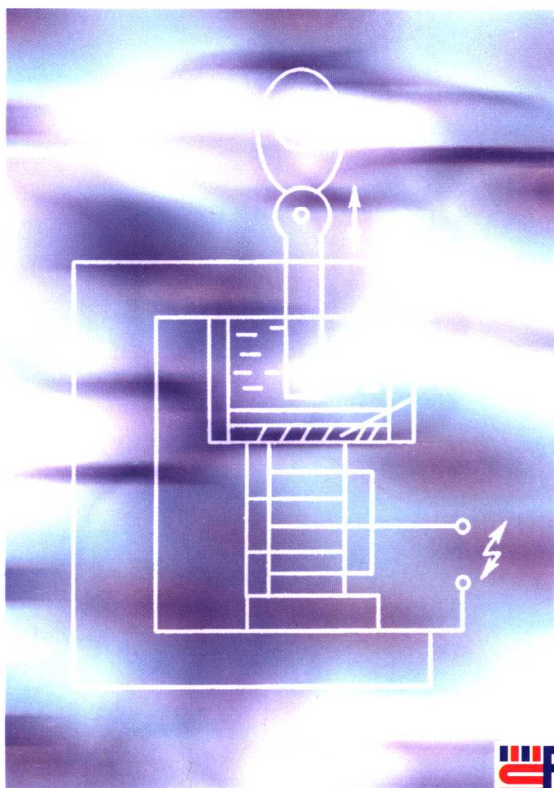




应用物理学丛书

功能陶瓷性能与应用

王永龄 著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书是著者近 40 年来的科研实践和科研成果的比较系统的总结,它比较全面地介绍了功能陶瓷的性能及其应用.全书共 4 章,除第一章绪论外,主要论述感应极化与自发极化、功能陶瓷的电物理性能和功能陶瓷的应用.书末附有经过精选的参考文献.

本书可供从事陶瓷材料(特别是功能陶瓷)的科技人员参考,也可作为大专院校有关专业的教材使用.

图书在版编目(CIP)数据

功能陶瓷性能与应用/王永龄著. —北京:科学出版社,2003

(应用物理学丛书/吴自勤,杨国桢主编)

ISBN 7-03-010888-4

I. 功… II. 王… III. 功能材料-陶瓷 IV. TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 072010 号

责任编辑:李义发/责任校对:曹锐军

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

*

2003 年 2 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2003 年 2 月第一次印刷 印张:8 1/4

印数:1—3 000 字数:210 000

定价:20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

《应用物理学丛书》出版说明

1978年夏在庐山召开的中国物理学会年会（“十年动乱”结束后的全国物理学界第一次大型学术会议）上，部分与会专家与学者经过充分酝酿和热烈讨论后一致认为，为了迎接科学春天的到来和追赶世界先进科学技术水平，有必要编辑出版一套《实验物理学丛书》，并组成以钱临照院士为主编，王淦昌等5位院士为副主编，王之江、王业宁等26位院士或专家为编委的《实验物理学丛书》编委会。

20年来，这套丛书在钱临照院士的主持下，通过编委们的积极工作（有的编委还亲自撰稿），先后出版了《实验的数据处理》、《X射线衍射照相学》、《粒子与固体相互作用物理学》、《压电与铁电材料的测量》、《电介质的测量》、《物理技术在考古学中的应用》及《材料科学中的介电谱技术》等20部实验物理学著作。这些著作都是实验、科研和教学的系统总结，出版后受到读者的欢迎和好评，有不少被评为国家级、部级和院校级的优秀科技图书，如《实验的数据处理》一书获国家优秀科技图书一等奖。这套丛书的陆续出版，在社会上引起较大影响，在科研、教学、经济建设和国防建设中发挥了积极的作用。

改革开放以来，我国在各个方面发生了翻天覆地的变化，经济体制由计划经济逐步转向社会主义市场经济，科学技术和教育也得到了空前的发展。为了适应社会主义市场经济的需要和满足社会的需求，我们决定对原丛书的出版宗旨、选题方向做相应的调整，重新组建编委会，并将原丛书更名为《应用物理学丛书》，使新丛书能在“科教兴国”和将科学技术转化为生产力的伟大实践中发挥更大的作用。

《应用物理学丛书》的出版宗旨和选题方向如下：

1. 密切联系当前科研、教学和生产的实际需要, 介绍应用物理学各领域的基本原理、实验方法、仪器设备及其在相关领域中的应用, 并兼顾有关交叉学科.

2. 反映国内外最新的实验研究与技术水平和发展方向, 并注重实用性.

3. 以大专院校师生以及科研单位、国防部门、工矿企业的科研人员为对象, 理论与实践紧密联系.

这套丛书将按照“精而准, 系统化”的原则, 力求保持并发展原《实验物理学丛书》已形成的风格和特色, 多出书、出好书.

需要强调的是, 《应用物理学丛书》将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作.

我们坚信, 在编委们的共同努力下, 在广大科研和教学人员的积极参与和大力支持下, 《应用物理学丛书》的出版将对我国科学技术和教育事业的持续发展发挥积极的作用!

编委会

序 言

本书是王永龄教授整理自 1959 年进入中国科学院上海冶金陶瓷研究所（1960 年名为上海硅酸盐研究所）电子陶瓷研究室以来一直从事功能陶瓷学科的材料性能、测试和应用研究工作，并自 1992 年至 1997 年以客座教授的身份先后应西班牙自助马德里大学材料物理系和美国辛辛那提大学材料科学与工程系的邀请讲授 6 个学期“功能陶瓷性能”与“功能陶瓷器件”两本教材的基础上总结写成的。

功能陶瓷的性能部分，作者从描述电介质的感应极化及其随频率、温度的变化即频谱温度曲线开始到描述铁电陶瓷的自发极化及其随应力、温度、电场的变化，清楚地阐明复介电系数和自发极化的物理概念，从而展开描述功能陶瓷在各个发展阶段的主要功能，即

- (1) 高介电系数；
- (2) 机、电、光、声、热、磁耦合功能，包括压电、热电、电光、电致伸缩等由铁电自发极化随应力、温度、电场变化关系的结果；
- (3) 铁电半导体功能；
- (4) 离子导电功能；
- (5) 铁电诱导相变功能及作为智能材料与器件所具备的内在复合功能等。

作者用比较通俗的语言和简明的（包含物理概念）数学推导，特别是通过材料特性参数测试方法的研究所获得的大量信息说明这些功能的实验曲线和图表，使读者能清晰地并较深层次地了解这些功能的物理概念，从而开拓这些功能的一些特殊应用。

本书虽不是一部系统的功能陶瓷材料专著，书中也缺少陶瓷

材料制备工艺，然而作者凭藉他在功能陶瓷领域的 40 年研究工作中吸收了硅酸盐研究所中一些著名的材料制备专家（如王鸿、郭演仪、祝炳和等）的实践经验，并在协助测试电物理性能、参与各项重大国家任务等科研活动中，积累了大量的宝贵资料和数据，从而总结出精华而写成本书。此外，作者还吸收美、日、德、法等国在功能陶瓷领域中的最新进展和最新成果，使本书内容更加全面和系统。因此，本书也能部分地体现了功能陶瓷材料性能和应用之间的密切联系以及功能陶瓷的发展概况。我坚信，该书的及时出版定能对我国的陶瓷事业的进一步发展起到积极的促进作用。

解：子

2001 年 9 月

目 录

《应用物理学丛书》出版说明	(i)
序言	殷之文(iii)
第一章 绪论	(1)
第二章 感应极化与自发极化	(6)
§ 2.1 极化弛豫	(6)
§ 2.2 德拜弛豫与 Cole-Cole 图	(9)
§ 2.3 电滞回线	(12)
2.3.1 电滞回线的特征性能	(15)
2.3.2 电滞回线的测量	(17)
2.3.3 功能陶瓷的前呈极化	(23)
2.3.4 各类功能陶瓷的电滞特性	(38)
2.3.5 电滞回线的直接应用	(45)
§ 2.4 自发极化与温度的关系	(47)
2.4.1 晶体结构与自发极化	(48)
2.4.2 温度诱导相变	(51)
2.4.3 功能陶瓷的热释电性能	(54)
§ 2.5 自发极化的应力关系	(57)
2.5.1 应力诱导相变	(58)
2.5.2 压电效应与电致伸缩	(59)
2.5.3 机电耦合	(74)
2.5.4 压电陶瓷材料	(78)
§ 2.6 自发极化的电场关系	(82)
2.6.1 电场诱导相变	(83)
2.6.2 电致伸缩与非线性机电换能	(85)
2.6.3 铁电陶瓷的电光效应	(90)
第三章 功能陶瓷的电物理性能	(93)

§ 3.1	绪言	(93)
§ 3.2	改性钛酸钡(BaTiO_3)陶瓷的高介电性能	(94)
§ 3.3	锆钛酸铅(PZT)陶瓷的压电性能	(98)
§ 3.4	改性钛酸钡与锆钛酸铅陶瓷的热释电性能	(101)
§ 3.5	掺镧锆钛酸铅陶瓷(PLZT)的光电性能	(107)
§ 3.6	正温度系数 PTC 陶瓷的半导电性能	(111)
3.6.1	PTCR 效应机理	(113)
3.6.2	$R = f(T)$ 特征	(115)
3.6.3	$I = f(U)$ 特征	(115)
3.6.4	工作电压的影响	(116)
3.6.5	工作频率的影响	(117)
3.6.6	热导的影响	(117)
3.6.7	环境温度对 $I-U$ 特性的影响	(118)
§ 3.7	PZT 95/5 陶瓷的诱导相变性能	(119)
3.7.1	PZT 95/5 陶瓷材料	(119)
3.7.2	相变温度测试方法	(129)
3.7.3	诱导相变的宏观唯象理论	(132)
第四章	功能陶瓷的应用	(142)
§ 4.1	反铁电储能电容器	(143)
§ 4.2	冲击波爆电换能器	(146)
4.2.1	工作原理	(146)
4.2.2	冲击波爆电换能器应用试验	(154)
§ 4.3	相变声发射换能器	(159)
4.3.1	相变陶瓷	(159)
4.3.2	换能器设计和水声功率发射测试	(162)
§ 4.4	热释电传感与换能器件	(164)
4.4.1	红外探测方面的应用	(165)
4.4.2	热释电效应在热电能量转换方面的应用	(173)
§ 4.5	PTC 元件的应用	(182)
4.5.1	PTC 热敏电阻的开关应用	(183)
4.5.2	PTC 热敏电阻用作切断回路应用	(185)
4.5.3	PTC 热敏电阻用作温度传感器	(187)

4.5.4	PTC 热敏电阻作为液面指示器应用	(187)
4.5.5	PTC 热敏电阻用作发热元件	(188)
4.5.6	PTC 陶瓷发热体应用例子	(194)
§ 4.6	智能陶瓷及其应用	(195)
4.6.1	绪言	(195)
4.6.2	叠合薄膜光电转换器	(202)
4.6.3	热释电电压变压器	(203)
4.6.4	人工压电耳蜗	(208)
§ 4.7	功能陶瓷氧量传感器	(212)
4.7.1	化学伏特势传感器	(213)
4.7.2	化学电阻传感器	(217)
§ 4.8	铁电薄膜及其应用	(223)
4.8.1	引言	(223)
4.8.2	铁电薄膜材料	(225)
4.8.3	铁电薄膜存储器结构和制备方法	(230)
4.8.4	铁电薄膜的应用	(234)
§ 4.9	压电电源与压电驱动器	(236)
4.9.1	压电电源	(236)
4.9.2	压电驱动器	(239)
参考文献		(243)
后记		(249)

第一章 绪 论

功能陶瓷的“功能”二字在一特定的含义上是指它具有特殊的力学、电学、热学性能以及在机、电、声、光、热、磁间的耦合功能.功能陶瓷的第一个突破性的功能是其具有高介电系数.

20 世纪 40 年代初,在 TiO_2 出现以前,所有电介质包括陶瓷材料,其介电系数都不超过 10.以二氧化钛(TiO_2)以及由此而发展的钛酸钡(BaTiO_3)为基础的高介电陶瓷的应用,使得陶瓷材料的介电系数被提高了 4~5 个数量级,并且很快被应用制作各个频段直至微波段的大容量电容器,品种多,用量大已形成近 50 亿美元的世界市场.

功能陶瓷的第二个功能是具有压电性,20 世纪 40 年代钛酸钡和 20 世纪 50 年代的锆钛酸铅(PZT)陶瓷研制成功,很快就被应用于能量转换和各种类型的水声、超声、电声换能器;信号转换的各类压敏、热敏、力敏、光敏等传感器和基于压电等效回路的振荡、滤波和传波器件,从而使得功能陶瓷在无机新材料领域里具有独立稳固的地位.其应用之广已深入到家家户户,也已形成几十亿美元的市场.

功能陶瓷的第三个功能是具有铁电性.1960 年 Cochran 和 Anderson 正式发表了说明铁电性起因,亦即自发极化产生的软模理论,为功能陶瓷的发展奠定了坚实的理论基础.对陶瓷来说,其压电、热释电、电光和其他非线性效应是起源于自发极化受应力、温度或电场作用而引起的变化.对晶体来说,虽然铁电晶体的范围小于热释电晶体的,更小于压电晶体的.然而,对陶瓷而言,铁电性已成为具备其他效应的必要条件,铁电陶瓷以此得名.压电陶瓷、热释电陶瓷和电光陶瓷就其物理性来说可看成铁电陶瓷的压电性、热释电性和电光性等.

功能陶瓷的第四个功能是具有半导电性. 20 世纪 70 年代的
正温度系数(PTC)和负温度系数(NTC)陶瓷研制成功, 标志着如
今的陶瓷材料已不再仅仅是人们习惯上所感受的绝缘材料. 通过
对陶瓷结构的深入研究和检测方法的不断改进, 人们研制成功阻
值在半导体范围、随温度变化呈非线性的半导电性陶瓷材料. 这个
过程是, 一方面利用不等价离子的取代, 使其能提供大量可供导电
的电子和空穴, 使晶粒具有半导电性; 另一方面又利用铁电陶瓷在
居里温度附近因自发极化的突变, 通过内场的变化而导致晶界上
势垒的突变, 从而得到完全可控的电阻温度非线性变化元件, 用于
各种类型的控制器和自保护陶瓷发热体. 此外, 具有明显结构特征
和晶格与离子互作用特征的快离子导体材料研制成功, 以及它在
燃料电池和气敏传感等方面的应用, 使功能陶瓷导电性能的研究
推向一个新的阶段. 人们利用功能陶瓷的电子、离子电导, 差不多
已能比较自由地控制陶瓷在很宽范围(ρ 为 $10^{-3} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$) 的
导电性能.

功能陶瓷的第五个功能是始于 20 世纪 80 年代的诱导相变与
超导研究. 虽然目前还缺乏非常有力的证据来说明铁电性与超导
性的关系, 然而已有不少的研究者认为, 陶瓷高温超导性与电子和
声子的非线性相互作用及晶格的不稳定性与引起铁电性的结构相变
有关. 近年来, 利用应力、温度和电场的诱导相变, 直接利用相变过
程中的自发极化变化发展了相变陶瓷材料和一系列铁电新应用.

20 世纪 80 年代底 90 年代初兴起的铁电薄膜存贮以及正在
发展的热电、压电等薄膜材料使功能陶瓷的材料制备、性能检测、
铁电、压电、热电性在纳米量级材料中的性能变化以及应用范围在
很大程度上已从体材料研究转向薄膜.

功能陶瓷之所以固有地存在这些重要性能, 一般地说来是因
为它固有地存在自发极化以及自发极化随电场、应力、温度的独特
变化. 自发极化存在于陶瓷多晶体的每一个晶粒的原胞中, 它是由
晶体的非对称结构决定的, 因而是永久地存在于晶体原胞中. 铁电
体的含义是它不仅存在自发极化, 而且该自发极化是可以随外加

电场变化而改变它的指向或量值状态的, 功能陶瓷的发展程度在某种意义上是决定于我们对自发极化的认识和利用的程度。

功能陶瓷的主要组成部分是电介质陶瓷和铁电、压电陶瓷, 它的发展方向是智能陶瓷. 铁电陶瓷是从电介质陶瓷发展过来的. 陶瓷的介电性能决定于感应极化的产生及其随时间的建立过程, 所以介电性能叙述的主要内容是复介电系数随频率、温度的变化. 铁电陶瓷的介电、压电、热释电、光电等性能决定于自发极化的产生及其随应力、温度、电场的变化. 本书在一开始简要的叙述感应极化及介电系数的宏观物理概念后, 重点阐述自发极化. 自发极化与感应极化是完全不同的两个概念, 虽然它们之间存在着密切的关系. 铁电电滞回线能最全面地反映自发极化的存在及其宏观特性的表现, 为了使超低频电滞回线测量技术以及铁电陶瓷能显示其压电、热电、光电等特性, 必须首先使陶瓷内的自发极化排列整齐, 为此首先必须介绍前呈极化工艺. 作者在 1979 年设计并装置成的低频电滞回线测试仪的主要特点在于低频高压电源的结构设计. 通过光电二极管把低频小电流放大后, 转变为低频光强变化的光信号, 再通过光电耦合器把强度变化的光信号返回电信号输入高压三极管的栅极, 由正、负放大的两个高压三极管组合输出低频高压加给铁电陶瓷, 由 $S-T$ 回路测量电滞回线. 这种通过光电耦合的高压电源, 不仅能得到良好的电绝缘, 它使操作可处在低压的安全区域, 而且能隔离由低压电源引进的电噪声, 从而获得很纯的高压信号. 如果采用光导纤维来传送光信号, 可使高、低压部分全部分开. 实践证明, 利用这套装置可顺利的测试包括属于钙钛矿结构的钛酸钡、钛酸铅、锆钛酸铅、掺镧锆钛酸铅、富锆锆钛酸铅和属于钨青铜型结构的偏铌酸铅、铌酸锶钡、铌酸铅钡钠等各种类型铁电陶瓷的电滞回线, 定量地显示起始电滞回线、剩余、饱和极化值、矫顽场强值和相变过程的动态变化.

作者在 1964 年就建立了极化条件工艺设备, 利用在极化过程中同时在地测量其压电性能. 测量少量的被极化样品就能定量地确定铁电陶瓷的极化条件, 包括极化电压、极化时间和极化温

度.实际上相当一部分的软性铁电陶瓷所需要的极化时间很短,甚至在—分钟以内已完成极化,而且短时间极化并不影响极化后的压电性能,包括老化性能.这就提供了甚至在器件安装后再进行极化的可能性.

通过对自发极化的深刻认识,在详细地归纳自发极化的温度、电场、应力关系,大量的实验数据和图表的展示不仅提供各种应用的可靠实验依据,而且开发各种创新应用的途径.如爆电换能,诱导相变的机电和热电换能,热耦合变压器,压电植入耳窝试验以及利用复合效应来设计的各种可能的智能系统,都有可能在这些实验关系的基础及其发展上得以创立.

爆电换能是一种自发极化的直接应用.通过应力诱导铁电相向反铁电相的相转变过程,可释放存贮在极化铁电陶瓷内的全部自发极化 P_r .理论上能输出高达每立方厘米几十个焦耳的高压电能.这种电能的输出与外负载的匹配关系极大,在各种量级的电阻、电容和电感的组合匹配条件下,可获得各种输出量级的输出波形的高压高功率脉冲电源.

相变热释电换能也是利用在温度诱导相变时的自发极化的变化.自1958年开始,大量的探索性研究时冷时热地已持续了几十年.温度诱导相变可发生于铁电-反铁电之间或反铁电-顺电之间,也可在两个铁电相之间.本书比较系统地回顾其发展历史,可以清楚地看到热电相变换能的研究尚在不断深入.虽然到目前为止所发表的换能效率都还比较低(约低于1%),但各种卡诺热循环的设计、多级换能方式和扩展材料相变温度的众多研究和设想,对较大幅度地提高换能效率和开始利用一些废热来设计换能器也尚显示有实际应用的可能.

功能陶瓷具有机、电、光、声、热、磁、化学和生物等多种直接效应和转换、耦合、传输、存贮和自动反馈等功能,因而成为设计和发展智能材料和器件的重要支撑性材料.有些功能陶瓷本身已具有智能化的某些属性,例如正温度系数(PTC),掺杂钛酸钡半导体性陶瓷、相变氧化锆陶瓷和氧化锌变阻器等,对温度、应力或电压具

有自适应、候补保护和自修复的功能,使材料能抵抗环境的突然变化而免于损坏.本书叙述的智能陶瓷和器件是立足于铁电陶瓷的自发极化 P_s 在外电场、应力或温度作用下的变化,特别是在诱导相变时的非线性变化 ΔP_s ,引入组合功能效应的概念,利用厚膜和薄膜形态的叠层技术和集成工艺,将功能陶瓷中两种或两种以上的效应组合起来,并通过等效回路和整体设计回路,连接各部分的功能,从而设计和制备材料、器件、回路一体的新型智能器件和体系,使之同时具备传感功能,灵敏地接收外来信号和驱动功能,对外作出智能反应.基于这个新设想研究和发展的一些新器件,如利用正、逆压电效应和电致伸缩效应的叠合研制成功的智能减振器,以及利用光伏效应和铁电效应的叠合,并进行适当的阻抗比匹配而研制出来的光存贮,光电开关器件已经取得了成功.最近研制的热释电电压变压器,利用热耦合将 PTC 陶瓷的电热效应和 PTC 相变陶瓷的热释电效应叠合起来,实现了低电压到高电压的变换.

近 60 年来功能陶瓷发展很快,目前在材料科学基础、新材料研制和应用开发方面都已具有丰富的内容,形成了一门很有发展前途的新兴学科.取名为功能陶瓷也因为它的发展与其功能的发展是紧密联系在一起的.

第二章 感应极化与自发极化

功能陶瓷的性能发展,究其物理本质是深入极化研究的结果.从感应极化到自发极化的研究发展,即电介质物理学到铁电学的进展结果.

感应极化是组成电介质的正负粒子,包括原子、分子、晶格原胞中所包含的正负电荷,在电场作用下极性分离,产生极化形成感应电偶极子的一个普遍现象.一旦电场拆除后,这些感应电偶极子将回复到原来的中性状态,或偶极子的原始取向状态.整个物体是始终呈电中性的.

自发极化是极性晶体的结构参量,是组成晶体原胞中正负粒子的非中心对称排列而自发产生的.它的存在与是否外加极化电场无关.自发极化随温度、应力、电场的变化,揭示了功能陶瓷电物理性能的本质,从而发展了一系列机、电、声、光、热的耦合应用,包括高灵敏度的传感器、高功率的换能器和强有力的驱动器.

§ 2.1 极化弛豫

电介质在直流电场作用下产生感应极化是需要时间的,即极化总是滞后于电场的建立,这就是极化弛豫的原因.组成电介质的正负电荷在电场作用下进行极化的机制大致可分为五类,即电子极化、离子极化、热离子极化、永久电偶极子的转向极化和夹层或不均匀介质中的空间电荷极化.电子、离子极化所需要的时间很短,在 $10^{-14} \sim 10^{-12}$ s 范围内,一般被称为快极化过程.施加电场的频率在微波频道以下的无线电频率范围内,快极化总是跟得上电场的变化.陶瓷介质的热离子极化大都起源于杂质离子和晶格缺陷.它们实际上可看成是具有各种可能取向的永久电偶极子.在

分析这种感应极化建立的过程以及数学处理方法,与分析永久电偶极子的转向极化过程是一样的.它们极化建立所需的时间比较长些,而且直接与温度有关,各种不同介质在不同温度下极化建立的时间分布大约在 $10^{-3} \sim 10^{-8}$ s 范围内,正好处于常用的无线电频率范围内,所以讨论得很多.在夹层介质或不均匀介质中的空间电荷极化,建立所需的时间最长,有的甚至可达几百秒.这种极化是自由电荷在有限范围内的移动产生的,一般被称为慢极化过程.

电介质在弱电场作用条件下,宏观极化量 P 与平均宏观电场 E 是呈线性关系的,因此宏观上可表达为下式:

$$P = XE, \quad (2.1)$$

式中 X 是极化系数, P 是宏观极化量,单位是 C/m^2 . E 是平均宏观电场,单位是 V/m .

比较直观地描述感应极化的宏观物理现象如图 2.1 所示.把一块电介质放进已接上电源的空气平板电容器中,电介质中正负电荷受电场作用而产生沿电场方向排列的电偶极子.如果电介质中原来就存在电偶极矩,受电场作用后会沿电场方向偏转,等效地产生相应的沿电场方向的电偶极矩 μ .电介质表面将呈现与电极极性相反的束缚电荷,该电荷与极板上的自由电荷一一对应.由于极化是不断建立的,因而电源在极化过程中会不断地向极板补充电荷以抵消表面极化电荷,保持恒定电场.极板上的电荷容量显然因介质极化而增大了.极板上总的自由电荷密度,定义为电位移 D ,它包括极化电荷密度 P 和放进电介质前极板上就已存在的电

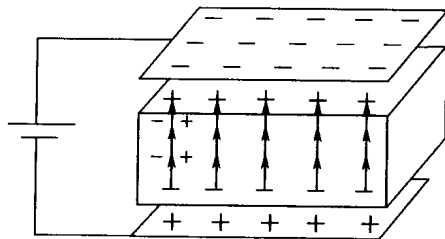


图 2.1 感应极化示意图.

荷密度 $\epsilon_0 E$, 即

$$D = \epsilon_0 E + P. \quad (2.2)$$

代入式(2.1), 并取 $X = \epsilon_0 X_r$, 则

$$D = \epsilon_0 E + \epsilon_0 X_r E = (1 + X_r) \epsilon_0 E = \epsilon E, \quad (2.3)$$

式中 $\epsilon = \epsilon_0(1 + X_r)$, 而 $X_r = \epsilon_r - 1$, $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$, 介电系数 ϵ 的单位是(F/m), $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$.

电介质弛豫现象说明电荷在极化过程中的移动受到阻力, 或电偶极子在极化过程中转动遇到阻力. 为克服阻力进行极化就会导致一部分的能量损耗. 结合各种不同的电介质的组成结构, 分析内在的极化机制, 并进行定量计算, 是极为困难的. 工程电介质物理往往用经典的德拜模型, 或附加各种改进条件的德拜模型来作极化弛豫的现象解释. 用德拜模型推导的介电系数随频率、温度的变化, 得到著名的 Cole-Cole 图, 能半定量地对比实测数据.

在极化过程中, 电荷移动的阻力 fv 正比于它的移动速度 v , 其运动动态方程可写为

$$m dv/dt = eE - fv, \quad (2.4)$$

式中 f 是摩擦系数, e 是电荷量, E 是外加电场, m 是电荷有效质量. 把式(2.4)稍为整理, 取 $\tau = m/f$ 和最终稳定速度 $V_s = eE/f$, 则

$$dv/dt = \frac{1}{\tau} (V_s - v). \quad (2.5)$$

式(2.5)说明了电荷在阡跃电场作用下, 它的运动速度随时间的变化率与 $(V_s - v)$ 成正比. 如图 2.2 所示.

解式(2.5)得电荷运动速度, 即

$$v(t) = V_s [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (2.6)$$

假设感应偶极子的产生和永久电偶极子的转向. 在阡跃电场作用下的极化形成过程与方程(2.6)的形式是一样的, 这就是

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{\tau} (\Delta P - P), \quad (2.7)$$

这里的 $\Delta P = P_0 - P_\infty$, P_0 是最终建立的极化, P_∞ 是电子、离子快