

# 超声加工技术研究进展

冯真鹏, 肖强

(西安工业大学 机电工程学院, 西安 710021)

**摘 要:** 超声加工技术依靠瞬时高频振动撞击对工件断续加工, 具有极强切削能力的同时, 具有较小的宏观切削力, 主要用于硬脆材料的精密加工, 能提高加工精度和表面质量。首先, 阐明了超声加工技术的基本原理及其基本应用范围。其次, 综述了超声辅助切削加工技术的研究进展, 着重论述了超声辅助铣削净切削时间模型的建立以及模型正确性验证, 总结了加工参数对刀具运动轨迹、工件表面质量的影响, 阐明了椭圆振动切削能有效抑制切削颤振带来不利影响的原因; 探讨了超声辅助磨削技术在加工非金属和金属材料时, 对表面质量以及工件表面温度分布的影响; 综述了超声辅助钻削技术的切削力和进给速度与普通钻削参数的比较。再者, 介绍了超声波加工技术的新发展方向, 包括三维椭圆超声振动切削技术、超声 ELID 复合磨削技术、超声 EDM 复合加工技术、超声辅助抛光的工作原理及最新研究趋势和能实现的试验效果。最后, 总结了目前对超声加工技术及超声辅助或复合技术的研究。

**关键词:** 超声加工; 超声辅助切削加工; 三维椭圆超声振动切削; 超声 ELID 复合加工; 超声电火花复合加工  
**中图分类号:** TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)04-0161-12

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.04.018

## Research Progress of Ultrasonic Machining Technology

FENG Zhen-peng, XIAO Qiang

(School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** With the ultrasonic machining technology, the intermittent processing of a workpiece relies on the instantaneous high frequency vibration impact. Despite a small macro cutting force, due to its extremely strong cutting capability, the technology is mainly used in the precision processing of hard and brittle materials to improve the processing accuracy and surface quality. Firstly, the basic principle and application scope of ultrasonic machining technology were expounded. Secondly, the research progress of ultrasonic assisted cutting technology was summarized. Afterwards, the establishment and validation of the model for ultrasonic assisted milling net cutting were emphatically presented, along with a discussion on the effects of processing parameters on tool trajectory and workpiece surface quality. The reasons why elliptical vibration cutting could effectively restrain cutting chatter were explained. The various effects of ultrasonic assisted grinding technology on the surface quality and temperature distribution of the workpiece surface in the processing of both metallic and non-metallic materials were

收稿日期: 2019-07-31; 修订日期: 2020-03-04

Received: 2019-07-31; Revised: 2020-03-04

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室资助项目 (16JS046)

Fund: Shaanxi Provincial Department of Education Key Laboratory Project (16JS046)

作者简介: 冯真鹏 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为特种加工。

Biography: FENG Zhen-peng (1993—), Male, Master, Research focus: special processing.

通讯作者: 肖强 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为特种加工。邮箱: 175230206@qq.com

Corresponding author: XIAO Qiang (1976—), Male, Doctor, Professor, Research focus: special processing. E-mail: 175230206@qq.com

引文格式: 冯真鹏, 肖强. 超声加工技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(4): 161-172.

FENG Zhen-peng, XIAO Qiang. Research progress of ultrasonic machining technology[J]. Surface technology, 2020, 49(4): 161-172.

discussed. Later, the resulting cutting force and feed speed of ultrasonic assisted drilling technology versus regular drilling parameters were summarized. In addition, the recent development directions of ultrasonic machining technology were introduced, including the three-dimensional (3D) elliptical ultrasonic vibration cutting technology, ultrasonic ELID composite grinding technology, ultrasonic EDM composite processing technology, working principle of ultrasonic assisted polishing, latest research trends and experimental results to be achieved. Finally, the current researches on ultrasonic machining technology and ultrasonic assisted or composite technology were summarized.

**KEY WORDS:** ultrasonic machining; ultrasound-assisted cutting; three-dimensional elliptical ultrasonic vibration cutting; ultrasonic ELID composite processing; ultrasonic EDM composite processing

随着社会科学技术的进步,各种新型材料的应用得到广泛发展,如硅晶体、陶瓷、淬火钢、硬质合金等各种硬脆材料,由于其硬度高、耐磨性强等优异特性,广泛应用于航空、航天和汽车等现代工业中。为了满足各种先进材料的高性能要求,通过融合多种学科,产生了很多新的加工方法,其中,超声加工技术及超声辅助或复合技术因具有极强的切削能力、较小的宏观切削力和细微的光整能力等优点,广泛应用于硬脆材料、硬质合金等精密加工领域<sup>[1-2]</sup>。本文综述了超声加工技术以及超声辅助加工技术或超声复合加工技术的发展和现状,总结了目前存在的问题,并对未来的发展方向做出了展望。

## 1 超声加工技术的研究

超声加工 (Ultrasonic Machining) 也称为超声波加工,加工原理如图 1 所示。超声加工设备主要由超声波主轴系统和磨料悬浮液循环系统组成<sup>[3-4]</sup>,加工过程中,在工具 1 和工件 2 之间添加磨料悬浮液。超声换能器 5 产生 16 000 Hz 或更高频率的超声频纵向振动,并且变幅杆 6 能把超声振动的振幅放大到约 0.05~0.1 mm。同时驱动工具作超声频振动,悬浮液中的磨粒在变幅杆的驱动下以比较高的速度和加速度间歇地冲击、抛磨工件。待加工工件的表面材料主要在机械冲击的作用下剥离,同时伴有抛磨以及超空化,最终实现成形加工。

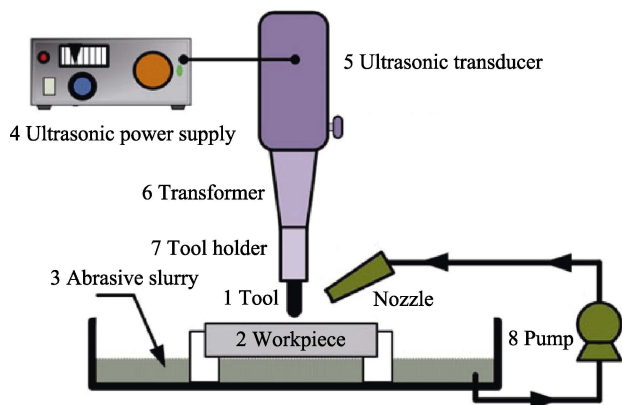


图 1 超声波加工系统原理图<sup>[5]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic machining system<sup>[5]</sup>

超声加工技术具有广泛的应用范围,并且不受材料导电性的限制<sup>[6]</sup>。前苏联科学家 Koval'chenko 等<sup>[7]</sup>验证了超声加工氮化物陶瓷的可加工性,并比较了不同氮化物对材料去除率的影响(材料去除率曲线如图 2 所示),结果显示,具有相同晶粒尺寸的碳化硼陶瓷的材料去除率高于碳化硅陶瓷。1968 年,苏联的 Markov 发现并首次研究了超声热效应<sup>[8]</sup>,在超声频振动的工具作用下,工具-工件接触点处的温度会急剧升高,导致工件微熔化,工具-工件间的接触由于摩擦变成半干摩擦甚至液体摩擦。2015 年,俄罗斯的 Bekrenev 等<sup>[9]</sup>通过研究超声波的热效应对高强度材料加工时切削力的影响,用表面覆盖有软金属膜的固体球体的运动来表示刀具尖端与材料表面在小切削深度处的相互作用,使微观的效应得以宏观展现,金属膜越厚表明作用强度越高。

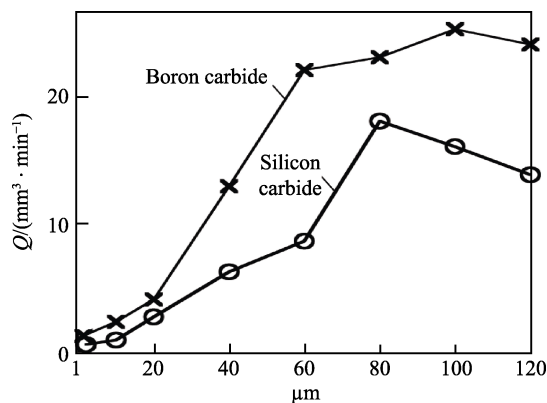


图 2 超声加工中材料去除率的变化<sup>[7]</sup>

Fig.2 Variation of rate of material removal in ultrasonic machining<sup>[7]</sup>

超声加工硬质合金、耐热合金等硬质金属材料时,存在加工速度较慢、效率较低、工具损耗大等缺点,为了克服这些缺点,超声加工技术结合其他加工方法(超声辅助或复合加工技术)成为新加工技术的研究热点。

## 2 超声辅助切削加工技术研究进展

传统的机械加工技术存在加工质量不稳定、生产效率低、切削应力显著等缺点,而超声加工技术具有

提高加工质量和精度、降低加工表面宏观切削应力的优点, 为了实现不同加工方法之间的互补优势, 出现了利用超声加工技术辅助传统加工技术的超声辅助切削加工技术。1956 年, 日本宇都宫大学的隈部淳一郎教授<sup>[10]</sup>对超声波振动切削理论作了系统的阐述, 1979 年, 他出版专著《精密加工、振动切削基础及应用》, 首次将振动切削理论应用于热加工领域(如车削、铣削、刨削、钻孔、镗孔、铰孔、磨削、螺纹加工、齿轮加工等), 并取得显著成效, 这为超声加工技术的研究应用和发展奠定了基础。

超声辅助切削加工技术是一种基于传统切削方法与超声振动加工技术相结合的新型加工方法, 即通过对传统机床结构和功能的二次改造, 对加工工具或被加工工件施加超声频振动, 将超声频振动能量附加到机械加工过程中, 使其加工性能进一步增强, 以满足更高的加工要求。超声辅助切削技术综合不同的加工技术, 实现了不同加工技术之间的优势互补, 能优质高效地加工难加工材料, 满足不同领域的应用技术要求。经过了多年的应用, 超声辅助已成为提高机械加工能效的重要手段之一, 超声辅助切削技术也已成为机械加工行业的重要发展方向。

## 2.1 超声辅助铣削加工

超声辅助铣削加工技术将超声加工技术与传统的铣削相结合, 将超声波振动应用于刀具或工件中, 图 3 是将超声频振动施加到工件上的机床示意图<sup>[11]</sup>。超声辅助切削加工过程是高频断续地对工具加工, 在加工过程中, 工具或工件按照一定振幅做超声频振动, 工具与工件间发生高频重复分离和接触。切削力是评定切削性能的重要指标。在单个循环中比较普通铣削力和超声铣削力信号, 如图 4 所示。普通铣削力信号是连续的正弦波信号, 而超声振动切削力信号由致密的脉冲束构成, 呈现出明显的振荡特征, 超声振动能够同时显著降低横向和纵向两个方向的铣削力峰值。由于超声振动切削速度的大小和方向呈周期性变化, 并且在单个切削循环中, 工具的净切削时间极

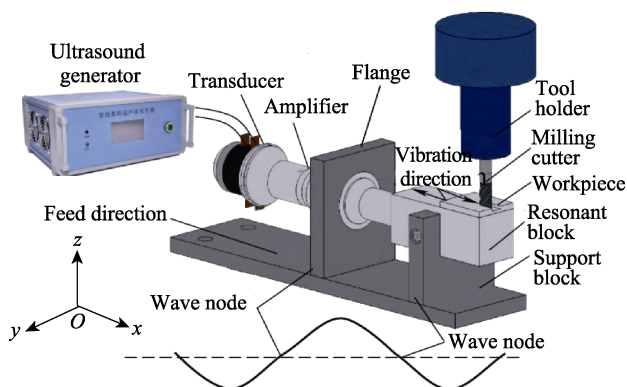
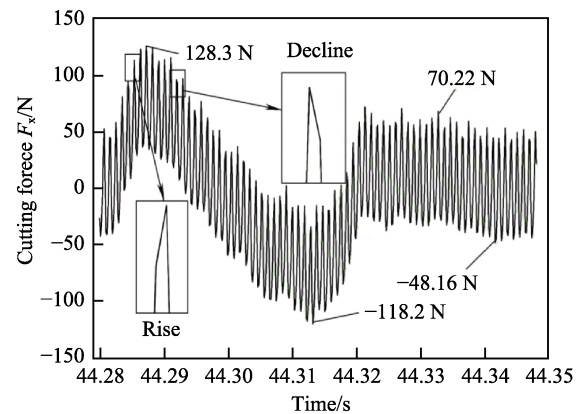
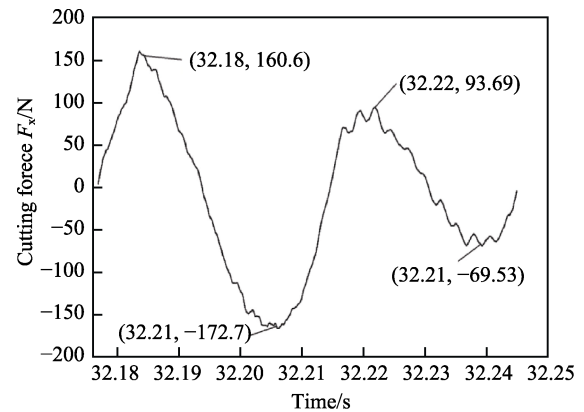


图 3 超声振动辅助铣削加工示意图<sup>[11]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic vibration assisted milling<sup>[11]</sup>



b 超声振动铣削( $A=8\ \mu\text{m}$ ,  $v_c=11$  m/min)

图 4 单个周期内的普通铣削力和超声铣削力<sup>[11]</sup>

Fig.4 Regular milling force and ultrasonic milling force in a single cycle<sup>[11]</sup>: a) regular milling; b) ultrasonic vibration milling

短, 刀具与工件间的摩擦系数大大降低, 平均切削力也小于普通切削力。

东北大学的倪陈兵等<sup>[11]</sup>在研究超声振动辅助铣削钛合金时, 根据超声加工具有高频断续性的特性, 以及不同时间段超声槽铣的铣削加工过程, 分别建立了顺铣和逆铣过程中的刀具净切削时间模型, 获得了加工参数和振动参数之间的关系以及刀具净切削时间, 单个振动加工循环可以分为切削阶段(如  $t_1\sim t_2$  和  $t_5\sim t_6$ )和分离阶段( $t_2\sim t_3$  和  $t_6\sim t_7$ ), 如图 5 所示。

超声振动顺铣过程中的刀具净切削时间模型表达式为:

$$2a\cos\pi f(t_4 - t_c + t_2)\sin\pi f(t_4 - t_c - t_2) = -\int_0^{t_4 - t_c - t_2} v_c \sin(\phi - \omega_r(t_4 - t_2) + \omega_r t) dt \quad (1)$$

式中,  $t_c = t_4 - t_3$ 。

超声振动逆铣过程中的刀具净切削时间模型表达式如式(2)所示, 其中,  $t'_c = t_8 - t_7$ 。

$$2a\cos\pi f(t_8 - t'_c + t_6)\sin\pi f(t_8 - t'_c - t_6) = -\int_0^{t_8 - t'_c - t_6} v_c \cos(\theta - \omega_r(t_8 - t_6) + \omega_r t) dt \quad (2)$$

超声振动铣削刀具净切削时间模型的建立, 可以得出切削速度、切削角、振动频率和振动振幅对超声



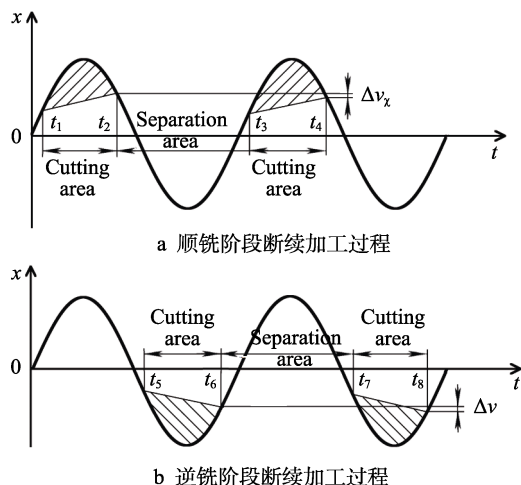
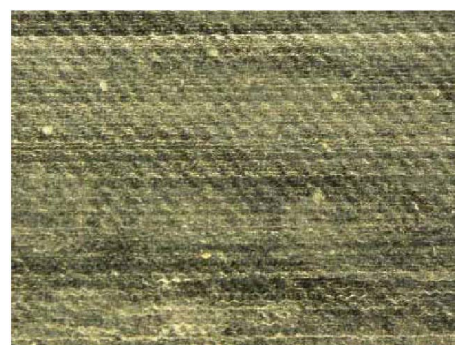
图5 超声辅助铣削加工分离式切削过程<sup>[12]</sup>

Fig.5 Ultrasonic assisted milling's separate cutting process<sup>[12]</sup>: a) interrupted machining process in milling stage; b) intermittent machining process in reverse milling stage

振动铣削过程中刀具净切削时间具有直接影响，清楚地表达了加工参数和振动参数与刀具净切削时间之间的关系，不再模糊地认为净切削时间为总切削时间的 1/3，使得刀具的净切削时间模型得以量化。此数学模型的建立可以继续扩展到超声辅助切削的其他加工技术中。

张辽远等<sup>[12]</sup>用超声辅助铣削碳纤维复合材料，试验表明，超声辅助能够使纤维束在铣削时产生脆性化，剪断纤维素的同时生成较少的毛刺，得到较为完整的表面形貌和较低的表面粗糙度。张跃敏<sup>[13-14]</sup>对超声振动辅助铣削系统的稳定性进行了深入研究，研究表明，加工工艺参数的变化影响系统稳定性和表面加工质量，这为优化无颤振铣削工艺参数提供了依据。图 6 是通过超声椭圆振动辅助铣削获得的工件表面质量，在不稳定条件下（图 6a），加工表面深度不同，局部切屑堆积，表面粗糙不均匀；在稳定状态下加工，刀纹清晰均匀且稳定，形成的加工表面齐整光滑（图 6b）。Maurotto 等<sup>[15]</sup>对 AILI361L 不锈钢在不同超声频率（20、40、60 kHz）辅助下铣削，与传统铣削相比，超声辅助面铣的表面粗糙度和残余应力均较低。经过试验，得到加工表面的表面粗糙度与频率和进给量的关系图，如图 7 所示，可以看出，通过调整振动频率和进给量可以满足不同精度的加工要求。

超声辅助在铣削加工过程中，也有一定的不利因素。铣刀刀齿与被加工工件不断地分离与接触，铣刀的运动轨迹如图 8 所示<sup>[16]</sup>，铣刀偏离原始铣削位置，形成刀具与工件的相对振动，并且在工件表面留下振动波纹，这种切削颤振现象会降低工件的加工精度，并增加刀具磨损。日本的 Shamoto 于 1994 年首次提出了“椭圆振动切削”<sup>[17]</sup>方法，该方法在切削方向和切屑流动方向确定的平面上，对切削刀具施加同步双向振动，使刀具沿着椭圆轨迹在每个振动周期中完成切削，椭圆振动切削能够有效抑制颤振，降低切削颤



a 不稳定



b 稳定

图6 超声椭圆振动辅助铣削工件表面质量<sup>[13]</sup>  
Fig.6 Workpiece surface quality after ultrasonic elliptical vibration assisted milling<sup>[13]</sup>: a) unstable; b) stable

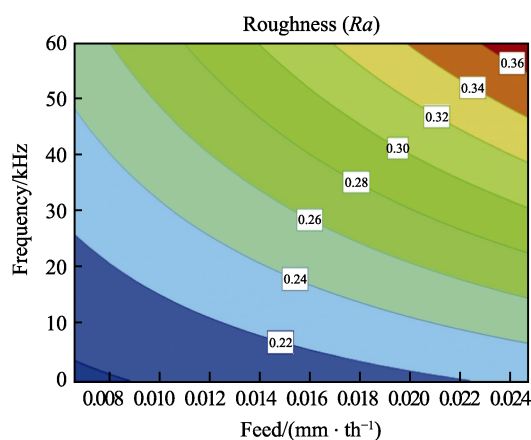


图7 加工表面的表面粗糙度与频率和进给量的关系<sup>[15]</sup>  
Fig.7 Surface roughness of surfaces machined versus frequency and feed<sup>[15]</sup>

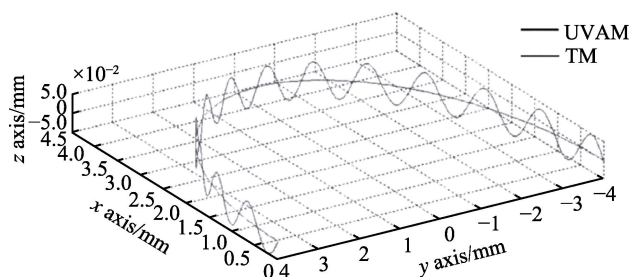


图8 超声辅助铣削和传统铣削加工方式下的刀具运动轨迹图<sup>[16]</sup>

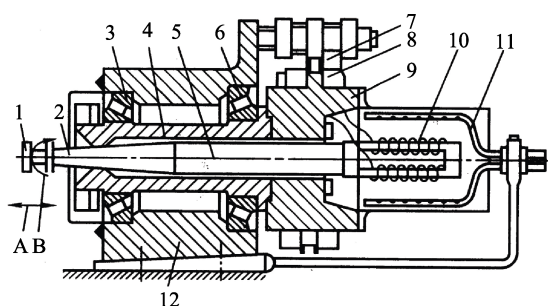
Fig.8 Tool path map of ultrasonic assisted milling and traditional milling<sup>[16]</sup>

振所带来的不利影响。

## 2.2 超声辅助磨削加工技术

超声振动辅助磨削是将超声波加工和磨削加工相结合, 在传统磨削的基础上对工件或砂轮施加超声频振动, 通过超声频振动和砂轮磨削的组合来加工工件表面。图 9 所示是单向振动超声磨削装置, 砂轮旋转磨削的同时进行轴向频振动。由砂轮的一个振动方向的超声频振动扩展到两个方向的超声频振动(如图 10d、e)<sup>[18]</sup>, 可同时在两个方向对工作台施加超声频振动。

Gong 等<sup>[19-20]</sup>用金刚石磨具对 K9 光学玻璃施以轴向旋转超声磨削, 磨削示意图如图 11 所示, 并研



1—Grinding wheel; 2—Horn; 3,6—Tapered roller bearing;  
4—Hollow sleeve; 5—Vibration shaft; 7—Carbon brush;  
8—Collector ring; 9—Collector ring bracket; 10—Transducer;  
11—Nickel plate transducer cooling device; 12—Bearing seat;  
A—Vibration direction; B—Rotation direction of grinding wheel

图 9 纵向振动超声磨削装置<sup>[3]</sup>

Fig.9 Longitudinal vibration ultrasonic grinding device<sup>[3]</sup>

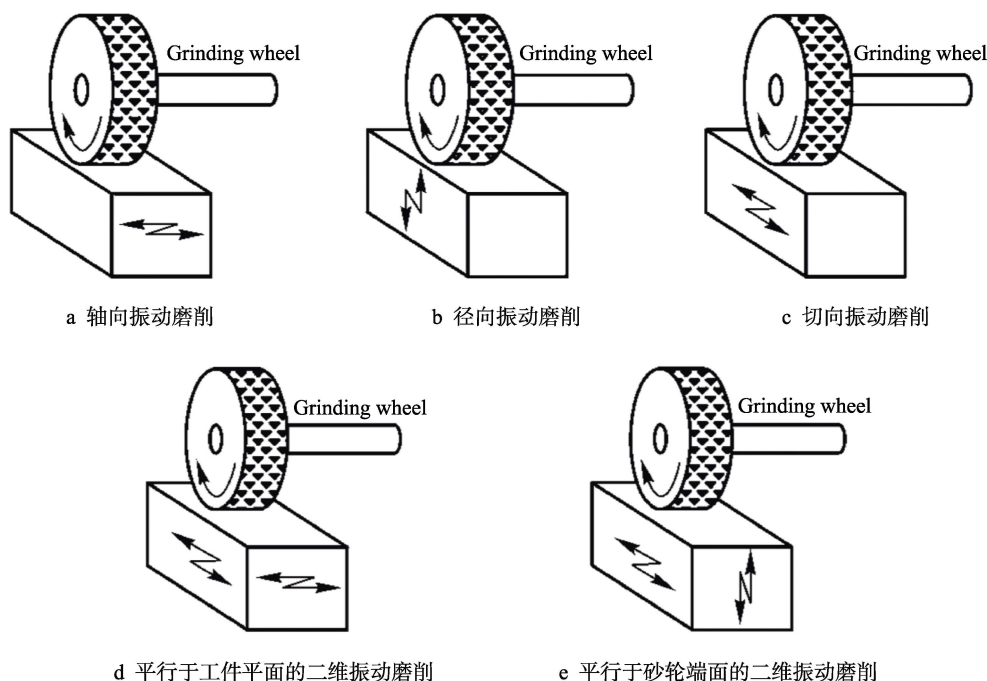


图 10 不同类型的超声振动辅助磨削技术<sup>[18]</sup>

Fig.10 Different types of UAG<sup>[18]</sup>: a) axial UAG; b) vertical UAG; c) tangential UAG; d) two-dimensional UAG with elliptical vibration parallel to workpiece; e) two-dimensional UAG with elliptical vibration parallel to wheel end face

究了不同金刚石磨粒的相互作用。结果显示, 在相同的工件材料和加工条件下, 旋转超声磨削的深度比普通磨削浅, 提高了材料的去除效率和磨削精度, 有效降低了切削力, 延长了刀具使用寿命。上海理工大学的李厦等<sup>[21]</sup>建立了超声振动辅助磨削的温度场分析模型, 发现在超声振动辅助磨削过程中, 磨粒与工件高频间歇性接触, 能降低磨削工件表面温度 20% 左右。陈玉荣等<sup>[22]</sup>在侧面磨削 SiC 陶瓷材料时, 磨削参数的持续增大, 使磨粒的振动轨迹趋近于普通磨削的直线轨迹, 弱化了磨粒轨迹间的重叠作用, 进而降低了超声辅助磨削的效果。

以上研究针对非金属的超声辅助磨削, 不仅可以显著提高磨削效率, 而且轴向旋转超声磨削可降低表面粗糙度值, 对此国内外学者基本无争议<sup>[23-25]</sup>, 但超声辅助对磨削表面粗糙度的影响还有待进一步研究。埃及学者 A. Nassar 等<sup>[26]</sup>在椭圆超声辅助磨削下对 A356 合金进行磨削, 试验结果表明, 椭圆超声辅助磨削加工表面的粗糙度远低于传统磨削表面。天津大学的赵春阳等<sup>[27]</sup>用 4 种不同粒度的金刚石砂轮对硬质合金 YG8 进行超声磨削和普通磨削, 试验结果表明, 在采用较小粒度的金刚石砂轮时, 由于超声旋转加工会在被加工工件的表面留下断续的轨迹, 造成旋转超声辅助磨削所得工件的表面粗糙度差。而使用较大粒径的金刚石砂轮时, 旋转超声辅助磨削工件的加工表面粗糙度与普通磨削之间的差异不明显。这是由于金刚石粒径越小, 单位面积内磨削所涉及的颗粒越多, 单颗金刚石颗粒形成的轨迹被相邻颗粒轨迹覆盖, 从而使得轨迹间断不明显。

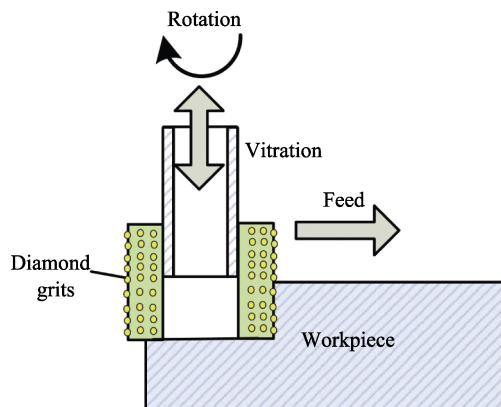


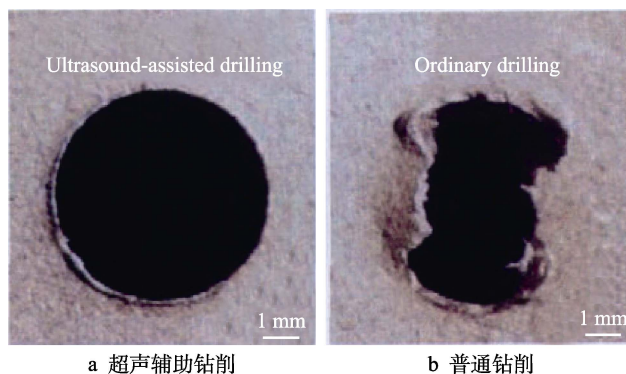
图 11 利用刀具侧面旋转超声加工的图示<sup>[19]</sup>  
Fig.11 Illustration of the rotary ultrasonic machining with the side of cutter<sup>[19]</sup>

## 2.3 超声辅助钻削加工技术

在钻削过程中，孔的加工工具长度一般大于孔径，但由于切削力的作用易使工具产生变形，影响孔的加工精度和效率，且对难加工材料的钻孔效果较深，切削液不易进入切削区，导致切削温度升高。该工具磨损更快，并形成积屑瘤，使排屑困难。为了改善钻削条件，并减少工具磨损，对旋转钻具施加超声波振动，超声波辅助钻孔可以改善加工条件，提高钻孔精度和效率<sup>[28]</sup>。

硬脆材料的去除过程可分为韧性断裂和脆性断裂。在脆性断裂区，材料去除从裂纹开始，进而扩展和交叉，直至剥离母材<sup>[29-30]</sup>。硬脆材料的韧脆过渡深度极小。Abdelkawy 等<sup>[31-32]</sup>分析了硬脆性材料的韧脆转变现象，针对不同的韧脆过渡深度，分别建立了旋转超声钻削脆性材料韧性和脆性断裂区的推力数学模型，预测加工过程，并验证了模型的正确性。

大连理工大学的康仁科<sup>[33]</sup>分别使用超声辅助钻削和普通钻削加工镍基高温合金，如图 12 是不同加工形式的出口形态，普通钻屑成连续状，超声辅助钻屑成断续状，普通钻孔有不规则的出口和更多的毛刺，加工质量次于超声辅助钻削。浙江大学卢干<sup>[34]</sup>明确了超声辅助旋转钻削加工机理，并建立了模型，开发出一套专门用于超声辅助旋转钻削的驱动模块，重点解决超声波能量放大，激励信号非接触耦合传输和工作频率在线自动跟踪调整等关键问题，确保超声波辅助振动装置和母机实现高精度旋转耦合。Krishnaraj 等<sup>[35]</sup>和 Kuruc 等<sup>[36]</sup>均研究了硬质合金钻头对碳纤维复合板的高速钻孔，通过改变钻削速度和进给速度等钻削参数，将遗传算法应用于多目标优化，确定了无缺陷钻削的最佳切削条件。Shan 等<sup>[37]</sup>通过对 C/C 复合材料不同钻孔方式的研究，比较了旋转超声钻（RUD）、常规麻花钻（CTD）、高速钻（HSD）三种钻削方法的切削力及刀具磨损情况，不同进给速率和切削力之间的关系如图 13 和图 14 所示。与 CTD 和 HSD、RUD



a 超声辅助钻削 b 普通钻削

图 12 钻孔的出口形貌<sup>[33]</sup>  
Fig.12 Exit morphology of borehole<sup>[33]</sup>:  
a) ultrasonic assisted drilling; b) regular drilling

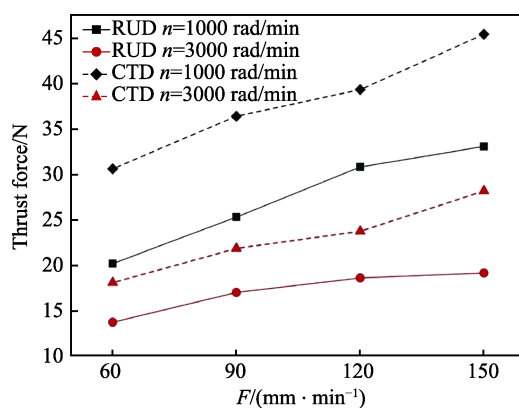


图 13 RUD 和 CTD 中切削力与进给速度的关系<sup>[37]</sup>  
Fig.13 Cutting force versus feed speed in RUD and CTD<sup>[37]</sup>

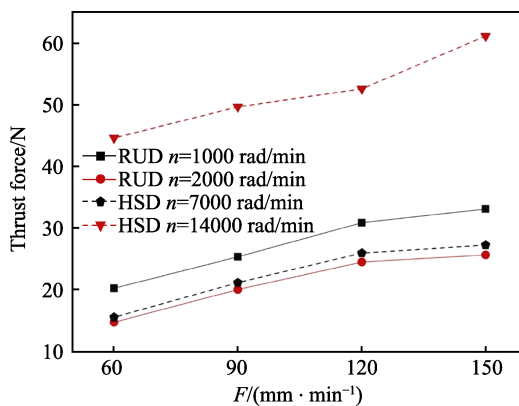


图 14 RUD 和 HSD 中切削力与进给速度的关系<sup>[37]</sup>  
Fig.14 Cutting force versus feed speed in RUD and HSD<sup>[37]</sup>

相比较，旋转超声钻削可以有效地减少切削力，从而降低刀具磨损并延长刀具寿命。

## 3 超声加工技术发展新方向

### 3.1 三维椭圆超声振动切削

三维椭圆振动切削是在二维振动切削的基础上形成的，在由切削方向和切屑流动方向所确定的平面内对切削刀具施加同步双向振动，使刀具沿着椭圆轨



迹在每个振动周期中完成切削,其刀具的轨迹为空间螺旋线<sup>[38]</sup>,如图 15 所示。将振动的频率增大到超声频率,即为三维椭圆超声振动切削。作为一种新兴的超精密加工方法,三维椭圆超声振动切削不仅继承了普通超声振动切削技术的优点<sup>[39]</sup>,还具有抑制毛刺生成,增加刀具寿命,减小表面粗糙度,降低切削力,减少切削热等诸多优点。

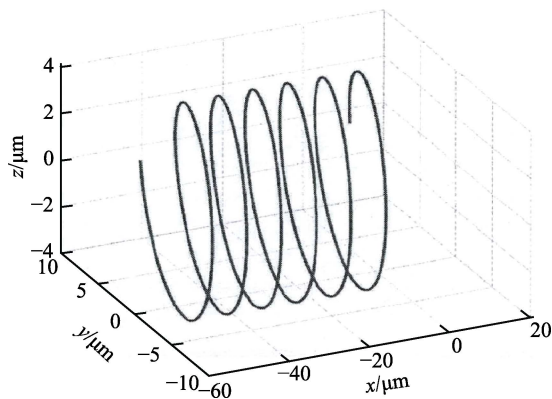


图 15 三维椭圆振动切削刀具轨迹图<sup>[38]</sup>

Fig.15 Three-dimensional elliptical vibration cutting tool path<sup>[38]</sup>

三维椭圆超声振动铣削在三维椭圆超声振动切削中所占比例较大,不少高校人员积极投入研究。超声椭圆振动铣削过程复杂,工作台的直线进给、机床主轴的回转运动以及铣刀的高频微小椭圆振动共同组合成铣削的切削轨迹,椭圆振动轨迹方向与铣刀旋转变化过程如图 16 所示。姜兴刚等<sup>[40]</sup>通过低速超声椭圆振动铣削钛合金薄壁件,研究了铣削力的差异,附加超声椭圆振动的铣削力较一般铣削力降幅达 51.4%,且加工精度更高。河南理工大学的童景琳等<sup>[41]</sup>基于 ABAQUS 力-热耦合模型,分析了超声椭圆振动切削 TC4 钛合金的瞬态切削过程,研究表明,一定范围内的椭圆振动切削下,切削力随着切削速度的增加而增大,切削力减小率随着切削深度的增加而减小。刘佳佳等<sup>[42-43]</sup>利用自行研制的超声椭圆振动顺侧铣装置,通过铣削 Ti-6Al-4V 钛合金,对高速条件下超声椭圆铣削进行了较为细致的研究。结果显示,刀具在随着机床主轴产生进给运动和回转运动的同时,也在进行椭圆超声振动,用 Matlab 软件仿真计算在特定加工参数下高速超声椭圆振动刀尖的运动轨迹如图 17 所示。这为使超声椭圆振动铣削在高速条件下实现分离型切削提供了合理的切削条件。

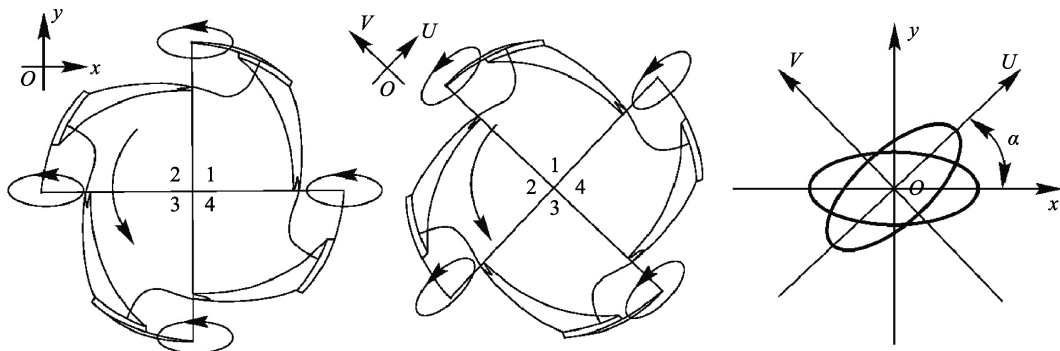


图 16 椭圆振动轨迹方向随铣刀旋转变化的示意图<sup>[40]</sup>

Fig.16 Schematic diagram of elliptical vibration trajectory changing with rotated milling cutter<sup>[40]</sup>

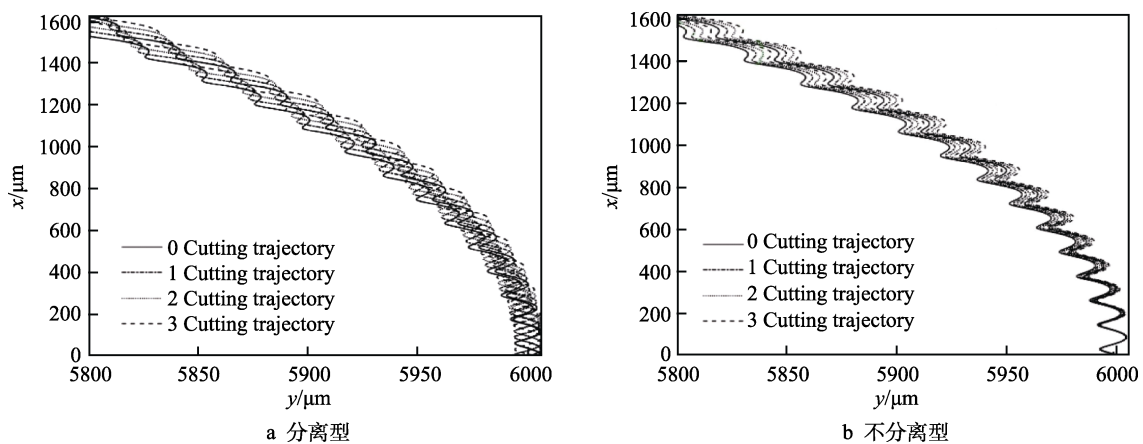


图 17 四刃铣刀高速超声椭圆振动铣削刀尖运动轨迹<sup>[42]</sup>

Fig.17 High speed ultrasonic elliptical vibration milling with four edge milling cutter<sup>[42]</sup>: a) separation type; b) non-separation type

由于铣刀是多齿切削刀具,在每一回转周期内,一齿将滞后于先前的一齿,定义 $K$ 为当前刀齿滞后于前一刀齿刀尖振动加工轨迹的振动周期系数, $K$ 受频转比、进给量以及附加在工具上的椭圆振动特性的影响。根据建立的实现分离型高速椭圆振动切削的临界条件数学模型进行侧铣切削试验,分别对比普通铣

削、分离型超声振动椭圆铣削、不分离型超声振动椭圆铣削所得切屑的宏观与微观形态。图18b是分离型高速超声椭圆振动铣削的切屑形貌,其呈现针状,较普通铣削、不分离型超声振动椭圆铣削所得的切屑更为微细,与理论切屑截面形貌一致。验证了高速超声椭圆振动铣削实现分离断续切削的可行性。

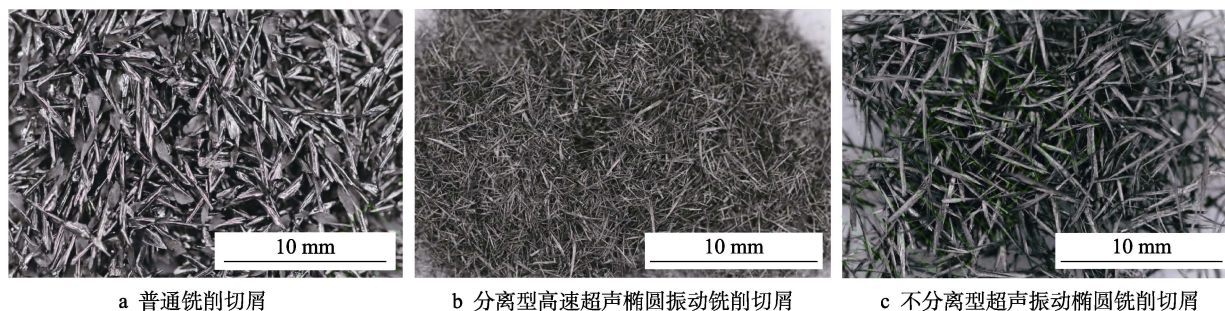


图18 三种切屑的实际形貌<sup>[42]</sup>

Fig.18 The actual morphology of three kinds of chips<sup>[42]</sup>: a) regular milling chip; b) separate high speed ultrasonic elliptical vibration milling chip; c) non-separation ultrasonic elliptical vibration milling chip

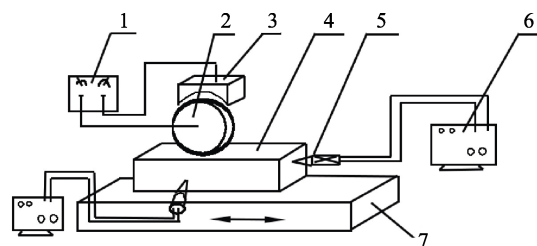
超声椭圆振动切削方法不仅可以精密加工平面,而且可以加工非球面和自由曲面光学零件。但在超声椭圆振动切削应用过程中,许多缺陷也逐渐暴露出来:由压电片驱动非线性刀杆而生成的椭圆轨迹会产生重叠串扰<sup>[44]</sup>;超声振动在多个方向耦合的椭圆轨迹振动频率难以控制;实际切削中,刀杆的不同装夹方式会产生不同的固有振动频率,造成节点位置发生改变。

### 3.2 超声 ELID 复合磨削技术

目前,在线电解修整(ELID)磨削多用于硬脆材料的精密超精密加工,ELID磨削技术较为成熟,应用较为广泛,磨粒在磨削过程中一直保持锋锐状态,并能有效防止砂轮钝化,但由于砂轮易堵塞、砂轮修整时间长、加工效率低等缺点<sup>[45-48]</sup>,使得ELID磨削技术在某些特定条件下不能满足实际需要。超声ELID复合磨削技术是一种将超声振动辅助磨削技术与在线电解修整磨削技术结合的新型加工方法,在获得高质量加工表面的同时,能提高加工效率。

2014年,刘折等<sup>[49-50]</sup>模拟了超声ELID复合磨削陶瓷材料的高效去除机理,确立了单颗磨粒去除材料的数学模型,材料的去除率在一定范围内随着超声ELID复合磨削的振幅和频率的增大而增大。2017年,马新毅<sup>[51]</sup>将二维超声振动技术复合应用到ELID磨削纳米相陶瓷技术中,在ELID磨削时,将两个方向互相垂直的超声频振动施加到工件上,伴随着砂轮作阳极、铜电极作阴极的电解修整,同时产生致密的氧化膜,以提高磨削效果,进一步改善加工精度和表面质量,工作示意图如图19所示,并建立了超声ELID复合磨削过程中单个磨粒磨削力的数学模型。对超声ELID复合研磨下工件质点的运动学进行分析,如图20所示,质点的运动轨迹是陀螺线,超声ELID复合

磨削增加了平面磨削的陀螺轨迹的接触弧长,提高了研磨效率,改善了工件表面质量。



1—Power supply; 2—Grinding wheel; 3—Brush; 4—Workpiece; 5—Horn; 6—Ultrasonic generator; 7—Worktable

图19 二维超声ELID复合磨削系统<sup>[51]</sup>  
Fig.19 Two-dimensional ultrasonic ELID composite grinding system<sup>[51]</sup>

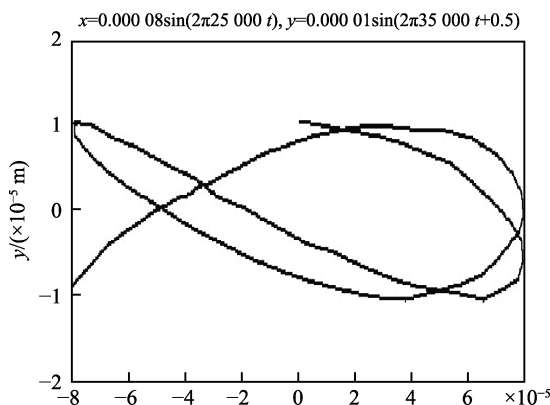


图20 单颗磨粒运动轨迹<sup>[51]</sup>

Fig.20 Trajectory of single abrasive particle<sup>[51]</sup>

超声振动磨削与ELID磨削都是对硬脆材料精密超精密加工的方法,将两种加工方法复合在一起提出的超声ELID复合磨削技术,能够实现技术之间的优势互补,在获得高精度光滑表面的同时,提高加工效



率。该方法必将成为高效超精密加工技术的重要研究方向之一。

### 3.3 超声电火花复合加工

电火花加工 (EDM) 技术<sup>[52]</sup>使用工具和工件作为正电极和负电极,通过电极之间的脉冲火花放电引起的电腐蚀来去除多余的材料,进而实现对零件的精密加工。EDM 技术主要用于处理金属等导电材料,也可在一定条件下处理半导体材料和非导体材料。然而 EDM 也有局限性,其处理速度慢和效率低是主要缺点。超声波电火花复合加工技术是超声波加工与电

火花加工技术相结合的新型加工技术。超声波加工技术在电火花加工技术中的应用,可以显著提高加工效率和加工质量。

超声波电火花线切割复合加工分为两种类型:电极丝振动和工件振动。电极丝振动是将超声波振动施加到电极上,在切割方向和垂直切割方向上振动,加工示意图如图 21a 所示;工件振动是将超声波振动施加在工件上,加工示意图如图 21b 所示。Hoang<sup>[53]</sup>比较了两种超声波 EDM 线切割复合加工方法,试验表明,工件振动可以更好地提高加工质量,显著提高加工效率。

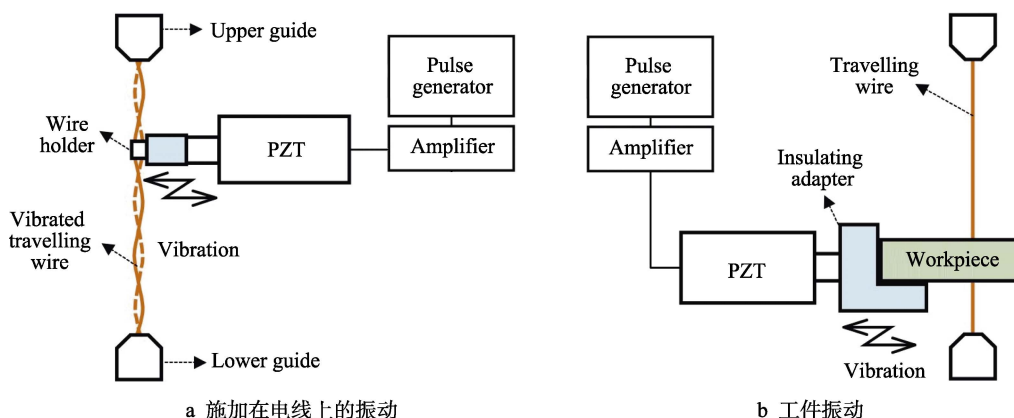


图 21 振动系统原理<sup>[53]</sup>

Fig.21 Schematic diagram of vibration systems<sup>[53]</sup>: a) vibration applied to the wire; b) vibration applied to the workpiece

武汉理工大学的陈伯厅等<sup>[54]</sup>建立了超声电火花复合加工间隙模型,其实际加工间隙为:

$$h=h_0+A\sin(2\omega t) \quad (3)$$

式中:  $h$  为实际加工间隙 ( $\mu\text{m}$ );  $h_0$  为初始加工间隙 ( $\mu\text{m}$ );  $A$  为振幅 ( $\mu\text{m}$ );  $\omega$  为角频率 ( $\text{rad/s}$ );  $t$  为时间 ( $\text{s}$ )。

电极振动与脉冲信号叠加如图 22 所示,曲线为电极振动曲线,阴影部分为加工电极具有脉冲电流信号的时间。 $h_1$  为最大放电间隙,  $h_2$  为最小放电间隙。当  $h>h_1$  或  $h<h_2$  时,加工电极虽然有脉冲电流信号,但由于放电间隙过大或过小,在电极之间不能形成正常的火花放电。而超声波振动将使间隙放电更稳定,从而减少空载、短路和电弧放电的发生,提高有效脉

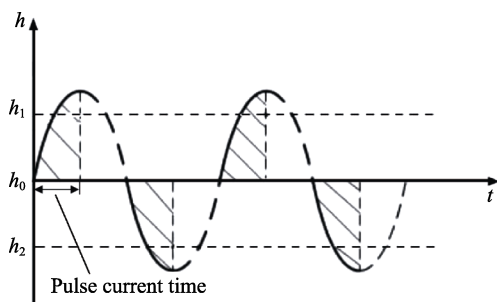


图 22 电极振动与脉冲信号叠加示意图<sup>[53]</sup>

Fig.22 Schematic diagram of superposition of electrode vibration and pulse signal<sup>[53]</sup>

冲放电率和能源利用率。

超声电火花复合抛光是一种超声波电火花复合加工技术,其效率是纯超声波抛光的 3 倍以上,粗糙度  $Ra$  可达  $0.08\sim 0.16\ \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。在超声辅助电火花复合抛光工艺中,工具以交错的方式抛出和侵蚀工件,超声空化操作使工件表面软化。因此,表面材料被剥离,并且空化大大增加了火花放电的影响。山东大学的林本刚等<sup>[55]</sup>研究超声振动对电火花加工镍基高温合金 Inconel718 的影响发现,与普通 EDM 相比,其表面粗糙度大大降低,平均加工速度显著提高。

中北大学对超声波电火花复合加工技术进行了广泛而深入的研究。2014 年,车江涛<sup>[56]</sup>在原有的电火花加工机床上,设计了一个锥形三节复合超声变幅杆,并对工件施加超声波振动,建立水平超声波电火花加工机床,充分发挥了超声波加工和电火花加工的优点。同年,孔文军等<sup>[57]</sup>研究并验证了水平超声电火花复合加工与普通电火花加工相比,能改善表面质量和提高加工效率。2017 年,王璟<sup>[58]</sup>进行了电火花线切割 TC4 钛合金,试验结果表明,对工件施加超声频振动后,只有在适当选择处理能量和处理时间时,才能显著改善表面质量。

### 3.4 超声辅助抛光

超声波辅助抛光是一种新的镜面抛光技术,将超

声能量附加到抛光工具或抛光工件上,因此振动系统需要具有稳定的功率输出。工具或工件受到超声频率的机械振动时,具有一定的超声频率和振动幅度。通过豪克能镜面加工设备,采用超声波抛光技术,将超声波振动施加到抛光工具上,可以将金属的表面粗糙度  $Ra$  降低到  $0.05\text{ }\mu\text{m}$ ,零件的疲劳性能(疲劳寿命)提高数十倍以上,显微硬度(提高20%以上)、耐磨性(增加50%或更多)和耐腐蚀性(增加40%或更多)也得到极大改善。

## 4 总结

超声加工技术依靠瞬时高频振动撞击对工件断续加工,具有极强的切削能力的同时,还具有较小的宏观切削力。它不仅加工硬质合金等金属材料,还可以加工陶瓷、玻璃和宝石等非金属硬脆材料。超声波辅助或复合加工技术不仅丰富了传统的加工技术,还探索了新的加工技术,可以有效地提高加工精度和表面加工质量。随着加工技术向高效、精密、超精密的方向发展,超声波加工及其辅助和复合加工技术的应用研究将越来越深入。

然而,超声加工的设备性能还有待进一步提高。工欲善其事必先利其器,超声换能器和超声变幅杆作为超声加工的核心组成部分,其性能的优异决定了超声加工的精度,对换能器增大功率与变幅杆增加振幅的功能仍需强化,以适应特定的加工需求。

在超声辅助切削加工应用方面,抑制切削颤振带来的不利影响仍需深入研究,应进一步优化切削参数的选择,以实现最佳的加工质量和精度。

随着超声加工技术的日益多样化,超声辅助或复合加工技术结合了多种加工技术的优点,将成为未来超声波处理技术的新发展方向,会得到更广泛的研究和应用。

## 参考文献:

- [1] 房善想,赵慧玲,张勤俭. 超声加工技术的应用现状及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 22-32.  
FANG Shan-xiang, ZHAO Hui-ling, ZHANG Qin-jian. The application status and development trends of ultrasonic machining technology[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(19): 22-32.
- [2] BALLANDRAS S, WILM M, GIJS M, et al. Periodic arrays of transducers built using sand blasting and ultrasound micromachining techniques for the fabrication of piezocomposite materials[C]// 2001 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium. [s. l.]: IEEE, 2001: 871-874.
- [3] 曹凤国. 超声加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.  
CAO Feng-guo. Ultrasonic machining[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [4] 白基成,刘晋春. 特种加工[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.  
BAI Ji-cheng, LIU Jin-chun. Non-traditional machining[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [5] CONG W, PEI Z. "Process of ultrasonic machining" in handbook of manufacturing engineering and technology[M]. London: Springer, 2013: 1-19.
- [6] HEISE C, BÖHM S, SCHWARTE S, et al. Hybrid cutting of granite by use of ultrasonic assistance[J]. Production engineering, 2014, 8(5): 567-575.
- [7] KOVAL'CHENKO M S, PAUSTOVSKII A V, PEREV-YAZKO V A. Influence of properties of abrasive materials on the effectiveness of ultrasonic machining of ceramics[J]. Powder metallurgy and metal ceramics, 1986, 25(7): 560-562.
- [8] MARKOV A I. Ul'trazvukovoe rezanie trudnoobrabatyvayemykh materialov[M]. Moscow: Mašinstroenie, 1968.
- [9] BEKRENEV N V, MULDAŠHEVA G K, PETROVSKII A P, et al. Influence of the thermal effect on the cutting forces in the ultrasonic machining of high-strength materials[J]. Russian engineering research, 2015, 35(10): 758-759.
- [10] BAKHMATOV Y F, PASHCHENKO K G. Plastic machining of wire rod in die-free drawing, in the presence of ultrasound[J]. Steel in translation, 2014, 44(8): 607-609.
- [11] 倪陈兵,朱立达,宁晋生,等. 超声振动辅助铣削钛合金铣削力信号及切屑特征研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 207-216.  
NI Chen-bing, ZHU Li-da, NING Jin-sheng, et al. Research on the characteristics of cutting force signal and chip in ultrasonic vibration-assisted milling of titanium alloys[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 55(7): 207-216.
- [12] 张辽远,刘小栋,苏君金,等. 超声辅助铣削碳纤维复合材料的工艺研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(6): 147-150.  
ZHANG Liao-yuan, LIU Xiao-dong, SU Jun-jin, et al. Ultrasonic assisted milling carbon fiber recombination materials technology research[J]. Modular machine tool & automatic manufacturing technique, 2018(6): 147-150.
- [13] 张跃敏. 超声振动辅助铣削系统的稳定性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.  
ZHANG Yue-min. The study on stability of ultrasonic vibration assisted milling system[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.
- [14] ZHANG Y, ZHAO B, WANG Y, et al. Effect of machining parameters on the stability of separated and unseparated ultrasonic vibration of feed direction assisted milling[J]. Journal of mechanical science and technology, 2017, 31(2): 851-858.
- [15] MAUROTTO A, WICKRAMARACHCHI C T. Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: A feasibility study[J]. Ultrasonics, 2016, 65: 113-120.

- [16] 张习芳. 超声振动辅助铣削钛合金工艺实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
ZHANG Xi-fang. Experimental study on ultrasound vibration-assisted milling of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [17] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Study on elliptical vibration cutting[J]. *Ann cirp*, 1994, 43: 35-38.
- [18] 梁志强, 王西彬, 吴勇波, 等. 超声振动辅助磨削技术的现状与新进展[J]. *兵工学报*, 2010, 31(11): 1530-1535.  
LIANG Zhi-Qiang, WANG Xi-bin, WU Yong-bo, et al. Status and progress of ultrasonic assisted grinding technique[J]. *Acta armamentarii*, 2010, 31(11): 1530-1535.
- [19] GONG H, FANG F Z, HU X T. Kinematic view of tool life in rotary ultrasonic side milling of hard and brittle materials[J]. *International journal of machine tools and manufacture*, 2010, 50(3): 303-307.
- [20] JIANG C, WANG C, LI H. Experimental investigation of brittle material removal fraction on an optical glass surface during ultrasound-assisted grinding[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2016, 86(1-4): 419-426.
- [21] 李厦, 王锴霖. 超声振动辅助缓进给磨削温度场仿真与试验分析[J]. *表面技术*, 2018, 47(7): 265-269.  
LI Sha, WANG Kai-lin. Simulation and experimental analysis of ultrasonic vibration assisted creep feed grinding temperature field[J]. *Surface technology*, 2018, 47(7): 265-269.
- [22] 陈玉荣. 超声振动辅助磨削 SiC 陶瓷的加工表面粗糙度研究[C]// 2016 年全国超声加工技术研讨会论文集, 大连: 中国机械工程学会, 2016: 5.  
CHEN Yu-rong. Study on surface roughness of sic ceramics processed by ultrasound vibration assisted grinding[C]// 2016 national symposium on ultrasonic processing technology. Dalian: China Mechanical Engineering Society, 2016: 5.
- [23] UNYANIN A N. Grinding forces in the presence of ultrasound[J]. *Russian engineering research*, 2018, 38(3): 193-197.
- [24] TAMARKIN M A, TISHCHENKO E E, VYALIKOV I L. Increased efficiency of vibroabrasive machining in the presence of ultrasound[J]. *Russian engineering research*, 2015, 35(10): 740-744.
- [25] ZHAO B, CHEN F, JIA X, et al. Surface quality prediction model of nano-composite ceramics in ultrasonic vibration-assisted ELID mirror grinding[J]. *Journal of mechanical science and technology*, 2017, 31(4): 1877-1884.
- [26] NASSAR A, NASSAR E. An experimental study of ultrasonic vibration-assisted grinding[J]. *Computational tools for engineering applications*, 2013, 413(1): 289-291.
- [27] 赵春阳, 宫虎, 房丰洲. 旋转超声磨削硬质合金的表面质量实验研究[J]. *机械科学与技术*, 2012, 31(10): 1584-1587.  
ZHAO Chun-yang, GONG Hu, FANG feng-zhou. Experimental investigation on the surface quality in rotary ultrasonic grinding of cemented carbide[J]. *Mechanical science and technology for aerospace engineering*, 2012, 31(10): 1584-1587.
- [28] SONG X F, YANG J J, REN H T, et al. Ultrasonic assisted high rotational speed diamond machining of dental glass ceramics[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2018, 96(1-4): 387-399.
- [29] GAVRILOVA T M. Contact friction in the deformation zone during ultrasonic surface plastic deformation[J]. *Russian engineering research*, 2008, 28(8): 764-768.
- [30] SUN L, YANG S, YANG L, et al. A new model of grinding forces prediction for machining brittle and hard materials[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 27: 192-197.
- [31] ABDELKAWY A, HOSSAM M, EL-HOFY H. Mathematical model of thrust force for rotary ultrasonic drilling of brittle materials based on the ductile-to-brittle transition phenomenon[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2019, 101(1-4): 801-813.
- [32] ABDELKAWY A, HOSSAM M, EL-HOFY H. Machinability assessment of soda lime glass in ultrasonic-assisted drilling[J]. *Solid state phenom*, 2018, 278: 23-27.
- [33] 康仁科, 马付建, 董志刚, 等. 难加工材料超声辅助切削加工技术[J]. *航空制造技术*, 2012, 412(16): 44-49.  
KANG Ren-ke, MA Fu-jian, DONG Zhi-gang, et al. Ultrasonic assisted machining of difficult-to-cut material[J]. *Aeronautical manufacturing technology*, 2012, 412(16): 44-49.
- [34] 卢干. 超声辅助钻铣加工机理及其系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
LU Gan. Research on mechanism and system of ultrasound-assisted drilling and milling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [35] KRISHNARAJ V, PRABUKARTHI A, RAMANATHAN A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates[J]. *Compos part B*, 2012, 43(4): 1791-1799.
- [36] KURUC M, NECPAL M, VOPÁT T, et al. Influence of ultrasonic assistance on delamination during machining of CFRP composite[C]// *International Conference on Advanced Manufacturing Engineering & Technologies*. [s. l.]: Springer, 2017.
- [37] SHAN C, ZHANG X, DANG J, et al. Rotary ultrasonic drilling of needle-punched carbon/carbon composites: comparisons with conventional twist drilling and high-speed drilling[J]. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2018, 98(1-4): 189-200.
- [38] 靖贤. 三维椭圆振动切削参数对光学曲面表面形貌影响的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2014.  
JING Xian. Research on the effects of three-dimensional elliptical vibration cutting parameters on the optical surface topography[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2014.
- [39] 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]. Journal of mechanical engineering, 2003(12): 67-70.
- [40] 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 titanium alloy parts[J]. Acta armamentarii, 2014, 35(11): 1891-1897.
- [41] 童景琳, 卫官. 超声椭圆振动切削钛合金切削力特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(9): 208-215.  
TONG Jing-lin, WEI Guan. Characteristics of cutting force during titanium alloy processed with UEVC[J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38(9): 208-215.
- [42] 刘佳佳, 姜兴刚, 张德远. 钛合金高速旋转超声椭圆振动侧铣削切屑特征和刀具磨损研究[J]. 机械工程学报, 2019, 53(19): 22-32.  
LIU Jia-jia, JIANG Xing-gang, ZHANG De-yuan. Research on the characteristics of chips and tool flank wear in high-speed rotary ultrasonic elliptical machining for side milling of Ti-6Al-4V[J]. Journal of mechanical engineering, 2019, 53(19): 22-32.
- [43] 刘佳佳, 姜兴刚, 高泽, 等. 高速旋转超声椭圆振动侧铣削振幅对钛合金表面完整性影响的研究[J]. 机械工程学报, 2019(11): 215-223.  
LIU Jia-jia, JIANG Xing-gang, GAO Ze, et al. Investigation of the effect of vibration amplitude on the surface integrity in high-speed rotary ultrasonic elliptical machining for side milling of Ti-6Al-4V[J]. Journal of mechanical engineering, 2019(11): 215-223.
- [44] NATH C, RAHMAN M, NEO K S. Machinability study of tungsten carbide using PCD tools under ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. International journal of machine tools and manufacture, 2009, 49(14): 1089-1095.
- [45] 万林林, 刘志坚, 邓朝晖, 等. 氮化硅陶瓷 ELID 磨削预修锐与氧化膜成膜的影响因素[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(2): 55-61.  
WAN Lin-lin, LIU Zhi-jian, DENG Zhao-hui, et al. Influence factors of pre-dressing and oxide film forming when ELID grinding silicon nitride ceramic[J]. Diamond and abrasives engineering, 2017, 37(2): 55-61.
- [46] KLIMA J. Application of ultrasound in electrochemistry. An overview of mechanisms and design of experimental arrangement[J]. Ultrasonics, 2010, 51(2): 202-209.
- [47] ZHAO B, ZHAO C Y, DU B Y. Experimental study on damage mechanism of nano-ceramic surface/subsurface under ultrasonic vibration aided grinding[J]. Solid state phenomena, 2011, 175: 107-111.
- [48] DENG Z Q, ZHU Y W, WANG F, et al. Analysis and experimental study of vibration system characteristics of ultrasonic compound electrical machining[J]. Strength of materials, 2017, 49(1): 37-44.
- [49] 刘折, 赵波, 郑友益, 等. 超声 ELID 复合磨削陶瓷材料高效去除机理的仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(5): 27-31.  
LIU Zhe, ZHAO Bo, ZHENG You-yi, et al. Simulation on mechanism of ceramic removal by ultrasonic ELID composite grinding[J]. Ordnance material science and engineering, 2014, 37(5): 27-31.
- [50] 刘折. ZTA 纳米复相陶瓷超声 ELID 复合磨削机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.  
LIU Zhe. Experimental studies on ultrasonic vibration and electrolytic in-process dressing (ELID) combined grinding mechanism of ZTA ceramic nanocomposites[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.
- [51] 马新毅. 二维超声 ELID 复合平面磨削系统磨削力研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(1): 66-69.  
MA Xin-yi. Grinding force of two-dimensional ultrasonic-ELID composite grinding system[J]. Diamond and abrasives engineering, 2017, 37(1): 66-69.
- [52] 薄鑫涛. 电火花加工[J]. 热处理, 2019, 34(1): 60.  
BAO Xin-tao. Electrical discharge machining[J]. Heat treatment, 2019, 34(1): 60.
- [53] HOANG K T, YANG S H. A study on the effect of different vibration-assisted methods in micro-WEDM[J]. Journal of materials processing technology, 2013, 213(9): 1616-1622.
- [54] 陈伯厅, 陶孟仑, 陈定方, 等. 单脉冲超声辅助电火花加工温度场仿真分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47(18): 116-120.  
CHEN Bo-ting, TAO Meng-lun, CHEN Ding-fang, et al. Simulation analysis on temperature field of single pulse ultrasonic assisted EDM[J]. Hot working technology, 2018, 47(18): 116-120.
- [55] 林本刚, 李丽, 刘云, 等. 超声振动对电火花加工效果的影响[J]. 工具技术, 2017, 51(11): 79-83.  
LIN Ben-gang, LI Li, LIU Yun, et al. Effect of ultrasonic electrical discharge machining[J]. Tool engineering, 2017, 51(11): 79-83.
- [56] 车江涛. 水平超声振动电火花复合加工装置及试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.  
CHE Jiang-tao. The design and experimental study on horizontal ultrasonic EDM[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
- [57] 孔文军, 车江涛, 祝锡晶, 等. 水平超声振动电火花复合加工试验研究[J]. 制造业自动化, 2014, 36(19): 38-41.  
KONG Wen-jun, CHE Jiang-tao, ZHU Xi-jing, et al. The experimental study on horizontal ultrasonic EDM[J]. Manufacturing automation, 2014, 36(19): 38-41.
- [58] 王璟. TC4 钛合金超声振动高速走丝电火花线切割复合加工的研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.  
WANG Jing. Study on the HS-WEDM for TC4 titanium alloy workpiece attaching to ultrasonic vibration[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.