

——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

53.17
37
3

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)

建筑工程部技术情报局出版

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 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)

(北京市書局出版业营业許可証出字第052号)

目 录

超声波发生法	(1)
--------------	-------

钛酸钡陶瓷与強力超声波	(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. 利用超声波进行縫焊和点焊	(61)
-----------------------	--------

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

1. 用超声波和 γ 綫测定水泥熟料的气孔率和燒結度	(68)
---	--------

2. 用超声波檢驗瀝青混凝土	(80)
----------------------	--------

3. 用超声波檢驗塑料板	(87)
--------------------	--------

4. 用超声波脉冲方法檢驗塑料	(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評述	(107)
-------------------------------	---------

7. 用超声波研究材料的組織	(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. 用声波收尘的經驗	(144)
-------------------	---------

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

4. 用超声波强化去污和酸性洗滌	(153)
------------------------	---------

5. 用超声波沉淀氫氧化鎂悬浮液	(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

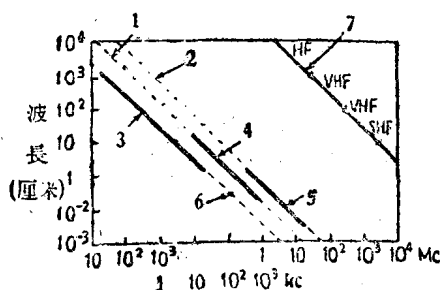


图1 空气、水、金属中声波波长与频率的关系
(实线表示普通使用范围)

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

表 1

各种媒質的彈性波特性

媒 質	縱波速度 (千赫芝) $\frac{C}{\rho}$	密 度 (克/厘米 ³) ρ	声响阻抗 $\times 10^5 \rho \times C$	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	鋁	錫	錳	
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	2	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	1	5	0					
鉛	2.13	11.4	2.73	100	80	79	55	61	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	31	40	0								
聚苯乙稀	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													

編 号	振 源	振 源 物 質	振源发生的频率 (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	鉄酸鋇	30~10000
3	压电式振蕩器	(a) 水晶	100~50000
		(b) 酒石酸鉀鈉	0.2~100



图 2、磁致伸縮式鎳片振蕩器

編 号	尺 寸		共振频率 (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瓦的发振器。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) 20φ×1	1200	120-
B	圆板形	20φ×6	400	120
C	圆板形	50φ×6	400	57
D	圆板形	80φ×6	400	38
E	圆板形	100φ×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

鋇陶瓷的导电系数非常大，靜电容量也非常大，电阻却非常低，因此容易使用。但这种电致伸縮特性对溫度变化很敏感，在 120°C 左右即成为居里点，超过此溫度后，即失去强导电性，因而不能使用。这是鈦酸鋇陶瓷的缺点。表2中的鎳、鉄鋁合金（Al 12%，Fe 88%）、鉄素体等为强磁性材料，它們磁化时容易变形，发生磁致伸縮現象。

这种磁致伸縮与上述电致伸縮一样，磁場变化时，强磁性材料产生伸縮而作机械振动，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，超声波則开始应用到工业中。鎳、鉄鋁合金及鈦酸鋇陶瓷的磁致伸縮和电致伸縮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 圍

表 3

应 用	应 用 实 例
通訊	水中通訊
探測	探測魚羣，探測，金屬探伤，延迟回路，洩速計，液面計，粘度計，濃度計，厚度計，測定彈性系数，測定高分子聚合度
应用于金屬	超声波机械加工，超声波放电加工，串焊，焊接，切削加工，拉絲，热处理，金屬組織的微细化，防止誤差，混合異种金屬，分散
分散、乳化作用的应用	混合攪拌，均匀分散，制造乳化液，超声波洗滌，酸洗，制造电子显微鏡試样
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，工厂用水及廢水处理）
脫泡作用的应用	电鍍，电气鑄造，熔融金屬脫气，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，聚合分解和提纯，含浸染色，漂白
应用于生物、医学	杀菌，治疗神經痛、腰痛、关节炎等，診斷和治疗癌症，用作外科手术刀

鈦酸鋇陶瓷与強力超声波

日本 三浦 謙一

1~20瓩的強力超声波裝置在工業上應用範圍很廣，由鐘表、軸承、透鏡等的零件的洗滌到超声波加工、作業以及由洗煤廢水回收煤粉等各个方面。因此，必須設計適用、經濟的超声波裝置。用鈦酸鋇陶瓷作振蕩器对上述超声波應用的頻率範圍能發生最高功率；同時根據頻率高低可以制成各種適當的形狀和振動形態。在實際應用時除頻率外，在確定照射力量、照射時間、處理體積、強度分布、液體內的損失、處理容器等方面，也必須根據要求確定適合的振蕩器的形狀、尺寸和裝置。鈦酸鋇陶瓷除換能效率高之外，還可以適應上述複雜要求。

圖1所示為發生強力超声波用的晶片振蕩器。



圖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的混合漿制成適當

形状在約 $1,400^{\circ}\text{C}$ 高溫下燒結制成的陶瓷，它和水晶、酒石酸鉀鈉和磷酸鉍等压电材料不同，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，振荡器内部阻力小；
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荡器；
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，在接近常溫的导电系数、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。因此在接近常溫时要求高的电气-机械結合系数的情況下，最好用鈦酸鋇陶瓷；要求具有低的溫度系数时，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	0.18
水晶	2.65	1.27	4.5	0.093
磷酸鉍	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	5.0	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-机械結合系数的溫度特性，(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。

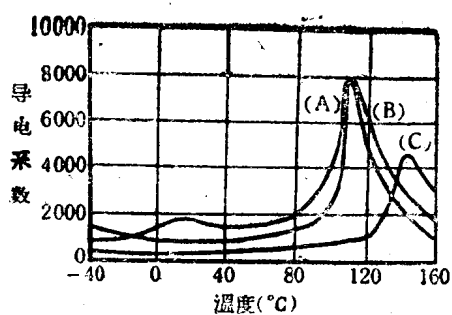


图 2 导电系数的温度特性

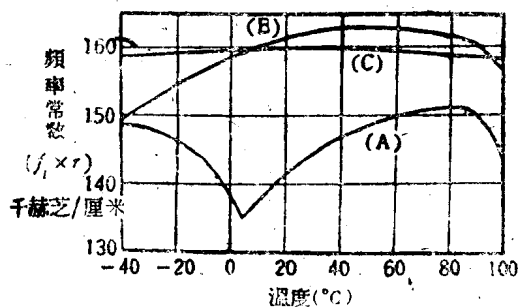


图 3 频率常数的温度特性

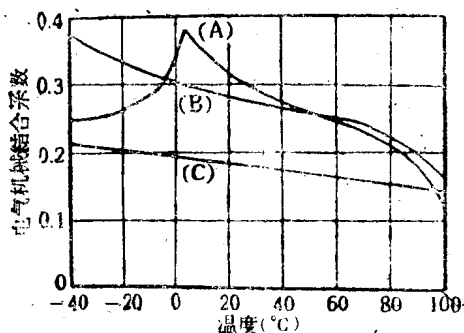


图 4 电气机械结合系数的温度特性

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

振蕩器的电气声响特性在空气中及水中求出其傳导。即振蕩器的共振頻率附近的傳导在复数平面划一圓，由此圓綫求出共振頻率 f_r 与反共振頻率 f_a 、动傳导 $\dot{Y}_{mo}$ 及制動傳导 $\dot{Y}_d$ 。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 之間的关系如下：

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

这里 r 为机械强度， m 为質量， s 为勁度， A 为强度系数。这些之中知道一个其他均可計算出来，一般是先求出傳导再进行計算，其測定法一般是用瓦格納接地的維恩电桥法。此外声响效率 η 是以損失角为 δ ，水中的动傳导为 $\dot{Y}_{mo}$ ，空气中的动傳导为 $\dot{Y}_{mo0}$ ，公式如下：

$$\eta = \eta_{em} \times \eta_{ma} = \frac{\dot{Y}_{mo}}{\dot{Y}_d \sin \delta + \dot{Y}_{mo} \cot 2\delta} \cdot \frac{\dot{Y}_{mo0} - \dot{Y}_{mo}}{\dot{Y}_{mo0}}$$

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，但如强力超声波連續负荷时，容许量由于内部温度上升及偏振迅速降低而下降。

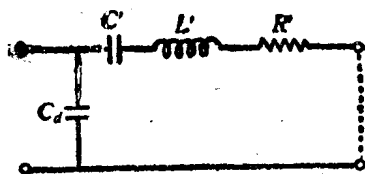


图 5 等价回路

根据T. F. 海特尔(Heuter)等的試驗結果，輕負荷具有90%換能效率的鈦酸鋇陶瓷，在約100伏/厘米的电場强度其声响輸出为2瓦/厘米²时，陶瓷内部的損失是机械摩擦加热1瓦/厘米²；导电加热0.0025瓦/厘米²，結果換能效率为66%，在工业方面考虑到电源的經濟性，振荡器的高頻率輸入以2~5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傳下来的圓板如表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。頻率低时，增加板的厚度使陶瓷不易燒成大幅射面积。在使用中内部加热成問題，因此把幅射面分开成柱体使用。如表3中的图(b)方形，但柱体过長时偏振困难，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，每隔一个偏振为負反饋，同时向負反饋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屬代替，但金屬的膨胀系数不同，会因連續加热而減低負荷量。

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	$d_{33} \sim 190$ $\times 10^{-12} \text{ m/V}$	$f \approx \frac{2350}{t}$ <1000千赫芝 >200	$2r \sim 20$ 120毫米 $t < 12$	(a) 
柱形	纵共振	d_{33}	$f \approx \frac{2000}{l}$ <40千赫芝	$2a(2r) \sim 30$ ~ 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	$2a(2r) \sim 30$ ~ 60 毫米 $l < 20$	(c) 
方形	边共振	$d_{31} \sim 18$ $\times 10^{-12}$	$f \approx \frac{2000}{l}$ >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、 $\alpha = 90^\circ$ 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)的球形面也可把能量集中。

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

1. 超声波洗滌

[illegible]

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。

Grade	Percentage
1	99.5%
2	92%
3	35%
4	30%
5	14%

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