

T1185  
1023

# 高压电气绝缘及测试

云南省电力技工学校 王川波 编  
成都水力发电学校 王 岷 审

中国水利水电出版社

# 出 版 说 明

南方职业技术教育学会与中国水利水电出版社联合,在全国电力职业技术教育界选聘、组织了一批专家,依据最新审定的电力工业学校教学计划和教学大纲,编审了一套职业技术教材,包括:《电工工艺》、《电器检修与试验》、《发变电站一次系统》、《高压电气绝缘及测试》、《电工测量技术》、《电工测量技术实验指导书》、《电机及其运行与检修》(第一册、基础部分)、《电机及其运行与检修》(第二册、运行部分)、《电机及其运行与检修》(第三册、检修部分)等,并出版发行。

这套教材针对职业技术学校(含电力工业学校、中专、技校)培养操作型、应用型人才的要求和电气类专业的特点,突破传统职教教材模式,采用模块组合结构,融讲授、实验、实习内容于一体;结合实际,深入浅出,语言简炼、通俗易懂,便于读者自学和操作训练;同时,编审者着意在教材中融入了当今国内、外有关的先进技术,以利于教育面向现代化。

这套教材可供电力工业学校、中专、技校电气类专业使用,也可供其他职业技术学校电气类专业选用,还可作为电气类专业检修、运行、试验岗位在职职工的培训用书,并供从事电气专业的技术人员和教学人员参考。

在这套教材的编审过程中,得到电力部职业技术教育研究中心教材建设研究室,有关省、市电力局以及编审者所在单位的积极支持,在此表示衷心的感谢!

读者对这套教材有何意见和要求,请与“邮编 661000,云南开远市、南方职业技术教育学会”函件联系。

中国水利水电出版社  
南方职业技术教育学会

1997年6月

# 前 言

本书是依据 1996 年 4 月审定的电力工业学校《高压电气绝缘及测试教学大纲》编写的。

全书共分为七章：第一、二、三章讲述电介质的基本理论知识及气体、液体、固体电介质的绝缘特性和击穿规律；第四章介绍高压电气设备（电力电容器、电力电缆、高压套管、电流互感器、电力变压器、旋转电机）的绝缘结构、绝缘特性及常用的绝缘材料；第五、六、七章讨论绝缘的预防性试验（常规试验）和在线监测的原理、方法及对测试结果的分析判断。通过对本书的学习，可使学生（学员）了解高压电气绝缘的基本知识，掌握对高压电气设备绝缘进行常规试验及在线监测的基本原理和方法。

本书的编写既考虑要适应职业技术学校（含电力工业学校、中专、技校）教学的特点，又兼顾现场电气技术人才培养或自学的需要，力求做到：内容深入浅出，联系生产实际；文字通俗易懂，便于读者自学；在对理论问题的分析上，侧重从物理意义方面进行定性阐述。此外，编者特别着意在书中融入了当今国内、外在高压电气绝缘及测试方面的先进技术，以有助于职业技术教育面向现代化。

在本书编审的全过程中，承蒙南方职业技术教育学会的精心组织和策划；全书由《高压电气绝缘及测试教学大纲》审定组组长、成都水力发电学校王岷高级讲师审阅，由云南工业大学电力工程学院王娴校订。在此一并致以衷心的感谢。

由于知识水平所限，书中难免存在不妥和错误，恳请读者给予批评指正。

编 者

1997 年 5 月

# 目 录

出版说明	
前 言	
绪 论 .....	1
<b>第一章 电介质的极化、电导和损耗 .....</b>	<b>3</b>
第一节 电介质的极化 .....	3
第二节 电介质的电导 .....	6
第三节 电介质的损耗 .....	8
复习思考题 .....	11
<b>第二章 气体放电 .....</b>	<b>12</b>
第一节 气体放电的基本知识 .....	12
第二节 均匀电场中的气体放电 .....	14
第三节 不均匀电场中的气体放电 .....	17
第四节 冲击电压作用下的气体放电 .....	20
第五节 不同大气状态下气体击穿电压的换算 .....	23
第六节 提高气体间隙击穿电压的措施 .....	26
第七节 沿面放电 .....	30
复习思考题 .....	33
<b>第三章 液体、固体电介质的击穿 .....</b>	<b>34</b>
第一节 液体电介质的击穿 .....	34
第二节 固体电介质的击穿 .....	37
复习思考题 .....	40
<b>第四章 高压电气设备的绝缘 .....</b>	<b>41</b>
第一节 电力电容器的绝缘 .....	41
第二节 电力电缆的绝缘 .....	46
第三节 高压套管的绝缘 .....	52
第四节 电流互感器的绝缘 .....	57
第五节 电力变压器的绝缘 .....	59
第六节 旋转电机的绝缘 .....	65
复习思考题 .....	69
<b>第五章 绝缘的预防性试验 (一) .....</b>	<b>71</b>
第一节 绝缘电阻和吸收比试验 .....	71
第二节 泄漏电流试验 .....	74
第三节 介质损失角正切值试验 .....	76

第四节	局部放电测试 .....	81
第五节	绝缘油的电气性能试验 .....	85
第六节	绝缘油中溶解气体的色谱分析 .....	87
	复习思考题 .....	90
<b>第六章</b>	<b>绝缘的预防性试验 (二)</b> .....	<b>92</b>
第一节	交流耐压试验 .....	92
第二节	感应耐压试验 .....	94
第三节	直流耐压试验 .....	97
	复习思考题 .....	99
<b>第七章</b>	<b>绝缘的在线监测</b> .....	<b>100</b>
第一节	泄漏电流在线监测 .....	100
第二节	介质损耗在线监测 .....	104
第三节	局部放电在线监测 .....	106
第四节	绝缘油中气体含量在线监测 .....	108
	复习思考题 .....	110
附录	一球接地时的球隙放电电压表 .....	111

## 绪 论

绝缘材料又称电介质，简称绝缘，是电气工程中应用最为广泛的一类材料。绝缘材料的电阻率极高，可达  $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ ，在一般电场作用下，通过其中的电流极小，通常可以忽略不计，从而能起到绝缘的作用。电力系统中的电气设备主要由导电部分和绝缘部分组成，绝缘的作用是将电位不等的导体分隔开，使其没有电气的连接，以保持不同的电位。电气设备运行的可靠性，在很大程度上取决于绝缘部分的良好与否，据统计，电力系统中 50%~80% 的停电事故是由绝缘部分引起的。所以，绝缘既是电气设备结构中的重要组成部分，又对电力系统的安全运行起着极为重要的作用。

随着国民经济的发展，用电量不断上升，输电距离不断增加，因而发电厂、变电站及电力系统的工作电压不断提高，我国的 500 kV 交流超高压输电线路早已开始投入运行，目前，有些国家正在研究兴建 1200 kV 级特高电压输电线路。由于工作电压的提高，有关高压电气绝缘的问题就显得越来越突出，绝缘材料越用越多，绝缘的费用在设备成本中所占比重越来越高，设备的体积和重量也越来越大，如果不研究并采用新的技术措施，设备的绝缘甚至无法构成。另一方面，发电厂、变电站的电气设备在正常运行时，是长期处在在工作电压的作用之下，但是，由于各种原因，电力系统中的电压有时会出现短时升高的现象，即产生过电压。过电压的作用时间虽然很短，但过电压的数值却大大超过正常工作电压，因而容易造成绝缘的破坏。所以，电气设备绝缘除应能耐受工作电压的持续作用外，还必须能耐受过电压的作用。也就是说，为了电气设备安全可靠地运行，必须想方设法保证及提高绝缘耐受电压的能力。

要保证电气设备安全可靠地运行，一方面电气设备制造行业需要改进绝缘材料、绝缘结构及其制造工艺，另一方面要求电力生产运行单位掌握电气绝缘运行的特点和规律，使设备科学地运行，在设备检修过程中，恰当地选择绝缘材料，改进绝缘结构，提高检修工艺，同时，还应加强绝缘监督，正常开展绝缘的常规试验和绝缘的在线监测，检测设备绝缘的故障，并加以及时消除，防患于未然。

《高压电气绝缘及测试》是电力职业技术学校（含电力工业学校、电力中专、电力技校等）、发电厂及变电站电气运行与检修、发电厂及电力系统运行等电气类专业的专业课程之一。本课程主要讲述高电压下电气绝缘的基础知识及绝缘的测试这两大方面的问题，内容包括：电介质的极化、电导和损耗，气体、液体、固体绝缘的性能及击穿机理，高压电气设备（电力电容器、电力电缆、高压套管、电流互感器、电力变压器、旋转电机等）的绝缘结构，电气设备绝缘的常规试验及绝缘的在线监测。通过对本课程的学习，学生（学员）应该了解电介质在各种类型高电压下的绝缘特性、耐电强度和放电机理，认识各种高压电气设备的绝缘材料、绝缘结构、绝缘特点，掌握提高各类电介质击穿电压的基本措施，还应掌握各项绝缘试验的原理、试验方法、试验注意事项以及对试验结果进行分析判断的原则。

《高压电气绝缘及测试》是一门实践性很强的课程，在理解有关基本理论的基础上，应紧密结合实际，通过实际测试、参加电气设备检修等方法，才能切实掌握有关的绝缘知识和测试技能。绝缘的测试工作，一般都是在高电压下进行，所以，必须严格遵循有关规程规定进行操作，以确保人身及设备的安全。

# 第一章 电介质的极化、电导和损耗

电介质在电场作用下会发生极化、电导和损耗等物理现象，在长期使用条件下，电介质还会发生老化。

通过对绝缘材料在电场作用下所发生的物理现象的研究，能使我们了解它们的性能，从而有利于合理地选择和使用绝缘材料。

## 第一节 电介质的极化

### 一、极化现象

构成电介质的分子，从结构上看，可分为中性和极性两类。所谓中性分子，就是分子中正、负电荷的作用中心是重合的，对外不显电性。而极性分子则不然，其正、负电荷的作用中心保持一定的距离（这种分子一般又称作偶极分子），单个分子对外是显电性的。但由于热运动，电介质内极性分子是不规则的排列，不同极性分子对外的电性互相抵消，故从电介质的整体上看，对外仍然不显电性。

当电介质受外电场作用时，中性分子内互相束缚的电荷在外电场力的作用下，按其所受电场力的方向发生微小的弹性位移，正电荷沿电场方向位移，负电荷逆电场方向位移，电场越强，位移越大；而偶极分子受电场力而转向，顺电场方向作有规则的排列。这样，原来对外不显电性的电介质这时显现了电性，在电介质两端出现等量异号电荷。

综上所述，电介质在外电场的作用下，所发生的束缚电荷的弹性位移或偶极分子的转向，就称为电介质的极化。

### 二、极化的基本形式

电介质极化的种类较多，下面讨论几种基本的极化形式。

#### （一）电子式极化

如图 1-1 所示，图 (a) 为无外电场作用时的中性原子；图 (b) 是在外电场作用下的原子，电子的轨道发生了变形位移，其作用中心与原子核的正电荷不再重合，正、负电荷两极分化。这种由电子的位移形成的极化叫电子式极化。

电子式极化是具有弹性的，在外电场去掉以后，由于正、负电荷的互相吸引力而自动恢复到原来的中性状态，因而这种极化没有能量损耗。此外，由于电子的质量很小，极化的过程极短，约为  $10^{-15}$  s，因而在各种频率的外电场作用下均能产生电子式极化。

温度对电子式极化的影响很小。当温度升高时，电子与原子核的结合力减弱，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，温度升高时极化程

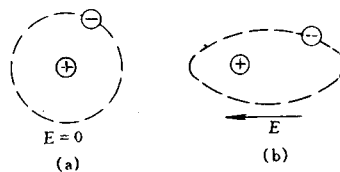


图 1-1 电子式极化



度略有下降。

气体、液体、固体各种电介质中都存在着电子式极化。

### (二) 离子式极化

固体无机化合物多属于离子式结构，如云母、陶瓷、玻璃等。无外电场作用时，正、负离子的作用中心互相重合，故不显电性，如图 1-2 (a) 所示。在外电场作用下，正、负离子发生位移，它们的作用中心不再重合，对外显示出电的极性来，如图 1-2 (b) 所示。这种极化叫离子式极化。

离子式极化具有弹性，故不消耗能量。因为这种极化的过程极短（约为  $10^{-13}\text{s}$ ），所以极化不随外施电压的频率而变化。

温度对离子式极化有较大的影响。温度升高时，离子间的结合力减弱，使极化程度增加；而离子的密度随温度的升高而减小，又使极化程度降低。但是，前者的影响较大，所以这种极化随温度的升高而增强。

### (三) 偶极式极化

有些电介质是由偶极分子组成，这种电介质称为极性电介质，例如：蓖麻油、氯化联苯、松香、橡胶、胶木、纤维素等。

组成这些极性电介质的偶极分子，在没有外电场作用时，由于不停的热运动，排列混乱，不同分子间对外的电性互相抵消，所以，整个介质对外不显示极性，如图 1-3 (a) 所示；在外电场作用下，偶极子发生转向，并顺电场方向作有规则的排列，如图 1-3 (b) 所示，对外显示出电的极性来。这种极化叫偶极式极化。

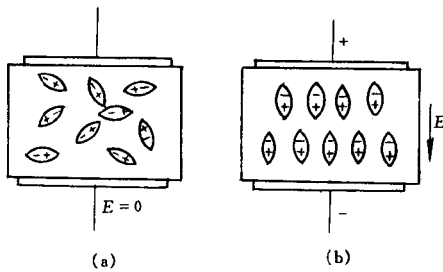


图 1-3 偶极式极化

极性分子在转向时要克服分子间的吸引力和摩擦力，所以，偶极式极化是属于非弹性的，极化时消耗的电场能量在复原时不能全部收回，因此，偶极式极化是有损耗的极化。此外，这种极化所需的时间较长（约为  $10^{-10}\sim 10^{-2}\text{s}$ ），故与电源的频率有较大的关系。频率很高时，偶极子来不及跟随外电场转动，因而使极化减弱。

### (四) 夹层式极化

上面所述的几种极化形式都是在单一而又均匀介质中所发生。实际上，高压电气设备的绝缘材料往往是由几种不同的介质组成，或者即使是单一介质也往往是不均匀的，在这种情况下会产生“夹层式界面极化”，通称夹层式极化。

为了便于分析，现以平行平板电极间的双层介质（每层介质的面积和厚度均相等）为例进行介绍，如图 1-4 所示。图中，两层介质 I 和 II 在电场作用下产生了极化，在两层介质

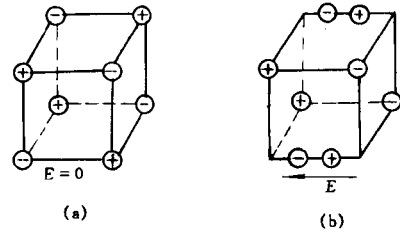


图 1-2 离子式极化

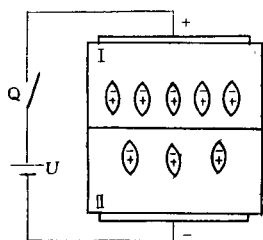


图 1-4 夹层式极化

的交界面处，介质 I 积聚了正电荷，介质 II 积聚了负电荷。由于两层介质的材料不相同（或者是不均匀的），它们的极化程度不一样，所以在两层介质的交界面处积聚的异号电荷量就不相等，例如介质 I 的下部边缘处积聚的正电荷数目比介质 II 的上部边缘处所积聚的负电荷数目多，于是在两介质交界面处显示出电的极性来。在外电场的作用下，交界面处所积聚的正电荷顺电场方向（即向电源负极方向）移动，而交界面处的负电荷则逆电场方向（即向电源正极方向）移动，并在介质内部形成电流。这种在电场作用下两介质交界面处所形成的极化叫夹层式极化。

夹层式极化的过程特别缓慢，所需时间约为  $10^{-2} \sim 10^4$  s 或更长，而且极化过程有能量的损耗。

### 三、相对介电系数及其在工程应用中的意义

#### (一) 相对介电系数

先看实验现象，如图 1-5 所示的平行平板电容器，先放在密闭的容器内将极间抽成真空，并在极板上施加直流电压  $U$ ，这时极板上积聚有正、负电荷，其电量为  $Q_0$ ，如图 1-5 (a) 所示。然后把一块固体介质（厚度与极间距离相等）放在极板之间，施加同样的电压  $U$ 。由于极化的结果，在固体介质表面上形成了电荷，在与正极板相对的面上形成负电荷，在与负极板相对的面上形成正电荷。这些电荷在相应的极板上另外吸住了一部分电荷  $Q'$ ，使极板上的电荷量增加到  $(Q_0 + Q')$ ，如图 1-5 (b) 所示，并造成平行平板电容器的电容量增大。平行平板电容器在真空中的电容量为

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (1-1)$$

式中  $A$ ——极板面积， $m^2$

$d$ ——极间距离， $m$ ；

$\epsilon_0$ ——真空的介电系数， $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} F/m$ 。

极板间插入固体介质以后，电容量增为

$$C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = \frac{\epsilon A}{d}$$

式中  $\epsilon$ ——介质的介电系数。

所以  $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0} \quad (1-2)$

$\epsilon_r$  即称为电介质的相对介电系数。由式 (1-2) 可见，某电介质的相对介电系数  $\epsilon_r$  可定义为：以该物质为介质的电容器的电容与以真空为介质的同样大小电容器的电容之比值。

任何物质的相对介电系数都与单位制的选择无关。为了简便起见，“相对”二字往往省略，仅写介电系数。几种常用电介质的介电系数如表 1-1 所示。

#### (二) 介电系数在工程应用中的意义

相对介电系数在实际工程应用中具有特殊的意义，在选择高压电气设备的绝缘材料时，一般应该考虑电介质的  $\epsilon_r$  值。例如：选择电容器的绝缘材料，一方面要注意电气强度，另

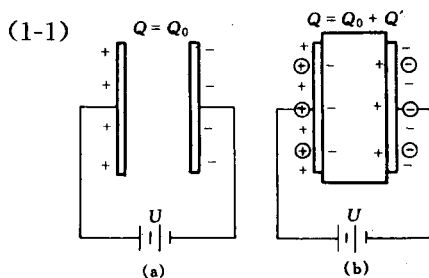


图 1-5 说明极化与介电系数的关系图

(a) 极间为真空；(b) 极间有介质

表 1-1

几种电介质的介电系数

材 料 类 别		名 称	相对介电系数 $\epsilon_r$ (工频, 20℃)
气体介质 (标准大气条件)		空 气	1.00058
液 体 介 质	弱 极 性	变 压 器 油 硅 有 机 液 体	2.2~2.5 2.2~2.8
	极 性	蓖 麻 油 氯 化 联 苯	4.5 4.6~5.2
	强 极 性	丙 酮 酒 精 水	22 33 81
固 体 介 质	中 性 或 弱 极 性	石 蜡	2.0~2.5
		聚 苯 乙 烯	2.5~2.6
		聚 四 氟 乙 烯	2.0~2.2
松 香		2.5~2.6	
沥 青		2.6~2.7	
极 性	纤 维 素	6.5	
	胶 木 聚 氯 乙 烯	4.5 3.0~3.5	
离 子 性	云 母	5~7	
	电 瓷	5.5~6.5	

一方面希望电介质的  $\epsilon_r$  要大, 这样, 电容器单位容量的体积和重量就可以减小; 但其他绝缘结构则往往希望电介质的  $\epsilon_r$  要小一些, 如减小电缆绝缘的  $\epsilon_r$ , 可以使电缆工作时的充电电流减小。

在交流电压的作用下, 串联介质中的电场强度按介电系数成反比分布, 即  $\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$ 。一般高压电气设备中的绝缘常常是由几种介质组合而成, 这种情况下就一定要注意各种介质的  $\epsilon_r$  值的配合, 使各种介质上的电场分布尽量均匀。例如三氯联苯浸渍的电容器的尺寸比矿物油浸渍的小, 一方面是因为三氯联苯的  $\epsilon_r$  大, 另一方面也是由于采用三氯联苯时液体介质与固体介质 (纸) 间电场分布较为合理的缘故。

在工程应用中, 还可以通过测量  $\epsilon_r$  值判断电介质受潮的程度及所含气体的多少, 进而了解电介质的绝缘性能。因为当水分浸入材料后, 由于水分的介电系数大 (在 80 左右), 可使材料的  $\epsilon_r$  增加。当介质中含有气泡时, 可以增加夹层极化的作用, 使介质的介电系数增加。

## 第二节 电介质的电导

### 一、电介质电导的基本概念

电介质并不是理想的绝缘体, 在电场的作用下仍然会有一些电流流过, 这就叫做电介质的电导。不过, 电介质的电导能力比导体的小得多。表征电导大小的物理量是电导率

(γ)。在常温下，金属导体的电导率在  $10^7$  s/m 以上，电介质的电导率在  $10^{-7}$  s/m 以下。

电介质的电导，是由于电介质中存在一些联系很弱的带电质点，在电场的作用下沿电场方向（正电荷沿电场方向，负电荷沿电场反方向）发生移动所造成的。按带电质点的种类，电介质的电导可以分为：

(1) 电子电导：带电质点是带负电荷的电子；

(2) 离子电导：带电质点是离解了的原子或原子团（离子），它们可以带正电荷，也可以带负电荷，如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{OH}^-$  等。离子电导时伴随有电解现象发生。

(3) 胶粒电导：带电质点是带电的分子团，即胶粒，如油中处于悬浮状态的水滴等。

应该指出，电介质电导与金属电导不尽相同，这不仅在于两者电导率差别很大，更重要的是在绝大多数情况下电介质的电导主要是离子电导，而金属导体的电导是自由电子电导。

表 1-2 几种液体介质的电导率

液体介质名称	结构特点	20℃时的电导率 $\gamma$ (s/m)
变压器油 硅有机液体	中性或弱极性	$10^{-10} \sim 10^{-13}$ $10^{-12} \sim 10^{-13}$
蓖麻油 氯化联苯	极性	$10^{-10} \sim 10^{-11}$ $10^{-8} \sim 10^{-10}$
丙酮 酒精 蒸馏水	强极性	$10^{-4} \sim 10^{-5}$ $10^{-4} \sim 10^{-5}$ $10^{-3} \sim 10^{-4}$

1-2 所示。

### 三、固体电介质的电导

固体电介质的电导分为体积电导和表面电导。

在固体介质上加电压时，介质的内部有电流流过，这是固体介质的体积电导。固体介质内形成电导的带电质点有：在高电场作用下从电极拉出的电子；介质中的杂质和介质本身由于电场和热的作用而离解产生的离子。通常认为：在低电场范围内（常用介质的工作范围）以离子电导为主，高电场范围内以电子电导为主。由于固体介质本身的离子电导很小，所以一般在温度不是很高的情况下，总是杂质离子电导起主要作用。

几种固体介质的电导率如表 1-3 所示。

在固体介质上加电压时，介质的表面有电流流过，这是固体介质的表面电导。干燥、清洁的固体介质的表面电导是很小的，因为表面电导主要是由附着于介质表面的水分和其他污物引起。介质表面极薄的一层水膜就

## 二、液体电介质的电导

液体电介质中构成电导的因素主要有两种：一种是液体本身的分子离解为离子，构成离子电导；另一种是液体中的胶体物质（如树脂、碳渣、悬浮状水滴等）吸附电荷后形成带电胶粒，构成胶粒电导。

中性液体的离子电导，主要由杂质离子所构成。极性液体除杂质离子外，还有液体本身分子所形成的离子，所以电导率较高。水和酒精等强极性液体，本身电导已很大，不能作为绝缘。几种液体介质的电导率如表

表 1-3 几种固体介质的电导率

固体介质名称	20℃时的电导率 $\gamma$ (s/m)	
	相对湿度 0%	相对湿度 70%
聚乙烯、聚苯乙烯、聚四氟乙烯	$10^{-15} \sim 10^{-16}$	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
纤维板	$10^{-12}$	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
纸	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	$10^{-7} \sim 10^{-8}$
白云母	$10^{-13} \sim 10^{-14}$	$10^{-13} \sim 10^{-14}$
玻璃、电瓷	$10^{-12} \sim 10^{-13}$	$10^{-12} \sim 10^{-13}$
硬橡胶	$10^{-14} \sim 10^{-15}$	$10^{-14} \sim 10^{-15}$

能造成明显的电导，水膜越厚则电导越大。如果水分之外又有污物，则表面电导将更为显著地增大。虽然，表面电导主要决定于外界的因素，但由于各种材料吸附水分的能力不同，所以，还是应该将表面电导看作是介质本身的一种性能。

中性和弱极性介质，如石蜡、聚苯乙烯、聚乙烯、硅有机物等，它们吸附水分的能力比较弱，水分只能在它们的表面形成不连续的水珠。这种介质称为憎水性介质，其表面电导很小。

有的介质，如电瓷等，能被水湿润，但若表面无脏污，则即使在潮湿环境仍能保持相当小的电导率。

有的介质部分溶于水，如含碱金属玻璃，介质中的碱金属离子还会进入水膜，增加水的电导率，甚至丧失其绝缘性能。

多孔性介质在潮湿环境中，不仅表面电导大，而且体积电导也大（水分浸入内部），如纤维材料就属于这一类。

#### 四、温度和杂质对电导的影响

影响介质电导的外界因素有二：一是杂质；二是温度。

由于杂质的离子数较多，杂质又易使介质内产生带电质点，所以当介质中的杂质增多时，会使介质的电导明显地增加。杂质中以水分的影响为最大，因水分内带电质点很多，本身电导又较大，而且水分又能使介质内的另一些杂质（如盐类、酸类等物质）发生水解，从而大为增加介质的电导。所以，电气设备的绝缘在运行前要进行干燥处理，运行中要采取各种措施防潮。

温度对介质电导的影响也很明显。温度升高，介质本身和介质内所含杂质离解的程度加剧，离子的数目增多；与此同时，温度升高，介质内部粘度减小，在一定电场作用下，带电质点的运动加快。因此，使介质的电导随温度的升高而增大。由实验及理论均已证明，介质的电导率  $\gamma$  或电阻率  $\rho$  随温度的变化近似于指数规律

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha t} \quad (1-3)$$

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha t} \quad (1-4)$$

式中  $\gamma_0$ 、 $\rho_0$ —— $0^\circ\text{C}$ 时的电导率和电阻率；

$\gamma$ 、 $\rho$ —— $t^\circ\text{C}$ 时的电导率和电阻率；

$\alpha$ ——温度系数。

### 第三节 电介质的损耗

#### 一、电介质损耗的基本形式

由前述的电介质的极化和电导可以看出，在外加电压作用下，电介质中的一部分电能被转换为热能，这种现象称为介质损耗。

电介质的损耗可以分为电导损耗、极化损耗及电离损耗等。

电导损耗是由电介质中的电导电流引起的，气体、液体和固体介质中普遍存在这种形式的损耗。在通常情况下，只要介质干燥、清洁，而又不存在变质等缺陷，介质的电导电流很小，所以电导损耗很小。

极化损耗是由某些形式的极化引起，例如：极性介质中的偶极式极化，复合介质或不均匀介质中的夹层式极化，都能造成介质的极化损耗。在第一节中曾经提到过，在偶极式极化中，极性分子在电场的作用下，沿电场方向发生转动，这就要克服分子间的吸引力和摩擦力，从而消耗一部分电能转变为热能，即造成能量的损耗。而在夹层式极化中，在不同介质的交界面上发生电荷的积聚和消失，这些电荷的积聚和消失，都是通过介质内部的，所以也要造成能量的损耗。

在极性介质及结构不紧密的离子固体介质中，例如三氯联苯、环氧树脂等，都存在极化损耗，在这些介质中，同时还存在电导损耗，所以这些介质的损耗较大。

气体原子外层的电子，在外电场的作用下将克服原子核的作用，而成为自由电子，原子因失去电子而形成正离子，这一过程叫电离，又叫游离（关于气体游离在第二章中还要讨论）。电离损耗就是气体介质在电场的作用下发生游离所造成的损耗。气体介质以及含有气体的液体、固体介质中，当外施电压升高到足以使气体发生游离时，气体便发生游离而产生带电质点，这些带电质点在电场的作用下发生碰撞使气体发热，导致能量的损耗。

由上述知，介质损耗会引起介质内部的发热，损耗越大，发热越严重；反过来，发热引起温度的升高，促使电导和极化加强，于是造成损耗进一步增大。在这种恶性循环下，容易在介质薄弱的地方造成破坏。所以，介质损耗的大小反映了介质的优劣状况。

## 二、介质损失角正切值及其物理意义

在直流电压的作用下，由于介质中没有周期性的极化过程，因此不存在极化损耗，只有电导损耗和电离损耗；当外施电压较低，不足以引起气体发生游离时，介质中的损耗仅由电导决定，这时用体积电导率和表面电导率两个物理量已能够表达。但是，在交流电压下，还存在由周期性极化而引起的极化损耗，用电导率这样的物理量来表达已经不能满足，需要引入一个新的物理量——介质损失角正切值 ( $\text{tg}\delta$ )。

图 1-6 (a) 为介质两端施加交流电压的示意图，图 (b) 为将介质看成一个电阻和一个无损电容并联组成的等值电路，图 (c) 是根据等值电路作出的相量图（取电压为基准值）。

由图 1-6 (b) 可见，通过介质的总电流  $\dot{I}$  是由通过电阻的有功电流  $\dot{I}_R$  和通过电容的无功电流  $\dot{I}_C$  合成，其介质损耗由  $\dot{I}_R$  产生， $\dot{I}_R$  越大，介质损耗越大。由相量图可见， $\dot{I}_R$  的大小取决于总电流  $\dot{I}$  与无功电流  $\dot{I}_C$  之间的夹角  $\delta$ ， $\delta$  角愈大，则  $\dot{I}_R$  愈大，所以称  $\delta$  角为介质损失角。图 1-6 (c) 中，有功电流  $I_R$

与无功电流  $I_C$  的比值 ( $I_R/I_C$ ) 为  $\text{tg}\delta$ ，它也与有功电流  $I_R$  成正比，也就是说， $\text{tg}\delta$  值与介质的损耗成正比。关于这一点，还可由图 1-6 (b) 作进一步地推导

$$I_R = \frac{U}{R} \quad (1-5)$$

$$I_C = \frac{U}{x_C} = \omega C U \quad (1-6)$$

式中  $\omega$ ——电源角频率。

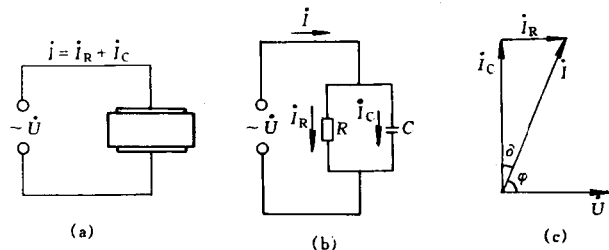


图 1-6 介质在交流电压作用下的等值电路及相量图

(a) 示意图；(b) 等值电路；(c) 相量图

由相量图可见

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega CR} \quad (1-7)$$

所以  $P = UI_R = Utg\delta I_C = U\omega tg\delta CU = \omega CU^2 tg\delta$  (1-8)

用介质损耗  $P$  表示介质的好坏是不方便的，因为它与试验电压、被试品尺寸等因素有关，不同的被试品难于互相比较。由式 (1-8) 可见，对于一定尺寸结构的设备（这时  $C$  为一定值），当所加电压的频率和大小一定时，介质损耗  $P$  的大小与介质损失角的正切值  $\operatorname{tg}\delta$  成正比，即  $\operatorname{tg}\delta$  的大小反映了介质损耗的大小。

在电工中使用的电介质，从介质损耗这一角度看，要求它的  $\operatorname{tg}\delta$  值越小越好。各种结构固态电介质的  $\operatorname{tg}\delta$  值如表 1-4 所示。

表 1-4 各种结构固态电介质的介质损耗

介 质 结 构		名 称	1 MHz、20℃时的 $\operatorname{tg}\delta$
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 锆 英 石	0.015 0.02
	无定形结构	硅 酸 铅 玻 璃 硅 碱 玻 璃	0.001 0.01
不 均 匀 结 构		绝 缘 子 瓷 浸 渍 纸 绝 缘	0.01 0.01

### 三、 $\operatorname{tg}\delta$ 与频率、温度及电压的关系

当不考虑电导电流所引起的损耗时，不均匀介质的  $\operatorname{tg}\delta$  在同一温度下与电源频率的关系如图 1-7 所示。在一定的频率范围内， $\operatorname{tg}\delta$  随频率的升高而增大，在某一频率下  $\operatorname{tg}\delta$  出现最大值。当频率超过某一值后， $\operatorname{tg}\delta$  随频率的升高而减小。这是因为在一定的频率范围以内，随频率的升高，介质中偶极子往复转向运动的速度增加，极化程度加强，介质损耗增大，以至达到最大值。当频率超过一定的范围时，由于偶极子质量的惯性及相互间的摩擦作用，来不及随电源的变化而转动，极化反而减弱，损耗下降。在电力系统的绝缘试验中，电源频率固定为 50 Hz，一般该频率只有微小的变化，应视为对  $\operatorname{tg}\delta$  没有影响。

介质损耗与温度的关系，是随介质的结构不同有显著差异。中性或弱极性介质的损耗主要来源于电导，所以  $\operatorname{tg}\delta$  随温度升高而增大。对于极性介质，其损耗与温度的关系如图 1-8 所示。在温度  $t_1$  以前，温度低时，电导损耗和偶极式极化损耗都较小，随温度升高两种损耗均增大，到  $t_1$  时达到最大。以后，温度升高，由于分子热运动妨碍偶极式极化，极化损

耗减小，而且极化损耗减小的程度超过电导损耗随温度上升而增加的程度，所以总的介质损耗反而下降。到  $t_2$  以后，电导损耗上升为主要因素，故介质损耗又随温度的上升而增加。

在一定的电压数值范围内，当外加电压升高时， $\text{tg}\delta$  并不随电压的变化而变化，即  $\text{tg}\delta$  与电压无关，如图 1-9 中左半段曲线所示。只有当电压升高到某一数值足以使介质中的气泡发生游离时，即图 1-9 中电压达到  $U_1$  及以后，介质中产生了附加的电离损耗， $\text{tg}\delta$  才急剧地增加，如图 1-9 中右半段曲线所示。据此，在较高电压下测量  $\text{tg}\delta$  值，可以检查出介质中夹杂有气隙或分层、龟裂等缺陷来。

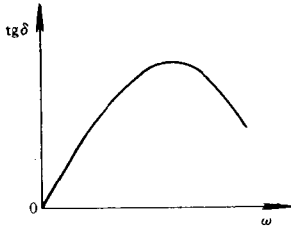


图 1-7 介质在一定温度下， $\text{tg}\delta$  与角频率的关系

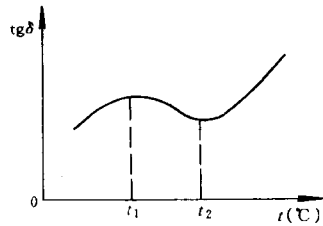


图 1-8 极性介质  $\text{tg}\delta$  与温度的关系

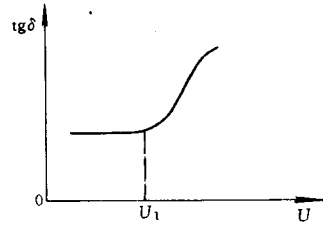


图 1-9 气体的  $\text{tg}\delta$  与电压的关系

### 复习思考题

1. 什么叫电介质的极化？极化有哪些基本形式？它们各有何特点？
2. 什么叫介质的相对介电系数？相对介电系数在工程应用中有何意义？
3. 试分析介质电导的原因和影响介质电导的主要因素。
4. 试说明介质损失角正切值 ( $\text{tg}\delta$ ) 的物理意义。
5. 电介质的  $\text{tg}\delta$  值与电源频率、温度及电压的高低有何关系？



## 第二章 气体放电

气体在电压作用下而发生导通电流的现象称为气体放电。

在电力系统中，气体（主要是空气）是一种应用得相当广泛的绝缘材料，如架空输电线、母线、隔离开关的断口处等都是完全依靠空气作为绝缘的。还有些虽然不完全依靠空气作为绝缘，但空气包围在它们的外部，构成外绝缘的一部分，如变压器和断路器设备。除使用气体作为绝缘外，电力系统中有许多处于空气中的绝缘，如绝缘子、套管等，将会遇到气体沿固体绝缘表面的放电问题。另外，在液体或固体绝缘内部或多或少总会含有一定的气体杂质，介质的损耗往往是由于这些气体杂质的放电引起的。要正确地解决这些问题，就需要了解气体中的放电过程。

### 第一节 气体放电的基本知识

处于正常状态并没有受到外能作用的气体是完全不导电的。由于来自空中的紫外线、宇宙射线及来自地球内部的辐射线的作用，通常气体中总存在少量的带电质点。在电场作用下，这些带电质点沿电场方向运动，形成导电电流。所以，气体通常并不是理想的绝缘介质。但当电场较弱时，由于气体内带电质点很少，气体的电导极小，气体仍为优良的绝缘体。

当加于气体间隙上的电压达到一定数值时，通过气体的电流会突然剧增，从而使气体失去绝缘的性能。气体这种由绝缘状态变为良导电状态的过程称为击穿。气体发生击穿时，除电导突增外，还常常伴随有发光及发声等现象。使气体发生击穿的最低电压称为气体的击穿电压，气体的击穿电压又叫气体的放电电压。

#### 一、气体放电的主要形式

多年来，人们对气体放电进行了大量的观察和研究，积累了丰富的资料。通过实验观察，在不同的情况下，气体放电现象很不相同，大致有以下几种主要放电形式：

(1) 火花放电。在气体间隙的两极，电压升高到一定值时，气体突然发生明亮的火花，火花向对面电极伸展出细光束。在电源功率不大时，这种火花会瞬时熄灭，接着又突然发生。这种放电是高电压放电实验中常见的现象。

(2) 辉光放电。外施电压增加到一定值后，通过气体的电流明显增加，气体间隙两极间整个空间忽然出现发光现象，这种放电形式称为辉光放电。辉光放电的电流密度较小，放电区域通常占据整个电极间的空间。霓虹管中的放电就是辉光放电的例子。

(3) 电晕放电。当电极的曲率半径很小时，电场很不均匀，随外施电压的升高，在电极尖端附近会出现暗蓝色的放电微光，并发出声音。如不继续提高电压，放电就局限在较小的范围内，成为局部放电。发生电晕放电时，气体间隙的大部分尚未丧失绝缘性能，放电电流很小，间隙仍能耐受电压的作用。各种高压装置的电极尖端，常常发生这种电晕放电。