

文章编号 1004-924X(2026)11-1732-11

高频超声-快刀伺服复合加工及工艺验证

王 勋, 王 峥, 郑云祥, 刘伯林, 朱 岩*

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 微结构阵列是先进光学系统的关键功能载体, 其规模化生产高度依赖于模压成型。常见的模具由模具钢等难加工材料制备, 其表面微结构的高效高精制造是关键技术挑战。为此, 提出一种将高频椭圆振动切削 (High-frequency Elliptical Vibration Cutting, HEVC) 和快刀伺服技术 (Fast Tool Servo, FTS) 相结合的方法, 以实现制造精度和效率的双提升。通过构建纵弯耦合振动的传递矩阵解析模型, 初步完成了高频椭圆振动切削装置的结构设计, 并结合有限元仿真优化分析, 研制了谐振频率达 110 kHz 的轻量化高频超声椭圆振动装置。该装置在弯振与纵振方向可分别输出 2.5 μm 与 1 μm 的稳定振幅。然后, 搭建了复合加工平台, 系统分析了负载质量对快刀伺服系统输出幅值的影响, 明确了其最优工作负载区间 (≤ 100 g), 验证了所研制振动装置与快刀伺服系统的动态耦合可行性。最后, 以 S136 模具钢为对象, 开展了微结构阵列切削实验。实验结果表明, 所加工的微结构阵列形貌均匀, 结构轮廓的深度误差和宽度误差分别为 11.62% 和 3.61%, 且刀具磨损可忽略不计。本研究不仅验证了所提复合加工方案的可行性与稳定性, 还为解决难加工材料表面复杂微结构的高效超精密加工提供了一种有效的技术途径。

关键词: 超精密加工; 模具钢; 微结构阵列; 超声椭圆振动切削; 快速刀具伺服

中图分类号: TH16 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20263411.1732 CSTR: 32169.14.OPE.20263411.1732

High-frequency ultrasonic-fast tool servo integrated machining and process verification

WANG Xun, WANG Zheng, ZHENG Yunxiang, LIU Bolin, ZHU Yan*

(School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China)

* Corresponding author, E-mail: zhuyan523@hust.edu.cn

Abstract: Microstructure arrays are critical functional elements in advanced optical systems, and their mass production relies heavily on compression molding. Molds are typically fabricated from difficult-to-machine materials such as mold steel, making the efficient and high-precision fabrication of surface microstructures a key technical challenge. To address this issue, a hybrid method integrating high-frequency elliptical vibration cutting (HEVC) with fast tool servo (FTS) technology is proposed to enhance both machining accuracy and efficiency. A transfer matrix-based analytical model for longitudinal - bending coupled vibration was established to guide the structural design of the high-frequency elliptical vibration device. In conjunction with finite element simulations for optimization, a lightweight ultrasonic elliptical vibration device

收稿日期: 2026-03-17; 修订日期: 2026-04-27.

基金项目: 华中科技大学仪器设备开放共享基金资助项目 (No. KFGX2026015)

with a resonant frequency of 110 kHz was developed. The device is capable of delivering stable vibration amplitudes of 2.5 μm and 1 μm in the bending and longitudinal directions, respectively. A hybrid machining platform was subsequently constructed. The influence of load mass on the output amplitude of the FTS system was systematically investigated, identifying an optimal working load range (≤ 100 g) and confirming the feasibility of dynamic coupling between the developed vibration device and the FTS system. Machining experiments on S136 mold steel were conducted to fabricate microstructure arrays. The results demonstrate that the produced microstructures exhibit uniform morphology, with depth and width errors of 11.62% and 3.61%, respectively, and negligible tool wear. These findings validate the feasibility and stability of the proposed hybrid machining strategy and provide an effective technical approach for the efficient and ultra-precision fabrication of complex microstructures on difficult-to-machine materials.

Key words: ultra-precision machining; mold steel; microstructure arrays; ultrasonic elliptical vibration cutting; fast tool servo

1 引 言

随着光学和光电子技术的快速发展,微结构表面由于具有独特的光学性能、润滑性和耐磨损性,得到了广泛的应用。快速刀具伺服金刚石切削技术是超精密加工领域的一项关键技术,能够一次性成型具有复杂轮廓的光学微结构,如微透镜阵列、衍射光栅以及各类功能性的微结构阵列^[1]。快速刀具伺服系统也因其高频响能力,可以高效地加工出这些微结构并且获得优异的表面质量与面型精度,这对于许多光学元件的性能至关重要^[2]。因此,该技术广泛应用于军事、光纤通信等装备的制造。

模压成型是一种利用模具对目标材料进行成型加工的工艺,是实现光学表面大批量高精高效制造的一种有效方法^[3-4]。在模压成型工艺中,模具表面形貌质量直接决定成型产品的表面质量,因此,模具须具备高表面质量才能确保高质量的成型结果。然而,随着模具工业的不断发展,对具有复杂功能微纳米结构表面的模具需求日益增长,这对加工技术提出了新的挑战。S136 模具钢具有高耐磨性、高耐腐蚀性与良好的机械性能,是制造精密光学模具的理想材料^[5-6]。但直接运用快速刀具伺服系统对 S136 模具钢等铁基材料表面进行切削加工时,由于金刚石刀具与铁基材料之间易发生热化学磨损,刀具磨损严重,难以实现稳定高效加工^[7]。

针对模具钢等难加工材料,Shamoto 和 Moriwaki 等提出了超声椭圆振动切削技术(Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting Technology, UEVC)^[8-9]。超声椭圆振动切削技术通过在加工过程中的刀具上附加额外的椭圆轨迹运动,使切削过程中刀具与被加工材料实现周期性分离,增加了空气与切削液的润滑,且每一个振动运动周期内材料去除量极小,对于切削力、切削热和切削温度起到了有效降低作用^[10-12]。针对难加工材料微结构的高效超精密加工需求,Kurniawan 等提出一种超声椭圆振动切削与快刀伺服切削复合的微结构高效加工思路^[13]。然而,随着快刀伺服系统负载的增加,在相同驱动参数下,快刀伺服的有效振幅会出现明显衰减,从而直接限制所能加工微结构的深宽比与轮廓精度。现有的国内外超声椭圆振动切削装置的质量普遍超过了 500 g,工作频率通常在 40 kHz 左右^[14-15],这类装置给快刀伺服系统带来较大负载,影响了快刀伺服系统的动态性能。此外,在超声椭圆振动装置的轻量化设计过程中,随着装置重量的减小,其工作频率会随之升高,而高工作频率也可以进一步提升微结构的加工效率^[16]。为此,本研究旨在设计一款新型的轻量化(< 500 g)超声椭圆振动装置,装置的工作频率超过 100 kHz,将其与商业化的快刀伺服系统耦合,验证了该工艺对模具钢等难加工材料微结构的高效超精密制造能力。

2 原理

2.1 高频椭圆振动切削装置

高频椭圆振动切削装置需要在一个谐振频率下同时工作在两种不同的振动状态,最终生成稳定的高频椭圆振动轨迹。考虑到切削椭圆振动方向对表面质量的影响,本装置选择工作在纵振模式(Longitudinal Vibration Mode, LM)和弯振模式(Bending Vibration Mode, BM)的耦合模式。

为了实现高频椭圆振动切削装置的设计,通过牛顿第二定律、胡克定律和 Timoshenko 梁理论来构建纵弯耦合振动的解析模型,探究高频椭圆振动切削装置设计的可行性,并进一步设计其具体结构的尺寸。本装置的核心结构是夹心谐振式圆锥形变幅杆,这种结构不仅保证了装置自身的强度和刚度,还能更好地适应长时间且高频率的工作环境。为了简化分析,先分析一根单一均质的等截面圆形梁,梁的横截面面积是 A ,如图 1 所示。



图 1 纵弯耦合状态下单一均质等截面圆形梁两侧的边界条件

Fig. 1 Boundary conditions on both sides of single homogeneous circular beam with uniform cross-section under longitudinal-bending coupling

梁的振动状态是时间与空间的共同结果,因此其振动方程也是包含位置与时间的函数。为了方便陈述,这里仅讨论在某一时刻下,梁的不同位置的振动状态变化。换句话说,就是把时间当作常数,而把位置当作方程的唯一变量。因此,纵弯耦合振动的解析模型如下:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ F_1 \\ y_1 \\ \theta_1 \\ M_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} = T_0 \begin{bmatrix} u_2 \\ F_2 \\ y_2 \\ \theta_2 \\ M_2 \\ Q_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$T_0 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $u_i, F_i, y_i, \theta_i, M_i, Q_i$ 分别是梁在 $x=j$ ($i=1$ 时, $j=0$; $i=2, j=l$) 时横截面的位移(沿 x 方向)、力(沿 x 方向)、位移(沿 y 方向)、转角、弯矩、力(沿 y 方向); T_0 是这两个横截面之间的传递矩阵,通过它联系两个端面的参数。

由于简化梁的两端不受力,所以其边界条件是自由状态-自由状态,在该状态下,有 $F_1=F_2=0, M_1=M_2=0, Q_1=Q_2=0$, 将上述等式关系代入式(1),则有:

$$a_{21} = 0, \quad (3)$$

$$a_{53} \times a_{64} - a_{54} \times a_{63} = 0. \quad (4)$$

根据边界条件和已知的材料参数,就可以通过式(3)和式(4)分别求解其不同振动模式的谐振频率。其中,式(3)是梁的纵向振动的频率方程,式(4)则是梁的弯曲振动的频率方程。梁的密度 ρ 为 $7\,750 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 E 为 $1.93 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, 泊松比 σ 为 0.31。将材料参数代入频率方程后,通过 MATLAB 软件求解频率方程并绘制其图像,如图 2 所示。

通过选择正确的工作模式,可以有效减少数值解析的计算量。进一步,从图 2(a)中观察到随着纵振模式阶数的增加,在固定谐振频率的前提下,梁的长度在增加。图 2(b)显示随着弯曲振动模式的增加,在固定谐振频率和直径的前提下,梁的长度在增加。为了保证装置能在高频(超过 100 kHz)状态下工作,并且整体质量要控制得比较小,这就要求纵振和弯振保持较低的模式。由图 2(a)可知, LM1 曲线下当谐振频率 $f \geq 100 \text{ kHz}$ 时,总长度 $l \leq 25 \text{ mm}$, 这并不适合加工制造。除此以外,一阶纵振与其他阶的弯振最多只有一个驻点,这也不利于装置的稳定性。因此应该选取 LM2, 也就是二阶纵振模式。进一步,二阶纵振模式下,由式(3)可得 $f \times l$ 是个定值,为 $4\,990.3 \text{ Hz} \cdot \text{m}$, 再根据图 2(b)中显示的内容,模式阶数越小,直径越大,整体的质量就越大;模式阶数越大,直径越小,这给制造、装配过程带来了极大的困难。通过对比,在第四阶弯振模式下,梁的直

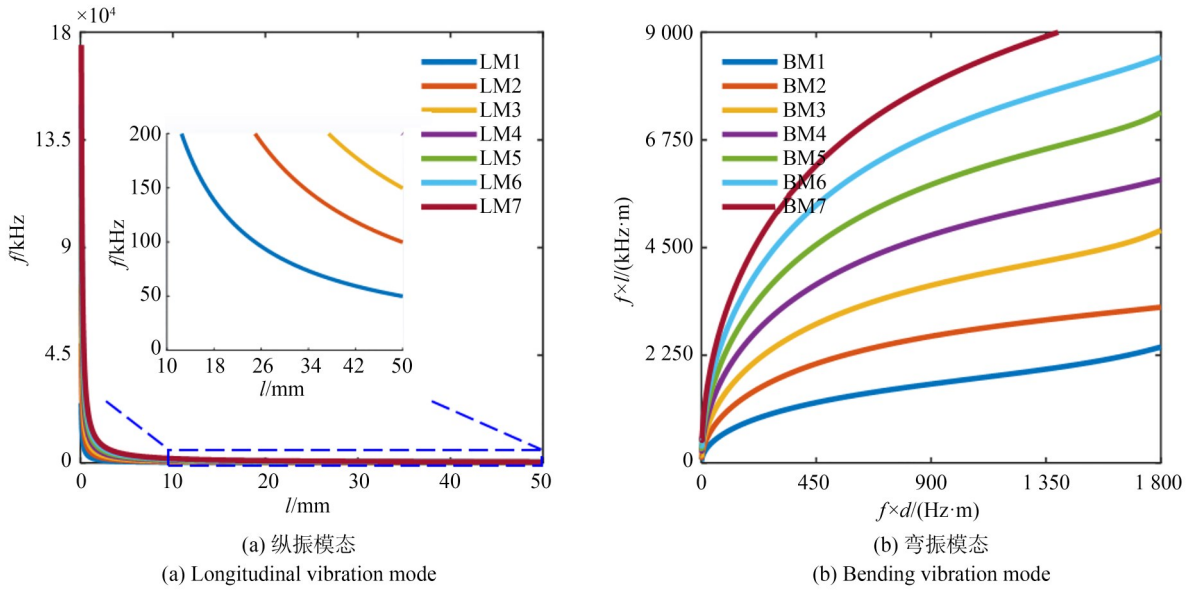


图 2 单一均质等截面梁的振动频率与结构尺寸关系(图中的数字表示模式阶数)

Fig. 2 Relationship between vibration frequency and structural dimensions of a single homogeneous beam with uniform cross-section(The numbers in the legend represent the model order)

径是合理的,这方便了压电陶瓷片和结构件的制造。并且,二阶纵振模态和四阶弯振模态的振动曲线之间是可以有两个驻点的,这也保证了装置在高频振动工作状态下的稳定性和刚度。通过上述分析,利用构建的纵弯耦合振动的解析模型从理论上判断出高频率、轻量化的椭圆振动切削装置的制作是可行的,另外,还获得了其工作模态的具体阶数。

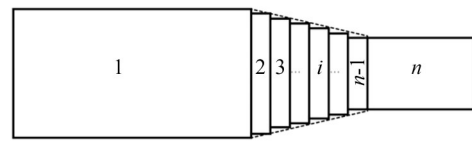
2.2 数值解析结构参数

获得装置结构尺寸的具体数值解是制造装置的关键。上述已构建了等截面圆形梁的数值解析方程,但是圆锥形变幅杆的特殊结构,存在一部分非等截面的梁。此时,可以将圆锥部分拆分成多个等截面的单元梁,如图 3(a)所示。

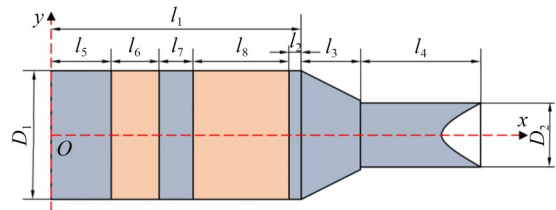
利用传递矩阵法和式(1)创建不同单元梁之间的振动联系,则不同单元梁之间的关系式如下:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ F_1 \\ y_1 \\ \theta_1 \\ M_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} = T_0^1 T_0^2 T_0^3 \dots T_0^{i-1} \begin{bmatrix} u_i \\ F_i \\ y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ Q_i \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: T_0^{i-1} 表示第 $i-1$ 个单元梁的传递矩阵,



(a) 单元梁划分示意图
(a) Schematic diagram of unit beam division



(b) 结构示意图
(b) Structural schematic diagram

图 3 高频椭圆振动切削装置

Fig. 3 High-frequency elliptical vibration cutting devices

$i \geq 2$ 且为整数。

根据上述分析,纵弯耦合振动的解析模型、装置的模态阶数、夹心谐振式结构都已确定。但是,考虑到驻点的位置不能选择在压电陶瓷上,因此在压电陶瓷组之间用金属结构件隔开。图 3(b)是完整装置的结构示意图。长度为 l_7 的结构件为“中间盖板”,其左侧是纵振压电陶瓷组,右侧是弯振压电陶瓷组。装置的初始频率

设定为 120 kHz,为了简化计算,设定大端面直径 D_1 是小端面直径 D_2 的 2 倍。通过纵弯耦合振动数值模型对每个结构部件的尺寸参数进行了迭代计算,最终得到一组合适的结构参数,如表 1 所示。

表 1 结构参数的理论值

Tab. 1 Theoretical values of structural parameters

l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	D_1	D_2
27	2	6	10	8	4	5	8	12	6

表 2 PZT-8 的物理参数

Tab. 2 Physical parameters of PZT-8

Parameter	Value
Stress piezoelectric coefficient matrix/($C \cdot m^{-1}$)	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 10.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.3 & 0 & 0 \\ -4.1 & -4.1 & 14.0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{10}$
Stiffness matrix/($N \cdot m^{-2}$)	$\begin{bmatrix} 14.9 & 8.11 & 8.11 & 0 & 0 & 0 \\ 8.11 & 14.9 & 8.11 & 0 & 0 & 0 \\ 8.11 & 8.11 & 13.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.13 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.13 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.42 \end{bmatrix} \times 10^{10}$
Electrostatic force constant/($N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$)	$\begin{bmatrix} 518.4 & 0 & 0 \\ 0 & 518.4 & 0 \\ 0 & 0 & 183 \end{bmatrix}$

在模拟计算过程中,两个结构之间的界面连接处存在微小的网格单元,这很容易导致计算量巨大以及结果失真。因此,在压电陶瓷环与金属结构件之间设置了不同的网格划分方法。设置压电陶瓷环的网格划分以六面体为主,而设置金

3 仿真与测试

3.1 仿真优化设计

根据初步的结构尺寸构建了模型,忽略了刀具、电极片和环氧树脂胶黏剂的影响。随后,通过结合有限元模拟软件 ANSYS 进行模拟分析对装置组装进行了优化。在运用有限元分析技术处理模型时,需设定所要用到的各种材料属性。其中,金属结构件部分是由不锈钢材料制作,压电陶瓷则是选用 PZT-8,具体参数如表 2 所示。

属结构件则采用机械网格划分法。

基于优化后的结构参数进行振动模态分析,结果如图 4 所示。该装置在弯曲振动的第四阶共振模式和纵向振动的第二阶共振模式下工作。如图 4(a)所示,可以看到弯曲振动的共振频率为

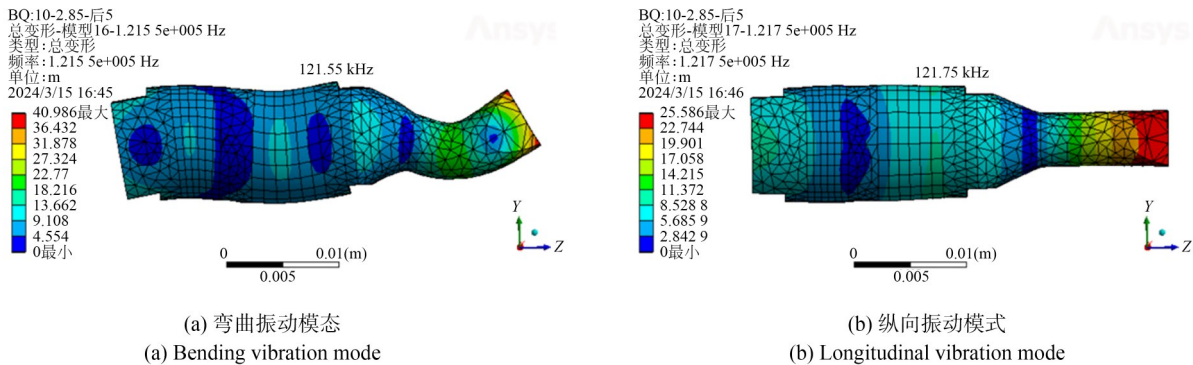


图 4 复合加工装置的振动模态分析

Fig. 4 Vibration mode analysis of integrated machining devices

121.55 kHz,且在中间盖板处分布着驻点。如图 4(b)所示,纵向振动的共振频率为 121.75 kHz,在中间盖板处也分布着一个驻点。仔细观测,这两种振动模态在中间盖板处的驻点是重合的,因此可以作为固定支撑点,在此处施加的固定约束对振动模态影响较小。优化后的装置结构参数如表 3 所示。

表 3 模拟优化后的结构参数

Tab. 3 Structural parameters after simulation optimization

l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	l_7	l_8	D_1	D_2
21.8	2	6	10	5	4	2.8	8	12	6

3.2 测 试

为验证前述理论设计与有限元仿真优化的可行性,对已完成制造与装配的高频超声-快刀伺服系统进行了综合性能测试。

测试系统如图 5 所示。其中,信号发生器用于产生两路频率、幅值与相位独立可调的高频正弦交流电信号,其驱动频率范围完全覆盖高频椭圆振动的工作频段。然而,由于驱动对象为具有高容性特性的压电陶瓷圆环,需施加高压交流信号才能有效激励,因此信号发生器输出的信号幅值不足以直接驱动装置,需接入功率放大器。功率放大器接收来自信号发生器的两路高频正弦信号,对其进行高倍数电压放大,同时保持频率与相位不变,从而满足高频椭圆振动切削的实际驱动需求。经放大后的两路信号分别输入至装置的弯曲振动压电陶瓷组与纵向振动压电陶瓷组,激发相应方向的高频机械振动;该振动经超声变幅杆传递并耦合,最终作用于金刚石刀具刀尖,形成椭圆轨迹振动。椭圆轨迹由两路存在相位差的单向振动耦合而成,为准确表征其运动特

性,采用激光多普勒测振仪对两路振动幅值分别进行测量:将两束激光聚焦于金刚石刀尖,通过检测反射激光的时间差解析得到各方向的振动幅值。此外,搭载该高频椭圆振动装置的快速刀具定位台(芯明天 P93. X70)由专用快速刀具压电控制器驱动,通过输入相应的正弦交流电信号实现精确调控。

为评估装置性能并为后续工艺实验提供参数选择依据,对高频超声-快刀伺服装置开展了三项测试实验。首先,进行高频椭圆振动装置的幅值测试,在两个振动方向上施加频率为 110 kHz 的高频正弦交流电信号。测试结果如图 6(a)所示,该装置在弯曲振动方向振幅为 $2.5 \mu\text{m}$,纵向振动振幅为 $1 \mu\text{m}$,两路振幅信号的频率均是 110 kHz,耦合后形成稳定的椭圆运动轨迹。为了更好地展现出本装置优越的性能,与商业产品 EL-50 Σ 型号超声椭圆振动切削装置作对比,该装置的振动频率为 41.7 kHz,两个方向的最大振动幅值均是 $4 \mu\text{m}$ 。可以看出,自研装置的振幅有所衰减,这是两个原因造成的。一方面,受压电陶瓷材料性能的限制;另一方面,弹性固体会随着谐振频率的提升而降低振幅,这是装置设计的物理特性。但是,超声振动切削装置的加工效率与振动频率和切削方向的最大幅值的乘积成正比关系^[16]。因此,自研装置相比商业产品,加工效率上提升了约 65%,这为高效加工提供了技术保障。为评估快速刀具定位台的负载能力,进行了不同载荷下的振幅测试实验。在空载条件下,设定振动全幅值为 $12.17 \mu\text{m}$ 。在相同驱动参数下,于快速刀具定位台顶部逐级加载不同质量块,实验结果如图 6(b)所示。当负载质量低于 100 g 时,定位台振幅变化较小,全幅值仍保持在 $12 \mu\text{m}$ 以上;而当负载质量超过 500 g 时,全幅值下降至 $10 \mu\text{m}$ 以下。另外,测试了自研装置的质量,其数值为 100 g,这表明自研的高频超声椭圆振动装置对快速刀具定位台性能影响较小,二者可实现良好耦合应用。为进一步研究高频超声-快刀伺服系统的动态特性,开展了扫频实验以获取快速刀具定位台的幅频特性曲线,以分析其在预定负载下的工作性能与稳定性边界,为后续精密加工中的运动控制与工艺参数优化提供依据。

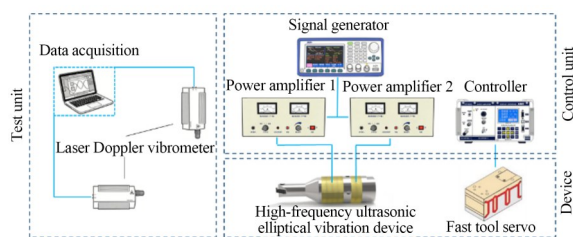
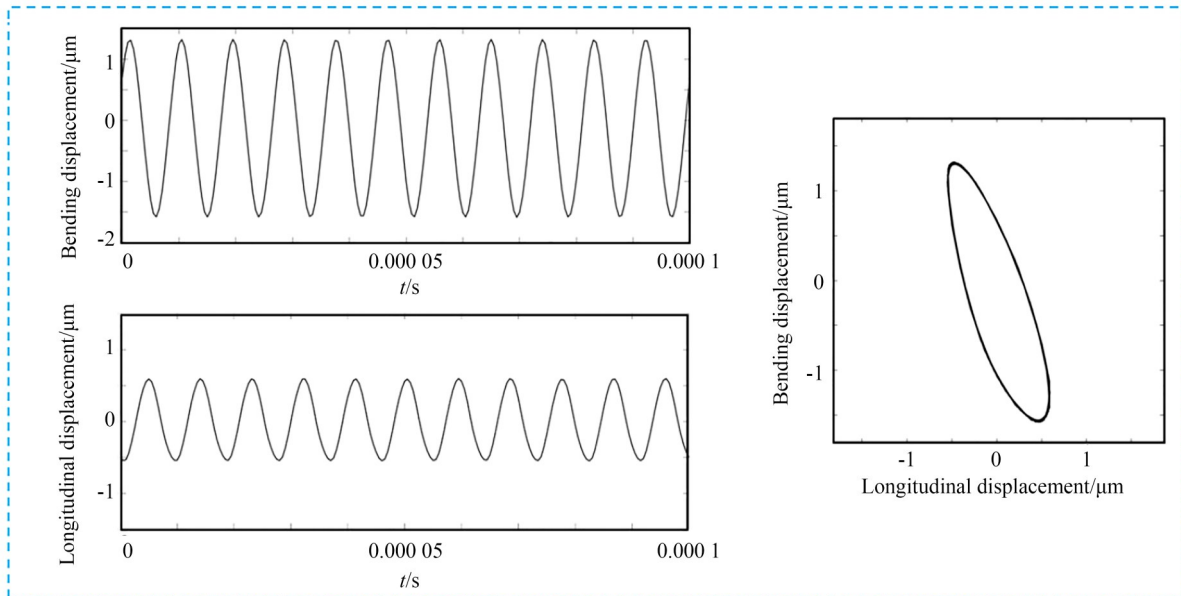


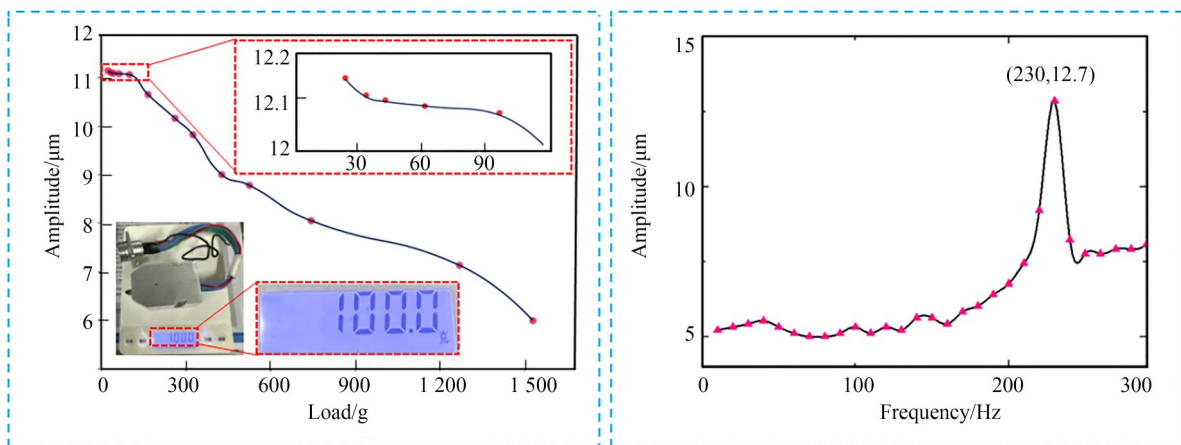
图 5 幅值测试系统

Fig. 5 Amplitude testing system



(a) 高频超声椭圆振动装置振幅测试

(a) Amplitude measurement of the high-frequency ultrasonic elliptical vibration device



(b) 快速刀具定位台负载能力测试

(b) Load capacity test of the fast tool servo positioning stage

(c) 快速刀具定位台幅频特性曲线

(c) Frequency response characteristic curve of the fast tool servo positioning stage

图 6 测试结果

Fig. 6 Test results

实验时,在搭载高频椭圆振动装置的快速刀具定位台输入端施加幅值恒定、频率可调的正弦电压信号,同步采集输出端位移幅值,得到幅频特性曲线如图 6(c)所示。曲线在 230 Hz 附近出现幅值峰值,表明系统一阶共振频率位于该频率附近。因此,在后续实验加工中,将快速刀具定位台的工作频段选定在 161 Hz(约 230 Hz 的 70%)以下。该频段内系统振幅稳定、响应可控,有利于提高精密加工中的可靠性与加工过

程的稳定性。

4 实验验证与结果分析

基于高频椭圆振动装置质量轻、体积小特点,本研究对高频椭圆振动装置进行了集成化应用拓展,将该装置搭载于快速刀具定位台上,构建出高频超声-快刀伺服加工系统。图 7 为搭建好的高频超声-快刀伺服加工系统超精密切削平

台,耦合了高频超声椭圆振动装置的快速刀具定位台固定在 Z 轴上,S136 模具钢装夹在吸盘夹具上,通过机床主轴真空吸盘附在主轴上,随主轴转动。切削液用于润湿工件表面,降低切削温度,促进切屑排出。利用该系统,对 S136 模具钢表面进行了微结构阵列加工。

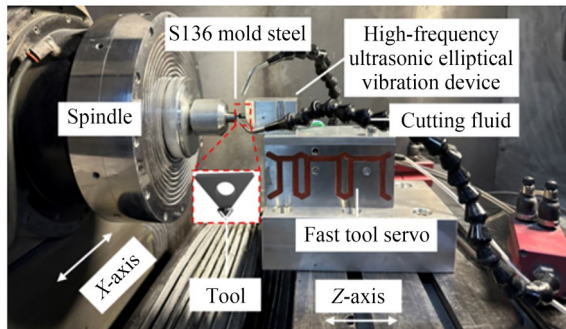


图 7 高频超声-快刀伺服加工系统超精密切削平台
Fig. 7 Ultra-precision cutting platform of high-frequency ultrasonic-fast tool servo machining system

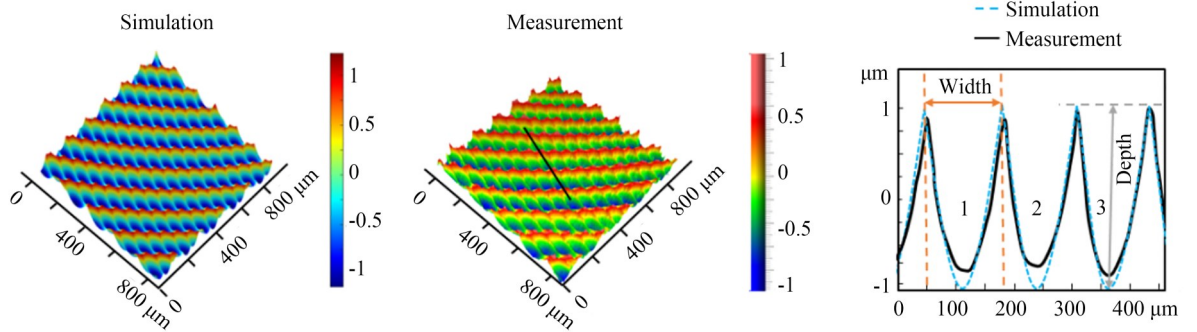
为验证高频超声-快刀伺服加工系统对模具钢的微结构加工能力,开展了 S136 模具钢表面微结构阵列实验。首先,采用 MATLAB 对目标微结构形貌进行仿真,仿真参数与后续实验参数保持一致。仿真结果如图 8(a)所示,截取仿真区域,可见微结构阵列沿螺旋轨迹均匀、紧凑地分布于工件仿真表面,单个微结构呈椭圆凹透镜状。随后开展加工实验,工艺参数如表 4 所示。检测工具为 ZYGO 光学表面轮廓仪,在放大倍数 10× 时,对切削后 S136 模具钢工件表面

表 4 S136 模具钢微结构阵列切削实验参数

Tab. 4 Microstructure array cutting experimental parameters of S136 mold steel

Machining conditions	Value
Vibration frequency/kHz	110
Amplitude in cutting direction/ μm_{p-p}	2
Amplitude in depth-of-cut direction/ μm_{p-p}	1
Cutting speed/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	50
Feed rate/ $(\mu\text{m}\cdot\text{rev}^{-1})$	10
Amplitude/ μm_{p-p}	4
Frequency/Hz	120
Nose radius, R/mm	0.5
Rake angle/ $(^\circ)$	0
Flank angle/ $(^\circ)$	10
Material	S136 mold steel
Diameter/mm	10

直径 6 mm 位置 $868.148 \mu\text{m} \times 868.148 \mu\text{m}$ 的区域进行观测,结果如图 8(a)所示,由三维形貌可以看出,在快刀伺服的作用下,金刚石刀具通过 Z 轴往复运动,以螺旋进给的方式在 S136 模具钢工件上一次加工出多个微结构阵列,微结构阵列结构完整,排列沿螺旋线分布整齐。进一步,从图 8(a)中提取了切削速度方向上的轮廓曲线,对比理论轮廓曲线与实际轮廓曲线的



(a) 仿真三维形貌与工件表面三维形貌
(a) Simulated 3D morphology and 3D morphology of the workpiece surface

(b) 微结构轮廓对比
(b) Comparison of microstructure profiles

图 8 微结构阵列

Fig. 8 Microstructure array

关键数据,如图 8(b)所示。可以看出,该图展示了 3 个相邻且完整的微结构轮廓,分别对各个微结构轮廓的深度和宽度进行测试,数据如表 5 所示。微结构深度值的平均误差为 11.62%,而宽度值的平均误差为 3.61%,基本符合设计需求。其中,平均误差的计算方法是:先分别计算每个微结构的测量值与理论值之间的误差,再对这

些误差求平均值。测量值基本小于理论值,尤其是在深度方向上,平均误差更大,这归因于钢材加工后存在一定的回弹,同时,快刀伺服系统的刚度可能不足。结果表明,所构建的高频超声-快刀伺服加工系统具有良好的运行稳定性,能够实现模具钢表面的复杂微结构阵列的高效可控加工。

表 5 微结构的加工尺寸数据
Tab. 5 Machined size data of microstructures (μm)

Items	The first microstructure	The second microstructure	The third microstructure	Theoretical value	Average error
Depth	1.678	1.747	1.878	2	11.62%
Width	134.335	125.358	124.902	130	3.61%

图 9 所示为加工后金刚石刀具前、后刀面的形貌特征,可以观察到前刀面和后刀面的磨损量均很小。这一结果表明,在整个加工过程中,刀具沿着椭圆轨迹高频周期性循环振动,能够强化切削区域空气与切削液的介入润滑效果,且每一个振动运动周期内材料去除量极小,有效降低了切削力、切削热和切削温度,抑制了快刀伺服往复运动过程中刀具与模具钢之间的摩擦与热效应,刀具切削刃未产生显著的磨损。由此可验证,所采用的高频超声-快刀伺服加工系统在钢表面加工微结构时具有稳定性与工艺可靠性。

模型,提供了一种高频椭圆振动切削装置的结构方案,并验证了装置的设计可行性,为轻量化超声椭圆振动装置设计提供了理论指导。研制了高频椭圆振动装置。该装置质量为 100 g,在 110 kHz 工作频率下稳定运行,实现了弯曲振动方向振幅 2.5 μm 、纵向振动振幅 1 μm 的输出。两向振动在金刚石刀具刀尖处相互耦合,形成稳定的椭圆运动轨迹。加工后金刚石刀具前、后刀面磨损量极小,表明高频椭圆振动有效抑制了切削力与切削热,显著降低了刀具磨损。刀具磨损的减小不仅大幅延长了金刚石刀具的使用寿命,还保证了微结构形貌长期加工稳定性。加工实验表明,该复合加工技术可以实现微结构阵列的高效加工,并将主要轮廓误差控制在较低水平,为难加工材料表面微结构的超精密制造开辟了新途径。然而,当前研究对形状精度的定量控制尚需深化,未来工作将聚焦于工艺参数优化与加工补偿控制,以实现微结构面形的精准创成。

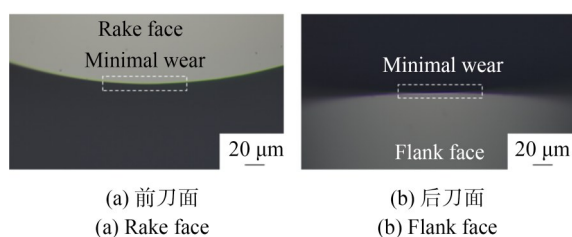


图 9 加工后刀具磨损情况
Fig. 9 Tool wear after cutting

5 结 论

本文建立了纵弯耦合振动的传递矩阵解析

作者贡献声明:

- 王 勋:研究方法提出,论文构思与撰写;
- 王 峰:实验设计;
- 郑云祥:实验数据测量及分析;
- 刘伯林:实验结果验证;
- 朱 岩:论文审核与编辑。

参考文献:

- [1] 黄维维, 张鑫泉, 朱利民. 基于重复控制的快速刀具伺服系统前馈补偿方法[J]. 机械工程学报, 2023, 59(21): 43-51.
HUANG W W, ZHANG X Q, ZHU L M. Repetitive-control-based feedforward compensation method for fast tool servo system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(21): 43-51. (in Chinese)
- [2] 张敏, 吴社群, 陈东生. 高精度快刀伺服系统构建及其特性研究[J]. 制造技术与机床, 2022(1): 84-88.
ZHANG M, WU ZH Q, CHEN D SH. Modeling and study on characteristic of high accuracy FTS system [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2022(1): 84-88. (in Chinese)
- [3] 朱志伟, 李凯敏, 李宏驰, 等. 微透镜阵列玻璃模压成形填充特性[J]. 中国表面工程, 2025, 38(4): 74-85.
ZHU ZH W, LI K M, LI H CH, *et al.* Filling behavior in glass molding of microlens arrays[J]. *China Surface Engineering*, 2025, 38(4): 74-85. (in Chinese)
- [4] 高立恒, 于谦, 周天丰, 等. 光纤准直非球面微透镜阵列模压成形[J]. 光学精密工程, 2025, 33(1): 75-83.
GAO L H, YU Q, ZHOU T F, *et al.* Precision glass molding for fiber collimating aspherical microlens array [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(1): 75-83. (in Chinese)
- [5] 李文正, 董敏鹏, 苏子宽, 等. S136钢模具断裂的原因[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(11): 37-39.
LI W ZH, DONG M P, SU Z K, *et al.* Reason of fracture of S136 steel die[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing)*, 2021, 57(11): 37-39. (in Chinese)
- [6] 李爱农, 周丹, 赵玉宏, 等. 几种预硬塑料模具钢的组织与性能对比[J]. 机械工程材料, 2012, 36(10): 50-53.
LI A N, ZHOU D, ZHAO Y H, *et al.* Comparison for microstructure and properties of several pre-hardened plastic mould steels[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(10): 50-53. (in Chinese)
- [7] 金洙吉, 谢飞, 郭晓光, 等. 单晶金刚石切削模具钢磨损机理的分子动力学仿真[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(6): 410-415.
JIN ZH J, XIE F, GUO X G, *et al.* Wear mechanism of single crystal diamond tool against mold steel by molecular dynamics simulation [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016, 14(6): 410-415. (in Chinese)
- [8] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Study on elliptical vibration cutting [J]. *CIRP Annals*, 1994, 43(1): 35-38.
- [9] MORIWAKI T, SHAMOTO E. Ultrasonic elliptical vibration cutting [J]. *CIRP Annals*, 1995, 44(1): 31-34.
- [10] 刘良, 王茂, 马善意, 等. 钼铜合金超声椭圆振动金刚石切削机制研究[J]. 机械工程学报, 2025, 61(19): 327-340.
LIU L, WANG M, MA SH Y, *et al.* Investigation of the mechanism in ultrasonic elliptical vibration diamond cutting of Mo-La alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, 61(19): 327-340. (in Chinese)
- [11] ZHANG J G, HU C, WU D X, *et al.* Design and experimental verification of high frequency elliptical vibration cutting system [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 229: 112526.
- [12] ZHENG Y X, HU C, WANG M, *et al.* A novel design for double-bending elliptical vibration boring device and its performance evaluation [J]. *Ultrasonics*, 2025, 149: 107584.
- [13] KURNIAWAN R, KISWANTO G, KO T J. Surface roughness of two-frequency elliptical vibration texturing (TFEVT) method for micro-dimple pattern process [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 116: 77-95.
- [14] BAI W, WANG K, DU D X, *et al.* Design of an ultrasonic elliptical vibration device with two stationary points for ultra-precision cutting [J]. *Ultrasonics*, 2022, 120: 106662.
- [15] 殷森, 鲍岩, 潘延安, 等. 具有多级放大功能的超声椭圆振动切削装置的设计[J]. 机械工程学报, 2022, 58(11): 260-268.
YIN S, BAO Y, PAN Y A, *et al.* Development of ultrasonic elliptical vibration cutting device with multi-stage amplification function [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(11): 260-268. (in Chinese)
- [16] 李梓, 李淑娟, 麻高领. 脆性材料塑性域超声加工综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(2): 124-132.

LI Z, LI SH J, MA G L. Review on ductile regime ultrasonic vibration machining for brittle mate-

rials[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2015, 38(2): 124-132. (in Chinese)

作者简介:



王 勳(1986—),女,黑龙江绥化人,工程师,2010年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事智能制造、超精密加工的研究。E-mail: wangxhust@hust.edu.cn

通讯作者:



朱 岩(1988—),女,陕西渭南人,工程师,2014年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事智能制造、微纳加工与测量的研究。E-mail: zhuyan523@hust.edu.cn