

中等专业学校教材

高电压技术

西安电力学校

电力工业出版社

中等专业学校教材

高 电 压 技 术

西安电力学校

电力工业出版社

内 容 提 要

本书为中等专业学校发电厂及电力系统专业发电厂电气设备及高压技术课程的教材，上册为“发电厂变电所电气设备”，自第一章至二十二章；下册为“高电压技术”，自第二十三章至三十章。

本书重点介绍电气设备的过电压保护及绝缘预防性试验的基础，结合部颁规程分析常用的电气试验方法和典型的防雷保护绝缘等内容。

本书亦可做为中等专业学校“电力系统继电保护”专业的教材，并可供电力工人和技术人员以及电力技工学校教学参考。

中等专业学校教材

高 电 压 技 术

西安电力学校

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9印张 204千字

1980年4月第一版 1980年4月北京第一次印刷

印数 00001—12350册 每册 0.75元

书号 15036·4014

前 言

本书系根据1978~1981年中等专业学校电力类教材编审出版规划编写的。本书由西安电力学校赵之中同志编写。南京电力学校、长春电力学校、重庆电力学校、湖南电力学校、湖北电力学校的有关同志参加审稿，对本书的编写提出了很好的建议，在此表示感谢。

本书适用于《发电厂及电力系统》和《电力系统继电保护》专业。由于教学的时间较少，所以本书只能叙述高压技术的基本概念，对内部过电压，绝缘配合等方面，只作较简单地介绍。

对于本书存在的缺点和错误，诚恳地希望读者提出宝贵意见。

编 者

一九七九年七月

目 录

前言

第三篇 高 压 技 术

概述	1
第二十三章 电介质的理论基础	1
第一节 电介质极化	1
第二节 电介质电导(或绝缘电阻)	6
第三节 电介质损耗	7
第四节 电介质老化与击穿电场强度	10
第二十四章 气体放电	12
第一节 气体击穿的理论分析	13
第二节 提高气体间隙击穿电压的措施	24
第三节 沿面放电	28
第二十五章 固体液体介质的击穿	30
第一节 固体介质的击穿	30
第二节 液体介质的击穿	32
第二十六章 绝缘的预防性试验	34
第一节 绝缘电阻的测量	35
第二节 泄漏电流试验	38
第三节 介质损失角测量	44
第四节 工频交流耐压试验	47
第五节 直流耐压试验	54
第二十七章 波动过程	55
第一节 单根均匀无损导线上的波过程	55
第二节 波的折射与反射	60
第三节 波穿过电感或从电容旁经过	62
第四节 波在绕组中传播	66
第二十八章 大气过电压及防雷器具	75
第一节 大气过电压	76
第二节 雷电参数	80
第三节 避雷针和避雷线保护范围的确定	82
第四节 冲击接地	86
第五节 保护间隙与管型避雷器	88
第六节 阀型避雷器	94
第七节 磁吹避雷器	102
第二十九章 发、变电所的防雷保护	106
第一节 发、变电所的直击雷防护	107
第二节 变电所的绝缘配合	109
第三节 变电所的行波保护结线	114
第四节 变压器防雷保护中的几个特殊问题	118
第五节 旋转电机的防雷	121
第三十章 内部过电压	125
第一节 切断空载线路过电压	126
第二节 切断空载变压器过电压	129
第三节 弧光接地过电压与消弧线圈的应用	132
附 录	136

第三篇 高 压 技 术

概 述

大功率远距离的电能输送，只有在使用高电压或超高电压电网的条件下才能实现。目前我国电网的最高电压是330千伏，500千伏电网正在进行设计。从国外看，750千伏电网已有多年运行经验，1000千伏以上电网的研制工作也在进行。

这类超高压电网所面临的主要问题之一，就是如何保证设备绝缘的安全运行。这就需要研究采用何种绝缘材料；何种绝缘结构型式，以及如何限制过电压的大小。这些就是“高电压技术”所研究的课题。

第二十三章 电介质的理论基础

绝缘材料是电工中应用最广的一类材料。对绝缘材料的物质结构以及它们在电场作用下所发生物理现象的研究，使我们能了解它们的性能（电、热、机械、化学、物理方面的），并确定其性能（主要是电的性能）与其物质微观结构之间的联系，帮助我们了解绝缘的性能和判断绝缘的老化或损坏程度。从而合理地选择和使用绝缘材料。所以研究绝缘材料在电场作用下的物理现象是高压电气设备绝缘预防性试验的基础知识。绝缘材料常常称为“电介质”。

电介质在电场作用下主要有极化、电导、介质损失和击穿四种物理现象。以下就这四个方面来说明。

第一节 电 介 质 极 化

当电介质处于弱电场作用下时，电介质中荷电的质点，由于库仑力的作用，会沿电场的正或反方向作微小的位移。其结果是使电介质中的电荷分布不均匀，相当于形成了一些偶极子，此现象称电介质的极化。

一、电介质的极化和介电系数

在电场作用下，电介质中的束缚电荷按其所受作用力方向发生微小位移，电场愈强，位移愈大。正电荷沿电场方向位移，而负电荷则逆电场方向位移。当电场消失时，电荷又恢复至原状。

由偶极分子组成的极性电介质中，电场的作用使得偶极分子顺电场方向取向，在没有

电场时, 偶极分子因热运动而排列混乱。电介质在电场作用下发生的束缚电荷的弹性位移与偶极分子的取向现象, 称为电介质的极化。

极化的结果, 使电介质表面形成了电荷, 在与正极板相对的面上出现负电荷, 与负极板

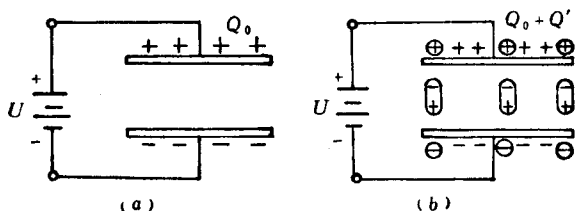


图 23-1 极化现象
(a) 极间为真空; (b) 极间为介质

相对的面上产生了正电荷。如图23-1的平行板电容器, 先放在密封容器内将其极间抽成真空, 在极板上施加直流电压 U , 这时极板上分别出现正负电荷, 其电荷量为 Q_0 , 然后把一块固体电介质 (厚度与极间距离相等) 放入极板间, 施加同样的电压, 就可发现极板上的电荷增加到 $Q_0 + Q'$ 这

就是电介质极化现象。由于在外电场作用下, 电介质中本来彼此中和的正负电荷产生位移, 形成电矩, 在极板上另外吸住了一部分电荷 Q' , 所以极板上电荷增加了。可用数学式表示如下:

$$\text{真空中电容} \quad C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (23-1)$$

式中 A —— 极板面积 (米²);

d —— 极间距离 (米);

ϵ_0 —— 真空的介电系数 $1/36\pi \times 10^9$ 法/米。

$$\text{极间插入固体电介质后} \quad C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = \frac{\epsilon A}{d} \quad (23-2)$$

$$\text{由上两式可得} \quad \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0} \quad (23-3)$$

ϵ_r 称为电介质的相对介电系数。各种气体的 ϵ_r 均接近于 1。而常用的液体、固体绝缘材料的 ϵ_r 则各不同, 一般在 2 ~ 6 之间, 且与温度、电源频率的关系也不一致。

由式 (23-3) 可见, ϵ_r 可定义为以某物质为介质的电容器的电容与以真空作介质的同样大小电容器的电容之比。

二、极化的基本形式

极化的种类很多, 基本的形式有三种: 电子式极化、离子式极化和偶极子极化。

(一) 电子式极化

电介质原子内的电子轨道, 因受外电场的作用, 对原子核产生位移, 叫电子式极化 (图23-2), 这时原子的正、负电荷作用中心不再重合, 极化强度 (即正、负电荷作用中心拉开的距离) 随外电场的增加而增加。

这种极化的特点有二: ①极化过程极短 (因电子质量极小), 约为 10^{-16} 秒。所以这种极化在各种频率范围均能产生,

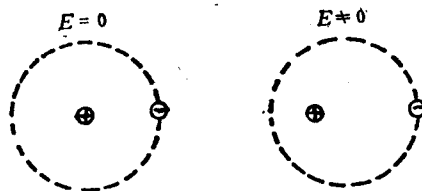


图 23-2 电子式极化

即其 ϵ_r 不随频率而变化。②具有弹性。外电场去掉后,依靠正负电荷的吸引力,作用中心又会重合而呈现中性,所以这种极化没有损耗。

温度对电子式极化的影响是不大的。当温度升高时,电子与原子核的结合力减弱,使极化略有加强;但温度升高时介质膨胀,单位体积内质点减少,又使极化减弱。在这两种相反的作用中,后者略占优势,所以 ϵ_r 具有很小的负温度系数,即温度升高时 ϵ_r 略有下降,其变化不大,工程上可予忽略。

电子式极化存在于一切气体、液体、固体介质中。

(二) 离子式极化

固体无机化合物多属离子式结构,如云母,陶瓷材料等。无外电场时正负离子的中心是重合的,故不呈现极性。在外电场作用下,正负离子向相应电极偏移,使整个分子呈现极性(图23-3)。离子式极化也属弹性极化,几乎没有损耗;极化过程也很短,不超过 10^{-13} 秒,所以在使用的频率范围内可认为 ϵ_r 与频率无关。

温度对离子式极化的影响,也存在相反的两种因素,即离子间结合力随温度升高而降低,使极化程度增加;但离子的密度随温度升高而减小,可使极化程度降低,其中以第一种因素影响较大,所以 ϵ_r 具有正温度系数。

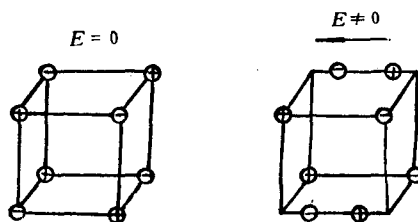


图 23-3 离子式极化

(三) 偶极子式极化

某些物质是由偶极分子组成。偶极分子是一种特殊的分子,它的电子的作用中心和原子核不相重合,好象分子的一端带正电荷,而另一端带负电荷似的,因而形成一个永久性的偶极矩(图23-4)。具有偶极子的电介质称为极性电介质。例如蓖麻油、氯化联苯、橡胶、胶木、纤维素等均是常用的极性绝缘材料。

单个的偶极子虽然具有极性,但偶极子处在不停的热运动中,分布异常混乱,对外的作用互相抵消,所以整个介质是不呈现极性。在电场作用下,原来混乱分布的极性分子顺电场方向转动,作较有规律的排列(图23-4b),因而显示出极性。

偶极子式极化是非弹性的,极化时消耗的电场能量在复原时不可能全部收回(因极性分子旋转时要克服分子间的吸引力,可想象为分子在一种粘性的媒质中旋转时阻力很大一样),极化所需的时间也较长,约 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ 秒。因此极性介质的 ϵ_r 与电源频率有较大的关系。频率很高时偶极子来不及跟随外电场转动,因而其 ϵ_r 减小如图23-5示。此图给出极

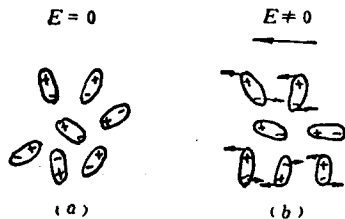


图 23-4 偶极子极化

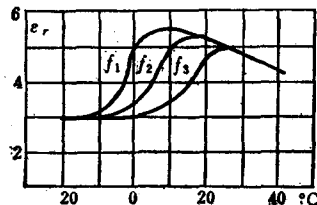


图 23-5 苏伏油的 ϵ_r 与温度的关系: $f_3 > f_2 > f_1$

性液体——苏伏油（氯化联苯）的介电系数与温度之间的关系。

温度对极性电介质的 ϵ_r 有很大的影响。温度升高时，分子间联系减弱，使极化加强，但同时分子热运动加剧，妨碍它们有规则的运动，这又使极化减弱。所以极性电介质的 ϵ_r 最初随温度的升高而增加；以后，当热运动变得较强烈时， ϵ_r 又随温度上升而减小。

综上所述，可知：

1. 气体介质由于密度很小，也即单位体积内所含分子的数目很少，所以不论是非极性气体还是极性气体，其 ϵ_r 均很小，在工程上可近似地认为 ϵ_r 等于1。

2. 液体介质可分为非极性、极性与强极性三种。非极性（或弱极性）液体的 ϵ_r 在1.8~2.5之间，变压器油等矿物油即属此类。极性液体 ϵ_r 在3~6之间，如蓖麻油、氯化联苯即属此类。强极性液体如酒精、水等 ϵ_r 很大（ $\epsilon_r > 10$ ），但此种液体介质的电导也很大，所以不能用作绝缘材料。

3. 固体介质的情况比较复杂，用作高压设备绝缘材料的极性介质（如酚醛树脂、聚氯乙烯等），非极性介质（聚乙烯、聚苯乙烯等）以及离子性固体介质（如云母，陶瓷等），其 ϵ_r 约在2~10范围内（见表23-1）。还有一些 ϵ_r 很大的固体介质，如钛酸钡等

$\epsilon_r > 1000$ ，不能用作高压绝缘材料。

（四）夹层式极化

以上是单一电介质的情况。

实际上高压设备的绝缘往往由几种不同的材料组成，这时会产生“夹层介质极化”现象。这种极化的过程特别缓慢，而且伴随有介质损耗。

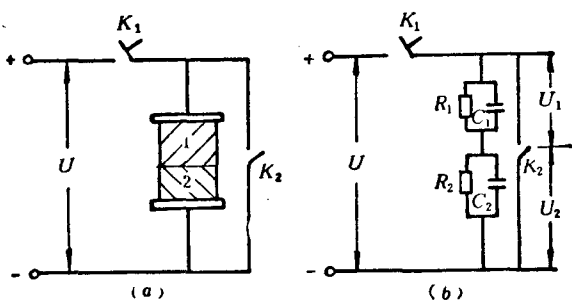


图 23-6 夹层介质极化现象

为了分析的简便，以平行电极间的双层介质为例，如图23-6所示，外施电压为直流。在 K_1 刚合闸的瞬间，两层介质之间的电压与各层电容成反比（突然合闸瞬间相当于很高的频率）。

$$\therefore \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t=0} = \frac{C_2}{C_1}$$

到达稳态的情况时，只有电导电流，层间电压与各层电阻成正比，也就是说和电导成反比。

$$\therefore \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty} = \frac{g_2}{g_1}$$

若介质是均匀的，则

$$\left(\because C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}, g = \frac{\gamma \cdot A}{d} \therefore \frac{C_1}{C_2} = \frac{g_1}{g_2}, \frac{C_2}{g_1} = \frac{\epsilon_2}{\gamma_1}, \frac{C_1}{g_2} = \frac{\epsilon_1}{\gamma_2}, \text{若 } \epsilon_1 = \epsilon_2, \gamma_1 = \gamma_2, \text{ 则 } \frac{C_1}{g_1} = \frac{C_2}{g_2} \right) \cdot$$

式中 γ_1, γ_2 ——电导系数;

A ——平板电极面积;

d ——各层介质的厚度。

$$\therefore \frac{U_1}{U_2} \Big|_{t=0} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty}$$

即是说如介质均匀, 则合闸后两层介质之间不会发生电荷重新分配的过程。

如介质不均匀, 则 $\frac{C_1}{C_2} \neq \frac{g_1}{g_2}$, $\therefore \frac{U_1}{U_2} \Big|_{t=0} \neq \frac{U_1}{U_2} \Big|_{t \rightarrow \infty}$ 。所以合闸以后, 两层介质之间有一个电压重新分配的过程, 也即 C_1, C_2 上的电荷要重新分配。

设 $C_1 > C_2$ 而 $g_1 < g_2$, 则 $t = 0$ 时, $U_2 > U_1$; 而 $t \rightarrow \infty$ 时, 则 $U_1 > U_2$ 。即 $t = 0$ 以后, U_2 逐渐下降而 U_1 逐渐增大 ($\because U_1 + U_2 = U = \text{常数}$)。也即 C_2 上的一部分电荷要通过 g_2 放掉, 而 C_1 则要从电源再吸收一部分电荷——称吸收电荷。所以夹层的存在使整个介质的等值电容增大, 因而称为夹层介质极化。

绝缘预防性试验中, 经常利用夹层介质极化现象来判断绝缘的受潮情况。

表 23-1 几种电介质的介电系数

材 料 类 别		名 称	介电系数 ϵ_r (工频, 20℃)
气体介质(标准大气条件)		空 气	1.00059
液 体 介 质	弱 极 性	变 压 器 油	2.2
		硅 有 机 液 体	2.2~2.8
	极 性	蓖 麻 油	4.5
		苏 伏 油	4.6~5.2
	强 极 性	酒 精	33
		水	82
固 体 介 质	中 性	石 蜡	1.9~2.2
		聚 苯 乙 烯	2.4~2.6
		聚 四 氟 乙 烯	2
	极 性	松 香	2.5~2.6
		纤 维 素	6.5
		胶 木	4.5
		聚 氯 乙 烯	3.3
		沥 青	2.6~2.7
	离 子 性	云 母	5~7
电 瓷		6~7	

一种电介质内可以同时存在几种形式的极化, 甚至全部极化形式。

由电工基础中知, 在夹层介质中电场强度按介电系数成反比分布, 即 $\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$ 。当高压绝缘材料中有气泡时, 可使整个材料绝缘性能降低。因气泡的介电系数小, 气泡可先行游离, 损坏了整个材料的性能。并使极化作用增加。

水分侵入材料后, 使材料的介电系数增加。因水的介电系数大 (在80左右), 同时水分的侵入能增加极化 (夹层极化) 作用。

可见通过测量 ϵ 能判断电介质受潮程度及吸入气体的多少。

第二节 电介质电导（或绝缘电阻）

任何电介质都不可能是理想的绝缘体，它们总有一些联系弱的带电质点存在。在电场作用下，它们可作有方向的运动构成电流，因而任何电介质都具有一定的电导。表征电导大小的物理量是电导率 γ 。

电介质的电导率比金属小得多，且是离子性的，这和金属的自由电子导电是不同的。

温度愈高，参与漏导的离子（介质本身或杂质的）愈多，即电导电流愈大，所以介质电阻具有负的温度系数（金属电阻的温度系数是正的）。

电介质电导的另一特点是与所加电压有关，通常是在接近击穿时，导电现象显著增加，因此绝缘电阻值剧烈下降。

其第三特点是绝缘电阻值与加压时间有关，在加电压初期，因电导电流与可逆性的极化电流同时产生，可逆性极化电流叫做吸收电流，它是随介质加电压的时间逐渐衰减的，故要测得绝缘电阻的稳定值需较长时间，实用上规定加压一分钟后所测得的值作为绝缘电阻值。

对于固体电介质，必须注意区分体积电阻和表面电阻，因为表面电阻受外界影响很大（如潮湿、脏污），不能用它来说明绝缘内部的问题。

几种常用的液体、固体介质的电导列于表23-2及23-3中。

表 23-2 几种液体介质电导率

液体名称	结构特性	20°C时电导率 γ (欧 ⁻¹ ·厘米 ⁻¹)	介电系数 ϵ_r
变压器油	中性或弱极性	$10^{-12} \sim 10^{-15}$	2.2
硅有机油		$10^{-14} \sim 10^{-15}$	2.5
蓖麻油	极性	$10^{-12} \sim 10^{-13}$	4.5
苏伏油		$10^{-10} \sim 10^{-12}$	5
酒精	强极性	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	33
蒸馏水		$10^{-5} \sim 10^{-6}$	82

表 23-3 几种固体介质的电导率

固体介质名称	20°C 时 电 导 率 (欧 ⁻¹ ·厘米 ⁻¹)	
	相 对 湿 度 0%	相 对 湿 度 70%
聚乙烯	$10^{-17} \sim 10^{-18}$	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
聚苯乙烯	$10^{-17} \sim 10^{-18}$	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
聚四氟乙烯	$10^{-17} \sim 10^{-18}$	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
纤维板	10^{-14}	$10^{-8} \sim 10^{-9}$
纸	$10^{-16} \sim 10^{-17}$	$10^{-9} \sim 10^{-10}$
白云母	$10^{-15} \sim 10^{-16}$	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
普通玻璃	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
电瓷	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
硬橡胶	$10^{-16} \sim 10^{-17}$	$10^{-16} \sim 10^{-17}$

在绝缘预防性试验中，一般可通过绝缘电阻及泄漏电流来判断绝缘是否受潮或有无其

它劣化现象。

第三节 电 介 质 损 耗

在电场作用下,无论是荷电质点的移动(电子、离子)或转向(极性分子),必须从电场中吸收能量,所以极化过程有能量损失,这些损失是将电能不可逆的转化为热能,这种现象称为电介质的损耗。

由前所述的极化和电导可看出,介质在电压作用下有能量损耗。一是由极化引起的损耗,极性介质中偶极子转动有能量损耗,在多层介质中也会产生夹层介质极化引起损耗。另一种是电导引起的损耗。

直流电压作用下,由于无周期性的极化,因此损耗只是由电导引起,用体积电阻率和表面电阻率两个物理量已能够表达。故直流电压下不需再引入介质损耗这个概念。但在交流电压作用下,除电导损耗外,还有由于周期性的极化而引起的能量损耗。因此需引入一新的物理量来表示。如图23-7所示为:介质两端施加交流电压时的电压电流向量图(取电

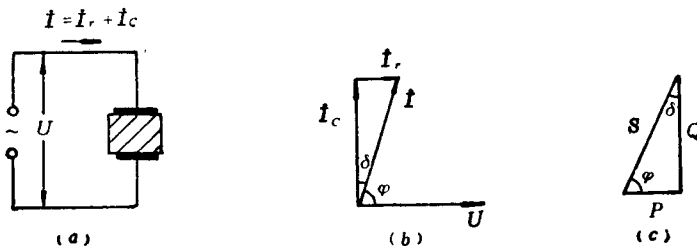


图 23-7 介质在交流下的向量图

压为基准量),由于介质中有损耗所以电流不是纯粹的电容电流,而是包含有功和无功两个分量,即

$$\dot{I} = I_r + jI_c \quad (23-4)$$

所以电源供给的视在功率为

$$S = P + jQ = U(I_r + jI_c) = UI_r + jUI_c \quad (23-5)$$

由图23-7(c)功率三角形可见

$$P = Q \cdot \tan \delta = U^2 \omega C \tan \delta \quad (23-6)$$

用介质损耗 P 表示介质品质好坏是不方便的,因为 P 值和试验电压、试品尺寸等因素有关,不同的试品难以互相比较,故以介质损耗角正切—— $\tan \delta$ (δ 角为功率因数角 φ 的余角)来判断介质的品质。

有损耗的介质可以用一个理想电容器和一个有效电阻的并联等值电路来表示。如图23-8所示。从向量图上可看出

$$\tan \delta = \frac{R}{U \omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R} \quad (23-7)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p \tan \delta \quad (23-8)$$

此等值电路只有计算上的意义，并不能确切地反映物理过程。

气体介质在强电场作用下，除了电导，极化两种损耗外，还有气体游离引起的损耗。当电场强度不足以产生碰撞游离时，气体中损耗是由电导引起的，损耗极小 ($\text{tg}\delta < 4 \times 10^{-8}$)，所以常用气体（如空气、 N_2 、 CO_2 、 SF_6 等），作为标准电容器的介质。但当外

施电压超过起始游离电压 U_0 时，气体介质会发生局部放电，损耗剧增，如图23-9所示。这种现象在高压输电线上表现得极为突出，称电晕损耗。

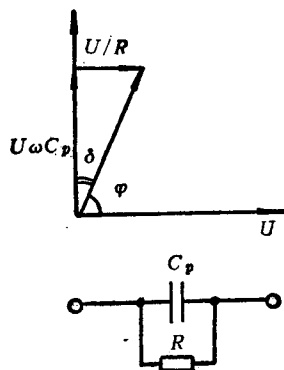


图 23-8 用 R 、 C_p 并联等值电路表示有损耗介质时的向量图

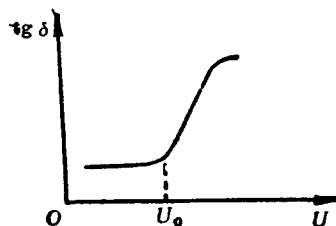


图 23-9 气体的 $\text{tg}\delta$ 与电压的关系

固体介质中含有气泡时，在高压下也会发生游离，使固体介质逐渐劣化。所以经常采用浸油、充胶等措施来消除气泡。对于固体介质和金属电极接触处的空气隙，则经常采用短路的办法，使气隙内的电场强度降为零。例如35千伏瓷套内壁上半导电性釉，通过弹性铜片与导杆相连；高压电机定子线圈槽内绝缘外包半导体层后再嵌入槽内等等。

中性或弱极性液体的损耗主要来源于电导，故损耗较小，与温度的关系也和电导相似。

极性液体（如蓖麻油、氯化联苯等）以及极性与中性液体的混合物（如电缆胶是松香

和变压器油的混合物），都具有电导和极化两种损耗，故损耗和温度、频率都有关系，如图23-10所示。图中曲线1是当温度 $t < t_1$ 时，由于温度低，电导和极化损耗都很小。随温度升高电导增加，电导损耗也增大；同时由于液体粘度随温度上升而减少，故偶极子的极化增强，极化损耗也因而增加。故在这一段内 $\text{tg}\delta$ 随温度升高而上升，直到 $t = t_1$ 时达极大值。在 $t_1 < t < t_2$ 范围内，由于分子热运动加快，妨碍偶极子在电场作用下作有规则的排列，极化强度反而减弱，所以极化损耗随温度升高而减小。由于这一段内，极化损耗的减小比电导损耗的增加更快，故总的看来 $\text{tg}\delta$ 随温度升高而下降。在 $t = t_2$ 时 $\text{tg}\delta$ 出现一极小值。

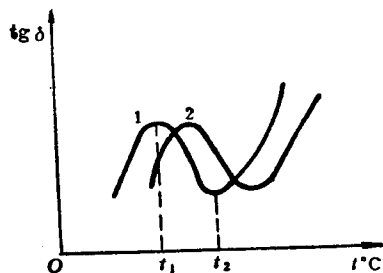


图 23-10 极性液体介质 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系
1—对应于频率 f_1 的曲线；2—对应于频率 f_2 的曲线 $f_1 < f_2$

$t > t_2$ 后极化损耗已不起主要作用，电导损耗决定着总的损耗，故 $\text{tg}\delta$ 重新随温度上升而增加。

从图 23-10 中还可看出，频率增大时， $\text{tg}\delta$ 的极大值出现在较高的温度。这是因为频率高时，偶极子的转动来不及充分进行。要使极化进行的充分，就必须减小粘度，即升高温度。故整个曲线向右移。图 23-11 给出松香—油复合胶的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系曲线。

固体介质的情况比较复杂，通常将其分为四大类：分子式结构、离子式结构、不均匀结构及强极性电介质。强极性电介质在高压设备上是不用的，故只讨论前三种。

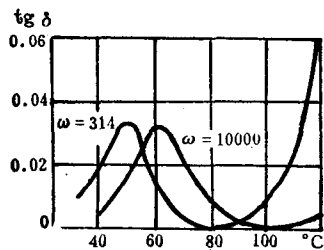


图 23-11 松香—油复合胶在不同频率时的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系

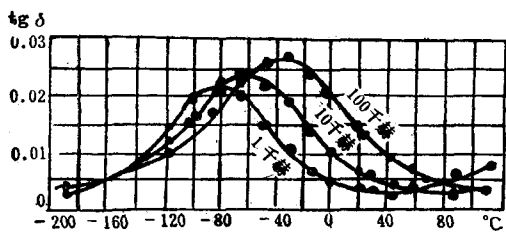


图 23-12 干燥纸的 $\text{tg}\delta$ 和温度之间的关系

分子式结构有中性和极性两种。中性的如纯石蜡、聚乙烯、聚苯乙烯、聚四氟乙烯等，损耗主要由电导引起，这些介质的电导极小，故介质损耗非常小，在高频下也可使用。极性的如纤维性材料——纸、纤维板等和含有极性基的聚合物——聚氯乙烯、有机玻璃、酚醛树脂、硬橡胶等。此类介质的 $\text{tg}\delta$ 与温度和频率的关系和极性液体相似， $\text{tg}\delta$ 值较大，高频下更为严重（图 23-12）。

离子式结构的介质、 $\text{tg}\delta$ 与结构特性有关。结构紧密的离子晶体，且不含有使晶格畸变的杂质时，主要是电导式损耗，故 $\text{tg}\delta$ 极小，如云母。云母不仅 $\text{tg}\delta$ 小，而且抗电强度高、耐热性能好、耐游离性能也好，故是优良的绝缘材料，在高频下也可使用。

结构不紧密的离子结构中，有离子松弛式极化现象。这种极化同偶极子极化相类似，也是有损耗的，故这类介质 $\text{tg}\delta$ 较大。玻璃、陶瓷属此类。但不同成分的玻璃， $\text{tg}\delta$ 差得很多；不同结构的陶瓷 $\text{tg}\delta$ 也相差极大，例如主要是结晶相的超高频电瓷 $\text{tg}\delta$ 很小，而含有大量玻璃相的普通电瓷，则 $\text{tg}\delta$ 较大。

不均匀结构介质，在工程上较常遇到，如电机绝缘中使用的云母制品，和广泛使用的油浸纸、胶纸绝缘。它们的损耗决定其中各成分的性能和数量间的比例，如图 22-13 示出用复合胶浸渍的电容器纸的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系曲线。曲线中出现两个极大值，

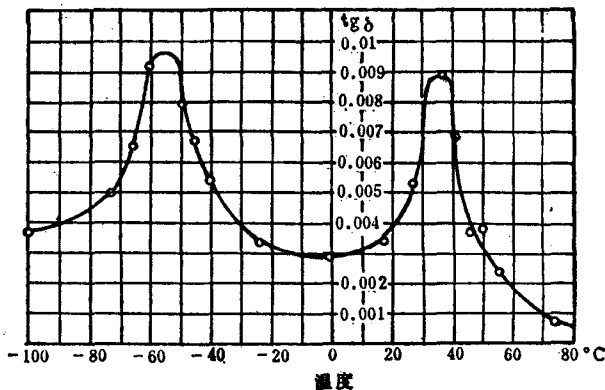


图 23-13 用复合胶（80%松香+20%变压器油）浸渍的电容器纸的 $\text{tg}\delta$ 和温度的关系

第一个（低温时）可能是由于纸本身的偶极式损耗引起，第二个（较高温度时）则可能是复合胶的偶极式损耗所致。

在电工中使用的电介质，要求它的 $\text{tg}\delta$ 愈小愈好，尤其在高频下使用的绝缘材料， $\text{tg}\delta$ 大，介质发热，可使绝缘性能发生不可逆的变坏（老化），严重者导致热击穿。

绝缘预防性试验中，测 $\text{tg}\delta$ 是一个基本项目，因绝缘受潮或劣化时， $\text{tg}\delta$ 剧烈上升，绝缘内部发生游离也可通过测 $\text{tg}\delta=f(U)$ 的曲线，加以判断。表23-4给出几种电介质的介质损耗。

表 23-4

各种结构固态电介质的介质损耗

介 质 结 构		名 称	1兆赫20°C时的 $\text{tg}\delta$
分 子 结 构	非 极 性 分 子	石 蜡 聚 苯 乙 烯 聚 四 氟 乙 烯	小于0.0002
	极 性 分 子	纤 维 素 有 机 玻 璃	0.01~0.015
离 子 式 结 构	晶 格 结 构 紧 密	岩 盐 刚 玉	小于0.0002 小于0.0002
	离 子 晶 格 不 紧 密 晶 格 畸 变 的 晶 体	多 铝 红 柱 石	0.015
		锆 英 石	0.02
	无 定 形 结 构	硅 酸 铝 玻 璃 硅 碱 玻 璃	0.001 0.01
不 均 匀 结 构		绝 缘 子 瓷	0.01
		浸 渍 纸 绝 缘	0.01

第四节 电介质老化与击穿电场强度

实验指出：随着施加于电介质的电压的增加，当达到某临界值 U_j （击穿电压）时，通过电介质的电流剧增发生了电介质的击穿，介质击穿后，完全丧失它固有的绝缘性能，转变成导体（对气态、液态材料，外施电压除去后，绝缘还可能恢复）。绝缘材料被击穿时的电场强度 E_j 称击穿电场强度或抗电强度。仅在均匀电场时， U_j 与 E_j 间才存在有如下的简单关系

$$E_j = \frac{U_j}{d} \quad (23-9)$$

式中 d ——击穿处电介质厚度（厘米或毫米）；

E_j ——击穿电场强度（千伏/厘米或千伏/毫米）。

有关气态、固态、液态电介质的击穿，将在以后两章中详细讨论。

在电介质中由于电场、热、化学、机械等的作用，其绝缘性能逐渐变坏，这一过程可能是可逆的，即在电压除去后，可回到原来的绝缘状态，即恢复其抗电强度，但这些过程

也可能是不可逆的，即在电压消失后，介质不再恢复它原来的特性。可逆的过程我们称做介质疲劳，不可逆的则称为介质老化。

使介质发生不可逆的老化过程，可能有下列原因：

1. 热过程 过热的原因有：①由其它过热部分传来的热量；②介质损耗或不均匀介质的局部损耗产生的局部过热（在高频下可能性大）。

2. 化学作用 由于高温及强电场作用使电极和电介质接触处的空气隙或介质内部的气泡发生局部放电：产生臭氧、氮的氧化物等，腐蚀电介质。

3. 机械损伤 由于机械碰撞及温度系数不同造成的应力引起的机械损伤。或介质不均匀及电极边缘处电场集中形成局部过电压，也会引起机械损害。

以上各种过程可能在介质中同时进行，也可能在一定条件下，从一种形式过渡到另一种，例如热的过程过渡到化学的和机械的，化学的过渡到机械的（温度作用下的附加聚合作用改变了绝缘的机械特性）。

介质的物理化学结构，外加电压的形式，媒质的工作条件，决定着每一个别情况中的老化形式。如果介质由不同的熔点的部分组成（如绝缘胶、松香），则在热的作用下，个别部分可能熔化，而别的部分发生移动，改变了它在介质本身中的位置，因而改变了介质的构造。电压失去后，变冷，其中形成被空气或气体充满的空洞。这种不可逆的反应，使绝缘特性变坏。

在局部受热的影响下，可能发生最不耐热部分的损坏。在由云母和漆组成的云母绝缘中，可观察到这种现象。由介质损耗发生的热，引起最弱点的过热。强烈的过热使各层云母组合在一起的粘合漆发生部分碳化。并沿碳化部分开始放电，逐渐损坏绝缘。

有些介质的组成部分，处在不同的聚集状态中，如油浸的布。所有这些属于有机绝缘材料中，在电压影响下，发生的化学反应，更大大地使现象复杂起来。

当介质处于高压装置中时，常发生放电现象。放电可发生在介质表面或介质中的气体部分，空气在放电时，析出臭氧和氮的氧化物，能腐蚀有机材料。油中的电晕，也能损害有机介质。

因此有机绝缘材料实际上不适宜于在高电压条件下工作。因为这些材料中只要有一些微小的空气，在外加高压的作用下，就会发生化学分解。使有机介质逐渐损坏。

介质中发生的变化是按照它的电导系数和介质损耗的改变来判断的。

此外，放电还可能引起机械损害，形成裂缝和沟道。下面举一些常见的介质老化现象。

发电机绝缘受机械振动作用，使线圈中出现微小裂纹和空隙；由于积累破坏效应，冷缩热胀受到摩擦；这些都加速了电机绝缘的老化。

在运行中绝缘子上引起电晕、滑闪放电甚至击穿或部分受损。过电压作用下，绝缘子可能受损的原因是由于轴棒胶装得不好，釉受伤、潮气渗入电瓷孔内及其他原因等等，经过一定时间之后，绝缘子便老化了。也就是它的电气和机械性能变坏了。使绝缘子老化的重要原因是：①构成绝缘子各部分的温度膨胀系数不同。②外部的机械负荷不同和瓷在焙烧后冷却而产生的内部机械应力。

在负荷变化时, 电缆绝缘内不可避免的要产生气泡而使绝缘老化。

变压器油在运行过程中也会老化, 其原因是高温和电场中的氧化作用。

介质疲劳是老化的起始阶段, 介质在过电压作用后“休息”可使其击穿电压值恢复。

介质老化与疲劳均与材料的物理和化学结构有关, 也与制造的工艺水平有关。

第二十四章 气 体 放 电

在电力系统中, 气体(主要是空气)是一种运用得相当广泛的绝缘材料, 如架空线, 母线、变压器外绝缘, 隔离开关的断口处。此外在绝缘材料内部或多或少含有一些气泡, 所以气体放电的研究是高压技术中一个基本问题。

气体在通常情况下, 由于宇宙射线及地层放射性物质的作用, 其中有少量带电粒子(约每立方厘米100对), 在电场作用下, 它们沿电场方向移动时, 在间隙中会有微弱的电流。逐渐提高施于间隙的电压, 则带电粒子运动速度会加大, 电流便增加, 如图24-1(b)所示的曲线 Oa 段。当电压继续提高, 但小于 U_0 时, 电流维持不变, 这是由于宇宙射线、地层放射性物质等的作用下, 气体间隙中单位体积、单位时间内产生的带电粒子数是不变的, 如图24-1(b)中曲线 ab 段, 此段内的电流也是极微小, 一般工程仪表测不出来可忽略, 所

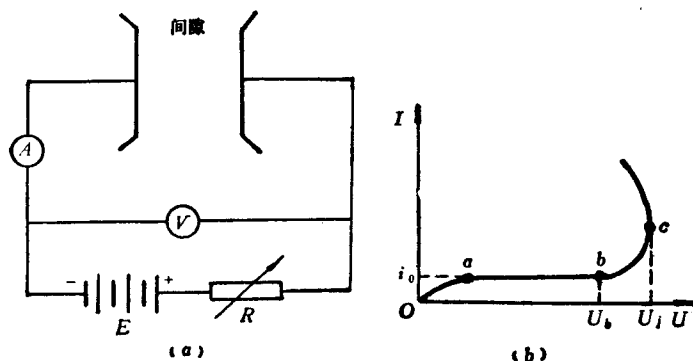


图 24-1 气体间隙的伏安特性

(a) 气体间隙伏安特性实验装置原理图; (b) 在均匀电场中气体间隙的伏安特性

以气体电导极小, 这说明气体可作为绝缘材料使用。当电压增加到大于 U_0 时, 由于较高的电场的作用, 使气体中产生了新的带电粒子, 间隙中流过的电流增加。当电压达 U_1 时, 间隙中流过电流剧增, 并伴有声、光、热、气味等现象, 称为气体击穿或气体放电, 这时加于间隙的电压、叫击穿电压或放电电压。在均匀电场中, 如果间隙的距离不太小时(> 1 厘米), 其击穿电场强度大约为30千伏(最大值)/厘米。

气体击穿后, 间隙中电流剧增, 说明气体中带电粒子突然剧烈地增加, 但此时如将外施电压除去, 气体能恢复它的绝缘强度, 并且当再次加压时, 它的击穿电压不会降低, 这说明外施电压去掉后, 气体中带电粒子会逐渐消失。气体在电场作用下, 带电粒子是不断产