

电 工 器 材

陈宪文 翁世耀 程玉书 编

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 8 5 年 • 北 京

内 容 简 介

本书从物资技术管理工作的实际需要出发,着重阐述了绝缘材料、导电材料、半导体及电子元器件、电机、电器和电工仪表等的基础知识、基本理论、性能、参数指标,以及检验、测试方法;还介绍了器材的合理使用、储运及保管原则。在选材上注意了典型性、先进性和通用性。另外,对有发展前途和近几年发展的新材料、器材,如直线电机、集成电路等也作了介绍。

本书可作为大学物资技术管理专业的教材,亦可供物资技术管理工作者和从事电工技术、电气设备工作的同志学习和参考。

电 工 器 材

陈宪文 翁世耀 程玉书 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 黄成士

封面设计 王毓平

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 21.5 字数: 541千

1983年5月第1版 1985年4月第2次印刷

印数: 15,001—25,000册 定价: 2.95元

前 言

现代科学技术的飞速发展,使电能国民经济各部门得到普遍而广泛的应用。随着“四化”的逐步实现,电气化、自动化的程度必然进一步提高。电工器材是电气化、自动化的物质基础。如果没有电工器材,可以说电能的生产、输送、分配、使用、控制过程就不能实现。所以,电工器材和金属材料、非金属材料一样对国民经济的发展起着重要的作用。

在工业方面,发电部门需要大量的发电机、变压器、输配电设备;冶金、矿山、机械部门使用大量电动机、电器;铁路交通部门广泛应用牵引电机、起重运输设备、通信信号设备;至于邮电部门,更是离不开电工器材。

在农业方面,随着现代化程度的提高,农业排灌设备,农产品加工设备,中小型输发电设备将越来越广泛发展和使用。

在国防和科学技术方面,大量应用各类仪器仪表,制导控制设备以及监视、计算、测试设备。

由于国民经济各部门所应用的器材都建立在绝缘材料、导电材料、磁性材料及半导体材料的基础上,因此,电工原材料的性能优劣又直接关系到器件和整机设备性能和质量。近年来,电工材料性能不断提高,新材料、新品种、新应用不断出现。如超导电材料、超高阻材料、超纯净半导体材料的出现,为新型元器件和整机设备的发展,提供了良好的物质基础。

随着电工器材的发展,品种、规格越来越多,性能和技术条件要求越来越高。如何科学地管理,合理地使用,最大限度地发挥电工器材的性能和效果,就成为一个迫切的问题。对于从事电工器材的物资技术管理人员来说,不仅要掌握电工材料、器件和设备的基本理论、性能、适用范围,以及如何经济合理地选用,充分发挥器材的性能效果,而且要熟练掌握电工器材的检验、质量标准、代用、运输、保管等知识,还要了解器材的发展方向,积极推广应用新材料、新设备,以促进国民经济的飞速发展。对于电气工程技术人员来说,了解器材性能,掌握质量标准以及合理使用等也极为重要。

由此可见,随着“四化”的进展,国民经济各部门对电工器材的数量、质量的要求越来越高,而电工器材的研制、生产和发展,也必将进一步促进国民经济的更快发展。与此同时,对物资技术管理工作也将提出更高的要求。

电工器材内容十分广泛,品种繁多,性能差异很大。本书从物资管理工作的实际出发,着重阐述基本理论,选择具有典型性、通用性、先进性的器材进行讨论,对一般器材简要地列表说明或省略,以求精炼。

本书的计量单位以国际单位制(缩写符号SI)为主,但收集的实验数据多为厘米·克·秒制单位,为便于读者换算,现将国际单位制与厘米·克·秒单位制单位的量值关系用表下注和附录的形式列出,供参考。

本书由北方交通大学陈宪文、翁世耀同志和铁道部物资局天津职工大学程玉书同志合编。

陈宪文编写12~19章和23、24章,翁世耀编写1~11章和20~22章,程玉书编写25~28

目 录

第一篇 绝缘材料

第一章 电介质理论基础	1	第一节 液体绝缘材料的用途 和分类	26
第一节 绝缘材料的功用和 分类	1	第二节 矿物绝缘油	27
第二节 电介质的电导	1	第三节 植物绝缘油	30
第三节 气体、液体、固体介质 的电导	3	第四节 氯化物液体绝缘材 料	31
第四节 绝缘电阻在工程应用 上的意义	6	第五节 硅有机液体绝缘材 料	32
第五节 电介质的极化	7	第六节 绝缘油的老化与再 生	33
第六节 气体、液体、固体介 质的介电系数	10	第四章 绝缘漆、绝缘胶与熔敷 粉末	35
第七节 影响相对介电系数的 因素	12	第一节 概述	35
第八节 介电系数在工程应用 上的意义	12	第二节 浸渍漆	36
第九节 电介质的损耗	12	第三节 涂覆漆	38
第十节 影响介质损耗的因素	14	第四节 绝缘胶	40
第十一节 气体、液体、固体 介质的介质损耗	15	第五节 熔敷粉末	41
第十二节 介质损耗在工程应 用上的意义	17	第五章 浸渍纤维制品	42
第十三节 电介质的击穿	17	第一节 绝缘漆布	42
第十四节 气体、液体、固体 介质的击穿及其影 响因素	17	第二节 漆管	45
第二章 绝缘材料的非电性能	20	第三节 绑扎带	45
第一节 绝缘材料的热性能及 耐热等级	20	第六章 绝缘层压制品	47
第二节 绝缘材料的吸湿性	22	第一节 概述	47
第三节 绝缘材料的老化	24	第二节 层压板	47
第四节 绝缘材料的命名法	25	第三节 卷制层压制品	50
第三章 液体绝缘材料	26	第四节 模制层压制品	54
		第七章 电工用橡胶	54
		第一节 天然橡胶	54
		第二节 丁苯橡胶	56
		第三节 氯丁橡胶	57
		第四节 硅橡胶	58
		第八章 电工用塑料	60

第一节 电工用塑料的组成和分类	60	第三节 玻璃纤维制品	82
第二节 热固性塑料	61	第四节 电工陶瓷的分类和用途	83
第三节 热塑性塑料	66	第五节 电工陶瓷的性能及影响因素	85
第九章 绝缘云母及其制品	72	第十一章 绝缘材料的检测与保管	86
第一节 云母的分类、级别及用途	72	第一节 绝缘电阻的测量	86
第二节 云母的结构及性能	74	第二节 相对介电系数与介质损耗的测量	91
第三节 云母制品	76	第三节 击穿强度的检测	94
第十章 电工玻璃与陶瓷	80	第四节 绝缘老化的检测	97
第一节 电工用玻璃的分类及用途	80	第五节 绝缘材料的保管原则	100
第二节 玻璃的性能	80		

第二篇 导电材料

第十二章 导电材料理论基础	101	第十四章 电线和电缆	125
第一节 导电材料的功用和分类	101	第一节 电线、电缆的分类和型号命名法	125
第二节 金属的导电理论	101	第二节 架空导线	127
第三节 金属的电阻及影响电阻的因素	104	第三节 架空导线的主要性能	130
第四节 金属导电材料的其它主要性能	106	第四节 架空导线的选用原则	134
第十三章 高电导金属材料	108	第五节 设备用电线和电缆	135
第一节 导电金属概述	108	第六节 电力电缆	140
第二节 导电用铜及铜合金	109	第七节 通信电缆	147
第三节 导电用铝及铝合金	117	第八节 电磁线	151
第四节 复合金属导体	123	第十五章 特殊用途导电材料	156
		第一节 高电阻合金制品	156
		第二节 电碳制品	159

第三篇 磁性材料

第十六章 磁性材料理论基础	164	能与要求	172
第一节 磁性材料的分类和特点	164	第二节 软磁材料的种类、特点和应用范围	172
第二节 铁磁性的来源	165	第三节 电工用纯铁	173
第三节 磁性材料的基本磁性能	166	第四节 硅钢片	174
第四节 影响磁性能的因素及改进磁性能的途径	170	第五节 铁镍合金	177
第十七章 软磁材料	172	第六节 铁铝合金	179
第一节 软磁材料的主要性能		第七节 软磁铁氧体	179
		第十八章 硬磁材料	181
		第一节 硬磁器件的工作状	

	态和主要性能要求·····181
第二节	硬磁材料的种类、性能和用途·····182
第三节	永磁体的磁稳定性·····186
第四节	永磁体的磁化·····187

第十九章	特殊性能的磁性材料·····187
第一节	恒导磁合金·····188
第二节	磁温度补偿合金·····188
第三节	矩磁材料·····189
第四节	压磁材料·····190

第四篇 半导体及电子器件

第二十章	半导体材料的理论基础·····191
第一节	半导体材料的种类及其应用·····191
第二节	半导体材料的导电机理·····192
第三节	半导体材料的晶体缺陷与杂质·····197
第二十一章	晶体管·····200
第一节	晶体二极管·····200
第二节	晶体三极管·····203
第三节	其它晶体管·····212
第四节	半导体器件型号命名法及晶体管选用原则·····221
第五节	晶体管的测试、验收与保管·····224
第二十二章	集成电路·····228
第一节	集成电路的分类和特点·····228
第二节	集成电路中的元器件·····230
第三节	数字集成电路·····234
第四节	模拟集成电路·····239
第五节	集成电路的特性参数及其测试·····241
第六节	半导体集成电路型

	号命名法及其检验与保管·····246
第二十三章	线路元件·····249
第一节	电阻器的功用、类别和特点·····249
第二节	电阻器的特性参数·····253
第三节	电容器的功用、类别和特点·····255
第四节	电容器的特性参数·····258
第五节	电阻器、电容器型号命名法·····260
第六节	阻容元件检验保管原则·····262
第二十四章	电真空器件·····264
第一节	电真空器件的特点和应用范围·····264
第二节	电真空器件的类别和型号命名法·····265
第三节	电子发射·····267
第四节	电子管的基本组成·····268
第五节	电子管及其参数·····271
第六节	电子管的检验、保管与代用原则·····275

第五篇 常用电工设备

第二十五章	变压器·····279
第一节	变压器的功用与分类·····279
第二节	变压器的基本构造·····281
第三节	变压器组别的测定·····284
第四节	变压器的铭牌和型号·····286
第五节	变压器的验收与保管·····288
第二十六章	电机·····290

第一节	电机的功用与分类·····290
第二节	电机的基本构造·····293
第三节	特殊电机·····297
第四节	电气绝缘测量与烘干·····304
第五节	电机的铭牌和型号·····305
第六节	电机的验收与保管·····308
第二十七章	电器·····309

第一节	电器的功用与分类·····309	特点·····320	
第二节	电器的结构原理·····310	第二节	电气测量指示仪表
第三节	电器的触头·····311	的工作原理·····321	
第四节	电器的电磁机构·····313	第三节	常用电气测量指示
第五节	低压电器·····316	仪表的基本结构·····322	
第六节	高压电器·····318	第四节	电桥·····328
第七节	电器的验收与保管·····319	第五节	直流电位差计·····330
第二十八章	电工仪表·····320	第六节	常用电工仪表的验
第一节	电工仪表的分类与	收与保管·····331	
附录 1	本书所用量纲的单位名称和符号 (SI单位) ·····334		
附录 2	本书所用量纲的单位名称和符号 (非SI单位) ·····336		

第一篇 绝缘材料

第一章 电介质理论基础

第一节 绝缘材料的功用和分类

现代材料学所研究的对象,按电阻率大小可以分为绝缘材料(电阻率为 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$),导电材料(电阻率为 $10^{-8} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$)和半导体材料(电阻率为 $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$)三类。其中绝缘材料又称电介质,在直流电压作用下仅有极微弱的漏泄电流通过,一般可认为是不导电的。

绝缘材料在电工技术中的功用主要有:

1. 使导体与其它部分相互绝缘。
2. 把不同电位的导体分隔开来。
3. 提供电容器储能的条件。
4. 改善高压电场中的电位梯度。

随着电工技术向高压、高频、大容量、小体积发展,仪器设备的使用条件要求越来越高,对绝缘材料也提出了更高的要求。为了适应这种要求,一方面要进一步研制新型绝缘材料,另一方面应根据现有材料的性能进行合理设计和选用。而所有这些都必须建立在对绝缘材料主要性能深入认识的基础上。

绝缘材料在电工产品中占有极其重要地位,它涉及的面广、品种多,为了便于掌握和使用,通常根据其不同特征来进行分类。

1. 按材料的物理状态分为:
气体绝缘材料;液体绝缘材料;弹性体绝缘材料;固体绝缘材料。
2. 按材料的化学成分分为:
有机绝缘材料;无机绝缘材料。
3. 按材料的用途分为:
高压工程材料;低压工程材料。

此外,按材料的来源可分为天然的和人工合成的绝缘材料等。在多数情况下往往先按一种特征分大类,再按第二种特征分小类。这要根据需要和系统来决定。

第二节 电介质的电导

电介质总是以隔绝电流而存在的,因此,要求它具有不导电的能力。然而,实际上绝对不导电的材料是没有的,一切绝缘材料在电场作用下都会有一很小的电流通过,这一电流称为漏泄电流。

电介质的电导和金属导体的电导有本质上的区别。金属的电导完全由电子移动形成,电

导极大，电阻率极小，仅为 $10^{-8} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 。电介质的电导主要由本身的离子或外来杂质（水分、酸及其它）的离子移动形成，电导极小，电阻率极大，可达到 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

电介质电导的另一特点是当直流电压作用其上时，通过介质的电流有随时间而衰落，并趋于一稳定值的现象。如图 1-1 所示。

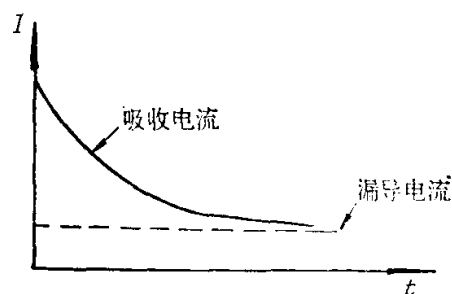


图 1-1 电介质电流与时间关系

这种现象是由于通过电介质的电流是由下面三部分组成的：一是由几何电容和位移极化产生的随时间迅速减小的电流，称充电电流，二是由缓慢极化、导电离子产生的体积电荷，从而形成的随时间逐渐减小的电流，称吸收电流，三是由内部带电质点导电形成的不随时间

而变化的电流，称漏泄电流或称漏导电流。工程上在实际测量时，通常是以加压一分钟后所测得的电流值来计算绝缘材料的电阻。这时吸收电流已基本降为零。

电介质的电导常用电导率 γ 或其倒数——电阻率 ρ 来表示。

固体电介质除了有通过本身内部的漏导电流 I_v 外，还有沿着介质表面流过的漏导电流 I_s 。因此，绝缘电阻和绝缘电阻率可分为体积电阻、表面电阻和体积电阻率、表面电阻率。它们的定义如下：

体积电阻率 ρ_v ：表示介质在单位面积 (cm^2) 和单位长度 (cm) 上所具有的体积电阻值。即

$$R_v = \rho_v \cdot \frac{h}{S}$$

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h} = \frac{U}{I_v} \cdot \frac{S}{h} (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (1-1)$$

式中 R_v ——体积电阻 (Ω)；
 h ——被测介质的厚度 (cm)；
 S ——被测介质上的电极面积 (cm^2)；
 I_v ——流过介质内部的体积电流 (A)；
 U ——外加电压 (V)。

表面电阻率 ρ_s ：表示一个正方形的介质表面在其相对二边之间的单位长度和单位宽度的表面电阻值。一般表示为：

$$R_s = \rho_s \cdot \frac{b}{l}$$

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{l}{b} = \frac{U}{I_s} \cdot \frac{l}{b} (\Omega) \quad (1-2)$$

式中 R_s ——表面电阻 (Ω)；
 l ——电极长度 (cm)；
 b ——平行电极相隔距离 (cm)；
 I_s ——流过介质表面的电流 (A)。

确定体积电阻率 ρ_v 和表面电阻率 ρ_s 的示意图如图 1-2 所示。

电介质的电导率等于绝缘电阻率的倒数，即

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

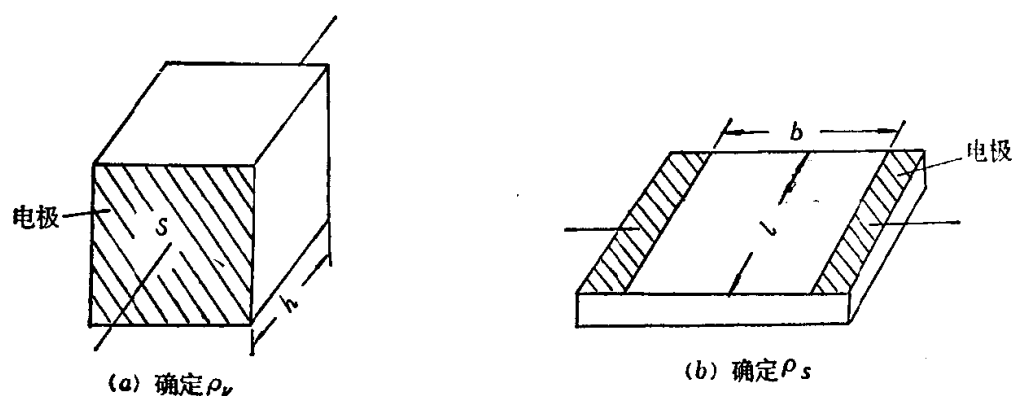


图 1-2 确定电阻率的示意图

所以，体积电导率和表面电导率分别表示为：

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v} \text{ (S/cm)}$$

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s} \text{ (S)}$$

第三节 气体、液体、固体介质的电导

一、气体介质的电导

气体的电导是由自由电子和离子造成。气体在电场强度不太大时，只有极微小的电导，这微量的电导多系受外界因素如紫外线、宇宙线及地层中的放射性辐射线引起。由于高能量粒子流撞击气体分子，使其产生游离，因此平时气体中总有少量自由电子和自由离子存在，从而引起气体的电导。这种由外界因素引起的气体电导称非自制性电导。

气体在弱电场下，由于外界因素而游离形成正负离子的同时，一部分正负离子又会产生复合，因此，气体中的离子数不会无限增加，仅保持一定的密度。

当电场强度足够大时，气体中带电质点由于获得足够大的动能，使气体分子产生碰撞游离，这时将产生很大的电导，称为自制性电导。

均匀电场中空气的伏安特性曲线如图1-3所示。

A段表示气体在弱电场作用下，遵守欧姆定律，电流与电压成线性关系，电流密度为：

$$j = n_0 q (v_+ + v_-) = n_0 q (k_+ + k_-) E \quad (1-3)$$

式中 n_0 ——单位体积内正离子和负离子的数量；

q ——离子所带的电量；

v_+, v_- ——正负离子的速度；

k_+, k_- ——正负离子的迁移率。

B段表示电流不取决于施加的电压，呈饱和状态。其饱和电流的密度为：

$$j = n_0 q h \quad (1-4)$$

式中 h ——电极间的距离。

实际上，气体的饱和电流都很小，如空气在常压、常温和电极距离为 $1 \sim 10 \text{ cm}$ 时， $j = 1 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$ 。

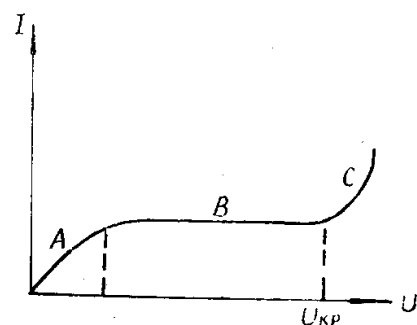


图 1-3 气体的伏安特性曲线

C段表示当电场强度足够大时, ($U \geq U_{KP}$), 气体出现放电现象, 产生自激性导电, 电流将随外加电压的增大而急剧增大。

二、液体介质的电导

液体介质的导电机理与气体不同, 引起液体介质电导的原因有:

1. 由液体本身分子离解而引起的固有离子电导。
2. 由液体中杂质分子离解而引起的杂质离子电导。
3. 由液体中的带电胶体质点移动而引起的电泳电导。

液体介质的电导与分子的离解度和离子在液体中的迁移率有密切关系。极性液体的固有电导和杂质电导均较大, 而非极性纯净的液体不易产生离子, 电导就小。

液体介质电导率与温度和粘度也有一定关系。实验得出: 液体的电导率与温度成指数关系, 可用式 (1—5) 表示。

$$\gamma = Ae^{\frac{-B}{T}} \quad (1-5)$$

式中 γ ——绝对温度为 T 时的电导;
 A 、 B ——常数。

实验还得出: 在一定条件下, 液体电导率 γ 与粘度 η 符合式 (1—6) 规律。

$$\gamma \cdot \eta = \text{常数} \quad (1-6)$$

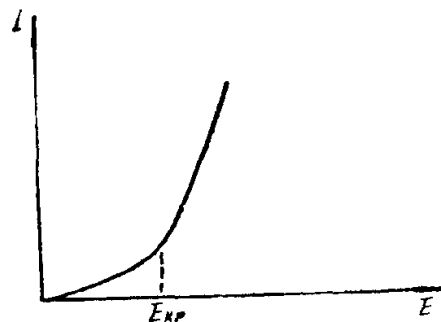


图 1—4 液体介质中的电流与电场间关系

由于液体的电导受杂质 (如水分等) 影响极大, 所以工程上用液体介质的 $I = f(U)$ 曲线往往很不确定。对一般纯净液体介质的电导与电压关系的实验指出, 电压低时, 电流的增大与电场强度成正比, 而从某一临界点 ($E_{KP} \approx 10^5 \text{ V/cm}$) 开始电流剧烈增大, 如图 1-4 所示。在高度静化的液体介质中, 曲线会出现一段饱和电流区。

由此可见, 严格保持液体绝缘材料在运输、保管、收发料过程中的洁净, 防止一切杂质的掺入是极为重要的。

表 1-1 列出了几种液体的电导和纯净度、温度的关系。

几种液体的电导和纯净度、温度的关系

表 1—1

液体种类	液体名称	温度(℃)	ϵ	$\gamma(\text{S/cm})$	净化程度
非极性	变压器油	80	2.2	0.5×10^{-12}	未净化的
	变压器油	80	2.1	2×10^{-15}	净化的
	变压器油	80	2.1	0.5×10^{-15}	二次净化的
	变压器油	20	2.1	10^{-18}	又经电净化的
	硅有机油	20	2.4	10^{-14}	未净化的
弱极性	蓖麻油	20	4.5	10^{-12}	工程纯净 净化的
	蓖麻油	100	3.5	10^{-8}	
强极性	水	20	80	10^{-7}	高度净化的 纯净的
	乙醇	20	25.7	10^{-8}	

三、固体介质的电导

作为绝缘材料的固体介质，主要起作用的是离子电导，但并非全部离子都参与，只有杂质离子、脱离晶格的离子和离子空穴才产生电导。离子从正常晶格点阵上脱离需要较大能量，只有在高温时才显著，故这类电导称为高温电导（或固有电导）。一般晶格缺陷处的离子和杂质离子联系较弱，容易脱离，在不高的温度下就会产生电导，所以这类称为低温电导或杂质电导。

固体介质的体积电导与其结构和成份有关

1. 中性固体介质。无论是结晶的硫或石蜡或是无定形体的聚苯乙烯，体积电阻率都很大，一般在 $10^{17} \sim 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$ 。它们的电导主要由杂质引起。

2. 极性固体介质。除杂质引起电导外，还要依据极性强弱和分子的活动程度而定。例如苯胺分子的极性较苯酚分子为弱，聚苯胺-甲醛树脂的电导也就比苯酚-甲醛树脂的要小。又如完全聚合的苯酚-甲醛树脂，由于极性分子的活动性差，其电导就比未充分聚合的同样树脂要低。

由于极性介质分子自身的离解，一般极性固体介质的电导要比中性固体介质的为大。极性弱的固体介质的体积电阻率可达 $10^{15} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ ，一般极性固体介质的电阻率约为 $10^{13} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

3. 离子式晶体介质。它的电导在低温时主要由杂质离子引起，在高温时固有电导占主要地位。另外，这类晶体的电导与离子的化合价有关，由单价离子组成的晶体（如 NaCl ），其电导要比多价离子组成的晶体（如 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）的电导要大得多。纯净而完善的离子式晶体介质的 ρ_v 可达 $10^{17} \sim 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$ 。一般在 $10^{15} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ 左右。

4. 离子键无定形固体介质。它的电导因成份和结构不同差异较大。例如石英玻璃的电导极微， ρ_v 可达 $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上；而含一价碱金属氧化物（如 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ 等的）玻璃，其电导则较大， ρ_v 只有 $10^{13} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 左右。这是由于一价碱金属原子仅能与一个氧原子联系，使价键在一价碱金属原子处中断，形成不紧密的结构；同时一价碱金属原子与氧原子联系较弱，所以使电导大大增加。又如钠离子的半径比钾离子的小，因而钠玻璃的电导要比钾玻璃为大。

5. 多孔性固体。它的电导与环境湿度有密切关系，湿度大时，浸入材料孔隙的水分形成导电通路，使材料的电导大大增加。这在材料的使用和保管过程中应特别注意。表 1-2 列出了湿度对多孔性材料和非多孔性材料 ρ_v 的影响。

以上都是指电场强度不很大时固体介质的电导。当电场强度达到 $10^5 \sim 10^6 \text{V/cm}$ 以上时，由于电子开始参与导电，固体的电导将随电场的增强而加大。

电子式电导与电场强度的关系可用下列经验公式表示：

$$\gamma = \gamma_0 e^{bE} \quad (1-7)$$

式中 E ——电场强度；

γ_0 ——在 γ 与 E 尚无关系的范围内的电导；

b ——材料的特性系数。

固体介质的表面电导主要由介质表面的水分和附着的杂质引起，所以受环境条件的影响很大，这就要求使用、保管材料时要给予足够重视。

湿度对固体材料 ρ_v 的影响

表 1—2

材 料 名 称	20℃时的体积电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)	
	相对湿度0%	相对湿度70%
绝 缘 纸	$10^{10} \sim 10^{17}$	$10^9 \sim 10^{10}$
大 理 石	$10^{14} \sim 10^{16}$	$10^8 \sim 10^{10}$
木 材	$10^{13} \sim 10^{14}$	$10^8 \sim 10^9$
特别纯净的石蜡	10^{10}	10^{10}
聚 乙 烯	$10^{17} \sim 10^{18}$	$10^{17} \sim 10^{18}$
聚 苯 乙 烯	$10^{17} \sim 10^{18}$	$10^{17} \sim 10^{18}$
琥 珀	$10^{10} \sim 10^{20}$	$10^{10} \sim 10^{20}$

固体介质的表面电导与其结构成份关系密切。一般介质分子的极性愈弱,对水分子的亲和力愈小,则表面电导亦愈小。

中性固体介质,如石蜡、聚苯乙烯等,水分子与介质质点间的互相作用力比水分子相互间的相互作用力小得多,称为疏水介质。其表面不能被水湿润形成水膜,只能形成分散的水滴,因而这类材料的表面电导小,受环境湿度的影响小。

极性固体介质,极性愈强吸附水的能力愈强,固体介质质点与水分子间的相互作用力也大。这类介质能被水湿润其表面,吸附形成水膜,称亲水介质,其表面电导较大,并和环境湿度有很大依赖关系。

由离子键组成的固体介质具有强极性,因而这类介质的表面电导受环境湿度影响极为显著,特别是当其中某些组分能溶于水时,影响更为严重;例如大部分的工程玻璃,其表面电导将随湿度的增高而剧烈增大。

图1-5示出了几种典型固体介质的表面电阻率 ρ_s 与相对湿度 φ 的关系。曲线表明湿度对中性介质影响小,对极性介质影响大,特别是部分水溶性的介质,例如工程玻璃的 ρ_s 的变化可达 $10^7 \sim 10^8$ 倍之多。

另外,表面电导与介质表面状态有关。表面平滑、清洁,则表面电导小。为了减轻绝缘材料表面吸附水分及杂质的作用,可采用吸水性小的介质涂覆表面的措施,提高表面电阻率。

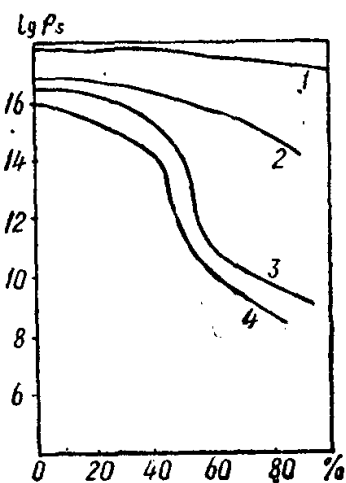


图 1—5 几种材料的 ρ_s 与 φ 关系
(20℃时)

1——石蜡; 2——纯净石英;
3——玻璃; 4——污石英。

第四节 绝缘电阻在工程应用上的意义

绝缘电阻在工程应用有重要意义。

1. 绝缘材料吸湿后绝缘电阻会显著降低,工程上常以绝缘电阻的大小判别电机、电器、变压器等设备的受潮程度,决定能否运行。

2. 绝缘材料的表面电阻受外界环境影响很大,所以为提高电气设备(尤其是户外设备)的表面电阻,在使用和贮运过程中要防止设备表面的污染。当绝缘表面吸附杂质和水分

后,不但能引起过大的漏泄电流,增大能量损耗,而且由于杂物的非均匀分布,使电压分布不均,可能产生局部放电,从而引起设备绝缘系统的损坏。为此,在要求较高的场合应定期对绝缘表面进行清洁或进行适当的表面处理。

3. 具有不同电阻率的多层绝缘材料,在直流电压作用下,层间承受的电压按电导率成反比分配。如果两种材料的 ρ_v 相差很大,多层介质中的电压分布将很不均匀,这对材料的合理利用不利。在交流电压作用下,如果材料的电阻率很大,介电系数也较大,则电压分布主要决定于介电系数;如果电阻率小,介电系数也较小,则电压分布主要决定于电阻率。在工程应用上应给予足够重视。

第五节 电介质的极化

一、介质极化及介电系数

电介质在不大的外电场作用下,其束缚电荷受电场力的作用发生位移,电场愈强,位移愈大。外电场消失,电荷恢复原状。在极性电介质中,极性分子受电场作用而发生转向,有序排列;外电场消失,极性分子(具有电偶极矩)将因热运动而呈现原来的杂乱状态。这种在电场作用下束缚电荷的弹性位移和极性分子转向和作有序排列的现象称为电介质的极化。

极化作用使介质中形成一些偶极子,其效果可以用电矩(偶极矩)来表示。若正负电荷量为 q ,相互间移开距离为 l ,则电矩为:

$$m = q \cdot l \quad (1-8)$$

在单位电场强度作用下形成的偶极子,其电矩的大小称为质点的极化率,以 α 表示,它表征着质点极化的能力。

$$\alpha = \frac{m}{E} \quad (1-9)$$

若电介质单位体积中极化的质点数为 n_0 ,每一质点的平均电矩为 m ,则电介质单位体积的电矩为:

$$I = mn_0 = n_0 \alpha E \quad (1-10)$$

I 表示电介质的极化强度。介质的极化表现愈强烈,它单位体积的电矩也愈大。

介质极化形成偶极子沿电场方向排列,对外呈现电荷,电荷分布如图1-6所示。

介质面对正电极的一面呈现负电荷,面对负电极的一面为正电荷。介质表面感应出的束缚电荷产生的电场将削弱外加电场。

设极板间为真空时,极板上的电荷为 Q_0 ,所产生的电场为 E_0 ,有介质时被削弱后的电场强度为 E ,则

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} \quad (1-11)$$

式中 ϵ 称为介质的相对介电系数。

如果极板上加恒定电压,当极板间为真空时,极板上有电荷 Q_0 ,当极板间充以介质时,则由于电场的削弱,必然还有一部分电荷(相当于介质表面的束缚电荷 Q_1)流至极板。所以当有介质时,极板上的电荷为:

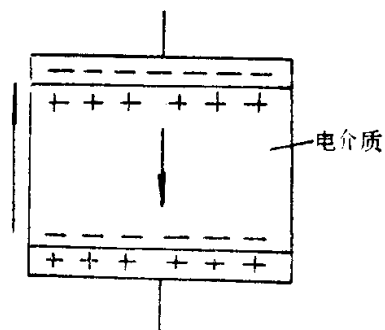


图 1-6 电介质极化后的电荷分布

$$Q = Q_0 + Q_1 \quad (1-12)$$

介质的相对介电系数为:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_1}{Q_0} = 1 + \frac{Q_1}{Q_0} \quad (1-13)$$

由上式可知介质的相对介电系数均大于 1, 只有在真空时才等于 1。

又根据物理概念, 任一电容器的电荷为:

$$Q = CU \quad (1-14)$$

$$\therefore \varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} \quad (1-15)$$

$$C = \varepsilon C_0 \quad (1-16)$$

ε 又称为电容率, 它表示电容器 (两极板间) 在有某电介质时的电容量比真空时的电容量增长的倍数。

二、介质极化的基本形式

介质极化是由于电荷在空间移动而引起的, 但与电导的电荷移动有根本的区别, 主要表现在:

1. 极化时的电荷发生位移不会超出该分子的范围, 而电导是由于自由电荷的运动所引起, 这些电荷能在电介质中作较长距离的位移。
2. 极化时的位移是一种“弹性的”电荷位移, 在外加电场消失后已位移的电荷有恢复原来位置的倾向, 而电导无这种特点。
3. 均质材料的极化, 实际上是在电介质的所有分子内发生的, 而电导往往是由于少量杂质存在而引起的。

在向电介质施加直流电压的全部时间内电导电流总是存在的, 而位移电流 (电容电流) 只在电压接通或断开的瞬间, 或者在外加电压值发生变化时才存在。

电介质的极化虽然可归结为介质中形成了电偶极子, 但其形式各不相同, 主要有三种基本形式。

1. 电子位移式极化。即电子轨道相对于原子核产生位移而引起的极化。电子极化所需时间极短, 约为 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ s}$ 。

电子式极化在所有介质内部都存在, 且是完全弹性的, 外电场消失后立即恢复。

2. 离子位移式极化。这是在离子构成的介质中, 正负离子在有限范围内产生弹性位移而引起的极化。这种极化过程发生的时间虽比电子极化长, 但仍很短, 约为 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ s}$ 。

电子式极化和离子式极化都是位移极化, 即电荷在外电场作用下作相对位移形成的。

3. 偶极式极化。在极性分子组成的介质内, 偶极性分子沿电场方向作有序排列 (定向) 而引起的极化。通常极性分子的分布是混乱无序的, 当有外电场作用时, 如果分子力不妨碍偶极子沿电场方向排列, 就会产生电偶式极化。由于分子力是随温度升高而削弱的, 故温度升高能使极化加强; 但同时由于分子热运动的能量增加又使电场的排列作用减弱。所以偶极式极化的质点极化率, 当温度不太高时, 将随温升而增大; 当温度过高时又随温度升高而减小。

偶极式极化与电子式极化和离子式极化的不同处, 除了它的质点与热运动有关外, 完成

极化所需时间亦比较长，约为 $10^{-2} \sim 10^{-10}$ s，而且有明显的能量损耗。

以上三种基本极化形式是结构比较简单的电介质特性，见图1-7。

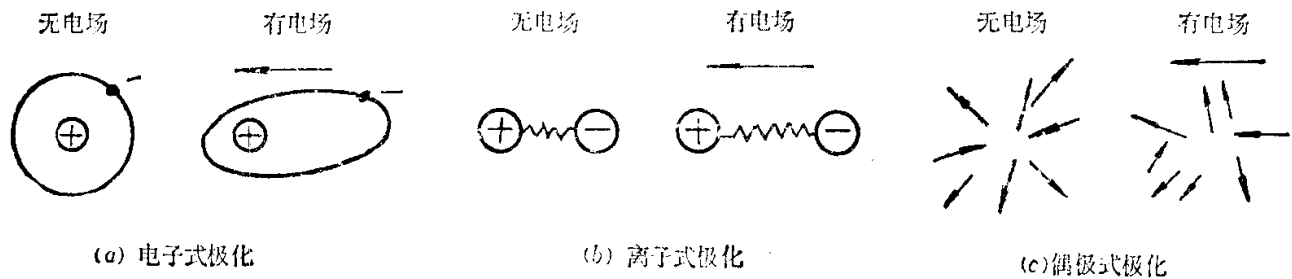


图 1-7 几种极化形式

此外，还有几种极化形式。

夹层式极化：由两种以上不同相对介电系数及电阻率的绝缘材料组成的不均匀绝缘结构中，加上电场后，联系较弱的离子沿电场方向移动积聚在层间交界面上，产生层间电荷，形成偶极矩而极化。这类极化时间长，发生在低频段，损耗能量。

自发式极化：这种极化发生在强极性介质，如钛酸钡晶体中，具有自发地极化到饱和的“电畴”。在外电场作用下转向极化，其时间很长，能量损耗大，表现为 ϵ 值特别大，且与电场强度成非线性关系。

在成份及结构复杂的电介质中，可能同时出现几种极化形式。各种极化可用等效电路表示，如图1-8所示。图中C和Q表示该种极化引起极板间电容量及电量的增加，串联电阻表示它们消耗能量。

几种极化形式的特点见表1-3。

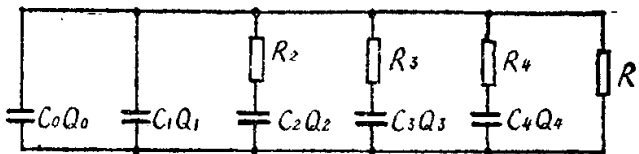


图 1-8 具有各种极化形式的复杂电介质等效电路
 C_0, Q_0 ——真空时的电容及电荷；
 C_1, Q_1 ——电子式极化的电容及电荷；
 C_2, Q_2 ——离子式极化的电容及电荷；
 C_3, Q_3 ——偶极式极化的电容及电荷；
 C_4, Q_4 ——夹层式极化的电容及电荷；
 R ——漏阻；
 R_2, R_3, R_4 ——各极化时的能量损耗等效电阻。

几种基本极化形式

表 1-3

极化形式	电 介 质	极化时间(s)	发生极化的 频率范围	与温度的关系
电子式位移极化	所有气体、液体、 固体电介质	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	从直流到光频	仅在气体中观察到温度上升时极化稍减弱，对液体、固体的影响很小
离子式位移极化	所有离子式结构的 固体介质	$10^{-12} \sim 10^{-13}$	从直流到光频	温度升高，极化增强
偶极式极化	极性电介质	$10^{-2} \sim 10^{-10}$	直流到超高频	在某温度出现最大值，某些高分子电介质中可能在几个温度点出现峰值
夹层式极化	结构不均匀 电介质	$10^{-2} \sim 10^4$	直流到音频	温度升高，极化减弱
自发式极化	强极性电介质	$> 10^{-10}$	直流到超高频	居里温度点处出现最大值

第六节 气体、液体、固体介质的介电系数

一、气体的介电系数

由于气体分子间距离很大，密度小，因而气体的极化表现较弱，一切气体的介电系数 ε 均略大于 1。表 1-4 列出几种气体的介电系数 ε 值。

当温度不变压力增加时，单位体积分子数增加，因而 ε 值增大；当压力不变而温度增加时，单位体积分子数减少， ε 值亦将降低。

另外，温度对空气 ε 值的影响。由于水分子是极性的，因而温度的增加将使空气的 ε 值变大。

几种气体的 ε 值 表 1—4

气体的极性	气体名称	ε 值 (20℃, 760mmHg ^①)
中性气体	氢	1.00027
	氧	1.00025
	氮	1.00060
极性气体	二氧化硫	1.009
	氯化氢	1.003

注：① 1mmHg = 133.3224Pa

二、液体介质的介电系数

液体的密度比气体大，介电系数也较大；中性液体介质与极性液体介质的 ε 值差别也较大。

在中性液体中主要是电子位移极化，其介电系数一般在 1.8~2.4 范围内。当温度升高时， ε 值降低。

在极性液体介质中，除电子式极化外，还有偶极式极化，因此其介电系数比中性液体为大。实用的极性液体介质的 ε 值约为 4.5~5.0；强极性液体如水、酒精等的 ε 值可达 30~80。但它们的电阻率太低，并无实用价值。表 1-5 是一些液体介质的 ε 值。

几种液体介质的 ε 值 表 1—5

液体种类	液体名称	ε 值
中 性	苯	2.218
	四氯化碳	2.163
	电容器油	2.200
极 性	蓖 麻 油	4.2~4.5
强 极 性	水	81
	硝 基 苯	36.5

由于极性分子的极化与温度、频率有密切关系，因而极性液体的 ε 值要随温度及电场频率等作复杂的变化。

三、固体介质的介电系数

固体介质的介电系数可按固体介质结构不同分别讨论。

1. 中性固体。这类固体介质主要是电子位移式极化， ε 值在数值上约等于光折射率 (n) 的平方。介电系数与温度的关系是由单位体积内分子数而定。又因其热膨胀系数较小，所以 ε 值随温度升高而略微减小。表 1-6 为几种中性固体介质的 ε 值。图 1-9 为石蜡的 ε 值与温度的关系曲线。

2. 离子式晶体。离子晶体同时存在电子式和离子式极化，因而 ε 值较中性介质要大，一般约为 4~12，个别的可达 100 以上。离子晶体中电子式极化虽然也会因温度升高带来体