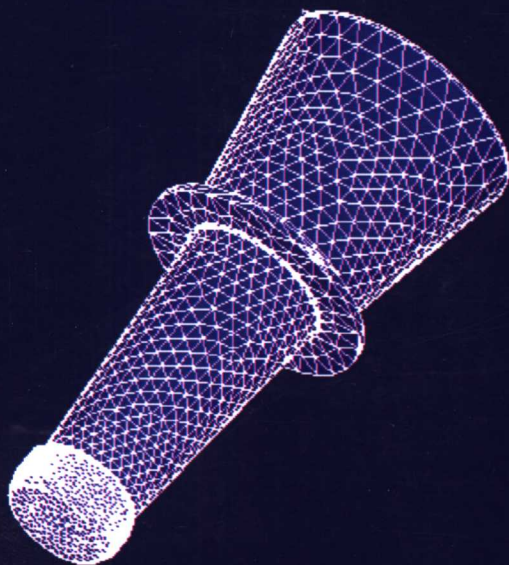


夹心式压电换能器 及其应用

◎ 张云电 著



科学出版社
www.sciencep.com

夹心式压电换能器及其应用

张云电 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了夹心式压电换能器结构、参数、设计、制造、装配和测试方法,重点介绍了夹心式压电换能器在五个领域中的应用:①超声波焊接;②滤心超声清洗;③弯曲振动超声车削;④表面微坑超声加工;⑤循环式多级超声波分散。

本书可作为高等院校机械、汽车、电子、化工、声学等专业的教材,也可供从事超声设备设计、开发、生产、应用和维修的高、中级技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

夹心式压电换能器及其应用/张云电著. —北京:科学出版社,2006. 12

ISBN 7-03-013197-5

I. 夹… II. 张… III. 压电换能器 IV. TB552

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 138033 号

责任编辑:胡 凯 耿建业 / 责任校对:钟 洋

责任印制:安春生 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 12 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 12 月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—2 500 字数: 345 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

1880年，法国物理学家居里兄弟（Jacques Curie 和 Pierre Curie）发现了压电效应。不久，他们又发现了压电晶体同时具有逆压电效应。

夹心式压电换能器是一种电声转换装置，它将压电效应和逆压电效应集于一身：夹心式压电换能器的装配过程是实现压电效应的过程；夹心式压电换能器的使用过程是实现逆压电效应的过程。但是，直到电子管放大器发明以后，压电效应才能用于电声转换工程上，压电换能器才能走出实验室，走进生产应用。

需求是发明之母，在社会需求的强大推动下，人类发明了许多基于压电换能器的新方法、新技术、新工艺和新产品，例如声呐、B超、超声焊接机、超声清洗机、超声粉碎机、超声车床、超声铣床、超声珩磨机、超声研磨机、超声乳化机、超声切割机、激光成型-超声珩铰加工中心、超声电动机、超声洁牙机等智能超声设备。一个多世纪以来，压电换能器已绽放出无数绚丽多姿的花朵。

智能超声设备在国内外有几千种产品，在世界各国广泛的应用范围和发展前景。智能超声设备由超声波发生器、夹心式压电换能器、超声变幅杆、工具、数控系统、软件、机体和机械传动系统等构成。夹心式压电换能器是智能超声设备的核心器件。因此，研究、开发、生产高质量、高可靠性的各种夹心式压电换能器，对开发和生产智能超声设备，推动我国技术进步有着重要的意义。

作者长期从事压电换能器设计、制造和测试工作，先后研制了超声车削装置、超声珩磨装置、超声压光装置、超声推挤装置、表面微坑超声加工装置、循环式多级超声波分散机、滤心超声清洗机、聚焦超声清洗机、夹心式压电换能器数控恒扭矩装配机、压电换能器谐振频率数控修正机、数控激光成型-超声研磨加工中心，取得了一系列成果。

本书的研究得到了国家自然科学基金 [项目编号 50275043]、国家中小企业技术创新基金、浙江省科技攻关项目和浙江省自然科学基金 [Z105528] 的资助，冯晓宇、赵峰、喻家英、李成岩、吕瑞芳、黄文剑、黄仕彪等同志做了大量研究工作，本书还引用了其他同志的成果，在此一并表示衷心的感谢。

愿本书的出版能对相关工程及领域的设计、开发、研制、生产、应用、维修和教学人员有所帮助。本书不当之处，敬请批评指正，以便日后修改。

杭州电子科技大学

张云电

2006年3月

目 录

第一章 压电效应与逆压电效应	1
1.1 压电效应	1
1.2 晶体压电效应的解释	2
1.3 压电陶瓷压电效应的解释	5
第二章 压电材料	10
2.1 压电材料的重要参数.....	10
2.2 压电单晶体.....	19
2.3 压电陶瓷.....	25
2.4 几种新型压电材料.....	28
第三章 压电晶体的工作模式	32
3.1 压电方程与振动模式.....	32
3.2 电场垂直于长度的长度伸缩模式.....	34
3.3 电场平行于波传播方向的厚度剪切模式.....	38
3.4 电场平行于波传播方向的厚度伸缩模式.....	41
3.5 电场平行于长度的长度伸缩模式.....	42
3.6 薄圆片的径向振动模式.....	45
3.7 考虑损耗的压电陶瓷常用振动模.....	49
第四章 纵向振动夹心式压电换能器	59
4.1 概论.....	59
4.2 夹心式压电换能器的理论分析及设计.....	66
第五章 压电换能器制造和装配技术	80
5.1 精密磨削.....	80
5.2 超精密磨削.....	84
5.3 精密研磨和抛光.....	89
5.4 压电换能器装配技术	103
5.5 压电换能器的黏结技术	106
5.6 压电换能器和超声聚能器谐振频率数控修正方法	109
5.7 大功率压电换能器在长时间恶劣工况下的失效形式	112
第六章 功率超声的测试技术	113
6.1 超声波发生器输出功率的测量	113

6.2	声功率的测量方法	115
6.3	换能器参数的测量	117
6.4	位移振幅的测量	126
6.5	变幅杆谐振频率的测量	127
6.6	空化强度的测量	131
第七章	超声波焊接	133
7.1	超声波塑料焊接	133
7.2	超声花边缝合	146
7.3	金属材料的超声焊接	151
第八章	滤芯超声清洗机	159
8.1	滤芯失效形式	159
8.2	滤芯超声清洗机整体方案	164
8.3	滤芯超声清洗机理	166
8.4	滤芯超声清洗声学系统	185
8.5	滤芯超声清洗机机械结构	203
8.6	滤芯超声清洗槽中声场分布	216
8.7	滤芯超声清洗机电气控制系统	220
8.8	超声清洗滤芯试验与清洗工艺	237
第九章	弯曲振动超声车削技术	245
9.1	弯曲振动超声车削装置	245
9.2	弯曲振动夹心式压电换能器	247
9.3	弯曲振动变幅杆	254
9.4	超声车刀	257
9.5	安装与调试	261
第十章	表面微坑超声加工方法	266
10.1	表面微坑超声加工原理	266
10.2	超声加工装置	269
10.3	超声变幅杆与工具的有限元分析	271
第十一章	循环式多级超声波分散机	275
11.1	问题的提出	275
11.2	循环式多级超声波分散机	276
	参考文献	280

第一章 压电效应与逆压电效应

夹心式压电换能器由压电陶瓷片、前后金属盖板、预应力螺栓、金属电极片以及预应力螺栓绝缘套管等组成。

夹心式压电换能器是一种电声转换装置，它将压电效应和逆压电效应集于一身：夹心式压电换能器装配时出现压电效应；夹心式压电换能器使用时出现逆压电效应。因此，夹心式压电换能器是利用压电效应和逆压电效应工作的。

1.1 压电效应

1880年，法国物理学家居里兄弟（Jacques Curie 和 Pierre Curie）发现了压电效应。他们把砝码分别放在许多晶体上，如石英、电气石、罗谢尔盐等，用静电计测量到这些晶体的某些表面上产生了电荷，这些电荷与所加砝码的重量成正比。1881年李普曼从理论上预言存在逆压电效应，居里兄弟进行了实验，证明逆压电效应确实存在。压电效应和逆压电效应是超声学发展史上的重大发现。1921年瓦拉塞克（Valasek）又在酒石酸钾钠晶体（RS）中发现了铁电现象，1935年巴希（Basch）在磷酸二氢钾晶体（KDP）中也发现了铁电现象。经极化处理的铁电材料具有良好的压电性能，例如锆钛酸铅（PZT）压电陶瓷其压电性能优越，机械强度高，易于加工成各种不同的形状和尺寸，又具有非水溶性，遇潮不易损坏，原材料价格低廉，采用不同的形状和不同的电极化轴，能得到所需的各种振动模式，因此有着广泛的应用。

某些电介质（例如晶体、陶瓷、高分子聚合物等）在其适当的方向施加作用力时，内部的电极化状态会发生变化，在电介质的某相对两表面内会出现与外力成正比的符号相反的束缚电荷，这种由于外力作用使电介质带电的现象叫做压电效应。相反，若在电介质上加一外电场，在此电场作用下，电介质内部电极化状态会发生相应的变化，产生与外加电场强度成正比的应变现象，这一现象叫做逆压电效应。

有两种压电效应是很常用的，一种是形变的方向与电场的方向相重合，这种压电效应如图 1-1 所示，称之为纵向压电效应。另一种是形变的方向与电场的方向相垂直，这种压电效应如图 1-2 所示，称之为横向压电效应。

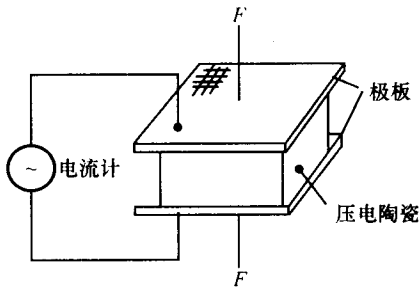


图 1-1 纵向压电效应

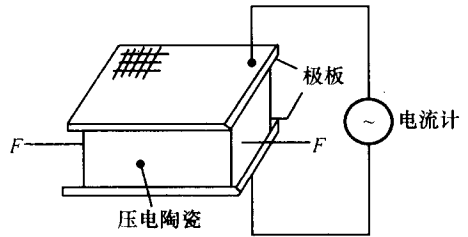


图 1-2 横向压电效应

1.2 晶体压电效应的解释

为了解释晶体的压电效应，我们以 α 石英晶体为例说明如下：

图 1-3 所示为石英晶体的外形图，(a) 为左旋石英晶体，(b) 为右旋石英晶体。因其内部结构的对称性，石英晶体具有规则的几何形状。石英晶体具有三个晶轴，如图 1-4 所示。x 轴称为电轴，沿 x 轴方向施加外力时，在垂于此轴的棱面上会产生最强的电荷；y 轴称为机械轴，沿 y 轴方向施加机械应力时，y 轴方向上不产生压电效应，但有应变产生；z 轴称为光轴，当光沿 z 轴入射时不产生双折射。

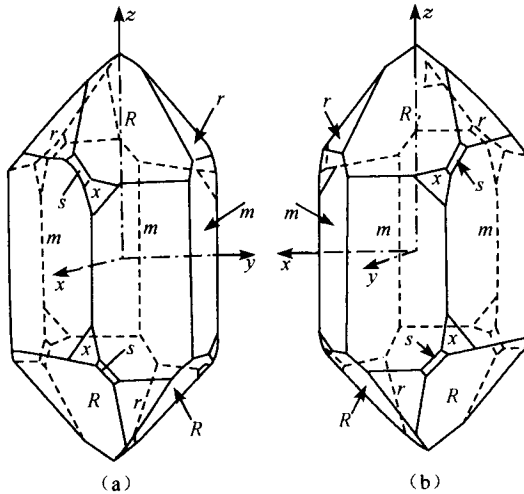


图 1-3 石英晶体外形图
(a) 左旋石英晶体；(b) 右旋石英晶体

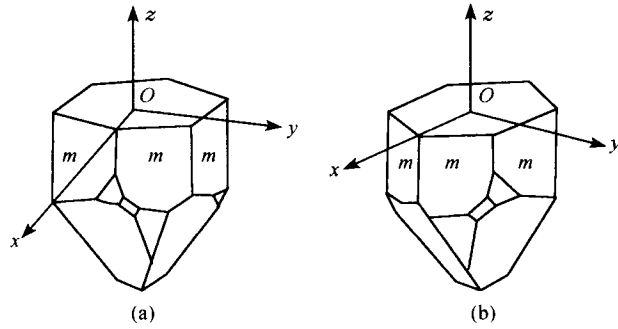


图 1-4 石英晶体的晶轴
(a) 左旋石英晶体；(b) 右旋石英晶体

迈斯纳 (Meissner A) 提出的石英晶体模型可用来解释其压电效应。

石英晶体 (SiO_2) 是由硅离子和氧离子规则排列所组成的, 图 1-5 给出了石英晶体结构的示意图. 这是垂直于 z 轴方向的晶体结构, 大圆表示硅离子, 小圆表示氧离子, 硅离子按左旋方向排列, 硅离子 1 为表层的话, 硅离子 2 的位置深入一些, 硅离子 3 更深一些. 硅离子具有四个正电荷, 氧离子具有两个负电荷, 晶格中离子的电荷正负相抵, 对外呈电中性. 为说明问题, 我们把处于硅离子上边和下边的两个氧离子作为一个带有四个负电荷的氧离子看待, 画成图 1-6(a) 的简图. \oplus 代表 Si^{4+} , \ominus 代表 2O^{2-} , 它们排列在正六边形的顶角上, 这就形成了三个大小相等、互成 120° 夹角的电偶极矩 p_1, p_2, p_3 , 它们的矢量和为零.

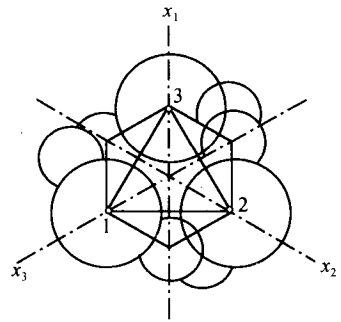


图 1-5 石英晶体结构示意图

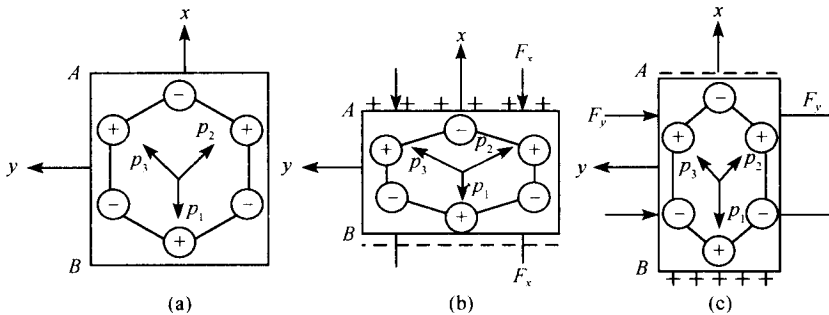


图 1-6 石英晶体的压电效应机理

(1) 图 1-6(b) 表示当石英晶体受到沿 x 轴方向的压力作用时, 晶体沿 x 轴方向产生压缩变形, Si^{4+} 与 2O^{2-} 的相对位置发生变动, 正、负电荷的中心不再重合, 电偶极矩的矢量和在 x 轴上的分量大于零, 在晶体表面 A 上出现正电荷, 在晶体表面 B 上出现等量的负电荷, 这就叫做纵向压电效应. 电偶极矩的矢量和在沿 y 轴方向和 z 轴方向上的分量都为零. 因此在垂直于 y 轴和 z 轴的晶体表面上不会出现电荷.

(2) 图 1-6(c) 表示当石英晶体受到沿 y 轴方向的压力作用时, 晶体沿 y 轴方向产生压缩变形, Si^{4+} 与 2O^{2-} 的相对位置也发生变动, 正、负电荷的中心也不重合, 电偶极矩的矢量和在 x 轴上的分量小于零, 在晶体表面 A 上出现负电荷, 在晶体表面 B 上出现等量的正电荷, 这就叫做横向压电效应. 电偶极矩的矢量和在沿 y 轴方向和 z 轴方向上的分量也均为零. 因此在垂直于 y 轴和 z 轴的晶体表面上也不会出现电荷.

(3) 当石英晶体受到沿 z 轴方向的力作用时, 晶体沿 x 轴方向和 y 轴方向的变形是对称变形, 正、负电荷中心总是重合的, 电偶极矩矢量和在 x 轴方向和 y 轴方向的分量均为零, 因此石英晶体不会产生压电效应.

(4) 当石英晶体沿 x 轴方向和 y 轴方向所受力不是压力而是拉伸力时, 则 A , B 面上出现与受压力时符号相反的电荷.

(5) 当石英晶体各个方向上同时受到均等的作用力 (例如液体压力) 时, 晶体的正、负电荷的中心始终保持重合, 不呈现电性, 因此石英晶体不存在体积的压电效应.

(6) 当在 A , B 面上施加电场时, 正、负离子在电场库仑力的作用下会发生相对位移, 使晶体结构产生内应力, 从而产生形变, 这就是逆压电效应产生的原因.

压电晶体表面产生电荷时, 相对应两表面的电荷的符号是相反的, 所以, 电轴必须是晶体中的极轴.

由于具有对称中心的晶体发生形变后其正、负电荷的中心仍旧是相重合的, 因此不可能产生压电效应. 同样地, 也不可能产生逆压电效应, 因为正、负离子产生相互位移的结果是互相抵消的. 只有不具有对称中心点群的晶体才可能具有压电效应, 在 32 类晶体中, 下列 21 个点群的晶体是不具有对称中心的, 它们是 1 , 2 , m , 222 , $2mm$, 4 , $\bar{4}$, 422 , $4mm$, $\bar{4}2m$, 3 , 32 , $3m$, 6 , $\bar{6}$, 622 , $6mm$, $\bar{6}m2$, 23 , $\bar{4}3m$, 432 . 在这 21 个点群中并非每一种都肯定产生压电效应, 属于 432 点群的晶体至今未发现过具有压电效应, 这可能是因为轴对称性很高所造成的.

1.3 压电陶瓷压电效应的解释

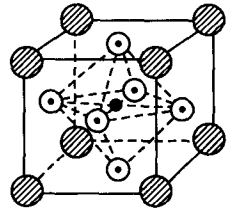
压电陶瓷的压电效应是由它的内部结构引起的，我们以钛酸钡 (BaTiO_3) 为例来说明压电陶瓷的内部结构情况。

1. 晶胞结构

我们将一块钛酸钡陶瓷经过研磨、抛光、腐蚀后，放在显微镜下进行观察，就可清楚地看到：它是由许许多多的小晶粒组成的，从实验分析得知，小晶粒内的离子是有规则地排列的，在一定的条件下，排列的情况如图 1-7 所示。

从图中可以看出，整个结构是个立方体，正二价的 Ba^{2+} 位于立方体的八个顶角上，正四价的 Ti^{4+} 离子位于立方体的中心，负二价的氧离子位于立方体六个面的面心上，我们将这样的一个小立方格子称为一个晶胞，整个晶粒就是由许多的小晶胞重复排列而成的。

应该说明的是，图 1-7 所示的钛酸钡晶胞结构，只是表示了三种离子的排列位置，并没有反映出离子的大小。实际上三种离子的大小是不同的，我们可以将这些离子看成是小圆球，它们的半径值分别是： Ba^{2+} 离子半径为 1.43\AA ， Ti^{4+} 离子半径为 0.68\AA ， O^{2-} 离子半径为 1.40\AA 。显然 Ba^{2+} 离子半径与 O^{2-} 离子半径比较接近，而且都远大于 Ti^{4+} 离子的半径。由于正、负离子之间的吸引力， Ba^{2+} 离子与 O^{2-} 离子很紧密地堆积在一起，而 Ti^{4+} 离子可比较宽敞地处于六个 O^{2-} 离子所围成的间隙内。



○ 氧离子 ● 钡离子
● 钛离子

图 1-7 钛酸钡晶胞结构

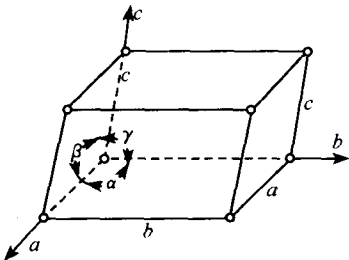


图 1-8 晶胞参数

为了描述晶胞的形状和大小，我们将晶胞的三个边长定义为晶格常数，表示为 a ， b ， c ，三个边长的方向称为晶轴，表示为 a 轴、 b 轴和 c 轴，晶轴之间的三个夹角用 α ， β ， γ 表示，如图 1-8 所示。 a ， b ， c 和 α ， β ， γ 统称为晶胞参数。

在室温时， BaTiO_3 的晶胞参数为：

$$a=b=3.993\text{\AA};$$

$$c=4.035\text{\AA};$$

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

这说明在室温情况下，钛酸钡的晶胞结构并不是对称的， c 轴比 a 轴和 b 轴都长，沿 c 轴方向的物理性能也就不同于沿 a 轴和 b 轴方向的物理性。但这并不意味着整块压电陶瓷在这种情况下是各向异性的，因为各小晶粒的晶轴方向沿空间

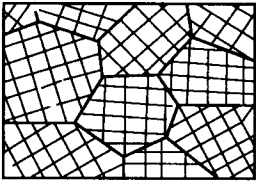


图 1-9 晶格取向

排列是杂乱无章的,如图 1-9 所示,就统计平均的角度看,沿空间各个方向是均匀分布的。

现在使用较多的压电陶瓷还有锆钛酸铅和铌镁-锆钛酸铅。锆钛酸铅是由锆酸铅和钛酸铅两种成分组成,它们的分子式分别为 PbZrO_3 和 PbTiO_3 。这种陶瓷的晶格结构与钛酸钡是一样的,正二价的铅离子 (Pb^{2+}) 排列在晶胞的八个顶点上,负二价的氧离子 (O^{2-}) 处在晶胞的六个面心上,而正四价的锆离子 (Zr^{4+}) 和钛离子 (Ti^{4+}) 处于晶胞的体心,至于多少晶胞的体心是 Zr^{4+} ,多少晶胞的体心是 Ti^{4+} ,要由这两种成分的比例确定。这是与钛酸钡区别之处。铌镁-锆钛酸铅由铌镁酸铅 $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ 、锆酸铅和钛酸铅三种成分组成,它的晶格结构也与钛酸钡相同,只不过位于晶胞体心的离子有 Mg^{2+} , Nb^{5+} , Zr^{4+} , Ti^{4+} 四种,每种离子的体心有多少根据压电陶瓷的组成比例而定。若材料的组成比例为 $0.4\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.3\text{PbZrO}_3-0.3\text{PbTiO}_3$ 的话,则在它的晶格结构中有 $0.4 \times 1/3 \times 100\%$ 的晶胞的体心是 Mg^{2+} , $0.4 \times 2/3 \times 100\%$ 的晶胞的体心是 Nb^{5+} , $0.3 \times 100\%$ 的晶胞体心是 Zr^{4+} , 而有 $0.3 \times 100\%$ 的晶胞体心是 Ti^{4+} 。

综上所述,不论是钛酸钡,还是锆钛酸铅或者铌镁-锆钛酸铅,它们的晶格都具有相同的结构形式。

2. 自发极化和电畴结构

压电陶瓷的晶体结构中,晶胞会随外界温度而变,一般来讲,在室温条件下,晶胞具有下述形式的参数: $a=b \neq c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。这种情况下,晶胞是一个长方体,这种形状的晶胞我们称之为四方晶胞,处于四方晶胞状态下的压电陶瓷具有压电效应。如果我们对压电陶瓷进行升温,当达到某一特定温度时,晶胞的三个边长会发生突变, c 边会增长, a , b 边会缩短(三条边增长的机会是相同的,即三条边中的任何一条都可能成为 c 轴),晶胞将具有下述形式的参数: $a=b=c$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。这种情况下的晶胞是一个立方体,这种形状的晶胞叫做立方晶胞,处于立方晶胞状态下的压电陶瓷没有压电效应。由此可见,温度能使晶胞发生形变,从而使压电陶瓷发生相变,在某特定温度以下具有压电效应,超过此特定温度,陶瓷失去压电效应,这一特定温度就是压电陶瓷的居里点,以 Q_T 表示。对钛酸钡来说, $Q_T=115^\circ\text{C}$, 在高于此温度时晶格常数为 $a=b=c=4.009\text{\AA}$, 低于此温度时,晶格常数为 $a=b=3.993\text{\AA}$, $c=4.035\text{\AA}$ 。对钛酸铅来说, $Q_T=490^\circ\text{C}$, 高于此温度时 $a=b=c=3.96\text{\AA}$, 低于此温度时, $a=b=3.89\text{\AA}$, $c=4.14\text{\AA}$ 。

在居里点以上,压电陶瓷的晶胞呈立方形,这种形状的晶胞中正离子的对称

中心和负离子的对称中心是互相重合的，也就是说，晶胞中正电荷中心与负电荷中心是互相重合的，因此不呈现极性。在居里点以下，晶胞呈长方形，这时晶胞的正电荷中心与负电荷中心不再重合，它发生的变化如图 1-10 所示。

该图是沿 a 轴方向投影的示意图，图中表示了钛酸钡陶瓷晶胞由立方形变为长方形后的情况，从图中可看出，上、下两平面中心的氧离子被向下挤出该平面，上面的 O^{2-} 离子与 Ti^{4+} 离子的距离缩短，促使 Ti^{4+} 离子向上位移，下面的 O^{2-} 离子与 Ti^{4+} 离子的距离伸长，这就说明晶胞的正电荷中心与负电荷中心不再重合，此时，晶胞带有一对电量相等距离一定的正负电荷，我们称这样的电荷为电偶极子，正负电荷的电量 q 与正负电荷中心之间的距离 l 的乘积称为电偶极矩或电矩，用 p 表示，则 $p=ql$ 。这是一个矢量，它的方向从负电荷中心指向正电荷中心，与矢量 l 的方向一致，如图 1-11 所示，用矢量的形式可表示为： $p=ql$ 。

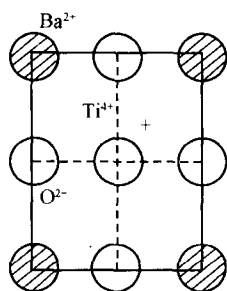


图 1-10 $PbTiO_3$ 晶胞的离子位移

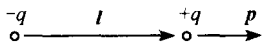


图 1-11 电矩

由此可见，在居里点以下，晶胞会自发地产生电矩，电矩的方向必定是沿着伸长的那条边的方向即 c 轴的方向，我们称这一现象为自发极化。自发极化不是外部电场所引起的，而是晶体的内因所产生的。

用偏光显微镜可以观察到晶体内晶胞的自发极化取向是不同的，它划分为一个个的小区域，在每个小区域内所有晶胞的电矩方向是同向平行排列的，我们将这样的小区域叫做电畴，显然整个晶体包含了许许多多的电畴，电畴之间的交界面称为畴壁，畴壁是一个过渡层。由于自发极化的电矩取向只能与立方晶相三个晶轴之一平行，所以，自发极化方向是只可能相差 90° 或 180° ，我们把相差 90° 的交界面称为 90° 畴壁，把相差 180° 的交界面称为 180° 畴壁，如图 1-12 所示。图 (a) 是电畴结构示意图，图 (b) 是一个 90° 畴壁的示意图。由于同一个电畴内所有晶胞的电矩都同向平行排列，因此电畴的一侧出现正电荷，而在另一侧出现负电荷。我们把这些电荷叫做极化电荷。

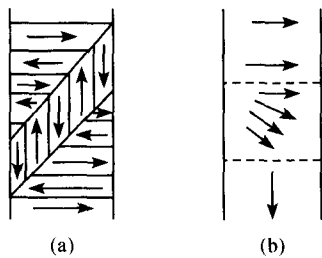


图 1-12 畴壁

应该指出，对于整个压电陶瓷来说，由于电畴自发极化沿空间六个方向是均匀分布的，电矩的矢量和为零，我们称这种状态为去极化状态。

我们将一块处于去极化状态的压电陶瓷片的两面电极上施加足够高的直流电压时，它内部的正负离子将受到电场力的作用而发生位移，它内部的电畴结构将发生变化，单位体积内电矩的矢量和定义为极化强度，这里压电陶瓷将产生极化

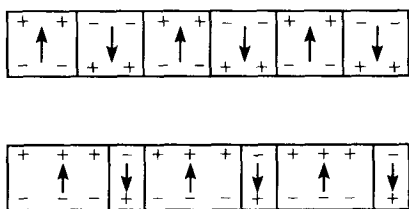


图 1-13 壁移

强度，我们将由外电场使材料产生极化强度的过程称为极化过程。在极化过程中电畴会发生下面两种变化。

(1) 壁移：在电场作用下，畴壁发生移动，使自发极化方向与电场方向相同的电畴的体积增大，而使自发极化方向与电场方向不一致的电畴的体积缩小。我们用一个简单的模型来说明，有六个电畴，它们的分布如图 1-13 所示，在去极化状态时，六个电畴都具有相同的体积 V 和自发极化强度 P_s ，因六个电畴的电矩方向不同，互相抵消，总的极化强度为零。在外电场 E 的作用下畴壁发生了移动，极化方向与电场正方向相同的电畴体积增大 ΔV ，而极化方向与电场 E 方向相反的电畴体积减少 ΔV 。这时，前者电畴内的电矩之和将增加为 $P_s(V+\Delta V)$ ，后者电畴内的电矩之和将减少为 $P_s(V-\Delta V)$ ，它们的电矩将不完全抵消。不能抵消的电矩为 $6P_s\Delta V$ ，方向与外电场方向相同，它的极化强度不再为零，而等于 $P_s\Delta V/V$ 。这时，它的一端将出现正极化电荷，而另一端将出现与之等量的负电荷。

(2) 畴转：在外电场的作用下，电畴的自发极化方向，向接近于电场的方向转动，我们用图 1-14 的模型来说明这一过程。设外加电场方向与电畴的自发极化方向垂直，即它们之间的夹角为 90° ，在外电场作用下，电畴的自发极化强度会发生转动，假定转动后的极化方向与外电场方向成 θ 角，则六个电畴的电矩矢量和为 $6P_sV\cos\theta$ ，方向与外电场的方向一致。这时极化强度不再为零，它的值为

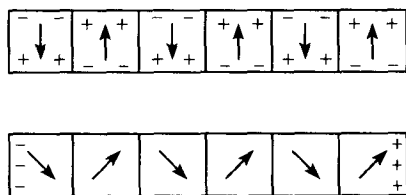


图 1-14 畴转

$$P = \frac{6P_sV\cos\theta}{6V} = P_s\cos\theta$$

这样压电陶瓷沿电场方向的两端也将出现等量的正负极化电荷。

通过实验可观察到，压电陶瓷的极化强度会随外加电场的增大而增大，当外加电场增强到某一数值时极化强度会趋向于饱和，这时外加电场继续增加而极化强度不再增加。接着，如果外加电场减少，极化强度也会随之减少，当外加电场撤去时，外加电场减小到零，而极化强度却不会为零，我们称这时的极化强度为剩余极化强度，用 P_r 表示。要想使极化强度为零，必须反向加一个电场 E_c ，我们称 E_c 为矫顽电场。因为当外加电场增加时，压电陶瓷内部的电畴会不断变化，电畴的自发极化方向会不断地趋向于外电场方向，当外加电场增大到某一数值时，材料内各电畴的自发极化方向都趋向于外电场方向了，此时外加电场再增大，不可能增加极化

强度。撤去外电场，电畴的自发极化方向不会恢复到原来的方向，而是仍旧保留在比较接近于外电场的那个方向上，从而保留了剩余极化程度。

存在自发极化性质的晶体又称铁电体。铁电体与铁磁体的机理是很相似的，有饱和现象和滞后现象，存在 $P-E$ 电滞回线。与磁致伸缩现象相似，未经极化的铁电体也存在电致伸缩现象。所谓电致伸缩现象是指在外电场作用下引起的形变 Δd 与电场 E 的极性无关，仅与电场的绝对值有关，在 $E \propto \sin \omega t$ 时存在下述关系

$$\Delta d \propto \sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t),$$

显然铁电体振动的频率为外加电场频率的两倍，这往往是我们不希望的。

未经极化的铁电体，一般是不用来制作换能器的，必须经极化后才能应用。最常用的极化方法是在铁电体上加一大的直流电场（例如 150°C 情况下，加压 4kV/mm ， 15min ）。另一种极化方法是在工作时加一强的直流电场，再附加较小的交流工作电场。

应当指出，压电体和铁电体虽然压电的机理不同，但对于极化处理后的铁电体，在变形不大或所加交流电场的振幅不大时，可将电致伸缩曲线当作直线处理。

第二章 压电材料

压电材料是夹心式压电换能器的研制、应用和发展的关键问题之一。早期应用的压电材料是压电单晶体，其中首先是石英晶体，随后是一系列的人造水溶性晶体，如罗谢尔盐、磷酸二氢铵等。在早期应用的压电材料中，除石英晶体现在仍得到广泛应用外，其他实际上已不常应用。

由于压电陶瓷的出现，开辟了压电材料的广阔前景，也使压电换能器的理论发展和实际应用提高到一个新的高度。IRE 又针对这种高耦合材料发布了测量标准，给出了推荐定义和测量方法。后来 IEC（国际电工委员会）对 IRE 的标准进行了修订，并使其更适用于压电陶瓷材料。压电陶瓷成为当今最有应用前景的压电材料。

对于单晶体要注意不同的切割对其性能和应用的影响，而对于压电陶瓷材料则要注意由于其组分的不同，性质有很大不同。当然，不管何种材料，都要注意其性能随使用条件（例如温度、时间、电场强度和受压力情况等）的变化而改变。

在压电陶瓷发展的同时，由于晶体生长技术的提高，也研制出一些性能相当优越的压电单晶体。

在压电陶瓷方兴未艾之时，几种新型压电材料——压电高聚物和压电复合材料等，又以很快的速度发展起来，目前已达到实用阶段。它们与压电陶瓷相辅相成，有广阔的发展前景。

2.1 压电材料的重要参数

压电材料的品种很多，性能各异，根据不同的用途对性能的要求也不同。作为压电换能材料来说，常用的重要参数见表 2-1。

表 2-1 压电材料的重要参数

符 号	参数名称	单 位	
		名 称	符 号
c	弹性劲度常数	牛顿每平方米	N/m^2
s	弹性柔顺常数	平方米每牛顿	m^2/N
ϵ	介电常数	法每米	F/m
β	介电隔离率	米每法	m/F