

超声加工及其应用

张云电 著

国防工业出版社

CHAOSHENG JIAGONG JIQI
YINGYONG

G F G Y C B S

TG 663
Z 29

337186

超声加工及其应用

张云电 著

国防工业出版社

· 北京 ·

DV84/33-05

图书在版编目(CIP)数据

超声加工及应用/张云电著, —北京:国防工业出版社,
1995.)

ISBN 7-118-01480-X

I. 超… II. 张… III. 超声波加工 IV. TG663

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 11231 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14½ 330 千字

1995 年 9 月第 1 版 1995 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—3 000 册 定价:17.60 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

随着科学技术的发展,在机械制造、兵器制造、航空航天、车辆制造、造纸和造船工业中,广泛使用不锈钢、耐热钢、钛合金、高温合金、冷硬铸铁、陶瓷和花岗岩等材料,这些材料的加工性很差,给机械加工带来很大困难。因此,应当探索新型加工方法,以改善材料的加工性,提高加工质量和加工效率,降低加工成本。

超声加工方法是近30年来逐步发展的一种新型加工方法。在难加工材料和精密加工中,超声加工方法具有普通加工无法比拟的工艺效果,具有广泛的应用范围。

著者从80年代中期开始研究超声加工技术。1988年,研制成功超声珩磨装置,其结构和性能已大大超过国外同类装置;1989年,超声珩磨装置通过部级鉴定,填补了国内技术空白,达到国际先进水平;超声珩磨装置已获得两项国家专利,并被国家科委、国家物价局、国家工商银行、国家物资部评为1990年度国家级新产品;1991年,研究成功变截面细长杆超声车削技术,并通过部级鉴定,专家们一致认为属国际首创,居国际领先水平;从1992年7月开始,利用超声珩磨装置分别在立式珩磨机和卧式珩磨机上对钢质薄壁镀铬缸套和高强度合金钢深孔进行了工业试验。除上述成果之外,还研究了超声压光技术,研制了具有频率自动功能的新型晶体管型超声波发生器,提出了研制中空夹芯式压电换能器和变幅杆的科研工作,以解决立式超声珩磨装置可以在不停车的情况下实现自动加压的问题。目前,中空夹芯式压电换能器已研制成功,并用于立式超声珩磨装置,取得了满意的效果。

超声加工技术横跨机械学、电学和声学三个学科,因而可把超声加工视为边缘学科。

本书共分9章:第1章是绪论,第2章至第4章分别介绍了超声波发生器、换能器和变幅杆的原理和设计,第5章至第9章分别介绍了超声车削、超声钻孔和镗孔、超声磨削、超声珩磨和其他超声加工方法的原理和应用范围,以及超声加工装置的设计、制造、调试和试验结果。为使读者能从书中得到启发而得出正确的、能指导生产的结论,本书汇集了国内外最新的超声加工理论及试验结果,提供了相当数量在生产中应用的实例。著者在书中提出了将变截面杆超声波振动车削技术用于超声聚能器——变幅杆的精密加工的思想,这对解决超声加工系统中的关键零件之一——变幅杆的精密加工是颇有意义的。

本书如果能对想深入了解超声加工原理以及研究、设计、制造和应用超声加工设备的读者有所帮助,将是著者最大的欣慰。限于著者学术水平及实践经验,书中难免有不当之处,恳请读者不吝指正为盼。

本书承清华大学池去病教授、北京理工大学王信义教授审阅,并提出了宝贵的修改意见。

著者向池去病教授、王信义教授及本书中所引用的著作及论文的所有作者,表示衷心的感谢,同时,著者向参加超声加工科研工作的王纯、喻家英等同志表示深切的感谢。

杭州电子工业学院 张云电

内 容 简 介

超声加工技术横跨机械学、电学和声学三个学科,因而属于边缘学科。

本书系统地介绍了超声加工的原理、超声加工系统(包括超声波发生器、换能器、变幅杆、工具等)的设计、制造和调试以及超声加工方法的应用范围。

全书共分9章,不仅汇集了国内外最新的超声加工理论及试验成果,而且提供了相当数量的在生产中应用的实例。

本书以著者的研究成果为基础,参考了国内外权威著作及论文,以新颖的方法系统编写。全书观点明确,文笔流畅,深入浅出,通俗易懂。

本书可作为高等工科院校机械制造专业的教材,也可供从事超声加工的科研、生产人员及机械行业的高、中级技术人员参考。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
§ 1-1 超声加工技术发展概况	(1)
§ 1-2 超声加工的工艺效果	(2)
§ 1-3 超声加工的应用范围及前景	(9)
第 2 章 超声波发生器	(12)
§ 2-1 振荡器的工作原理	(12)
§ 2-2 电子管型超声波发生器	(18)
§ 2-3 晶体管型超声波发生器	(22)
§ 2-4 功率超声设备的新发展	(28)
第 3 章 超声换能器	(33)
§ 3-1 压电换能器	(33)
§ 3-2 磁致伸缩换能器	(46)
§ 3-3 换能器与发生器的匹配	(57)
§ 3-4 换能器的冷却与旋转	(61)
§ 3-5 换能器的选用	(63)
第 4 章 超声变幅杆	(64)
§ 4-1 纵向振动变幅杆	(65)
§ 4-2 有负载的变幅杆	(88)
§ 4-3 扭转振动变幅杆	(90)
§ 4-4 变幅杆的固定方法	(92)
§ 4-5 变幅杆与换能器的连接方式	(93)
§ 4-6 变幅杆的材料	(94)
§ 4-7 变幅杆的选用原则	(95)
§ 4-8 变幅杆的设计步骤	(97)
第 5 章 超声车削	(99)
§ 5-1 超声车削装置	(99)
§ 5-2 超声车刀	(103)
§ 5-3 超声车削过程的运动特性	(107)
§ 5-4 超声车削的毛坯误差复映规律	(108)
§ 5-5 超声车削对加工精度的影响	(114)
§ 5-6 超声车削对表面质量的影响	(117)
§ 5-7 变截面细长杆超声车削技术	(123)
§ 5-8 难加工材料的超声车削试验	(129)
§ 5-9 40~60kHz 超声车削装置的研制	(138)

§ 5-10 重叠振动车削	(139)
§ 5-11 超声车削的应用范围	(140)
第 6 章 超声钻孔和镗孔	(141)
§ 6-1 超声钻孔	(141)
§ 6-2 超声镗孔	(148)
第 7 章 超声磨削	(152)
§ 7-1 超声波振动修整砂轮	(152)
§ 7-2 超声清洗砂轮	(156)
§ 7-3 超声磨削	(157)
第 8 章 超声珩磨	(163)
§ 8-1 超声珩磨装置的工作原理	(163)
§ 8-2 弯曲振动圆盘	(165)
§ 8-3 挠性杆—油石座振动子系统	(166)
§ 8-4 超声珩磨油石	(167)
§ 8-5 $\phi 122\text{mm}$ 卧式深孔超声珩磨装置	(173)
§ 8-6 立式超声珩磨装置及其主动测量	(174)
§ 8-7 平顶超声珩磨	(181)
§ 8-8 国内外超声珩磨装置的特点	(185)
§ 8-9 超声珩磨机	(185)
§ 8-10 超声珩磨的应用范围	(194)
第 9 章 超声加工的其他应用	(196)
§ 9-1 磨料冲击加工	(196)
§ 9-2 超声抛光	(199)
§ 9-3 超声压光	(202)
§ 9-4 超声拉丝	(207)
§ 9-5 超声拉管	(208)
§ 9-6 超声锯料	(215)
§ 9-7 超声焊接	(217)
§ 9-8 超声旋转加工	(220)
参考文献	(222)

第1章 绪 论

§ 1-1 超声加工技术发展概况

人耳可以听到的声波的频率范围约为 $16 \sim 20\,000\text{Hz}$ 。低于 16Hz 的声波称为次声波, 高于 $20\,000\text{Hz}$ 的声波称为超声波。人们还把频率为 $0.5 \times 10^9\text{Hz}$ 以上的声波称为特超声或微波超声。人耳听不见次声和超声, 很多海洋动物能感受。狗能听见超声波, 蝙蝠能发出超声, 再接收其回声, 借以探路和捕食。深海中一片漆黑, 鲸鱼、海豚等也用超声波来指路, 等等。可见, 次声波和超声波也是客观存在的自然现象。

由于人耳听不到超声, 所以人们研究它比较晚。直到本世纪生产和科学有了相当发展, 对超声的研究和应用有了可能和需要之后, 超声学才发展起来。超声具有许多独特的性质和优点, 所以超声学的发展很迅速, 应用领域十分广泛, 并有广阔的应用前景。超声加工技术是功率超声应用的一个分支。

超声加工, 是指给工具或工件沿一定方向施加超声频振动进行振动加工的方法。超声加工系统, 由超声波发生器、换能器、变幅杆、振动传递系统、工具、工艺装置等构成。例如, 超声珩磨系统由超声波发生器、换能器、变幅杆、弯曲振动圆盘、挠性杆——油石座振动子系统、油石、珩磨头体、珩磨杆、油石胀开机构、浮动机构等组成。超声波发生器的作用是, 将 220V 或 380V 的交流电源转换成超声频电振荡信号; 换能器的作用是, 将超声频电振荡信号转换为超声频机械振动; 变幅杆的作用是, 将换能器的振动振幅进行放大; 弯曲振动圆盘将变幅杆的纵向振动转换为弯曲振动, 挠性杆——油石座振动子系统再将圆盘的弯曲振动转换为纵向振动, 油石座带动与其连接在一起的油石进行纵向振动(详见第8章)。

超声加工起源于 50 年代初期。最早研究超声加工技术的国家是日本。日本在甲府设立了专门的振动切削研究所, 许多大学和科研机构也都设有这个研究课题。日本研究超声加工的主要代表人物有两位: 一位是中央大学的岛川正宪教授, 《超音波工学——理论和实际》是他的代表作; 另一位是宇都宫大学的隈部淳一郎教授, 《精密加工、振动切削基础和应用》是他的代表作。日本研究人员不但把超声加工用在普通设备上, 而且在精密机床、数控机床中也引入了超声振动系统, 并且试图将超声加工引入超精密加工机床。超声加工在日本已获得近百项专利, 在生产中发挥了一定的作用。

原苏联的超声加工研究也比较早, 50 年代末 60 年代初已经发表过很有价值的论文。在超声车削、钻孔、磨削、光整加工、复合加工等方面均有生产应用, 并取得了良好的经济效果。他们对超声加工设备操作人员的技能等级, 共分为五级。为了推动超声加工的应用, 1973 年原苏联召开了一次全国性的讨论会, 充分肯定了超声加工的经济效果和实用价值, 对这项新技术在全国的推广应用起到了积极的作用。

60年代初,美国开始了超声加工的研究工作。由于当时超声加工技术还很不成熟,包括声振系统、换能器、发生器的设计制造和质量都较差,美国的研究工作曾经停顿了10年。70年代中期,美国在超声钻中心孔、光整加工、磨削、拉管和焊接等方面,已处于生产应用阶段;超声车削、钻孔、镗孔已处于试验性生产设备原型阶段;通用超声振动切削系统已供工业应用,目前已形成部分标准。

德国和英国也对超声加工的机理和工业应用进行了大量的研究工作,并发表了许多有价值的论文,在生产中也得到了积极的应用。

我国超声加工的研究始于50年代末,曾经掀起过一阵群众性的“超声热”,由于当时超声波发生器、换能器、声振系统很不成熟,缺乏合理的组织和持续的研究工作,很快就冷了下来。60年代末,哈尔滨工业大学应用超声车削,加工了一批飞机上的铝制细长轴,取得了良好的切削效果,但事后没有进行深入的总结和研究。由于我国特定的历史条件,中断了这项新技术的研究工作十多年。1976年以后,我国再次开展超声加工的试验研究和理论探讨工作。吉林工业大学、广西大学及甘肃光学仪器厂等单位,率先进行超声车削设备及试验研究。1982年,上海钢管厂、中国科学院声学研究所及上海超声波仪器厂研制成功超声拉管设备,为我国超声加工在金属塑性加工中的应用填补了空白。1983年10月,机械电子工业部科技司委托《机械工艺师》杂志编辑部在西安召开了我国第一次“振动切削专题讨论会”,会议充分肯定了振动切削在金属切削中的重要作用,交流了研究和应用成果,促进了这项新技术在我国的深入研究和推广应用。1985年,机械电子工业部第11研究所研制成功超声旋转加工机,在玻璃、陶瓷、YAG激光晶体等硬脆材料的钻孔、套料、端铣、内外圆磨削及螺纹加工中,取得了优异的工艺效果。1989年,著者研制成功超声珩磨装置,在汽车、拖拉机、摩托车发动机汽缸、炮管、油缸、煤矿液压支架等精密孔的珩磨加工中进行了生产应用,并通过了部级鉴定,填补了国内技术空白。1990年,超声珩磨装置被列为国家级新产品。1991年,著者研制成功变截面细长杆超声车削装置,从根本上解决了节制杆、各种复杂形状的变幅杆、等截面细长杆精密加工的重大技术难题,对保证产品质量、提高制造技术水平有重大意义,这项新技术也已通过部级鉴定。到1993年为止,我国已发表了300多篇有关超声加工方面的科学研究论文。可以相信,随着超声加工设备的不断完善和理论研究的不断深入,它必将在我国技术进步和社会主义现代化建设中起到重要的作用。

§ 1-2 超声加工的工艺效果

超声加工具有传统的机械加工不可比拟的优异工艺效果,这些工艺效果可以归为10类。必须指出,并非每一种超声加工方法都同时具有这些工艺效果,请读者注意。

一、切削力大幅度降低

超声车削时,切削速度的大小和方向产生周期性的变化,这种变化改变了整个工艺系统的受力情况。用 $v=0.1\text{m/min}$ 、 $f=20\text{kHz}$ 、 $a=15\mu\text{m}$ 进行超声车削时,刀具在每一个振动周期 $T=1/20\,000\text{s}$ 内的纯切削时间 t_c 是非常短的,只有 10^{-6}s 。在纯切削时间 t_c 之内,

刀具沿切削方向的切削长度 $l_T = v/f = 8 \times 10^{-5} \text{mm}$ 。由此可见,超声车削是一个在极短时间内完成的微量切削过程。在一个切削循环过程中,刀具在很小位移上得到很大的瞬时速度和加速度,在局部产生很高的能量。例如,以 $f = 20 \text{kHz}$ 、 $a = 20 \mu\text{m}$ 进行超声车削时,刀具振动的最大速度和最大加速度分别可达到 150m/min 和 $3.2 \times 10^4 g$ (g 为重力加速度),即刀具振动的最大加速度为重力加速度的三万多倍。可以想象,这时被加工材料在局部微小体积内的物理、机械性能必将发生重大变化。在超声振动的影响下,摩擦系数大大降低,只有普通切削的 $1/10$ 左右,使超声车削的切削力下降到普通切削的 $1/3 \sim 1/10$ 。对一些塑性较大的材料,下降的程度更大。例如,超声车削紫铜 ($f = 20 \text{kHz}$, $a = 15 \sim 20 \mu\text{m}$) 时,主切削力下降到普通切削的 $1/8 \sim 1/10$,而径向力下降到普通切削的 $1/50$ 。这种工艺效果对精密加工或对刚度低、功率小的仪表机床将有重要意义。

大幅度降低切削力,为降低切削热、延长刀具寿命和保证加工质量创造了条件,这也正是切削工作者多年追求的目标,因而超声车削受到了国内外切削工作者的普遍重视。

二、切削温度大幅度降低

超声车削时,被加工材料的弹塑性变形和刀具各接触表面的摩擦系数大幅度下降,且切削力和切削热都以脉冲形式出现,使切削热的平均值大幅度下降。切屑的平均温度仅 40°C 左右(相当于南方的夏季高温气候),切屑完全没有氧化变色,用手去摸也不会烫伤,这是普通切削不可想象的。普通切削时,相当于加热了的烙铁一动不动地压紧工件进行焊接,产生了无用的、明显的发热现象,这种无用的发热,浪费了很多的电力。既然这种发热是不可避免的,就必须采取措施,解决因发热所产生的种种问题。也就是说,要研究出各种各样的切削液、磨削液,等等。超声车削时,相当于上下急促摆动的断续加热,刀具和工件不可能实现焊接。由于超声车削过程是一种分离型的断续过程,切削热是以脉冲形式出现变化的,在极短的切削过程中,热量来不及传到更深的金属内部,所以切削温度的绝对值是比较低的。超声车削消除了大部分无用的切削热,也没有普通切削因严重发热而引起的后遗症。早期的超声磨削发现,当给 $22 \text{mm} \times 22 \text{mm} \times 3 \text{mm}$ 的淬火钢(HRC55)加上 $f = 18 \text{kHz}$ 、 $a = 25 \mu\text{m}$ 的径向振动时,尽管磨削深度由普通磨削的 0.05mm 提高到 0.09mm ,但工件的磨削温度却降低了 50% 。切削过程的这种变化,无论在理论上,还是在实际应用中都有很大价值。它改善了切削条件,提高了加工质量和刀具耐用度,消除了由于切削温度高而引起的一系列问题,例如热致损伤,由于切削热引起的工件表面残余应力和工件的热变形等。尤其对需要热处理的零件,为减少热处理的变形与裂纹创造了十分有利的条件。

三、大幅度降低表面粗糙度 R_a 值和显著提高加工精度

超声车削破坏了产生积屑瘤和鳞刺的条件,又由于大幅度降低切削力、切削温度,使得工件表面粗糙度 R_a 值大幅度降低,加工精度大幅度提高。超声车削过程中,刀刃虽在振动,但在刀刃与工件接触并产生切屑的各个瞬时,刀刃所处的位置遵从灵敏性振动切削机理。按照这个机理,不仅工件的变形量减少(仅为普通切削变形量的 $1/3 \sim 1/10$),而且

完全不随时间变动,宛如静止的状态一样,从而使精密加工成为可能。

超声车削恒弹性合金 3J53、钛合金 TiC4 时,轮廓平均算术偏差 R_a 值从普通切削的 $3\mu\text{m}$ 降低到 $0.3\mu\text{m}$ 以下。用宽刃刨刀超声刨削黄铜、铝、碳素钢等材料, R_a 值均可达到 $0.06\mu\text{m}$ 。用各种几何形状的刀具,以不同的切削规范对各种材料进行超声切削,所得表面粗糙度与理论计算值相当一致。这一结果意味着根据刀具形状和切削参数可以预测表面粗糙度,为准确地控制表面粗糙度提供了可能。普通切削中,由于影响因素错综复杂,即使使用现代数理统计理论,也很难使计算结果与实际加工结果相一致。例如,采用刀尖圆弧半径 $r_c=1.5\text{mm}$ 的硬质合金刀片,以进给量 s 分别为 0.06 、 0.103 、 0.15 、 0.2mm/r 超声车削 40Cr 材质细长轴,分别得到 0.51 、 0.78 、 1.7 、 $2.93\mu\text{m}$ 的轮廓平均算术偏差值,与理论计算值相当一致。超声切削不但可以达到、甚至超过各种切削加工所达到的最小表面粗糙度 R_a 值,而且可以用刀具切削达到磨削、甚至研磨所达到的表面粗糙度,还可以实现虹面加工。

大量的超声切削试验表明,超声切削可显著提高零件的尺寸精度和几何精度。

(1)尺寸精度 在精密瑞士机床上,工件转速 $n=200\text{r/min}$,车削一批不锈钢工件,超声车削得到的工件平均偏差范围是 $\phi 5 \pm_{-0.001}^{+0.002}\text{mm}$,而普通车削是 $\phi 5 \pm_{-0}^{+0.008}\text{mm}$ 。用硬质合金刀片连续六次超声车削高速钢(淬硬至 HRC64~65),尺寸误差均在 $0\sim 5\mu\text{m}$ 范围内,平均误差为 $3\mu\text{m}$ 。

(2)形状精度和位置精度 在龙门刨床上超声刨削黄铜、铸铁、硬铝、镍铬钢,与材料无关地得到 $2\mu\text{m}/450\text{mm}$ 的平行度误差,而普通刨削的平行度误差为 $22\sim 65\mu\text{m}/450\text{mm}$ 。把工件支承在经过精密加工的顶尖上,用皮带传动,以 $v=15.5\text{m/min}$ 、 $s=0.03\text{mm/r}$ 进行超声车削,得到的圆度误差分别为:碳素钢 $0.1\mu\text{m}$;黄铜 $0.3\mu\text{m}$;不锈钢 $0.3\mu\text{m}$ 。进一步试验表明,从超声车削试件测出的圆度误差,实际是机床主轴的回转误差引起。因此,超声切削被认为是进行圆度误差、圆柱度误差、平面度误差、平行度误差等近似为零的精密加工和超精密加工的好方法。

四、工具寿命大幅度提高

超声加工时,由于切削力小、切削温度低、冷却充分,使工具寿命明显提高。当振动方向、振动参数和切削用量选择合适时,一般可使工具寿命提高几倍至几十倍,对难加工材料和难加工工序,其效果更好。超声车削恒弹性合金 3J53 端面,刀具寿命可提高 13 倍以上。超声车削不锈钢细牙螺纹时,硬质合金刀具寿命可比普通车削提高 20~30 倍,从普通车削的 200~300 件提高到 7000~8000 件。刀具寿命的延长不仅节约了刀具材料,减少刀具刃磨和更换刀具所需的辅助时间,降低了生产成本,而且有利于保证加工质量,提高生产效率。

五、切屑处理容易

随着切削加工技术不断向高效率、高精度、自动化等方面发展,使原来不被重视的“切屑处理”问题逐步转变成为生产中必须解决的问题之一。过去在单人、单机、单刀、低速加

工的情况下,切屑处理的难易程度虽然也曾作为评价被加工材料可加工性的基本因素之一,但同其他因素如刀具寿命、切削力、加工精度和表面质量等相比,它往往只处于无足轻重的次要地位。

随着科学技术的发展,宇航工业、国防工业、机械工业和化学工业等部门正在推广使用高强度、高韧性的难加工材料。与此同时,切削加工也正朝着自动化和省力化方向发展,各种自动机床、专用机床、自动生产线、数控机床、加工中心和柔性制造系统的推广应用,以及采用计算机控制和无人化管理等,因而使切屑处理问题成为影响生产效率和加工质量的重要因素。

国外曾提出用切屑的容积系数 w_c 来评价切屑处理的难易程度。

切屑的容积系数 w_c 定义为

$$w_c = \frac{V_s}{V_m}$$

式中 V_s ——切屑占有的总体积(cm^3);

V_m ——与切屑同样质量的金属体积(cm^3)。

测定方法是,先用已知容积的容器量出某一数量切屑的体积,然后再称出此切屑的质量 $m(\text{kg})$,则它的实体金属体积为

$$V_m = \frac{m \times 1000}{\rho}$$

式中 ρ ——金属的密度(g/cm^3)。

切屑容积系数越小,则切屑处理就越容易。奇欧夫莱·博斯罗(Geoffrey Boothroyd)在他所著的《金属切削加工基础及机床》一书中介绍的数据为:

连续不断的切屑 $w_c = 50$

密卷的切屑 $w_c = 15$

良好的切屑 $w_c = 3$

这说明良好的切屑,其体积约为连续不断切屑所占体积的 $1/17$ 。当然,在具体生产中,也并不都是切屑容积系数越小越好。

超声车削用于精密加工 40Cr 材质变截面细长杆,当 $f = 20.6\text{kHz}$ 、 $a = 16\mu\text{m}$ 、 $n = 250\text{r}/\text{min}$ 、 $s = 0.103\text{mm}/\text{r}$ 、 $a_p = 0.2\text{mm}$ 时,切屑容积系数 $w_c = 19$,切屑柔软,切屑在自重作用下自然卷曲在床身下方,非常易于切屑处理。

超声车削还具有下述优点:

(1)切屑不缠绕工件。即使切屑缠绕在工件上,也不会损伤已加工表面,降低其精度和增大表面粗糙度 R_a 值。

(2)由于切屑温度接近于室温,不会形成派生热源,使机床导轨产生热变形,导致加工精度降低。

(3)由于排屑顺利,不需要操作者手持铁钩排屑,更不会因为排屑不畅而导致机床停机,甚至会使整个自动化生产线停产。

(4)普通车削脆铜时,切屑折断得太碎,到处飞散,影响操作者和邻近机床操作者的安全,同时也会降低机床滑动表面(如导轨等)的配合精度,而且切屑不易清理。超声车削脆铜时,切屑呈卷曲状,切屑容积系数 $w_c = 16$,普通车削脆铜过程中的问题全部消失。

六、提高了切屑液的使用效果

普通切削中,切屑总是压在刀具前刀面上,形成一个高温、高压区。对冷却液来说,这是个禁区。切削过程中,冷却液只能在刀刃的外围间接地起冷却作用。分离型超声切削($v \leq v_c/3 = 2\pi fa/3$)中,这个禁区被打开了。超声切削时,切削过程是断续发生的,当刀具与工件分离时,冷却液从四面进入切削区,包围刀尖,进行充分的冷却和润滑。在刀具切入时,切削液被强力挤压,形成瞬时高压,使切削液直接渗到刀具与切屑的接触表面,充分地起冷却和润滑作用。超声切削时,由于超声振动的影响所形成的空化作用,一方面可使冷却液均匀乳化,形成均匀一致的乳化液微粒;另一方面,切削液更容易渗透到材料的裂纹内,进一步提高了冷却液的使用效果,改善了排屑条件。

在没有冷却液的情况下,由空气起冷却作用。由于刀具在离开切屑时,前刀面完全暴露在空气中,而钢在空气中只需要有 10^{-8} s 的时间就能形成一分子层厚的氧化层(超声切削时,纯切削时间 $t_c = T/3 \sim T/10 = 1/60\,000 \sim 1/200\,000$ s),并随时间成近似抛物线关系扩散加厚。形成的氧化层减少了刀具与切屑接触表面之间的摩擦,延长了刀具的使用寿命。

一般来说,有冷却液时的超声切削效果比没有冷却液的好,但冷却液也不可随便选用。试验结果证明:采用乳化液做冷却液时,刀具磨损较快;采用机油加锭子油做冷却液时,超声切削效果最好。

超声清洗砂轮利用超声波对磨削液的机械作用、化学活化作用、空化作用和热作用,可以降低工件表面残余应力,减轻磨削烧伤,降低磨削力和提高磨削比,从而提高磨削效率和工件表面质量,降低产生磨削缺陷的可能性。

七、提高已加工表面的耐磨性、耐腐蚀性

超声切削时,在一个周期内的切削长度 L_T 是很小的。例如,用 $v = 0.1\text{m/min}$ 、 $f = 20\text{kHz}$ 、 $a = 15\mu\text{m}$ 的参数进行超声切削时, $L_T = 0.08\mu\text{m}$,即在 1mm 宽内有上万条刀痕。刀具是按正弦规律振动的,在加工面上形成的细小刀痕如同二次再加工时形成的花格式网状花纹。数量如此巨大的花纹均匀密布在零件的表面上,工作时在零件的表面形成较强的油膜,对提高滑动面耐磨性有着重要作用。用 $\phi 28\text{mm}$ 的 45 号钢圆棒进行普通车削、超声车削和普通磨削,然后把试件放在 Q835 型平面抛光机上进行研磨,磨盘线速度为 30m/min ,加压 80N,加 306 号金刚砂研磨剂,用万分之一天平称重,其结果列于表 1-1。此表说明,超声车削工件表面的耐磨性高于普通车削,接近普通磨削。

表 1-1 耐磨性试验

研磨时间 (min)	金属去除量(mg)		
	普通车削	超声车削	普通磨削
20	0.6	0.25	0.2
40	0.9	0.4	0.3
60	1.1	0.5	0.4

用普通车削、超声车削、普通磨削三种不同加工方法加工同样直径、同样材料的圆棒后,进行耐腐蚀试验。把试件放入腐蚀液中(硝酸醇水溶液、浓度1%),用电加热器加热至30℃并保温,每10min测量一次,其结果列于表1-2。试验结果表明:超声车削工件表面的耐腐蚀性高于普通车削,接近普通磨削。

表 1-2 耐腐蚀性试验

加工方法	10min	20min	30min
	腐蚀量(μm)		
普通车削	2	3	3.8
超声车削	1	1.6	2.4
普通磨削	0.8	1.5	2

著者的研究表明,超声珩磨可以在汽缸套内孔表面上形成数以万计的微型凹坑,使汽车、拖拉机、摩托车、坦克运行中经飞溅而进入汽缸套内孔的润滑油作微量储存,经过渗透和吸附作用,使每个凹坑单元周围部分接触面存在润滑油膜,起到增加润滑和降低摩擦系数的作用。它能够润滑活塞和汽缸套内孔表面间的滑动区,从而可以防止粘着和咬合的出现。在初期磨合过程中,还可以存贮金属微粒,有效地缩短初期磨合时间、延长缸套使用寿命和降低耗油量。

八、降低工人培训费用

普通切削时,机床有着复杂而且不能根据理论计算出来的动态特性。熟练工人需经较长期探索,才可以掌握在机床上所用的工具切削刃产生持续而有规律地振动的切削条件,这就得花费时间,而且需要踏踏实实地努力学习工程知识。这就是说,培养熟练工人需要较长的培训时间和较高的费用。目前,自动化和省力化不仅在中国,而且在国际社会中已成为一种社会潮流。采用超声加工正好解决这一切削加工上的困难,因为熟练的超声加工操作,即使是一名技术水平低的年轻工人,只要他努力地认真学习,经过一个星期的培训后,也能容易、熟练地掌握。这样,即可降低工人培训费用。现在,超声加工作为能够适应时代要求的、系统的、而且节约资源和能源的新技术,已为人们所重视。

九、大大节省能源,简化机床结构

普通车削中,使用大功率电动机(例如普通车床C620使用的电动机功率为7.5kW)带动工件高速回转,并使车刀挤压工件进行加工。一方面,带动工件回转并推动刀刃振动的能量都是来自远离刀刃的电动机的转动能量,且从电动机→工件回转和从电动机→刀具运动都需要复杂的传动链:主传动链、进给传动链。另一方面,切削力大,切削温度高。因此,必须使用大功率电动机。在对能源越来越重视的情况下,如果能降低切削力,动力就会有富裕,因而就可以加大切削深度和进给量。如果加工精度和表面质量对转速和进给量(一定条件下)不敏感,则在保证生产率的前提下,可以大大简化主传动链和进给传动链,使普通车床CW6140A的21级转速转换成三四级转速(有高速、低速和中速),而且进给

量级数减半。这时简化机构结构大有益处。如果从根本上而不是靠冷却液大幅度降低切削温度,就会大大节约因刀具与切屑接触表面之间的剧烈摩擦、磨蚀所消耗的大量无用能量。超声切削恰有这些特点。

由于超声切削的切削力和切削温度大幅度降低,使用小功率的电动机就足以带动工件进行回转。这时,可以用另外设置的振动源,直接让刀具在切削方向上进行振动,而不是像普通切削那样,因刀具挤压高速回转的工件从而使刀具切削刃产生振动。图 1-1 有助于说明这个问题。

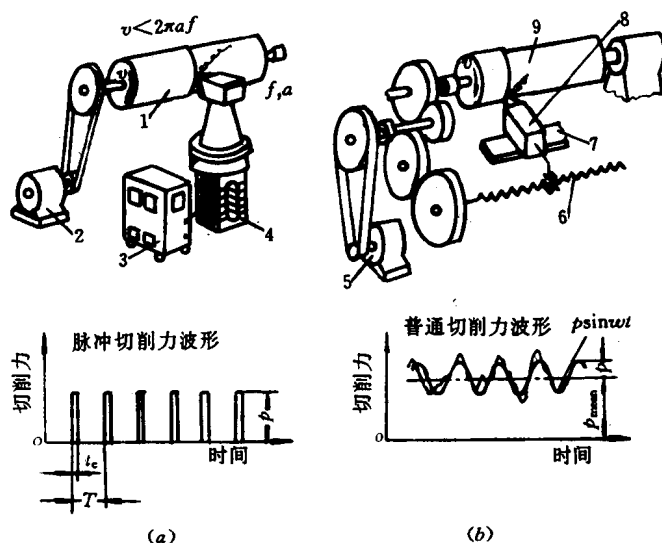


图 1-1 超声车削和普通车削的差别

(a) 超声车削, $P(t) = \frac{t_c}{T} p + \frac{2}{\pi} p \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n \frac{t_c}{T} \pi \cos n \omega t$; (b) 普通车削, $P(t) = P_{\text{mean}} + p \sin \omega t$.

1、9—工件;2—小功率电动机;3—振动源;4—换能器;5—大功率电动机;6—丝杠;7—导轨;8—车刀。

十、解决普通加工难以解决的问题

超声加工的一个非常重要的工艺特点,是可以胜任对于普通加工来说是复杂的、困难的甚至是无法解决的加工难题。例如在普通加工中,壁厚小于 1.5mm 的钢质薄壁镀铬汽缸套的镗孔、磨削和珩磨不仅加工效率很低,而且加工质量难以保证;不易采用磨削加工的变截面细长杆的精密加工;要求精度高、表面粗糙度 R_a 值低而且对不生成毛刺要求特别严格的零件(如模具零件);用金刚石刀具加工淬硬钢;硬脆材料例如工程陶瓷、玻璃、石英、YGA 激光晶体、碳纤维复合材料等的精密加工,尤其是随着陶瓷发动机(绝热、耐高温、不需要水冷、热转换效率高)的诞生和逐步使用,陶瓷的切削加工、磨削加工和光整加工已成了当代机械制造工业的一大难题;高效率研磨无缺陷、低表面粗糙度 R_a 值的陶瓷刀片也是一大难题,它将直接影响陶瓷刀片的使用;铜、铝、钛合金等韧性材料的磨削和珩磨,由于磨具严重堵塞,加工效率极低,表面质量很差。超声加工的理论研究和试验结果表

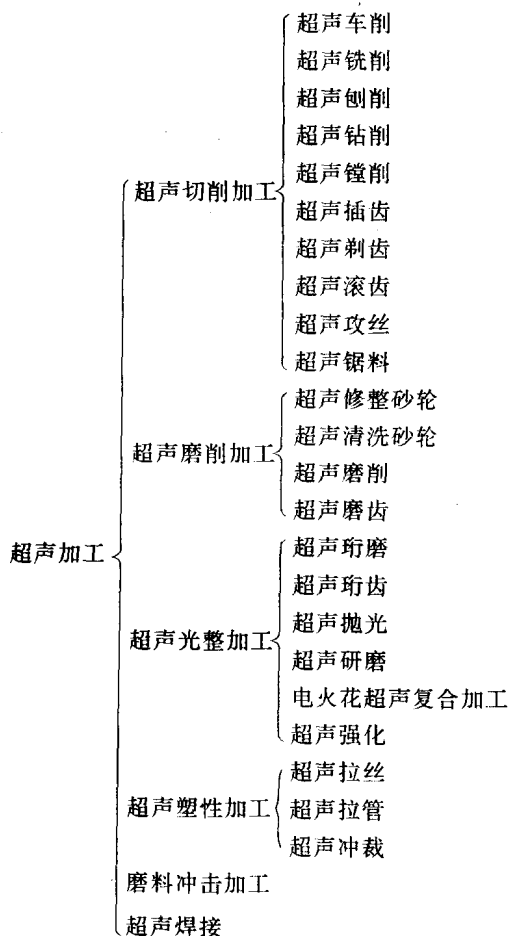
明,超声加工可以有效地解决上述难题。

总之,超声加工有着普通加工无法比拟的工艺效果,尤其是在难加工材料、精密零件的加工和圆度误差 ≈ 0 、圆柱度误差 ≈ 0 、平面度误差 ≈ 0 、平行度误差 ≈ 0 、直线度误差 ≈ 0 等超精密加工中,更是大显身手,因此受到了各国的重视,成为机械加工中的一种新技术,在生产实践中获得了越来越多的应用。

§ 1-3 超声加工的应用范围及前景

由于超声加工的工艺效果十分显著,因而在生产中获得了广泛的应用。超声加工的应用范围列于表 1-3。随着超声加工研究的不断深入,它的应用范围还将继续扩大。

表 1-3 超声加工的应用范围



参考国内外有关文献和技术资料,鉴于超声加工技术中存在的问题,要普及推广超声加工技术,以取得更好的效果,著者认为必须采取下列措施。

1. 开发性能优良生产效率高的超声加工机床

将超声波发生器、换能器、变幅杆、超声振动传递系统、工具、工艺装置直接安装在传统的机床上进行技术改造的方法是经济、简便易行的方法,在某些超声加工方法应用于生

产实践的过程中获得了很好的应用效果,这也是超声加工技术过去发展的主要模式。但是,这种方法有许多问题尚未解决:

(1)有些机床结构不适应超声加工系统的安装,常常发生结构干涉现象。例如,采用可转位硬质合金刀片作为超声车刀,直接安装在变幅杆输出端,虽然方便、易于使用,但是当刀架靠近车床三爪卡盘时,换能器与三爪卡盘发生干涉;将超声珩磨装置安装在某些型号的珩磨机床上,珩磨深孔时,则行程不够,需要加长床身。

(2)总体布局不合理,电气系统配置与操作有时不协调。

(3)传统机床的传动链、运动参数在某些条件下不适合超声加工的要求,需要进行技术改造。

(4)随着微机控制、主动测量技术的迅速发展,研制超声加工机床就更加迫切了。因此,必须将传统机床、超声波发生器、换能器、变幅杆、超声振动传递系统、工具等重新考虑,进行布局,设计、制造出结构合理、易于操作、性能优良、生产效率高且又价廉的超声加工机床。

2. 研制频率稳定、阻抗易于匹配的超声波发生器

超声波发生器正在向系列化、通用化(标准化)和积木化程度高的方向发展。通过超声加工研究的亲身实践,著者认为,超声波发生器的开发必须满足频率稳定、阻抗易于匹配、体积小、造价低、耗能少的要求。要使超声波发生器频率稳定,可采取石英晶体振荡器和频率自动跟踪系统两个措施。石英晶体振荡器的频率稳定性可达 10^{-8} 以上,但频率调节范围只有几十赫芝,难以满足工具磨损和负载对频率变化范围(几百赫芝)的要求,这个问题值得研究。频率自动跟踪系统是新型超声波发生器研制的必要条件。要使阻抗易于匹配,以满足超声波发生器通用化的要求。要使体积小、造价低、耗能少,必须选用先进器件和新线路。

3. 提高高效换能器的可靠性

换能器应具有较高的能量转换效率,目前已广泛使用的压电换能器的能量转换效率可达 88%,这个效率已经比较高了。以往超声设备连续工作时间通常规定为 8h,随着科学技术的发展和实际使用的需要,超声设备连续工作时间考核已提出 16d 以上的要求。要达到这样的要求,除了超声波发生器能够满足可靠性(改进线路,对元器件进行老化筛选试验)以外,必须对高效换能器提出高可靠性的要求。

4. 开发新型工具及其连接技术

研究和发展结构简单、寿命长、价格低的新工具,对发展超声加工技术至关重要。以超声车削为例,传统的超声车刀为一振型、四振型和五振型车刀,存在着易产生裂纹(焊接所致)、制造成本高、声能损耗大、刀杆节点测量麻烦、调整压块时间长等问题,研究和开发使用新型超声车刀已迫在眉睫。

工具与振动传递系统或变幅杆连接的基本要求是:

- (1)结构简单、连接可靠;
- (2)易于更换;
- (3)声能传递效率高,使连接部分在连续工作时不发热或发热较少;
- (4)连接部分不发出尖叫声。

在有些超声加工技术中,工具与振动传递系统或变幅杆的连接已能满足上述要求。例