

二维超声振动车削 6061 铝合金圆筒 表面粗糙度研究

刘自强, 童景琳, 卞平艳, 宰鹏辉, 张志鹏

(河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: **目的** 研究分析二维超声振动车削加工中切削参数和声学参数对 6061 铝合金圆筒表面粗糙度的影响。**方法** 结合二维超声振动特性, 建立二维超声振动车削表面粗糙度理论模型, 采用四因素四水平正交试验, 获得二维超声振动车削 6061 铝合金圆筒过程中切削参数和声学参数对工件表面粗糙度的影响规律, 选取其中 4 组进行二维超声振动车削与普通车削对比实验, 并通过白光干涉仪和超景深显微镜对加工后的工件表面进行观测。**结果** 正交试验结果表明, 切深对加工表面粗糙度的影响不明显, 超声振幅、转速、进给量对加工表面粗糙度的影响程度分别为 84.35%、11.36%、4.29%。超声和无超声对比实验表明, 二维超声振动车削相较于普通车削能显著降低车削表面的粗糙度, 最大下降率为 47.65%, 最小下降率为 11.27%; 相比于普通车削加工, 二维超声振动车削表面具有均匀分布的鱼鳞状微织构。**结论** 加工参数对表面粗糙度影响的显著从高到低为超声振幅>转速>进给量>切深, 最优加工参数为 $f_r=0.15$ mm/r、 $n=400$ r/min、 $A=2$ μ m、 $a_p=0.2$ mm。采用二维超声振动车削的加工方法, 可以显著降低 6061 铝合金圆筒表面的粗糙度值, 并且加工表面有均匀分布的鱼鳞状微织构。

关键词: 二维超声振动车削; 6061 铝合金圆筒; 单激励椭圆振动车刀; 表面粗糙度; 微织构

中图分类号: TB559; TG511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0308-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.028

Surface Roughness of 6061 Aluminum Alloy Cylinder Turned by Two-dimensional Ultrasonic Vibration

LIU Zi-qiang, TONG Jing-lin, BIAN Ping-yan, ZAI Peng-hui, ZHANG Zhi-peng

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454003, China)

ABSTRACT: Two-dimensional ultrasonic vibration turning can effectively reduce cutting temperature, retard tool wear and improve surface quality of machined workpiece. At the same time, due to its special tool tip movement track, the machined

收稿日期: 2022-02-25; 修订日期: 2022-07-03

Received: 2022-02-25; Revised: 2022-07-03

基金项目: 中国博士后面上基金(2019M652534); 2019 省博士后科研项目启动资助(19030071); 河南省高等学校重点科研项目(20A460016)

Fund: The China Postdoctoral Science Foundation (2019M652534); This Project Supported by Henan Postdoctoral Foundation (19030071); Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province (20A460016)

作者简介: 刘自强(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密超精密加工技术与装备。

Biography: LIU Zi-qiang (1996-), Male, Postgraduate, Research focus: precision and ultra-precision machining technology and equipment.

通讯作者: 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。

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

引文格式: 刘自强, 童景琳, 卞平艳, 等. 二维超声振动车削 6061 铝合金圆筒表面粗糙度研究[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 308-317.

LIU Zi-qiang, TONG Jing-lin, BIAN Ping-yan, et al. Surface Roughness of 6061 Aluminum Alloy Cylinder Turned by Two-dimensional Ultrasonic Vibration[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 308-317.

surface presents special micro-texture, which improves the wear resistance of the surface. 6061 aluminium alloy cylinder is characterized by large plasticity and easy deformation, but is difficult to guarantee the surface quality and accuracy after machining by ordinary turning. The experiment was carried out with a single-excitation two-dimensional ultrasonic vibration turning tool. The work aims to analyze the effects of cutting parameters and acoustic parameters on the surface roughness of 6061 aluminum alloy cylinders in two-dimensional ultrasonic vibration turning machining. Four-factor four-level orthogonal experiments were designed and four groups of experiments were selected for comparison between two-dimensional ultrasonic vibration turning and conventional turning. Before the test, the amplitude of the turning tool was measured with the laser displacement sensor LK-G10 and the required amplitude parameters were obtained. In order to eliminate the effects of the factors of the workpiece itself and the swing of the workpiece on the research results, self-made parts blocks were inserted at both ends of the workpiece to prevent the cylinder from being crushed and deformed during clamping, and the tail of the workpiece was held with an ejector pin to prevent the workpiece from swinging. Firstly, the clamped 6061 aluminium alloy cylinder was roughly machined on the lathe and then the workpiece was machined according to the experimental parameters.

The cutting length of each group was 15 mm. The machined workpiece surface was cleaned with an ultrasonic cleaner. Then the surface morphology of the cleaned workpiece was observed by VHX-2000, and the cleaned workpiece surface was measured by BRUKER GTK white light interferometer. Significance level $\alpha=0.01$ was selected to carry out ANOVA and significance analysis on orthogonal test results. Through analysis, it can be seen that the effect of cutting depth on surface roughness was not obvious, and the effect of ultrasonic amplitude on surface roughness was the largest. The degree of effect of ultrasonic amplitude, speed and feed on surface roughness was 84.35%, 11.36% and 4.29% respectively. The comparison experiments between ultrasonic machining and conventional machining showed that the two-dimensional ultrasonic vibration turning can significantly reduce the roughness of the turning surface compared with conventional turning, with a maximum decrease rate of 47.65% and a minimum decrease rate of 11.27%. Compared with conventional turning, the surface machined by two-dimensional ultrasonic vibration turning had uniformly distributed fish scale-like micro-texture. The significant influence of machining parameters on surface roughness from high to low is ultrasonic amplitude>speed>feed>depth of cut, and the optimum machining parameters are obtained as follows: $f_t=0.15$ mm/r, $n=400$ r/min, $A=2$ μ m, $a_p=0.2$ mm. By means of two-dimensional ultrasonic vibration turning, the roughness value of 6061 aluminium alloy cylinder surface can be significantly reduced, and the machined surface has fish-scale microstructure with uniform distribution.

KEY WORDS: two-dimensional ultrasonic vibration turning; 6061 aluminum alloy cylinder; single-excitation elliptical vibration turning tool; surface roughness; microstructure

6061 铝合金圆筒由于其结构紧凑^[1]、质量轻、综合性能好、节省材料,在现代航天工业和国防工业中得到了广泛的应用^[2-3]。但由于其塑性大、易变形等特点,工件的表面质量和精度^[4-5]在普通车削中很难达到要求,制约了航空航天等相关技术装备的发展^[6]。因此,对 6061 铝合金圆筒的加工技术及装备的研究具有重要意义^[7-9]。

超声椭圆振动车削是通过刀具或工件施加二维超声振动,使刀尖按照椭圆轨迹振动,达到高频间歇振动切割的加工方式^[10]。超声加工能有效地改善被加工工件的表面质量^[11],降低切削力^[12-13],减少刀具磨损,延长刀具寿命^[14],提高零件系统的稳定性^[15]。国内外学者对二维超声椭圆振动加工技术及设备进行了大量研究。

Chong 等^[16]搭建了薄壁盘形件车削过程中二维超声椭圆振动综合实验平台,结果表明,超声椭圆振动加工能显著降低切削变形和切削力,提高加工质量。王跃等^[17]设计了一种以 2 个相互垂直方向同时激

励的超声波椭圆振动车削系统的结构,并对其进行了动力学分析。Yu 等^[18]进行了超声波椭圆振动切削实验和仿真,分析了切削参数对超声波椭圆振动加工过程中切削阻力、切屑形态和表面完整性的影响。何俊等^[19]通过仿真证明,相位差为 90°时,切削力最小,切削效果最佳。Chen 等^[20]设计了三维超声振动装置,虽然研究获得了三维超声振动,但需要多套超声振动设备将振动应用到不同的方向,并且需要对多套振动设备的共振频率进行调整。Schuber 等^[21]在切削方向、径向和进给方向分别施加单向超声振动,实现了颗粒增强铝基复合材料的超声振动车削,并分析了不同超声参数和切削参数下工件的表面粗糙度与表面形貌的变化及形成规律。王思越^[22]、张蓉蓉^[23]通过切削表面形貌的成形原理和超声振动理论,运用 MATLAB 软件建立了超声振动外圆车削工件表面的三维形貌模型,研究了切削参数和刀具角度对加工表面微观形貌及纹理走向的影响。刘汇清等^[24]设计了一种垂直型的双纵向超声波椭圆振动切削装置,并对双

纵向超声波椭圆振动系统做了模态分析和谐波响应分析。吴得宝等^[24]分析了超声振动车削 6061 铝合金表面的三维形貌,得出了超声辅助车削能有效抑制普通车削过程中出现的碎片、鳞屑等表面缺陷的结论。郑建新等^[25]研究发现,高速二维超声加工后,7050 铝合金表面更加光滑,表面组织更加致密,有效降低了表面粗糙度值。

目前,二维超声椭圆振动车削大多通过不同方向的单个振动^[26]合成所需的多维振动。在加工过程中,二维超声椭圆振动车削刀尖运动的形状受到两相激励所产生的相位差、振幅、进给速度和刀具形状^[27]的影响。本试验采用单激励非对称超声椭圆振动车刀,通过在刀体上施加单向超声频振动信号,利用车刀本身的结构特性来实现二维超声椭圆振动。基于超声椭圆振动特性和加工表面形成机理,利用单激励非对称超声椭圆振动车刀进行了 7075 铝合金圆筒车削试验,对二维超声椭圆振动车削后的表面粗糙度和形貌进行研究,揭示了各加工参数和振幅对加工表面粗糙度的影响程度。

1 二维超声振动车削理论分析

1.1 二维超声振动车削模型

二维超声振动车削系统模型如图 1 所示,包括超声波发生器、换能器、变幅杆和纵弯工具头等部分。超声波发生器会将电信号传入到换能器中,换能器中的压电陶瓷片则将接收到的电信号转化成变幅杆的振动信号,利用纵弯工具头的特殊非对称结构,在刀尖处复合形成椭圆运动,从而实现单激励超声椭圆振动车削。

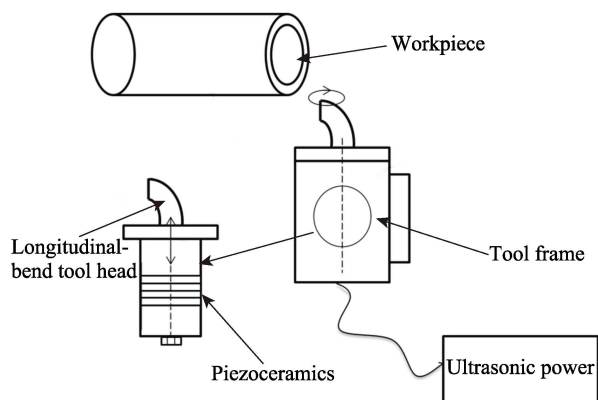


图 1 二维超声振动车削系统

Fig.1 Two-dimensional ultrasonic vibration turning system

1.2 二维超声振动运动特性分析

普通车削切削过程未附加主动激励的超声信号,则切削刃轨迹方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} X(t) = (r - a_p) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t}{60}\right) \\ Y(t) = \frac{n f_r t}{60} \\ Z(t) = (r - a_p) \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{60}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: X 为切深方向位移; Y 为进给方向位移; Z 为切削方向位移; r 为工件半径, mm; a_p 为切削深度, mm; n 为主轴转速, r/min; t 为切削时间, s; f_r 为进给量, mm/r。

图 1 所示二维超声振动车刀是单激励,纵向振动频率和轴向振动频率原则上一致,轴向和径向振动方向上的相位差夹角 θ 为固定值,因此二维超声振动的运动轨迹在 X 、 Z 平面内的轨迹方程为:

$$\begin{cases} Z(t) = A_1 \cos(2\pi f t + \theta) \\ X(t) = A_2 \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: A_1 、 A_2 分别为附加在 Z 、 X 方向上的超声振幅, μm ; f 为振动频率, kHz; θ 为 Z 、 X 方向的相位差。

在切削过程中,为了使刀具-工件分离,切削速度 v_F 与刀尖的最大振动速度(临界切削速度)的比值 η_{SR} 应满足 $\eta_{SR} < 1$ ^[28], 其中:

$$\eta_{SR} = v_F / 2\pi f A \quad (3)$$

将式(2)与式(1)联立可得二维超声振动刀尖运动轨迹方程,如式(4)所示。

$$\begin{cases} X(t) = A_2 \sin(2\pi f t + \theta) + (r - a_p) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t}{60}\right) \\ Y(t) = \frac{n f_r t}{60} \\ Z(t) = A_1 \cos(2\pi f t + \theta) + (r - a_p) \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{60}\right) \end{cases} \quad (4)$$

通过 MATLAB 计算得出二维超声振动车削和普通车削刀尖三维空间运动轨迹,如图 2 所示。普通车削的刀尖轨迹是一条直线,二维超声振动车削的轨迹是一条螺旋上升的曲线。

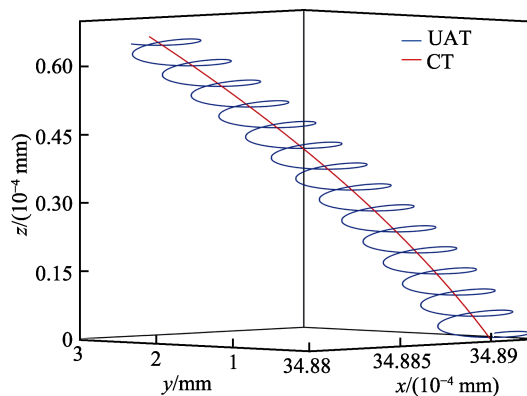


图 2 刀尖运动轨迹

Fig.2 Tool tip trajectory

二维超声振动车削过程模型如图 3 所示。可以发现, 二维超声振动车削过程中, 车刀的刀尖轨迹为椭圆轨迹, 刀具不是连续切削工件, 而是因刀尖椭圆轨迹的特征呈现切削—分离—切削的高频断续切削。图 3 中, A 点是刀具与工件之间开始切削过程的接触点; A_i 对应切削时间 t_i ; B 点为切削时刀具的最低点; C 点为切削时刀具与工件的接触点; D 点为刀具与工件分离点; b 为椭圆轨迹 X 方向振幅, dI 为进给方向振纹宽度, R_{th} 为切削方向理论振纹高度, 根据参考文献[29]可知:

$$R_{th} \approx \left(\frac{A_t}{4} \right) \left(\frac{v_F}{fA_C} \right)^2 \quad (5)$$

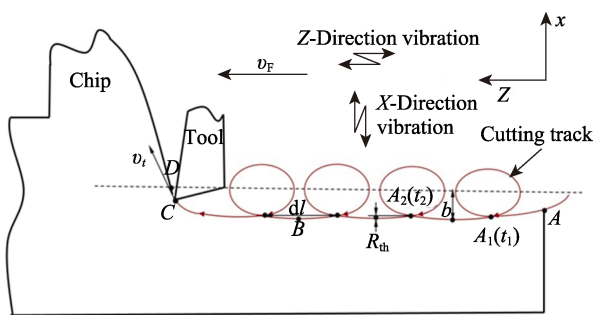


图 3 二维超声振动车削过程

Fig.3 Two-dimensional ultrasonic vibration turning process

2 二维超声振动车削表面粗糙度建模

2.1 二维超声振动车削表面粗糙度理论模型

车削加工时, 工件旋转为主运动, 通过刀具对工件表面材料进行挤压、剪切等作用, 材料发生变形, 最终被去除。但是会存在不完全去除的情况, 而且在已加工后的表面会产生弹性回复, 在表面产生表面粗糙度, 其大小由表面残留高度 h 决定。因此, 在表面粗糙度建模中, 主要考虑工件表层发生的微塑性变形和弹性回复的影响。残留高度 h 受刀具几何形状和切削用量的影响, 车削过程时如图 4 所示。

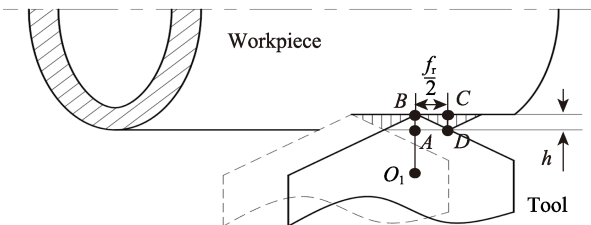


图 4 车削过程表面残留高度的形成

Fig.4 Formation of surface residual height during turning

由图 4 可知, 车削后残留高度 $CD=h$, $O_1B=R$, BC 之间的距离为 $f_r/2$, 由几何关系可知:

$$\left(\frac{f_r}{2} \right)^2 + (R-h)^2 = R^2 \quad (6)$$

式中: R 为刀尖圆弧半径。

实际加工中, 一般有 $h \ll R$, 因此可得残留面积高度 h 为:

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{f_r^2}{4}} \quad (7)$$

基于分子-机械摩擦理论, 由于刀具和材料的挤压摩擦, 在工件上会引起微塑性变形, 以及少量的弹性回复, 已加工表面会产生塑性流动高度差 Δh , 可以用式 (8) 表示。

$$\Delta h = h_p - h_e \quad (8)$$

式中: h_p 为工件的塑性变形深度; h_e 为工件的弹性回复高度。

基于 Kragelsky 摩擦理论中分子-机械摩擦理论可知^[30], 对于在切削加工过程中存在塑性变形的材料来说, 塑性变形深度可以表示为:

$$h_p = 2R \left(1 - \frac{0.33H}{\sigma_m} \right) \quad (9)$$

根据 Hertz 弹性接触理论可知^[31]:

$$h_e = \left(\frac{9}{16} \frac{P}{E^2 R} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

式中: H 为工件材料硬度; σ_m 为工件材料流动应力; E 为工件的弹性模量; P 为工件在加工时受到的垂直于加工表面的压力。

二维超声振动车削加工时, 刀具的实际运动状态会发生改变, 二维超声振动车削的过程实际上是高频的断续切削, 刀具以很大的切削速度切入工件, 同时伴有一个很大的瞬时加速度。

超声沿 X 方向振动时, 对式 (4) 求导可得径向加速度 $a_x(t)$:

$$a_x(t) = -A_2(2\pi ft)^2 \sin(2\pi ft) \quad (11)$$

则存在的径向冲击力为:

$$F_x = ma_x = -A_2 m(2\pi ft)^2 \sin(2\pi ft) \quad (12)$$

在超声振动车削时, 径向力为:

$$F' = P + F_x = P - A_2 m(2\pi ft)^2 \sin(2\pi ft) \quad (13)$$

则超声加工时工件的弹性回复高度为:

$$h_e = \left(\frac{9}{16} \frac{P - A_2 m(2\pi ft)^2 \sin(2\pi ft)}{E^2 R} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

联立式 (9) 和式 (14) 可得^[32]:

$$\Delta h = 2R \left(1 - \frac{0.33H}{\sigma_m} \right) - \left(\frac{9}{16} \frac{P - A_2 m(2\pi ft)^2 \sin(2\pi ft)}{E^2 R} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

超声加工时残留面积高度^[33]:

$$H' = h + R_{th} \quad (16)$$

由式 (3) 和式 (7) 可知:

$$H' = R - \sqrt{R^2 - \frac{f_r^2}{4}} + \left(\frac{A_t}{4} \right) \left(\frac{v_F}{fA_C} \right)^2 \quad (17)$$

则超声加工时,考虑弹性变形和微塑性变形这2部分对表面粗糙度的影响时,表面粗糙度理论模型为:

$$Ra' = \left[R - \sqrt{R^2 - \frac{f_r^2}{4}} + \left(\frac{A_t}{4} \right) \left(\frac{v_F}{fA_C} \right)^2 \right] + \left[2R_t \left(1 - \frac{0.33H}{\sigma_m} \right) - \left(\frac{9}{16} \frac{P - A_2 m (2\pi f t)^2 \sin(2\pi f t)}{E^2 R_t} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (18)$$

在二维超声振动车削过程中,由于机床的稳定性和变幅杆的精度会存在少许误差,因此需要对二维超声振动车削表面粗糙度理论模型进行修正,设修正系数为 λ ,则表面粗糙度理论模型最终公式为:

$$Ra' = \lambda \left\{ \left[R - \sqrt{R^2 - \frac{f_r^2}{4}} + \left(\frac{A_t}{4} \right) \left(\frac{v_F}{fA_C} \right)^2 \right] + \left[2R_t \left(1 - \frac{0.33H}{\sigma_m} \right) - \left(\frac{9}{16} \frac{P - A_2 m (2\pi f t)^2 \sin(2\pi f t)}{E^2 R_t} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \right\} \quad (19)$$

从式(19)可以得出,影响二维超声振动车削表面粗糙度的因素主要包括转速、进给和振幅,切深对二维超声振动车削表面粗糙度的影响可以忽略不计。这为试验方案设计提供了理论支持。

2.2 表面粗糙度仿真

基于上述的表面粗糙度理论模型,对不同参数下的粗糙度值进行了仿真,仿真参数与结果见表1。可以看出,二维超声振动车削表面粗糙度值明显低于普通车削得到的表面粗糙度值。

表 1 Ra 仿真结果
Tab.1 Simulation results of Ra

Number	$f_t/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$	a_p/mm	$Ra/\mu\text{m}$
A-1	0.05	300	1	0.05	0.432
A-2	0.05	400	2	0.1	0.523
A-3	0.05	500	3	0.15	0.123
A-4	0.05	600	4	0.2	0.531
C-1	0.05	300	0	0.05	0.568
C-2	0.05	400	0	0.1	0.609
C-3	0.05	500	0	0.15	0.234
C-4	0.05	600	0	0.2	0.671

3 二维超声振动车削 6061 铝合金圆筒试验

3.1 试验条件

试验平台如图5所示。试验车削所选用的机床为

普通车床 CA6140,将单激励非对称二维超声振动车刀安装在机床刀架上,超声波发生器通过二维超声振动车刀尾部的电缆连接,从而将接收的电信号传入二维超声振动车刀内部的换能器中,换能器则将电信号转化为刀具的振动信号,使车刀发生二维振动。工件选用外径 $R=70 \text{ mm}$,壁厚 $h_0=5 \text{ mm}$,长度 $L_0=600 \text{ mm}$,6061 铝合金圆筒。刀具参数见表2。

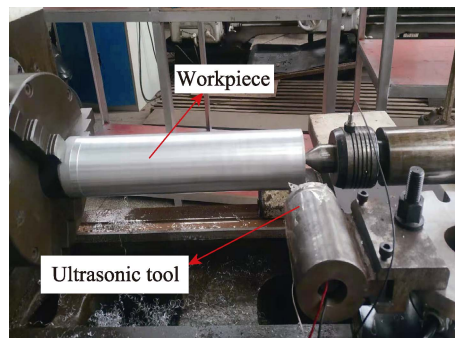


图 5 二维超声振动车削试验平台
Fig.5 Experimental platform for two-dimensional ultrasonic vibration turning tool

表 2 刀具参数
Tab.2 Cutting tool parameters

Material	Cemented carbide
Anterior horn/(°)	0
Posterior angle/(°)	7
Tip radius/mm	0.4
Knife tip angle/(°)	55
Principal deflection angle/(°)	62.5
Blade inclination/(°)	0

为了研究超声振幅、切深、转速及进给量对加工表面的影响程度,设计了正交试验方案,试验方案见表3。为了验证超声椭圆振动车削对6061铝合金圆筒件的优越性,选取了其中4组试验结果进行普通车削的对比实验。

表 3 正交试验因素水平
Tab.3 Orthogonal test factors level

Levels	Speed/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	Feed rate/ ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	Cutting depth/mm	Amplitude/ μm
1	300	0.05	0.05	1
2	400	0.10	0.10	2
3	500	0.15	0.15	3
4	600	0.20	0.20	4

3.2 测试条件

利用 KEYENCE 公司生产的激光位移传感器(LK-G10)进行振幅测量,采样频率为50 kHz。将超声波发声器的频率调至与二维超声振动车刀固有

频率相匹配的频率段,对二维超声振动车刀振幅和轨迹进行测量。二维超声振动车刀振幅的测试现场如图 6 所示。使用超景深显微镜 VHX-2000 对工件车削表面微观形貌进行观测,利用 BRUKER GTK 白光干涉仪对工件表面参数进行测量,采样面积为 $350\text{ }\mu\text{m}\times 475\text{ }\mu\text{m}$,采样参数为 $5\text{ }000\text{ }\mu\text{m/s}$,采样间距为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

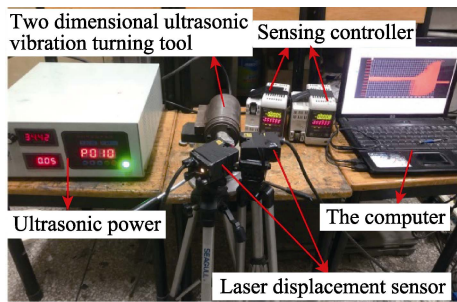


图 6 二维超声振动车刀振幅值测量
Fig.6 Vibration amplitude measurement of two-dimensional ultrasonic vibration turning tool

4 试验结果

4.1 二维超声振动车刀轨迹

利用 KEYENCE 公司生产的激光位移传感器 (LK-G10) 进行测量,将超声波发声器的频率调至与二维超声振动车刀固有频率相匹配的频率,测量结果如图 7 所示。可以发现,纵向振幅为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$,弯转振幅值为 $0.90\text{ }\mu\text{m}$ 。由于刀具是单激励非对称结构的二维超声振动车刀,其纵向振动与弯转振动振幅比值固定,比值为 1.78。将测量到的多组振幅数据导入 Origin 软件,绘制出的振动轨迹如图 8 所示。可以看出,实际振动轨迹近似为椭圆,与理论分析一致。

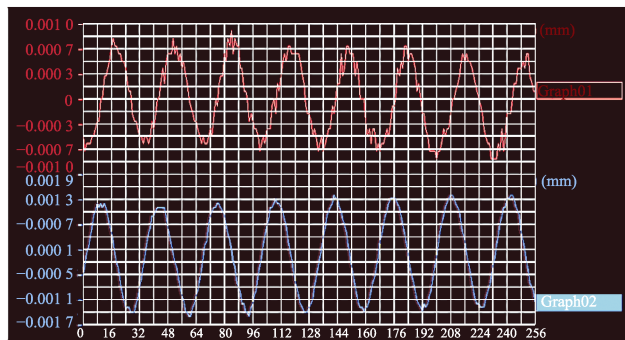


图 7 二维超声振动车刀振幅测量结果
Fig.7 Amplitude measurement results of two-dimensional ultrasonic vibration turning tool

4.2 试验结果分析

使用 BRUKER GTK 型白光干涉仪对加工后的工件表面进行测量,为了降低偶然因素带来的误差,在切削后的工件上分别取 3 个点进行测量,然后取平均

值,结果见表 4。对表 4 中的表面质量参数进行极差分析和显著性分析,结果见表 5 和表 6。

通过表 5 的分析结果,可以得出最优加工参数为: $f_r=0.15\text{ mm/r}$ 、 $n=400\text{ r/min}$ 、 $A=2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $a_p=0.2\text{ mm}$ 。由表 6 可知,因素切深的均方差为 0.002 696,小于误差的均方差 0.003 944,说明切深对试验结果 Ra 的影响应当归为误差,切深对表面粗糙度的影响可以忽

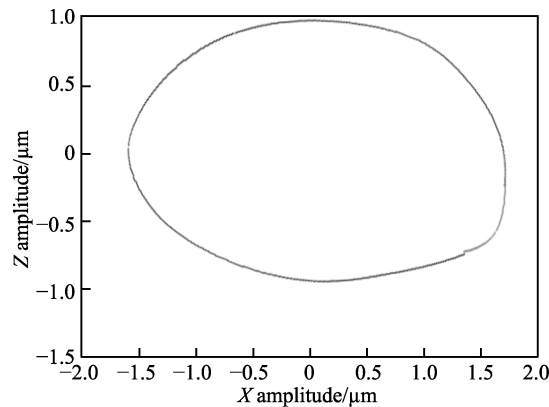


图 8 椭圆振动轨迹
Fig.8 Diagram of elliptical vibration trajectory

表 4 正交试验结果
Tab.4 Orthogonal test results

Number	$f_r/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$	a_p/mm	$Ra/\mu\text{m}$
T-1	0.05	300	1	0.05	0.197
T-2	0.05	400	2	0.1	0.553
T-3	0.05	500	3	0.15	0.465
T-4	0.05	600	4	0.2	0.514
T-5	0.1	300	2	0.15	0.3
T-6	0.1	400	1	0.2	0.197
T-7	0.1	500	4	0.05	0.552
T-8	0.1	600	3	0.1	0.485
T-9	0.15	300	3	0.2	0.307
T-10	0.15	400	4	0.15	0.536
T-11	0.15	500	1	0.1	0.134
T-12	0.15	600	2	0.05	0.41
T-13	0.2	300	4	0.1	0.441
T-14	0.2	400	3	0.05	0.487
T-15	0.2	500	2	0.2	0.511
T-16	0.2	600	1	0.15	0.112

表 5 Ra 方差分析
Tab.5 Variance analysis of Ra

	$f_r/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$	$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$A/\mu\text{m}$	a_p/mm	Error
K1	0.432 25	0.443 25	0.443 5	0.411 43	0.432 25
K2	0.383 44	0.311 25	0.16	0.403 25	0.380 94
K3	0.346 75	0.415 44	0.436	0.353 25	0.378 25
K4	0.387 75	0.380 25	0.510 69	0.382 25	0.358 75
R	0.085 5	0.132	0.350 687 5	0.058 18	0.073 5

表 6 Ra 显著性分析
Tab.6 Significance analysis of Ra

Factor	TSS	Freedom	MSE	F ratio	Contribution rate/%	Significance
f_r	0.014 72	3	0.004 91	1.477 95	4.29	*
n	0.039 02	3	0.013 01	3.918 19	11.36	*
A	0.289 68	3	0.096 56	29.087 5	84.35	.
a_p	0.008 09	3	0.002 70	*	*	*
Error 1	0.011 83	3	0.003 94	*	*	
Error 2	0.019 92	6	0.003 32	*	*	

$$F_{0.05}(3,6)=4.76, F_{0.01}(3,6)=9.78$$

略不计。这样,误差的离差平方和、自由度和均方值都会随之变化,如误差 2 所示。查临界值 $F_{0.05}(3,6)=4.76$, $F_{0.01}(3,6)=9.78$, 所以对于给定显著性水平 $\alpha=0.01$, 超声振幅对试验结果 Ra 有着显著影响。通过显著性分析可知, 超声振幅对表面粗糙度的贡献率最大, 为 84.35%; 其次是转速, 贡献率为 11.36%; 进给量的影响最小, 其贡献率仅为 4.29%。

分析正交试验结果, 得出加工表面粗糙度与切削参数之间的关系, 如图 9 所示。从图 9 可知, 随着超声振幅的不断增大, 表面粗糙度 Ra 呈现先减小、后增大的趋势。当振幅 $A=2 \mu\text{m}$ 时, 表面粗糙度 Ra 最小。出现这一现象的原因是, 当超声振幅较小时, 较小的超声振幅对表面修整作用还不是很明显; 随着超声振幅的增大, 椭圆振动也相应地增大, 刀具与工件的周期性分离与接触会造成刀具在进给方向对加工表面产生周期性的熨压和修整, 使得表面质量得到改善。但是较大的超声振幅会对切削表面产生较大的冲击, 影响切削表面质量, 因此表面粗糙度值会出现随着超声振幅的增大而增大的现象。由此可知, 在加工时应选择合适的超声振幅。

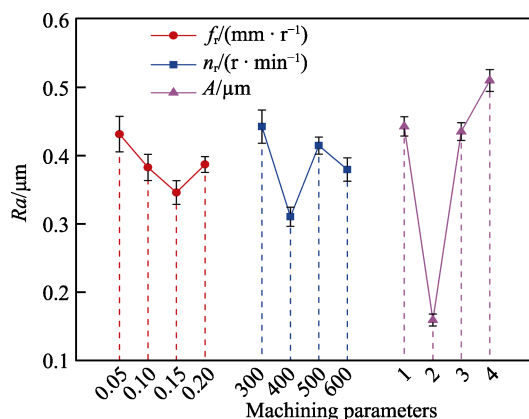


图 9 加工参数对表面功能参数 Ra 的影响
Fig.9 Effect of machining parameters on surface function parameter Ra

随着转速的增加, 表面粗糙度 Ra 呈现出先减小、后增大、再减小的趋势。当转速达到 400 r/min 时, 表面粗糙度 Ra 达到最小值。根据式 (3) 的分析可知,

这是因为切削速度随着转速的增大而增大, 当切削速度超过临界切削速度时, $\eta_{SR}>1$, 此时超声分离现象会减弱, 二维超声振动车削的断续切削效果被弱化, 二维超声振动车削加工被弱化为二维纵向超声振动车削加工, 导致加工表面粗糙度增大; 随着转速持续增大, 转速对 Ra 的影响占主要因素, 使得切削表面粗糙度值也随之减小。因此, 在加工时, 应选择与二维超声振动车削加工振幅相适的转速。

随着进给量的增大, 表面粗糙度 Ra 呈现出先增大、后减小的趋势。结果表明, 进给量与加工表面粗糙度存在非线性关系, 在加工时选择合适的进给能显著降低加工表面粗糙度。

为了探究二维超声振动车削相对于普通车削的优越性, 选取正交试验中编号 3、7、11、15 进行了二维超声振动车削与普通车削铝合金对比实验, 结果如图 10 所示。在选取的 4 组实验中, 二维超声振动车削表面粗糙度相较于普通车削, 有不同程度的降低, 最大下降率为 47.65%, 最小下降率为 11.27%, 平均下降了 26.17%。结果表明, 二维超声振动车削相比于普通车削能大幅降低车削表面的粗糙度, 提高工件表面的加工质量。

为了进一步验证粗糙度模型的合理性, 对相同参数下的实验结果与仿真结果进行对比, 如图 11 所示。可以看出, 仿真结果与实验结果相差较小, 最大误差值在 5.63%, 在可接受范围内, 说明粗糙度理论模型合理。

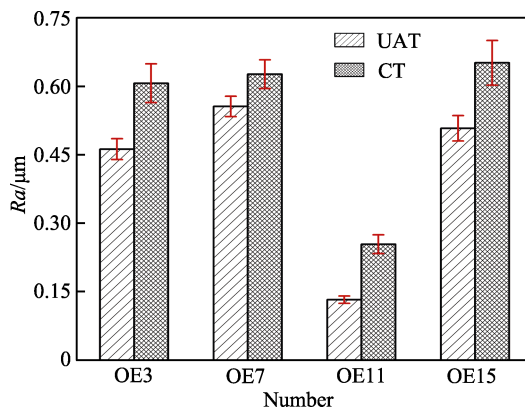


图 10 表面粗糙度对比
Fig.10 Comparison of surface roughness

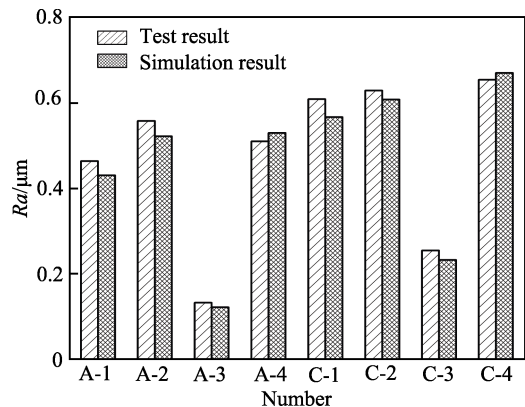


图 11 实验结果与仿真结果对比
Fig.11 Comparison of test results and simulation results

通过超景深显微镜 VHX-2000 对清洗后的工件进行观测,对比分析普通车削和二维超声振动车削表面微观形貌,如图 12 所示。普通车削表面有明显的刀痕,即“犁切”现象;二维超声切削表面有质地均匀、形状规则的鱼鳞状微织构。利用 BRUKER GTK 型白光干涉仪分别对相同切削参数下,普通车削和二维超声振动车削后的表面形貌进行观测,如图 13 所示。与普通车削相比,二维超声振动车削的加工表面呈现出规则的鱼鳞状微织构,且均匀分布在测量曲面。通过刀尖运动轨迹分析及运动轨迹仿真可知,正是由于二维超声振动车削特殊的运动特性,使得切削刃存在独有的运动轨迹及工件-刀具分离特性,使得被加工表面形成特殊的微织构表面。

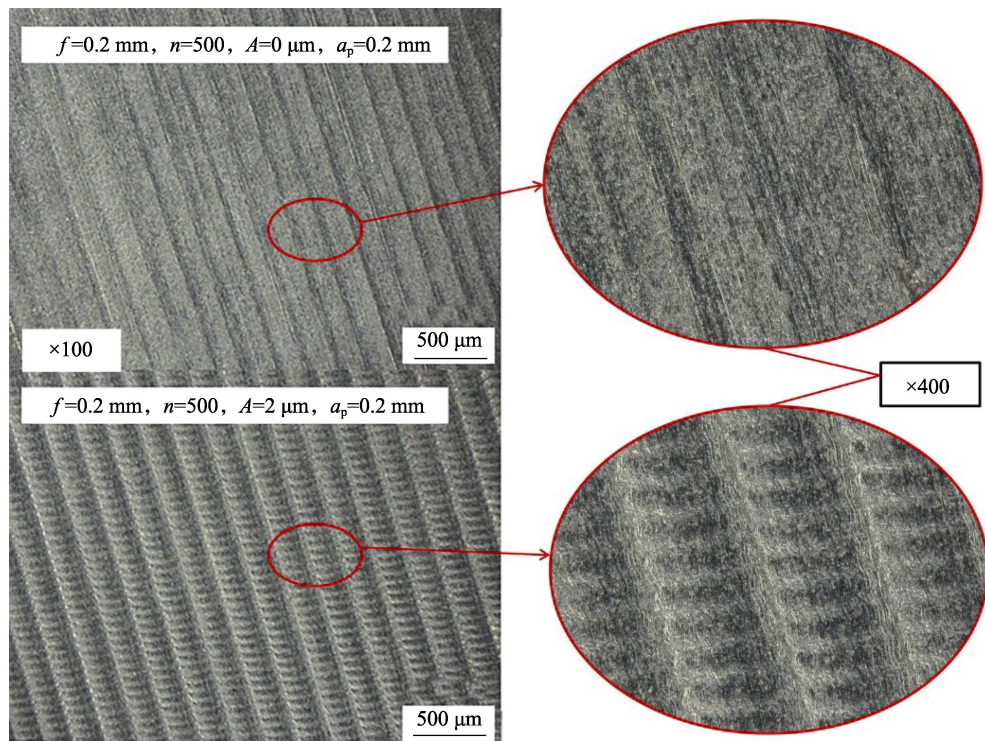


图 12 表面形貌对比
Fig.12 Contrast of surface morphology

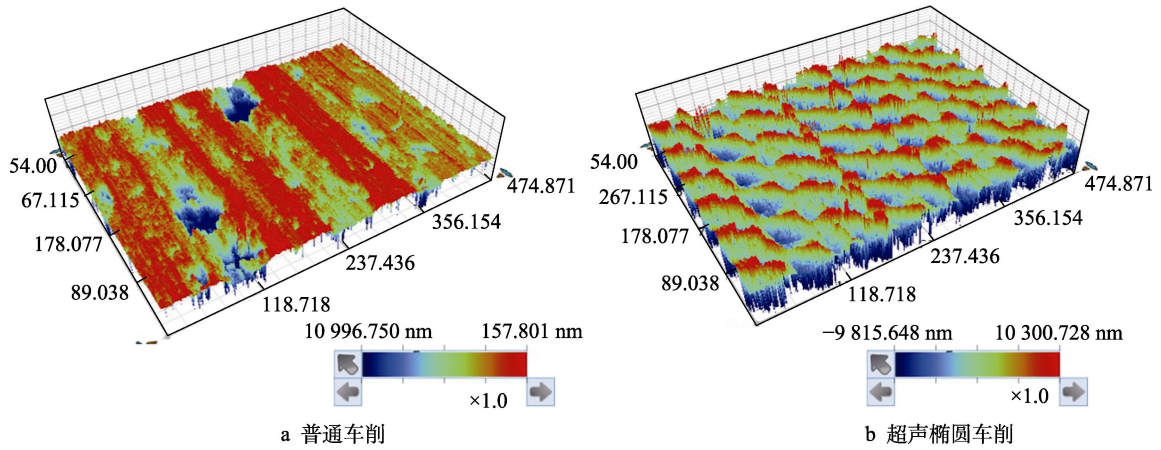


图 13 三维表面形貌
Fig.13 Three-dimensional surface topography: a) ordinary turning; b) ultrasonic elliptical turning

5 结论

本文采用单激励二维超声振动车刀,分析了其椭圆振动原理及刀尖振动轨迹,建立了二维超声振动车削表面粗糙度理论模型,进行了四因素四水平正交二维超声振动切削试验和二维超声振动车削与普通车削对比实验,得到以下结论:

1) 通过对二维超声振动车刀振动轨迹进行测量,验证了单激励二维超声振动车刀的椭圆振动轨迹,其轨迹呈现出规则的椭圆状。

2) 通过对正交试验结果进行分析,得出试验最优参数组合为: $f_r=0.15\text{ mm/r}$ 、 $n=400\text{ r/min}$ 、 $A=2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $a_p=0.2\text{ mm}$ 。通过对试验结果的显著性分析发现,超声振幅对车削表面表面粗糙度值 Ra 的影响最大,其次是转速,进给量的影响最小,切深的影响可以忽略不计。

3) 通过二维超声振动车削与普通车削对比实验发现,二维超声振动车削相比于普通车削,表面粗糙度出现了不同程度的下降,最大下降率为 47.65%,最小下降率 11.27%,平均下降了 26.17%,明显优于普通车削,说明二维超声振动车削铝合金圆筒具有可行性和优越性。与理论模型仿真结果的误差最大为 5.63%,验证了理论模型。

4) 通过对铝合金圆筒加工后表面形貌进行研究,发现相比普通切削工件表面的犁切痕迹,超声切削的工件表面有质地均匀、形状规则的鱼鳞状微结构。

参考文献:

- [1] 郑伟. 薄壁零件数控加工的有限元分析[D]. 西安: 西安工业大学, 2015.
ZHENG Wei. The Finite Element Analysis of Numerical Control Machining to Thin-Walled Parts[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.
- [2] 王启桥. 6061 铝合金薄壁圆筒耐热表层设计及数值模拟优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
WANG Qi-qiao. Heat-Resistant Surface Design and Simulation Optimization on 6061 Alloy Thin-Walled Cylinder [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [3] 毕运波, 柯映林, 董辉跃. 航空铝合金薄壁件加工变形有限元仿真与分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(3): 397-402.
BI Yun-bo, KE Ying-lin, DONG Hui-yue. Finite Element Simulation and Analysis of Deformation in Machining of Aeronautical Aluminum Alloy Thin-Walled Workpiece [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(3): 397-402.
- [4] 秦浩天. 刀尖半径对 7050 铝合金薄壁件切削性能影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
QIN Hao-tian. Influence of Tool Tip Radius on Cutting Performance of 7050 Aluminum Alloy Thin-Walled

- Parts[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [5] 李彬. 薄壁构件稳定性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
LI Bin. The Stability Analysis of Thin-Walled Members [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [6] 李益锋. 低刚度零件数控侧铣精加工的变形预测与控制策略研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2006.
LI Yi-feng. Research on Prediction and Controlling Strategies of Low-Rigidity Components Deflections in Peripheral Finish Milling[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2006.
- [7] 王旺兵, 刘骥, 刘松, 等. 基于 Deform-3D 的铝合金圆筒件冲锻成形压边力模拟分析[J]. 锻压技术, 2019, 44(3): 1-9.
WANG Wang-bing, LIU Ji, LIU Song, et al. Simulation Analysis on Blank Holder Force for Aluminum Alloy Cylinder in Punching-Forging Based on Deform-3D[J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44(3): 1-9.
- [8] GAO Jian, SONG Qing-hua, LIU Zhan-qiang. Chatter Detection and Stability Region Acquisition in Thin-Walled Workpiece Milling Based on CMWT[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(1): 699-713.
- [9] 周珂, 贾晓林, 张虎, 等. 5083 铝镁合金薄壁件整体数控铣削试验及优化[J]. 装备制造技术, 2018(9): 116-120.
ZHOU Ke, JIA Xiao-lin, ZHANG Hu, et al. Test and Optimization of Numerical Control Milling for 5083 Aluminum-Magnesium Alloy Thin-Walled Parts[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(9): 116-120.
- [10] 唐军, 赵波. 超声波椭圆振动加工技术的研究进展[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2014, 34(1): 70-78.
TANG Jun, ZHAO Bo. Developments of Ultrasonic Elliptical Vibration Machining[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2014, 34(1): 70-78.
- [11] JIAO Feng, ZHAO Li, YAO cheng lin, et al. Research on Milling Deformation in Ultrasonic Vibration Assisted End Milling of Titanium Alloy Thin-Walled Parts[J]. Key Engineering Materials, 2018, 764: 174-183.
- [12] ZHOU Xiao-qin, ZUO Cheng-ming, LIU Qiang, et al. Surface Generation of Freeform Surfaces in Diamond Turning by Applying Double-Frequency Elliptical Vibration Cutting[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 104: 45-57.
- [13] KURNIAWAN R, KUMARAN S T, ALI S, et al. Experimental and Analytical Study of Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting on AISI 1045 for Sustainable Machining of Round-Shaped Microgroove Pattern[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(5/6/7/8): 2031-2055.
- [14] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Ultraprecision Diamond Cutting of Hardened Steel by Applying Elliptical Vibration Cutting[J]. CIRP Annals, 1999, 48(1): 441-444.
- [15] KIM G D, LOH B G. Machining of Micro-Channels and Pyramid Patterns Using Elliptical Vibration Cutting[J].

- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(9/10/11/12): 961-968.
- [16] 王翀, 隋嵩, 张翔宇, 等. 薄壁盘类零件超声振动车削实验研究[J]. 电加工与模具, 2016(3): 33-35.
WANG Chong, SUI He, ZHANG Xiang-yu, et al. Experiment Study on the Ultrasonic Vibration Turning of Thin-Wall Plate Parts[J]. Electromachining & Mould, 2016(3): 33-35.
- [17] 王跃, 轧刚, 王翠英. 超声波椭圆振动切削研究[J]. 电加工与模具, 2010(3): 38-40.
WANG Yue, YA Gang, WANG Cui-ying. Research on Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting Structure[J]. Electromachining & Mould, 2010(3): 38-40.
- [18] HE Yu, ZOU Ping, ZHU Wu-le, et al. Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting of Hard Materials: Simulation and Experimental Study[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1): 363-374.
- [19] 何俊, 邓成军. 椭圆轨迹对超声波椭圆振动切削的影响[J]. 制造业自动化, 2013, 35(2): 43-47.
HE Jun, DENG Cheng-jun. Effect of Elliptic Trajectory on Ultrasonically Elliptical Vibration Cutting[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(2): 43-47.
- [20] ZHANG Chen, EHMANN K, LI Ying-guang. Analysis of Cutting Forces in the Ultrasonic Elliptical Vibration-Assisted Micro-Groove Turning Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1): 139-152.
- [21] NESTLER A, SCHUBERT A. Surface Properties in Ultrasonic Vibration Assisted Turning of Particle Reinforced Aluminium Matrix Composites[J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 125-130.
- [22] 王思越. 外圆车削表面三维形貌的仿真分析与实验研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2005.
WANG Si-yue. Simulation Analysis and Experiment Research on Three-Dimensional Shape of Turning Part Surface[D]. Beijing: North China University of Technology, 2005.
- [23] 张蓉蓉. 车削工艺参数对铝合金 211Z 加工表面质量的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
ZHANG Rong-rong. Effect of Turning Process Parameters on Surface Quality of Aluminum Alloy 211Z[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.
- [24] 刘汇清, 皮钧, 杨光. 双激励二维超声振动切削装置设计[J]. 机械设计与制造, 2020(5): 193-197.
LIU Hui-qing, PI Jun, YANG Guang. Design of Two-Dimensional Ultrasonic Vibration Cutting Device with Double-Excitation[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(5): 193-197.
- [25] 郑建新, 刘宏伟, 蒋书祥, 等. 7050 铝合金高速二维超声滚压对表面质量的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(6): 187-192.
ZHENG Jian-xin, LIU Hong-wei, JIANG Shu-xiang, et al. Effect of High-Speed Two-Dimensional Ultrasonic Rolling on Surface Quality of 7050 Aluminum Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(6): 187-192.
- [26] FENG Ping-fa, WANG Jian-jian, ZHANG Jian-fu, et al. Research Status and Future Prospects of Rotary Ultrasonic Machining of Hard and Brittle Materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 3-21.
- [27] ZHANG Xin-quan, KUMAR A S, RAHMAN M, et al. Modeling of the Effect of Tool Edge Radius on Surface Generation in Elliptical Vibration Cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(1): 35-42.
- [28] ROY S J. Design of a Circular Hollow Ultrasonic Horn for USM Using Finite Element Analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(1/2/3/4): 319-328.
- [29] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
CHEN Ri-yao. Principles of Metal Cutting[M]. 2nd Edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2012.
- [30] KRAGELSKY I V, DOBYCHIN M N, KOMBALOV V S. Friction and Wear[M]. Amsterdam: Elsevier, 1981: 427-459.
- [31] 赵洋, 华一雄, 张执南, 等. 基于 Hertz 接触理论的叶片-机匣碰摩模型[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(6): 660-664.
ZHAO Yang, HUA Yi-xiong, ZHANG Zhi-nan, et al. A New Blade-Casing Rubbing Model Based on Hertz Contact Theory[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(6): 660-664.
- [32] 张明军. 硬质合金二维超声车削过程及加工表面质量的试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2019.
ZHANG Ming-jun. Experimental Investigate on the Ultrasonic Turning Process and Surface Machining Quality of Cemented Carbides[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019.
- [33] 陈鹏. 超声辅助铣削薄壁件振动特性和表面形貌研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
CHEN Peng. Study on Vibration Characteristics and Surface Morphology of Ultrasonic-Assisted Milling of Thin-Walled Parts[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.

责任编辑: 刘世忠