



QIANG CHAO SHENG BO YING YONG

强超声波应用

资 料

强超声波应用

资 料

《强超声波应用》编译小组编译

辽宁人民出版社

一九七五年·沈阳

强 超 声 波 应 用

《强超声波应用》编译小组编译

辽宁人民出版社出版

(沈阳市南京街6段1里2号)

辽宁省新华书店发行

辽 阳 印 刷 厂 印 刷

开本: 787×1092 $\frac{1}{2}$ 印张: 5 $\frac{1}{2}$

字数: 115,000 印数: 1—5,000

1975年5月第1版 1975年5月第1次印刷

统一书号: 15090·24 定价: 0.40元

内 部 发 行

目 录

一、超声波和它的性质	(1)
1. 超声波的频率范围	(1)
2. 超声波的种类	(2)
3. 超声波的各个物理量	(3)
(1) 超声波的速度和波长	(3)
(2) 媒质粒子的速度和加速度	(3)
(3) 超声波的强度和能量	(5)
(4) 超声波的方向性	(6)
(5) 超声波的反射、透射和折射	(7)
(6) 超声波空化作用	(8)
二、超声波发生方法	(10)
1. 压电振动子	(10)
2. 电致伸缩振动子	(11)
3. 磁致伸缩振动子	(12)
4. 电磁振动子	(13)
5. 加诺夫斯基·鲍尔曼喷射声源	(13)
6. 哈脱曼笛	(14)
7. 超声波气笛	(14)
三、超声波加工	(15)
1. 超声波加工的原理和特点	(15)
2. 超声波加工机的构造	(19)
3. 超声波振动增幅杆的选择	(21)
4. 振动增幅杆的设计	(21)

(1) 圆锥形增幅杆的设计	(23)
(2) 指数形增幅杆的设计	(25)
(3) 悬链形增幅杆的设计	(26)
(4) 阶梯形增幅杆的设计	(27)
5. 对于加工速度的最佳条件	(28)
(1) 对于加工速度的最佳加工压	(28)
(2) 工具的振动振幅和加工速度	(29)
(3) 磨料粒度和加工速度	(30)
(4) 磨料浓度和加工速度	(30)
6. 增大加工速度的各种方法	(31)
(1) 在磨料供给上的方法	(31)
(2) 利用多工具加工	(31)
(3) 与电解抛光并用	(32)
7. 加工精度	(34)
(1) 尺寸精度	(34)
(2) 正圆度	(35)
8. 加工面的粗糙度	(35)
9. 利用超声波的表面加工方法	(36)
10. 采用钻石头磨具的超声波加工	(37)
11. 超声波加工举例	(38)
四、超声波磨削	(42)
1. 超声波磨削加工	(42)
2. 超声波砂带磨削	(44)
3. 超声波修整	(44)
4. 砂轮气孔堵塞的防止	(46)
5. 磨削砂轮结合度的测试	(47)
五、超声波切削	(48)
1. 超声波车削和刨削	(48)

2. 振动攻丝和振动铣削	(50)
3. 超声波铰孔	(51)
4. 超声波拉削加工	(52)
六、超声波塑性加工	(53)
1. 在材料测试中的应用	(53)
2. 在拉丝加工中的应用	(56)
3. 在深拉深和变薄拉深加工中的应用	(57)
4. 在挤压加工中的应用	(57)
5. 在压延加工中的应用	(58)
6. 在管的拉拔加工中的应用	(58)
7. 在锻造中的应用	(59)
8. 在冲孔加工中的应用	(59)
七、超声波焊接	(60)
1. 超声波焊接的原理和特点	(60)
2. 金属的超声波焊接	(61)
(1) 金属焊接机的原理	(61)
(2) 金属焊接的接合机理	(62)
(3) 金属焊接的应用领域	(63)
(4) 加压力与焊接特性	(65)
(5) 超声波功率与焊接特性	(65)
(6) 焊接时间与焊接特性	(66)
(7) 表面处理与焊接特性	(67)
(8) 触头和砧座的形状, 光洁度与焊接特性	(67)
(9) 加工度、组织、电镀等与焊接特性	(68)
3. 塑料的超声波焊接	(69)
(1) 原理和特点	(69)
(2) 塑料焊接的接合机理	(71)
(3) 冲息焊接	(71)

(4) 成形品的传递焊接	(73)
(5) 连续封接	(80)
(6) 金属的嵌入	(82)
(7) 铆接	(83)
4. 超声波导线焊接	(83)
(1) 接合面的组织	(85)
(2) 接合部的变形与应力集中问题	(85)
(3) 接合面的表面处理	(85)
(4) 工具触头长度的影响	(86)
八、超声波清洗	(90)
1. 超声波清洗的机理	(95)
2. 振动子的安装形式	(96)
3. 清洗方式	(98)
4. 频率的选定	(99)
5. 振荡器功率的选定	(101)
6. 由网眼引起的超声波衰减	(102)
7. 各种清洗举例	(103)
(1) 电子及电气工业机器	(103)
(2) 照相机透镜及镜胴的清洗	(105)
(3) 轴承钢珠的清洗	(107)
(4) 餐具、瓶类的清洗	(107)
(5) 贵重金属、装饰品类的清洗	(110)
(6) 其他的超声波清洗举例	(110)
九、超声波在医学及生物学上的应用	(111)
1. 超声波手术	(111)
2. 超声波治疗	(113)
3. 超声波细菌破坏	(114)
4. 超声波牙垢去除机	(115)

5. 超声波透析	(115)
十、超声波凝集	(117)
1. 超声波集尘	(117)
2. 微粉煤的回收	(119)
十一、超声波乳化和分散	(121)
十二、超声波电镀	(124)
1. 电镀铬中的超声波效果	(124)
2. 电镀镍中的超声波效果	(128)
3. 对于其他电镀的超声波效果	(128)
十三、超声波在冶金工业中的应用	(129)
1. 连续铸造与结晶的微细化	(130)
2. 铸造中的脱气	(131)
3. 渗碳与分散	(131)
4. 退火与时效	(132)
十四、超声波的其他应用	(133)
1. 超声波锡焊	(133)
2. 空化腐蚀试验	(135)
3. 超声波疲劳试验	(137)
(1) 试验片形状与最大应力	(137)
(2) 重复速度与疲劳极限的关系	(138)
4. 超声波去毛刺	(139)
5. 超声波加热和干燥	(141)
(1) 超声波加热	(141)
(2) 超声波干燥	(143)
6. 边界层的破坏	(145)
7. 摩擦的减少	(146)
8. 超声波硬度计	(147)
(1) 硬度计的原理	(147)

(2) 振动方程式.....	(148)
(3) 实用例与特点.....	(149)
9. 化学反应的促进.....	(150)
10. 超声波脱气与脱泡.....	(153)
(1) 熔融金属的脱气.....	(154)
(2) 啤酒的发泡.....	(154)
(3) 清凉饮料水的脱泡.....	(155)
11. 熟化作用	(156)
(1) 啤酒的酿造.....	(156)
(2) 酒的熟化.....	(157)
(3) 香料的熟化.....	(159)
(4) 照相乳剂的熟化.....	(159)
12. 液体的烟雾化	(159)
13. 改变燃料油的质量.....	(161)
14. 超声波浴池	(163)

一、超声波和它的性质

1. 超声波的频率范围

一般认为人们的耳朵能够听到的声波的频率范围是由16Hz（赫芝）到20KHz（千赫芝）。然而，正如图1.1中所示的那样，这个频率的范围是随着声强的不同而变化的，对于不同人或者同一个人的不同年龄也有所不同，所以可听声

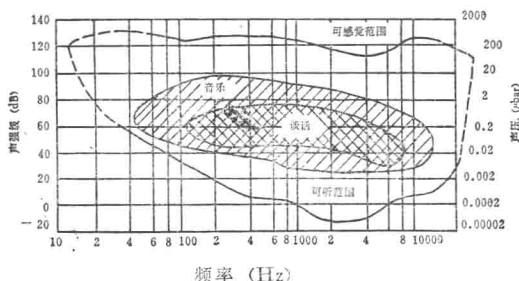


图1.1 耳朵所能感受到的声音范围

波的范围不仅和频率有关，而且和声强级有关。这样一来可听声波的频率范围便是不确定的，所以超声波的频率下限也很难规定，但是通常都是把20KHz以上的声波叫做超声波（ultraSonic Waves）。不过所谓“可听”与“不可听”那只是人们耳朵的感觉问题，就超声波的本质来说，它是媒质中传播的弹性波，与声波没有本质的区别。例如，即使是

在运用频率为10千赫的技术中也常常使用“超声波”这个词。现在,利用水晶振动子的高次谐振动已经能够产生1,000 MHz (兆赫芝) 的超声波。但是,通常能够产生的超声波的频率上限约为300兆赫。应用在工业上的强超声波频率范围一般约在10千赫~500千赫之间。

2. 超声波的种类

在固体中传播的超声波种类有如下三种:

纵波 (Longitudinal wave, L波)

横波 (Shear wave, S波)

表面波 (Surface wave, Rayleigh波)

如果假设材料的杨氏模量为 E , 泊松比为 σ , 密度为 ρ , 刚性率为 G , 体积弹性率为 K , 在无限广阔的声场内, 纵波速度 C 可由下式算出:

$$C = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} = \sqrt{\frac{1}{\sigma} \left(K + \frac{4}{3} G \right)} \quad (1.1)$$

在与波长相比直径非常小的棒中, 传播的纵波速度为:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.2)$$

另外, 横波的速度 C_s 为:

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (1.3)$$

同样, 表面波的声速 C_R 大约为:

$$C_R = 0.9 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.4)$$

应用在工业上的强超声波大多数为纵波, 横波被应用在

探伤计等测量仪表中。

3. 超声波的各个物理量

(1) 超声波的速度和波长

超声波的声速 C 、波长 λ 、频率 f 之间有如下关系：

$$C = \lambda \cdot f \quad (1.5)$$

当声速已知时可由频率求波长。表 1.1 示出了在各种媒质中的声速度。

(2) 媒质粒子的速度和加速度

取在媒质中传播的平面波的方向为 X 坐标轴，假设由于超声波的作用，媒质粒子的位移振幅为 a ，角频率为 $\omega (= 2\pi f)$ 、时间为 t ，则粒子的位移 x 作正弦波运动， x 为：

$$x = a \sin \omega t \quad (1.6)$$

这个时候粒子的速度 v 以及加速度 a 用下式表示：

$$v = \frac{dx}{dt} = a\omega \cos \omega t \quad (1.7)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -a\omega^2 \sin \omega t \quad (1.8)$$

应该注意，在这里粒子的速度 v 与声速度 C 是不同的。举个例子：假设 $f = 20\text{KHz}$ 、 $a = 20\mu$ ，那末此时粒子的速度和加速度的最大值分别为 $v_{\max} \approx 2.5\text{m/s}$ ， $a_{\max} \approx 3.2 \times 10^7 \text{cm/s}^2 \approx 3.2 \times 10^4 g$ (g 是重力加速度)，加速度竟达到重力加速度的 3 万倍。如果这时的媒质是液体则发生空化现象（空洞作用），结果超声波在液体中起氧化、搅拌和破坏等各种作用。粒子的速度通常用 cm/s 表示，有时也采用另一名称卡因 (Kine) ($1\text{卡因} = 1\text{cm/s}$)。

各种媒质的声特性

表1.1

媒质	纵波速度 C km/s	密度 ρ g/cm ³	声阻抗 $\times 10^6$ ρC	在完全接触的境界面的法线方向上入射的超声波 能量的反射率%													
				空气	变压器油	水	酚醛塑料	聚苯乙烯	玻璃	水银	铅	黄铜	铜	镁	镍	钢	铝
铝	6.22	2.65	1.70	100	74	72	42	50	2	1	3	14	18	9	24	21	0
钢	5.81	7.8	4.76	100	89	88	76	77	31	16	9	1	0.3	43	0.2	0	
镍	5.6	8.9	4.98	100	90	89	75	79	34	19	12	2	0.8	47	0		
镁	4.33	1.74	0.926	100	58	54	19	27	2	12	20	36	40	0			
铜	4.62	8.93	4.11	100	88	87	71	75	19	13	7	0.2	0				
黄铜	4.43	8.5	3.61	100	87	86	68	73	23	10	5	0					
铅	2.13	11.4	2.73	100	80	79	55	62	9	1	0						
水	1.46	13.6	1.93	100	76	75	6	8	4	0							
玻	4.9~5.9	2.5~5.9	1.81	100	67	65	32	40	0								
聚苯乙烯	2.67	1.1	0.924	100	17	12	1	0									
酚醛塑料	2.59	1.4	0.363	100	23	18	0										
水	1.43	1.00	0.143	100	0	0											
变压器油	1.39	0.92	0.123	100	0												
空气	0.331	0.00120	0.00042	0													

(3) 超声波的强度和能量

当考虑在一个方向上传播的平行平面波时，声波的强度 I (erg/s/cm²或w/cm²) 可以用单位时间内从垂直于声音传播方向的单位面积上通过的能量表示，用下式给出：

$$I = 2\pi^2 \rho c (fa)^2 = \frac{1}{2} \rho c v^2 = \frac{P^2}{2\rho c} = PV = \frac{P^2}{\rho c} = \rho c V^2 \quad (1.9)$$

在这里， ρ 是媒质的密度 (g/cm³)， C 是在媒质中的声波速度 (cm/s)， f 是声波的频率 (1/s)， a 是媒质粒子的位移振幅 (cm)， v 是媒质粒子的速度振幅 (cm/s)， p 是声波的压力振幅 (dyn/cm²)， P 是声压的有效值 (dyn/cm²)， V 是媒质粒子速度的有效值 (cm/s)， ρc (g/cm²/s) 叫做固有声阻抗 (Specific acoustic impedance)，它是声学中一个经常使用的量。

声波的能量密度 J (erg/cm³ 或 J/cm³) 是存在于单位体积中的声能，用下式表示：

$$J = \frac{I}{C} \quad (1.10)$$

即为：

$$\begin{array}{ccc} \text{(能量密度)} & \times & \text{(声速度)} = \text{(功率密度)} \\ J/\text{cm}^3 & & \text{Cm/S} \quad \text{w/cm}^2 \end{array}$$

在强超声波应用中，所谓“超声波的强度”通常就是指振动物每单位面积上的功率 (W/cm²)，它也被叫做功率密度。对于无衰减的自由声场内的平面波，“声强度”和“功率密度”是一致的。

由式 (1.9) 可知声压的振幅值 p (dyn/cm²) 为

$$\underline{p = \rho c v} \quad (1.11)$$

一般媒质是吸收声能的，声波衰减。把平行平面波的压力振幅写为：

$$p = p_0 e^{-\alpha x} \quad (1.12)$$

式中 α 称为每单位长度上的吸收系数。至于说到强度则可表示为：

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (1.13)$$

(4) 超声波的方向性

超声波的特点在于它的频率高，波长短。例如 500KHz 的超声波的波长在空气中是 0.68mm，在水中是 2.8mm。所以在一般情况下声源的尺寸都比波长大。

现在，假设在不吸收的媒质中，有一半径为 R 的圆板声源，它象活塞那样作振动。当与波长 λ 相比 R 很大时，求圆板中央的法线方向上的声场强度分布，假设在距声源中心的距离 r 与 R 相比足够大的点上张开角为 θ ，则压力振幅 p 为：

$$p(r, \theta) \sim \frac{e^{-jrk}}{r} \cdot \frac{J_1(kR \sin \theta)}{kR \sin \theta} \quad (1.14)$$

在这里 $k = 2\pi/\lambda$ 。因为当贝塞尔函数 J_1 最初为零时， $kR \sin \theta = 3.83$ 所以有：

$$\sin \theta = 0.61 \frac{\lambda}{R} \quad (1.15)$$

也就是说如果 λ 与 R 相比很小，那末 θ 也很小，结果声波具有强烈的方向性。

这种声波的方向性通常是用声压变为原来的 1/2 的半衰角表示，如果假设它的值为 θ' ， θ' 可按下式求出：

$$\theta' = \sin^{-1} \left(0.365 \frac{\lambda}{R} \right) \quad (1.16)$$

例如，由直径为 30mm 的振动子把频率为 1MHz 的超声波发

射到油中，此时 $R/\lambda = 10$ ，所以半衰角为 2° 。因此强超声波很容易聚焦。

(5) 超声波的反射、透射和折射

在图1.2(a)中，两种媒质的界面是无限平面，平面波垂直地入射到边界面上，如果假设媒质的固有声阻抗分别为 $\rho_1 C_1$ 和 $\rho_2 C_2$ ，那末反射率 β_r 、透射率 β_t 可用下式给出：

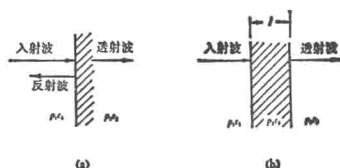


图1.2 声波的反射和透射

$$\beta_r = \frac{\text{反射波强度}}{\text{入射波强度}} = \left(\frac{\rho_1 C_1 - \rho_2 C_2}{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2} \right)^2 \quad (1.17)$$

$$\beta_t = \frac{\text{透射波强度}}{\text{入射波强度}} = 1 - \beta_r = \frac{4\rho_1 C_1 \rho_2 C_2}{(\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2)^2} \quad (1.18)$$

在表1.1中示出了各种媒质的反射率(%)。从表中可以知道超声波由水中向空气中入射时几乎全部被反射。

其次，象图1.2(b)中所示的那样，在不同的媒质间存在厚度为 l 的第三种媒质时或者是从相反的方向将超声波遮断时，超声波的透射率 β_t 为：

$$\beta_t = \frac{4\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{(\rho_1 C_1 + \rho_3 C_3)^2 \cos^2 kl + \left(\rho_2 C_2 + \frac{\rho_1 C_1 \rho_3 C_3}{\rho_2 C_2} \right)^2 \sin^2 kl} \quad (1.19)$$

在这里：

$$k = \frac{2\pi f}{C_2}$$

f 是超声波的频率。若与中间媒质相接的左右媒质是同一种媒质，即 $\rho_1 C_1 = \rho_3 C_3$ 时，则式(1.19)变为：

$$\beta_t = \frac{4}{4\cos^2 kl + \left(\frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} + \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} \right)^2 \sin^2 kl} \quad (1.20)$$

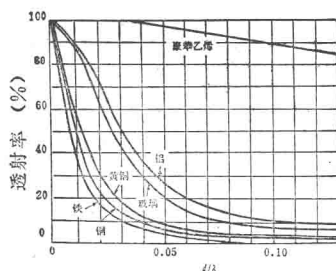


图1.3 在水中放入中间层时的声波透射率

图1.3中示出了在水中放入各种中间层时的声波透射率。为了要使 β_t 大,根据式(1.20),中间层的 $\rho_2 C_2$ 应尽可能地接近液体的 $\rho_1 C_1$,并且应该使用尽可能薄的板或者是板的厚度为超声波的半波长的整数倍。

在式(1.20)中若 $\rho_2 C_2 \gg \rho_1 C_1$,则可得到:

$$\beta_t = \frac{4}{4\cos^2 kl + \left(\frac{\rho_2 C_2}{\rho_1 C_1} \right)^2 \sin^2 kl} \quad (1.21)$$

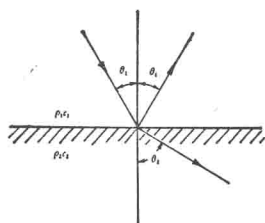


图1.4 声波的反射和折射

声波的折射与光的折射相同,在图1.4中有以下关系:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (1.22)$$

$\theta_2 = 90^\circ$ 即:

$$\theta_1 = \arcsin \frac{C_1}{C_2}$$

声波以临界角 θ_1 全反射。

(6) 超声波空化作用

把强超声波辐射到液体中,象图1.5所示的那样,在液体中产生负压,发生空孔,形成气泡,把这种现象叫做空化现象。这种气泡在声压的压缩相位被压缩,有时也溶解于液体中,但是,当成为某半径以上的气泡时,便不消灭而在声