



现代机械制造技术丛书

超声加工



Ultrasonic Machining

曹凤国 主编



化学工业出版社



现代机械制造技术丛书

超声加工



Ultrasonic Machining

曹凤国 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

超声加工/曹凤国主编. —北京: 化学工业出版社, 2014. 1
(现代机械制造技术丛书)
ISBN 978-7-122-18112-1

I. ①超… II. ①曹… III. ①超声波加工 IV. ①TG663

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 177512 号

责任编辑: 王 烨 张兴辉
责任校对: 王素芹

文字编辑: 谢蓉蓉
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 364 千字 2014 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

《超声加工》编委会

主 任 曹凤国

副主任 黄建宇

编 委 曹凤国 黄建宇 刘 媛
胡绛梅 张利苹

前言

FOREWORD

超声学涉及的领域非常广泛，在航空航天、深海探测、医疗技术、生物工程、机械工程、探伤测量等诸多方面均有超声的身影出现。超声加工技术既是超声学的一个重要分支，又是现代特种加工中不可或缺的重要组成部分。超声加工技术在特定的环境和条件下，发挥出神奇和不可替代的作用，是一门非常诱人的学科。

随着科学技术的高速发展，超声加工技术不断创新提高，应用领域不断拓宽，使用超声加工的新技术、新方法层出不穷，使得不少读者迫切希望了解和学习有关超声加工方面的知识，加深对超声基础理论的理解，提高掌握超声加工技术的能力。为满足这部分读者的需求，我们编写了本书。

本书理论性与实用性并重，第1、2章主要论述了超声的基本理论和工作特点，并简单地描述了超声加工技术发展概况和未来发展趋势。第3章~第5章对超声加工技术中的几个重要组成部分：超声发生器、超声换能器以及超声变幅杆，进行了较系统的阐述，重点介绍了典型电路和一些实用的计算方法。在第6章~第8章中，以独特的视角，从材料的去除、材料的表面改性、材料的生长等方面全面讲述了超声加工技术工作原理、应用范围和加工方法。第9章简单介绍了超声加工与其他加工方法共同作用的超声复合加工方法。

本书由曹凤国主编，黄建宇副主编，刘媛、胡绛梅、张利苹参加了本书的编写。本书在编写过程中参阅了大量相关信息。在此，向为本书编写和修订提供书籍、论文以及其他文献资料的有关院校、科研院所和生产单位，向给予我们支持和帮助的专家、学者和同行们表示由衷的感谢。

由于编者水平所限，书中难免存在错漏之处，敬请广大读者提出宝贵意见。

主编

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 超声加工技术发展概况和未来展望	1
1.1.1 超声加工技术发展概况	1
1.1.2 超声加工技术发展趋势和未来展望	3
1.2 超声加工的特点和用途	6
1.2.1 超声加工的特点	6
1.2.2 超声加工的用途	6
1.3 超声加工常用名词术语和专用符号	7
1.3.1 超声加工常用名词术语	7
1.3.2 超声加工专用符号	8
第 2 章 超声加工的基本原理	10
2.1 超声波的特性	10
2.1.1 超声波的空化效应	10
2.1.2 超声波的传播特性	14
2.1.3 超声波的干涉、衍射和共振特性	17
2.1.4 超声波的吸收特性	21
2.1.5 超声波的多普勒效应	22
2.2 超声加工的基本原理及其设备	22
2.2.1 超声加工的基本原理	22
2.2.2 超声加工设备	24
第 3 章 超声波发生器	28
3.1 模拟电路超声波发生器	28
3.1.1 超声波振荡器	28
3.1.2 超声波放大器	35
3.1.3 匹配电路和频率自动跟踪	41
3.2 数字电路超声波发生器	46
3.2.1 数字电路超声波发生器的基本原理	46
3.2.2 几种典型的数字电路超声波发生器	47
3.3 超声波发生器应用	49

3.3.1	晶体管超声波发生器应用	49
3.3.2	模拟集成电路超声波发生器应用	50
3.3.3	数字化控制超声波发生器应用	52
第4章	超声换能器	54
4.1	磁致伸缩换能器	54
4.1.1	磁致伸缩材料的特性及换能器的工作原理	54
4.1.2	磁致伸缩换能器的材料	57
4.1.3	磁致伸缩换能器的结构形式和特点	58
4.2	压电换能器	63
4.2.1	晶体的压电效应及压电换能器的工作原理	63
4.2.2	压电材料及其性能	64
4.2.3	压电换能器的等效电路	66
4.2.4	压电换能器的结构形式、特点及频率公式	67
第5章	超声变幅杆	76
5.1	概述	76
5.2	纵向振动变幅杆	76
5.2.1	变截面杆纵振动的波动方程	76
5.2.2	单一变幅杆	77
5.2.3	复合变幅杆	84
5.3	有负载的变幅杆	87
5.3.1	负载力抗对变幅杆共振频率的影响	87
5.3.2	简单形状加工工具头对变幅杆共振频率的影响	88
5.4	扭转振动变幅杆	90
5.4.1	变截面杆扭转振动的波动方程	90
5.4.2	指数形扭转振动变幅杆	90
5.4.3	悬链线形扭转振动变幅杆	91
5.4.4	阶梯形扭转振动变幅杆	91
5.5	弯曲振动变幅杆	92
5.6	超声变幅杆的设计	94
5.6.1	变幅杆类型的选择	94
5.6.2	变幅杆材料的选择	96
5.6.3	变幅杆的设计方法	97
第6章	超声材料去除加工	99
6.1	磨料冲击超声加工	99
6.1.1	半导体、玉石、陶瓷等材料的磨料冲击超声	99
6.1.2	金刚石、立方氮化硼、碳化硼等材料的磨料冲击超声加工	101
6.1.3	磨料冲击超声雕刻加工	104
6.2	超声磨削	106
6.2.1	超声磨削装置	106

6.2.2	超声磨削工艺规律	107
6.2.3	超声振动修整砂轮	111
6.2.4	超声清洗砂轮	113
6.2.5	工程陶瓷的超声磨削技术	114
6.3	超声车削	116
6.3.1	超声车削装置	117
6.3.2	超声车削过程的运动特性	120
6.3.3	超声车削对加工精度和表面质量的影响	120
6.3.4	难加工材料的超声车削	128
6.3.5	超声椭圆振动切削	133
6.4	超声钻孔和镗孔	136
6.4.1	超声钻孔	136
6.4.2	超声镗孔	141
6.5	超声锯料	143
6.5.1	超声锯料的基本原理与特点	143
6.5.2	超声锯床的类型	143
6.5.3	纵向振动缺齿式超声锯床	145
6.6	超声旋转加工	145
6.7	超声振动滚齿加工	146
6.7.1	超声振动滚齿加工的实现	147
6.7.2	超声振动滚齿加工实验的工艺效果	147
6.7.3	超声振动滚齿系统的设计要点	148
6.8	超声振动铰孔加工	148
6.8.1	超声振动铰孔与试验条件	148
6.8.2	超声振动铰孔过程的特有现象	149
6.8.3	超声振动铰孔的效果	149
6.8.4	超声振动铰孔的工艺规律	149
6.9	典型的超声加工机床	151
6.9.1	超声加工用刀具	151
6.9.2	控制系统	152
6.9.3	超声加工机床的应用	152
6.9.4	加工实例	153

第7章	超声表面光整加工	154
7.1	超声抛光	154
7.1.1	超声抛光的基本装置和工艺效果	154
7.1.2	超声抛光的分类	155
7.1.3	超声抛光技术在模具行业中的应用	155
7.2	超声珩磨	156
7.2.1	超声珩磨的临界速度	156
7.2.2	超声珩磨的材料去除模型	157
7.2.3	超声珩磨装置	159

7.2.4 超声珩磨装置关键机构的设计	160
7.3 超声砂带抛光	162
7.3.1 超声砂带抛光的基本原理	162
7.3.2 超声砂带抛光的运动方式	163
7.4 超声压光	164
7.4.1 超声压光的基本原理和装置	164
7.4.2 超声压光工艺试验	165
7.4.3 超声压光的应用范围	168

第 8 章 超声焊接加工和其他应用

8.1 超声焊接加工	169
8.1.1 超声金属焊接	169
8.1.2 超声塑料焊接	173
8.2 超声电镀	176
8.3 超声清洗	177
8.3.1 原理与特点	177
8.3.2 影响超声清洗效果的因素	178
8.3.3 超声清洗设备	179
8.4 超声处理	183
8.4.1 超声乳化	183
8.4.2 超声搪锡	184
8.4.3 超声粉碎	185
8.4.4 超声雾化	186
8.4.5 超声凝聚	188
8.4.6 超声除气	189
8.4.7 超声加速过滤	189
8.4.8 超声振动筛	190
8.4.9 超声加速陈化过程	190
8.4.10 超声淬火	191
8.4.11 超声细化晶粒	191
8.4.12 超声疲劳试验	191
8.4.13 声悬浮技术	192
8.5 超声金属塑性加工	193
8.5.1 超声金属塑性加工的基本原理	193
8.5.2 超声拉丝	193
8.5.3 超声拉管	195
8.5.4 超声挤压、铆墩和其他塑性加工	196
8.6 超声采油	196
8.6.1 超声采油机理	196
8.6.2 超声采油工艺流程	201
8.6.3 超声波在采油中的应用范围	203

第 9 章 超声复合加工	205
9.1 超声电火花复合加工	205
9.1.1 超声电火花复合抛光	205
9.1.2 超声电火花线切割复合加工	210
9.1.3 超声电火花复合打孔	214
9.2 超声电解复合加工	216
9.2.1 超声电解复合加工的基本原理和特点	216
9.2.2 超声电解复合抛光	217
9.2.3 超声脉冲电解复合研磨加工	218
参考文献	220

绪 论

1.1 超声加工技术发展概况和未来展望

1.1.1 超声加工技术发展概况

人耳可以听到的声波频率范围为 $16\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ ，人们通常把频率低于 16Hz 的声波称为次声波，频率大于 20kHz 的声波称为超声波，超声波频率的上限是 10^{14}Hz 。人们还把频率在 $0.5 \times 10^9\text{Hz}$ 以上的波称为特超声或微波超声，见表 1-1。人耳听不见的次声和超声，很多动物都能感受到，比如鲸鱼、海豚等可以用超声波来指路，蝙蝠能发出超声，再接收其回声，借以探路和捕食等。可见次声波和超声波也是客观存在的。

表 1-1 声波的频率范围

声波的种类	次声波	可听声波	超声波	微波超声波	光波超声波
频率/Hz	$10^{-5} \sim 10^1$	$10^1 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^8$	$10^8 \sim 10^{12}$	$10^{12} \sim 10^{14}$

由于人耳听不到超声，所以对它的研究比较晚，直到 20 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。除遵循声波传播的基本规律外，超声波还有许多独特的性质和优点。例如，超声波传播的方向性较强；超声波传播过程中，介质质点振动的加速度非常大；在液体介质中，当超声波的强度达到一定值后便产生空化现象等。这些特点使得超声学得到了快速的发展，同时，其应用领域也非常广泛，并具有广阔的应用前景。超声加工技术是超声学的一个分支。

超声加工 (ultrasonic machining, USM) 是利用超声振动的工具，在有磨料的液体介质或干磨料中产生磨料的冲击、抛磨、液压冲击及由此产生的气蚀作用来去除材料，或在工具或工件上沿一定方向施加超声频振动进行加工，或利用超声振动使工件相互结合的加工方法。超声加工具有很强的工艺优势，切削力小、切削热低、工件表面质量高、精度高、切屑易处理、刀具耐用高、加工稳定、生产率高，能很好地解决难加工材料、非金属材料、表面质量要求高的零件加工问题，作为新兴的特种加工技术受到了国内外专家和学者的广泛关注，是机械加工行业的一个重要发展方向之一。

超声加工一词最早出现在文献上大约在 1940 年。早在 1927 年，美国物理学家伍德 (R. W. Wood) 和卢米斯 (A. L. Loomis) 最早做了超声加工试验，利用强烈的超声振动对玻璃板进行雕刻和快速钻孔，但当时并未应用在工业上。直到在文献上第一次出现超声加工

工艺技术描述以后, 超声加工才吸引了大家的注意, 并且逐渐融入到其他工业领域。1951年, 美国的 A. S. 科恩制成第一台实用的超声加工机, 并引起广泛关注, 为超声加工技术的发展奠定了基础。

较早研究超声加工技术的国家是日本, 20 世纪 50 年代初, 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最有权威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, 他在 1956 年提出了系统的振动切削理论, 发表了大量论文, 出版了《精密加工、振动切削基础及应用》专著, 他首先把振动切削理论成功地应用于车、刨、铣、钻、镗、铰、拉、磨削、螺纹加工、齿轮加工、抛光、珩磨、拉伸与挤压等冷热加工领域, 取得了意想不到的效果与显著的经济效益。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。1977 年日本将超声振动切削与磨削用于生产, 可对直径为 $\phi 600\text{mm}$ 大型船用柴油机缸套进行镗孔。

前苏联的超声加工研究也比较早, 20 世纪 50 年代末 60 年代初已经发表过关于超声加工的很有价值的论文, 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。为了推动超声加工的应用, 1973 年前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。到 80 年代末期, 苏联已经生产了系列超声振动钻削装置。

美国于 20 世纪 60 年代初开始对超声加工进行研究。由于当时超声加工技术还不是很成熟, 包括声振系统、换能器、发生器的设计制造和质量都较差, 因此停止了其研究工作。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。1979 年通用超声振动切削系统已供工业界应用, 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, 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。例如, 英国于 1964 年提出使用烧结或电镀金刚石工具的超声旋转加工方法, 克服了一般超声加工深孔时加工速度低和精度差的缺点, 取得了较好的效果。

我国超声加工技术的研究始于 20 世纪 50 年代末, 由于当时超声波发生器、换能器、声振系统的不成熟, 缺乏合理的组织和持续的研究工作, 很快就冷了下来。60 年代末开始了超声振动车削的研究, 1973 年上海超声波电子仪器厂研制成功 CNM-2 型超声研磨机。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, 原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, 广西大学、南京电影机械厂和南京刀具厂联合开发了我国第一套“CZQ-250A 型”超声振动切削系统。同年, 原机械电子工业部第 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, 取得了良好的工艺效果。1987 年, 北京市电加工研究所在国际上首次提出了超声频调制电火花与超声波复合的研磨、抛光加工技术, 并成功应用于聚晶金刚石拉丝模的研磨和抛光。1989 年, 我国研制成功超声珩磨装置。1991 年研制成功变截面细长杆超声车削装置。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。

20 世纪末到本世纪初的十几年间,我国的超声加工技术发展迅速,在超声振动系统、深小孔加工、拉丝模及型腔模具研磨抛光、超声复合加工领域均有较广泛的研究,尤其是在金刚石、陶瓷、玛瑙、玉石、淬火钢、模具钢、花岗岩、大理石、石英、玻璃和烧结永磁体等难加工材料领域解决了许多关键性问题,取得了良好的效果。例如,哈尔滨工业大学谢涛等采用有限元法对传统拉丝和超声拉丝过程进行仿真研究,并研制了一套拉丝实验系统,通过研究超声振动对金属丝拉拔过程的影响,发现超声拉丝明显降低了拉拔力,改善了表面质量,金属丝不均匀变形减小,为更好地掌握超声波在拉丝加工中的作用机理及拉丝加工的塑性成形规律提供了科学依据。吕正兵、徐家文对工程陶瓷超声加工进行了基础的实验研究,得出了工程陶瓷超声加工的一些规律,为今后工程陶瓷的应用提供了更为广阔的前景。王超群等利用改装后的数控超声加工装置对 Al_2O_3 进行了工艺试验,其数控超声加工是对传统超声加工的技术创新,具有传统超声加工所无法比拟的特点,初步掌握了对 Al_2O_3 的加工工艺规律。郑建新等通过数学物理模型分析超声加工声学系统的动力学规律,探讨工具杆的局部共振现象,得出当工具杆发生局部共振时,变幅杆和工具杆连接处为位移节点,且此时系统处于谐振状态的结论,并推导了超声波发生器的可调频率范围与刀具杆的磨损率关系。

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,超声加工技术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。

1.1.2 超声加工技术发展趋势和未来展望

超声加工技术已经涉及许多领域,在各行各业发挥了突出的作用,但有关工艺与设备的相关技术有待于进一步研究开发。

(1) 超声振动切削技术

随着传统加工技术和高新技术的发展,超声振动切削技术的应用日益广泛,振动切削研究日趋深入,主要表现在以下几个方面。

① 研制和采用新的刀具材料。在现代产品中,难加工材料所占的比例越来越大,对机械零件加工质量的要求越来越高。为了更好地发挥刀具的效能,除了选用合适的刀具几何参数外,在振动切削中,人们将更多的注意力转为对刀具材料的开发与使用,其中天然金刚石、人造金刚石、陶瓷、立方氮化硼和超细晶粒硬质合金材料的研究和应用为主要方向。

② 对振动切削机理深入研究。目前,虽然对超声振动切削机理的研究内容相对较多,且取得了一定的成果,但由于受到理论分析和检测手段等诸多原因的限制,对其机理的研究大都是根据各自的试验表象以及所得到的工艺效果分析而得,尚缺乏统一的、科学的定量描述和认识,对其机理的研究也成为这一技术能否在实际生产中进行大规模推广利用的前提。

当前和今后一个时期对振动切削机理的研究将主要集中在以下几个方面。第一,研究超声振动状态下工件上多余金属是如何与工件相分离并形成切屑的,位错理论是超声振动切削过程中切屑形成的较好解释。第二,对超声振动切削过程进行动力学分析,得出超声振动切削过程中的位移、速度、加速度,以及刀具与工件的相互力学作用。第三,对超声振动切削工艺过程进行数学描述并建立数学模型。对超声振动切削过程的数学描述和数学模型建立是我国超声振动技术研究的重要内容,通过数学模型的建立,能够为超声振动切削的深入研究和超声振动技术的实际应用提供良好的理论基础。第四,对超声振动切削机理的研究向着微观方向突破。随着电子仿真和众多力学、电磁学等工程分析软件的运用,对超声振动切削微观机理的研究进入新的阶段,诸如利用有限元分析软件 ANSYS 等分析振动切削过程中的应

力、应变,在微观层面分析切削机理。

③ 设计和发展新型超声振动系统与实用高效的设备装置。通过改变某个单独的零部件,配之以相应的控制系统,而不需要改变机床或装置的整体结构,设计一个或数个机床附件,实现超声加工;采用大功率的振动切削系统不断地提高加工效率、减少能耗;针对不同领域加工的需要,开辟新型超声加工系统,如对变幅杆进行不同于以往结构形式的设计、设计超声拉丝换能器等,这些都是未来超声振动系统及其相应设备装置设计研究的重要考虑方向。

④ 超声椭圆振动切削的研究与推广。超声椭圆振动切削已受到国际学术界和企业界的重视。美国、英国、德国和新加坡等国的大学以及国内的北京航空航天大学 and 上海交通大学已开始这方面的研究工作。日本企业界如日立、多贺和 Towa 公司等已开始这方面的实用化研究工作。目前,我国设计出高频超声椭圆振动精密切削,其相对目前一般的椭圆振动和普通低频超声振动具有减低切削力、提高加工精度的效果,并且可采用更高切削速度,从而可以提高工作效率。超声椭圆振动切削在理论和应用方面还有许多工作要做。尤其是对硬脆性材料的超精密切削加工、微细部件和微细模具的超精密切削加工等方面还需要进一步研究。

⑤ 超声铣削加工技术。超声铣削加工是比较新的加工方法,关于加工参数优化方面的资料较少,需要加强研究,以便为超声铣削提供参考。大连理工大学提出了基于分层制造原理的超声波铣削加工技术,该技术采用简单形状工具,依靠机床的成形运动逐层加工复杂的三维型面,使复杂的工具形状补偿问题转化为简单工具轴向补偿问题,极大地简化了工艺过程和数控工具补偿的难度,使加工带有尖角和锐边的复杂型面三维工程陶瓷零件成为可能,为工程陶瓷和其他超硬材料的广泛应用提供了有力的技术支持,未来需加大对该技术的优化研究和实际生产应用推广。

(2) 超声复合加工技术

近年来,超声电火花磨料三元复合加工、超声脉冲电解加工、超声脉冲电解复合研磨加工等各种超声复合加工技术都得到了较快的发展,且具有较好的应用前景。其今后的主要发展方向表现在以下几个方面。

① 与多种加工方式结合。随着新材料特别是难加工材料的不断涌现,即使采用一般的超声加工也难以获得理想的加工效果,而采用超声复合加工技术则可以获得更理想的效果,将超声加工与其他一种或数种加工方式结合起来进行生产加工,可以综合超声加工和其他加工的优点,获得良好的加工效果,如将超声振动研磨与脉冲电解加工相结合,可以获得比一般脉冲电解加工更快的速度,比一般超声振动研磨加工更高的精度,超声复合加工具有独特的威力,将成为未来发展的重要趋势。

② 向绿色制造方向发展,实现无污染加工。绿色制造已成为 21 世纪制造业的重要发展方向。目前大多数的超声加工中由于采用切削液体而给环境造成了污染,人们已经开始探索对环境污染少甚至没有污染的加工方式,如在不切削液条件下进行超声振动干式切削,在超声振动电火花加工中用气体作为介质进行加工,避免了一般超声加工过程中使用工作液而产生有害气体造成的环境污染问题。未来研究新的绿色制造方法和新型工作介质是实现少污染、无污染的关键。

③ 加工机理及加工工艺的深入研究、加工工艺的实用化。近年来,人们开发了多种复合加工技术,如哈尔滨工业大学利用超声电火花磨料三元复合加工技术对不锈钢进行加工;山东大学的研究人员将超声振动引入入气中放电加工技术;哈尔滨工业大学研究了超声辅助分层去除微细电火花加工技术;近年来,有学者提出了一种新的复合加工技术,即超声-脉冲电解复合研磨加工等,与普通加工方法相比,这些加工方法在加工效率、加工精度方面都具有一定的优

势,而且得到了实验验证,但这些加工方法都属于近年来出现的新加工方法,其加工机理及加工工艺都有待于进一步的研究。同时,其加工工艺的实用化也有待于进一步提高。因此,今后的主要研究方向主要是加工机理及工艺的进一步研究以及加工工艺的实用化。

由于新材料(尤其是难加工材料)的涌现和对产品质量与生产效益的要求不断提高,新的加工方法也不断出现。可以预见,超声复合加工将日益显现出其独特的魅力,并将拓展其更加广阔的应用领域。

(3) 旋转超声加工

国内先进超声加工机床的研制十分落后,至今还找不到市场化的旋转超声加工机床。在旋转超声加工中,如何实现工具与超声振动系统之间的有效连接,平稳传递超声能量;如何实现超声加工机床的高旋转和超声能量的有效传递与耦合;材料去除机理模型只适用于研究者所用的工件材料,需通过一定方式,综合考虑多种作用机理建立新的适合硬脆材料旋转加工的材料去除机理模型;将加工过程中的力与扭矩大小和加工过程中的能量分配联系起来等都是未来旋转超声加工的重要研究所在。

(4) 超精密加工技术

随着对产品精度要求的提高,将超声加工技术应用于精密加工车床是超精密加工技术的发展趋势,超精密加工技术分为超精密切削、超精密磨削和超精密研磨抛光三类。20世纪50~80年代,美国率先发展了以单点金刚石超声切削(single point diamond turning, SP-DT)为代表的超精密加工技术,用于航空航天、国防、天文等领域激光核聚变反射镜、球面、非球面大型零件的加工。徐可伟等利用1~2mm的薄壁零件,引入超声振动切削新工艺,对传统的谐振系统设计方法进行改进,证明了超声振动切削确实明显提高了薄壁零件的加工精度。周忆等利用新原理的超精密研磨方法,提出基于超声研磨的超精密加工方法,证实了超声研磨在各种研磨方法中有较大的综合优势,是一种很有发展前途和应用前景的超精密加工新方法。赵雪松、高洪在精密模具超声电解复合抛光试验研究中,论述了超声电解复合抛光工作原理及工艺规律,并通过对几种模具钢材料进行抛光试验,表明超声复合抛光是一种有效的镜面加工方法。

随着超声加工技术的应用与发展,超精密加工技术朝着以下方向发展:高精度、高效率;实现以磨代研、以磨代抛等,使得一台设备能完成多种加工(如车削、钻削、铣削、磨削、光整);实现加工大型光电子器件及微型电子机械、光电信息器件等领域所需要的超精密加工设备;减少加工中能量消耗及废液的排放。

(5) 微细超声加工技术

随着以微机械为代表的工业制品的日益小型化及微细化,特别是随着晶体硅、光学玻璃、工程陶瓷等硬脆材料在微机械中的广泛应用,硬脆材料的高精度三维微细加工技术已成为世界各国制造业的一个重要研究课题。目前可适用于硬脆材料加工的手段主要有光刻加工、电火花加工、激光加工、超声加工等特种加工技术。超声加工与电火花加工、电解加工、激光加工等技术相比,既不依赖于材料的导电性又没有热物理作用,与光刻加工相比又可加工高深宽比三维形状,这决定了超声加工技术在陶瓷、半导体硅等非金属硬脆材料加工方面有着得天独厚的优势。随着东京大学生产技术研究所对微细工具的成功制作及微细工具装夹、工具回转精度等问题的合理解决,采用工件加振的工作方式在工程陶瓷材料上加工出了直径最小为 $\phi 5\mu\text{m}$ 的微孔,从而使超声加工作为微细加工技术成为可能。

(6) 向新领域拓展

超声加工在制造业领域已经取得了显著的成果,在军事、航空航天、汽车工业等都有广

泛应用，随着超声加工技术的不断进步，该技术向新领域迅猛发展，在生物学领域、日常生活等方面拓展，有学者将超声振动引入微切割领域，开发了一套基于超声振动的显微切割系统，研制了面向生物显微切割技术的执行模块与控制模块，实现了系统的集成，并利用该系统对新生小鼠大脑组织进行超声振动显微切割实验，证明了该技术的可行性和有效性。

同其他特种加工技术一样，超声加工技术在不断完善之中，正向着高精度、微细化发展，微细超声加工技术有望成为微电子机械系统（MEMS）技术的有力补充。

综上所述，超声加工技术的发展及其取得的应用成果是可喜的。一方面，材料加工的客观需要推动和促进了超声加工技术的发展；另一方面，超声加工技术的发展又为材料的加工提供了一种强有力的加工手段，而促进了材料加工的发展。材料加工中的许多课题需要研究者们去探讨。展望未来，超声加工技术的发展前景是美好的。

1.2 超声加工的特点和用途

1.2.1 超声加工的特点

① 加工范围广。不受材料是否导电的限制，适合加工各种硬脆材料，既可加工玻璃、陶瓷（氧化铝、氮化硅等）、宝石、石英、锗、硅、石墨、金刚石、大理石等不导电的非金属材料，又可加工淬火钢、硬质合金、不锈钢、铁合金等硬质或耐热导电的金属材料。

② 工件加工精度高，表面粗糙度低。由于去除工件材料主要依靠磨粒瞬时局部的冲击作用，故工件表面的宏观切削力很小，切削应力、切削热更小，不会产生变形及烧伤，表面粗糙度也较低，可达 $Ra0.63\sim0.08\mu\text{m}$ ，加工精度可达 $0.01\sim0.02\text{mm}$ ，而且可以加工薄壁、窄缝、低刚度零件。

③ 易于加工各种复杂形状 of 型孔、型腔和成形表面。工具可用较软的材料做成较复杂的形状，不需要工具和工件做比较复杂的相对运动，即可加工各种复杂的型腔和型面。

④ 超声加工机床的结构比较简单，只需一个方向轻压进给，操作、维修比较方便。

⑤ 可以与其他多种加工方法结合应用，如超声电火花加工和超声电解加工等。

⑥ 超声加工的面积不够大，而且工具头磨损较大，故生产率较低。

1.2.2 超声加工的用途

超声加工与其他加工方法相结合，逐渐形成了多种多样的超声加工方法和方式，在生产中获得了广泛的应用。超声加工的应用范围列于表 1-2。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 1-2 超声加工的应用范围

超声材料去除加工	超声切削加工	超声车削, 超声钻削, 超声镗削, 超声插齿, 超声剃齿, 超声滚齿, 超声攻螺纹, 超声锯料, 超声铣削, 超声刨削, 超声振动铰孔
	超声磨削加工	超声修整砂轮, 超声清洗砂轮, 超声磨削, 超声磨齿
	磨料冲击加工	超声打孔, 超声切割, 超声套料, 超声雕刻
超声表面光整加工	超声抛光, 超声珩磨, 超声砂带抛光, 超声压光, 超声珩齿	
超声焊接和其他应用	超声焊接, 超声电镀, 超声清洗, 超声处理	
	超声塑性加工	超声拉丝, 超声拉管, 超声冲裁, 超声轧制, 超声弯管, 超声挤压, 超声铆墩
超声复合加工	超声电火花复合加工, 超声电解复合加工	

1.3 超声加工常用名词术语和专用符号

1.3.1 超声加工常用名词术语

① 超声 (ultrasound) 声音是与人类生活紧密相连的一种自然现象。当声的频率高到超过人耳听觉的频率极限 (一般取 20kHz) 时, 人们就觉察不出声的存在, 因而称这种高频率的声为“超”声。

② 纵波 (longitudinal wave) 声波在介质中传播时, 介质质点振动方向与波传播方向相平行的波称为纵波。在纵波通过的区域内, 介质各点发生周期性的稀疏和稠密, 因此, 纵波是胀缩波。

③ 横波 (transverse wave) 声波在介质中传播时, 介质质点振动方向与波的传播方向相垂直的波称为横波。横波只能在具有切变弹件的介质中传播, 因此它仅存在于高黏滞液体和固体中。在横波通过的区域, 介质垂直于传播方向发生剪切形变, 所以横波又称为切变波。由于横波只是使介质发生形变, 而没有体积的变化, 因此横波是畸变波。

④ 表面波 (surface acoustic wave) 当声波在介质中传播时, 能量集中在介质自由表面层或两种介质分界面附近的声波称为表面波。这种波的类型很多, 例如在固体自由表面的瑞利波、声电波, 在两种固体分界面附近的斯通莱波, 以及在液体的自由表面产生的表面波。

⑤ 板波 (plate wave) 当声波在板状介质中传播时, 其波型称为板波。板波的类型有多种, 其中主要的一种是兰姆 (Lamb) 波。

⑥ 连续波 (continuous wave) 时间上持续存在的超声波。如波的振幅不随时间而变则为等幅型连续波, 如波的振幅随时间做某种规律变化则为调制型连续波。

⑦ 脉冲波 (impulsive wave) 时间上短促存在的超声波, 可以是周期性出现的重复性脉冲波。但存在声波的持续时间远小于无声波的静止时间。脉冲波可以是正弦波的短波列或冲击脉冲。

⑧ 反射 (acoustic reflection) 声波入射到两种声学特性阻抗不同的媒质之间的分界面上引起返回的过程。射向分界面的入射角等于其反射角。

⑨ 折射 (acoustic refraction) 因媒质中声速的空间变化而引起的声传播方向改变的过程。

⑩ 干涉 (acoustic interference) 频率相同或相近的声波在同一声场区域内传播时相叠加所出现的声场现象, 这时合成声场参量的幅值空间分布和时间分布不同于原有声场的量。

⑪ 衍射 (acoustic diffraction) 声波遇到障碍物或其他媒质时, 因阻抗不连续性而使声波的波阵面引起畸变的现象称为衍射。

⑫ 吸收 (acoustic absorption) 声波在媒质内传播过程中, 部分声能转换为热能或其他分子能量的现象。

⑬ 空化 (acoustic cavitation) 向液体中辐射声波时, 在一定压强下, 液体中出现微小气泡, 这些微小气泡将随着声压的振动做振荡, 或者伴随生长、收缩以至崩溃。这种现象称为空化, 这种微小气泡称为空化泡。

⑭ 超声发生器 (ultrasonic generator) 由超声频电发生器和换能器等组成的一种产生超声的设备。但习惯上有时仅把超声频电发生器称为超声发生器。

⑮ 超声换能器 (ultrasonic transducer) 超声换能器是一种将其他形式的能转变为所需频率的超声能或是把超声能转变为同频率的其他形式的能的器件。