

现代加工技术丛书

超声加工技术

曹凤国 主编



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

现代加工技术丛书

超声加工技术

曹凤国 主编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

超声加工技术/曹凤国主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 8
(现代加工技术丛书)
ISBN 7-5025-6102-1

I. 超… II. 曹… III. 超声波加工 IV. TG663

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 090180 号

现代加工技术丛书
超 声 加 工 技 术
曹凤国 主编

责任编辑: 段志兵
责任校对: 李 林 靳 荣
封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印刷
三河市宇新装订厂装订
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13½ 字数 326 千字
2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-6102-1/TB·79
定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

现代加工技术通常是指特种加工技术,即将电、磁、声、光、化学等能量或其组合施加在工件的被加工部位上,从而实现材料被去除、变形、改性或表面处理等的非传统加工方法。

由于各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现,对机械制造业提出了一系列迫切需要解决的新问题。例如,各种难切削材料的加工;各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工;薄壁、弹性元件等刚度、特殊零件的加工等。对此,采用传统加工方法十分困难,甚至无法加工,于是产生了特种加工技术。近年来,国家非常重视制造新技术的研发,加大了投入,特种加工技术获得了很大的发展,许多特种加工设备已经投入生产应用。当前,特种加工技术正在向工程化和产业化方向发展,大功率、高可靠性、多功能、智能化的加工设备的研发是重点。

从当前的制造业的发展趋势来看,现代加工技术将具有巨大的发展潜力和应用空间。在这样一个形势下,化学工业出版社组织出版了《现代加工技术丛书》。丛书共7种,包括《超声加工技术》、《激光加工技术》、《电火花加工技术》、《电化学加工技术》、《快速成形技术》、《微细加工技术》、《复合加工技术》。本书为《超声加工技术》。

超声加工技术是20世纪50年代以来逐步发展的一种特种加工方法。在难加工材料和精密加工中,超声加工技术具有其他加工方法无法比拟的优异的工艺效果,应用范围非常广泛。

为了及时总结近年来超声加工技术的最新研究和应用成果,促进其更快速的发展,我们特编写《超声加工技术》一书,该书系统阐述了超声加工技术的基本理论和方法。本书在编写时,主要考虑了新颖性、启发性和应用性,力求做到详略得当。本书可作为高等工科院校机械工程专业的教材使用,也可供从事超声加工技术的科研、生产人员及高、中级技术人员参考。

全书共设9章,主要内容有超声加工的基本原理和特点、超声波发生器、超声换能器、超声材料去除加工、超声表面光整加工、超声焊接加工、超声复合加工等内容。

本书由北京市电加工研究所组织科技人员编写,曹凤国任主编,负责全书的构思、组稿和编审,张勤俭任副主编。参加编写的有张勤俭(第1章,第2章,第6章第2、3、4、7、8节,第7章第2、3、4节)、黄建宇(第5章和第6章第1节)、徐国军(第6章第5、6节,第7章第1节,第8章,第9章第2节)和刘伟志(第3章,第4章,第9章第1节)。在成稿过程中,胡绛梅做了大量组织工作。

本书编写时参阅了有关院校、科研院所和生产单位的书籍和其他文献资料,得到了专家同行的支持和帮助,在此一并表示感谢。

编 者

2004年6月

目 录

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	4
1.2.1 超声加工的特点	4
1.2.2 超声加工的用途	5
1.3 超声加工常用名词术语和专用符号	5
1.3.1 超声加工常用名词术语	5
1.3.2 超声加工专用符号	7
第 2 章 超声加工的基本原理	9
2.1 超声波的特性	9
2.1.1 超声波的空化效应	9
2.1.2 超声波的传播特性	12
2.1.3 超声波的干涉、衍射和共振特性	16
2.1.4 超声波的吸收特性	19
2.1.5 超声波的多普勒效应	20
2.2 超声加工的基本原理及其设备	21
2.2.1 超声加工的基本原理	21
2.2.2 超声加工设备	22
第 3 章 超声波发生器	27
3.1 模拟电路超声波发生器	27
3.1.1 超声波振荡器	27
3.1.2 超声波放大器	31
3.1.3 匹配电路和频率自动跟踪	37
3.2 数字电路超声波发生器	42
3.2.1 数字电路超声波发生器的基本原理	42
3.2.2 几种典型的数字电路超声波发生器	43
3.3 超声波发生器应用	45
3.3.1 晶体管超声波发生器应用	45
3.3.2 模拟集成电路超声波发生器应用	46
3.3.3 数字化控制超声波发生器应用	48

第4章 超声换能器	50
4.1 磁致伸缩换能器	50
4.1.1 磁致伸缩材料的特性及换能器的工作原理	50
4.1.2 磁致伸缩换能器的材料	53
4.1.3 磁致伸缩换能器的结构形式和特点	53
4.2 压电换能器	61
4.2.1 晶体的压电效应及压电换能器的工作原理	61
4.2.2 压电材料及其性能	62
4.2.3 压电换能器的等效电路	64
4.2.4 压电换能器的结构形式、特点及频率公式	65
第5章 超声变幅杆	73
5.1 概述	73
5.2 纵向振动变幅杆	73
5.2.1 变截面杆纵振动的波动方程	73
5.2.2 单一变幅杆	74
5.2.3 复合变幅杆	81
5.3 有负载的变幅杆	84
5.3.1 负载力对抗变幅杆共振频率的影响	84
5.3.2 简单形状加工工具头对变幅杆共振频率的影响	85
5.4 扭转振动变幅杆	87
5.4.1 变截面杆扭转振动的波动方程	87
5.4.2 指数形扭转振动变幅杆	87
5.4.3 悬链线形扭转振动变幅杆	88
5.4.4 阶梯形扭转振动变幅杆	88
5.5 弯曲振动变幅杆	89
5.6 超声变幅杆的设计	91
5.6.1 变幅杆类型的选择	91
5.6.2 变幅杆材料的选择	93
5.6.3 变幅杆的设计方法	93
第6章 超声材料去除加工	96
6.1 磨料冲击超声加工	96
6.1.1 半导体、玉石、陶瓷等材料的磨料冲击超声	96
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	98
6.1.3 磨料冲击超声雕刻加工	102
6.2 超声磨削	103
6.2.1 超声磨削装置	104
6.2.2 超声磨削工艺规律	105
6.2.3 超声振动修整砂轮	108
6.2.4 超声清洗砂轮	110
6.2.5 工程陶瓷的超声磨削技术	111

6.3 超声车削	114
6.3.1 超声车削装置	114
6.3.2 超声车削过程的运动特性	117
6.3.3 超声车削对加工精度和表面质量的影响	118
6.3.4 难加工材料的超声车削	125
6.3.5 超声椭圆振动切削	131
6.4 超声钻孔和镗孔	134
6.4.1 超声钻孔	134
6.4.2 超声镗孔	139
6.5 超声锯料	140
6.5.1 超声锯料的基本原理与特点	140
6.5.2 超声锯床的类型	141
6.5.3 纵向振动缺齿式超声锯床	141
6.6 超声旋转加工	142
6.7 超声振动滚齿加工	144
6.7.1 超声振动滚齿加工的实现	144
6.7.2 超声振动滚齿加工实验的工艺效果	144
6.7.3 超声振动滚齿系统的设计要点	145
6.8 超声振动铰孔加工	145
6.8.1 超声振动铰孔与试验条件	145
6.8.2 超声振动铰孔过程的特有现象	146
6.8.3 超声振动铰孔的效果	146
6.8.4 超声振动铰孔的工艺规律	146
第7章 超声表面光整加工	149
7.1 超声抛光	149
7.1.1 超声抛光的基本装置和工艺效果	149
7.1.2 超声抛光的分类	150
7.1.3 超声抛光技术在模具行业的应用	150
7.2 超声珩磨	151
7.2.1 超声珩磨的临界速度	151
7.2.2 超声珩磨的材料去除模型	152
7.2.3 超声珩磨装置	154
7.2.4 超声珩磨装置关键机构的设计	154
7.3 超声砂带抛光	157
7.3.1 超声砂带抛光的基本原理	157
7.3.2 超声砂带抛光的运动方式	158
7.4 超声压光	159
7.4.1 超声压光的基本原理和装置	159
7.4.2 超声压光工艺试验	160
7.4.3 超声压光的应用范围	163

第 8 章 超声焊接加工和其他应用	164
8.1 超声焊接加工	164
8.1.1 超声金属焊接	164
8.1.2 超声塑料焊接	168
8.2 超声电镀	171
8.3 超声清洗	172
8.3.1 原理与特点	172
8.3.2 影响超声清洗效率的因素	173
8.3.3 超声清洗设备	174
8.4 超声处理	176
8.4.1 超声乳化	177
8.4.2 超声搪锡	177
8.4.3 超声粉碎	178
8.4.4 超声雾化	179
8.4.5 超声凝聚	180
8.4.6 超声除气	181
8.4.7 超声加速过滤	182
8.4.8 超声振动筛	182
8.4.9 超声加速陈化过程	183
8.4.10 超声淬火	183
8.4.11 超声细化晶粒	183
8.4.12 超声疲劳试验	183
8.4.13 声悬浮技术	184
8.5 超声金属塑性加工	185
8.5.1 超声金属塑性加工的基本原理	185
8.5.2 超声拉丝	186
8.5.3 超声拉管	187
8.5.4 超声挤压、铆接和其他塑性加工	188
第 9 章 超声复合加工	190
9.1 超声电火花复合加工	190
9.1.1 超声电火花复合抛光	190
9.1.2 超声电火花线切割复合加工	195
9.1.3 超声电火花复合打孔	199
9.2 超声电解复合加工	201
9.2.1 超声电解复合加工的基本原理和特点	201
9.2.2 超声电解复合抛光	202
参考文献	204

第 1 章 绪 论

1.1 超声加工技术发展概况和未来展望

超声波是指频率高于人耳听觉上限的声波。一般来说,正常人听觉的频率上限在 16~20kHz 之间,随年龄、健康状况等有所不同。值得注意的是,人们习惯上常把以工程应用为目的,而不是以听觉为目的的某些可听声的应用亦列入超声技术的研究范围。因此,在实际应用中,有些超声技术使用的频率可能在 16kHz 以下。而超声波频率的上限是 10^{14} Hz,整个频率范围是相当宽广的,如图 1-1 所示。

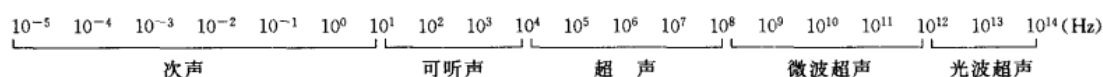


图 1-1 声学的频率范围

超声波是声波的一部分,因此它遵循声波传播的基本规律。但超声波也有与可听声不同的一些突出特点。例如,超声波由于频率可以很高,因而传播的方向性较强,同时超声设备的几何尺寸可以较小;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,等等。正是这些特点,决定了超声波具有与可听声不同的、领域相当广阔的各种用途。

1.1.1 超声加工技术发展概况

超声加工是利用超声振动的工具在有磨料的液体介质中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,或给工具或工件沿一定方向施加超声频振动进行振动加工,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。超声波发生器的作用是将 220V 或 380V 的交流电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放大;超声波的机械振动经变幅杆放大后传给工具,使工具以一定的能量与工件作用,进行加工。

超声加工技术是超声学的一个重要分支。超声加工技术是伴随着超声学的发展而逐渐发展的。

早在 1830 年,为探讨人耳究竟能听到多高的频率,F. Savrt 曾用一多齿的齿轮,第一次人工产生了 2.4×10^4 Hz 的超声波,1876 年加尔顿 (F. Galton) 的气哨实验产生的超声波的频率达到了 3×10^4 Hz,后改用氢气时,其频率达到了 8×10^4 Hz。这些实验使人们开始对超声波的性质有了一定的认识。

对超声学的诞生起重大推进作用的是 1912 年豪华客轮泰坦尼克 (Titanic) 号在首航中

碰撞冰山后沉没，这个当时震惊世界的悲剧促使科学家提出用声学方法来探测冰山。这些活动启发了第一次世界大战期间侦察德国潜艇的紧张研究。1916 年以法国著名物理学家郎之万 (P. Langevin) 为首的科学家开始研究产生和运用水下超声作为侦察手段，并在 1918 年发现压电效应可使石英板振动，制成了可用作超声源的石英压电振荡器。这就是现代超声学的开端。

1927 年，美国物理学家伍德 (R. W. Wood) 和卢米斯 (A. E. 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。1951 年，美国的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。

日本是较早研究超声加工技术的国家，20 世纪 50 年代，日本已经设立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。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。

原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。到 80 年代末期，当时苏联已经生产系列超声振动钻削装置。

20 世纪 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应工业界应用。

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的方法，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，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，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，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。

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。

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到许多领域,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上,其中天然金刚石、人造金刚石和超细晶粒的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。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对振动切削中刀具与工件相互作用的力学分析和振动切削机理的微观研究及数学描述两个方面。

③ 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。但是,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、微细部品和微细模具的超精密切削加工等方面还需要进一步研究。

④ 超声铣削加工技术。基于分层去除技术思想的超声铣削加工技术正在被更多的学者所关注。大连理工大学研制了超声数控铣削机床,提出了一种新的利用超声铣削加工技术数控加工工程陶瓷零件的途径。基于分层去除思想的超声铣削数控加工技术解决了传统超声加工中工具损耗严重且不能在线补偿的难题,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。

(2) 超声复合加工技术

目前,超声电火花机械三元复合加工技术已经得到较快的发展。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,解决了电火花小孔加工中生产率和表面质量不能兼顾的矛盾,具有较好的应用前景。

针对现代模具手动光整加工的弊端,华南理工大学采用超声电解磨粒复合加工技术对形状复杂的模具型腔光整加工进行了研究,并利用 BP 神经网络对加工表面粗糙度进行了预测,取得了良好的效果。超声电解磨粒复合加工技术是一项新的复合加工技术,能较好地用于形状复杂的模具型腔光整加工。但包括材料去除机理的许多方面的内容有待进一步研究。

近年来,日本东京农工大学对气体介质中的电火花脉冲放电加工技术进行了开创性的研究,为电火花脉冲放电加工技术开辟了一条新的途径。但该技术在加工过程中短路频繁,山东大学的研究人员将超声振动引入气中放电加工技术,并对工程陶瓷进行了加工实验研究,加工效率提高了近 3 倍。但该工艺的加工机理有待于进一步研究。

在微小三维型面的加工中,利用简单形状电极、基于分层制造原理的微细电火花铣削技术正在受到重视,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,对电极轴向施加的小幅超声振动对活化极间状态、拉大极间间隙、增加排屑能力、提高有效脉冲利用率和放电稳定性等方面起到了重要的作用,但是该工艺尚有待于进一步完善以达到实用化。

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) 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。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。

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。

此外,超声加工技术在迅猛发展的汽车工业中已有非常广泛的应用,目前超声加工技术主要用于精密模具的型孔、型腔加工,难加工材料的超声电火花和超声电解复合加工,塑料件的焊接,以及对具有小孔窄缝而清洁度要求较高的零件的清洗。可以预测,超声加工技术在世界汽车工业中将发挥越来越重要的作用。

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我们共同去探讨。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 适合加工各种硬脆材料,不受材料是否导电的限制。既可加工玻璃、陶瓷、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 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 $R_a 0.63 \sim 0.08\mu\text{m}$,尺寸精度可达 0.03mm ,也适于加工薄壁、窄缝、低刚度零件。

③ 工具可用较软的材料做成较复杂的形状,且不需要工具和工件作比较复杂的相对运动,便可加工各种复杂的型腔和型面。一般地,超声加工机床的结构比较简单,操作、维修

也比较方便。

④ 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。

⑤ 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。

⑥ 利用超声焊接技术可以实现同种或异种材料的焊接，不需要焊剂和外加热，不因受热而变形，没有残余应力，对焊件表面的焊接处理要求不高。

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 1-1。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 1-1 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, 超声攻丝, 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) 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顿时波, 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, 如波的振幅随时间作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, 声波的波阵面引起畸变的现象。

(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作振荡, 或者伴随生长、收缩以至崩溃。这种现象叫空化。这种微小气泡叫空化泡。

(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) 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。

(16) 磁致伸缩效应 (Magnetostrictive effect) 铁磁材料在外磁场作用下产生弹性应变的现象, 应变与磁场的极性无关。磁致伸缩这一术语也包括其逆现象, 即机械应力使铁磁材料内产生磁感应变化的现象。

(17) 磁致伸缩换能器 (Magnetostrictive transducer) 超声换能器的一种。它是利用磁致伸缩材料在交变磁场作用下产生交变应变的特性做成的换能器。常用的磁致伸缩材料有镍、铁钴钕合金、铝铁合金及铁氧体等。

(18) 叠片式换能器 (Laminated transducer) 叠片式换能器是用具有磁致伸缩特性的片状材料经成形、氧化、退火等工艺后叠合而成的换能器。由于采用了多片叠合而片间又是绝缘的, 这种类型的换能器涡流损失小。为了增加辐射面积, 同时减少横向振动和更好地散热, 经常采用双窗甚至多窗的形式。

(19) 压电效应 (Piezoelectric effect) 某些非对称单晶材料所具有的一种特性: 当使其在适当方向产生应变时, 能产生与应变成正比的电极化; 反之, 当受外电场作用时, 能产生机械应变, 应变与电场强度成正比, 此时称为逆压电效应。

(20) 压电换能器 (Piezoelectric transducer) 超声换能器的一种。它是利用压电材料在交变电场作用下产生交变应变的特性做成的换能器。

(21) 夹心换能器 (Sandwich transducer) 在一组压电晶片叠合而成的驱动部件的两端面, 分别配以相同或不同材料的匹配块 (通常称为前、后盖板), 并施加一定的预应力压紧

而制成的超声换能器。匹配块的作用是与晶片组成复合振子，并工作在较低频率。

(22) 超声变幅杆 (Amplitude transformer horn) 超声变幅杆也叫超声聚能器。通常是一根变截面杆。它是机械振动振幅的变换器。主要作用是把机械振动的振幅放大，或者说把能量集中在较小面积上，产生聚能作用。按其截面的形状随杆轴变化规律，可分为阶梯形、圆锥形、指数形、悬链线形、高斯形变幅杆等类型。

(23) 超声加工 (Ultrasonic machining) 超声加工是利用超声振动的工具在有磨料的液体介质中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，或给工具或工件沿一定方向施加超声频振动进行振动加工，或利用超声振动使工件相互结合的加工方法。

(24) 超声焊接 (Ultrasonic welding) 利用超声振动产生的机械和热效应使被焊件实现焊接的技术。对金属材料的焊接一般使用超声切向超声振动，而对塑料和化纤制品则多用纵向超声振动。

(25) 超声清洗 (Ultrasonic cleaning) 被清洗零件浸没在清洗液中，向液体辐射超声，并产生空化。由空化气泡运动产生的微冲流或由气泡崩塌产生的高强度冲击波，作用于附着在零件表面上及零件表面微孔、细缝中的污物，促使其脱落或加速溶解，从而达到清洗的目的。这种方法叫做超声清洗。

(26) 超声电镀 (Ultrasonic electrodeposition) 在电镀电解质溶液中引入超声振动，利用超声空化、声流、声毛细管等效应提高镀层质量和沉积速度的一种电镀方法。

(27) 超声处理 (Ultrasonic processing) 利用超声振动使物体物性或状态发生变化的方法与技术。超声处理的方式有超声乳化、超声搪锡、超声粉碎、超声雾化、超声凝聚、超声除气、超声加速过滤、超声振动筛、超声加速陈化、超声淬火、超声晶粒细化和超声疲劳试验等。广义地说，超声治疗、超声美容、超声处理农作物与种子等也属超声处理的范畴。

1.3.2 超声加工专用符号

超声加工专用符号见表 1-2，这些符号也用于本书各章节公式中。

表 1-2 超声加工专用符号

符号	含 义	符号	含 义	符号	含 义
a	振幅	P_a	声功率	c	声速
F	力	Y	导纳	ω	角频率
H	磁场强度	R	电阻(值)	M	磁化强度,质量
k	波数, $k = \frac{\omega}{c}$	N	变幅杆面积系数	λ	波长
K	磁化率, $K = \frac{\Delta M}{\Delta H}$	a_p	切削(磨削)深度	ρ	密度
σ	磁致伸缩应力常数	γ_o	前角	k_{31}	横向机电耦合系数
k_p	平面机电耦合系数	α_o	后角	V	电压
E	电源电压	α'_o	副后角	P_m	机械功率
P	功率	ξ	位移	η_{es}	电声效率