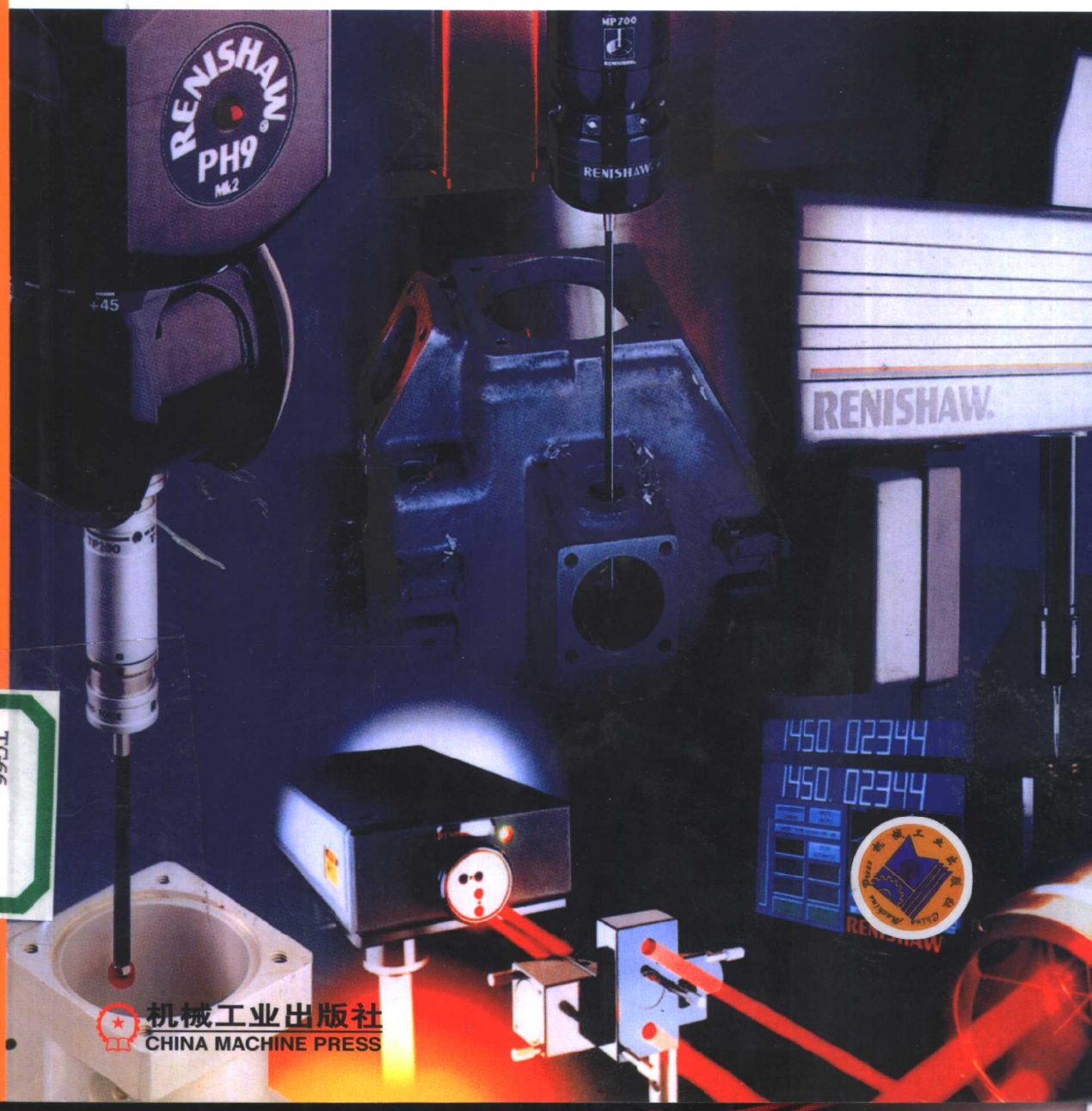


现代加工技术

张辽远 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

现代加工技术

张辽远 编著

机械工业出版社

本书的主要内容是：超声波加工；电化学加工；电火花加工；激光加工；电子束和离子束加工；化学加工和等离子加工；快速原形加工；电解研磨加工；挤压珩磨；精密加工工艺和光整加工工艺等。

本书为高等工业院校的机械电子工程专业及相近专业的“现代加工技术”课程的教材，也可供从事现代加工技术的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代加工技术/张辽远编著. —北京：机械工业出版社，2002.8
ISBN 7-111-10680-6

I. 现… II. 张… III. 塑料成型—技术 IV. TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 054187 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：张秀恩 王兴垣 版式设计：霍永明 责任校对：刘秀芝

封面设计：姚毅 责任印制：路琳

北京市樱花印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·7.875 印张·303 千字

0001—4000 册

定价：20.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527
封面无防伪标均为盗版

前 言

传统的切削加工已有很久的历史，它对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。近年来随着科技的进步和生产的发展，出现了许多由坚硬而又难加工材料制成的，具有精密公差尺寸和低表面粗糙度的复杂零件的加工，导致了许多的加工方法的产生。这些加工方法不同于以往的切削加工，现称之为现代加工方法。

本书的内容主要包括超声波加工、电化学加工、电火花加工、激光加工、电子束和离子束加工等现代加工方法的基本原理，设备、工艺规律、主要特点和应用。

本书为高等工业院校的机械电子工程专业及相近专业的“现代加工技术”课程的教材，也可供从事现代加工技术的工程技术人员参考和自学之用。

由于书中内容广泛，各方面条件的限制和作者的水平，书中难免有错误和不足之处，请读者批评指正。

编 者
2002年5月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 现代加工方法的产生及发展	1
第二节 现代加工方法的分类	2
第三节 现代加工方法的选择	2
第二章 超声波加工	6
第一节 超声波加工的基本原理和特点	6
一、超声波及其特性	6
二、超声加工的基本原理	9
三、超声加工的特点	9
第二节 超声波加工设备	10
一、超声发生器	11
二、声学部件	11
三、机床	19
四、磨料悬浮液	19
第三节 超声加工速度、精度、表面质量及其影响因素	20
一、加工速度及其影响因素	20
二、加工精度	22
第四节 超声加工的应用	22
一、型孔、型腔加工	23
二、切割加工	23
三、超声清洗	24
四、焊接加工	24
五、超声波在冶金中的应用	25
第五节 超声振动切削加工	26
一、振动切削的分类	26
二、振动切削的工艺效果	27
三、超声振动切削的运动学分析	29
四、超声振动切削的应用	31
第六节 磨粒喷射加工	36
一、基本原理	36
二、去除速度和加工精度	36
第七节 水射流加工	38

一、基本原理	38
二、材料去除速度和加工精度	38
三、设备	38
四、喷嘴	39
五、实际应用	39
第三章 电化学加工	40
第一节 电化学加工原理、特点及分类	40
一、电化学加工原理	40
二、电化学加工的特点	40
三、电化学加工的分类	41
第二节 电化学加工设备	42
一、直流电源	42
二、机床	42
三、工具、工件及电解液	43
第三节 电化学加工的基本规律	45
一、生产率及其影响因素	45
二、精度成型规律	48
三、表面质量	50
第四节 提高电化学加工精度的途径	51
一、脉冲电流电化学加工	51
二、小间隙电化学加工	51
三、混气电化学加工	52
第五节 电化学加工的应用	52
一、深孔扩孔加工	52
二、型孔的加工	54
三、型腔加工	54
四、套料加工	56
五、叶片加工	57
六、电解倒棱去毛刺	57
第六节 电化学磨削	58
一、电化学磨削加工原理	58
二、电化学磨削加工速度、精度及表面粗糙度	60
三、电化学磨削的应用	60
第七节 电铸和涂镀加工	62
一、电铸加工	63
二、涂镀加工	68
第八节 电化学抛光	73
一、电解抛光的机理	74

二、电解抛光的条件	75
三、金属的电解抛光	76
四、半导体的电解抛光	78
第四章 电火花加工	80
第一节 电火花加工的基本原理和特点	80
一、基本原理	80
二、电火花加工的特点	83
第二节 电火花加工的基本规律	84
一、影响电蚀量的主要因素	84
二、电火花加工的加工速度和工具的损耗速度	85
三、影响加工精度的主要因素	89
四、电火花加工的表面质量	90
第三节 电火花加工机床	93
一、电火花成型加工机床	93
二、电火花加工用脉冲电源	94
第四节 电火花加工自动进给调节系统	100
一、自动进给调节系统的作用、技术要求和分类	100
二、自动进给调节系统的基本组成部分	101
三、电液自动进给调节系统	103
四、电-机械式自动调节系统	104
第五节 电火花穿孔成型加工	105
一、冲模的电火花加工	105
二、型腔模的电火花加工	109
三、小孔电火花加工	115
四、异形小孔的电火花加工	115
第六节 其他电火花加工	117
一、电火花小孔磨削	118
二、电火花铲磨硬质合金小模数齿轮滚刀	119
三、电火花共轭同步回转加工螺纹	119
四、聚晶金刚石等高阻抗材料电火花加工	121
五、金属电火花表面强化和刻字	121
第五章 电火花线切割加工	124
第一节 电火花线切割加工原理、特点及应用范围	124
一、线切割加工的原理	124
二、线切割加工的特点	125
三、线切割加工的应用范围	126
第二节 电火花线切割加工设备	126
一、机床本体	126

二、脉冲电源	129
三、工作液循环系统	131
第三节 电火花线切割控制系统和编程技术	132
一、线切割控制系统	132
二、线切割数控编程要点	134
三、自动编程	137
第四节 线切割加工工艺及应用	139
第六章 激光加工	143
第一节 激光加工的理论、原理和特点	143
一、光的物理概念	143
二、激光的产生	143
三、激光的基本特性	145
四、激光加工的基本原理	146
五、激光加工的特点	149
第二节 激光加工的设备	150
第三节 激光加工的基本规律	152
第四节 激光加工工艺及应用	153
一、激光打孔	153
二、激光切割	154
三、激光焊接	154
四、激光热处理	155
五、激光存储	155
第七章 电子束离子束加工	157
第一节 电子束加工	157
一、电子束加工的原理和特点	157
二、电子束的加工装置	158
三、电子束加工应用	159
第二节 离子束加工	163
一、离子束加工原理、分类和特点	163
二、离子束加工装置	165
三、离子束加工的应用	165
第八章 其他现代加工方法	171
第一节 化学加工	171
一、化学蚀刻加工	171
二、光化学腐蚀加工	173
三、化学抛光	178
四、化学镀膜	179
第二节 等离子体加工	179
一、基本原理	179

二、材料去除速度和加工精度	181
三、设备和工具	181
四、实际应用	181
第三节 快速原形加工	182
一、快速原形制造发展	182
二、快速原形制造原理	183
三、快速原形制造主要发展方向	183
四、快速原形制造的优势	185
五、快速原形制造最新应用	185
第四节 磁性磨料研磨和磁性磨料电解研磨加工	186
一、基本原理	186
二、设备和工具	187
三、实际应用	187
第五节 挤压珩磨	188
一、基本原理	188
二、挤压珩磨的工艺特点	188
三、粘性磨料介质	189
四、夹具	189
五、实际应用	190
第九章 精密加工工艺和光整加工工艺	191
第一节 精密切削加工	191
一、高速精镗(金刚镗)	191
二、浮动镗及拉镗	193
三、超精密切削加工	197
第二节 精密磨削	200
一、超精磨削和镜面磨削	200
二、砂带磨削	202
第三节 超精密加工的设备 and 环境条件	206
一、机床设备	206
二、环境条件	208
第四节 珩磨、超精研和研磨加工	210
一、珩磨	210
二、超精研	216
三、研磨	224
第五节 无屑光整加工	230
一、滚压加工	230
二、深孔滚压	234
三、金刚石压光	234
参考文献	241

第一章 绪 论

第一节 现代加工方法的产生及发展

传统的机械加工已有很久的历史，它对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。例如 18 世纪 70 年代发明了蒸汽机，但由于难以制造出高精度的气缸而无法推广应用。直到制造出气缸镗床，解决了气缸的加工工艺，才使蒸汽机获得广泛的应用，引起了世界性的第一次产业革命。

第二次世界大战后，特别是进入 20 世纪 50 年代以来，随着生产的发展和科学实验的需要，许多工业部门，尤其是国防工业部门要求尖端的科学技术产品向高精度、高速度、高温、高压、大功率、微型化等方向发展。它们所使用的材料大多是坚硬而难加工的，零件的形状越来越复杂，精度要求高，表面粗糙度低。因此，如果加工工艺技术没有相应的改进，对上述零件的加工靠单纯提高强度的方法使总的加工成本增加，而有时根本无法加工，如图 1-1 所示。鉴于这个问题的严重性，1960 年 Merchant 强调机械加工方法需要更新的概念。于是人们开始探索采用除机械能进行机械加工以外的电能、化学能、声能、光能、磁能等进行加工。这些加工方法，在某种意义上说，即不使用普通刀具来切削工件材料，而是直接利用能量进行加工，为区别现有的金属切削加工，称之为“现代加工方法”或“特种加工方法”它们与一般的机械加工的不同点是：

（1）切除材料的能量不单纯是靠机械能，还可以用其它形式的能量；
（2）可以有工具，但工具材料的硬度可低于工件材料的硬度，也可以无工具；
（3）在加工过程中，工具和工件之间不存在显著的机械切削力。

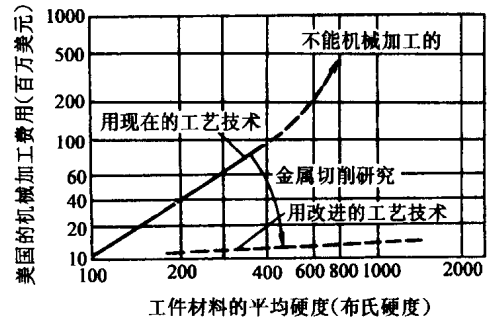


图 1-1 在美国工件材料强度对国家标准机加工费用的影响

第二节 现代加工方法的分类

现代加工方法的分类尚没有明确的规定，但一般是根据使用能量的基本类型进行分类。现代加工方法的分类见表 1-1。

表 1-1 现代加工方法的分类

能量类型	金属切削机理	传递介质	能源	方法
机械能	腐蚀	高速粒子	风动/液压	磨料射流加工 超声波加工 水射流加工
	剪切	直接接触	切削工具	普通机械加工
电化学能	离子转移	电介质	大电流	电化学加工 电化学磨削
化学能	烧蚀定律	易反应的周围介质	腐蚀剂	化学加工
热电能	熔化	高温气体	游离材料	离子束加工 等离子电弧加工
		电子放射线	高压加强光	电火花加工 激光加工
	气化	离子流	游离金属	等离子电弧加工

当然，在现代加工方法的发展过程中也形成了某些过渡性工艺，具有现代加工和常规机械加工的双重特点：如在切削过程中引入超声振动和低频振动切削；在切削过程中通以低电压大电流的导电切削；以及低温切削等。随着半导体大规模集成电路生产发展的需要，近年来提出了超微量加工，所谓原子、分子单位的加工方法。

第三节 现代加工方法的选择

为了正确有效地应用现代加工方法，必须考虑以下几个方面的问题：

- (1) 物理参数；
- (2) 工件材料的力学性能和加工形状；
- (3) 生产能力；
- (4) 经济性。

表 1-2~表 1-7 和图 1-2 分别就上述几个问题对现代加工方法进行了比较，由此可以确定加工零件时所选用合适的加工方法。

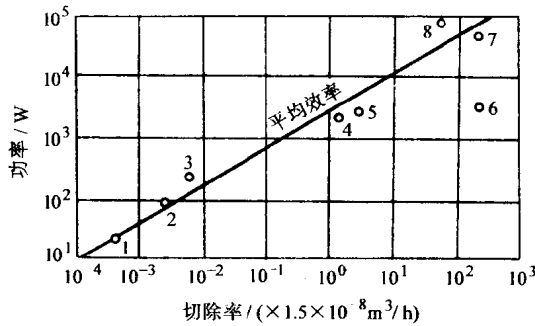


图 1-2 现代机械加工与普通加工方法的比较

1—激光加工 2—磨料射流加工 3—电子束加工 4—超声波加工
5—电火花加工 6—逆铣 7—等离子电弧加工 8—电化学加工

表 1-2 现代加工方法的物理参数

参 数	超声波加工	磨料射流加工	电化学加工	化学加工	电火花加工	电子束加工	激光加工	等离子电弧加工
电位/V	220	220	10	—	45	150000	4500	100
电流/A	12 (交流)	1.0	10000 (直流)	—	50 (脉动直流)	0.001 (脉动直流)	2 (平均峰值为 200)	500 (直流)
功率/W	2400	220	100000	—	2700	150 (平均峰值为 200)	—	50000
间隙/mm	0.25	0.75	0.20	—	0.025	100	150	7.5
介质	磨料在水中	磨料在气体中	电解液	化学品液体	不导电的液体	真空	空气	氩或氦

表 1-3 现代加工方法适用的形状

加工方法	孔				直通型腔		面		直通切割	
	精密的小孔		标准的		精密的	标准的	复式轮廓	旋转表面	浅的	深的
	直径 < 0.25mm	直径 > 0.25mm	长度 < 20 直径	长度 > 20 直径						
超声波加工	—	—	好	不好	好	好	不好	—	不好	—
磨料射流加工	—	—	尚好	不好	不好	尚好	—	—	好	—
电化学加工	—	—	好	好	尚好	好	好	尚好	好	好
化学加工	尚好	尚好	—	—	不好	尚好	—	—	好	—
电火花加工	—	—	好	尚好	好	好	尚好	—	不好	—
激光加工	好	好	尚好	不好	不好	不好	—	—	好	尚好
等离子电弧加工	—	—	尚好	—	不好	不好	—	不好	好	好

表 1-4 材料的适用性

加工方法	材 料							
	铝	钢	超级合金	钛	耐火材料	塑料	陶瓷	玻璃
超声波加工	不好	尚好	不好	尚好	好	尚好	好	好
磨料射流加工	尚好	尚好	好	尚好	好	尚好	好	好
电化学加工	尚好	好	好	尚好	尚好	不能用	不能用	不能用
化学加工	好	好	尚好	尚好	不好	不好	不好	尚好
电火花加工	尚好	好	好	好	好	不能用	不能用	不能用
电子束加工	尚好	尚好	尚好	尚好	好	尚好	好	尚好
激光加工	尚好	尚好	尚好	尚好	不好	尚好	好	尚好
等离子电弧加工	好	好	好	尚好	不好	不好	不能用	不能用

表 1-5 生产能力

加工方法	金属切除速率 / (mm ³ /min)	公 差 /μm	表面粗糙度 R _a /μm	表面损伤深度 /μm	圆角半径/mm
超声波加工	300	7.5	0.2~0.5	25	0.025
磨料射流加工	0.80	50	0.5~1.2	2.5	0.100
电化学加工	1500	50	0.1~2.5	5.0	0.025
电火花加工	800	15	0.2~12.5	125	0.025
电子束加工	1.6	25	0.4~2.5	250	2.5
激光加工	0.1	25	0.4~1.25	125	2.5
化学加工	15.0	50	0.4~2.5	50	0.125
等离子电弧加工	75000	125	粗糙	500	—
钢的逆铣	50000	50	0.4~0.5	25	0.050

表 1-6 对设备和工具的影响

加工方法	工具磨损比	加工介质的污染	安全性	毒 性
超声波加工	10	一般问题	无问题	无问题
磨料射流加工	—	一般问题	一般问题	无问题
电化学加工	0	关键问题	一般问题	无问题
电火花加工	6.6	一般问题	一般问题	一般问题
电子束加工	—	一般问题	一般问题	无问题
激光加工	—	无问题	一般问题	无问题
等离子电弧加工	—	无问题	无问题	无问题

注：工具磨损比 = 切除工件材料的体积 / 消耗掉的工具电极体积。

表 1-7 加工方法的经济性

加工方法	基本投资	工具和夹具	功率要求	效 率	工具消耗
超声波加工	低	低	低	高	中等
磨料射流加工	很低	低	低	高	低
电化学加工	很高	中等	中等	低	很低
化学加工	中等	低	高	中等	很低
电火花加工	中等	高	低	高	高
电子束加工	高	低	低	很高	很低
激光加工	中等	低	很低	很高	很低
等离子电弧加工	很低	低	很低	很低	很低
一般的机械加工	低	低	低	很低	低

第二章 超声波加工 (Ultrasonic Machining)

超声加工有时也称超声波加工。电火花和电化学加工都只能加工金属导电材料。然而，超声波加工不仅能加工硬质合金、淬火钢等脆硬金属材料，而且更适合于加工玻璃、陶瓷、半导体锗、硅片等不导电的非金属脆硬材料，同时还可以应用于清洗、焊接、探伤、测量、冶金等其它方面。

第一节 超声波加工的基本原理和特点

一、超声波及其特性

“超声波”这个术语用来描述频率高于人耳听觉频率上限的一种振动波，它通常是指频率高于 16kHz 以上的所有频率。超声波的上限频率范围主要是取决于发生器，实际用的最高频率的界限，是在 5000MHz 的范围以内。在不同介质中的波长范围非常广阔，例如在固体介质中传播时，频率为 25kHz 的波长约为 200mm，而频率为 500MHz 的波长将具有约为 0.008mm 的波长。

超声波和声波一样，可以在气体、液体和固体介质中传播。由于超声波频率高、波长短、能量大，所以传播时反射、折射、共振及损耗等现象更显著。在不同的介质中，超声波传播的速度 C 亦不同（例如 $C_{\text{空气}} = 331\text{m/s}$ ； $C_{\text{水}} = 1430\text{m/s}$ ； $C_{\text{铁}} = 5850\text{m/s}$ ），它与波长和频率 f 之间的关系可用下式表示：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2-1)$$

超声波具有下列主要性质：

(1) 超声波能传递很强的能量 超声波的作用主要是对其传播方向的物体施加压力（声压）。因此，可用这个压力的大小表示超声波的强度，传播的波动能量越强，则压力越大。

振动能量的强弱，用能量密度来衡量。能量密度就是通过垂直于波的传播方向的单位面积上的能量，用符号 J 来表示，单位为 W/cm^2

$$J = \frac{1}{2} \rho c (\omega A)^2 \quad (2-2)$$

式中 ρ ——弹性介质的密度 (kg/m^3)；

c ——弹性介质中的波速 (m/s)；

A ——振动的振幅 (mm);

ω ——圆频率, $\omega = 2\pi f$ (rad/s)。

由于超声波的频率很高,其能量密度可达 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 以上。超声波在液体或固体中传播时,由于介质密度 ρ 和振动频率比空气中传播声波时高许多倍,因此同一振幅时,液体、固体中的超声波强度、功率、能量密度要比空气中的声波高千万倍。

(2) 超声波的空化作用 当超声波经过液体介质传播时,将以极高的频率压迫液体质点振动,在液体介质中连续地形成压缩和稀疏区域,由于液体介质的不可压缩性,由此产生正、负交变的压力变化,由于这一过程时间极短,液体中的气体在此脉冲压力作用下,会破开,发生冲击波,局部产生极大的冲击力,瞬时高温,物质的分散,破碎及各种物理化学作用。图 2-1 为超声波作用于液体时产生的液体流动,为便于观察,在液体中加入铝粉后拍摄的图。

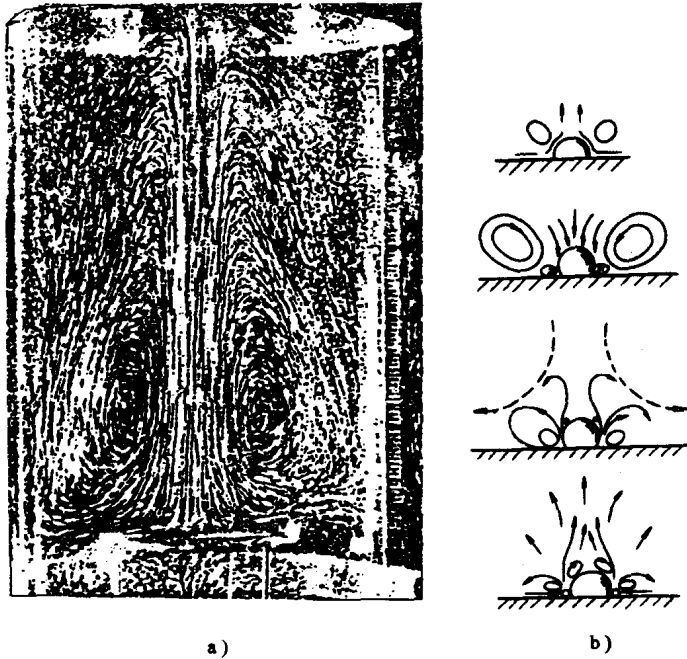


图 2-1 超声波作用于液体介质

a) 液中有铝粉便于观察的直进流 b) 气泡振动所致固体表面的流动

(3) 超声波的反射、透射、折射 超声波通过不同介质时,在界面发生波速突变,产生波的反射、透射和折射现象。能量反射的大小,决定于两种介质的波阻抗(密度与波速的乘积 ρc 称为波阻抗)。如图 2-2 所示,平面波垂直该面入射

时, 设各介质的固有波阻抗为 $\rho_1 c_1$ 、 $\rho_2 c_2$ 及 $\rho_3 c_3$, 则反射率 β_r , 透射率 β_t , 由下式表示

$$\beta_r = \frac{\text{反射波强度}}{\text{入射波强度}} = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 \quad (2-3)$$

$$\beta_t = \frac{\text{透射波强度}}{\text{入射波强度}} = 1 - \beta_r = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} \quad (2-4)$$

从式 (2-3) 可以看出, 如 $\rho_2 c_2 < \rho_1 c_1$, 水中的超声波几乎不向空气中传播。

(4) 超声波的衍射 设超声波换能器是一小圆片, 可以把表面上的每个点看成是振源, 辐射出一个半球面波 (子波), 这些子波没有指向性。但离开换能器的空间某一点的声压是这些无数个波迭加的结果 (衍射), 没有指向性。但是当圆片的半径比波长大, 在圆片的中心法线方向的声强分布, 满足下式

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2-5)$$

图 2-3 的物理意义是 $\theta = 0$ 时, 声强极大, θ 逐渐增加, 声强减弱。因此超声波有尖锐的指向性。

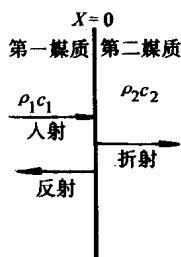


图 2-2 垂直入射的反射与折射

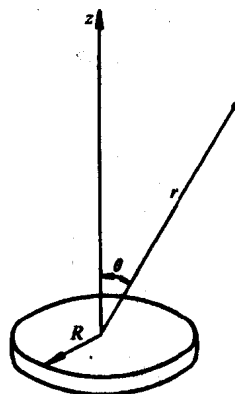


图 2-3

(5) 超声波的干涉和共振 超声波在一定条件下, 会产生波的干涉和共振现象, 图 2-4 为超声波在弹性杆中传播时各质点的振动情况。当超声波从杆的一端向另一端传播时, 在杆的端部将发生波的反射。所以在有限的弹性体中, 实际存在着同周期、同振幅、传播方向相反的两个波, 这两个完全相同的波从相反方向会合, 就会产生波的干涉。当杆长符合某一规律时, 杆上有些点在波动过程中位置始终不变, 其振幅为零 (为波节), 而另一些点振幅最大, 其振幅为原振幅的两倍 (为波腹)。图 2-4 中 x 表示弹性杆件任意一点 b 相距超声波入射端的距