

中等专业学校交流讲义

电 工 材 料

哈尔滨电工学院中专部高压教研室编



中国工业出版社

中等专业学校交流讲义



电 工 材 料

哈尔滨电工学院中专部高压教研室編

中国工业出版社

本书是根据中等专业学校电工仪表专业〔电工材料〕课程教学大纲编写的。本书着重叙述了各种电工材料的组成、性质及用途，对于材料的制造方法也作了简要的介绍。其内容包括：绝缘材料的性质、绝缘材料各论，导电材料、半导体材料及磁性材料。

本书可作为中等专业学校电工仪表专业电工材料课程的交流讲义，同时亦可供有关工程技术人员和技术工人参考。

电 工 材 料

*

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）
（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行，各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $6\frac{1}{2}$ · 字数 148,000
1961年6月北京第一版 · 1961年6月北京第一次印刷
印数 0001-20000 · 定价 (9-4) 0.66 元
统一书号: 15165 · 263 (-机-27)

目 次

緒論	5
----------	---

第一編 絕緣材料的性质

第一章 絕緣材料的电性质	6
§ 1-1 概述	6
§ 1-2 电介质按其化学结构的分类	6
§ 1-3 电介质的极化及介电系数	7
§ 1-4 电介质的电导	13
§ 1-5 电介质的能量損耗	16
§ 1-6 电介质的击穿	20
第二章 絕緣材料的物理化学和机械性质	23
§ 2-1 概述	23
§ 2-2 絕緣材料的吸水性性质	24
§ 2-3 絕緣材料的热性质	26
§ 2-4 絕緣材料的化学性质	28
§ 2-5 絕緣材料的机械性质	28

第二編 絕緣材料各論

第三章 有机絕緣材料	31
§ 3-1 概述	31
§ 3-2 液体絕緣材料	33
§ 3-3 树脂	35
§ 3-4 瀝青及蜡状电介质	40
§ 3-5 絕緣漆	41
§ 3-6 纖維材料及其制品	43
§ 3-7 塑料	47
§ 3-8 橡胶	49
第四章 无机絕緣材料	50
§ 4-1 概述	50
§ 4-2 云母	50
§ 4-3 玻璃	52
§ 4-4 电工陶瓷	55
第五章 热带用絕緣材料	57
§ 5-1 热带气候对絕緣材料的影响	57
§ 5-2 热带用絕緣材料	57

第三編 导电材料

第六章 金屬导电材料的性质	59
---------------------	----

§ 6-2 金属的电阻及其温度系数	60
§ 6-3 金属的热导	61
§ 6-4 接触电位差与热电势	61
§ 6-5 金属的机械性质	62
第七章 导电材料各论	63
§ 7-1 高导电材料	63
§ 7-2 高电阻材料	66
§ 7-3 触头材料	68
§ 7-4 电磁线	69
§ 7-5 电工用碳制品	70

第四編 半导体材料

第八章 半导体原理	72
§ 8-1 概述	72
§ 8-2 半导体的导电性	72
§ 8-3 半导体的单向导电现象	74
§ 8-4 半导体化学元素	75
第九章 半导体材料及其用途	77
§ 9-1 半导体整流器	77
§ 9-2 半导体放大器	79
§ 9-3 半导体光电效应的应用	80
§ 9-4 半导体热电效应的应用	85
§ 9-5 发光体	86

第五編 磁性材料

第十章 磁性材料的性质	88
§ 10-1 概述	88
§ 10-2 磁性理论	88
§ 10-3 磁性材料的磁化特性	90
第十一章 软磁材料	93
§ 11-1 普通软磁材料	93
§ 11-2 特殊软磁材料	97
§ 11-3 高频软磁材料	98
第十二章 硬磁材料	101
§ 12-1 硬磁材料的性质	101
§ 12-2 硬磁材料	103

緒 論

在电气設備中，对电磁場起有效作用的材料叫做电工材料。

电气工业的发展是与电工材料工业的发展紧密联系着的。电工材料工业的发展对于高速度的发展电气工业，提高产品质量，降低产品成本，起着重大的作用。

一切电工材料都可以按着它們的特点与功用分为四类：

导电材料：这些材料的电阻系数在 10^{-6} 与 10^{-3} 欧 $\times$ 厘米之間，在发电、輸电、配电和調整电能的电气設備中用作导电的部分。这类材料包括电机、变压器的繞組及电器繞圈中的高电导金屬和合金；絕緣电綫和电纜的导电芯；电力傳輸綫的导綫；电气鉄道的接触綫；变阻器，电工测量仪表，电热器，白熾灯和电子管等所用的高电阻金屬及合金；做触头用的金屬及合金等。

絕緣材料（电介质）：絕緣材料的电阻較大，其电阻系数約为 $10^8 \sim 10^{22}$ 欧 $\times$ 厘米。这些材料是用来在圍繞电气設備的导电部分的媒介质中建立电場以便取得电能（电容器），以及用来防止和限制电流，使电流不沿着不希望的方向流动（电机、变压器、电器、电工测量仪表等的絕緣）。

半导体材料：电阻系数在 $10^3 \sim 10^{-2}$ 欧 $\times$ 厘米間的材料为半导体材料。半导体材料的出現，为电子技术开辟了一个广闊的道路，在現代的科学技术中全面的应用半导体材料，将使国民經济得到迅速的发展。

磁性材料：磁性材料是供增加磁通和提高系統的磁能用的；并且还可以产生继电、磁滯伸縮以及其它一些效应，这些效应用在各种电工测量仪表的特殊設備中。磁性材料被用在变压器的磁导体、电机的鉄芯、电报和电话工程、无线电通訊、雷达、继电器、电子仪器等設備中。

任何电气設備都是各种电工材料的一定的組合，电工材料的性能以及在外界因素作用下的性能，对保証电气設備工作的可靠性起着决定性的作用。因此，必須深入的全面的研究电工材料的各种性能。

由此可見，每一个从事电气技术的工程技术人员，都应该具有一定程度的电工材料的专业知識。

我国的电工材料工业，在解放后才得到蓬勃的发展，尤其在一九五八年以后的几年中发展的更为迅速，各种电工材料制造厂增加很多，材料品种日益增多，材料质量逐渐提高，对于新型产品的研究与制造也取得了很大的成就。这些成就的取得是与党的領導，以及我国广大从事电工材料工作的全体同志的努力分不开的。

但是，目前的电工材料工业还不能完全滿足国民經济发展的需要，为了促进电气工业的迅速发展，使国民經济获得持續的全面的大跃进，需要从事于电气技术工作的全体工作人员，从事于电工材料工作的全体工作人员，在党的领导下，学习先进技术，充分利用我国的丰富資源，为发展我国的电工材料工业作出重大貢獻。

第一編 絕緣材料的性质

第一章 絕緣材料的电性质

§ 1-1 概 述

在电工材料中，絕緣材料占有首要地位，它对于提高产品质量，减小产品体积，降低产品成本起着显著的作用。

絕緣材料的种类很多，按其来源可分为天然絕緣材料（如云母、松香、干性油、石棉等）和合成絕緣材料（如树脂、塑料、絕緣漆等）；按其性质可分为有机与无机絕緣材料两类；按其状态又可分为气体、液体、固体三类絕緣材料。有机絕緣材料是絕緣材料中的核心，它是用得最多最广的絕緣材料；而无机絕緣材料往往不能单独使用，一般与有机絕緣材料配合起来使用，以克服它們的共同缺点，發揮它們的共同优点。

为了正确的选择和使用絕緣材料，必須首先了解它們的性质。表現絕緣材料性质的是在电场作用下的电性质，在自然条件作用下的物理化学性质，以及在外力作用下的机械性质等。

本章首先研究絕緣材料的电性质。絕緣材料的电性质包括：

介电系数 ϵ ：即材料的相对介电系数，为簡便起见，以后均以介电系数称之。它表示在电场作用下，电介质内部电荷移动的情况，即极化程度。

絕緣电阻（或以电导来表示）：它表示电介质对电的絕緣能力。任何絕緣材料都不是理想的絕緣材料，在电场作用下或多或少的都有电流通过，因而出現絕緣电阻。一般用电阻系数（或电导系数）表示它的大小，以便各种电介质互相比較。

能量損耗：电介质在电场作用下，由于种种原因使其发热产生能量損耗。这种能量損耗不但要消耗电能，而且也使材料性能变坏，因此必須减小这种能量損耗。一般用損耗功率 P 及損耗角正切 $\operatorname{tg}\delta$ 表示能量損耗大小。

击穿电场强度：又称抗电强度，当加于材料上的电压达到某一临界值时，材料失去絕緣性能，这个电压临界值称为击穿电压 U_{np} ，与击穿电压相对应的电场强度称为击穿电场强度 E_{np} 。因此，它是表示材料抵抗电场破坏的能力。

对絕緣材料的一般要求，在物理性质方面要有小的吸湿性，好的耐热性，并且还希望它有好的热傳导能力及机械性质。在电性质方面，則希望具有很高的絕緣性质，使漏导电流尽量减少，在电场作用下，有很少的能量損耗，同时也不容易被电场所破坏。

§ 1-2 电介质按其化学结构的分类

原子是由带正电的原子核及带負电的电子組成的；分子是由相同的或不同的原子組成的。因此，分子是由一些正負电荷所組成的电的系統。根据电荷在这些分子中的分布特性，可将电介质分为三类：

中性电介质：它是由对称结构的分子组成的，分子内部正负电荷中心互相重合，因此这类分子的电矩等于零（图 1-1, a），对外不显示极性。这种分子叫中性分子或非极性分子。中性电介质的介电系数在 1.8~2.6 范围内。当没有外来杂质时，它的电阻系数很大，约为 $10^{16} \sim 10^{18}$ 欧 $\times$ 厘米。

偶极性电介质：它的分子中的正负电荷中心不重合而具有电矩（图 1-1, b），即有极性，这种分子叫偶极分子。若其电荷为 e ，正负电荷中心距离为 L ，则分子的电矩或偶极矩为

$$\mu = e \cdot L \quad (1-1)$$

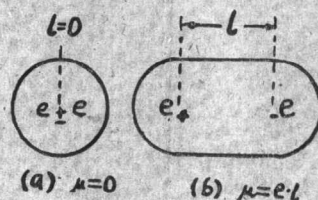


图 1-1 电介质 (a) 中性分子及 (b) 偶极性分子中电荷分布图。

偶极性分子的电矩值在 $0.3D \sim 10D$ 范围内 ($D = 10^{-18}$ 静电单位 $\times$ 厘米，称为德拜)。偶极性电介质的介电系数在 2.6~80 之间。其电阻系数在 $10^7 \sim 10^{17}$ 欧 $\times$ 厘米之间。大部分有机绝缘材料都是偶极性电介质。

离子式电介质：这一类电介质是由离子晶体所组成的。例如氯化钠 NaCl，钠是第一族中的碱金属，它将原子外层中的一个电子交给第七族的卤素原子氯，结果，钠原子形成带有正电的正离子，氯形成带负电的负离子，由于它们之间的静电吸力组成稳定的分子。整个电介质则由排列整齐的正负离子所组成的，即为离子式电介质。大部分无机电介质都是离子式的。

§ 1-3 电介质的极化及介电系数

任何物质都是由电子、质子、中子等质点所组成的。外层电子的状态基本上决定了该物质的结构，这些电子可以是自由的（例如金属等导体），也可以是受原子核或其它电荷束缚的。绝缘材料在一般情况下，有很少的自由电荷存在，绝缘材料中绝大多数电荷是被束缚的，这些束缚电荷，在电场作用下，将按其所受电场作用力的方向发生位移，而且电场强度愈大，位移也愈大。正电荷沿着电场的方向发生位移，而负电荷则逆着电场的方向发生位移。当电场移去时，电荷重新恢复到原来状态，这种位移叫弹性位移。例如食盐 NaCl 的分子中，它们的正负离子是紧密结合的，所以在正常情况下很少有自由电荷，但在电场作用下，其正离子将沿电场方向发生很小的位移，而负离子将逆电场方向稍有位移。电场消除时就恢复原来的位置。

极性分子在电场作用下，除了其中的电子和原子核可以弹性位移外，其整个分子还会顺着电场的方向转动整齐排列而显示极性。这些偶极分子在没有外电场时，因为热运动而排列得杂乱无章，使物质不显示极性。

以上所举的电介质在电场作用下发生的二种现象，即束缚电荷的弹性位移及偶极分子的转动现象，均称为电介质的极化。

由于极化作用的结果，在电介质表面上形成了符号相反的电荷。在与正极相对的面上产生了负电荷；与负极相对的面上产生了正电荷，如图 1-2

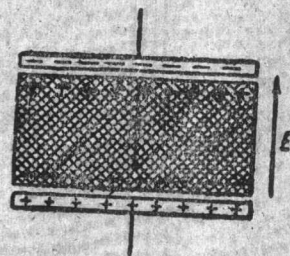


图 1-2 极化电介质的电荷分布。

所示。

电介质的束缚电荷的弹性位移，可以不引起能量的损耗，但其它极化形式，则可以引起一部分能量转变为热能，而使电介质发热。

任何接于电路中的电介质，都可以看作是具有一定电容量的电容器。如该电容器之电容量为 C ，而加于电介质上的电压为 U ，则可以求得该电容器之电荷量 Q ：

$$Q = CU \quad (1-2)$$

当外加电压值一定时，电量 Q 可以认为由二部分组成的。一部分是当电介质未接入，电容器之极片间为真空时，电极上存在的电荷 Q_0 ；另一部分是接入电介质后增加的电荷量 Q_d ，这电荷量 Q_d 是由于电介质在电场作用下产生极化的结果

$$Q = Q_0 + Q_d \quad (1-3)$$

在电容器中加入电介质后，极片上电荷量所以增加的原因，可以解释如（图 1-3）。

图 1-3. A 表示极性分子的排列情形。在没有外电场作用时，由于热运动而杂乱排列，对外不显现极性。图 1-3. B 表示真空电容器，在二平行极板之间无任何电介质存在，故无极化现象。当在极板上加以电压后，极板上产

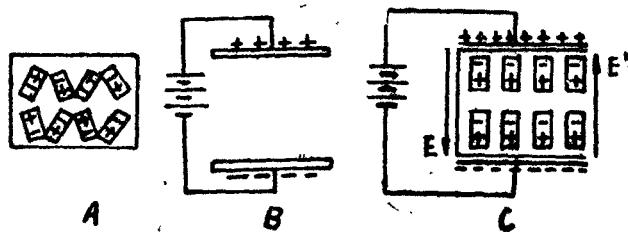


图 1-3 极化作用示意图。

生电荷 Q_0 。而 $Q_0 = C_0 U_0$ 。将 A 表示之电介质，放到 B 之极板中，而外加电压、极板距离等条件，均维持不变（如图 1-3. C），则此时极板上的电荷量将由 Q_0 增加到 Q 。

由图 1-3. C 可以看出，如果电源电压恒定，则在电容器二极板间的电压也维持不变，也就是存在于电容器中的电场强度 E 不变。而现在因电介质的存在发生了一个反向电场 E' ，因此要使总电场强度 E 不变，必须增强原来方向的电场，也就是必须增加极板上电荷使成为 Q ，所增加的电荷 Q_d 完全是极化的结果。

上述关系说明了由于电介质的存在，使电容器的电容量 C 比真空时的电容量 C_0 增大了一些。

相对介电系数 ϵ 在数值上等于电量 Q 与 Q_0 之比值，则

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} \quad (1-4)$$

或

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} \quad (1-5)$$

式中 Q ——电容器以绝缘材料作介质时的电量；

Q_0 ——电容器以真空作介质时的电量；

C ——电容器电极间有介质存在时的电容量；

C_0 ——电容器电极间为真空时的电容量。

由上式可以看出，对物质的介电系数 ϵ 可以下一定义：以该物质为电介质时的电容器之电容，与以真空作介质的同样尺寸的电容器之电容的比值，称为该物质之相对介电系数。既然 $\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0}$ ，而在任何情况下 $Q > Q_0$ ， $C > C_0$ ，因此除了真空以外，任何电介质的相对介电系数一定大于 1，只有真空等于 1。

由于介电系数与 Q_d 有很大关系，而 Q_d 的大小取决于电介质之极化程度。因此介电系数是表示电介质极化程度的一个系数，可以直接影响电容器的电容量、电荷及电场强度，是绝缘材料的一个主要的特性。

介电系数与温度的高低有关。它们的关系因电介质结构的不同而异。介电系数与温度的关系，用介电系数的温度系数来表示，即温度变化时，介电系数相对的变化。如以 α_t 表示介电系数的温度系数， t 表示温度，则

$$\alpha_t = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt} \quad (1-6)$$

电介质的介电系数主要决定于电介质的结构。同时由电介质的介电系数可以看出该电介质的极化现象。因为电介质结构的不同，其极化的形式可分成下列几类。

电子式极化：任何物质都是由分子组成，而分子是通过各种不同方式结合起来的。在这些分子中必然具有原子核（或正离子）及核外电子。因此任何电介质在电场作用下，电介质的电子必然产生与原子核之间的相对位移。由于电子对原子核的位置有所改变，使电介质呈现极性。这种极化现象是由于电子的位移而形成的，故称电子式极化。

电子式极化呈现于任何电介质中。电子的质量很小，只有氢原子核的 $\frac{1}{1850}$ ，因此极化所需的时间很短，约为 $10^{-13} \sim 10^{-15}$ 秒。电子式极化既是瞬时完成，所以在任何频率范围内都能产生，其极化程度与单位体积内原子上受束缚的电子数目成正比，与原子核对电子的约束力成反比。当温度升高时，电子与原子核的结合力减弱，使极化加强。但同时密度又因温度的增高而减小，又有使极化作用减低的效果。在普通情况下，上述二种效果不能互相抵消，一般说来，温度对于电子式极化的影响不大，其介电系数仅具有很小的负温度系数。即温度升高时介电系数略有降低。

离子式极化（又称原子式极化）：固体无机化合物是以离子结合而成的，如盐类及金属氧化物等。这些电介质的极化是束缚离子的弹性位移的结果。这些离子在没有电场存在时，互相牵制，而且大部分离子结合的固体的正负离子中心是重合的，故不显现极性。加上电场以后，正负离子的振动中心，向相应的电极偏移，使整个分子显现极性，由于正负离子发生位移而形成的极化，称为离子式极化。离子是带电的原子，因此其质量与原子相似，故又称为原子式极化。

离子式极化只可能存在于具有离子式结构的无机固体中。与离子式极化的同时，一定还伴有电子式极化，因为在这些物质中，仍有大量电子存在，在电场中也产生位移。

离子的质量远较电子大，惯性也大，故产生此种极化时，所需的时间较长，约为 10^{-13} 秒。当电场的频率在红外光频率以下时，离子结构的固体均能显现此种极化现象。电场频率在红外光频率以上时，因变化太快，离子式极化现象就逐渐减小，最后只有电子式极化存在。故凡是具有离子结构的电介质，在红外光频率以内，其介电系数值是不改变的；超出红外光频率时，介电系数才开始下降。但在目前应用的电场的频率来讲，离子式结构的电介质的介电系数值是一个常数。

温度升高时，离子式极化程度的改变也有二种因素。离子间结合力随温度升高而降低，使极化程度增加，介电系数值随之加大；但是离子的密度随温度升高而降低，则使极化程度降低，介电系数也随之减小。其中以第一种因素影响较大，所以有离子式极化的电介质，具有数值不大的正的介电系数温度系数。

一般离子式极化很少有能量损耗，可以忽略不计。如石英、云母、氧化铝、玻璃、陶瓷、食盐等电介质中都具有这种极化形式。

必须指出，离子式极化形式绝对不可能出现于任何液态电介质中。凡是离子式结构的物质，不论溶解成溶液或熔化成液态时，离子游离成自由离子，仍使电阻系数大大下降，不再属于电介质的范围了。

电偶式极化：又称分子式极化。电偶式极化是某些极性电介质所固有的极化形式。电偶式极化与电子式极化和离子式极化间具有很大的差别，电偶式极化与分子的热运动有很大关系，它的极化是由于整个分子的转动而形成的，故又称分子式极化。

当无外电场存在时，极性分子处于不断的热运动中，使其呈现杂乱的排列，因此对外不呈现极性。当在电介质上加以电场时，这些分子会部分地顺电场取向，因此使电介质显现极性。

极性电介质的极化除了电偶式极化以外，一定也伴有电子式极化。因为分子的质量大，所以在受电场的作用而旋转时，因其本身的惯性以及旋转时可能遇着的内阻力，故需要较长的时间才能完成，一般在 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ 秒，同时也消耗较多的能量。在无线电发射频率时，因为电场变化太快，极化现象来不及产生而使极化减弱。在发射频率以下，则电场变化较慢，电偶式极化现象才能存在，故具有此种极化性质的材料，在射频以下时介电系数大，在射频以上时介电系数逐渐降低，最后只有电子式极化，介电系数又趋稳定。图 1-4 中 ϵ_0 为 $f = 0$ 时的介电系数，由电子式及电偶式极化二部分组成， f_0 以上逐渐减小， ϵ_∞ 是 f 接近无穷大时的介电系数。这一部分仅包括电子式极化，故不随频率而改变。离子式极化也可得到同样形状的曲线，不过 f_0 较大，为红内光的频率。

电偶式极化与分子热运动有关，温度增高时，热运动加剧，使偶极性分子的排列更加杂乱，故温度系数为负值。但是，温度升高，固体的结构松弛，液体的粘度降低，都足以增加极化作用。以上二种因素同时影响电介质的极化。根据实验结果知道，在某一定频率下，在温度较低时其介电系数的温度系数为正值，即第二种因素比较主要，在温度达到某一定值时介电系数也出现一个最大值，温度再继续升高则温度系数就变成负值，也就是第一种因素比较主要了。极性液体（苏伏油）的介电系数与温度的关系曲线见图 1-5 所示。

电偶式极化的极化程度，是和分子的偶极矩 μ 成比例的。根据实验结果，凡是偶极矩愈大，则极化程度愈强，其介电系数也愈大。凡是极性电介质的介电系数，一般较结构相似的非极性电介质的介电系数要大得多，如 $\epsilon(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2) > \epsilon(\text{C}_6\text{H}_6)$ ； $\epsilon(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) > \epsilon(\text{C}_2\text{H}_6)$ 等等。

以上三种极化形式（电子式、离子式、电偶式）是最基本的也是最主要的。另外还有所谓〔结构式极化〕及〔自发式极化〕也能在某些复杂结构的电介质中呈现，下面略加介绍。

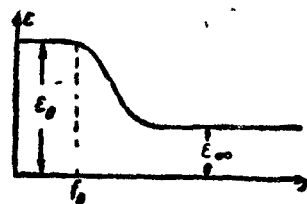


图 1-4 极性电介质(苏伏油)的介电系数与频率的关系(f_0 = 射频)。

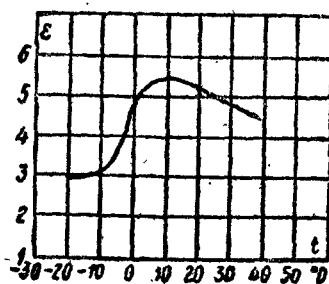


图 1-5 极性液体苏伏油的介电系数与温度的关系曲线。

結構式極化：無定形的及結晶結構的極性固體電介質及無定形離子電介質，如各種天然樹脂及極性聚合物（電木、虫膠、有機玻璃、硬橡膠、聚氯乙烯等）、纖維素及其製品（紙、紗、醋酸纖維脂等）、鹵腊、無機玻璃等電介質里面不單呈現電子式極化也有結構式極化。至于無定形離子介質則除這二種極化外還有離子式極化。

無定形及結晶結構的極性固體電介質，除了有電子式極化以外，尚有電偶式極化。它們的極化雖然也是由于在電場作用下而轉動，但與結構比較簡單的極性液體略有不同，這種極化一般已經不是由整個分子的轉動所引起的，而是分子中的極性基與分子發生相對的轉動。這種在固體極性電介質中發生的電偶式極化特稱為結構式極化。纖維素就是具有這種極化形式的例子。纖維素中的極性基就是羥基。故在纖維素有電子式及結構式二種極化。

無機玻璃及某些離子晶格不緊密的離子式晶體中，除了電子式極化和正常的離子式極化以外，其中某些聯繫不強的離子，能在外界電場作用下從雜亂的熱運動中得到沿電場方向的過分位移。這種由于結構特別弛緩而引起的極化形式也稱為結構式極化。這二種結構式極化的極化方式並不相同。因此應將極性固體所特有的極化稱為結構式極化，或者與極性液體電介質之電偶式極化，一起稱為偶極弛張式極化。因為這些電介質均具有偶極分子而且其極化均與質點之熱運動有關。無定形離子結構的電介質的極化稱為離子弛張式極化。因為它們的極化也與離子的熱運動有關。

綜合以上所述各種極化形式，可以歸納為下列二大類：

第一類極化形式是電介質在電場作用下發生的。實際上是瞬時的、彈性的、沒有能量損耗的，亦即不发熱的極化。這類極化包括電子式極化和離子式極化二種。

第二類極化形式是在電場作用下不是瞬時完成的，並且在電介質中發生能量損耗，也就是使電介質發熱。這種極化統稱弛張式極化，都與質點的熱運動有關。屬於這類極化形式的有偶極弛張式極化（包括液態的電偶式極化和固態極性電介質的弛張式極化）及離子弛張式極化。

具有偶極弛張式極化（固態極性電介質之極化形式）的電介質的介電系數與溫度及電場頻率有很大關係，往往與極性液體相似，不過關係格外密切而已。離子弛張式極化的電介質，它們的介電系數都比較小，而介電系數的溫度系數則較大，並且大都是正值。

自發式極化：某些晶體具有特殊的離子結構，它們的極化形式，除了有電子式極化、離子式極化以外，尚具有特殊的自發式極化。這些電介質稱為強性介質。

強性介質的離子晶格上正負離子的中心是不重合的，因此與普通的離子結晶不同。強性介質具有偶極分子，這些偶極分子在一定區域內在沒有電場時就已經自發地指向同一方向，這一個區域稱為一個電疇。不過在沒有外界電場時所有的這些區域（電疇）的方向是不同的，故只有在一個區域內有極性，整個電介質仍不顯極性。當外電場加上後，就促使電疇取向，這就出現了強烈的極化效應，這種極化稱為自發式極化。具有自發式極化的強性介質的性質，將在本節最後加以討論。

除以上各種極化形式以外，某些電介質在受到直流電壓或低頻交流電壓（100~1000赫）的作用時，還呈現出一種極化形式，稱為高壓式極化。由于電介質中存在雜質或結構不均勻，使電介質中的離子，在運動時受到阻礙，最後在鄰近電極的電介質內聚集有符號

与电极相反的电荷，这种极化，有时可以形成較高的反电势，而且形成得最慢。某些离子结构的材料中有时有高压式极化出现。

下面简单地分析一下各种不同状态的介质的极化情况：

气态物质的介电系数：气态物质的密度很低，分子間距离很大，其极化现象微不足道，而且只要是电子式极化，所有气体的介电系数差不多都接近于1。分子半径愈大，介电系数愈大，如氮分子半径为 1.12×10^{-8} 厘米，其介电系数为1.000072，二氧化碳分子半径为 2.3×10^{-8} 厘米，介电系数为1.00096。

气体的介电系数与温度及压力有关。因为一定容积内的气体分子数与气体压力成正比与绝对温度成反比，故温度升高时介电系数因单位体积内分子数减少而下降，压力增加时介电系数因单位体积内分子数增加而上升。

这两种因素都不能使气体的介电系数有显著的变化。

空气的介电系数与压力温度的关系见表1-1和表1-2。

液体电介质的介电系数：液态电介质是由中性分子或者是由极性分子构成的。

中性液体电介质在室温时介电系数约在2左右，絕不超过2.5。它的极化与电场频率无关，温度升高时则介电系数略有减小，极化时无能量损耗。

极性液体的介电系数很高，凡是电矩愈大，单位体积中分子数目愈多，则介电系数也愈大。其介电系数的温度系数是先正而后负，主要决定于液体之粘度及分子之热运动，开始时粘度下降使分子容易排列，以后则由于分子热运动过剧而妨碍分子之排列。当电场频率高于射频频时，则极化程度下降。极性液体苏伏油的介电系数与频率及温度的关系见图1-4及图1-5。

固体电介质的介电系数：固体电介质的结构最为复杂而种类也最多，计有下列五类：

· **中性电介质：**如石蜡及某些高频树脂。其极化形式只是电子式一种，故介电系数较小，且与电场频率无关，其温度系数，因物质受热膨胀，密度减小而为负值，与中性液体电介质相似。

离子结构的结晶固体：如岩盐、氧化铝等，其极化形式包括电子式及离子式两种。介电系数变化较大，介电系数的温度系数为很小的正值，与频率的关系不大，无显著的能量损耗。

无定形离子结构的固体：玻璃是此类电介质的典型例子。其极化形式包括电子式，离子式，结构式（或称离子弛张式）三种。其介电系数约在4~20之間，介电系数的温度系数一般为正值，含碱金属后往往使玻璃的温度系数加大。

结晶及无定形极性固体：包括纤维及卤蜡等固体材料。此类电介质包括电子式、电偶式等二类极化形式。它们的极化情形与液体中的情形一样。此类物质的介电系数受温度及频率的影响很大，与极性液体介电系数与温度及频率的关系相似。

强性介质：强性介质具有特殊的离子结晶结构。其离子的极化程度较普通离子结构的固体要大得多。此种电介质包括电子式、离子式及自发式三种极化形式。它们的介电系数

表1-1 空气的介电系数与压力的关系

空气压力(大气压)	1	20	40	真空
19°C时之介电系数	1.00059	1.0108	1.0218	1.0000

表1-2 空气的介电系数与温度的关系

温 度	-60°C	+20°C	+60°C
介电系数(在1大气压下)	1.00081	1.00058	1.00052

与温度的关系极为显著，它们的介电系数都很大，有在1000以上的。钛酸钡、薛氏盐等均为此类电介质。强性介质因其性质的不同，在无线电工业上有特殊的用途。

介电系数对选择材料有很大的作用。作为电容器介质用的绝缘材料，如果希望电容器具有尽量小的体积及极板面积，则应该选用介电系数较大的绝缘材料。在选择电容器介质时，不但要考虑到介电系数的大小，而且应该注意它的温度系数，希望得到电容量稳定的电容器，则必须具有尽量小的温度系数。

用于电缆制造及一般绝缘的绝缘材料的介电系数要低，以减少充电电流及电容，降低在这些材料上的能量损耗。

两种绝缘材料复合使用时，必须注意尽量选择介电系数相近的材料，如介电系数相差太远，则电压的分布是不均匀的，大部分外界电压集中在介电系数较小的材料上。这个现象说明了在材料中不应含有空气泡，因为空气的介电系数小，电压集中在空气上，而使空气游离，游离后产生电量，能腐蚀固体绝缘材料，日久绝缘体终被击穿而短路，故材料中的空气必须全部去净。

§ 1-4 电介质的电导

绝缘材料所以具有传导电流的能力，是由于在电介质中或多或少地存在着一些自由电荷，这些自由电荷可以是电介质本身的离子，也可以是杂质的离子。在加上直流电压时，离子从电介质中分离出来，并在电极上中和，这时电介质的电流即为漏导电流。在交流电压时，漏导电流则决定了电流的有效分量的一部分。

在接上电压后的初期，漏导电流与极化电流是同时产生的。因此在测量电介质的电导时是必须注意到的。当电介质在加上电压后不久的时间内所测得的电流，往往不仅是漏导电流，而且有与它同时产生的极化电流（吸收电流）。当将二电极短路时，试样产生可逆的放电电流，最后也衰减至零。

当电介质的偶极分子在按照电场方向缓慢极化时，极化电流变得如此显著以致在测量漏导电流时可以造成不正确的观念，将漏导电流误认为很大。但电介质在接入直流电路后，电流会逐渐衰减。这种衰减所经历的时间视电介质的性能而定，最后电流逐渐趋近于一个常数，这个常数就是由该材料的电导所决定的漏导电流值。

在电介质接上直流电压的最初时刻内有极化电流同时形成，过了一定时间后，由于极化的饱和，最后极化电流衰减至零，流过电介质的电流只有漏导电流了。如果知道了施加于电极的电压 U ，同时用灵敏的检流计量得在电路中通过的电流 I ，则可以确定电介质的绝缘电阻 $R = \frac{U}{I}$ 。

如果所试验的材料是陶瓷，玻璃或任何其它非多孔性无机材料制成的，把它置于潮湿空气中，我们看到在电路中的电流可以增大许多倍。这种现象是由于在潮湿空气中表面电流剧烈的增加。

电介质的漏导电流包括表面漏导电流及体积漏导电流两部分。由表面漏导电流所决定的电阻为表面电阻 R_s ，由体积漏导电流所决定的电阻为体积电阻 R_v 。

计算体积电阻系数 ρ_v 可用下式：

$$\rho_v = R_v \frac{S}{l} \text{—欧} \times \text{厘米} \quad (1-7)$$

式中 R_v ——体积电阻, 由外加电压及产生的体积漏导电流决定, 欧;

S ——测量电极的有效面积, 厘米²;

l ——测量电极间的距离, 厘米。

因此体积导电系数:

$$r_v = \frac{1}{\rho_v} \quad \text{欧} \times \text{厘米}$$

计算表面电阻系数 P_s 可用下式:

$$P_s = R_s \frac{b}{l} \quad \text{欧} \quad (1-8)$$

式中 R_s ——表面电阻, 由外加电压 U 及所产生的表面漏导电流所决定, 欧;

b ——电极的长度, 厘米;

l ——电极间距离, 厘米。

表面电导系数: $r_s = \frac{1}{\rho_s} = \frac{1}{\text{欧}}$ 。

一般情形下, 由于表面的积聚灰尘及水汽, 固体的体积电阻较表面电阻大。不过在体积电阻系数值低于 10^{14} 欧 $\times$ 厘米, 而空气湿度在 25% 以下时, 则大部分导电电流将由体内通过。

表面电阻只有在固体绝缘材料中考虑, 气态或液态材料均无表面电阻与体积电阻之分。

气体电介质的电导: 在正常状态下, 气体的质点是中性的, 不能导电, 是理想的绝缘体。如果在气体中存在微量的带电物体, 就能够导电。但实际上, 气体不可避免地要受到外界激素的作用, 如各种放射线、紫外线、伦琴射线、宇宙线以及电场、高温等等, 在气体中就产生了电子, 正离子及负离子, 这些激素可称为游离剂。

在上述许多激素的作用下, 使气体原子中的电子获得能量而脱离原子核的束缚, 原子就变成带正电的正离子, 这种作用称为游离作用。分裂出的电子可能与中性原子结合组成负离子。

这些由外界因素作用而产生的带电质点, 在弱电场作用下移动而形成的导电, 称为气体的非自制性导电。但是, 外界激素的作用并不能使正负离子数无限增加, 因为在游离的同时, 必定有一部分正负离子互相结合成中性分子, 这一过程称为复合作用。在一定情况下, 气体的游离作用与复合作用互相达到平衡, 使气体内的离子数保持了一定的密度而不能无限增加。以空气为例, 在 0°C 时平均每厘米³ 约含有 2000 个离子, 而此时所含的分子数为 2.7×10^{19} 个。

在外加电场作用下, 带电质点产生有规律的运动, 因此产生了电流, 电流的大小决定于单位时间离子达到二极的数目。增加电压, 趋向于二极的离子数增加, 复合作用减弱, 因而电流随电压正比例增加, 服从欧姆定律, 如图 1-7 所示。当电压达到一定值时, 电流饱和, 这是由于单位时间内所能游离的离子都趋向于二电极, 到电极上的带电质点数不能再增加。在电压 U_{kp} 以前产生导电的原因完全是由于外界激素的影响。如果将外界激素除去, 导电就停止, 这种导电叫非自主导电或非自制性导电。

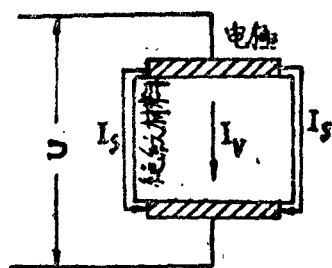


图1-6 表面电流(I_s)与体积电流(I_v)。



图1-7 气体的电流与电压的关系。

在强电场作用下, 气体中带电质点获得足够大的能量时, 就能撞击气体分子使气体产生撞击游离。由于撞击游离使正负离子剧烈增加, 这时的气体电导称为自主性导电或自制性导电。发生自制性导电后, 气体中离子数就不再保持一定数值, 此时电介质丧失其绝缘性能而成为导电体。

根据实验, 空气的饱和电流密度仅为 10^{-19} 安/厘米², 所以只要空气还没有达到撞击游离条件时, 可认为是相当完善的电介质。

液体电介质的电导: 液体电介质的电导视其分子结构而定。中性液体本身的漏电流是很小的, 其电导主要决定于所含杂质及水分。极性液体电导不但为杂质所决定, 并且与液体本身的离解度有关。液体中的电流, 可以是由于离子的移动而引起, 也可以是带电的悬浮质点所引起的。

将能游离的杂质从液体电介质中完全除去是不可能的, 因此一般液体电介质的电导要比气体大一些。

任何液体电介质的电导与温度有很密切的关系, 温度增加时液体粘度减少, 使离子的迁移率增加, 则电导必然增加。

液体电介质之电导, 在电压不高时也将遵循欧姆定律而变化; 达到游离电压时, 则因离子数剧增而迅速上升, 不再遵循欧姆定律变化。与气体电介质不同的是液体电介质所具有的自由离子数较多, 不容易饱和, 往往在饱和以前就产生了撞击游离的现象。

液体电介质之电导与电场强度之间的关系如图 1-8 所示。

固体电介质的电导: 固体电介质的电导为其本身或其杂质的离子的运动所引起。在强大电场的作用下开始有因自由电子的存在而引起的电导。

固体电介质的结构最为复杂, 而且其导电形式又有表面电导与体积电导之分。

根据固体电介质的结构, 可以分为结晶的和无定形的两种。均匀的晶体有离子的及分子的二种结构。在分子结构的结晶固体中如硫、石英等其电导系数很微小, 仅为所含杂质所决定, 比较简单。在离子结构的结晶固体如岩盐及其它金属氧化物等, 正负离子在自己电荷的吸力及斥力支持下处于晶格的节点上。当温度升高时, 离子在平衡位置上的振动加强, 有时可以使离子从晶格上脱离而成自由电荷。温度愈高, 该现象愈显著, 电介质的导电也愈大。

温度与电阻系数 ρ_v 或电导系数 r_v 的关系近似于下式:

$$\rho_t = \rho_0 e^{-a/t} \quad (1-9)$$

$$r_t = r_0 e^{a/t} \quad (1-10)$$

式中 ρ_t, r_t —— $t^\circ\text{C}$ 的电阻系数及电导系数;

ρ_0, r_0 —— 0°C 的电阻系数及电导系数;

a —— 材料的常数。

· 无定形固体, 如玻璃、橡胶、塑料及其它高分子有机化合物, 它们的电导与本身的化

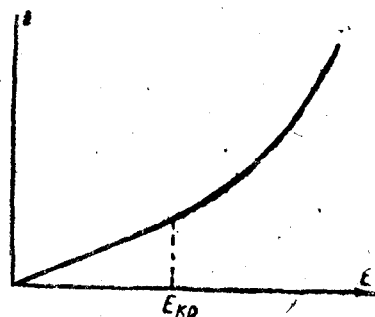


图1-8 液体电介质的导电性与电场强度的关系。

学成分，与所含杂质等有关。

总的来讲，一般固体电介质的电导决定于其结构、杂质、温度及湿度等等。

固体电介质的表面电导，由于表面上形成的水膜所引起。水膜愈厚则表面电导愈大。因此表面电导与空气的相对湿度有很大关系。至于空气的相对湿度对电介质表面电导的影响则因电介质结构的不同而异。如非水溶性的电介质如石蜡、陶瓷，表面电阻较高，与湿度的关系较小；部分水溶性的电介质如玻璃，湿度影响较大；多孔性结构的电介质，则表面电阻系数最小，与湿度的关系也最显著。

为了提高固体的表面电阻可在表面使用不透水的涂料，如涂以有机漆类或上釉等。石蜡本身虽不吸湿，但具有透水性，故并不理想。除此以外，将材料制成曲折的表面，以增加表面长度，使电阻适当地增加。

§ 1-5 电介质的能量损耗

电介质在电场的作用下单位时间内消耗的能量，也就是引起电介质发热所消耗的能量，称为电介质的损耗功率，简称介质损耗。

材料内部的自由离子在电场作用下作定向运动，其束缚电荷或极性分子在电场作用下作规则排列，在这些导电及极化过程中，必然会因与分子摩擦而消耗电场的能量。不过，极化所消耗的能量在直流电压下是很小的，只有在频率很高的交流电压下才显著。所以极性电介质在高频电压下损耗的能量必须加以注意，频率愈高，则极化次数愈多，损耗的能量也随之增加。

在绝缘材料中，除了漏导电流的损耗及极化的损耗以外，还有其它由外来的与电介质无关的半导体性杂质所引起的附加损耗。材料中含量极微的杂质如水、氧化铁、碳等等，会引起很大的损耗。在高电压下，更由于电介质内部所含的气体发生游离而引起介质损耗。

绝缘材料中的电介质损耗值，可以用单位体积中损耗的功率来衡量。一般在表示电介质在电场中损耗能量时，经常用电介质的损耗角及其正切值的观念。

绝缘材料置于直流电场中，由于材料中自由电荷很少，漏导电流很小，损耗功率不大。其损耗功率：

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (1-11)$$

式中 I ——电介质的漏导电流；

U ——直流电压；

R ——电介质的电阻。

任何绝缘材料，如温度不高，杂质及水分含量不多，则漏导电流是不大的，此时能量损耗不显著。例如在一立方厘米普通的绝缘材料上加以100伏直流电压，其漏导电流约为 10^{-8} 安，则其损耗功率 $P = IU = 10^{-8} \cdot 10^2 = 10^{-6}$ 瓦。

绝缘材料在交流电场中，除了有因漏导电流而产生的损耗以外，主要还有因极化而形成的损耗。为了便于研究电介质在交流电路中的损耗，首先来观察以该材料制成的电容器。

根据已知的理论，在一个理想的电容器中，其电压与电流的变化，应该相差 90° 相角，因此理想电容器无有功功率的损耗。真空度很高的真空电容器与理想电容器的性质几乎相似。

有电介质的电容器有漏电流和极化所引起的损耗，其电压与电流的变化不再是相差