sup>利用超声椭圆振动对工件表面进行凹坑织构化设计, 发现经设计后的工件摩擦系数显著降低, 工件的耐磨性能得到有效提高。张翔宇

等<sup>[19]</sup>将超声波椭圆振动应用于高速切削 Ti-6Al-4V 中, 发现刀具寿命提高了 300%, 效率提高了 90%, 切削力降低了 50%。姜兴刚等<sup>[20]</sup>利用双弯曲椭圆振动高速铣削 TC4 钛合金薄壁件, 发现刀具的切削力降低了 50%, 刀具颤振得到了抑制, 零件形位精度得到显著提高<sup>[20]</sup>。张臣等<sup>[21]</sup>提出了一种针对超声椭圆振动的转角同步控制方法, 在工件周面形成了矩形阵列织构。佟欣等<sup>[22]</sup>对比分析了变密度微织构和均匀分布微织构球头铣刀对钛合金切削加工性能的影响, 发现前者在提高刀具切削性能和工具表面质量方面均具有显著的优势。

综上所述, 预应力加工和插铣加工对加工工件的结构形状有较大的限制; 高速加工对机床刀柄系统动态平衡要求比较严格 (即 G2.5~G1.0)。相比较而言, 微织构刀具和超声振动不仅对主轴系统要求低, 且对工件形状无特殊要求。基于此, 本文提出了一种微织构超声振动刀具系统, 通过切削试验, 研究分析切削参数对工件表面完整性参数 (表面粗糙度、残余应力、显微硬度和微观织构) 的影响规律。

## 1 微织构超声振动铣削机理

### 1.1 切削系统

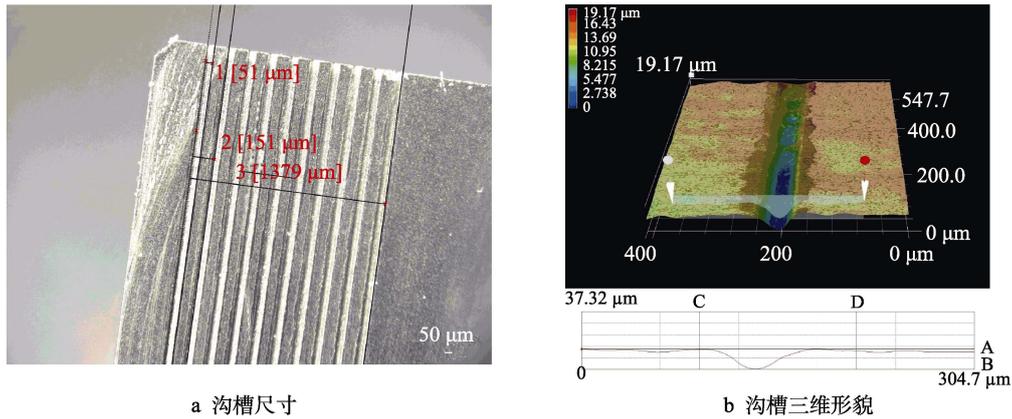
文献[23-24]指出, 较其他几种微织构形式 (纵向沟槽、凹坑以及凸包), 横向沟槽织构改善刀具切削性能的效果更为显著。据此, 在刀具前刀面上布置横向沟槽织构, 如图 1 所示。

纵扭复合超声振动系统结构如图 2 所示。声学系统主要包括五部分: 超声波电源、非接触电能传输系统、纵振换能器、斜槽式纵扭变幅杆以及横向沟槽微织构铣刀。

### 1.2 切削机理分析

加工工件表面形貌特征与刀具形状、运行轨迹有密切关系。本文所使用的纵扭复合超声微织构铣削属于超声椭圆振动加工范畴。在整个切削过程中, 微织构刀具的运动主要有进给运动、旋转切削运动以及纵扭复合超声振动三部分组成。

刀具采用的切削刃为圆角切削刃, 几何模型如图 3 所示, 前刀面为  $A_r$ , 后刀面为  $A_a$ , 切削刃为 S。



a 沟槽尺寸

b 沟槽三维形貌

图1 横向沟槽微织构

Fig.1 The transverse groove micro texture: a) groove size; b) 3D topography of grooves

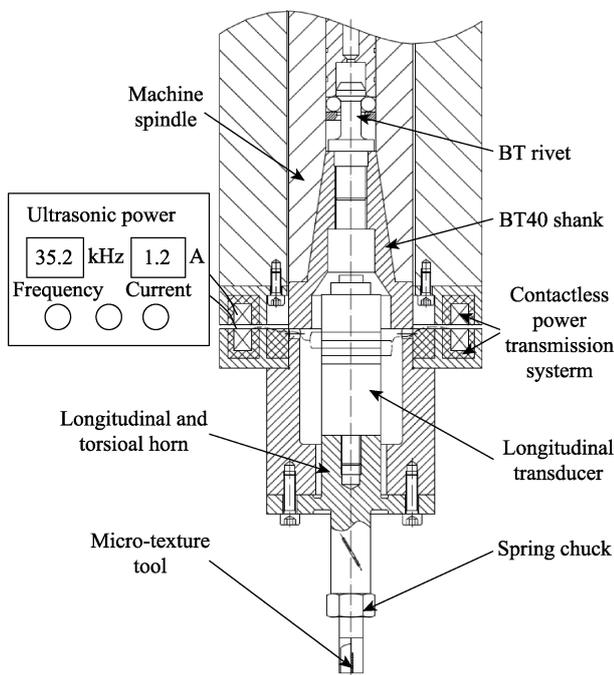


图2 纵-扭复合超声振动系统结构示意图

Fig.2 The schematic diagram of longitudinal-torsional ultrasonic vibration system

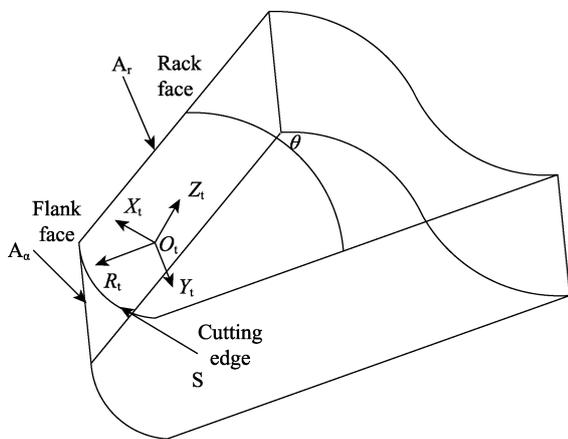


图3 刀具几何模型

Fig.3 Tool geometrical model

切削刃 S 在  $O_t-X_tY_tZ_t$  中可以表示为:

$$\begin{cases} X_t = X_t \\ Y_t = 0 \\ Z_t = \begin{cases} -B-A, & X_t < -C \\ \sqrt{-R_t^2 - X_t^2}, & -C \leq X_t \leq C; \\ B-A, & X_t \geq C; \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $A = X_t \frac{\tan(\pi - \theta)}{2}$ ,  $B = \frac{\sin \theta}{2} + \frac{\tan(\pi - \theta)}{2} \times \frac{\cos \theta}{2}$ ,  $C = \frac{R_t \cos \theta}{2}$ ,  $R_t$  为刀尖圆弧角, 其中  $\theta$  为刀尖角。

刀具在工件坐标系  $O_t-X_tY_tZ_t$  中可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{tw} \\ Y_{tw} \\ Z_{tw} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\gamma$  为坐标系  $O_t-X_tY_tZ_t$  与  $O_w-X_wY_wZ_w$  偏角。

纵扭复合超声振动会使得刀具在空间形成一个三维椭圆振动轨迹。考虑刀具切削参数(切削深度、瞬时切削速度以及进给速度)和振动特征条件,可得刀具运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} X' = A_x \sin(2\pi ft + \phi_x) + v_f t \\ Y' = A_y \sin(2\pi ft + \phi_y) + vt \\ Z' = A_z \sin(2\pi ft + \phi_z) - \alpha_p \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f$  为超声振动频率;  $A_x$ 、 $A_y$ 、 $A_z$  为超声振幅;  $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$  为相位差;  $\alpha_p$  为切削深度;  $v_f$  为进给速度;  $v$  为瞬时切削速度。

据此可得刀具在坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$  中的轨迹为:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{tw} \\ Y_{tw} \\ Z_{tw} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对方程式(4)进行求解计算，可以获得刀具刀尖的运动轨迹（假设相位差为  $90^\circ$ ），如图 4 所示。

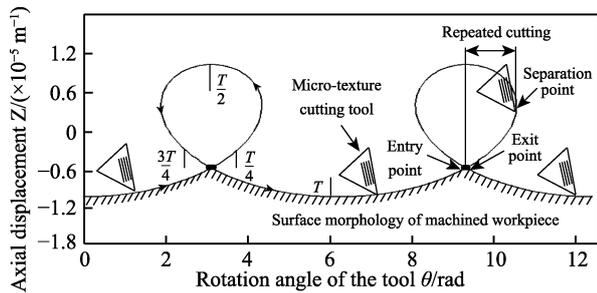


图 4 刀尖运动轨迹特征

Fig.4 The characteristics of tool tip motion trajectory

由图 4 可知，在  $0 \sim \frac{T}{4}$  和  $\frac{3T}{4} \sim T$  的切削过程中，纵扭复合超声振动对刀尖切削速度起到了加速作用，同时在工件表面形成了点压和冲击；在  $\frac{T}{4} \sim \frac{T}{2}$  和  $\frac{T}{2} \sim \frac{3T}{4}$  过程中，刀具前刀面与切屑出现了分离现象，这不仅促进切屑的排出，而且也打开了“切削禁区”，便于切削液的润滑和冷却。此外，由于刀具的前刀面设置有横向沟槽微织构，在切削过程中，刀具-工件产生的大量磨屑便可以由横向沟槽微织构收集，从而减轻刀具的磨粒磨损，同时刀具前刀面与切屑的实际接触面积减少，也使切削力进一步减低。

基于方程式（4），利用数学仿真软件在空间范围内绘制加工工件的表面形貌，如图 5 所示。

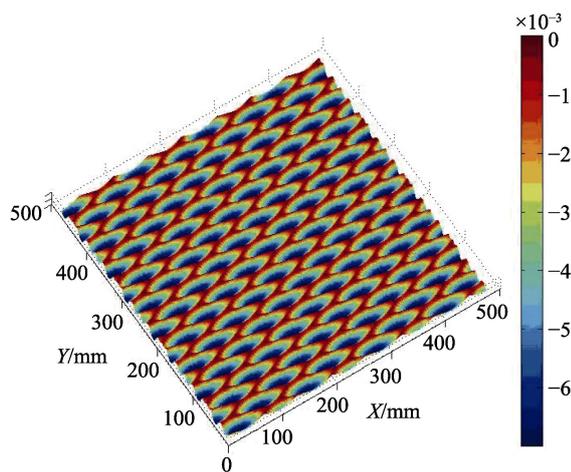


图 5 工件表面织构形貌

Fig.5 Surface texture morphology of work-piece

## 2 试验研究

微织构纵扭复合超声铣削装置加工现场如图 6 所示。在 DMU80 加工中心上，通过 BT40 刀柄将微织构超声铣削系统与电主轴相连，利用平口虎钳来固定工件。

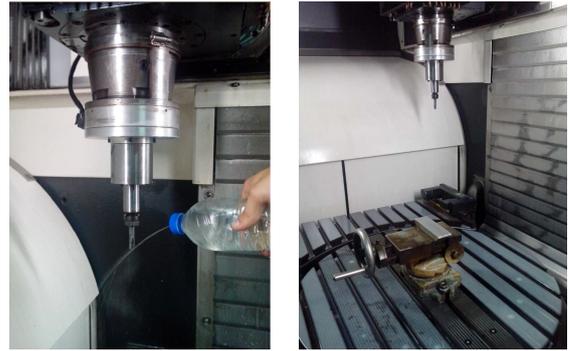


图 6 加工现场

Fig.6 The processing site

本试验利用前期所研制的超声电源与无线电能传输系统<sup>[25]</sup>，原-副边气隙为 0.5 mm，电能传输效率为 65%，超声换能器频率为 35 kHz，变幅杆为调质 45#钢，铣刀基体为调质 40Cr，双直刃铣刀直径为 12 mm，刀片材料为钨钴类硬质合金 YG6X，硬质合金厚度为 2 mm。铣刀与纵扭变幅杆通过弹簧夹头（ER20）相连，再与超声振动系统相连，利用阻抗分析仪（PV70A）进行测试，纵扭复合超声频率为 36.5 kHz，并通过 LK-G10 激光位移传感器（KEYENCE）测量，超声纵振振幅为 7.5  $\mu\text{m}$ ，扭转振幅为 5.2  $\mu\text{m}$ 。铣刀表面沟槽微织构采用北京中航北工研制的金属光纤 M20 打标机制作，激光功率 6 W，频率 20 kHz，速度 70  $\mu\text{m/s}$ 。所制备的沟槽宽度为 51  $\mu\text{m}$ ，跨距为 100  $\mu\text{m}$ ，深度为 12.57  $\mu\text{m}$ 。

试验材料为供应态 7075-T6 铝合金，加工工件的厚度为 50 mm，宽度为 40 mm，显微硬度  $\text{HV}=1370$  MPa，抗拉强度为 524 MPa，密度为 2850  $\text{kg/m}^3$ 。

在相同加工参数下，分别进行无超声振动的微织构刀具铣削和有超声振动的微织构刀具铣削。开启超声电源按钮为微织构超声铣削（Micro-texture ultrasonic milling, MTUM），关闭超声电源按钮为微织构刀具铣削（Micro-texture tool milling, MTTM）。采用单因素试验法，分析加工参数对工件表面粗糙度、显微硬度和残余应力的影响规律。

采用上海泰明光学仪器有限公司研制的 JB-IC 表面粗糙度测试仪对加工工件表面粗糙度  $R_a$  进行 3 次测量，并取平均值；使用 MH-5 显微维氏硬度计测量试件的显微硬度；采用加拿大 PROTO-LXRD X 射线衍射仪测量工件表面残余应力；采用基恩士 VHX-5000 超景深仪测量工件三维形貌特征。

## 3 结果与讨论

### 3.1 切削试验

根据表 1 的试验参数进行切削试验，整个切削过程中，在主轴转速  $N=1400$  r/min，每齿进给量  $f_z=0.03$  mm，铣削深度  $a_p=0.1$  mm 时，微织构刀具超声

加工工件表面的粗糙度数值最小, 为  $Ra=0.588 \mu\text{m}$ , 较相同切削参数下微织构刀具铣削工件表面粗糙度 ( $Ra=0.65 \mu\text{m}$ ) 降低约 9.5%。

设置表 1 所示的切削试验参数。分别改变主轴转速、每齿进给量、铣削深度得到其与粗糙度的关系, 见图 7—9。在相同切削参数条件下, 与微织构刀具加工相比较, 微织构刀具超声铣削加工的工件表面粗糙度比较小, 粗糙度的降幅在 4.7%~13.2%。随主轴转速增大, 工件表面粗糙度呈逐渐下降的趋势, 而铣削深度、每齿进给量与工件表面粗糙度成正比关系。

这主要是由于随着主轴转速增大和施加超声振动, 较好地抑制了刀具表面积屑瘤的形成。微织构纵扭复合铣削的变切削角特性<sup>[26]</sup>, 能够有效降低每齿进

给量和铣削深度在工件表面残留面积的高度, 从而降低工件表面的粗糙度。

在相同切削参数条件下, 与微织构刀具铣削相比较, 微织构刀具超声加工的工件表面显微硬度比较大, 增加了 1.13%~2.35% (图 10—12)。这主要是由于与微织构刀具铣削相比, 微织构纵扭复合铣削的变速切削特性使加工材料应变硬化率得到提高, 流变抗力增加, 加工工件表面的强化效应也得到了增强, 最终形成了较高的表面显微硬度<sup>[26]</sup>。在两种铣

表 1 试验参数  
Tab.1 Test Parameter

Serial Number	Constraint parameters	Variable Parameters
1	$f_z=0.03 \text{ mm}$ , $a_p=0.1 \text{ mm}$	$N=1000, 120, 1400, 1600 \text{ r/min}$
2	$N=1400 \text{ r/min}$ , $a_p=0.1 \text{ mm}$	$f_z=0.03, 0.04, 0.05, 0.06 \text{ mm}$
3	$f_z=0.03 \text{ mm}$ , $N=1400 \text{ r/min}$	$a_p=0.1, 0.2, 0.3, 0.4 \text{ mm}$

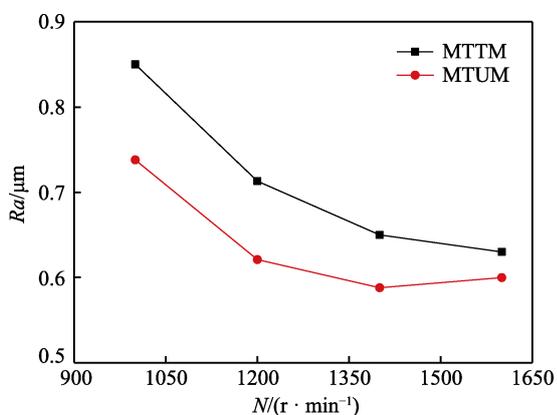


图 7 主轴转速对表面粗糙度的影响  
Fig.7 Effect of rotary speed on the surface roughness

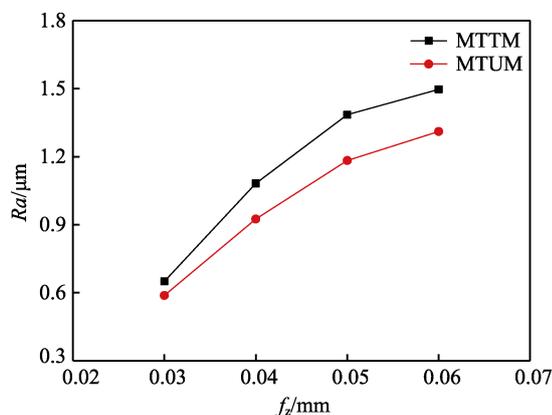


图 8 每齿进给量对表面粗糙度的影响  
Fig.8 Effect of feed per tooth on the surface roughness

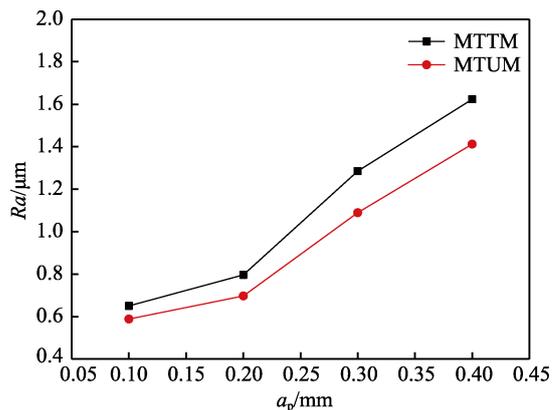


图 9 铣削深度对表面粗糙度的影响  
Fig.9 Effect of milling depth on the surface roughness

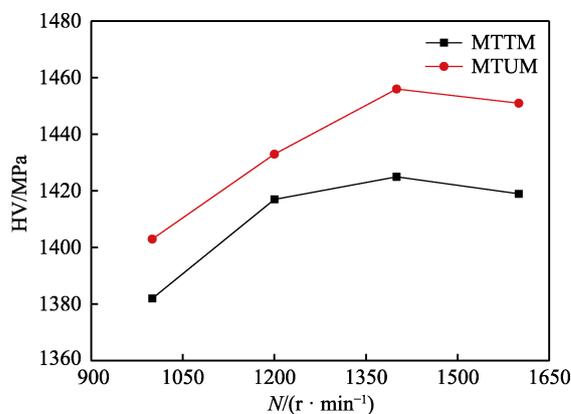


图 10 主轴转速对显微硬度的影响  
Fig.10 Effect of rotary speed on the micro-hardness

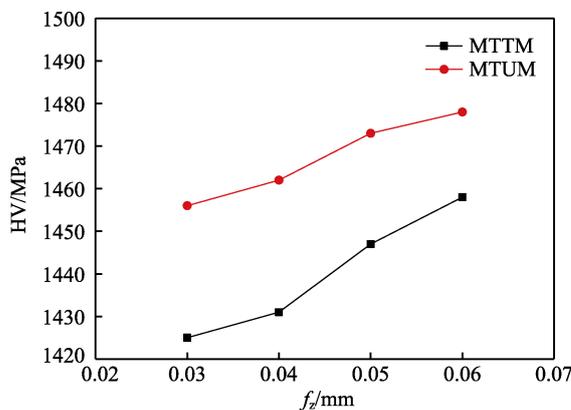


图 11 每齿进给量对显微硬度的影响  
Fig.11 Effect of feed per tooth on the micro-hardness

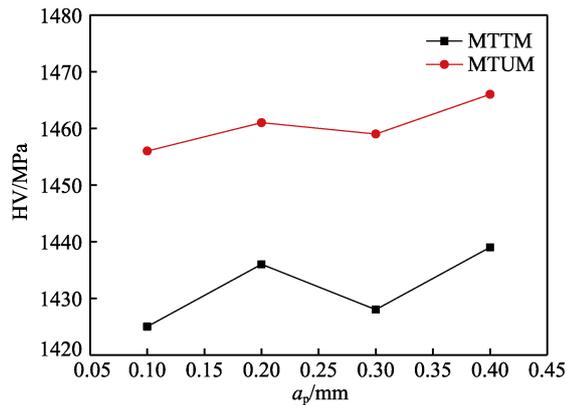


图 12 铣削深度对显微硬度的影响

Fig.12 Effect of milling depth on the micro-hardness

削条件下,加工工件表面的显微硬度随主轴转速的增大,呈现先增大、后减小的趋势,随每齿进给量的增大而增大,而铣削深度对工件显微硬度的影响不显著。

在相同切削参数条件下,微织构刀具超声加工的工件表面深度方向的残余应力以压应力为主,而微织构刀具铣削加工的工件表面深度方向的残余应力以拉应力为主(图 13—15)。在两种铣削条件下,加工工件表面的残余应力随主轴转速和每齿进给量增大而增大,增势显著。铣削深度对工件表面残余应力的影响不显著。

这主要是由于随着主轴转速和每齿进给量的增大,切削温度会急剧上升,在热应力作用下,工件表

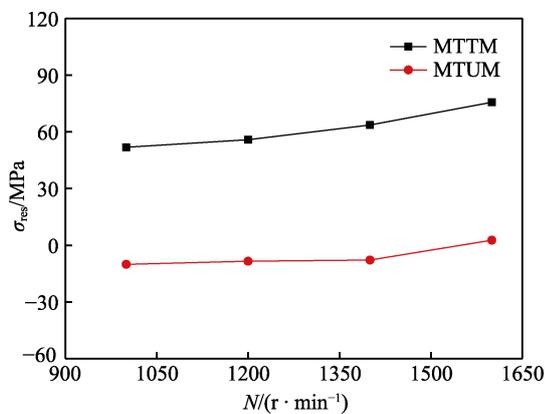


图 13 主轴转速对残余应力的影响

Fig.13 Effect of rotary speed on the residual stress

层形成残余拉应力,其中,每齿进给量对残余拉应力的影响最为显著。相比微织构刀具铣削,微织构刀具在超声加工过程中会对工件表面反复冲击和挤压,这会使表层材料产生塑性变形,增大位错密度,形成残余压应力层和加工硬化。

### 3.2 表面微观形貌特征

在主轴转速  $N=1400$  r/min,每齿进给量  $f_z=0.03$  mm,铣削深度  $a_p=0.1$  mm 时,两种铣削工况下工件表面的微观形貌如图 16 所示。在微织构刀具铣削条件下,加工工件表面有明显的走刀轨迹和划痕;在微织构超

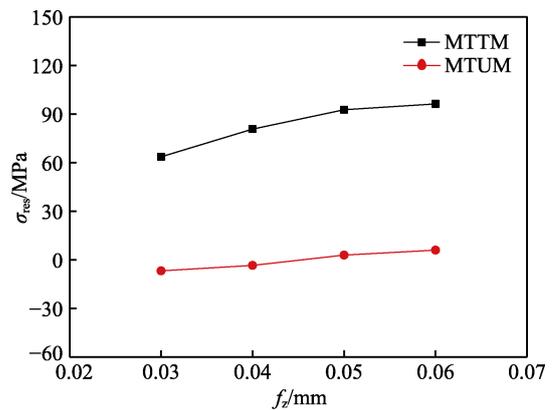


图 14 每齿进给量对残余应力的影响

Fig.14 Effect of feed per tooth on the residual stress

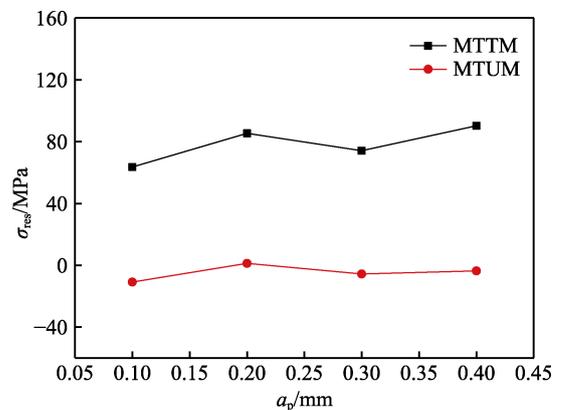
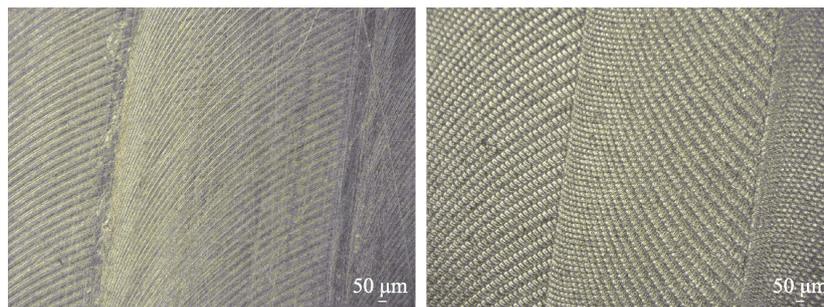


图 15 铣削深度对残余应力的影响

Fig.15 Effect of milling depth on the residual stress



a 微织构刀具铣削

b 微织构刀具超声铣削

图 16 加工工件表面形貌

Fig.16 Surface morphology of work-piece; a) micro-texture tool milling; b) micro-texture ultrasonic milling

声铣削条件下,加工工件表面形成较为规整、统一的“鱼鳞网纹”。由此可见,较微织构刀具铣削,微织构刀具在超声加工过程中具有改善工件表面质量的优势。

## 4 结论

1) 基于微织构刀具的超声铣削运动轨迹特征,利用MATLAB7.1软件仿真分析了加工工件的表面微观形貌特征。

2) 在相同切削参数下,微织构刀具超声铣削所获工件表面的粗糙度值均优于微织构刀具铣削所获工件表面的粗糙度值,其中,主轴转速与工件表面粗糙度呈负相关关系,而铣削深度、每齿进给量与工件表面粗糙度呈正相关关系。微织构刀具超声铣削所获工件表面的显微硬度值均高于微织构刀具铣削所获工件表面的显微硬度值,其中,随主轴转速、每齿进给量的增大,显微硬度呈现增大趋势,而切削深度对显微硬度的影响不显著。微织构刀具铣削所获工件表面呈现残余拉应力,而微织构刀具超声铣削所获工件表面均呈现残余压应力,其中,随着主轴转速和每齿进给量的增大,残余应力呈现逐渐增大的趋势,而切削深度对残余应力的影响不显著。

### 参考文献:

- [1] 唐军. 碳/碳化硅材料纵扭复合超声铣削系统及加工稳定性的研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.  
TANG Jun. Study on the longitudinal-torsional composite ultrasonic milling system of carbon/silicon carbide and machining stability [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015.
- [2] DENG J X, WU Z, LIAN Y S, et al. Performance of car-bide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes[J]. International journal of ref-ractory metals and hard materials, 2012, 30(1): 164-172.
- [3] 孙聪, 姚云龙, 修世超, 等. 预应力条件下系统颤振对磨削工件表面形貌的影响研究[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 326-335.  
SUN Cong, YAO Yun-long, XIU Shi-chao, et al. Influences of system chatter on the ground workpiece's surface topography under prestress condition[J]. Surface technology, 2020, 49(1): 326-335.
- [4] 杨振朝, 张定华, 姚倡锋, 等. TC11 钛合金插铣加工铣削力影响参数的灵敏度分析[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1776-1781.  
YANG Zhen-chao, ZHANG Ding-hua, YAO Chang-feng, et al. Sensitivity analysis of parameters affecting milling force in plunge milling of titanium alloy TC11[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2009, 30(9): 1776-1781.
- [5] 何少林. 二维型腔插铣加工技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
HE Shao-lin. Research on two-dimensional cavity plunge milling technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [6] 辛民, 解丽静, 王西彬, 等. 高速铣削高强高硬钢加工表面残余应力研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(1): 19-23.  
XIN Min, XIE Li-jing, WANG Xi-bin, et al. Study on the surface residual stress of high hardness and strength alloy steel in high speed milling[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(1): 19-23.
- [7] 王兵, 刘战强. 材料动态性能对高速切削切屑形成的影响规律[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(1): 1-19.  
WANG Bing, LIU Zhan-qiang. Effect of material dynamic properties on the chip formation mechanism during high speed machining[J]. Scientia sinica (technologica), 2016, 46(1): 1-19.
- [8] 耿其东, 汪炜. 超声冲击强化铝合金小孔构件的试验研究[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 189-195.  
GENG Qi-dong, WANG Wei. Experimental study of aluminum alloy hole test specimen reinforced by ultrasonic impact[J]. Surface technology, 2019, 48(4): 189-195.
- [9] 胡神阳. 6061 铝合金试件的超声冲击表面强化及其组织性能基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.  
HU Shen-yang. Basic study on strengthening and effect of properties of 6061 aluminum alloy by ultrasonic impact treatment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [10] OLLEAK A, ÖZEL T. 3D finite element modeling based investigations of micro-textured tool designs in machining titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Procedia manufacturing, 2017, 10: 536-545.
- [11] 彭锐涛, 廖妙, 谭援强, 等. 预应力切削镍基高温合金的试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 186-191.  
PENG Rui-tao, LIAO Miao, TAN Yuan-qiang, et al. Experimental study on prestressed cutting of nickel-based superalloys[J]. Journal of mechanical engineering, 2012, 48(19): 186-191.
- [12] YANG Shu-cai, CUI Xiao-yan, ZHANG Yu-hua, et al. Effect of tool wear on surface qualities in milling of TC4 [J]. Materials science forum, 2016, 836-837: 132-138.
- [13] 田荣鑫, 史耀耀, 杨振朝, 等. TC17 钛合金铣削刀具磨损对残余应力影响研究[J]. 航空制造技术, 2011(Z1): 134-138.  
TIAN Rong-xin, SHI Yao-yao, YANG Zhen-chao, et al. Effect of tool wear on residual stress in milling of tita-

- mium alloy TC17[J]. *Aeronautical manufacturing technology*, 2011(Z1): 134-138.
- [14] 许鸿昊, 佐敦稳, 朱笑笑, 等. 拉伸高速铣削对 TC4 钛合金疲劳性能的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2008(2): 260-264.  
XU Hong-hao, ZUO Dun-wen, ZHU Xiao-xiao, et al. Fatigue resistance improvement of TC4 Titanium alloy with high speed milling under stretching fixation[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2008(2): 260-264.
- [15] 许鸿昊, 佐敦稳, 朱笑笑, 等. 拉伸对 TC4 钛合金铣削表面质量的影响[J]. *应用科学学报*, 2008(1): 106-110.  
XU Hong-hao, ZUO Dun-wen, ZHU Xiao-xiao, et al. Influence of stretching fixation on TC4 Ti alloy milling surface quality[J]. *Journal of applied sciences*, 2008(1): 106-110.
- [16] 唐志涛, 刘战强, 艾兴. 高速铣削加工铝合金表面残余应力研究[J]. *中国机械工程*, 2008(6): 699-703.  
TANG Zhi-tao, LIU Zhan-qiang, AI Xing. Experimental on the superficial residual stresses generated by high-speed aluminum alloy[J]. *China mechanical engineering*, 2008(6): 699-703.
- [17] GUO P, EHMANN K F. Development of a tertiary motion generator for elliptical vibration texturing[J]. *Precision engineering*, 2013, 37(2): 364-371.
- [18] 曹腾. 超声椭圆振动辅助切削表面微织构及其摩擦性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.  
CAO Teng. Study on micro texture and friction properties of ultrasonic elliptical vibration assisted cutting surface [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [19] 张翔宇, 隋翥, 张德远, 等. 高速超声振动切削钛合金可行性研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(19): 120-127.  
ZHANG Xiang-yu, SUI He, ZHANG De-yuan, et al. Feasibility study of high-speed ultrasonic vibration cutting titanium alloy[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2017, 53(19): 120-127.
- [20] 姜兴刚, 梁海彤, 卢慧敏, 等. 钛合金薄壁件超声椭圆振动铣削研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(11): 1891-1897.  
JIANG Xing-gang, LIANG Hai-tong, LU Hui-min, et al. Investigation of ultrasonic elliptical vibration milling of thin-walled alloys partys[J]. *Acta armamentaria*, 2014, 35(11): 1891-1897.
- [21] 霍建强, 张臣, 王晓雪, 等. 椭圆振动切削加工的同步控制研究[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(Z1): 66-72.  
HUO Jian-qiang, ZHANG Chen, WANG Xiao-xue, et al. Research on synchronous control of elliptical vibration cutting[J]. *Aeronautical manufacturing technology*, 2020, 63 (Z1): 66-72.
- [22] 佟欣, 杨树财, 何春生, 等. 变密度微织构球头铣刀切削性能多目标优化[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(21): 221-232.  
TONG Xin, YANG Shu-cai, HE Chun-sheng, et al. Multi-objective optimization of cutting performance of variable density micro-texture ball-end milling tool[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2019, 55(21): 221-232.
- [23] SU Yong-sheng, LI Liang, HE Ning, et al. Experimental study of fiber laser surface texturing of polycrystalline diamond tools[J]. *International journal of refractory metals and hard materials*, 2014, 45: 117-124.
- [24] 梁志强, 李蒙招, 陈碧冲, 等. 基于微磨削方法的微织构刀具制备与切削性能研究[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 143-150.  
LIANG Zhi-qiang, LI Meng-zhao, CHEN Bi-chong, et al. Fabrication and cutting performance of micro-textured tools based on micro-grinding[J]. *Surface technology*, 2020, 49(2): 143-150.
- [25] 唐军, 赵波, 李文星. 超声系统中无接触电能传输的设计及性能分析[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2017(6): 44-49.  
TANG Jun, ZHAO Bo, LI Wen-xing. Design and performance analysis of non-contact power transmission in the ultrasonic system[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (nature science edition)*, 2017(6): 44-49.
- [26] 马春翔, 胡德金. 超声波椭圆振动切削技术[J]. *机械工程学报*, 2003(12): 67-70.  
MA Chun-xiang, HU De-jin. Ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2003(12): 67-70.