

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.105

# 大振幅超声振动辅助高速干切装置设计开发与性能测试

黄雪峰, 曹华军, 张 金, 宋 阳, 康信祺

(重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 超声换能器是超声振动辅助切削装置的核心部件, 为研制适用于高速干切的大振幅超声振动辅助切削装置, 需先设计研制超声换能器。基于考虑刀具的二级放大超声换能器设计方法, 遵循“变幅杆-超声换能器”一体式设计理念, 结合 ANSYS 有限元软件的模态分析和谐响应分析结果, 设计并研制了二级放大超声换能器。根据研制的二级放大超声换能器特性, 系统设计并研制与其相匹配的超声波发生器、止转环、输电系统和刀柄壳结构。对二级放大超声换能器进行了阻抗分析和振幅测量等性能测试。对所设计研制的大振幅超声振动辅助高速干切装置开展实验测试分析, 探究了其为难加工材料 30CrMnSiNi2A 加工表面质量的改善程度。结果表明: 二级放大超声换能器纵向振动仿真结果与理论设计一致, 二级放大超声换能器输出振幅稳定, 在 50% 输出功率下纵振振幅为 15.4  $\mu\text{m}$ , 最大可达 25.1  $\mu\text{m}$ , 且输出振幅与功率百分比呈正相关, 性能良好; 所研制的大振幅超声振动辅助切削装置可大幅降低进给方向切削力和表面粗糙度, 显著提高难加工材料加工表面质量, 适用于难加工材料高速干切。

**关键词:** 二级放大超声换能器; 有限元仿真分析; 大振幅超声振动辅助切削装置; 振幅; 超声振动辅助高速干切

中图分类号: TG663

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)09-014-16

## Design and development of a large-amplitude ultrasonic vibration-assisted high-speed dry cutting device and its performance tests

HUANG Xuefeng, CAO Huajun, ZHANG Jin, SONG Yang, KANG Xinzhen

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** The ultrasonic transducer is the core component of an ultrasonic vibration-assisted cutting device. To develop a large-amplitude ultrasonic vibration-assisted cutting device suitable for high-speed dry cutting, the first step is to design and develop the ultrasonic transducer. Based on the design method of the second-stage amplified ultrasonic transducer considering the tool, following the integrated design concept of amplifier-ultrasonic transducer, and combined with the results of modal analysis and harmonious response analysis using ANSYS finite element software, a two-stage amplified ultrasonic transducer was designed and developed. According to the characteristics of the developed two-stage amplified ultrasonic transducer, its matching ultrasonic generator, anti-

收稿日期: 2022-09-09 网络出版日期: 2023-04-23

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB2010500)。

Supported by National Key R&D Program of China (2020YFB2010500).

作者简介: 黄雪峰(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事超声振动辅助高速干切技术研究, (E-mail)xfhuang@cqu.edu.cn。

通信作者: 曹华军, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)hjcao@cqu.edu.cn。

rotation ring, power transmission system, and tool holder shell structure were systematically designed and developed. Performance tests including impedance analysis and amplitude measurement were carried out for the developed two-stage amplified ultrasonic transducer. Experimental test and analysis of the designed and developed large-amplitude ultrasonic vibration-assisted high-speed dry cutting device were conducted to explore the improvement of surface quality in the difficult-to-machining material 30CrMnSiNi2A. The results show that the longitudinal ultrasonic vibration simulation results of the two-stage amplified ultrasonic transducer are consistent with the theoretical design, and the longitudinal vibration amplitude output is stable. The longitudinal vibration amplitude is  $15.4\ \mu\text{m}$  at 50 % output power and can reach a maximum of  $25.1\ \mu\text{m}$ , with the output amplitude positively correlated with the power percentage, indicating good performance test results. The developed large-amplitude ultrasonic vibration-assisted cutting device greatly reduces the cutting force and surface roughness in the feeding direction, significantly improves the surface quality of difficult-to-machine materials, and is suitable for high-speed dry cutting of such materials.

**Keywords:** two-stage amplified ultrasonic transducer; finite element simulation analysis; large amplitude ultrasonic vibration assisted cutting device; amplitude; ultrasonic vibration assisted high-speed dry cutting

随着航空航天行业的高速发展,航空航天领域对典型材料的需求日益旺盛。而典型材料所具有的高强度和复杂结构等难加工特性,使传统加工技术方法难以满足典型材料零部件生产加工的要求<sup>[1]</sup>。通过引入超声振动辅助加工技术,将传统刀具与工件持续接触切削方式转化为脉冲式切削模式,大幅缩短了刀具与材料的接触时间,进而有效地降低了摩擦力和切削热。超声振动辅助加工作为以断续切削机理为主导的非传统加工方法,具有切削力小、切削热低、刀具延寿、表面加工质量高等特点,适用于钻削、铣削、车削和一些特种加工<sup>[2]</sup>。与此同时,高速干切<sup>[3]</sup>作为清洁切削加工的关键技术,无论从加工环境、加工质量或绿色发展<sup>[4-5]</sup>等方面考虑,均可满足航空航天典型材料零部件的加工制造。

超声振动辅助切削装置主要由3部分组成,分别为信号发生、输电系统和刀柄硬件。信号发生部分即超声波发生器,其主要功能是将交流电转化并输出频率大于16 kHz的高频振荡信号。Kardys等<sup>[6]</sup>对超声焊接领域的数字信号合成单元进行创新设计,实现了精准控制多功能超声波发生器的输出参数;Yokozawa等<sup>[7]</sup>提出了一种利用开关的占空比调节超声换能器谐振频率的动态追频技术;刘宁庄等<sup>[8]</sup>为了更快捕捉换能器的最佳工作频率,提出了基于FPGA的谐振自动追踪策略,提高了超声波发生器的工作效率。输电系统主要有无线输电非接触式和导电滑环电刷接触式2种形式,其作用是将超声频电信号传递到刀柄硬件结构中。吴陈军<sup>[9]</sup>基于松耦合变压器原理建立了无线输电系统数学模型,采用感应导电的方式设计了一组可相对高速转动的无线输电传输单元,实现了超声振动铣削加工。导电滑环和无线输电均适用高速干切,但在高速转动条件下导电滑环易磨损,服役性能方面需采用其他合金涂层材料来提高导电滑环转速范围和使用寿命。无线输电非接触式受限于单通道信号的传输模式,存在传输效率低等问题。刀柄硬件部分包含换能器、变幅杆和刀具头等刀柄结构。朱传宇<sup>[9]</sup>基于半波长理论与夹心式压电换能器设计理论,设计了应用于超声辅助SiC陶瓷磨削加工中的旋转超声刀柄,并依据磨削力和粗糙度结果验证了旋转超声刀柄的振动加工性能;茆廷学<sup>[10]</sup>针对光学玻璃的铣削加工设计了一种超声振动铣削刀柄,并测试了超声振动铣削刀柄的频率和振幅分别为23.384 kHz和 $6.5\ \mu\text{m}$ ,但是该超声刀柄振幅较小且无法调节输出振幅,难以适应不同工况下的切削加工。为提高超声振动振幅,已有学者开展了大振幅超声换能器的相关研究。陈桂生等<sup>[11]</sup>设计了一种阶梯式的换能器,提高了超声换能器输出振幅,并指出大振幅超声换能器起到提高加工效率的效果<sup>[12]</sup>;靳涛<sup>[13]</sup>针对蜂窝复合材料切割加工设计了一种大振幅超声变幅杆,通过优化变幅杆法兰盘的厚度和布置U型槽结构,实现了超声换能器的大振幅输出,提高了超声传递效率。在齿轮超声加工领域,梁欣等<sup>[14]</sup>提出了一种级联纵弯谐振新型变幅杆,实现了齿轮分度圆处最大振幅 $12\ \mu\text{m}$ ,满足了齿轮超声加工需求。潘巧生等<sup>[15]</sup>设计了一种等应力大振幅变幅杆,通过仿真优化调节形状因素和输出端尺寸,实现了大振幅超声振动。

超声振动辅助加工技术的发展一方面源于各类典型难加工材料的加工需求,另一方面源于超声振动辅助加工技术本身的断续切削机理为典型难加工材料提供了一种有效的加工方式<sup>[16-19]</sup>。Paktinat等<sup>[20]</sup>针对7075

铝合金材料开展了纵向超声振动辅助钻削加工与常规钻削的对比实验,结果表明超声振动辅助技术的引入可起到刀具延寿和减小切削力的作用。Zhou等<sup>[21]</sup>通过碳化硅增强金属基复合材料的超声振动辅助加工实验,研究了切削过程中的材料去除机制、切削力、表面粗糙度和微观结构,并根据实验结果得出了材料加工的推荐工艺参数。Ma等<sup>[22]</sup>开展了碳纤维复合材料纵扭耦合超声辅助钻削实验,通过变换主轴转速、进给速度和超声波参数,建立了碳纤维复合材料力学预测模型,并通过实验验证了预测模型的准确性。Zhang等<sup>[23]</sup>开展了碳纤维复合材料轴向超声振动切边质量的实验与仿真分析,全面揭示了轴向振动对碳纤维布修边质量的影响机理。从研究现状可知,超声振动辅助加工技术大多应用于难加工材料的钻削加工,而少有学者开展航空航天典型难加工材料的高速干式铣削加工研究。

因此,针对航空航天典型材料零部件的高速干切技术,笔者设计开发了一种大振幅超声振动辅助高速干切装置,将该装置应用于典型难加工材料的铣削加工中,以超声振动辅助装置输出的大振幅超声振动,提高难加工材料去除率和可加工性,降低切削力和表面粗糙度,从而提高表面加工质量。

## 1 大振幅超声振动辅助切削装置设计

### 1.1 二级放大超声换能器理论设计与仿真分析

超声换能器的主要功能是将超声发生器输入的高频振荡信号转化为机械振动,进而传递给变幅杆结构。超声变幅杆又称为超声聚能器,其外形通常为变截面杆。在超声振动辅助切削装置中,超声变幅杆的主要作用是将超声换能器产生的机械变形放大,并将超声能量聚集在较小的面积上,以产生聚能作用。变幅杆的种类主要有指数形、圆锥形、悬链形、阶梯形和复合形,复合形由各种简单形状变幅杆根据实际需要组合而成<sup>[24]</sup>。本研究选用圆锥过渡梯形变幅杆结构,其优势在于既可实现高放大系数,又以圆锥截面过渡,可同时满足刚性和强度要求,提高变幅杆的工作稳定性。另外,为减少能量传输损耗,采用变幅杆作为夹心式压电换能器结构中的前盖板结构,以满足“变幅杆-超声换能器”一体式设计理念。该理念是将变幅杆作为换能器的前盖板结构,进而缩小整体结构尺寸,提高其紧凑性,减小能量损失<sup>[25]</sup>。变幅杆-超声换能器一体式理论设计示意图如图1所示,以节面中心为原点 $o$ ,径向为 $y$ 轴,换能器中心线为 $x$ 轴, $R_1$ 和 $R_2$ 分别为圆锥形部分的输入端半径和输出端半径; $v_i$ 为后盖板输入端表面振速, $v_e$ 为换能器输出端振速; $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 分别为后盖板段位移、压电陶瓷组段位移、圆锥过渡梯形变幅杆输入端位移、圆锥形结构位移和圆锥过渡梯形变幅杆输出端位移; $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$ 、 $l_5$ 分别为后盖板长度、压电陶瓷组长度、圆锥过渡梯形变幅杆输入端长度、圆锥形结构长度和圆锥过渡梯形变幅杆输出端长度。

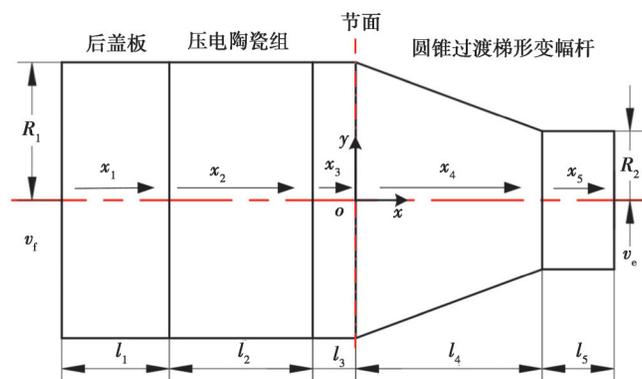


图1 超声换能器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic transducer structure

所提出的超声换能器以圆锥过渡梯形变幅杆作为换能器的前盖板部分,因此超声换能器的面积函数为

$$S_n(x_n) = \begin{cases} \pi R_1^2, & -l_1 - l_2 - l_3 \leq x_n \leq 0; \\ \pi \left[ R_1 - \frac{x_n(R_1 - R_2)}{l_4} \right]^2, & 0 \leq x_n \leq l_4; \\ \pi R_2^2, & l_4 \leq x_n \leq l_5. \end{cases} \quad (1)$$

由设计理论可知,任意变截面超声换能器纵振波动方程为<sup>[25]</sup>

$$\frac{\partial^2 \mu_n(x_n)}{\partial x_n^2} + \frac{1}{S_n(x_n)} \cdot \frac{\partial S_n(x_n)}{\partial x_n} \cdot \frac{\partial \mu_n(x_n)}{\partial x_n} + k_n^2 \mu_n(x_n) = 0. \quad (2)$$

式中: $\mu_n(x_n)$ 为质点位移函数; $S_n(x_n)$ 为变幅杆的横截面积函数; $k_n$ 为圆波数, $k_n = \omega_n / c_n$ , $\omega_n$ 为圆频率, $c_n = (E_n / \rho_n)^{0.5}$ 为纵波在不同介质的传播速度, $E_n$ 和 $\rho_n$ 分别为材料杨氏模量和密度。

如图1所示,节面设计在圆锥过渡梯形变幅杆的圆锥面输入端,节面即是变形位移为0的位置,节面左侧为后盖板和压电陶瓷组以及变幅杆输入端圆柱面,均为等圆柱截面,即 $S_n(x_n)$ 为常数,则式(2)简化为

$$\frac{\partial^2 \mu_n(x_n)}{\partial x_n^2} + k_n^2 \mu_n(x_n) = 0. \quad (3)$$

根据式(3),可解得通式为

$$\begin{cases} \mu_n(x_n) = A_n \sin k_n x_n + B_n \cos k_n x_n, \\ F_n(x_n) = -jZ_n (A_n \cos k_n x_n - B_n \sin k_n x_n). \end{cases} \quad (4)$$

式中: $F_n(x_n)$ 为纵向弹性力; $Z_n = \rho_n c_n S_n(x_n)$ 为换能器各个部分的声阻抗; $A_n$ 、 $B_n$ 为系数; $j$ 为虚数单位。

根据如图1所示设计的节面,节面左侧的等圆柱截面部分的振速和力的边界条件为

$$\begin{cases} \mu_1(0) = v_r, \\ \mu_1(l_1) = \mu_2(0), \\ \mu_2(l_2) = \mu_3(0), \\ \mu_3(l_3) = 0, \\ F_1(0) = 0, \\ F_1(l_1) = F_2(0), \\ F_2(l_2) = F_3(0). \end{cases} \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)中各边界条件,求得截面左侧等圆柱截面部分的频率方程为

$$\tan k_3 l_3 = \frac{Z_1 Z_2 - Z_1^2 \tan k_1 l_1 \tan k_2 l_2}{Z_1 Z_2 \tan k_1 l_1 + Z_2^2 \tan k_2 l_2}. \quad (6)$$

如图1所示,节面右侧结构为圆锥过渡型和等圆柱截面变幅杆结构,因此 $l_5$ 等圆柱截面的振速和纵向弹性力由式(4)表达,而圆锥形部分的纵振波动方程为

$$\frac{\partial^2 \mu_n(x_n)}{\partial x_n^2} + \frac{2\alpha}{\alpha x_n - 1} \cdot \frac{\partial \mu_n(x_n)}{\partial x_n} + k_n^2 \mu_n(x_n) = 0. \quad (7)$$

式中, $\alpha = \frac{R_1 - R_2}{R_1} l_4$ 。

根据式(7)求得通解

$$\begin{cases} v_n(x_n) = \frac{\alpha}{\alpha x_n - 1} C_n \sin k_n x_n + D_n \cos k_n x_n, \\ F_n(x_n) = -j\rho_n c_n S_n(x_n) \left\{ C_n \left[ \frac{\alpha}{\alpha x_n - 1} \cos k_n x_n - \frac{\alpha^2}{k_n (\alpha x_n - 1)^2} \sin k_n x_n \right] - D_n \left[ \frac{\alpha}{\alpha x_n - 1} \sin k_n x_n - \frac{\alpha^2}{k_n (\alpha x_n - 1)^2} \cos k_n x_n \right] \right\}. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $v_n(x_n)$ 为圆锥部分的振速; $F_n(x_n)$ 为圆锥部分的纵向弹性力; $C_n$ 和 $D_n$ 为系数。

根据如图1所示设计的节面,节面右侧的圆锥形结构和等圆柱截面部分的振速和力的边界条件为

$$\begin{cases} \mu_4(0) = 0, \\ \mu_4(l_4) = \mu_5(0), \\ \mu_5(l_5) = v_o, \\ F_4(0) = jZ_3 v_o, \\ F_4(l_4) = F_5(0), \\ F_5(l_5) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

式中, $v_o$ 为圆锥过渡梯形变幅杆输入端振速。

联立式(4)、式(8)和式(9)方程求解得到节面右侧圆锥形和等圆柱截面部分频率方程为

$$\tan kl_5 = \cot kl_4 + \frac{1}{kl_4} \cdot \frac{R_1 - R_2}{R_2} \quad (10)$$

圆锥过渡梯形变幅杆为同种材料。因此,  $k=k_4=k_5$ 。

超声换能器由前盖板、后盖板、压电陶瓷组和预紧螺栓组成。预紧螺栓的作用是为压电陶瓷提供预紧力。前盖板即变幅杆结构的作用主要是保证机械振动能量有效向前传递;而后盖板的主要作用是保证能量向前传递,尽可能减小能量从后表面辐射<sup>[25]</sup>。因此,前、后盖板材料均选用40Cr,换能器整体材料属性如表1所示。

表1 超声换能器前后盖板材料属性

Table 1 Material properties of front and rear cover plates of ultrasonic transducers

材料	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/GPa	泊松比
40Cr	7 800	210	0.26

在确定超声换能器前后盖板材料后,需对换能器整体尺寸进行设计。根据实际工程经验,压电陶瓷片外径不应大于超声波在压电陶瓷材料中波长的1/4<sup>[25]</sup>。材料波长的计算式为

$$\lambda = \frac{c}{f} = 157.5 \text{ mm} \quad (11)$$

式中: $c$ 为压电陶瓷材料声速, $c=3\ 150 \text{ m/s}$ ;  $f$ 为超声频率, $f=20 \text{ kHz}$ 。

压电陶瓷片的尺寸与变幅杆超声信号输入端相同,均为 $R_1$ 。换能器中最核心的部分是压电陶瓷材料,其性能参数决定了整个换能器结构的性能。压电陶瓷重要的性能参数分别为机电耦合系数 $k$ 、介质损耗因子 $\tan\delta_E$ 、声速 $c$ 、谐振频率 $f_s$ 等。机电耦合系数反映压电陶瓷材料在机械能和电能之间的转换效率;介质损耗因子表示压电陶瓷机械损耗程度。因此,针对超声振动辅助装置的应用场景,需选用机电耦合系数高、介电损耗较小的PZT(锆钛酸铅)材料。本研究中的压电材料选用PZT-8,尺寸为外径38 mm、内径15 mm和高度5 mm,材料属性如表2所示。

变幅杆超声信号输出端半径 $R_2$ 的大小考虑了振幅放大倍数和ER16刀柄头标准件尺寸。换能器整体结构基于半波长设计原理,按照传统设计方法取值,并结合式(6)(10)(11),得到圆锥过渡梯形变幅杆的设计尺寸参数如表3所示。

表2 压电陶瓷(PZT-8)材料属性

Table 2 Material properties of piezoelectric ceramic (PZT-8)

材料	介质损耗因子 $\tan\delta_E$	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	声速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	声阻抗
PZT-8	0.005	7 800	3 150	24

表3 超声换能器设计参数

Table 3 Design parameters of ultrasonic transducer

$R_1$	$R_2$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	mm
19.0	9.5	17.5	20.0	4.3	16.0	11.0	

换能器需要通过卡簧、压帽和刀具等零件统一装配,最终输出端为刀具末端,因此,需要考虑用于切削加工的刀具尺寸参数。图2为设计时考虑了刀具结构的超声换能器整体结构,即整个换能器中的放大结构为第一级放大的圆锥过渡梯形变幅杆和第二级放大的刀具部分。一体化设计更贴近工程应用场景,并可得到更大的刀具末端振幅,振幅放大系数为

$$M = \frac{R_1^2}{R_2 R_3} \cdot \frac{\sin kl_4}{\cos kl_5} \quad (12)$$

在第二级放大部分选用长度60 mm、直径8 mm的硬质合金刀具。根据设计参数,用Solidworks软件建立二级放大超声换能器三维模型,模型包含硬质合金立铣刀、卡簧、压帽、圆锥过渡梯形变幅杆、压电陶瓷组、后盖板,以及预紧螺栓,如图3所示。针对理论设计建立的模型,采用ANSYS仿真软件对模型开展模态分析

和谐响应分析。ANSYS 仿真软件中先赋予不同零部件的对应材料属性,再采用最大尺寸 3 mm 的设定对模型进行自适应网格划分,最后对模型进行自由模态求解。

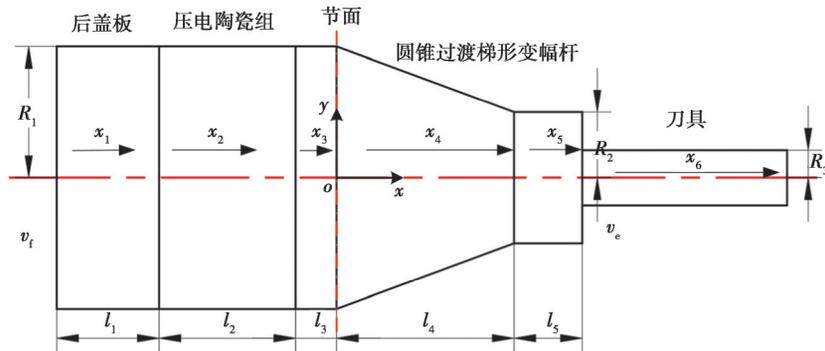


图 2 考虑刀具结构的二级放大超声换能器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the second-stage amplified ultrasonic transducer considering the tool structure

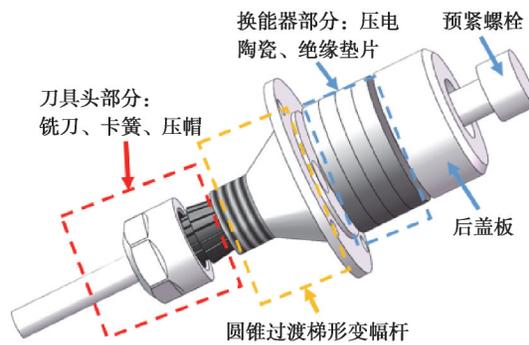
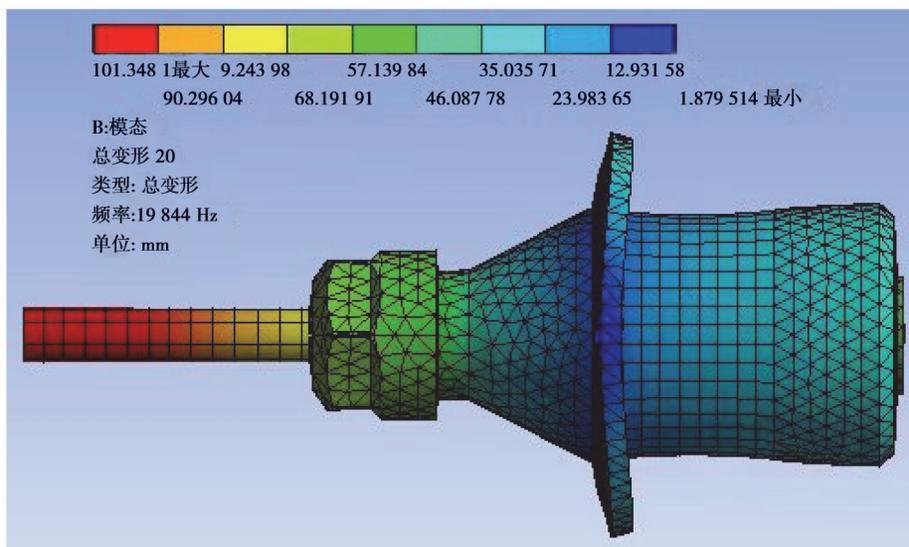


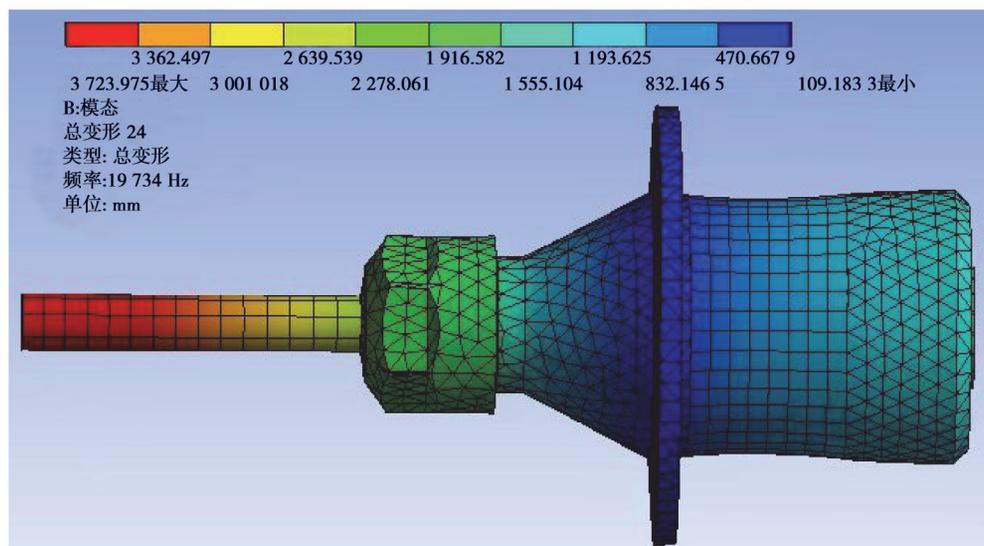
图 3 二级放大超声换能器模型

Fig. 3 Model of the two-stage amplified ultrasonic transducer

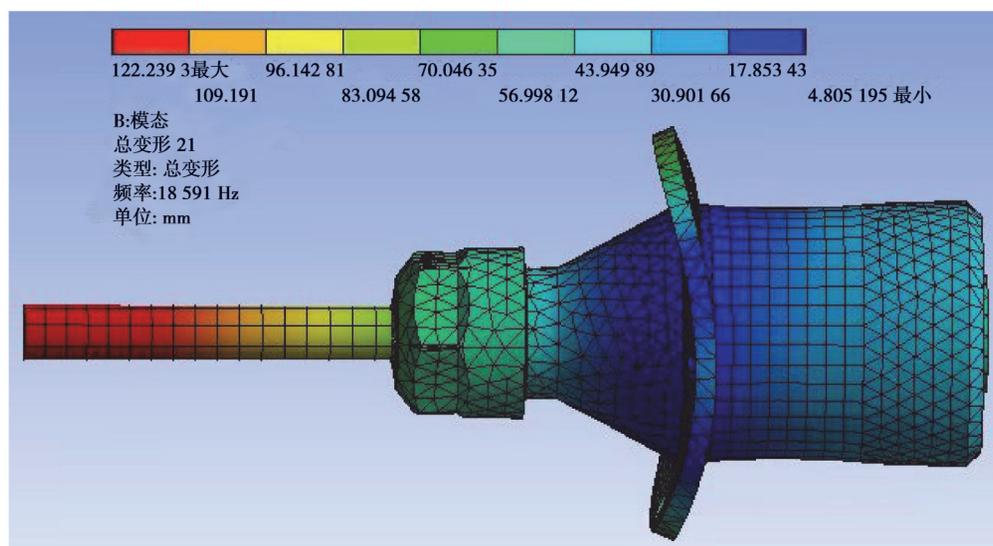
在刀具结构设计中,还需确定刀具悬伸尺寸 $l_6$ 以保证超声换能器装配刀具后法兰结构的稳定。因此,依据刀具装夹的工程经验以及尽可能地保证刀具装配后法兰的稳定,通过 ANSYS 仿真软件探究了二级放大超声换能器刀具悬伸分别为 35、40、45 mm 时的纵振模态,仿真结果如图 4 所示。当刀具悬伸为 35 mm 时,模态频率与理论设计频率最接近,为 19.844 kHz,但此时法兰结构变形较大,不利于实际安装。当刀具悬伸为 45 mm 时,模态频率已进一步偏离 20 kHz 设计频率,且法兰结构变形更为剧烈,不满足设计要求。当刀具悬伸为 40 mm 时,二级放大超声换能器法兰结构最稳定,符合设计要求,因此确定刀具悬伸 $l_6$ 为 40 mm。



(a) 35 mm 刀具悬伸



(b) 40 mm 刀具悬伸



(c) 45 mm 刀具悬伸

图 4 不同刀具悬伸下二级放大超声换能器模态分析

Fig. 4 Modal analysis of two-stage amplified ultrasonic transducer under different tool overhangs

如图 4(b) 所示, 二级放大超声换能器的纵振模态频率为 19.734 kHz。因此, 当外界激振频率在 19.734 kHz 范围内时, 二级放大超声换能器实现纵向振动, 验证了理论设计的准确性。图 5 为二级放大超声换能器模态分析的纵振速度矢量图, 输出端轴向值最大位置在刀具尖端, 振动效果良好, 且变形位移为 0 的节面位置与预先理论设计的法兰盘结构重合, 即设计结果与仿真结果相符。再结合图 6 所示的二级放大超声换能器谐响应分析结果可知: 在 ANSYS 中对压电陶瓷材料赋予压电体特性并施加对应 300 V 电压后, 得到谐振频率为 19.8 kHz, 与二级放大超声换能器纵振的模态频率接近。同时, 谐振频率下理论二级放大超声换能器的最大振幅为 16.4  $\mu\text{m}$ , 进一步验证了换能器理论模型的准确性。

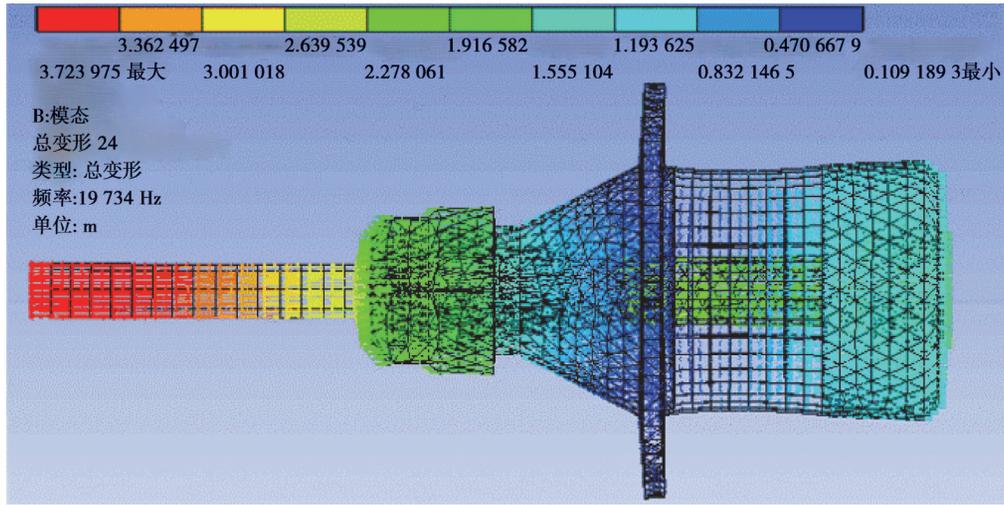
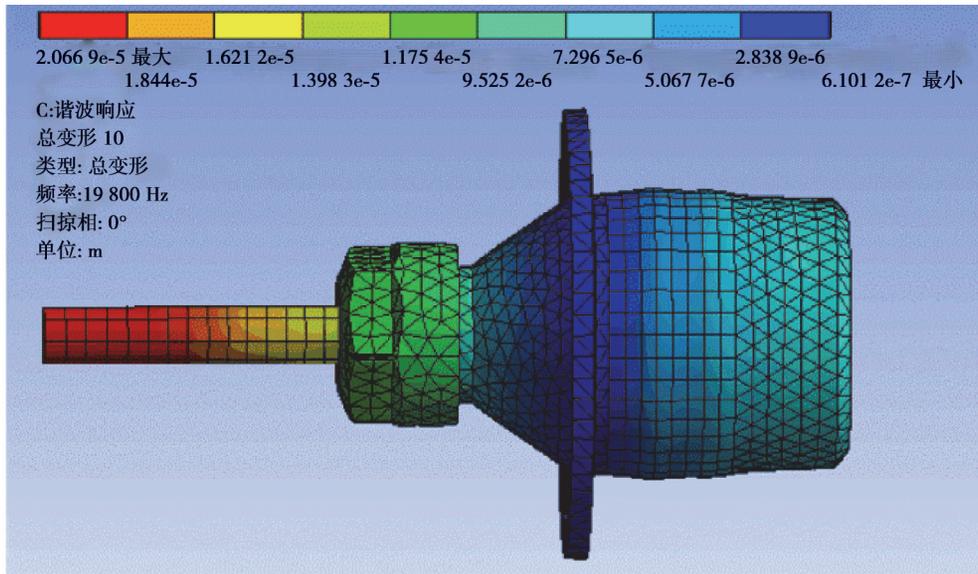


图 5 二级放大超声换能器模态分析  
Fig. 5 Modal analysis of two-stage amplified ultrasonic transducer



(a) 振型云图

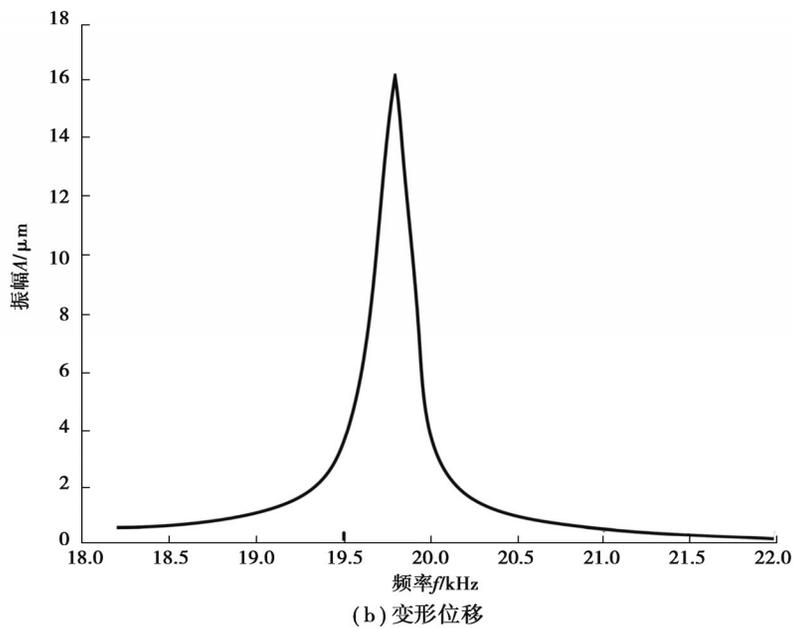


图 6 二级放大超声换能器谐波响应分析  
Fig. 6 Analysis of harmonic response of second-stage amplified ultrasonic transducer

## 1.2 大振幅超声振动辅助切削装置整体设计

大振幅超声振动装置包括超声波发生器、止转环、输电系统、刀柄壳和二级放大超声换能器等结构。超声波发生器的主要组成部分为信号发生器、功率放大器、振荡器和输出变压器,其主要功能为将50 Hz的220 V或380 V交流电转化为频率大于16 kHz的超声频交流电信号,为超声振动辅助切削提供能量<sup>[26]</sup>。超声信号发生器频率需要同刀柄硬件部分中换能器的固有频率相匹配。同时,超声波发生器的输出阻抗还需与换能器的阻抗进行阻抗匹配<sup>[26]</sup>。此外,超声波发生器还应具备自动追频功能,通过追踪频率信号进行自我调节以寻找换能器的谐振频率。采用主体结构如图7所示的自主研发超声波发生器,其主要原理是:用32位单片机的脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)功能做脉冲信号,再通过驱动芯片放大信号,进而驱动MOS管(金属-氧化物半导体场效应晶体管);然后取样匹配电路的2个电压信号,判断换能器阻抗变化和频率改变;最后通过单片机的AD功能对电压信号采样,再通过程序算法实现闭环。经过与二级放大超声换能器的阻抗匹配,所研制出的超声波发生器如图8所示,具备0~100%的功率调节、自动追频、失频报警和模式调节等功能,可实现二级放大超声换能器不同输出振幅控制并适用于多种刀具工况,其主要性能参数见表4。

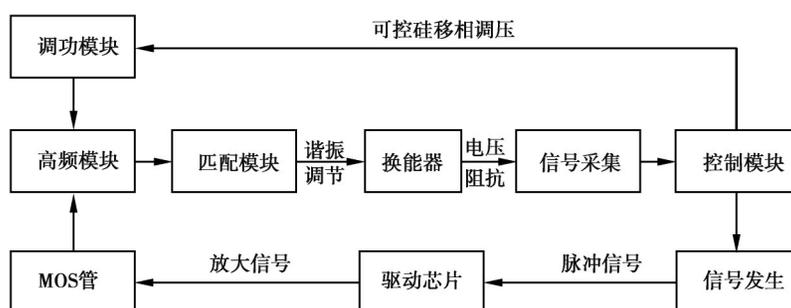


图7 超声波发生器结构示意图

Fig. 7 Structure of the ultrasonic generator

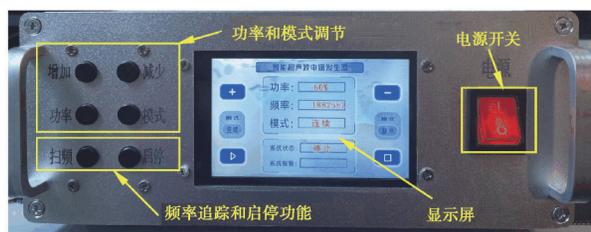


图8 超声波发生器

Fig. 8 Ultrasonic generator

表4 超声波发生器主要性能参数

Table 4 Main performance parameters of ultrasonic generator

额定功率/W	输出功率范围	输出功率精度	输出频率范围/kHz	输出频率精度/Hz	最快追频速度/s
600	1%~100%	±1%	16~30	±0.1	10

输电系统采用默孚龙公司定制生产的MT60130系列导电滑环。根据BV8H立式加工中心主轴尺寸及导电滑环尺寸配套设计了由止转环和止转棒组成的止转结构,其主要作用是固定导电滑环结构中的定子部分,以保证整体结构正常工作。考虑到所使用的BV8H立式加工中心主轴适配BT系列刀柄,本研究与换能器结构相连的刀柄壳结构中的刀柄头部尺寸为标准BT40系列刀柄头;壳体部分与换能器法兰盘最大直径匹配,并通过4颗M4螺栓与换能器结构中的法兰盘连接。大振幅超声振动辅助切削装置的整体结构如图9所示。

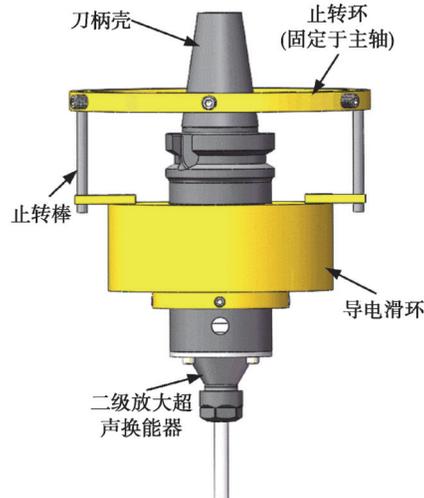


图9 大振幅超声振动辅助切削装置整体模型

Fig. 9 Overall model of large-amplitude ultrasonic vibration-assisted cutting device

## 2 二级放大超声换能器性能测试

根据二级放大超声换能器设计参数,试制换能器后盖板和变幅杆2个非标准零部件,并同选用的压电陶瓷片、筒夹、压帽和刀具等标准零部件进行统一装配后得到如图10所示的二级放大超声换能器实物。其中,二级放大超声换能器中的筒夹为ER16系列,刀具夹持范围为直径1~10 mm,压帽选用ER16MS系列。对所加工的大振幅换能器进行阻抗分析和振幅测量,以测试其性能。

### 2.1 二级放大超声换能器阻抗分析

为探究所加工的二级放大超声换能器的实际工作频率与设计频率的吻合度以及能量传递效率等性能,采用阻抗分析仪对其进行阻抗分析。通过阻抗分析仪得到二级放大超声换能器的串联谐振频率 $F_0$ 、动态电感 $L_1$ 、动态电容 $C_1$ 、动态电阻 $\Omega_1$ 、静态电容 $C_0$ 和机械品质因素 $Q_m$ 等参数。超声换能器的整体结构等效电路如图11所示。

通过使用ZX70A阻抗分析仪对二级放大超声换能器进行测试,得到图12所示的阻抗特性及参数。其中,串联谐振频率 $F_0$ 代表二级放大超声换能器的工作频率;动态电阻 $\Omega_1$ 的大小代表超声换能器的机械损耗大小,并可即时反应出换能器工作时的发热量;动态电感 $L_1$ 和动态电容 $C_1$ 的参数值由换能器本身的压电体材料和尺寸决定;机械品质因素 $Q_m$ 的数值用以表征换能器的能量传递效率, $Q_m$ 越大表明超声换能器的效率越高。

由阻抗分析结果可知,二级放大超声换能器的串联谐振频率 $F_0$ 为20.617 kHz,与有限元仿真谐响应分析频率结果偏差3.9%,产生的原因是在仿真分析中压电陶瓷设定为均质,而实际生产加工的压电陶瓷片材料不能达到完全均质;此外,在仿真中超声换能器模型各结构之间的连接装配均为理想状态,而实际装配过程中接触面与各零部件连接装配过程比较复杂,因此结果存在一定偏差。动态电阻 $\Omega_1$ 的值较小,为78.4  $\Omega$ ,表明二级放大超声换能器的热量损耗较小。动态电容 $C_1$ 为585.3 pF,代表了压电陶瓷片在振动工作下的电容



图10 二级放大超声换能器

Fig. 10 Second stage amplified ultrasonic transducer

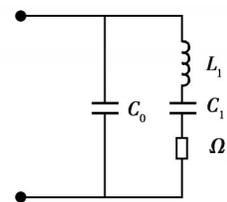


图11 二级放大超声换能器等效电路图

Fig. 11 Equivalent circuit diagram of two-stage amplified ultrasonic transducer

变化量。动态电感  $L_1$  为 101.8 mH, 静态电容  $C_0$  为 6.3 nF, 机械品质因素  $Q_m$  为 187.2, 这 3 个参数值适中。综合上述参数, 二级放大超声换能在谐振频率下能正常连续稳定地工作, 能量传递效率较高。因此, 二级放大超声换能器性能良好, 符合实际工况需求。

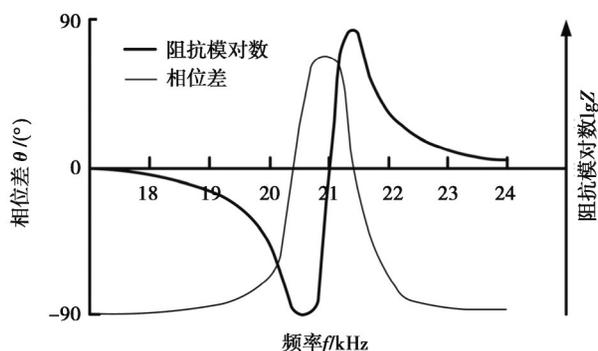


图 12 二级放大超声换能器阻抗特性

Fig. 12 Impedance characteristics of second-stage amplified ultrasound transducers

## 2.2 二级放大超声换能器振幅测量

正常工作状态下二级放大超声换能器的振幅大小对材料表面加工质量具有重要影响。因此, 为保证超声换能器振幅的测量精度, 选用德国 Polytec 公司生产的 OFV-505/5000 高性能激光测振仪测量振幅。该设备的测量方式为非接触式测量, 具备自动聚焦功能, 位移分辨率优于 0.05  $\mu\text{m}$ , 频率范围为 0~24 MHz。测试前的设备安装需保证二级放大超声换能器的振动方向与激光测振仪红外光线水平, 还需通过调整三脚架将激光头发射的光路调整至贴有反光纸的测试位置, 以便于激光的自动对焦和反射, 进而提高采集稳定性和数据准确性。

测试现场如图 13 所示, 主要包括二级放大超声换能器、自主研发的超声波发生器、激光测振仪、接收信号的控制器, 以及显示超声振动频率、波形和振幅的示波器。测试数据包含超声波发生器 50%~100% 输出功率下二级放大超声换能器的不同振幅, 振幅值由控制器采集的多组原始数据取均值后由 Matlab 分析得到。

针对超声波发生器不同输出功率, 测量其对应的二级放大超声换能器纵振振幅, 测量结果及其变化规律如图 14 所示。二级放大超声换能器纵向振动输出振幅随功率增加而增大, 当输出功率为 100% 时, 超声换能器的纵向振动振幅达 25.1  $\mu\text{m}$ 。振幅与功率百分比不呈线性关系, 随着功率百分比增加, 振幅增幅变缓, 这是由于压电陶瓷片的性能随功率提升而逐渐达到性能上限。

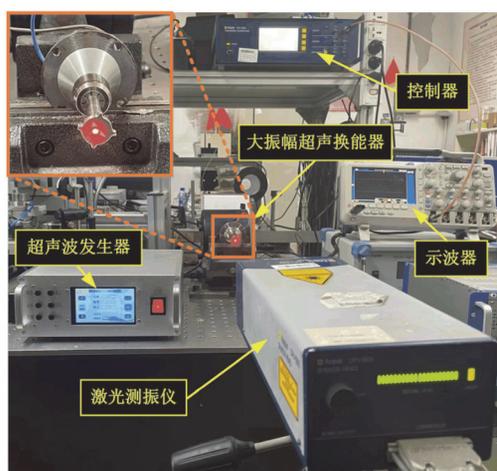


图 13 二级放大超声换能器振幅测量现场图

Fig. 13 Amplitude measurement site map of two-stage amplified ultrasonic transducer

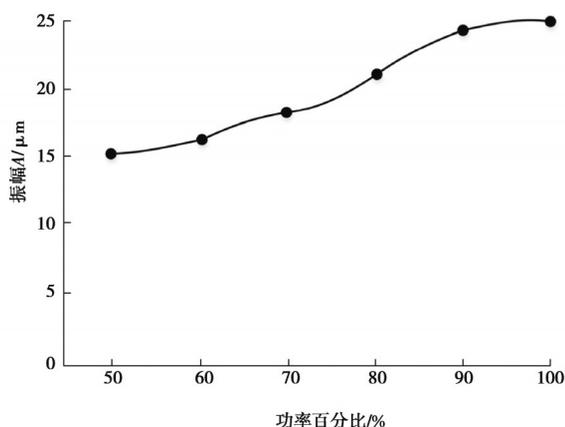


图 14 功率百分比与振幅关系

Fig. 14 The relationship between power percentage and amplitude

通常情况下, 超声波发生器选用 50% 输出功率即可实现二级放大超声换能器正常稳定工作, 其纵向振动的频域图和时域图分别如图 15 和图 16 所示。由激光测振仪测试结果可知: 在超声波发生器 50% 输出功率和

18.11 kHz工作频率下,二级放大超声换能器纵向振动振幅为  $15.4 \mu\text{m}$ ,且振幅输出平稳,符合超声振动辅助加工装置要求。

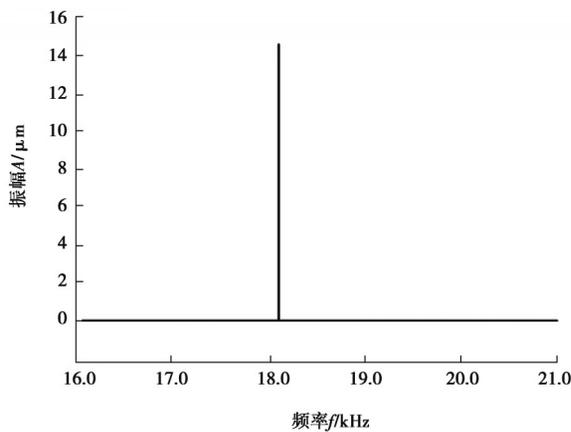


图 15 二级放大超声换能器纵振频域图

Fig. 15 Longitudinal vibration frequency domain of two-stage amplified ultrasonic transducer

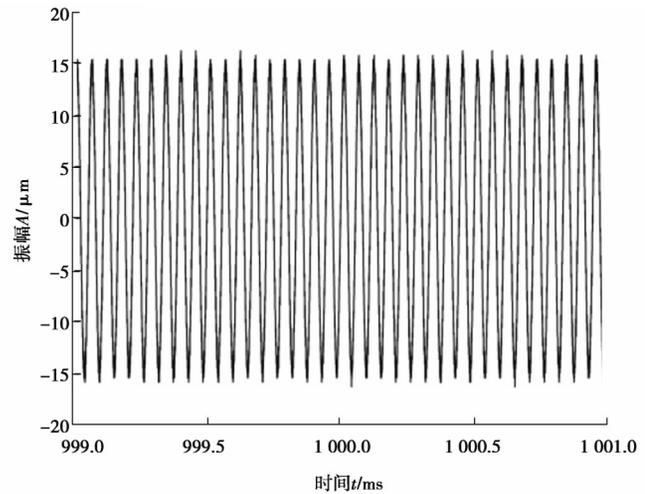


图 16 二级放大超声换能器纵振时域图

Fig. 16 Longitudinal vibration time domain of second-stage amplified ultrasonic transducer

### 3 大振幅超声振动辅助高速干切典型难加工材料工艺实验验证

#### 3.1 实验条件

采用图 17 所示自主研发的大振幅超声振动辅助切削装置,针对典型难加工材料 30CrMnSiNi2A,开展了有无超声振动辅助高速干切对比验证实验。超声波发生器选用 50% 输出功率和 18.11 kHz 工作频率,此时输出振幅为  $15.4 \mu\text{m}$ ;切削参数根据工程经验优选转速  $n=5\ 000 \text{ r/min}$ 、每齿进给量  $f_z=0.05 \text{ mm}$ 、切削深度  $a_p=1 \text{ mm}$ 、切削宽度  $a_e=6 \text{ mm}$ ;刀具为直径 6 mm 的四刃合金立铣刀。开展了大振幅超声振动辅助高速干切和普通高速干切对比实验,分别采用 Kistler 测力仪、白光干涉仪和 KEYENCE 超景深显微镜 (VHX-1000) 对切削力、加工表面粗糙度和切屑形貌进行测量。

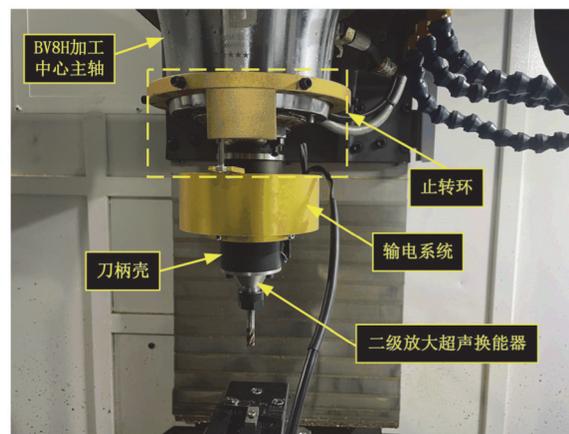


图 17 大振幅超声振动辅助切削装置

Fig. 17 Large-amplitude ultrasonic vibration-assisted equipment

#### 3.2 实验结果与分析

在难加工材料切削过程中,切削力是影响 30CrMnSiNi2A 表面质量的重要因素,通过开展有无超声振动辅助高速干切的切削力对比分析,可探究超声振动辅助加工技术的引入对降低切削力的改善程度。图 18 为不同方向普通高速干切与超声振动辅助高速干切的切削力对比分析,发现超声振动辅助加工可显著降低进给方向切削力  $F_y$ 、较大程度降低纵向切削力  $F_z$ ,但对切向切削力  $F_x$  影响较小。这是由于在刀具进给方向切削过程中,超声振动辅助加工技术通过高频断续切削,改变了传统的连续切削过程,使刀具与工件周期性接触

与分离,利于切屑脱离<sup>[27]</sup>;同时,刀具尖端呈现高频纵向微米级振动,可实现变厚度切削,进而改善了难加工材料的可加工性,显著降低进给方向切削力。通过采用Dynoware切削力分析软件对图18中的切削力数据进行滤波处理和误差补偿,选取加工过程中切削力波形平稳阶段,得出该阶段的切削力峰值。由上述处理结果可知:普通高速干切工况下3个方向的切削力 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 分别为219.3、223.9、95.6 N;超声振动辅助高速干切工况下3个方向的切削力 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 分别为213.8、148.9、82.5 N。对比普通高速干切和超声振动辅助高速干切2种工况下的3个方向的切削力可知:超声振动辅助加工技术的引入使切向切削力 $F_x$ 、进给方向切削力 $F_y$ 、纵向切削力 $F_z$ 分别降低2.5%、33.5%和13.7%。

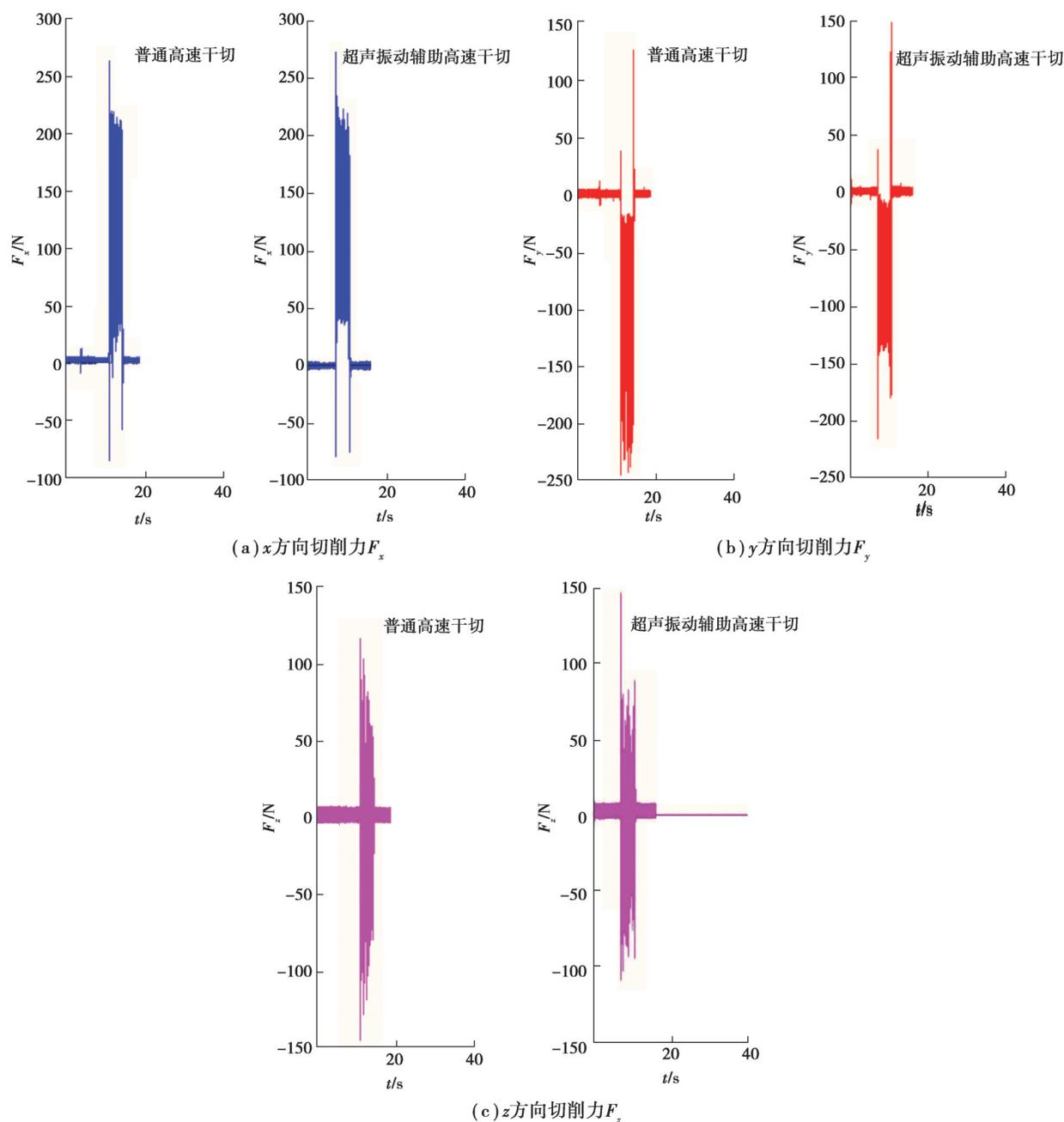


图18 普通高速干切与超声振动辅助高速干切不同方向切削力对比

Fig. 18 Comparison of cutting forces in different directions between ordinary and ultrasonic vibration-assisted high-speed dry cutting

使用白光干涉仪对30CrMnSiNi2A普通高速干切和超声振动辅助高速干切加工表面进行了粗糙度测量,在进刀口、出刀口和中间区域3个位置,每个位置各选取3个相邻检测点进行测量,每个位置3个检测点的粗糙度数据取平均值后得到2种加工方式下刀具进刀口、出刀口和中间区域3个位置的粗糙度参数。在普

通高速干切条件下,进刀口、出刀口和中间区域 3 个位置的面粗糙度  $S_a$  分别为 0.98、0.67、0.89  $\mu\text{m}$ ;而在超声振动辅助高速干切条件下,3 个位置的面粗糙度  $S_a$  分别为 0.57、0.62、0.71  $\mu\text{m}$ 。相较于普通高速干切,超声振动辅助高速干切在所选取的 3 个测量位置的表面粗糙度分别降低了 41.8%、7.5% 和 20.2%,达到了提高表面加工质量的目的。图 19 与图 20 分别为普通高速干切与超声振动辅助高速干切 30CrMnSiNi2A 中间区域的二维和三维表面形貌图,超声振动辅助加工技术的引入使加工表面呈现更均匀平整的表面形貌和表面纹理,提高了加工表面平整性和纹理均匀性。

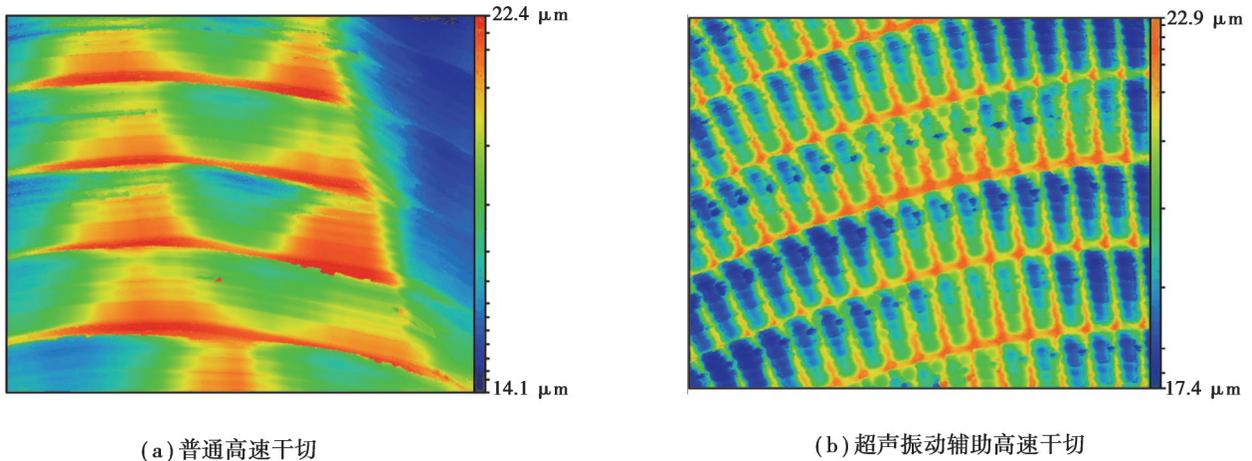


图 19 普通高速干切与超声振动辅助高速干切二维表面形貌图

Fig. 19 2D surface morphology of ordinary and ultrasonic vibration-assisted high-speed dry cutting

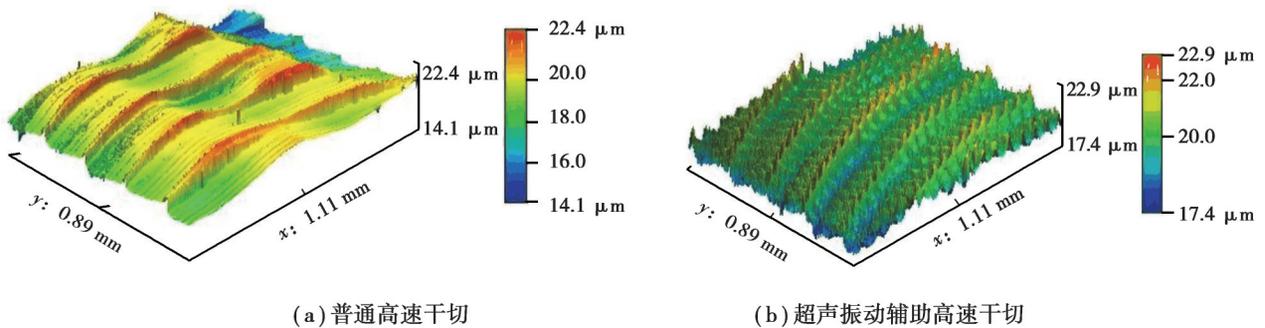


图 20 普通高速干切与超声振动辅助高速干切三维表面形貌图

Fig. 20 3D surface morphology of ordinary and ultrasonic vibration-assisted high-speed dry cutting

采用超景深显微镜(VHX-1000)对比观察 2 种加工条件下的切屑形貌,如图 21 所示。由图中框图和红色虚线部分所示,相较于普通高速干切,超声振动辅助高速干切过程中切屑光洁度更高,切屑呈现短而卷的折断效果,更有利于从工件和刀具之间排出,间接验证了超声振动辅助高速干切可有效降低切削力和表面粗糙度。

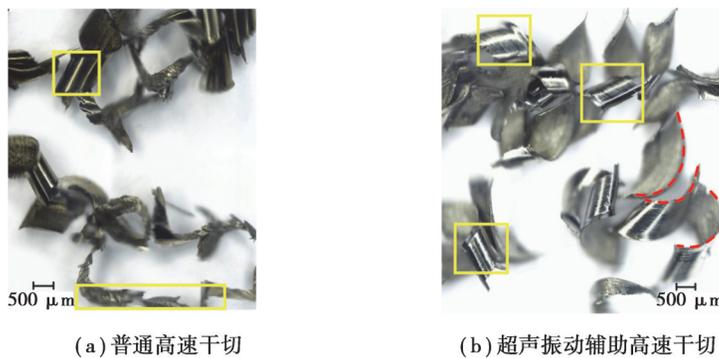


图 21 普通高速干切与超声振动辅助高速干切切屑形貌

Fig. 21 The chip morphology of ordinary and ultrasonic vibration-assisted high-speed dry cutting

综上,针对难加工材料30CrMnSiNi2A,对比分析普通高速干切和超声振动辅助高速干切2种条件下的切削力、表面粗糙度和切屑形态,超声振动辅助加工技术的引入显著降低了切削力和表面粗糙度,可有效改善表面加工质量,适用于典型难加工材料的辅助高速干切。

## 4 结束语

1)二级放大超声换能器的纵向振动模态和谐响应频率分别为19.734 kHz和19.8 kHz,与理论预设的20 kHz分别相差1.3%和1.0%,谐响应分析结果得到纵向振动相对位移为16.4  $\mu\text{m}$ 。

2)由二级放大超声换能器性能测试结果可知:串联谐振频率 $F_0$ 为20.617 kHz,与有限元仿真谐响应分析频率结果偏差3.9%;动态电阻 $\Omega_1$ 为78.4  $\Omega$ ,动态电容 $C_1$ 为585.3 pF,动态电感 $L_1$ 为101.8 mH,静态电容 $C_0$ 为6.3 nF,机械品质因素 $Q_m$ 为187.2。二级放大超声换能在谐振频率下可保持连续稳定工作,能量传递效率较高。

3)二级放大超声换能器纵向振动输出振幅随功率增加而增大,且整体不呈线性关系。当输出功率为50%时,其纵向振动振幅为15.4  $\mu\text{m}$ ;当输出功率为100%时,其纵向振动振幅最高达25.1  $\mu\text{m}$ 。

4)由典型难加工材料30CrMnSiNi2A有无超声振动辅助高速干切实验结果可知:与普通高速干切相比,大振幅超声振动辅助装置的引入可使进给方向、纵向和切向切削力分别降低33.5%、13.7%和2.5%。

5)普通高速干切工况下,进刀口、出刀口和中间区域3个位置的面粗糙度分别为0.98、0.67、0.89  $\mu\text{m}$ ;而大振幅超声振动辅助高速干切相应位置的面粗糙度分别为0.57、0.62、0.71  $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度分别降低41.8%、7.5%和20.2%。同时,所研制的大振幅超声振动辅助加工装置可使切屑呈现短而卷的形貌,且光洁度更高,利于其从工件和刀具之间排出。

## 参考文献

- [1] 吴陈军. 纵扭共振超声铣削系统研制及其加工实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
Wu C J. Design and experimental study of longitudinal-torsional vibration assisted milling system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [2] 童志强. 纵扭共振旋转超声加工碳纤维复合材料的研究[D]. 厦门:集美大学,2014.  
Tong Z Q. Study on longitudinal-torsional resonance rotary ultrasonic machining of carbon fiber composites[D]. Xiamen: Jimei University, 2014. (in Chinese)
- [3] 杨潇,曹华军,杜彦斌,等. 基于切削比能的高速干切工艺刀具温升调控方法[J]. 中国机械工程,2018,29(21): 2559-2564.  
Yang X, Cao H J, Du Y B, et al. Regulation and control method for tool temperature in high-speed dry cutting processes based on specific cutting energy[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(21): 2559-2564. (in Chinese)
- [4] 刘飞,曹华军,何乃军. 绿色制造的研究现状与发展趋势[J]. 中国机械工程,2000, 11(1/2):105-110.  
Liu F, Cao H J, He N J. On state-of-the-art of green manufacturing [J]. China Mechanical Engineering, ,2000, 11(1/2):105-110. (in Chinese)
- [5] 曹华军,李洪丞,曾丹,等. 绿色制造研究现状及未来发展策略[J]. 中国机械工程,2020,31(2): 135-144.  
Cao H J, Li H C, Zeng D, et al. The state-of-art and future development strategies of green manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2): 135-144. (in Chinese)
- [6] Kardys W, Milewski A, Kogut P, et al. Universal ultrasonic generator for welding[J]. Acta Physica Polonica A, 2013, 124(3): 456-458.
- [7] Yokozawa H, Twiefel J, Weinstein M, et al. Dynamic control of the resonant frequency of ultrasonic transducer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017,262: 64-67.
- [8] 刘宁庄,张远宝,许龙,等. 基于模糊PID控制的超声电源频率跟踪设计[J]. 电力电子技术,2021,55(10): 80-82.  
Liu N Z, Zhang Y B, Xu L, et al. Design of ultrasonic power frequency tracking based on fuzzy PID control[J]. Power Electronics, 2021, 55(10): 80-82. (in Chinese)
- [9] 朱传宇. 旋转超声刀柄设计及其试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.  
Zhu C Y. Design and experimental research of rotary ultrasonic tool holder[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)

- [10] 茆廷学. 光学玻璃超声振动铣削刀柄设计研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2018.  
Mao T X. Research on design of ultrasonic vibration milling handle for optical glass[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [11] 陈桂生,朱革非,张宏彬. 大振幅超声换能器设计[J]. 声学技术,1983(1):21-31.  
Chen G S, Zhun G F, Zhang H B. Design of large amplitude ultrasonic transducer[J]. Technical Acoustics, 1983(1):21-31. (in Chinese)
- [12] 陈桂生. 超声换能器设计[M]. 北京:海洋出版社,1984:387.  
Chen G S. Design of ultrasonic transducer[M]. Beijing: China Ocean Press, 1984:387. (in Chinese)
- [13] 靳涛. 大振幅超声变幅杆在切割蜂窝材料中的设计与应用[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2020.  
Jin T. Design and application of large amplitude ultrasonic luff in cutting honeycomb materials[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2020. (in Chinese)
- [14] 梁欣,吕明,王时英,等. 齿轮超声加工大振幅纵弯谐振变幅器的设计[J]. 工程设计学报,2015,22(2):172-177,184.  
Liang X, Lv M, Wang S Y, et al. Design of longitudinal-flexural coupling vibration transformer with large amplitude used in gear ultrasonic machining [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(2):172-177,184. (in Chinese)
- [15] 潘巧生,刘永斌,贺良国,等. 一种大振幅超声变幅杆设计[J]. 振动与冲击,2014,33(9):1-5,20.  
Pan Q S, Liu Y B, He L G, et al. Design of an ultrasonic horn with high amplitude of longitudinal vibration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(9): 1-5,20. (in Chinese)
- [16] 曹凤国. 超声加工[M]. 北京:化学工业出版社,2014.  
Cao F G. Ultrasonic machining[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [17] Chern G L, Lee H J. Using workpiece vibration cutting for micro-drilling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2006, 27: 688-692.
- [18] Asami T, Miura H. Study of ultrasonic machining using longitudinal and torsional vibration[C]//IEEE International Ultrasonics Symposium, October 21-24, 2015, Taipei, Taiwan. IEEE, 2015:1-4.
- [19] Asami T, Miura H. 2P4-6 hole machining of brittle materials by ultrasonic longitudinal-torsional vibration[J]. Symposium on Ultrasonic Electronics, 2013, 34:273-274.
- [20] Paktinat H, Amini S. Ultrasonic assistance in drilling: FEM analysis and experimental approaches[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(5/6/7/8):2653-2665.
- [21] Zhou J K, Liu M M, Lin J Q, et al. Elliptic vibration assisted cutting of metal matrix composite reinforced by silicon carbide: an investigation of machining mechanisms and surface integrity[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 1115-1129.
- [22] Ma G F, Kang R K, Yan C, et al. Mechanical model of thrust force and torque in longitudinal-torsional coupled ultrasonic-assisted drilling of CFRP[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 189-202.
- [23] Zhang B, Wang F, Fan J, et al. Simulation and experimental analysis on influences of axial cutting-induced vibration on edge trimming quality of carbon fiber reinforced plastics[J]. Journal of Manufacturing Processes,2021,68:632-645.
- [24] 崔鑫. 三维超声振动切削技术的研究[D]. 沈阳:东北大学,2012.  
Cui X. Research on three-dimensional ultrasonic vibration cutting technology[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012. (in Chinese)
- [25] 袁松梅,唐志祥,吴奇,等. 纵扭超声换能器设计及其性能测试研究[J]. 机械工程学报,2019,55(1):139-148.  
Yuan S M, Tang J X, Wu Q, et al. Design of longitudinal torsional ultrasonic transducer and its performance test[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1):139-148. (in Chinese)
- [26] 王佳奇. 纵扭共振超声波发生器设计及辅助铣削工艺过程仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.  
Wang J Q. Longitudinal-torsional resonance ultrasonic generator design and simulation research on auxiliary milling process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [27] 王明海,李世永,郑耀辉,等. 超声振动铣削加工参数对切削力的影响[J]. 中国机械工程,2014,25(15): 2024-2029.  
Wang M H, Li S Y, Zheng Y H, et al. Effects of processing parameters on cutting force in ultrasonic vibration milling[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(15):2024-2029. (in Chinese)