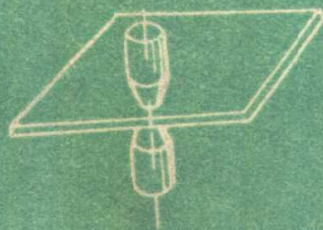


——超 声 波——

在建筑材料工业中的应用

建筑工程部技术情报局 选译

(内部发行)



建筑工程出版社

超声波在建筑材料工业中的应用

建筑工程部技术情报局 选译

(内部发行)

建筑工程出版社出版

1960

內 容 提 要

本書內容包括国外有关超声波及其在建筑材料工业中应用的文章共二十一篇，介紹超声波的发生以及超声波在加工、檢驗、探伤、凝聚及沉淀等方面的应用。其中着重介紹了用超声波破碎岩石、加工脆硬性材料及超声波探伤等問題。

本書可供建筑材料工业工作者參閱。

超声波在建筑材料工业中的应用

建筑工程部技术情报局 选譯

(內 部 发 行)

1960年7月第1版

1960年7月第1次印刷

850×1168 $\frac{1}{32}$ • 140千字 • 印張 57/16 • 定价 (10) 0.87元

建筑工程出版社印刷厂印刷 • 新华書店发行 • 書号: 2072

建筑工程出版社出版 (北京市西郊百万庄)

(北京市書刊出版业营业許可証出字第052号)

目 录

超声波发生法	(1)
--------------	-------

钛酸钡陶瓷与强力超声波	(6)
-------------------	-------

(一) 应用于加工方面	(18)
-------------------	--------

1. 用超声波破碎岩石	(18)
-------------------	--------

2. 用超声波预制和加工建筑材料	(43)
------------------------	--------

3. 用超声波加工陶瓷材料	(45)
---------------------	--------

4. 用超声波加工脆性非金属材料	(51)
------------------------	--------

5. 超声波振动对木材着色的作用	(58)
------------------------	--------

6. 利用超声波进行缝焊和点焊	(61)
-----------------------	--------

(二) 应用于检测、探伤方面	(68)
----------------------	--------

1. 用超声波和 γ 线测定水泥熟料的气孔率和烧结度	(68)
---	--------

2. 用超声波检验沥青混凝土	(80)
----------------------	--------

3. 用超声波检验塑料板	(87)
--------------------	--------

4. 用超声波脉冲方法检验塑料	(88)
-----------------------	--------

5. 超声波探伤法	(94)
-----------------	--------

6. 用声波测定固体材料机械性能的各种方法评述	(107)
-------------------------------	---------

7. 用超声波研究材料的组织	(122)
----------------------	---------

8. 波兰超声波探伤的发展	(136)
---------------------	---------

(三) 应用于凝聚、沉淀等方面	(143)
-----------------------	---------

1. 超声波气体收尘	(143)
------------------	---------

2. 用声波收尘的经验	(144)
-------------------	---------

3. 用超声波进行石膏脱水	(150)
---------------------	---------

4. 用超声波强化去污和酸洗过程	(153)
------------------------	---------

5. 用超声波沉淀氢氧化镁悬浮液	(162)
------------------------	---------

超声波发生法

日本 西村源六郎

超声波一般是指频率在16千赫以上的声波。超声波分为纵波、横波（均为实体波）与表示分散特性的表面波。它能在气体和液体等流体及金属和非金属等固体中传播。超声波频率非常高，波长很短，因此，在媒质中传播时呈现种种特性（表1、图1）。在理论方面可以以波动论为基础研究流体。固体中的传播特性及种种物质界面的传播性质，或试验超声波的特性，使超声波在媒质中发生时，由于媒质中的粒子移动在媒质中发生传播的波动，与声波的声源一样，需要如表2、图2及图3那样的机械振源。此外，根据不同的用途选用各种不同的振荡器，0.2~20千赫用活动线圈型电磁振荡器，0.2~250千赫用气笛，2~100千赫用卡尔顿（Galton）哨空心共振振荡器，5~50千赫用波尔

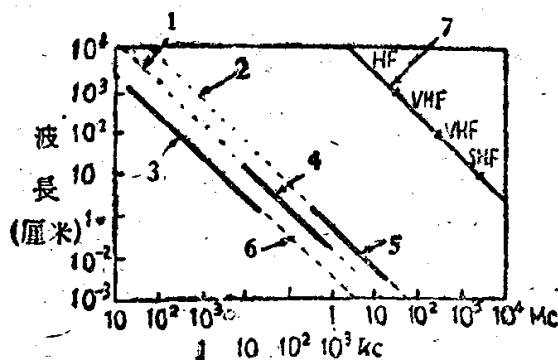


图1 空气、水、金属中声波波长与频率的关系
（实线表示普通使用范围）

- 1—水中的声波 1.5×10^5 厘米/秒； 2—金属中的声波 6×10^6 厘米/秒；
- 3—可听声波； 4—水中冲击电液强力超声波的应用； 5—金属探伤；
- 6—空气中的声波 34×10^4 厘米/秒； 7—电磁波

各种媒質的彈性波特性

• 2 •

媒質	縱波速度 (千赫芝) C	密度 (克/厘米 ³) ρ	聲阻抗 $\times 10^6 \rho \times C$	在充分胶結的界面法綫上入射超声波的反射率(%)													
				空气	变压器油	水	电木	聚苯 乙烯	玻璃	水銀	鉛	黃銅	銅	鎂	銀	鋼	鋁
鋁	6.22	2.65	1.70	100	78	72	42	50	2	1	3	14	18	9	24	21	0
銅	5.81	7.8	4.76	100	89	88	76	77	31	16	9	1	0.3	43	0.2	0	
銀	5.6	8.9	4.98	100	90	89	75	79	39	19	12	2	0.8	47	0		
鎂	4.33	1.74	0.926	100	58	54	19	27	2	12	20	35	40	0			
銅	4.62	8.93	4.11	100	88	87	71	75	19	13	7	0.2	0				
黃銅	4.43	8.5	3.61	100	87	86	68	73	23	10	5	0					
鉛	2.13	11.4	2.73	100	80	79	55	62	9	1	0						
水銀	1.45	13.6	1.93	100	76	75	6	8	4	0							
玻璃	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									
电木	2.59	1.4	6.363	100	23	18	0										
水	1.43	1.00	0.143	100	0	0											
变压器油	1.30	0.92	0.128	100	0												
空气	0.331	0.0012	0.000042	0													

表 1

編 号	振 源	振 源 物 質	振源发生的頻率 (千赫芝)
1	磁致伸縮式振蕩器	鎳、鉄鋁合金、鉄素体	10~100
2	电致伸縮式振蕩器	鈦酸鋁	30~10000
3	压电式振蕩器	(a) 水晶	100~50000
		(b) 酒石酸鈉鈣	0.2~100

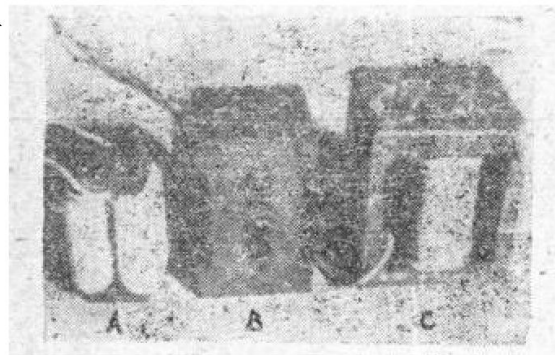


图 2 磁致伸縮式鎳片振蕩器

編 号	尺 寸		共振頻率(千赫芝)
	輻 射 面	高 度	
A	58□	69	25
B	42□	68	28
C	24□	54	30

曼 (Pohlman) 哨楔形共振振蕩器。超声波洗滌用的振蕩器如表 2 中的 2 及 3, 它們均由电子工学的真空管发振器发动, 适用于液体及固体的媒質。至于在气体中傳播的, 由于技术上的限制, 目前尚无适当的振源。这些振蕩器本身的振幅只有数微米, 如果要获得振幅为数十微米至百微米的超声波, 需要将振蕩器与特殊的机械振幅扩大装置接連。表 2 中 2 振蕩器的換能效率最大。驅

动 1 及 2 的电源，目前使用最大为 2 ~ 3 瓩的发振器。发振器的形式一般用推拉式哈特里电路（Hartley Circuit），主要是要求发振频率与共振频率一致，并要便于调整 and 效率高而省电。

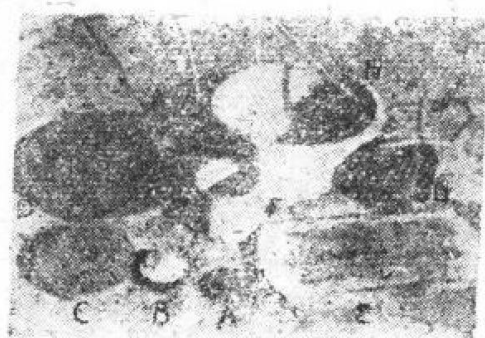


图 3 电致伸缩式钛酸钡振荡器

号数	形 状	尺 寸(毫米)	共振频率(千赫芝)	
			厚度方向共振	直径方向共振
A	圆板形	(直径) × (厚) 20 φ × 2	1200	120
B	圆板形	20 φ × 6	400	120
C	圆板形	50 φ × 6	400	57
D	圆板形	80 φ × 6	400	38
E	圆板形	100 φ × 6	400	—
F	圆筒形	(外径) × (厚) × (高) 38 × 4 × 30	厚度方向共振 600	圆周方向共振 40
G	圆筒形	38 × 3 × 30	800	40
H	圆筒形	65 × 6 × 30	400	20

表 2 中的钛酸钡振荡器是以 BaCO_3 与 TiO_2 粉末混合加压制成的具有一定形状的烧结陶瓷，这种陶瓷的微结晶的偏振轴的排列很不规律，成等方性。如果加以一个强力的直流电场，使这些偏振轴全部按电场方向排列时，这种陶瓷能在电场方向上伸长 0.67%，在其垂直方向上收缩 0.33%。但实际的伸缩值小于这个理论值。这种现象称为电致伸缩效应。其伸缩值与电气变位的平方成比例。电气变位使电致伸缩值呈现蝶型曲线。在陶瓷上加以高偏振电压后，便会产生与残余偏振一起剩为某一数值的残余伸缩；若再加以交流电压，即发生机械振动。因此，它可用作振源。钛酸

钽陶瓷的导电系数非常大，静电容量也非常大，电阻却非常低，因此容易使用。但这种电致伸缩特性对温度变化很敏感，在120°C左右即成为居里点，超过此温度后，即失去强导电性，因而不能使用。这是钽酸钡陶瓷的缺点。表2中的镍、铁铝合金（Al 12%，Fe 88%）、铁素体等为强磁性材料，它们磁化时容易变形，发生磁致伸缩现象。

这种磁致伸缩与上述电致伸缩一样，磁场变化时，强磁性材料产生伸缩而作机械振动，因而也可用作发生超声波用的振源。

利用超声波进行探测的技术在第一次世界大战后有很大发展，第二次世界大战后，超声波则开始应用到工业中。镍、铁铝合金及钽酸钡陶瓷的磁致伸缩和电致伸缩性能的改善与电子技术的发展，使有可能制成强力的超声波发生器，它已得到了广泛的应用。用它作能源应用到各种工业技术中去的情况如表3所示。

超 声 波 的 应 用 范 围

表 3

应 用	应 用 实 例
通讯	水中通讯
探测	探测鱼群，探测，金属探伤，延迟回路，流速计，液面计，粘度计，浓度计，厚度计，测定弹性系数，测定高分子聚合度
应用于金属	超声波机械加工，超声波放电加工，电焊，焊接，切削加工，拉丝，热处理，金属组织的微细化，防止误差，混合异种金属，分散
分散、乳化作用的应用	混合搅拌，均匀分散，制造乳化液，超声波洗涤，酸洗，制造电子显微镜试样
凝聚作用的应用	气体中微粒的凝聚（超声波收尘），液体中微粒的凝聚（反应生成物的凝聚分离，工厂用水及废水处理）
脱泡作用的应用	电镀，电气铸造，熔融金属脱气，除去液中气体
化学作用的应用	促进化学反应，促进催化作用，促进聚合，聚合分解和提出，含浸染色，漂白
应用于生物、医学	杀菌，治疗神经痛、腰痛、关节炎等，诊断和治疗癌症，用作外科手术刀

（岳宗摘译自日本“化学技术”1959年，第8期，49~51页）

鈦酸鋇陶瓷与強力超声波

日本 三浦 葆

1~20瓩的強力超声波装置在工业上应用范围很广，由鐘表、軸承、透鏡等的零件的洗滌到超声波加工、作业以及由洗煤廢水回收煤粉等各个方面。因此，必須設計适用、經濟的超声波装置。用鈦酸鋇陶瓷作振蕩器对上述超声波应用的頻率范围能发生最高功率，同时根据頻率高低可以制成各种适当的形状和振动形态。在实际应用时除頻率外，在确定照射力量、照射時間、处理体积、强度分布、液体內的損失、处理容器等方面，也必須根据要求确定适合的振蕩器的形状、尺寸和装置。鈦酸鋇陶瓷除換能效率高之外，还可以适应上述复杂要求。

图1所示为发生強力超声波用的晶片振蕩器。

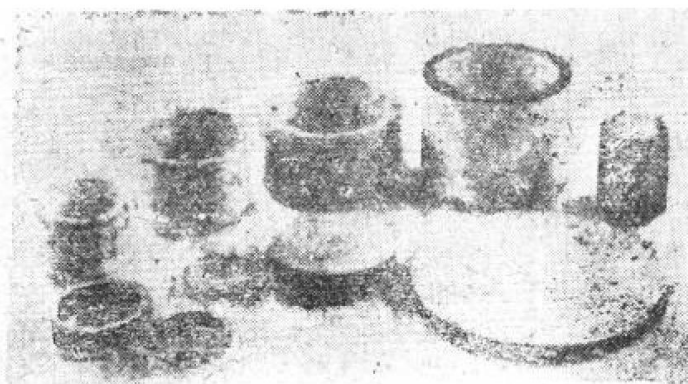


图1 強力超声波用的晶片振蕩器

一、鈦酸鋇陶瓷

1. 成分及性質

鈦酸鋇陶瓷一般是將 BaCO_3 和 TiO_2 以1:1的混合漿制成适当

形状在約 $1,400^{\circ}\text{C}$ 高温下燒結制成的陶瓷，它和水晶、酒石酸鉀鈉和磷酸銨等压电材料不同，一方面它是多結晶質，同时它有显著的压电性質，其特征如下：

1. 导电率极高，振蕩器内部阻力小；
2. 用电压处理在电场方向可制成偏振軸，因此可制成各种形状的功率高的振蕩器；
3. 因为是人造材料，不受大小和形状的限制；
4. 耐湿性极高；
5. 机械性能好，每一單位面积可耐100公斤的拉力和500公斤的压力。

它和其他压电材料的各种压电常数如表 1 所示。但是这种鈦酸鋇陶瓷(BaTiO_3)在 120°C 和 0°C 左右具有体积变化点，在接近常温的导电系数、电气-机械結合系数或頻率常数的温度特性不很好，因此最近在快結晶时用Ca或Pb代替部分Ba作为 $(\text{Ba}-\text{Ca})\text{TiO}_3$ 或 $(\text{Ba}-\text{Pb})\text{TiO}_3$ 的固溶体材料，以改善其性能。因此在接近常温时要求高的电气-机械結合系数的情況下，最好用鈦酸鋇陶瓷；要求具有低的温度系数时，用鈦酸鋇陶瓷的固溶体为最好。

表 1

材 料	密 度 ($\text{kg}/\text{m}^3 \times 10^{-3}$)	彈 性 系 数 ($\text{m}^2/\text{N} \times 10^{11}$)	导电系数	电气-机械結合系数
酒石酸鉀鈉	1.77	6.7	500	0.78
水晶	2.65	1.27	4.6	0.093
磷酸銨	1.80	5.3	15.6	0.288
磷酸鉀	2.31	4.85	22.2	0.29
电石	3.10	0.61	7.52	0.092
鈦酸鋇	5.90	110	1800	0.45

图 2、图 3 和图 4 表示鈦酸鋇陶瓷的导电系数、頻率常数、电气-机械結合系数的温度特性，(A)为 BaTiO_3 ，(B)为 $(\text{Ba}-\text{Ca})\text{TiO}_3$ ，(C)为 $(\text{Ba}-\text{Ca}-\text{Pb})\text{TiO}_3$ 的特性。

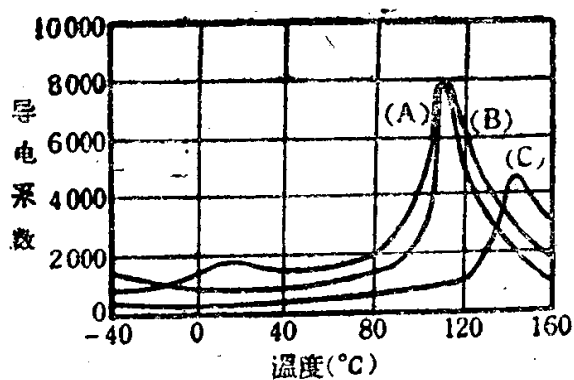


图 2 导电系数的温度特性

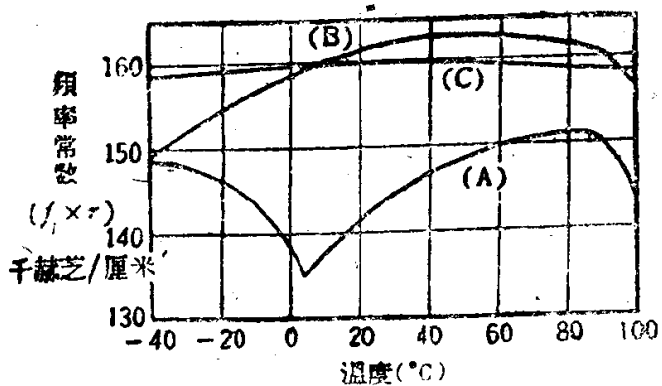


图 3 频率常数的温度特性

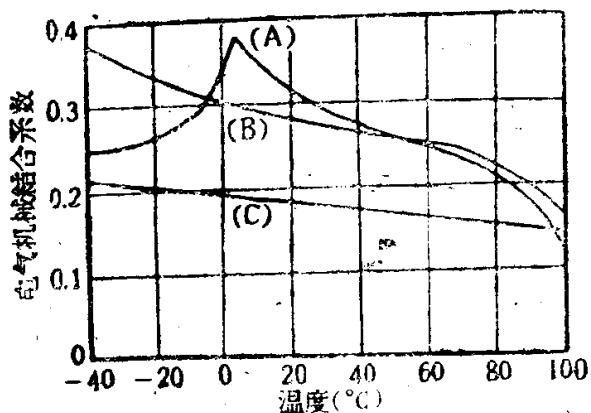


图 4 电气-机械结合系数的温度特性

在常溫的压电常数及其他常数如表 2。

表 2

常 数	材 料	A	B	C
导电系数		1800	1000	600
密度		5.5	5.4	5.3
彈性系数		0.88	1.00	1.06
电气-机械結合系数		0.35	0.28	0.22

2. 电气声响特性

振荡器的电气声响特性在空气中及水中求出其传导。即振荡器的共振频率附近的传导在复数平面划一圆，由此圆线求出共振频率 f_r 与反共振频率 f_a ；动传导 $\dot{Y}_{mo}$ 及制动传导 $\dot{Y}_d$ 。其等价回路如图 5 所示。回路常数 C_d 、 L' 、 C' 及 R' 可由下列关系式导出：

$$\dot{Y}_{mo} = \frac{1}{R'}, \quad \dot{Y}_d = \omega C_d$$

$$\omega_r^2 = \frac{1}{L'} \left(\frac{1}{C'} - \frac{1}{C_d} \right), \quad \Delta f = f_a - f_r$$

R' 、 C' 及 L' 与声响常数 r 、 s 及 m 之间的关系如下：

$$R' = \frac{r}{A^2}, \quad C' = \frac{A^2}{s}, \quad L' = \frac{m}{A^2}, \quad A = \sqrt{2\pi m \Delta f \dot{Y}_{mo}}$$

这里 r 为机械强度， m 为质量， s 为劲度， A 为强度系数。这些之中知道一个其他均可计算出来，一般是先求出传导再进行计算，其测定法一般是用瓦格纳接地的维恩电桥法。此外声响效率 η 是以损失角为 δ ，水中的动传导为 $\dot{Y}_{mo}$ ，空气中的动传导为 $\dot{Y}_{mo}$ ，公式如下：

$$\eta = \eta_{em} \times \eta_{ma} = \frac{\dot{Y}_{mo}}{\dot{Y}_d \sin \delta + \dot{Y}_{mo} \cot 2\delta} \cdot \frac{\dot{Y}_{mo} - \dot{Y}_{mo}}{\dot{Y}_{mo}}$$

3. 声 响 輸 出

振荡器的声响输出的界限，确定陶瓷的抗拉强度即负荷极限，在液体中时，容许量可达 30 瓦/厘米^2 ，但如强力超声波连续负荷时，容许量由于内部温度上升及偏振迅速降低而下降。

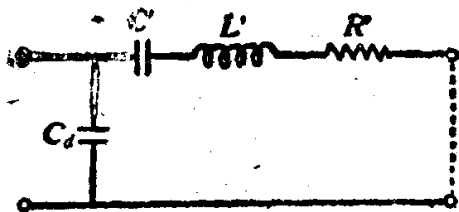


图 5 等价回路

根据T. F. 海特尔(Heuter)等的试验结果，轻负荷具有90%换能效率的钛酸钡陶瓷，在约100伏/厘米的电场强度其声响输出为 2 瓦/厘米^2 时，陶瓷内部的损失是机械摩擦加热 1 瓦/厘米^2 ；导电加热 0.0025 瓦/厘米^2 ，结果换能效率为66%，在工业方面考虑到电源的经济性，振荡器的高频率输入以 $2 \sim 5 \text{ 瓦/厘米}^2$ 左右为适宜。

4. 振荡器的形状与振动形态

普通用的振荡器的形状与形态如表3所示。最基本的形式是由过去水晶时代传下来的圆板如表3图(a)那样两面将电极焊上使其偏振，加上交流电压利用其厚度方向的振动。频率低时，增加板的厚度使陶瓷不易烧成大幅射面积。在使用中内部加热成问题，因此把辐射面分开成柱体使用。如表3中的图(b)方形，但柱体过长时偏振困难，因此采用表3中图(c)及(a)的方法。

表3中的图(c)是将容易偏振的柱体数个重迭起来，每隔一个偏振为负反馈，同时向负反馈通交流电压使成为一个整体的励振器。用此方法重迭的柱体一部分也可考虑用金属代替，但金属的膨胀系数不同，会因连续加热而减低负荷量。

BaTiO₃陶瓷振荡器的种类

表 3

形状	振动方式	相当于电致伸缩系数	频率	尺寸范围	
板形	厚度共振	$d_{33} - 190$ $\times 10^{-12} \text{m/V}$	$f \approx \frac{2350}{t}$ <1000千赫芝 >200	$2r$ 20~120毫米 $t < 12$	(a) 
柱形	纵共振	d_{33}	$f \approx \frac{2000}{l}$ <40千赫芝	$2a(2r)$ 30~60毫米 $l < 50 \sim 30$	(b) 
复合柱形	纵共振	d_{33}	$f \approx \frac{2000}{l}$ <10千赫芝	$2a(2r)$ 30~60毫米 $l < 20$	(c) 
方形	边共振	$d_{31} = 18$ $\times 10^{-12}$	$f \approx \frac{2000}{l}$ >13千赫芝	$l < 150$ 毫米 $t < 20$	(d) 
圆弧形	圆弧共振	d_{31}	$f \approx \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^2}$ $\times \frac{4000}{2\pi r}$ >15千赫芝 <50千赫芝	$2r <$ 120毫米 $l < 40$	(e) 
圆筒形	圆筒共振	d_{31}	$f \approx \frac{4000}{2\pi r}$ <40千赫芝 >10千赫芝	$2r >$ 120毫米 $l < 40$	(f) 
球形	厚度共振	d_{33}		$2r <$ 100毫米 $l < 100$	(g) 

表 3 中的图(d)是容易获得特低频率的方形的厚度方向偏振, 且将交流电压通到其厚度方向, 利用其与直角边方向的共振, 这时磁致伸缩系数与上述比较降低60%左右。 l 、 w 两边的尺寸接近时发生结合振动以高频率的共振为主导, 因此必须利用它。

表 3 中图(e)的圆弧形、图(f)的圆筒形是方形的变形, 用于厚度共振, 除力量集中的特殊用途外, 更重要的是适用于发生径向共振的低共振频率。

圆弧形的共振频率公式中 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 相当于圆筒形。半圆形 $\alpha = \pi$ 时, 与同半径圆筒形比较其共振为 $\sqrt{2}$ 倍, $\alpha = 2/3\pi$ 时, 其共振为 $\sqrt{13/4}$ 倍。例如用半径平均为60毫米、 $\alpha = 90$ 毫米的半圆弧形可以获得20千赫芝的共振频率。

用表 3 中的图(g)的球面形也可把能量集中。

二、钛酸钡陶瓷强力超声波装置在工业中的利用

关于超声波的物理、化学作用的研究历史很早, 超声波能量在工业中的应用问题, 也有许多试验研究, 但是由于缺乏适当的换能器, 实际应用不多。由于镍和铁铝合金等磁致伸缩式振荡器换能效果不良, 使用的频率实际上只限于50千赫芝以下的, 此外, 天然水晶有尺寸限制, 很难发出强声波, 而用钛酸钡陶瓷可以解决过去用的换能器材料的种种困难, 因此对超声波技术有了新的发展。超声波技术用于工业方面的价值如下:

1. 具有高频率可以把能量集中;
2. 具有很大加速度(为重力加速度的 10^5 倍);
3. 由于空化作用, 在媒质中发生气泡, 据此发生局部大的压力变化(数千气压), 可以产生排气作用;
4. 由于空化作用, 使排气气体活性化, 可以产生氧化作用和其他化学作用;
5. 在两个介质的界面上, 由于声波的辐射压力, 产生激烈的机械搅拌, 可以发生乳化、搅拌、混合等作用。

因有上述特性, 超声波可以广泛应用于化学工业、机械工

业、酿造和医疗等方面，兹将应用实例列举如下。

1. 超声波洗涤

用超声波洗涤，根据用途不同，其频率可为200~500千赫芝，可用50瓦至数瓩的大型装置。图6为20千赫芝、100瓦超声波发生器的电路，用100千赫芝可以获得1瓦/厘米²的超声波，用水晶需要10千伏左右，而用钛酸钡陶瓷仅需100伏左右。

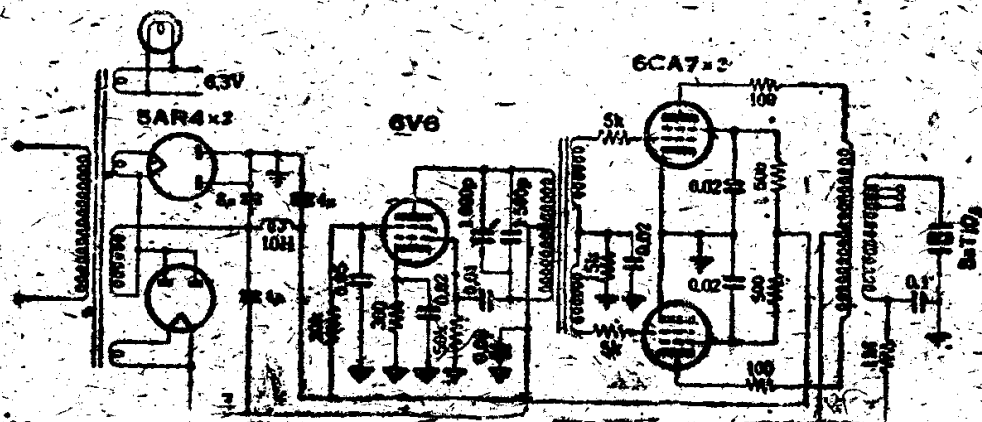


图6 20千赫芝、100瓦超声波发生器电路图

超声波的洗涤效果，与用其他各种洗涤法的效果比较如图7，从图可以看出超声波洗涤的效果是多么优越。

另外将10×10×3毫米³试块内直径为0.5毫米孔中的污腻

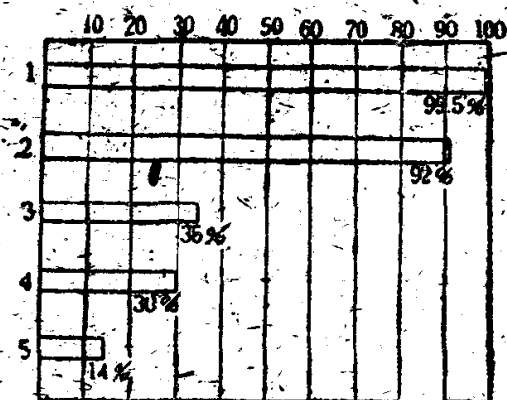


图7 超声波洗涤与其他洗涤法比较

1—超声波洗涤；2—手工洗涤；3—三氯代乙烯蒸汽洗涤；4—机械振动（浸渍）洗涤；5—压力洗涤