

## 前 言

本书是根据一九七八年四月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会确定的教学计划及一九七九年二月召开的绝缘、电缆、电瓷专业教材座谈会上通过的教学大纲编写的。

本书共分八章。第一章简要介绍电介质四个参数，包括电导、极化、损耗和击穿的基本概念以及在外界因素作用下它们的变化规律；第二章至第五章阐述测量绝缘（包括绝缘材料和绝缘结构）的电阻率或绝缘电阻、相对介电系数或电容、介质损耗角和击穿强度的测试原理、测试设备和测试技术；第六、七两章叙述绝缘局部放电的测试原理、测试技术和老化试验；第八章为实验的统计分析和设计，介绍数理统计在绝缘测试中的应用。

本书是在学校几种自编教材的基础上收集国外有关绝缘测试的新方法、新技术和新设备以及国内与绝缘有关的研究所、工厂、学校的测试经验编写而成。本书可作为大学电气绝缘技术专业的试用教科书；也可作为有关专业，例如高分子专业、无线电零件专业、高压专业的教学参考书以及绝缘测试技术人员、研究工作者的参考书。

本书第三、四、六、七、八章由刘耀南教授执笔，第一、二、五章由邱昌容执笔编写，最后由刘耀南负责全书的统一工作。

本书在编写过程中得到我校陈季丹教授、蒋国雄副教授、屠德民、陈寿田等同志的帮助；上海交通大学和哈尔滨电工学院绝缘教研室提供了宝贵资料；在审稿过程中，上海交通大学李静一、金雪虹，哈尔滨电工学院麻森、湖南大学夏艾生以及我校绝缘教研室吴力煌、王惠明、陈勤瑞等同志提出了宝贵意见，在此谨致以衷心的感谢。

限于我们的水平，书中不妥和错误之处，希望读者批评指正。

# 目 录

绪论 .....	1	角正切的测量 .....	97
第一章 绝缘材料的电气性能 .....	3	§ 3-11 低压工频电桥的测量原理和应 用 .....	100
§ 1-1 介质电导和绝缘电阻率 .....	3	§ 3-12 流比器型高压电容电桥的测量原 理和应用 .....	102
§ 1-2 介质极化和介电系数 .....	9	§ 3-13 超低频下相对介电系数和介质损 耗角正切的测量 .....	105
§ 1-3 介质损耗和损耗角正切 .....	18	第四章 高频下相对介电系数和介质损 耗角正切的测量 .....	110
§ 1-4 介质的击穿和绝缘强度 .....	29	§ 4-1 试样和电极 .....	110
附录 I 偶极子极化率 $\alpha_d = \frac{\mu_0^2}{3kT}$ 的 推导 .....	38	§ 4-2 低压西林电桥的结构和测量方 法 .....	113
附录 II 双层介质的电场分布 .....	39	§ 4-3 电压比例臂变压器电桥的原理和 测量方法 .....	116
第二章 绝缘电阻和绝缘电阻率的测 量 .....	40	§ 4-4 双 T 电桥的结构和测量原理 .....	120
§ 2-1 绝缘电阻和电阻率 .....	40	§ 4-5 谐振法概述 .....	123
§ 2-2 试样和电极 .....	41	§ 4-6 变 Q 值法测量原理和测量技术 .....	124
§ 2-3 直接测量法测量绝缘电阻 .....	47	§ 4-7 变电纳法测量原理和测量技术 .....	128
§ 2-4 比较法测量绝缘电阻 .....	52	§ 4-8 高频损耗测量技术 .....	131
§ 2-5 充电法测量绝缘电阻 .....	54	§ 4-9 不接触电极的结构和测量方法 .....	135
§ 2-6 高电阻的测量技术 .....	56	§ 4-10 介电特性测量新技术 .....	143
§ 2-7 泄漏电流的测量技术 .....	59	附录 I 二电极系统边缘电容的校正 .....	146
附录 I ZC-36 型高阻计的测量原理 .....	61	第五章 击穿和耐压试验 .....	148
附录 II 预处理条件和条件的建立 .....	62	§ 5-1 概述 .....	148
第三章 低频下相对介电系数和介质损 耗角正切的测量 .....	65	§ 5-2 试样、电极、媒质以及升压方式 的选择 .....	149
§ 3-1 基本概念 .....	65	§ 5-3 工频电压下绝缘的击穿和耐压试 验 .....	153
§ 3-2 试样和电极 .....	66	§ 5-4 直流电压下绝缘的击穿和耐压试 验 .....	160
§ 3-3 电桥法概述 .....	71	§ 5-5 冲击电压下绝缘的击穿和耐压试 验 .....	165
§ 3-4 西林电桥的测量原理、灵敏度和误 差分析 .....	73	§ 5-6 用非破坏性试验方法推断绝缘 强度 .....	171
§ 3-5 高压工频正接西林电桥的结构和 使用方法 .....	77	附录 I 球隙放电电压 .....	174
§ 3-6 高精密高压西林电桥的结构和使 用方法 .....	81	第六章 局部放电的测量和电老化试 验 .....	176
§ 3-7 大电容西林电桥的结构和测量原 理 .....	86	§ 6-1 局部放电的基本概念 .....	176
§ 3-8 反接电桥、对角线接地电桥的结 构和测量技术 .....	90		
§ 3-9 工频损耗测量技术 .....	92		
§ 3-10 强电场或强磁场干扰下介质损耗			

# IV

§ 6-2	有关局部放电的参数及其相互关系	177	§ 8-3	统计推断方法、大样本试验结果的分析	258
§ 6-3	局部放电检测方法	181	§ 8-4	"t" 分布、小样本试验结果的分析	263
§ 6-4	脉冲电流法测量线路和原理	183	§ 8-5	$\chi^2$ 分布、总体方差的显著性检验和区间估计	267
§ 6-5	脉冲电流法测量线路的特性	190	§ 8-6	F 分布、从二样本方差检验总体方差	270
§ 6-6	局部放电测试仪器和试验方法	196	§ 8-7	方差分析	273
§ 6-7	局部放电测量技术	201	§ 8-8	相关和回归分析	283
§ 6-8	电老化机理和电老化寿命	208	§ 8-9	惠勒尔分布、寿命的估计	289
§ 6-9	绝缘材料耐局部放电性试验	210	§ 8-10	试验设计	296
§ 6-10	电老化试验新方法	214	附录		308
§ 6-11	抗漏电痕迹试验	220	表 I	$P_z \left[ = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \right]$ 概率积分	
第七章	绝缘的耐热性试验	224	表		308
§ 7-1	概述	224	表 I	t 值表	308
§ 7-2	变形温度测定法	226	表 II	$\chi^2$ 值表	309
§ 7-3	热老化试验	228	表 IV	方差比值表	310
§ 7-4	快速评定热老化寿命方法	237	表 V	相关系数表	312
§ 7-5	耐电弧性的测定	245	表 VI	试样数 10 以下中值、5% 和 95% 等级表	312
附录 I	推导 $-\lg \beta - (0.457E/R) \frac{1}{T} = \text{常数}$	248	参考文献		313
第八章	实验的统计分析和设计	251			
§ 8-1	实验数据的分散性及其统计规律	251			
§ 8-2	数据的整理和取舍	254			

## 绪 论

迄今电介质理论尚不完善，绝缘材料的性能与结构的关系仍处于研究阶段，因此必须依靠试验来了解绝缘材料的性能。工程绝缘材料往往含有杂质，而杂质对绝缘材料的电性有极大影响，因此必须通过电性测量来控制材料的质量。绝缘的电性测量是相当复杂的，被测参数有的高到难于测准，有的则小到检测不出来。例如，高压绝缘的绝缘强度试验需要测量几十万到几百万伏的高电压；又如绝缘电阻的测量，实际上是微电流的测量，被测电流可以小到 $10^{-10}$ 安；聚苯乙烯、聚四氟乙烯等低损耗介质的损耗角正切约为 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ ，所以，必须研究测量方法和测量技术才能获得准确的测量结果。此外，外界条件，例如温度、湿度、电压、频率等因素对绝缘材料的电性有极大影响，故进行电性测试时应选定或规定试样的处理条件和试验条件。为此，国际电工委员会以及美、英、德、日、法、苏等国都制订绝缘材料试验方法标准，我国也已制订固体电工绝缘材料电性试验方法国家标准和部分绝缘材料试验方法标准。除了测定绝缘材料的短时性能外，考核绝缘材料绝缘系统长期运行的可靠性也十分重要。因为电气设备的使用寿命一般是由绝缘的耐久性决定的，所以研究并制订绝缘的老化试验方法，包括热老化和电老化，是一项极为重要的工作。

本书内容主要是绝缘材料的电性测量和老化试验，也包括部分绝缘系统的测试。其主要内容包括下列几方面。

1) 电介质的四个参数，即电导率、相对介电系数、介质损耗角正切、击穿强度的基本概念，它们在温度、湿度、场强、频率等外界因素影响下的变化规律。

2) 绝缘材料的电性，即四个参数的测量方法和测量技术。绝缘电阻的测量，除了叙述直接法和比较法两类测量方法外，还分析影响绝缘电阻测量的因素，如漏电、外来电势、残余电荷等，并提出消除的措施。相对介电系数和介质损耗角正切测量分低频测量和高频测量两章。前者主要叙述工频下相对介电系数和介质损耗角正切的测量方法，包括各种高压西林电桥和流比器型高压电容电桥，并作了测量灵敏度和误差分析；阐述了工频损耗测试技术，包括平衡技术、故障排除、负误差来源和电桥校正等；最后叙述三种超低频下相对介电系数和介质损耗角正切的测量方法。后一章包括二种测量方法：电桥法和谐振法。电桥法有低压西林电桥和低压变压器比例臂电桥；谐振法主要描述变Q值法和变电纳法和高频测量技术；此外，介绍了不接触电极测量技术以及介电特性测量新技术——时间域测量。绝缘强度试验包括工频、直流、脉冲击穿和耐压试验。除了高压设备和试验方法，书中还对高压测量技术作了较详细的描述。

3) 局部放电的测量。介绍各种测量方法的基本原理，分析它们的测量灵敏度和分辨能力，并阐述防止干扰、定位以及各种试品的测量等技术。

4) 老化试验。除了叙述常规或惯用老化试验应遵循的原则外，在热老化试验方面，介绍几种把分析技术和常规热老化试验方法相结合的快速评定法；在电老化方面介绍了二种新方法：绝缘强度法，等效老化法。

5) 实验的统计分析和设计，着重于数理统计在绝缘测试中的应用。其中，统计推断结

台试验结果的分析，方差分析、回归分析、相关分析结合热老化试验结果的处理，惠勃尔分布结合击穿试验和电老化试验的数据处理，最后阐述了试验设计的原则、方法和程序。

本书内容主要取材于国内外书刊有关资料及国内科学研究的成果和试验工作积累的经验。几年来，我室做过一些绝缘测试仪器、测试方法和测试技术的研究。试制过多种型式的局部放电测试仪，研究过残余电荷对绝缘电阻测量的影响，分析了工频损耗中出现负值的原因，并做过高压西林电桥和Q表的校正工作等，所有这些工作使我们在测试技术上有所提高。但是我们现有的测试设备、测试方法和测试技术与科学技术的发展不相适应。随着电子技术的飞速发展和计算机的广泛应用，绝缘测量技术正在发生巨大变化，全自动高压电容和介质损耗角正切测量电桥和数字式高阻计在国外都已试制成功，并在实际中使用。计算机已用于测量电介质的介电谱和绝缘中的局部放电。这就要求我们不仅要掌握已有的测试技术，而且必须研究新设备、新方法和新技术。展望未来，有许多工作等待我们去做，让我们携起手来，共同努力，为发展绝缘测试新技术作出贡献。

# 第一章 绝缘材料的电气性能

随着绝缘材料在电工和电子领域中的应用日益广泛，对其性能的要求特别是电气性能的要求也日益提高。例如，用于高电压系统电气设备上的绝缘材料要求有高的绝缘强度和低的介质损耗以及耐局部放电的腐蚀；作为电容器介质用的绝缘材料除了上述要求之外，还要求介电系数大而稳定，在某些仪表中的储能部件要求绝缘电阻非常高等。为了准确测定这些性能，必须了解构成这些性能参数的物理过程、影响这些性能的各种因素及其变化规律，这是设计试验方法、发展测试技术和分析试验结果必不可少的基础知识。

另外，宏观的电性能与微观的物质结构密切相关，因此掌握其间的相关规律，就可以用测定宏观性能来推断物质的微观结构，这为研究材料的分子结构开辟了重要的途径。此外，电性的测试往往比其他性能（如机械性能的测试）更为灵敏和方便，而且电场的频率变化范围很广，因此可以用介电性能的变化规律来研究材料的分子结构，物态转变、链段运动以及交联、降解、老化、添加剂和杂质的影响等，这不但可以用以控制工艺质量而且也能生产新型材料指出方向。

绝缘材料的电气性能，主要表现在电场作用下材料的导电性能、介电性能、以及绝缘强度，它们分别以绝缘电阻率 ( $\rho$ ) (或电导率  $\gamma$ )、相对介电系数 ( $\epsilon_r$ )、介质损耗角正切 ( $\text{tg}\delta$ )、以及击穿场强 ( $E_B$ ) 四个参数来表示。

## § 1-1 介质电导和绝缘电阻率

### 一、概述

绝缘材料并不是绝对不导电，只是导电能力很小而已，也就是说它具有很高的电阻率。绝缘电阻率  $\rho$  是绝缘材料所在的电场强度  $E$  与通过绝缘材料的电流密度  $j$  之商，即

$$\rho = \frac{E}{j} \quad (\text{欧姆} \cdot \text{米}) \quad (1-1)$$

电导率为电阻率的倒数，即

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{西/米}) \quad (1-2)$$

工程上应用的绝缘材料的电阻率一般都不低于  $10^{14}$  (欧·米) 如果绝缘结构的绝缘电阻太小，不但会造成电能浪费，而且还会引起仪器、设备不能正常工作，甚至因局部过热而造成损坏，因此在一般情况下总是希望绝缘电阻尽可能地高。只有在某些特殊场合，如为了改善电场分布，有时采用一定电阻值的材料组成分阶绝缘；有时涂以不同电阻率的导电漆或挤包一层导电层等。

通过测定绝缘电阻可以在一定程度上判断某些电气设备的绝缘好坏，判断某些电气设备，如电机、变压器的受潮情况以及推断材料物质结构的某些特征，如分子交联的程度、结晶状态等。

绝缘材料的电导率与该材料的介质损耗、绝缘强度都有内在联系。电导是产生介质损耗的原因之一。对于某些材料，当电导增大到某一临界值时，电流迅速增长，这就意味着击穿将要到来。

## 二、绝缘材料导电的机理

物体的导电特性，是由于物体内部存在的各种载流子在电场作用下沿电场方向自由移动而形成的。因此要了解绝缘材料的导电机理，首先必须了解绝缘材料内部存在的载流子的本质、载流子的数目以及载流子在电场方向的迁移率。

载流子的迁移率  $\chi$ ，以载流子在电场方向的平均速度与电场强度之比来表示，即

$$\chi = \frac{v}{E} \quad (\text{米}^2/\text{秒} \cdot \text{伏}) \quad (1-3)$$

式中  $v$  ——载流子在电场方向的平均速度 (米/秒)；

$E$  ——电场强度 (伏/米)。

设在单位体积 (1 米<sup>3</sup>) 内有  $n$  个载流子，每个载流子所带的电荷为  $q$ ，载流子的迁移率为  $\chi$ ，则每秒钟内通过单位面积 (1 米<sup>2</sup>) 的电量，即电流密度为

$$j = nqv = nq\chi E \quad (\text{安/米}^2) \quad (1-4)$$

因此，电导率为

$$\gamma = \frac{j}{E} = nq\chi \quad (\text{西/米}) \quad (1-5)$$

如果在一种材料中存在多种载流子，则其电导率为各种载流子作用的总和，即

$$\gamma = \sum_i n_i q_i \chi_i$$

式中  $n_i$ ,  $q_i$ ,  $\chi_i$  ——分别为第  $i$  种载流子的浓度、电荷量和迁移率。

(一) 载流子的性质 过去认为绝缘材料中的载流子只是正负离子，近年在许多高聚物中发现，除离子外还有电子和空穴。离子电导和电子电导有许多不同的特性，可以在精确的试验中予以区别，例如

1) 如果是离子电导，则在长时间通电后，电极附近将有电解物形成，这在灵敏度高的电解实验中能观察到。

2) 如果是电子电导，则在光照射下电导率有明显增长；在外磁场作用下产生与磁场和电流垂直的横向电动势即霍尔效应。

3) 对高聚物试样施加静压力时，由于自由体积的减小，阻碍离子迁移，离子电导下降；但分子间距离缩短的结果，使电子容易在分子间发生跳跃，因而电子电导增大。

绝缘材料的电导率本来就很小，要区别离子电导和电子电导是很不容易的。一般认为离子电导占主要成分，特别在高温条件下尤其如此。当电场强度增高时，电子电导也增大。对于某些材料，在一定条件下电子电导也可能占主要成分。

(二) 离子电导 绝缘材料中的离子，除了强极性原子的本征离解外，多数由于杂质离解而形成，如来自各种添加剂、加工过程混入的杂物以及吸收的水分等。所有这些可离解的分子，由于热运动给予的能量使之离解，但同时已离解的正负离子又可能重新复合为分子。在一定温度下，当这两种过程的速度相等时，达到动平衡状态，物质内部就保持有一定浓度的离子。

设单位体积内可离解的分子数为  $n_0$ ，其中离解的离子数为  $n$ ，如果每个分子离解为一对正负离子所需的离解能为  $W$ ，则用热力学和统计物理方法可求得

$$n = n_0 e^{-\frac{W}{2kT}} \quad (1-6)$$

式中  $k$  ——玻尔兹曼常数  $1.38 \times 10^{-23}$  (焦耳/度)；

$T$  ——绝对温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )；

$W$  ——离解能 (焦耳)。

不少研究者指出，离解能与介电系数有关。如果该分子在真空中的离解能为  $W_0$ ，则在相对介电系数为  $\epsilon_r$  的离解能可近似地表示为

$$W = \frac{W_0}{\epsilon_r}$$

已离解的离子由于受到周围原子的作用，一般只能在固定的位置上振动，只有当它的热运动能量超过周围的束缚能量时才能发生迁移，该能量称为离子迁移活化能，简称为迁移能  $A$ 。根据玻尔兹曼统计规律，当绝对温度为  $T$  时，热运动能量超过  $A$  的概率为

$$e^{-\frac{A}{kT}}$$

式中  $A$  ——离子迁移活化能 (焦耳)；

$T$  ——绝对温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )；

$k$  ——玻尔兹曼常数 (焦耳/度)。

设离子浓度为  $n$ ，离子在平衡位置上的振动频率为  $f$ ，则单位体积内的离子在单位时间内发生迁移的次数为

$$P = n f e^{-\frac{A}{kT}} \quad (1-7)$$

当没有外加电场时，离子在各个方向迁移的概率是相同的。若以空间直角坐标来表示，在  $\pm(X, Y, Z)$  六个方向的迁移概率都应相等，即每一方向迁移次数为

$$P_i = \frac{n}{6} f e^{-\frac{A}{kT}} \quad (1-8)$$

在外加电场作用下，正离子顺电场方向的迁移率超过了反电场方向的迁移率，两者之差就决定了正离子沿电场方向的迁移率。

假定在没有外加电场时，原子间作用的位能对称地均匀分布 (如图 1-1 中虚线所示)，而在外加电场存在时，位能分布应为原子间作用位能与电场位能的叠加，如图 1-1 中实线所示。于是  $m$  处的正离子向  $+X$  方向迁移所需克服的位垒减小  $\Delta A$ ，反之，向  $-X$  方向迁移所需克服的位垒增加  $\Delta A$ 。如果用  $a$  表示离子每次迁移的距离， $q$  表示离子所带的电荷， $E$  为外加电场强度，则

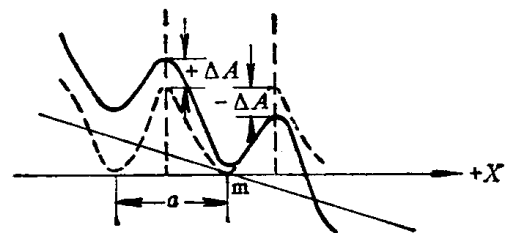


图 1-1 位能分布

$$\Delta A = \frac{1}{2} q a E \quad (1-9)$$



离子在  $+X$  和  $-X$  方向迁移的次数各为

$$P_{+x} = \frac{n}{6} f e^{-\frac{(A-\Delta A)}{kT}}$$

$$P_{-x} = \frac{n}{6} f e^{-\frac{(A+\Delta A)}{kT}}$$

在电场方向的有效迁移次数为两者之差, 即

$$\begin{aligned} \Delta P_x &= P_{+x} - P_{-x} = \frac{n}{6} f \left[ e^{-\left(\frac{A-\Delta A}{kT}\right)} - e^{-\left(\frac{A+\Delta A}{kT}\right)} \right] \\ &= \frac{nf}{6} e^{-\frac{A}{kT}} \left( e^{\frac{\Delta A}{kT}} - e^{-\frac{\Delta A}{kT}} \right) \\ &= \frac{nf}{6} e^{-\frac{A}{kT}} \left[ 1 + \frac{\Delta A}{kT} + \left(\frac{\Delta A}{kT}\right)^2 / 2! + \left(\frac{\Delta A}{kT}\right)^3 / 3! + \dots \right. \\ &\quad \left. - 1 + \frac{\Delta A}{kT} - \left(\frac{\Delta A}{kT}\right)^2 / 2! + \left(\frac{\Delta A}{kT}\right)^3 / 3! - \dots \right] \end{aligned} \quad (1-10)$$

当外电场不很强 即  $\Delta A \ll kT$  时

$$\Delta P_x = \frac{nf}{3} \frac{\Delta A}{kT} e^{-\frac{A}{kT}} = \frac{nfqaE}{6kT} e^{-\frac{A}{kT}} \quad (1-11)$$

单位时间内每个离子沿电场方向迁移的平均有效次数为  $\Delta P_x/n$ , 每次迁移的距离是  $a$ , 则离子的平均迁移速度为

$$v = \frac{\Delta P_x a}{n} = \frac{fqa^2 E}{6kT} e^{-\frac{A}{kT}}$$

因此电流密度为

$$j = nqv = \frac{nfq^2 a^2 E}{6kT} e^{-\frac{A}{kT}} \text{ (安/米}^2\text{)} \quad (1-12)$$

上式说明电流密度与电场强度成正比, 即服从欧姆定律。

将式 (1-12) 代入式 (1-5) 可求得电导率为

$$\gamma = \frac{nfq^2 a^2}{6kT} e^{-\frac{A}{kT}} \text{ (西/米)} \quad (1-13)$$

电阻率为

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{6kT}{nfq^2 a^2} e^{\frac{A}{kT}} \text{ (欧} \cdot \text{米)} \quad (1-14)$$

- 式中  $n$  —— 离子浓度 (离子数/米<sup>3</sup>);  
 $f$  —— 离子振动频率 (次/秒);  
 $q$  —— 离子带电量 (库);  
 $a$  —— 离子每次迁移的距离 (米);  
 $T$  —— 绝对温度 ( $^{\circ}\text{K}$ );  
 $A$  —— 离子迁移活化能 (焦耳);  
 $k$  —— 玻尔兹曼常数 (焦耳/度)。

将式 (1-6) 代入上式得

$$\rho = \frac{6kT}{fn_0q^2a^2} e^{-\frac{A}{kT}} e^{-\frac{W}{2kT}} = \frac{6kT}{fn_0q^2a^2} e^{-\frac{2A+W}{2kT}}$$

$$= \rho_0 e^{-\frac{W'}{kT}}$$

式中

$$\rho_0 = \frac{6kT}{fn_0q^2a^2}, W' = \frac{2A+W}{2}$$

$$\ln \rho = \ln \rho_0 + \frac{W'}{k} \frac{1}{T} \tag{1-15}$$

上式中温度对  $\rho$  的影响主要决定于指数项， $\rho_0$  随温度的变化相对于指数项是很小的，因此可以近似地看做常数。对于许多绝缘材料来说，在很宽的温度范围内， $\ln \rho$  与  $\frac{1}{T}$  的线性关系

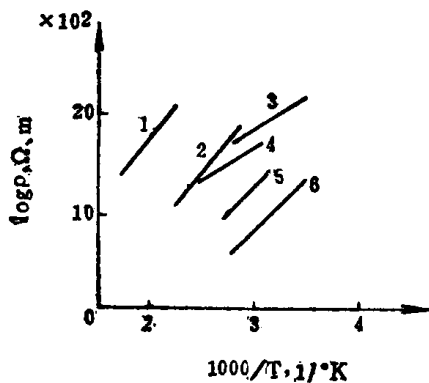


图 1-2 电阻率-温度曲线  
 1—聚四氟乙烯 2—聚对苯二甲酸乙  
 二醇酯 3—聚乙烯 4—聚甲基丙烯酸  
 甲酯 5—聚氯乙烯 6—聚酰胺-66

已在实验中得到证实。图1-2所示的  $\log \rho - \frac{1}{T}$  曲线是几种聚合物的实验结果。离子电导的活化能  $W'$  可以从直线的斜率求得。

(三) 电子电导 电子电导的机理比较复杂，这里只作简略介绍。对于一个孤立的原子，它的电子受原子核吸引而处于束缚状态。以氢原子为例，核外只有一个电子，电子受核吸力而形成的位能可根据库仑定律求得

$$A_r = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r} \tag{1-16}$$

式中  $q$  ——电子电荷  $1.6 \times 10^{-19}$  (库)；

$\epsilon_0$  ——真空介电系数  $\frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$  (法/米)；

$r$  ——电子离原子核的距离 (米)；

$A_r$  ——位能 (焦耳)。

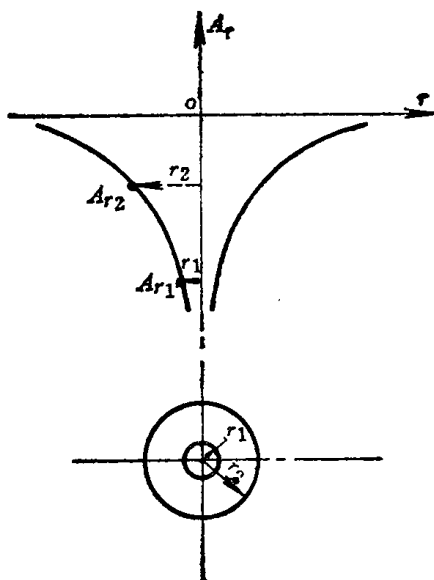


图 1-3 单原子位垒

图 1-3 为单原子的位能 (或称位垒) 曲线。不同能级的电子所能达到的最大距离不能超出此位垒曲线。只有当电子从外部获得的能量相当于它能级的能量时，才能越出位垒而形成自由电子。

如果分子是由两个原子以共价键结合成共价分子时，其外层的价电子为两个原子所共有。由于两个原子间的位能曲线是两个原子核共同作用的结果，使两个原子间的位垒  $A'_{r2}$  低于共有电子对的能级  $A_{r2}$ ，如图 1-4 所示。因此价电子可以在两原子间自由运动，但仍受二原子边缘位垒的束缚，而不能超出这两个原子核吸引的范围，因此双原子中共价键的共有电子仍然不能在各分子间自由迁移。

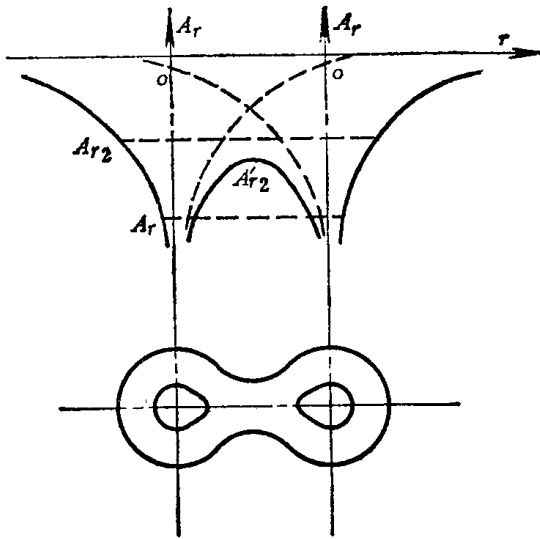


图 1-4 双原子位垒

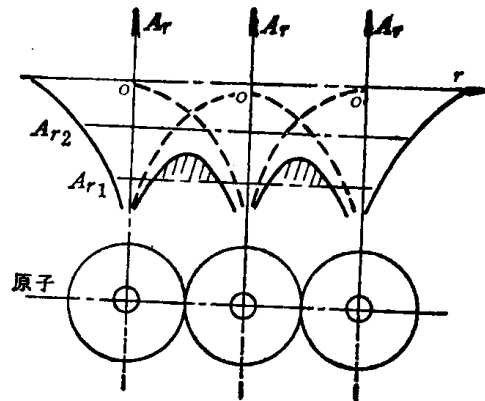


图 1-5 晶格位垒

如果原子呈周期性重复排列形成晶体，电子可在整个晶格范围内出现共有化运动。这种共有化运动的电子一般具有高于位垒的能级，但由于电子的波动性，也可能出现能级低于位垒的电子越过位垒而加入共有化运动，这种现象称之为隧道效应。电子因隧道效应而发生共有化的概率决定于位垒的高度和宽度(即图 1-5 中剖面所示的那块面积)。

电子共有化运动的结果，使不同原子中相同能级的电子成为一个相互影响的共同体系，这就使孤立原子中电子的能级，在晶体中形成电子的能带，但应注意并不是电子的共有化运动就一定能形成电子电导。如果能带中的全部状态都被电子所占满(称之为满带)，则此能带中电子的共有化运动只能是电子的相互调换，而不能形成电子单方面的迁移，所以就不能构成电子电导。只有部分状态为电子占有的能带才会形成电子单方向的迁移，即构成电子电导。

有机绝缘材料的分子排列，一般是无定形和结晶二相共存的，在这没有一定排列规则的体系内，电子运动就显得更加复杂。一般认为电子能量超过某一临界能量时，在分子内部也可能形成能带电导，而在分子之间电子迁移最大的可能是靠跳跃。因此分子间间隙较小时这种跳跃的可能性就增大，说明当材料被压缩时电子电导就会增大。

### 三、影响绝缘电阻率的因素

如前节所述，绝缘材料的导电性能主要决定于载流子所带的电荷量、载流子的浓度以及载流子的迁移率。因此，对于上述三方面有影响的因素都将会影响绝缘材料的电阻率。

#### (一) 材料本身的影响因素

1. 添加剂和杂质的影响 聚氯乙烯中加入少量炭黑其电阻率的变化如图 1-6 所示。当炭黑含量小于 20% 时，电阻率增加，这可能是由于炭黑有吸附作用，使离子被捕获，迁移率减小。而当炭黑继续增加时，电阻率迅速下降，这可能由于炭黑形成网络，产生了显著的电子电导所致。由此可见，不同杂质、或同一杂质在不同材料中的影响都各不相同。

2. 分子交联和结晶 分子交联会使离子的活化能提高而迁移率减小，因此随着交联程度的增加，电阻率也增大。可以利用交联度和电阻率的关系，通过测量电阻率来判断热固性聚合物的固化程度。材料结晶会减少离子电导，另一方面又会增大电子电导。如图 1-7 所示，当结晶增加时，活化能减小(直线斜率变小)，这可能是由于电子电导占的比例增加(一般电子迁移的活化能比离子的活化能低)所造成的。

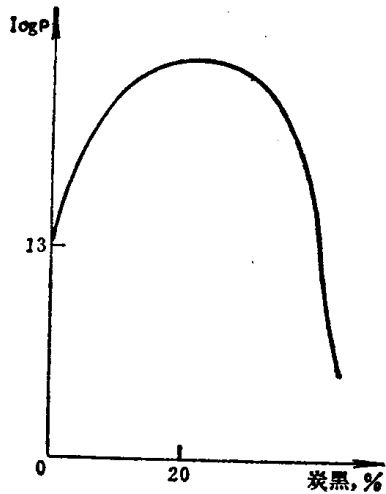


图 1-6 炭黑含量对电阻率的影响

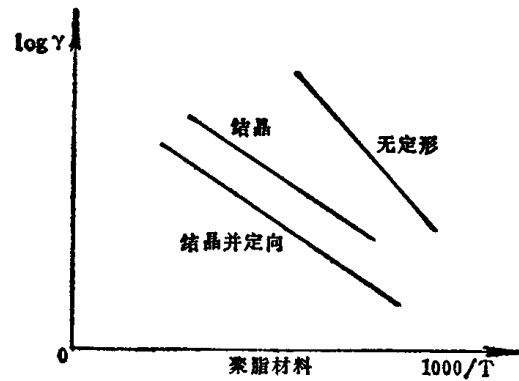


图 1-7 结晶度对导电性能的影响

3. 分子量的影响 对于离子电导, 分子量在一定数值以上时, 电阻率的变化不大, 但低于某一数值时将会使电阻率减小, 这可能是由于离子的迁移率增大所致。

#### (二) 工作及环境条件的影响因素

1. 温度的影响 前节已经指出, 绝缘电阻率随温度的升高按指数规律下降。

2. 电场强度的影响 当电场强度增高到使位能的增量  $\Delta A$  接近于  $kT$  时, 式 (1-10) 应简化为

$$\Delta P_x = \frac{nfqaE}{6kT} \left[ 1 + \frac{(\Delta A)^2}{3_1(kT)^2} \right] e^{-\frac{A}{kT}}$$

于是

$$j = \Delta P_x qa = \frac{nfq^2a^2E}{6kT} \left( 1 + \frac{q^2a^2E^2}{24k^2T^2} \right) e^{-\frac{A}{kT}}$$

$$\gamma = \frac{nfq^2a^2}{6kT} e^{-\frac{A}{kT}} \left( 1 + \frac{q^2a^2E^2}{24k^2T^2} \right) \quad (1-17)$$

式中各符号与式 (1-13) 同, 这时电导率是按  $E$  的二次方增长。

3. 水分(湿度)的影响 由于水分的相对介电系数很大, 使得介质中可离解分子的电离能降低, 从而增大了离子浓度。同时水本身的电导率又很大, 因此介质吸湿后电导率总是大为增加。

4. 辐照的影响 实验证明, 许多有机绝缘材料在  $X$  射线、 $\gamma$  射线以及其他粒子射线的辐照之下, 都会产生暂态的诱导电流, 致使绝缘电阻大大下降。例如聚乙烯在每分钟 8 仑琴辐射剂量的照射下, 温度在  $20^\circ\text{C}$  时, 电阻率下降 3、4 个数量级。这种效应有时在辐照停止后相当长的时间内仍然存在。

对于以上各种因素影响的研究, 不但可以进一步寻求绝缘材料的电导机理, 还可以在某种范围内判断电气设备运行中绝缘的可靠性, 以及分析绝缘电阻测定结果的合理性。

## § 1-2 介质极化和介电系数

介电系数是处理各种电场问题的基本参量之一。在绝缘技术中, 不论是设计合理的绝缘结构, 或是计算介质储能能力, 都需掌握绝缘材料的介电系数。另一方面介电系数的大小决

定于介质的极化，而介质极化又决定于物质的分子结构和分子运动形式，因此可以通过对介电系数这一宏观参数的研究，如介电系数随电场强度、频率以及温度等变化规律，来研究绝缘材料的分子结构。

### 一、介电系数及介质极化

(一) 介电系数 我们知道一个平板介质电容器的电容量  $C$  与平板电极的面积  $S$  成正比，而与平板电极间的距离  $d$  成反比，其比例常数决定于介质的特性。即

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (1-18)$$

式中，比例常数  $\epsilon$  称为介电系数，它表征介质的介电特性，在电场中它是各点电位移矢量  $D$  与电场强度  $E$  之比值，即

$$\epsilon = \frac{D}{E} \quad (\text{法/米})$$

同时，我们知道一个平板介质电容器储存的能量

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \epsilon \frac{S}{d} (Ed)^2 = \frac{1}{2} \epsilon SdE^2$$

$$\therefore \epsilon = \frac{2W}{sdE^2} = \frac{2W}{VE^2}$$

式中  $U$ ——施加于电容器的电压(伏)；

$W$ ——平板介质电容器储存的能量(焦耳)；

$V$ ——电极间介质的体积， $V = Sd$ (米<sup>3</sup>)；

$E$ ——电场强度(伏/米)；

其他符号与式(1-18)同。

因此，介电系数在数值上又可以理解为在单位电场强度下，储存在单位体积内能量的二倍。

设电极系统处于真空中的电容量为  $C_0$ ，

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

式中， $C_0$  称为几何电容； $\epsilon_0$  称为真空介电系数（ $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$  法/米）。对于同一电极系统，但电极间用介质取代真空时，其电容量变为  $C_x$ ，

$$C_x = \epsilon_x \frac{S}{d}$$

式中， $\epsilon_x$  称为介质的介电系数，单位是法/米。

介质的相对介电系数是充满介质电容器的电容量与同一电极系统的真空电容器的电容量之比，即

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_0} \quad (1-19)$$

实践证明， $C_x$  总是比  $C_0$  大，即  $\epsilon_r$  总是大于 1。这一宏观现象正反映了介质极化这一微观本质。

(二) 介质极化 在静电场中，构成电介质的分子或原子中的电荷将产生相对位移。这

种位移造成正负电荷中心不再重合，就形成了感应偶极子，如图 1-8 所示，这些偶极子所具有的偶极矩  $\mu$  为：

$$\bar{\mu} = q\bar{d} \quad (1-20)$$

偶极矩是一矢量，其方向是由负电荷指向正电荷，单位是德拜。

$$1 \text{ 德拜} = \frac{1}{3} \times 10^{-29} \text{ 库} \cdot \text{米}$$

各种绝缘材料的分子结构不同，有些材料本来正负电荷中心是重合的，只有在外电场作用下才出现感应偶极子，这类材料称为中性材料。有些材料却不需要外电场的作用，本身就具有固有的偶极矩，这类材料称为极性材料。极性材料在电场作用下，除了沿电场方向形成感应偶极矩外，固有偶极子也将沿电场方向排列，虽然由于热运动等其他因素的作用不可能使所有偶极子都完全平行于电场方向，但沿电场方向偶极矩总是大于其他方向的偶极矩。

因此，不论是感应产生的偶极子，或是固有偶极子沿电场方向排列的结果，在介质与电极的交界面上就形成了束缚电荷  $Q_s$ 。这些电荷的极性与电极极性相反，如图 1-8b) 所示。这种现象称为介质极化。

我们知道平板电容器中电场强度  $E$  与电压  $U$  有下列关系：

$$E = \frac{U}{d} \quad (1-21)$$

式中， $d$  为极板间距离。假定极板之间的空间为真空时，极板上的电荷为  $Q_0$ ，这时电极系统组成的真空电容器的电容量为

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} \quad (1-22)$$

如果极板之间的真空为介质所代替，这时由于电压  $U$  和电极之间的距离  $d$  都不变，则电场强度  $E$  也应保持不变。因此电极上的电荷必需增加  $Q_p$ ，以抵消极化的影响，这时极板上的电荷为  $Q_0 + Q_p$ ，而相应的电容量  $C_x$  为

$$C_x = \frac{Q_0 + Q_p}{U} = C_0 + \frac{Q_p}{U}$$

介质的相对介电系数为

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} = 1 + \frac{Q_p}{C_0 U} > 1 \quad (1-23)$$

由此可见，同一电极系统的真空电容器，当其中以介质填充时电容量的增大正是由于介质极化而造成的。在一定电场强度下，介质极化的强度愈高，其相对介电系数就愈大。同样，对一定结构和尺寸的电容器，当所用介质的相对介电系数愈大，它的电容量也就愈大。

## 二、介质极化的机理和分类

介质极化决定于物质的分子结构和分子的运动形式，根据形成极化的机理不同可以分为以下五类。

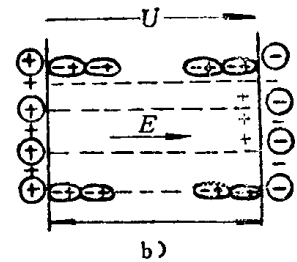


图 1-8 介质极化模型

(一) 电子位移极化 构成原子的电子云在外电场作用下产生了相对于原子核的位移,使正负电荷中心不再重合,于是就形成了感应偶极矩,如图1-9a)所示,这种极化称为电子位移极化,普遍存在于所有介质之中。电子极化形成所需的时间极短,约  $10^{-15} \sim 10^{-16}$  秒。

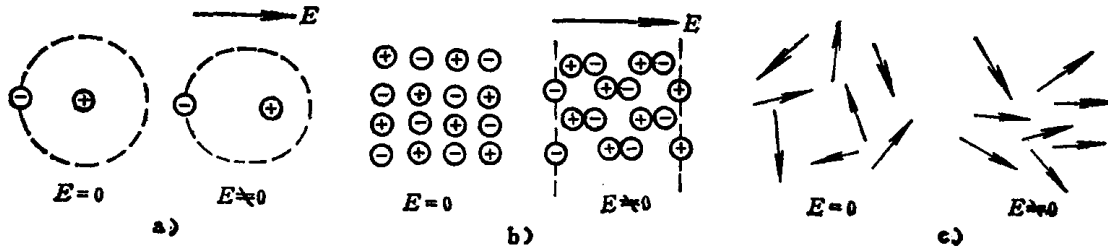


图 1-9

a)电子极化 b)原子极化 c)偶极极化

(二) 原子位移极化 分子中的不同原子,由于电负性的差异,电子云向电负性较大的原子偏移。这些原子在外电场作用下产生偏离平衡位置的位移,这种情况与离子晶体中的正负离子在外电场的作用下产生偏离平衡位置的位移相似。如图1-9b)所示,由于这些偏离平衡位置而形成的极化都称为原子极化。原子极化形成所需的时间也很短,大约为  $10^{-13} \sim 10^{-14}$  秒。

(三) 偶极子转向极化 具有固有偶极矩的极性分子,在没有外电场时,由于分子热运动、偶极矩朝向各个方向的机率相等,因此偶极矩相互抵消,从总体来看偶极矩为零,即不呈现介质极化。一旦加上外电场,偶极矩沿电场方向排列的机率增大,虽然不是所有的偶极子都完全沿外电场方向排列,但就总体而言偶极矩不为零,介质呈现极化,如图1-9c)所示。这种极化称为偶极子转向极化。由于偶极子转向运动要受到周围分子的阻碍作用,因此极化形成所需要的时间较长,而且分布也很广,约从微秒到分以上。当外电场去除后也要经过相应的时间,介质极化才能消除,这种现象称之为介质松弛。只要外加电场强度不过分强,介质极化的形成和消失的时间函数往往是一致的,如图1-10所示。具有这种可逆性质的电介质称之为线性电介质。

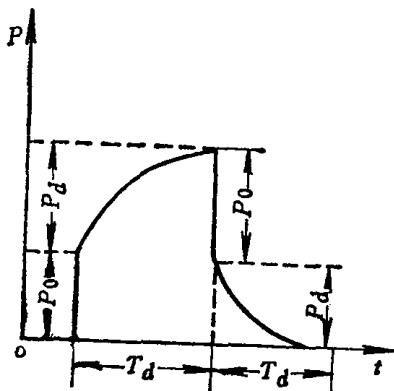


图 1-10 极化强度与时间的关系

$P_0$ —电子、原子极化强度  $P_d$ —偶极极化强度

电子极化和原子极化都是带电质点在外电场作用下产生位移而形成的,因此都称之为位移极化。同时又因其形成的时间都很短,又称之为瞬时极化。偶极子极化是由于固有的偶极子在外电场作用下发生转向而形成极化,故称之为转向极化。同时又因其形成过程是缓慢地趋向于一统计平衡状态,故又称之为松弛极化。松弛极化形成过程所需的时间,可用松弛时间来表示,它与介质的分子结构和介质的密度密切相关,通常密度小的介质松弛时间也小。气体、液体、固体介质的松弛时间是依次增长的,在固体介质中,高分子材料一般比低分子材料的松弛时间要长。

以上三种是基本的介质极化形式,此外还有下面二种特殊的极化形式。

(四) 空间电荷极化 上述各种极化中形成偶极矩的电荷都是束缚电荷,它们被束缚在分子中而不能自由地在整个介质中迁移。但我们知道即使是最优良的绝缘材料,其绝缘电阻

也不会是无穷大，也即介质中多少存在着自由的带电质点(离子或电子)，这些带电质点在外电场作用下就会沿电场方向迁移，但它们在迁移的过程中又可能会遇到各种障碍而停留在某一空间内，例如停留在电极附近不能及时放电或复合，或者停留在组合材料的分界面上。这些停留在某一空间的电荷在介质中形成了空间电荷极化，这种极化的形成往往需要较长的时间。在电气设备的绝缘结构中经常会遇到这种极化，例如为了改善电场分布而采用的分阶绝缘；或为了提高工作场强而采用的各种组合绝缘等。这些绝缘结构都是由两种或两种以上的绝缘材料组合起来的，于是在这不同材料的分界面上就可能出现空间电荷，从而形成了空间电荷极化(有时也称之为夹层极化)。下面用等效电路来分析这种极化出现的条件。

在电路中，介质阻抗可用电容  $C$  和电阻  $R$  的并联来表示。如果两种材料重叠起来，外施电场垂直于其交界面，如图 1-11a) 所示，则其等效阻抗可以用图 1-11b) 表示。 $C_1$ 、 $R_1$  并联等效阻抗代表介质 I， $C_2$ 、 $R_2$  并联等效阻抗代表介质 II。在这组合绝缘体的 a、c 之间加上电压  $u$  时，介质 I 上的电压降为  $u_1$ ，介质 II 上的电压降为  $u_2$ 。根据电流连续性原理

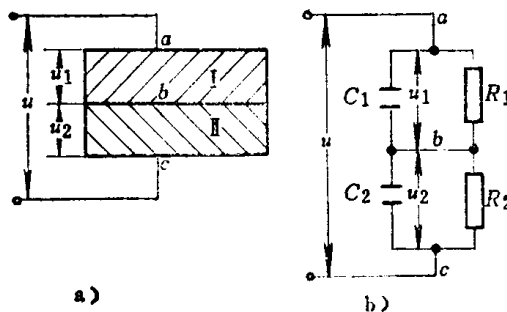


图 1-11 电介质的等效电路

$$\frac{u_1}{R_1} + C_1 \frac{du_1}{dt} = \frac{u_2}{R_2} + C_2 \frac{du_2}{dt} \quad (1-24)$$

而

$$u = u_1 + u_2$$

即

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{du_2}{dt}$$

代入式 (1-24) 得  $\frac{du_1}{dt} = -\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \left( u_1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} u \right)$

令

$$\tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2}, \quad B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u$$

$$\frac{du_1}{u_1 - B} = -\frac{1}{\tau} dt$$

$$u_1 = A e^{-\frac{t}{\tau}} + B$$

当  $t = 0$  时，两层电压按电容成反比分配，即

$$u_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u$$

代入上式得

$$A = \left( \frac{C_2}{C_1 + C_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) u$$

$\therefore$

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u + \left( \frac{C_2}{C_1 + C_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) u e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$u_2 = u - u_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u - \left( \frac{C_2}{C_1 + C_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) u e^{-\frac{t}{\tau}}$$



在任何时间  $t$ ，两种介质交界面上的空间极化电荷为

$$Q = C_2 u_2 - C_1 u_1$$

$$= -\frac{R_2 C_2 - R_1 C_1}{R_1 + R_2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) u \quad (1-25)$$

由此可见，只要  $R_2 C_2 \neq R_1 C_1$ ，在交界面上就会出现空间电荷极化。

(五) 自持式极化 某些晶体和多晶体，在一定温度范围内，由于分子内电场的作用使若干个分子结合成一电畴，电畴内正负电荷中心不重合而具有固有偶极矩。当没有外电场作用时，这些偶极矩在整个晶体内杂乱地排列，因此不呈现极化；而加上电场后，电畴的电矩转向电场方向，在电场方向偶极矩分量之和不再为零，从而出现了介质极化。这种极化形成过程较慢，极化强度很高，如薛格涅特盐的相对介电系数可达 1000 以上。这种极化的极化强度与外加电场强度的关系是非线性的，并且有滞后现象，当外加场强达到某一数值时，极化强度呈现饱和状态，如图 1-12 所示。

总之，介质极化的种类很多，在一个绝缘结构中可能同时存在多种极化形式。例如由极性材料组成的复合绝缘结构，就可能有电子位移极化、原子位移极化、偶极子转向极化以及空间电荷极化。但电子位移极化的强度很小，原子位移极化的强度也不大，通常起主要作用是偶极子转向极化和空间电荷极化。

### 三、极化强度、极化率与介电系数

极化强度以单位体积内在电场方向的偶极矩来表示。以平板电容器为例，假定充满电极之间的介质是均匀的，电场也是均匀的，则介质的极化强度为

$$P = \frac{Q_p d}{s d} = \frac{Q_p}{s} = \sigma_p \quad (1-26)$$

$P$  是矢量，它与外电场方向相同。 $\sigma_p$  为垂直于电场的介质表面出现的极化电荷的面密度。由式 (1-26) 可见，极化强度  $P$  的大小等于  $\sigma_p$ 。

电场中各点电场强度  $E$  与电位移  $D$  存在如下关系

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (1-27)$$

在平板电容器中，电位移的大小等于电极上的电荷面密度，即

$$D = \sigma_0 + \sigma_p = D_0 + P = \epsilon_0 E + P \quad (1-28)$$

$\sigma_0$  为该电极系统组成的真空电容器的电极极板上的电荷面密度，故  $\sigma_0 = D_0 = \epsilon_0 E$

比较式 (1-27) 与式 (1-28) 可得

$$P = (\epsilon - \epsilon_0) E = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E \quad (1-29)$$

上式表明极化强度  $P$  与相对介电系数  $\epsilon_r$  的关系，它正比于外加电场强度；而一般介质的介电系数与电场强度无关，它随单位场强下极化强度的增加而增大。

从微观来看，介质的极化强度与单位体积内极化质点总数、质点所在处的有效场强以及单位有效电场强度下极化质点在电场方向的平均偶极矩（即极化率）有关。这种关系可以表示如下

$$P = N \alpha E \quad (1-30)$$

式中  $N$  ——单位体积内极化质点的总数(1/米<sup>3</sup>)；

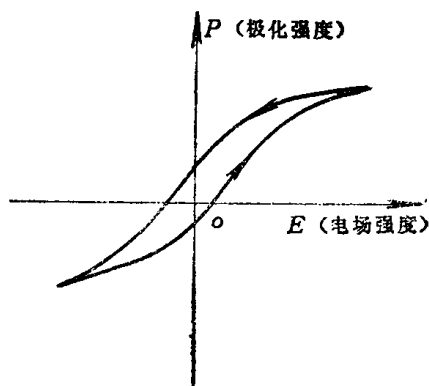


图 1-12 自持式极化与场强的关系