

压电陶瓷及其应用

山东大学压电铁电物理教研室编

山东人民出版社

压电陶瓷及其应用

山东大学压电铁电物理教研室编

*

山东人民出版社出版

山东新华印刷厂印刷

山东省新华书店发行

*

1974年11月第1版 1974年11月第1次印刷

印数：1—7,500

统一书号：15099·22 定价：0.95元

前 言

“压电陶瓷”虽然叫“陶瓷”，但实际上它不是普通概念的陶瓷，而是一种具有压电效应的多晶体，只是它的生产工艺与普通陶瓷相似，因而被人们称为压电陶瓷。

压电陶瓷的发现已经有三十年左右的历史了，但是，它的广泛应用还是近十年内的事情，因此说它是一种“新材料”也不算过分。目前，压电陶瓷材料品种繁多，其中最常用的有钛酸钡陶瓷、锆钛酸铅陶瓷以及以锆钛酸铅为基础的三元系陶瓷。利用这些材料的压电效应，可以设计、制造各种用途的器件。例如，用于电声器件中的有：陶瓷扬声器、送话器、受话器和拾声器等；用于水下通讯和探测的器件有：水声换能器和鱼群探测器等；用于雷达、电视机以及计算机中的有：陶瓷表面波器件和陶瓷变压器等；用于导航中的有：压电加速度计和压电陀螺等；用于通讯和遥测设备中的有：陶瓷滤波器和陶瓷鉴频器等；用于精密测量中的有：陶瓷压力计和流量计等；用于红外技术中的有：陶瓷红外热电探测器；用于超声探伤、超声清洗、超声显像中的有：陶瓷超声换能器。此外，透明压电陶瓷还广泛应用于电光技术中。总之，在现代电子技术和国防工业中，压电陶瓷已占有很重要的地位。

建国以来，在毛主席的无产阶级革命路线指引下，广大工人和技术人员发扬自力更生、艰苦奋斗的革命精神，在压电陶瓷材料与器件的生产和研制方面，从无到有，由小到大，

取得了很大成绩。特别是经过无产阶级文化大革命，狠批了刘少奇、林彪一伙的反革命修正主义路线，压电陶瓷的发展更加迅速，材料的品种推陈出新，应用的领域日益扩大，形势大好，令人鼓舞。

几年来，我们通过教育革命，在厂校挂钩、开门办学的过程中，深感目前国内有关压电陶瓷资料的缺少，远不能适应当前生产发展的需要。一些工厂曾多次建议我们编写压电陶瓷方面的专业性普及读物。根据教育、科研为无产阶级政治服务、为社会主义建设服务的方针，我们组织力量，着手这一工作。一面深入工厂，向工人师傅和技术人员学习，一面查阅文献资料，在这样的基础上，编成《压电陶瓷及其应用》这本书。

本书是专业性普及读物，主要供具有初中以上文化程度的专业工人阅读。另外，为了兼顾在生产上的需要，书中部分内容作了较为深入的讨论，也可供有关科技人员和专业师生参考。

由于我们的政治水平和业务水平不高，书中一定存有少数缺点和错误，恳切希望读者批评指正，以便再版时修改。

本书在编写过程中，承山东淄博瓷厂、北京七九八厂、中国科学院硅酸盐化学与工学研究所、物理研究所、天津大学、四川大学、广字803部队、武字262部队以及其他有关兄弟单位和同志的大力支持和热情帮助，并对本书初稿提了很多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

编者

一九七三年十二月

内 容 简 介

本书是专业性普及读物。全书共分六章：前两章从压电陶瓷内部结构出发，分析、讨论了它的压电性、取代元素改性、添加物改性以及稳定性等问题；第三章为压电陶瓷的生产工艺（包括新工艺），着重各工序的物理解释；第四章为压电陶瓷的测量，主要介绍“谐振——反谐振”测量方法，以及材料参数的测定；最后两章为压电陶瓷的应用，除较全面地介绍压电陶瓷滤波器的电路结构和电气特性外，对压电陶瓷在电声器件、水声器件、表面波器件、电光调制器件等方面的应用，也作了概述。附录中，介绍了几种常用机电耦合系数的数值表。

本书在内容、文字方面，突出了压电陶瓷的物理机构和理论解释，力求由浅入深，通俗易懂，切合实用，有些内容也作了较深入的讨论。可供具有初中以上文化水平的专业工人阅读，也可供有关科技人员和专业师生参考。

毛主席语录

马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。

人们为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然里得到自由。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

目 录

第一章 压电陶瓷的结构与压电性

§1—1 压电陶瓷的内部结构	1
(一) 压电陶瓷是多晶体	1
(二) 晶体的内部结构	3
(三) 晶体结构随温度变化的情况	8
§1—2 压电陶瓷的自发极化与电畴	10
(一) 自发极化的产生	10
(二) 电畴和电畴的运动	13
(三) 铁电性与电滞回线	17
§1—3 压电效应及压电效应表示式	19
(一) 陶瓷的压电效应	19
(二) 正压电效应表示式	22
(三) 逆压电效应表示式	28
§1—4 压电陶瓷的参数	31
(一) 介电常数	32
(二) 介质损耗	34
(三) 弹性常数	36
(四) 机械品质因子 Q_m	38
(五) 压电常数	38
(六) 机电耦合系数 k	41
(七) 频率常数 N	41

第二章 压电陶瓷的改性

§2—1 压电陶瓷的相图	43
--------------------	----

(一) 相 图	43
(二) 锆钛酸铅固溶体的相图	45
(三) 三元系压电陶瓷的室温相图	52
§2—2 锆钛酸铅陶瓷的取代元素改性	58
§2—3 锆钛酸铅陶瓷的添加物改性	63
(一) “软性”添加物	63
(二) “硬性”添加物	67
(三) 其他添加物	70
§2—4 三元系陶瓷的改性	71
§2—5 实用压电陶瓷的配方举例	75
(一) 陶瓷滤波器的材料配方	75
(二) 水声换能器的材料配方	77
(三) 电声器件的材料配方	77
(四) 高压发生、引燃引爆等材料的配方	78
§2—6 压电陶瓷性能的稳定性	80
(一) 时间稳定性	81
(二) 温度稳定性	84
(三) 现有改善稳定性的途径	90

第三章 压电陶瓷生产工艺

§3—1 配 料	93
(一) 配方的计算	93
(二) 原料的选择和处理	99
§3—2 混合和粉碎	101
§3—3 预 烧	105
(一) 影响固相反应的主要因素	105
(二) 锆钛酸铅陶瓷的生成过程	108
(三) 预烧工艺	110

§3—4	成型与排塑	111
	(一) 成 型	111
	(二) 排 塑	116
§3—5	烧 成	119
	(一) 烧成过程	119
	(二) 晶粒大小和密度与性能的关系	121
	(三) 影响烧成质量的主要因素	125
	(四) 烧成工艺	134
§3—6	上 电 极	137
	(一) 烧渗银层方法	138
	(二) 真空蒸镀方法	141
	(三) 化学沉银和化学沉铜的方法	142
§3—7	极 化	143
	(一) 极化电场	144
	(二) 极化温度	147
	(三) 极化时间	150
	(四) 极化工艺	151
	(五) 高温极化	152
§3—8	压电陶瓷新工艺	154
	(一) 化学方法制备粉料	155
	(二) 热 压	156
	(三) 通 氧	162
	(四) 气氛烧成法	163

第四章 压电陶瓷的测量

§4—1	压电振子的谐振特性与等效电路	165
	(一) 压电振子的谐振特性	165
	(二) 压电振子的等效电路	168

§4—2	“谐振——反谐振”方法的测量线路	173
	(一) 简单的测量线路	174
	(二) 常用的测量线路	175
	(三) 等效电阻 R_1 的测量方法	178
§4—3	压电陶瓷材料主要参数的确定	179
	(一) 陶瓷材料的主要参数	179
	(二) 材料参数 σ 、 k_p 、 Q_m 、 ϵ_{33}^T 和 $\tan\delta$ 的确定	181
	(三) 材料参数 k_{31} 、 S_{11}^E (或 Y) 和 d_{31} 的确定	183
	(四) 材料参数 k_{33} 、 S_{33}^D 、 S_{33}^E 和 d_{33} 的确定	186
	(五) 材料参数 k_{15} 、 S_{55}^D 、 S_{55}^E 、 ϵ_{11}^T 、 ϵ_{11}^E 和 d_{15} 的 确定	188
	(六) 材料参数 k_t 、 ϵ_{33}^E 和 C_{33}^D 的确定	190
	(七) 材料参数 S_{11}^D 、 S_{12}^D 、 S_{13}^D 、 S_{66}^D 、 S_{13}^E 、 S_{66}^E 、 ϵ_{33} 、 ϵ_{31} 和 ϵ_{15} 的确定	191
	(八) 确定 k_t 和 k_{15} 的其他方法	192
§4—4	测量压电常数 d_{33} 的静态方法	196

第五章 压电陶瓷滤波器

§5—1	滤波器的一般性质	199
	(一) 什么叫滤波器	199
	(二) 滤波器的分类	200
	(三) 滤波器的特性	201
§5—2	压电陶瓷滤波器	206
	(一) 单片压电振子的滤波作用	206
	(二) 两片压电振子组合后的滤波作用	207
	(三) 陶瓷滤波器的几种结构型式	209
§5—3	压电振子的振动模式	211

(一) 压电振子的伸缩振动模式	212
(二) 压电振子的厚度切变振动模式	217
(三) 压电振子的弯曲振动模式	217
(四) 压电振子的能阱振动模式	220
§5—4 梯型滤波器的衰耗特性和特性阻抗	225
(一) 理想的梯型滤波器的衰耗特性和特性阻抗	225
(二) 实际的梯型滤波器的衰耗特性	229
§5—5 制作和使用陶瓷滤波器的注意事项	233
(一) 陶瓷滤波器的阻抗	233
(二) 滤波器的激励电平对滤波器特性的影响	233
(三) 陶瓷滤波器的“掉点”	235
(四) 陶瓷滤波器中出现的啸叫声	237
(五) 决定滤波器带宽的主要因素	238
(六) 陶瓷滤波器调整装配中的问题	239
§5—6 陶瓷滤波器中的均衡器	240
§5—7 陶瓷滤波器的主要术语和定义	243
§5—8 陶瓷滤波器的测量	247
(一) 振子的测量	247
(二) 滤波器性能的测量	248
(三) 测量中应注意的几个问题	251

第六章 压电陶瓷的其他应用

§6—1 压电陶瓷电声器件	253
(一) 压电陶瓷送话器	253
(二) 压电陶瓷扬声器	259
§6—2 压电陶瓷水声换能器	261
(一) 夹心型振子	263
(二) 喇叭型振子	265

(三) 圆筒型振子	267
(四) 弯曲振动型振子	270
(五) 增压型振子	271
(六) 球壳型振子	272
§6—3 压电陶瓷在测量仪器中的应用	273
(一) 压电加速度计	273
(二) 压电陀螺	277
(三) 压电传声器	280
(四) 陶瓷压力计	281
(五) 压电流量计	282
(六) 钛酸铅红外热电探测器	283
(七) 其 他	285
§6—4 压电陶瓷变压器	285
(一) 压电陶瓷变压器的工作原理	285
(二) 压电陶瓷变压器的工作特性	288
(三) 压电陶瓷变压器的应用	292
(四) 压电陶瓷变压器的其他型式	296
§6—5 压电陶瓷表面波器件	298
(一) 瑞利表面波	299
(二) 陶瓷表面波的产生和检出	301
(三) 陶瓷表面波延迟线	304
(四) 陶瓷表面波滤波器	307
§6—6 压电陶瓷电光器件	308
(一) 电光调制	309
(二) 压电陶瓷的极化状态	312
(三) 压电陶瓷的电光效应	313
(四) 透明陶瓷电光效应的应用	317
附录一 σ 与 f_{r1}/f_r 关系的数值表	324

附录二	k_p 与 $\Delta f/f_s$ 关系的数值表	325
附录三	k_{31} 与 $\Delta f/f_s$ 关系的数值表	343
附录四	k_{33} 与 $\Delta f/f_p$ 关系的数值表	348
附录五	k_t 和 k_{15} 的数值表	352
附录六	有关化合物的化学分子式与分子量	356

第一章 压电陶瓷的结构与压电性

一块有电极、经过极化处理的压电陶瓷，如果在它的上面加一个力，那么陶瓷片就会产生形变，同时还会产生电效应（如放电或充电现象）。相反，如果在陶瓷片的电极上加一个电压，陶瓷片就会产生形变效应。由于形变而产生电效应，称为正压电效应；由于加电压而产生形变效应，称为逆压电效应。压电效应反映了陶瓷的“压”与“电”之间的线性耦合关系。

为什么压电陶瓷具有压电效应呢？这是由压电陶瓷本身的特殊矛盾所决定的，也就是说，是由它的内部结构所决定的。本章主要从压电陶瓷的内部结构来说明它的自发极化与电畴，以及压电效应产生的原因、压电效应的规律性和表示式等问题。

§ 1 — 1 压电陶瓷的内部结构

（一）压电陶瓷是多晶体

我们把一块压电陶瓷经过研磨、抛光、腐蚀后，放在显微镜下观察，便可以清楚地看出，整个陶瓷体是由一颗颗的小晶粒无规则地“镶嵌”而成的。图 1 — 1 就是某种压电陶瓷放大了 3000 倍的显微照片。

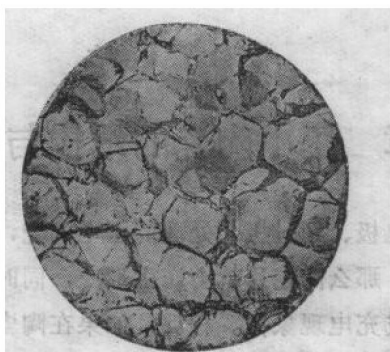


图 1—1 压电陶瓷显微照片 ($\times 3000$)

如果单看一个小晶粒，从实验分析可知，小晶粒内的原子（或离子、分子）是有规则地排列的，也就是说，晶粒内的原子在空间的排列是周期性重复的。图 1—2 表示原子在空间周期性重复排列的一种情况——简单立方晶系。整个晶体就是这样的立方格子在

三维空间内不断重复出现而构成的，这样的小立方格子称为晶胞。晶胞的三个边长，叫做晶格常数。在我们经常遇到的无机物晶体中，晶格常数往往是几个埃的大小（埃的符号为 \AA ， $1\text{\AA} = 10^{-10}$ 米）。

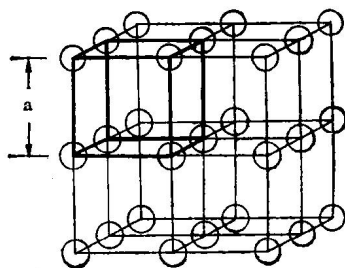


图 1—2 简单立方晶格示意图

从图 1—1 中可以看出，压电陶瓷是由许多小晶粒组成的。每个小晶粒的晶格示意图，如图 1—3 所示。每个晶粒内的原子都是有规则地排列的，但这一晶粒与那一晶粒的晶

格方向则不一定相同，因而，从整体来看，仍是混乱、无规则的。对于这样的结构，我们把它称为多晶体。

(二) 晶体的内部结构

晶体结构的共同特点是晶胞的周期性重复排列。不同种类的晶体，其晶胞的大小、形状和构成晶胞的原子是不同的。

如果从晶胞的形状（即对称性）来区分，客观世界成千上万种晶体可以归纳为三十二种对称类型，其中具有压电性的晶类共有二十种。在这二十种类型中，有十种可能兼有铁电性（关于铁电性将在§ 1—2说明）。因此，压电、铁电晶体的种类实际上是相当多的。

为了描述晶胞，我们用 a 、 b 、 c 分别表示晶胞六面体的三个边长，也就是前面提到过的晶格常数。三个边长之间的夹角用 α 、 β 、 γ 表示。通常，我们把这三个边长和三个夹角称为晶胞参数，用来描述晶胞的大小和形状，如图 1—4 所示。

如果晶胞的三个边长相等，三个夹角均为 90° ，即

$$a = b = c,$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ,$$

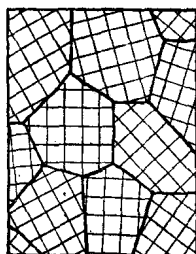


图 1—3 压电陶瓷晶粒的晶格取向示意图

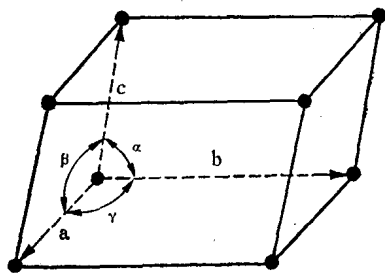


图 1—4 晶 胞

这个晶胞就是一个立方体，称为立方晶胞。由立方晶胞组成的晶体属于立方晶系。

如果晶胞参数是

$$a = b = c,$$
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ,$$

这个晶胞就是一个长方体，称为四方（或四角）晶胞。由四方晶胞组成的晶体属于四方晶系（或四角晶系）。

如果晶胞参数是

$$a = b \neq c,$$
$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ,$$

这个晶胞就是一个菱方体，称为菱方（或三角）晶胞。由菱方晶胞组成的晶体属于三角晶系。图 1—5 分别画出了这三种晶胞的形状。

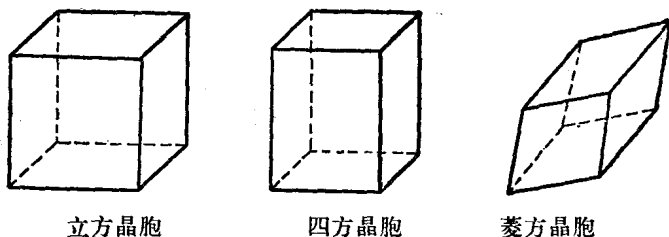


图 1—5 三种晶胞形状

目前应用最广泛的压电陶瓷，例如钛酸钡 (BaTiO_3)、钛酸铅 (PbTiO_3)、锆钛酸铅 [$\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$]、铌酸钾钠 ($\text{K}_{1-x}\text{Na}_x\text{NbO}_3$) 等等，都属于钙钛矿型 (CaTiO_3) 结构。它们的共同特点是：第一，化学分子式的形式相同，都可以写成 ABO_3 的形式。其中：A 可代表两价的正离子，如铅离子 Pb^{2+} 、钡离子 Ba^{2+} 等；或一价的正离子，如钾离子 K^+ 等。B