

# 超声波加工机床及其发展

Ultrasonic Machining Tool and Its Development

天津大学陶瓷与加工技术实验室 (300072) 程学艳 郭文娟 林彬 于思远

**【摘要】**介绍了旋转超声波加工的基本原理以及超声波机床的基本组成,包括超声波电源、换能器、变幅杆以及工具,阐述了超声波机床的发展,并介绍了日本现行生产的超声波机床。

**关键词** 超声波加工 超声波电源 振荡系统

**Keywords** ultrasonic machining, ultrasonic power supply, oscillation system

**中图分类号:** TH661 **文献标识码:** A

各种硬脆材料和硬脆复合材料很难用传统刀具进行加工,因而往往采用非传统的工艺方法进行加工,这些非传统工艺方法多数直接使用各种能量,如超声波加工和激光加工等。超声波加工始于1927年,已有七十多年的发展历史,适合于加工各种硬脆材料,如玻璃、陶瓷、石英、金刚石、硅等。

## 1 超声波加工的基本原理及特点

图1所示是超声波加工原理图,在工件和工具间加入磨料悬浮液,由超声波发生器产生超声振荡波,经换能器转换成超声机械振动,使悬浮液中的磨粒不断地撞击加工表面,把硬而脆的被加工材料局部破坏而撞击下来。在工件表面瞬间正负交替的正

压冲击波和负压空化作用下强化了加工过程。因此,超声波加工实质上是磨料的机械冲击与超声波冲击及空化作用的综合结果。

在传统超声波加工的基础上发展了旋转超声波加工,即工具在不断振动的同时还以一定的速度旋转,这将迫使工具中的磨粒不断地冲击和划擦工件表面,把工件材料粉碎成很小的微粒去除,以提高加工效率。

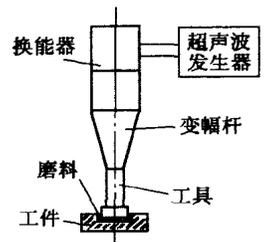


图1 超声波加工原理

超声波加工精度高,速度快,加工材料适应范围

(接上页) 系统控制车床主轴(Y向)和车床纵向(Z向)作联动运行,可以铣削加工轴类零件端面上各类(不同规格尺寸)曲面形状,还可数控铣削加工凸轮型面。

### 3.5 车削加工轴类零件

脱开FW160型万能分度头与X1轴左端的连接,恢复车床原主轴运动的旋转运动连接,当动力铣头夹持圆柱柄状刀杆的车刀(最好使用机械不重磨固夹车刀),或者更换动力铣头为电动刀台进行切削时,就可恢复普通的数控车削加工。

### 3.6 抛磨加工轴类零件

同上述,当更换各类成型砂轮或抛光轮替代铣刀,亦可进行轴类零件的磨削或抛磨加工。

## 4 结语

对普通车床采用三轴联动或二轴半(三坐标任意二轴联动)的数控系统进行改造,可使程序的编制更简便,效果更佳。上述CA6140普通车床的数控改造中,用X向步进电机控制车床的横向进给运动,Z

向步进电机控制车床的纵向进给运动,Y向步进电动机控制FW160型万能分度头驱动车床主轴旋转运动。与普通车床进行数控改造的区别是使数控系统中Y向原有的直线运行巧妙地变化为工件的旋转运行,并且使工件转动1周的运行位移长度恒定为 $L_y = 5 \times 40 = 200 \text{ mm}$ 。实践证明,采用该方法对普通车床进行数控改造,可使改造后的车床有一定的数控铣削功能,并通过串联2套经济型数控系统实现了多轴联动控制,拓宽和扩展了数控车床的加工范围,具有很强的实用性。

### [参考文献]

- [1] 余英良,付璐,刘伟. 数控车铣削方式大尺寸变螺距丝杠. 新技术新工艺, 2004(3): 21-24
- [2] 张新义主编. 经济型数控机床系统设计. 北京: 机械工业出版社, 1994
- [3] 林其骏主编. 微机控制机械系统设计. 上海: 上海科学技术出版社, 1991
- [4] 余英良著. 机床数控改造设计与实例. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [5] 王永章等编著. 机床的数字控制技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995

责任编辑 周守清

广,可加工出复杂型腔及型面,加工时工具和工件接触轻,切削力小,不会发生烧伤、变形、残余应力等缺陷,而且超声加工机床的结构简单,易于维护。

## 2 超声波加工机床的基本组成

超声加工机床为实现旋转超声加工,一般要由机床本体、超声波电源、超声振动系统、主轴旋转系统、主轴轴向进给系统、轴向力反馈保护系统等组成,分述如下。

### 2.1 超声波发生器

超声波发生器的作用是将 50 Hz 的交流电转变为一定功率的超声频振荡,以提供工具作超声频振动和切除工件材料所需的能量。目前常用的超声波发生器功率为 20~4 000 W。

在传统的超声波加工系统中,变幅杆和工具是装配在一起的,通过调整其尺寸以达到机械谐振的目的。但现在可用频率跟踪发生器自动调整输出频率,使其与变幅杆和工具组合的谐振频率相匹配,且能调整因装配误差、工具磨损、换能器生热等因素而造成的较小误差。在设计超声发生器时,还应考虑安全性能,例如:自动切断电源以防变幅杆破裂、变幅杆/工具连接失效等故障。

### 2.2 超声波振荡系统

超声波振荡系统的作用是将高频电振荡电能变为机械振动能,主要由超声换能器、变幅杆及工具 3 个部分组成。

#### 2.2.1 超声波换能器

超声波换能器的作用是将高频电振荡转变为机械振动。实现这种转变主要采用以下 2 种方法。

1) 磁致伸缩法 某些铁磁体或铁氧化物在变化的磁场中,由于磁场的变化,其长度也发生变化(伸长或缩短)的现象,称为磁致伸缩效应(亦称焦耳效应)。磁致伸缩换能器可分为 2 类:金属磁致换能器和铁氧体磁致换能器。金属磁致换能器的机械强度高,工作效能稳定,单位面积辐射功率大,电声转换效率一般为 30%~40%;铁氧体换能器电声转换效率高(>80%),但机械强度不高,单位面积辐射功率小。

磁致伸缩换能器因为具有较低的  $Q$  值( $Q$  是能量峰值的锐度),所以它能传递很宽的频率(例如:对于 20 kHz 的超声波发生器传递频率范围是 17~23 kHz)。这使变幅杆设计的灵活性增大,也使与变幅杆连接在一起的刀具允许在加工中磨损后可重磨。另外,在保证变幅杆振幅没有较大损失的情况下,可对其进行几次加工或重新设计。

磁致伸缩换能器工作时会大量生热,产生较大的电能损失,且使电声转换效率降低。因此,必须用水或空气进行冷却,从而使换能器尺寸增大。

2) 压电效应法 利用压电晶片(材料)在外电场中随电场方向的改变而形变发生相反变化的压电效应原理,将高频电振荡转变为机械振动的器件称为压电换能器。压电材料一般有压电单晶、压电陶瓷和压电薄膜 3 类。最典型的压电换能器是由 2 个圆形的锆钛酸铅或是厚度小于总超声换能器厚度 10% 的合成压电陶瓷构成。压电换能器电声转换效率高(90%~96%),不易有热量损失,不需要任何冷却措施,适应旋转操作,生产容易。

但要得到 0.1~1 GHz 级的超高频超声波换能器需要将压电晶片做得非常薄,加工很困难,所以对超高频超声换能器采用溅射成形的氧化锌薄膜,但是机电耦合系数低。为此,日本东北大学中村教授等人提出,用钛扩散,周期地形成自发极化反相区域,同时在表面配置叉指电极作成新型超高频超声换能器,可得到变换损失低于 5.5 dB、相对带宽为 0.9 的宽频带横波超声换能器<sup>[6]</sup>。

目前所使用的超声换能器,绝大多数仍然是压电晶体材料,其中锆钛酸铅类压电陶瓷又居多数。这是因为锆钛酸铅类强电介质材料,经烧结、极化后所形成的压电陶瓷,容易加工,表征能量转换效率的纵向机电耦合系数约 70%,相对其他压电材料,其值较大。

#### 2.2.2 变幅杆及工具

变幅杆的作用是将来自换能器的超声振幅由 0.005~0.01 mm 放大至 0.01~0.1 mm,以便进行超声波加工。变幅杆之所以能放大振幅,是由于通过其任一截面的振动能量是不变的(传播损耗不计),截面小的地方能量密度大,振动振幅也就越大。

在进行大功率的超声加工及精密加工时,往往将变幅杆与工具设计制成一个整体;在进行小功率的超声加工及加工精度不高时,则将变幅杆与工具设计制成可拆卸式。

变幅杆的基本形式有圆锥型、指数型、阶梯型。此外,还有由 2 种以上单一形状组成的组合型。在面积系数  $N$  一定时( $N = \sqrt{S_1/S_2} = D/d, S_1, S_2, D, d$  分别为变幅杆输入端及输出端面积及直径),阶梯型变幅杆的放大倍数  $M_p$  最大,圆锥型变幅杆的放大倍数最小。

但阶梯型变幅杆由于半径的突然变化会产生压力集中,因此变幅杆容易损坏。当放大倍数过大时,

还可能发生侧振,且对附加于端面的负荷较敏感。

目前,对超声变幅杆的研究和优化已广泛应用了CAD/CAM技术和有限元分析技术。如使用ANSYS软件对变幅杆进行优化:首先分析需要的所有数据(材料属性、频率范围等),定义结构的几何形状;然后求解,计算固有频率、位移、应变和应力;最后是估计分析结果和画出应力曲线。

工具是变幅杆的负载,其结构尺寸、质量大小以及与变幅杆连接的好坏,对超声振动共振频率和超声波加工性能均有很大影响。工具可以通过焊接或螺钉固定在变幅杆上;也可以和变幅杆设计成整体,采用可拆卸式,虽然能快速更换工具,但可能出现工具松懈、超声能量损失、疲劳破坏等问题。

采用中空变幅杆和工具在硬脆材料上加工深孔时,可通过变幅杆和工具的中心孔供给磨料,磨料供给能力得到增强,使加工效率得到提高。

工具材料应有高的抗磨损性,好的弹性和高的疲劳强度,常用的工具材料有硬质合金、蒙乃尔铜-镍合金等,其韧性和硬度要具有最佳值。近年来,多晶钻石(PCD)也被应用于对非常硬的工件材料(如热等静压氮化硅)的加工。

### 3 超声波加工机床的发展

超声振动系统是超声设备的核心。以前普遍采用的超声振动系统多为纵向振动方式,并按“全调谐”工作。近年来,对振动系统的工作方式、设计计算、振动方式及应用研究都取得新进展。

陕西师范大学声学所丁大成等研制成一种纵弯型振动系统。利用该振动系统制成的YP型超声车刀已获国家专利。其特点是:克服了以往通常采用的“纵-弯”型振动系统的某些不足,且结构简单,安装方便,节能。

日本还研制成一种“纵-扭”型超声复合振动系统,压电换能器采用两组压电陶瓷片,一组产生纵向振动,另一组产生扭转振动。复合振动系统与四边油石连接后,其纵向振动频率29.4 kHz,扭转振动频率为19.4 kHz。

国内外研究表明,超声旋转加工是一种有效的加工方法,但有关设备、加工工艺相关技术正待研究开发。传统的超声加工机床自动化程度低,操作麻烦。随着计算机技术的不断发展,为了实现机床操作的自动化,现在清华大学已经开发了完全数控化的旋转超声加工机床,以工控PC为硬件基础,其数控系统由Z轴进给控制,旋转电机控制,自动频率跟踪控制等功能模块组成。

天津大学也在超声加工机床方面做了很多研究,对机床进行了模块化设计研究,有利于产品的更新换代,可缩短设计和制造周期,降低成本,性能稳定可靠,且给今后的维修带来方便<sup>[9]</sup>。

近年日本研制生产了多种超声波加工机床,如:

1) UM-50VNR2型超声波加工机床 是微小孔的专用超声加工机床,采用数控系统,自动化程度高,加工孔的最小直径为 $\Phi 0.1\text{ mm}$ ,位置精度可达到 $\pm 3\ \mu\text{m}$ ,操作简单,变幅杆和工具采用可拆卸式,更换工具容易。

2) UM-500DA自动型超声波加工机床 适合加工直径为 $\Phi 0.5\text{ mm} \sim \Phi 60\text{ mm}$ 的孔,当加工完成后能自动回到原来位置,X、Y轴的进给精度为 $5\ \mu\text{m}$ ,且磨料供给系统好,深孔加工效率高。

3) UM-150B型超声波加工机床 主要用于成型研磨加工、精密细孔加工,加工尺寸范围是 $\Phi 0.1\text{ mm} \sim \Phi 2.0\text{ mm}$ 。

4) UM-300DAP自动吸引式超声波加工机床 适用于深孔加工和对超硬合金等高硬度材料的加工。有吸引式磨料供给装置,工具振幅大,且采用中空形式,可迫使磨料不断循环,使参与加工的磨粒更新快,故加工效率高(为常规加工的2.5~4倍)。

综上所述,超声加工技术是非常有效的加工手段,其发展和应用促进了超声加工机床的发展,且随着现代工业的需要,有进一步开发研究的必要。

### [参考文献]

- [1] 刘白 几种特种加工方法的原理及应用 长沙大学学报, 1997(4).
- [2] S. G. Amin, M. H. M. Ahmed, H. A. Youssef Computer-aided design of acoustic horns for ultrasonic machining using finite-element analysis Journal of Materials Processing Technology, 1995: 254-260
- [3] T. B. Thoe, D. K. Aspinwall, M. L. H. Wise Review on ultrasonic machining International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 1998, 38(4): 239-255
- [4] 范国良, 陈传梁 超声加工概况和未来发展 电加工, 1994(6): 7-11
- [5] 胡传焯 特种加工手册 北京: 北京工业大学出版社, 2001
- [6] 骆嘉龄 超声波换能器的研究动向 试验技术与试验机, 1993(33): 3-8
- [7] 轧刚, 秦华伟, 许永娃, 张裕生 旋转超声波加工的试验研究 新工艺·新技术·新设备, 2000(6).
- [8] 戴向国, 傅水根, 王先逵 旋转超声加工机床的研究 中国机械工程, 2003: 289-292
- [9] 刘金华 超声磨削加工机及其模块化设计研究: [硕士学位论文] 天津: 天津大学, 2001.

责任编辑 周守清