

超声换能器材料

〔美〕 O. E. 马蒂阿脱 编

2

科学出版社

D656/29

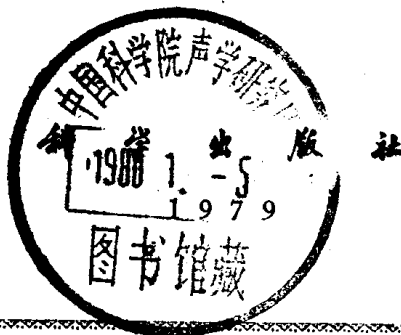
71.562
465
4

超声换能器材料

〔美〕O. E. 马蒂阿脱 编

林仲茂 施仲坚 孙承平等 译

D656/15



4010059

内 容 简 介

本书集中叙述了适用于低频段和高频段(100MHz 以上)的各种近代超声换能器(即磁场换能器和电场换能器)材料,对于各种材料的基本换能特性,尤其是作为超声换能器和声传播介质时的主要性能指标及优缺点都作了详细介绍,并列出了有关材料特性常数和图表。

全书共分三章:第一章是磁致伸缩材料(包括金属、合金和铁氧体);第二章是压电晶体和压电陶瓷材料;第三章是蒸镀和溅射的薄膜材料。

本书可供从事换能器材料和声学,特别是超声专业的高等院校师生以及有关科研技术人员参考。

O. E. Mattiat ed.

ULTRASONIC TRANSDUCER MATERIALS

Plenum Press, 1971

超 声 换 能 器 材 料

[美] O. E. 马蒂阿脱 编

林仲茂 施仲坚 孙承平等译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 11 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1979 年 11 月 第一次印刷 印张: 6 1/4

印数: 0001—5,300 字数: 140,000

统一书号: 13031·1111

本社书号: 1561·13—3

定 价: 0.95 元

译 者 的 话

O. E. 马蒂阿脱主编的《超声换能器材料》一书,是由在超声换能器材料方面具有世界权威的三位专家撰写的。内容大多是这三位作者多年来的工作经验和成果。本书篇幅虽然不多,但阐述精辟,对换能器的物理基础和近代超声换能器材料的性能都作了详细介绍,具有一定的参考价值。

早在 1973 年,因工作需要,我们已把本书译出。近几年来,在日常工作交往中,深感目前国内这方面的书籍较缺,而本书所涉及的材料仍是目前超声换能器方面的主要材料。因此,在应崇福教授指导下,对原译稿进行了整理校订出版,以供读者参考。

本书第一章由林仲茂、罗曾义、侯立琪同志翻译,第二章由施仲坚、刘金龙、翁文生、胡大兴同志翻译,第三章由孙承平同志翻译。由于水平所限,译文一定有不妥之处,希望读者批评指正。

译 者

1978 年 10 月

4010059

• 1 •

序 言

近年来, 超声换能器材料的研制已取得显著的进展。在现代技术中, 超声换能器的应用不断向更高的频段发展。这个领域的进展是特别迅速的, 但有关这课题的文章和著作分散在国内外许多科技杂志上。虽然关于超声学, 特别是超声换能器(显然在超声换能器中, 材料起着重要作用)已出版了一些好书, 然而现在尚无一本全面的书, 能代表现代超声换能器材料的目前水平。本书试图填补这个空白, 全面评论这个课题。

这里并不企图包括理论上能做成超声换能器的所有材料, 但是, 对于在技术上很重要和本身具有电声换能器性质的材料, 即磁致伸缩材料、电致伸缩材料或压电材料, 都已包括在内。本书分为三部分, 它们多少反映了技术应用上重要的超声换能器材料的历史发展。

第一章论述磁致伸缩材料, 即磁致伸缩金属及其合金, 以及磁致伸缩铁氧体(多晶性陶瓷)。在低超声频率范围和换能器强度特别重要的一些场合, 金属磁致伸缩材料特别有用。在描述磁致伸缩材料之前, 先介绍磁致伸缩原理、涡流效应、静态与动态效应间的关系和测量方法。本书全部采用有理化 MKS 单位, 并给出了过去采用过的 CGS 单位。

后两章论述有电场效应的材料, 章节是按频率范围来划分的。第二章论述压电晶体和压电陶瓷(严格地说, 后者应称为“电致伸缩”, 因为压电效应是线性的, 而电致伸缩则不然; 可是由于多晶性陶瓷可通过预极化变成线性的, 因而也采用了

压电陶瓷这术语)。它分成下面各节:压电晶体的基本关系、重要的振动模式、铁电性和损耗,最后是各种压电材料特性的实际描述。历史上,工程应用开始于低频段(直到几兆赫),而块状晶体和后来的多晶性陶瓷材料则是根据技术上的需要而发展的。微波频段(又称特超声)仅受到研究工作者的注意。但是目前,技术上对发展极高频范围(大于100兆赫)的超声愈来愈感兴趣,例如超声延迟线、光调制器和光偏转器等领域,故需要分开论述。

第三章集中论述特超声频段的压电换能器材料。这里,材料是和粘接、研磨以及在另一基片上蒸镀和溅射薄膜等特殊工艺密切联系着的。这些工艺的描述包括在第三章里。许多不太适合作低频换能器的材料,在特超声频换能器方面已变得十分重要,而这些材料的发展至今仍非常迅速。

对于超声换能器材料,科学和技术上的兴趣已从磁场换能器(磁致伸缩材料)转移到电场换能器(电致伸缩和压电材料),从低频段转移到更高频段,这种转变可从以下事实反映出来:本书所引用的参考文献,第一章大半是最近十年的,第二章是最近五年的,第三章仅是最近三年的。

O. E. 马蒂阿脱

1970年5月

目 录

第一章 用作换能器材料的磁致伸缩金属和压磁陶瓷·····

····· Y. Kikuchi (1)

1. 引言	1
1.1 超声发生器和检测器	1
1.2 磁致伸缩滤波器	3
2. 磁致伸缩原理	4
2.1 静态磁致伸缩现象	4
2.2 磁致伸缩力	6
2.3 磁致伸缩常数	7
2.4 材料的判据	12
2.5 流体静压力对磁致伸缩的影响	14
2.6 机械应力对磁致伸缩的影响	14
3. 涡流对材料常数的影响	16
4. 静态和动态磁致伸缩现象之间的关系	19
5. 材料测量方法	22
5.1 动阻抗法	22
5.2 在流体静压力下的测量	22
5.3 静态压应力下的测量	23
6. 材料的磁致伸缩特性	24
6.1 镍	24
6.2 镍-铁合金	30
6.3 铝-铁合金	32
6.4 其他金属	35
6.5 钴 Ronel	37

6.6 铁氧体	38
6.7 多晶金属中磁致伸缩特性的理论模型	42
7. 大讯号工作的考虑	44
7.1 理论探讨	44
7.2 实验研究	49
参考文献	56
第二章 压电晶体和压电陶瓷 D. Berlincourt(66)	
1. 引言	66
2. 压电学基础	67
2.1 基本作用和线性静态方程	67
2.2 晶体对称性的影响	69
2.3 压电耦合系数	69
3. 压电元件的振动模式	75
3.1 低频模式	76
3.2 高频模式或厚度模式	80
3.3 有效耦合系数——压电谐振子	82
4. 铁电现象	84
4.1 概论	84
4.2 铁电体中的压电现象——压电陶瓷	85
4.3 非线性——畴效应	86
4.4 相变	87
5. 压电材料中的耗散	89
5.1 概论	89
5.2 损耗对换能器效率和功率容量的影响	91
6. 重要压电晶体的参数	95
6.1 较老的压电晶体	95
6.2 较新的压电晶体	97
7. 压电陶瓷的参数	105
7.1 概要	105
7.2 压电陶瓷的老化和高静态应力的效应	115

符号	124
参考文献	127
第三章 100MHz 以上工作的超声器件的压电换能器材	
料和工艺.....A. H. Meitzler (134)	
1. 引言	134
1.1 本章范围.....	134
1.2 采用压电换能器的高频超声器件的等效电路分析	
结果.....	135
1.3 适用于高频应用的换能器材料特性和声介质材料	
特性.....	141
2. 粘接薄片换能器的材料和工艺	150
2.1 单晶材料.....	150
2.2 陶瓷换能器材料.....	163
2.3 高频换能器的粘接工艺和磨抛工艺.....	167
3. 蒸发的和溅射的薄膜换能器	172
3.1 硫化镉薄膜和氧化锌薄膜的电弹特性.....	172
3.2 硫化镉薄膜换能器的蒸发工艺.....	174
3.3 氧化锌换能器的溅射工艺.....	177
3.4 可能用作薄膜换能器的其他化合物.....	182
4. 结束语	184
参考文献	185

第一章 用作换能器材料的磁致伸缩金属和压磁陶瓷

Y. Kikuchi

1. 引言

近四十年来,磁致伸缩材料的研究和发展主要是为了超声波的产生和检测。最近介绍了一些谐振器的应用。我们将给出作为发生器和检测器以及电滤波器的磁致伸缩换能器的一些实例。

1.1 超声发生器和检测器

磁致伸缩振子是用于产生或接收超声波的电声换能器。在超声深度探测器中,脉冲电能激励换能器向水底发射一个超声波,后者从水底反射的回波又被换能器接收,并转换成电能。从声波传输的总时间就可以确定距离(深度)。超声鱼群探测器也是用同样的原理,它从鱼群得到回波。在超声声纳设备中,超声发射和接收的方向通常是水平的,利用其距离和方位可以测定目标位置。

超声换能器产生的声能在工业上有直接应用。在液体媒质中,超声空化能引起物理和化学反应。现在各种用途和大小超声振动器或超声清洗机已经商品化了。

同样超声频的机械振动在工业上也有许多应用。例如硬材料的研磨^[1]、超声铝焊^[2]、金属片的超声焊接^[3,4]和超声拉丝

等^[5]。在这些应用中常用变幅器^[2]将机电换能器的振动振幅作机械放大。

这些应用中的超声频率常为 5 至 100 KHz。在此频率范围内,广泛应用磁致伸缩换能器,而不用电致伸缩或压电换能器¹⁾。磁致伸缩换能器的基本形状如图 1 所示。对实际尺寸的设计应使换能器的整体(即电绕组的芯子)在预定的工作频率产生机械共振^[6,7]。

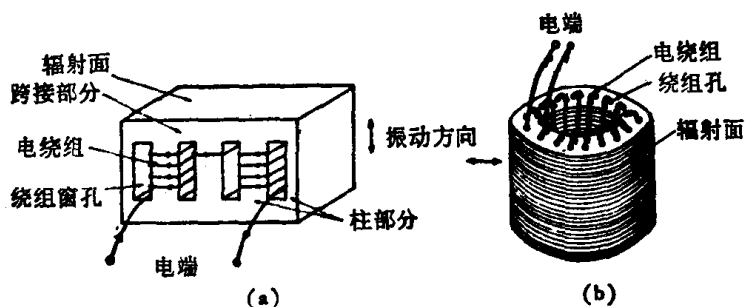


图 1 超声磁致伸缩振子的基本形状
(a) 矩形; (b) 环形

当磁致伸缩材料是金属时,换能器应该用薄片胶粘而成,以使涡流损失很小,这是控制换能器电声效率的一个主要因素^[6,7]。

最近,发明了一种适用的铁氧体磁致伸缩材料,并已在工业上得到了发展。就铁氧体而言,通常有很高的电阻率,甚至在材料不是片状而是用整块的情况下,其涡流损失仍然很小。因此,图 1 形状的换能器可用铁氧体粉末一次模压烧结制成。有人建议用磁铁嵌入或粘接在磁致伸缩部分^[8,9,10],构成偏磁的铁氧体换能器,例如图 2 所示。

1) 近来,在这个频率范围,夹心式压电换能器已有很大发展和应用。

——译者。

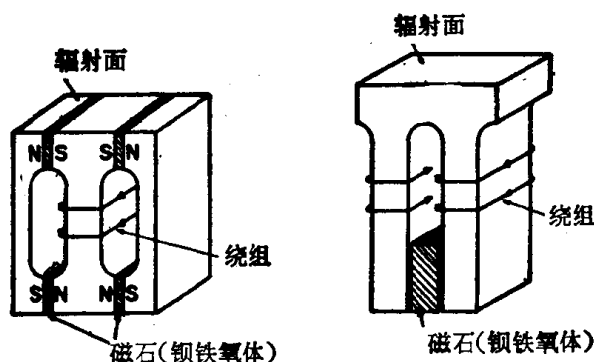


图2 用永久磁铁(图中阴影部分)做偏磁的铁氧体磁致伸缩振子

1.2 磁致伸缩滤波器

有些作者^[11,12]建议将磁致伸缩换能器用作电滤波器组件,但是这些器件的工业应用较有限。然而,最近几年引入了用铁氧体做成的新型磁致伸缩谐振器^[13,14]。Shibayama 等^[14]重

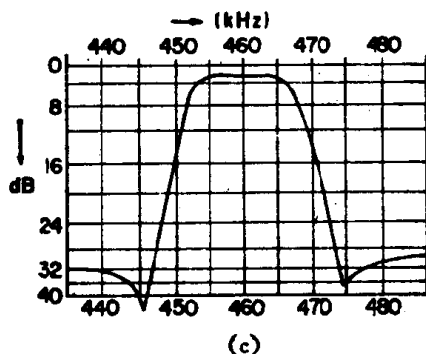
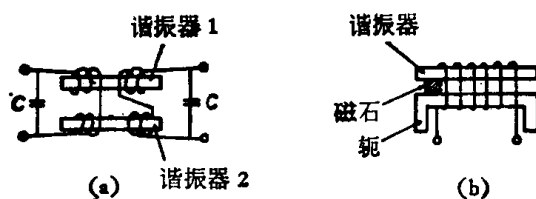


图3 不同类型的磁致伸缩滤波器

- (a) 电路; (b) 具有轭铁和磁石的铁氧体谐振器;
(c) 频率响应测量值的一个例子

新研究了用 Ni-Cu-Co 铁氧体 (Vibro-2) 做纵波谐振器的不同类型的磁致伸缩滤波器^[12,15]。图 3 是这种器件的一个例子及其频率特性。用作滤波器的磁致伸缩谐振器, 其谐振频率的温度系数必须小, 在机械 Q 值高的同时, 必须有一个适当的机电耦合系数 k 。 k 值决定了滤波器的带宽^[16]。对于窄带滤波器, 可用轭铁作为磁分路^[16]来减小谐振器材料的表观 k 值。在这种情况下, 轭铁要采用高导磁率的铁氧体材料。

Thiele^[13] 曾用简单的扭转振子做成另一种类型的窄带磁致伸缩滤波器。Boynton^[17] 报道了由 80 个磁致伸缩滤波器组成的随机波分析器, 滤波器的谐振频率约为 100KHz。

2. 磁致伸缩原理

2.1 静态磁致伸缩现象

通常, 当磁性物质被磁化时, 它的天然长度会发生变化,

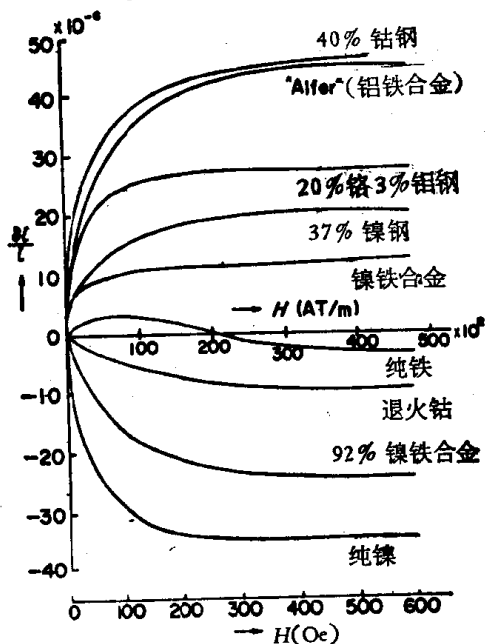


图 4 铁磁材料的静态磁致伸缩

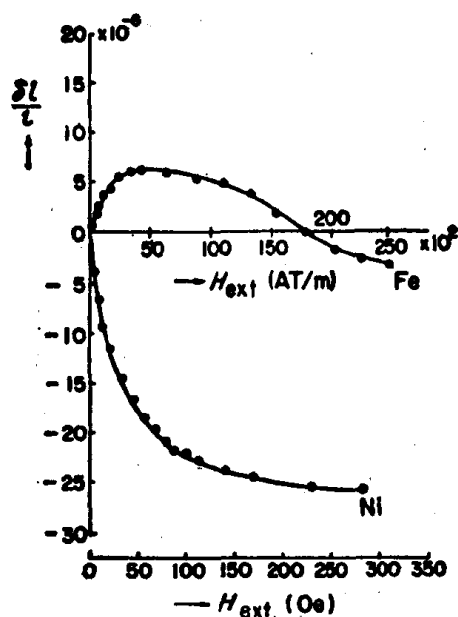


图5 铁和镍的静态磁致伸缩与外部磁场的关系

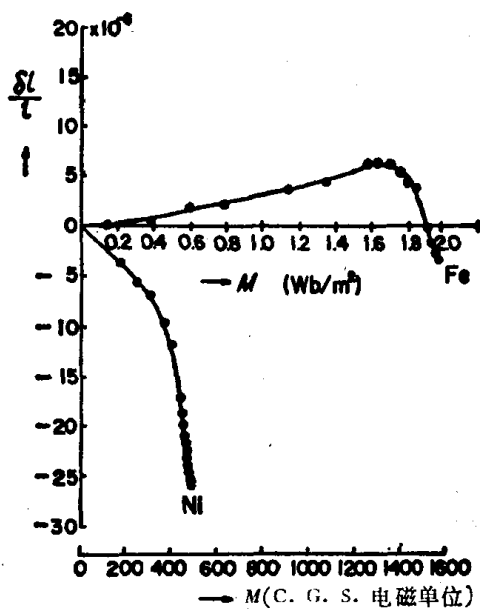


图6 磁致伸缩特性与磁化强度的关系

这一现象称为焦耳效应。图 4 表示一些磁性材料的焦耳效应； l 是物质的长度， δl 是长度的变化量，而 $\delta l/l$ 是相对变化或“应变”， H 是磁场。

观察这些曲线可以发现，在弱磁场时，有些曲线的斜率是陡峭的，而有些是渐倾的。具有较大饱和磁致伸缩的材料，斜率不一定是陡峭的；而具有较小饱和磁致伸缩的那些材料，斜率也不一定是渐倾的。在大多数情况中这些事实是材料磁化率的特征的表现。如果用磁化强度 M 代替 H 来描述焦耳效应，则曲线将出现很大的变化。例如，图 5 和图 6 表示铁和镍的应变曲线，即 $\delta l/l$ 随 H 和 M 变化的曲线。

2.2 磁致伸缩力

2.2.1 磁致伸缩推动力

虽然焦耳效应产生非常小的应变，但却需要很大的外加机械力才能阻止因磁致伸缩而产生的应变。对处于磁化态 M_{DC} 的物质外加磁化增量 ΔM ，则产生一定的长度增量 Δl 。为阻止这一长度的变化，所需的外力 $\Delta \tau$ 为

$$\Delta \tau = -E \cdot \Delta(\delta l/l), \quad (1)$$

其中 E 是杨氏弹性模量； $\Delta(\delta l/l)$ 是相应的静态磁致伸缩增量。例如镍，当 $\Delta M = 0.03 \text{ Wb/m}^2$ (25 电磁单位)， $M_{DC} = 0.3 \text{ Wb/m}^2$ (250 电磁单位) 时，可得到 $\Delta(\delta l/l) \simeq 0.5 \times 10^{-6}$ 。而如果取 $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ($2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)，则 $\Delta \tau$ 将大到 10^5 N/m^2 (1 kg/cm^2)。

这一效应可解释为在物质中产生相应于磁化增量 ΔM 的力，其数值为 $\Delta \tau' = -\Delta \tau$ 。 $\Delta \tau'$ 称为磁致伸缩推动力（有时简称为磁致伸缩应力）。

如果 ΔM 足够小，则 $\Delta \tau'$ 和 ΔM 之间存在着比例关系。因此我们可以将这一现象表成

$$\Delta\tau' = \Gamma\Delta M. \quad (2)$$

系数 Γ 是磁致伸缩动态常数.

2.2.2 磁致伸缩磁通势

当磁致伸缩材料受外应变作用时, 它的磁性就发生变化. 这一效应可解释为机械应变增量 $\Delta\xi$ 在物质内部产生了一个磁通势 $\Delta H'$, 从而引起磁化的相应增加. 用方程表示则有

$$\Delta H' = \Gamma' \Delta \xi, \quad (3)$$

其中 Γ' 是另一个磁致伸缩动态常数, 可以证明, 它就等于 Γ (见 2.3.2 节).

2.3 磁致伸缩常数

2.3.1 动态常数

与物质磁状态有关的物理量是磁场 H , 磁化强度 M , 机械应力 τ 和机械应变 ξ . 首先考虑函数

$$\xi = \xi(\tau, M), \quad (4)$$

其中 M 是 H 和 ξ 的函数:

$$M = M(H, \xi). \quad (5)$$

取方程(4)的全微分, 应变增量 $\Delta\xi$ 可表成^[22]

$$\Delta\xi = \frac{1}{E} (\Delta\tau + \Gamma\Delta M), \quad (6)$$

其中

$$\Gamma = \left(\frac{\partial \tau'}{\partial M} \right)_{\xi}, \quad (7)$$

而

$$\frac{1}{E} = \left(\frac{\partial \xi}{\partial \tau} \right)_M. \quad (8)$$

这样推导出来的动态常数 Γ 称为磁致伸缩率. E 是杨氏模量. 当这一现象按正弦律变化时, 用复数有效值来表示各种

量,则可得到

$$\xi = \frac{1}{E} (\tau + \Gamma M), \quad (9)$$

其中 $\Gamma M = \tau'$ 是方程(2)的动态表达式。同样有

$$\Delta M = \kappa(\Delta H + \Gamma' \Delta \xi), \quad (10)$$

其中

$$\Gamma' = \left(\frac{\partial H'}{\partial \xi} \right)_M, \quad (11)$$

而

$$\kappa = \left(\frac{\partial M}{\partial H} \right)_\xi. \quad (12)$$

动态常数 Γ' 是逆磁致伸缩率。对正弦变化的现象用复数有效值表示,则有

$$M = \kappa(H + \Gamma' \xi), \quad (13)$$

其中 $\Gamma' \xi = H'$ 是方程(3)的动态表达式。

2.3.2 Γ 和 Γ' 之间的互易性

两个磁致伸缩率的表达式(7)和(11)之间的互易性用热力学的方法很容易证明。然而,在方程(9)和(13)所描述的交变现象中,动态磁致伸缩率之间的互易性,用能量守恒定律可证明^[23],仅对它们的绝对值成立。而相位不能证明是可以互易的。只能导出它们是共轭量^[23],即

$$|\Gamma| = |\Gamma'| \quad \text{而} \quad \angle \Gamma + \angle \Gamma' = 0.$$

这个关系指出: (i) $\angle \Gamma = -\angle \Gamma'$ 或 (ii) $\angle \Gamma = \angle \Gamma' \equiv 0$ 。然而,许多实验结果^[23]和由磁畴概念出发的某些考虑^[22]指出,关系(ii)是存在的。因此,我们断定,

$$\Gamma = \Gamma' \equiv |\Gamma| < 0. \quad (14)$$