

高等学校教学用书

电工产品学

曾宪林 何长征 唐雄华 编

中国矿业大学出版社

前 言

“电工产品学”是为矿山物资管理工程专业编写的教材。内容注意结合物资供应管理工作的要求，侧重于讲述电工产品的性能、用途、适用范围、分类、型号规格及其订货、验收、保管等。考虑到矿山物资管理专业学生学习本课程的目的主要是应用和选择各种电工产品，而不是要设计制造各种电工产品，因此对各种电工产品的基本原理，尽量予以通俗的说明。由于各种电工产品更新换代的速度很快，所以书中所列各种常用产品只供参考。

对于矿山物资管理工程专业来说，《电工产品学》具有双重性质，既可认为是专业技术基础课，同时也可以认为是专业课。所以《电工产品学》在矿山物资管理工程专业课程设置中占有重要地位。

本书分上、下篇共十五章。第一、二、三、四、十二、十四章由何长征编写，第五、六、七、八、九、十、十一、十三章由曾宪林编写，第十五章由唐雄华编写。全书由曾宪林负责编稿、总纂、整理。

本书是在经过几次教学实践后编写的，但由于编者水平所限，且编写时间仓促，书中内容可能有不妥乃至错误之处，欢迎读者批评指正。

编者

1988年12月

目 录

上篇 电 工 材 料

第一章 绝缘材料	(1)
第一节 绝缘材料概述	(2)
第二节 绝缘材料的电性能	(4)
第三节 绝缘材料的非电性能	(10)
第四节 气体和液体绝缘材料	(13)
第五节 固体绝缘材料	(16)
第六节 绝缘材料的使用	(21)
第七节 绝缘材料的验收和保管	(23)
复习思考题、习题	(24)
第二章 导电材料	(25)
第一节 导电材料概述	(25)
第二节 高导电金属材料	(28)
第三节 特殊用途的导电材料	(31)
复习思考题、习题	(37)
第三章 半导体材料及器件	(38)
第一节 半导体材料概述	(38)
第二节 晶体管	(43)
第三节 半导体器的订货、验收和保管	(51)
复习思考题、习题	(52)
第四章 磁性材料	(53)
第一节 磁性材料概述	(53)
第二节 软磁材料	(56)
第三节 硬磁材料	(59)
第四节 特殊性能的磁性材料	(62)
复习思考题、习题	(63)

下篇 煤矿常用电气设备

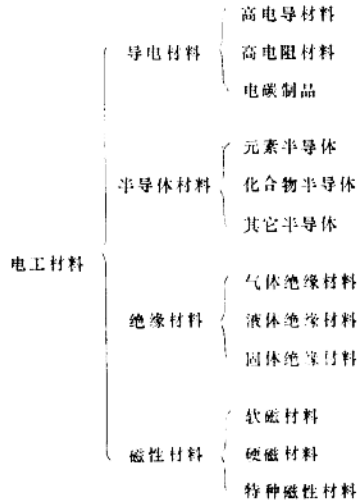
第五章 矿用电气设备的构造特点及适用范围	(64)
第一节 煤矿工作条件对电气设备的要求	(64)
第二节 煤矿电气设备的分类和适用范围	(64)
复习思考题、习题	(66)
第六章 煤矿常用电动机	(67)

第一节 三相异步电动机.....	(67)
第二节 矿用隔爆电动机.....	(82)
第三节 同步电机.....	(91)
第四节 直流电动机.....	(95)
第五节 电机的订货、验收和保管.....	(97)
复习思考题、习题.....	(99)
第七章 变压器	(100)
第一节 变压器的分类.....	(100)
第二节 变压器的结构和工作原理.....	(100)
第三节 变压器型号表示方法.....	(104)
第四节 变压器的铭牌.....	(105)
第五节 煤矿常用的几种变压器.....	(106)
第六节 采区变压器的选择.....	(108)
第七节 变压器的订货、验收及保管.....	(111)
复习思考题、习题.....	(111)
第八章 供配电设备	(112)
第一节 煤矿供电一般知识.....	(112)
第二节 高压开关.....	(117)
第三节 互感器.....	(125)
第四节 避雷器.....	(134)
第五节 电力电容器和电抗器.....	(141)
第六节 高压成套配电装置.....	(152)
第七节 低压成套配电装置.....	(158)
第八节 防(隔)爆自动馈电开关.....	(165)
第九节 矿用隔爆型移动变电站千伏级馈电开关.....	(166)
复习思考题、习题.....	(168)
第九章 煤矿常用起动设备和隔爆开关	(169)
第一节 煤矿常用起动设备.....	(169)
第二节 煤矿常用的几种隔爆开关.....	(177)
第三节 起动设备与隔爆开关的订货、验收与保管.....	(183)
复习思考题、习题.....	(184)
第十章 电线电缆	(185)
第一节 电线电缆的用途和基本结构.....	(185)
第二节 电线电缆的分类和型号编制.....	(191)
第三节 煤矿常用电线电缆.....	(194)
第四节 煤矿综合机械化配套电线电缆.....	(199)
第五节 电线电缆的选择.....	(204)
第六节 电缆的使用和管理.....	(216)
第七节 电线电缆的订货、验收和保管.....	(218)
复习思考题、习题.....	(218)
第十一章 电瓷	(220)
第一节 电器瓷套.....	(220)

第二节 高压支柱绝缘子.....	(221)
第三节 穿墙套管.....	(223)
复习思考题、习题.....	(224)
第十二章 硅整流设备和蓄电池.....	(225)
第一节 硅及可控硅整流电路.....	(225)
第二节 硅及可控硅整流设备.....	(228)
第三节 蓄电池.....	(232)
复习思考题、习题.....	(238)
第十三章 矿用照明、信号及通讯设备.....	(239)
第一节 煤矿照明设备.....	(239)
第二节 煤矿信号设备.....	(246)
第三节 煤矿通讯设备.....	(248)
复习思考题、习题.....	(251)
第十四章 电工仪表与矿用小型电子电器.....	(252)
第一节 电工仪表概述.....	(252)
第二节 几种常用电工仪表.....	(260)
第三节 矿用小型电子电器.....	(275)
第四节 电工仪表和小型电子电器的验收和保管.....	(277)
复习思考题、习题.....	(279)
第十五章 电子计算机.....	(280)
第一节 计算机概述.....	(280)
第二节 微型计算机系统.....	(288)
第三节 计算机的选购.....	(296)
复习思考题、习题.....	(306)
参考文献.....	(307)

上 篇 电 工 材 料

在电气设备和装置中,对电磁场起有效作用的材料称为电工材料。这些材料按其电或磁的特性,以及其物质结构或状态,工程上常作如下分类:



电工材料的应用和新品种的研制,与电气工程技术的发展有着密切的联系。任何电工产品与设备都是各种电工材料一定的组合,电工材料的性能,对保证电气设备正常工作起着决定性的作用。随着国民经济的不断发展,煤矿机械化、电气化程度日益提高,电工材料在现代煤矿企业中将起着越来越重要的作用。

第一章 绝 缘 材 料

绝缘材料又称电介质,与导电材料及半导体材料相比,它是一种电阻系数很高(电阻率为 $10^7 \sim 10^{12} \Omega \cdot m$),导电能力极低的物质。在直流电压作用下,绝缘材料中只有极小的电流通过,通常可以认为是不导电的。

绝缘材料是电工材料中最重要的一种,其种类繁多,用途广泛,而且其性质变化多端,在不同的应用中,对于材料的要求亦各不相同。本章先就绝缘材料的种类,一般性质及使用情况作一简单介绍,在此基础上,分别介绍电机、电器上常用的各种主要绝缘材料。

第一节 绝缘材料概述

一、绝缘材料的用途和分类

绝缘材料的用途首先是用来隔离带电导体或不同电位的导体,使电流按一定的方向流过;其次是利用绝缘材料的介电性能,制造电气工程及无线电工程中的各种电容器;另外,在不同的电工产品中,根据产品的技术需要,绝缘材料还往往起着散热冷却,机械支撑和固定、灭弧、防潮、防霉及保护导体等作用。

绝缘材料在电工产品的结构中占有极其重要的地位,电工产品损坏往往是因为绝缘材料性能不好造成的。随着电工产品技术日益向高压、高频、大容量、小体积方向发展、仪器设备的使用条件要求越来越高,对绝缘材料提出了更高的要求。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。只有这样,才能适应电工技术的发展,进一步提高电工产品的准确性和安全性。

绝缘材料的品种多,涉及面广,为了便于掌握和使用,通常根据不同的特征来进行分类。

按材料的来源可分为:天然绝缘材料和人工合成绝缘材料。

按材料的化学组成可分为:有机绝缘材料和无机绝缘材料。

按材料在电工上的应用可分为:高压工程材料和低压工程材料。

按材料的物理状态可分为:气体绝缘材料,液体绝缘材料和固体绝缘材料。

我国物资管理部门主管的绝缘材料主要是固体绝缘材料,并根据绝缘材料的应用或工艺特征进行分类管理。其分类方法是先按材料的应用或工艺特征分成大类;再按使用范围及形态划分小类;在小类中又按其主要组成成分和基本工艺分为品种,品种中划分规格。根据上述分法,物资管理部门管理的绝缘材料分为如下六大类:

1. 漆、树脂和胶类——有溶剂浸渍漆、无溶剂浸渍漆、覆盖漆、胶粘漆、熔敷粉末、硅钢片漆、漆包线漆和胶等。
2. 浸渍纤维制品类——棉纤维漆布、漆绸、合成纤维漆布、玻璃纤维漆布、混织纤维漆布、防电晕漆布、漆管和绑扎带等。
3. 层压制品类——有机底材层压板、无机底材层压板、敷铜箔层压板、有机底材层压管和棒、无机底材层压管和棒等。
4. 塑料类——木粉填料塑料、其它有机物填料塑料、云母填料塑料、其它矿物填料塑料、无机填料塑料等。
5. 云母制品类——云母带、柔软云母板、塑型云母板、换向器云母板、衬垫云母板、云母箔、云母管等。
6. 薄膜、粘带和复合制品类——薄膜、薄膜粘带、橡胶及织物粘带、薄膜绝缘纸及薄膜玻璃布复合箔、薄膜合成纤维纸复合箔、多种材料复合箔等。

二、绝缘材料的型号说明

绝缘材料按品种编制产品型号。一般可用4位阿拉伯数字表示,其中云母制品可能用附加第5位数字表示,其组成形式如下:

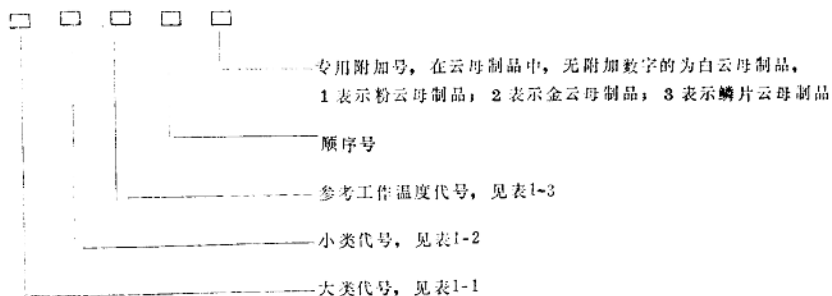


表1-1 绝缘材料型号中的大类代号

大类代号	产 品 大 类 名 称	大类代号	产 品 大 类 名 称
1	漆、树脂和胶类	4	塑料类
2	浸渍纤维制品类	5	云母制品类
3	层压制品类	6	薄膜、粘带和复合制品类

表1-2 绝缘材料型号中的小类代号

小 类 代 号	各 大 类 中 的 小 类 绝 缘 材 料 名 称					
	漆、树脂和胶类	浸渍纤维制品类	层压制品类	塑料类	云母制品类	薄膜、粘带和复合制品类
0	有溶剂浸渍的漆类	棉纤维漆布类	有机底材层压板类	木粉填料塑料类	云母带类	薄膜类
1	无溶剂浸渍漆类			其它有机物填料塑料类	柔软云母板类	
2	覆盖漆类	漆绸类	无机底材层压板类	石棉填料塑料类	塑型云母板类	薄膜粘带类
3	胶漆树脂类	合成纤维漆布类	防电晕及导磁层压板类	玻璃纤维填料塑料类		橡胶及织物粘带类
4		玻璃纤维漆布类	敷铜箔层压板类	云母填料塑料类	云母带类	
5	熔敷粉末类	混织纤维漆布类	有机底材层压管类	其它矿物填料塑料类	换向器云母板类	薄膜绝缘纸及薄膜玻璃漆布复合箔类
6	止铜片漆类	防电晕漆布类	无机底材层压管类	无机填料塑料类		薄膜合成纤维纸复合箔类
7	漆包线漆类	漆管类	有机底材层压棒类		衬垫云母板类	多种材料复合箔类
8	胶类	绑扎带类	无机底材层压棒类		云母箔类	
9					云母管类	

注：电工绝缘材料的大类及小类号均从0至9取10个号，其中空缺的号数供今后产品种类增加和新型材料出现时使用。

表1-3

绝缘材料型号中的参考工作温度代号

参考工作温度 代号	参考工作温度, ℃	相应的耐热 等级	参考工作温度 代号	参考工作温度, ℃	相应的耐热 等级
1	105	A	4	155	F
2	120	E	5	180	H
3	130	B	6	180以上	C

例: 1032 三聚氰胺醇酸浸渍漆;
5438-1 环氧玻璃粉云母带。

第二节 绝缘材料的电性能

绝缘材料的性能,可分为电的、机械的、物理化学的性能。在外加电场作用下,绝缘材料会发生导电、极化、损耗、击穿等现象,这是电介质的基本特性。绝缘材料的电性能对材料的选择及电工产品的安全性、可靠性影响极大。本节分别介绍各种电性能的基本意义,影响各种性质的因素及这些性质在应用上的重要性。

一、电介质的极化

1. 电介质的极化

电介质在外电场作用下,发生的束缚电荷的弹性位移和极性分子转动作有序排列的现象,称为电介质的极化。

电介质在一般情况下,自由电荷很少,绝大多数电荷是被束缚的。在外电场作用下,其束缚电荷受电场力的作用发生位移,电场愈强,位移愈大;当外电场消失时,电荷恢复原状,这种位移称为弹性位移。在极性电介质中,极性分子受电场作用发生转向,作有序排列而显示极性。在没有外电场作用时,极性分子因为热运动而排列得杂乱无章,使物质不显示极性。

电介质的极化有多种类型,其最基本的形式为以下3种。

(1) 电子位移式极化 在外电场作用下,电子轨道相对于原子核产生位移而形成偶极矩,如图1-1a所示。这种极化所需时间极短,约为 10^{-15} s。电子式极化存在于所有电介质,而且是完全弹性的,外电场消失后立即恢复。

(2) 离子位移式极化 在外电场作用下,电介质的正负离子顺或逆电场方向发生相对位移产生偶极矩,这就是离子式极化,如图1-1b所示。离子式极化所需时间也很短,约为 10^{-11} s。离子式极化存在于离子结构电介质中,也属于弹性极化,几乎没有损耗。

(3) 偶极子极化 极性电介质的分子,在无外电场作用时,就有一定的偶极矩,但它在各个方向的机率是相等的,因此就介质整体来看偶极矩等于零。当极性分子受外电场作用时,原来混乱分布的极性分子顺电场方向有顺序排列(如图1-1c所示),使沿电场方向出现宏观偶极矩,这种极化称为偶极子偶化。偶极子极化存在于极性液体和极性固体电介质中,所需极化时间较长,约 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ s,且是非弹性的,极化时消耗的能量在复原时不可能收回,因此这种极化有明显的能量损耗。

此外,还有几种特殊的极化形式。

夹层式极化 由两种以上不同相对介电系数和电阻率的电介质组成的不均匀绝缘结构

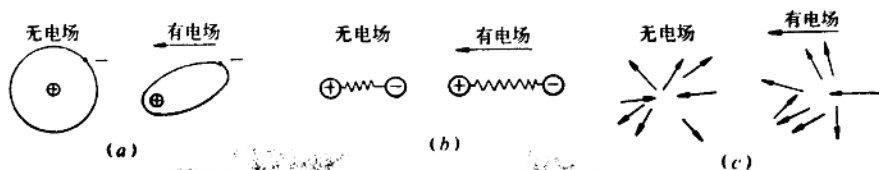


图1-1 基本极化形式

a—电子式极化；b—离子式极化；c—偶极子式极化

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。这种极化的过程特别缓慢，而且伴随着能量损耗。

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，本身具有许多独立的极化区域——电畴。当没有外电场作用时，相邻电畴的偶极矩方向将相差 90° 或 180° ，这样就整个晶体而言，对外界将不呈现极化状态。外加电场后，电畴沿电场方向转向，使沿电场方向出现宏观偶极矩，从而出现了介质极化。这种极化形成过程较慢，极化强度高，损耗能量大。

在成分及结构复杂的电介质中，可能同时出现几种极化形式。如由极性材料组成的绝缘结构，就可能有电子式极化、离子式极化、偶极子极化以及夹层式极化等。

2. 相对介电系数

电介质的极化程度可用相对介电系数 ϵ 来表示。设想有两块无限大的平行金属板，使它们各带有等量异号的电荷 Q_0 。当板间为真空时，电荷 Q_0 在极板间建立均匀电场 E_0 ，如图1-2a所示。

现在，我们在极板间引入任一电介质。为简单起见，认为此电介质是均匀的。在电场作用下，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1-2b所示。在和极板靠近的电介质表面上，出现了和邻近极板电荷异号的束缚电荷 Q' 。显然，由介质表面上的电荷 Q' 所造成的电场将削弱外电场。设有介质时被削弱后的电场强度为 E 。

把 E_0 和 E 之比值称为该电介质的相对介电系数，即

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

如果极板上施以恒定电压，则引入电介质后，极板间的电场强度仍和真空时一样。因此极板上的电荷必须增加 Q' ，以抵消极化的影响，从而使极板上的电荷成为 $Q_0 + Q'$ 。这时的电容量为

$$C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = C_0 + C' \quad (1-2)$$

介质的相对介电系数为

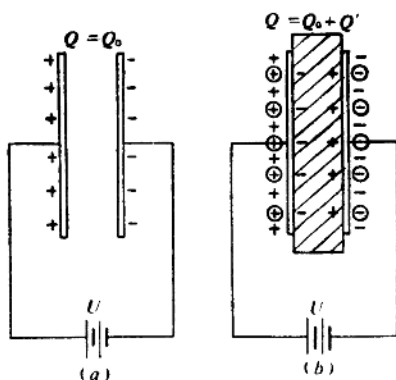


图1-2 极化与相对介电系数的关系
a—电极间为真空；b—电极间有介质

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0} = 1 + \frac{Q'}{Q_0} \quad (1-3)$$

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。

$$\text{又} \quad \epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0} \quad (1-4)$$

$$C = \epsilon C_0 \quad (1-5)$$

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

电介质的相对介电系数 ϵ 值主要取决于材料的结构。各种电介质由于极化形式的不同，其相对介电系数亦不同，介质极化的程度越高，其相对介电系数也愈大。所以，电介质的相对介电系数 ϵ 是表示电介质在电场作用下极化程度的一个重要参数。

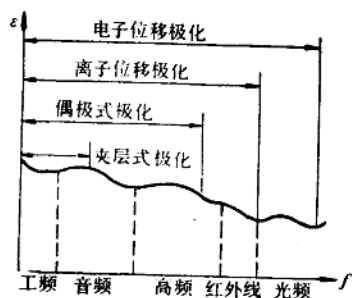


图1-3 ϵ 与频率的关系

3. 影响相对介电系数的因素

电介质的成分和结构多种多样，各自又具有不同的极化形式。因而影响电介质 ϵ 值的因素也非常复杂，主要有频率、温度、水分等。

(1) 频率 各种极化的形成过程都需要有一定的时间。当电场频率很高时，某些需要时间长的极化过程就可能跟不上电场的变化，则这种极化形式在此频率以上就不存在。各种极化形成的频段如图1-3所示。电介质的相对介电系数随频率的增高而趋于下降。

(2) 温度 温度对电介质相对介电系数的影响如图1-4所示， ϵ 值在某一温度出现峰值。当频率升高时，曲线的高峰向高温方向移动。

(3) 水分 由于水的介电系数很大，材料吸水受潮后，水又会增加夹层式极化，使电介质的相对介电系数增大。

4. 相对介电系数在工程上的应用

工程上对绝缘材料的 ϵ 要求不一样，因此应根据不同使用要求，合理选用具有不同极化形式和 ϵ 值的绝缘材料。

(1) 用于电容器中的电介质，一般希望 ϵ 值较大，这样电容器单位容量的体积和重量就可减小。而用于电缆中的绝缘材料，则应有较小的 ϵ 值，这样可防止电缆工作时产生过大的充电电流。即使对一般电气设备中使用的绝缘材料，也是希望 ϵ 值较小，因为大的 ϵ 值往往和大的介质损耗联系在一起。

(2) 在电气设备的绝缘结构中，常常是几种绝缘材料组合在一起使用。这时必须尽量选择 ϵ 值相近的材料，否则会造成绝缘系统电压分布不均匀，大部分外电压将集中在 ϵ 值较小的材料上，容易引起该材料的破坏。

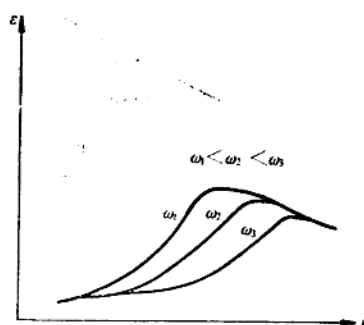


图1-4 ϵ 与温度的关系

(3) 绝缘材料吸湿受潮后 ϵ 值将大大增加,改变了介电系数对温度及频率变化的规律。工程上常利用这些规律来判定材料的受潮程度和决定可否运行。

二、电介质的电导

1. 电介质的电导及其表示方法

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,这些带电质点作有方向的运动形成电流(称为泄漏电流),因而任何电介质都具有一定的电导。

电介质在加上电压初期,泄漏电流和极化电流同时存在,因此在加上电压初期测得的电流往往不是泄漏电流。通电一定时间后,材料极化过程结束,极化电流衰减至零。工程上实际测量时,通常以加压一分钟后所测得的电流值来计算绝缘材料的电导。

电介质的电导常以电导率 γ 或其倒数电阻率 ρ 来表示。

在固体电介质中,除了有通过材料内部的泄漏电流外,还有沿介质表面流过的泄漏电流。因此,绝缘电阻和绝缘电阻率可分别表现为体积电阻、表面电阻及体积电阻率、表面电阻率。它们的定义如下:

体积电阻率 ρ_v :表示电介质在单位面积(m^2)和单位长度(m)上所具有的体积电阻值,即:

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h} = \frac{U}{I_v} \cdot \frac{S}{h}, \Omega \cdot m \quad (1-6)$$

式中 R_v ——体积电阻, Ω ;

h ——测量电极间的距离, m;

S ——被测介质上电极的有效面积, m^2 ;

I_v ——流过介质内部的体积电流, A;

U ——外加直流电压, V。

表面电阻率 ρ_s :表示一个正方形的电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,即

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{l}{h} = \frac{U}{I_s} \cdot \frac{l}{h} \quad (1-7)$$

式中 R_s ——表面电阻, Ω ;

l ——电极长度, m;

h ——平行电极相隔距离,

m;

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 的示意图见图1-5。

电介质的电导率等于绝缘电阻率的倒数,故体积电导率和表面电导率分别为

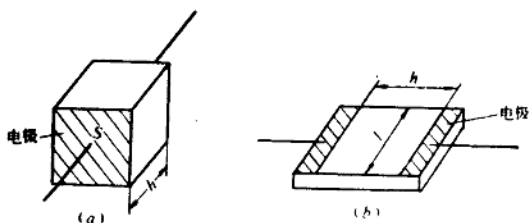


图1-5 确立 ρ_v 和 ρ_s 的示意图

a—确定 ρ_v ; b—确定 ρ_s ;

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v} \quad (1-8)$$

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s} \quad (1-9)$$

2. 影响电介质电导的因素

电介质的电导和金属导体的电导截然不同。金属的电导完全是由电子移动形成的电子电导，电导极大，电阻率极小。电介质的电导主要是由本身的离子或外来杂质（水分、酸以及其它）的离子移动所形成的离子电导，电导极小，电阻率极高。

影响电介质绝缘电阻的主要因素有温度、水分和杂质等。

（1）温度 绝缘电阻率与温度的关系可以用简化的分式表示，即

$$\rho = A e^{\frac{B}{T}} \quad (1-10)$$

式中 A 、 B ——常数。

可见，随温度升高各种绝缘材料的绝缘电阻通常会大大降低，因此电机和电炉中的绝缘材料，在工作温度下的绝缘电阻比常温下的绝缘电阻低的多。

（2）水分 水分侵入绝缘材料后，一方面由于水的导电性很强，另一方面由于水可以溶解材料内的某些杂质，增加了材料内部的电离作用，即增加了导电的自由离子。所以绝缘电阻率随湿度的增大而下降。

（3）杂质 绝缘材料的原材料大都存在杂质，在制造过程中又会引进一些杂质。这些杂质在材料内部直接增加了导电离子；同时，混入极性材料的杂质，又能促进极性分子的离解，造成更多的导电离子，从而使绝缘电阻下降。

三、电介质的损耗

1. 介质损耗及其表示方法

绝缘材料在电场的作用下引起发热而消耗的能量，称为介质损耗。产生介质损耗的原因，一是由于绝缘材料电导引起的电导损耗；一是由于某种极化的存在而引起的极化损耗。

介质损耗可以用单位时间内消耗的能量即介质损耗功率来表示。在直流电压作用下，由于仅存在电导损耗，可用绝缘材料的体积电阻率和表面电阻率两个物理量表示。在交流电压下，除由于泄漏电流引起的电导损耗外，还有因周期性的极化而产生的极化损耗。所以引入一个新的物理量——介质损耗角正切 $\tan \delta$ 。

如图1-6所示，电介质两端施加交流电压 U 时，由于介质中有损耗，所以电流不是单纯的电容电流，而是包括有功和无功两个分量（ I_R 和 I_C ），即

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_C \quad (1-11)$$

这时，电压和电流的相位差不再象理想电容器那样是 90° ，而是小于 90° 的 φ 角，它的余角 δ 是由于介质损耗而引起的，称为介质损耗角。由图中可知介质损耗功率为

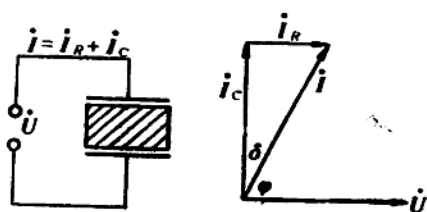


图1-6 有损耗电介质的电流分解及向量图

$$\begin{aligned} P &= UI_R = UI_C \operatorname{tg} \delta \\ &= UU\omega C \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 P ——介质损耗功率, W;
 U ——电容器极板间电压, V;
 C ——电容, F;
 ω ——角频率, rad/s;
 $\operatorname{tg} \delta$ ——介质损耗角正切。

由式(1-12)可知, 介质损耗功率 P 的大小取决于电压、电容、频率和 $\operatorname{tg} \delta$ 。因 P 值和多个因素有关, 不同产品间难以互相比较, 因而用 P 来表示电介质的能量消耗品质是不确切的。故改用介质损耗角正切 $\operatorname{tg} \delta$ 表示电介质损耗方面的品质。 $\operatorname{tg} \delta$ 是仅取决于材料的特性, 与材料尺寸无关的物理量。

2. 影响介质损耗的因素及 $\operatorname{tg} \delta$ 在工程上的应用

影响电介质的介质损耗的因素主要有频率、温度、湿度、电场强度等。一般说来, 频率越高, 损耗越大; 但频率达到一定程度后, 损耗就不再受频率的影响。温度越高, 在大多数情况下 $\operatorname{tg} \delta$ 也随之增大。 $\operatorname{tg} \delta$ 与受湿也有关系, 电介质吸湿后使电导损耗增大, 还会出现夹层式极化而使 $\operatorname{tg} \delta$ 增大。另外, 当电介质上施加的电压达到一定值时, 介质内部的气泡或电极边缘电场集中处将会出现局部游离放电, $\operatorname{tg} \delta$ 显著增大。

$\operatorname{tg} \delta$ 值除了直接影响电工产品的性能外, 还会影响产品的尺寸、重量和成本。因此电工产品使用的绝缘材料要求 $\operatorname{tg} \delta$ 值应小一些。在高压或高频工程中, 应该选用 $\operatorname{tg} \delta$ 值特别小的绝缘材料, 这是因为介质损耗功率与外施电压平方和电流频率成正比。常用的固体和液体绝缘材料, 其 $\operatorname{tg} \delta$ 约为千分之几, 甚至万分之几。而用在不太重要地方的绝缘材料质量较差, 其 $\operatorname{tg} \delta$ 值可能为百分之几, 甚至十分之几。根据 $\operatorname{tg} \delta$ 的变化可判断设备的绝缘材料是否受潮及老化, 绝缘材料受潮后其 $\operatorname{tg} \delta$ 可增加10~20倍, 因此反应是灵敏的, 根据 $\operatorname{tg} \delta$ 随时间的变化速度可判断材料的受潮程度。

四、电介质的击穿

1. 电介质的击穿及击穿强度

前述绝缘材料的几种电性能, 都是绝缘材料在一定电场强度范围内才具有的。当绝缘材料上的电压增加到某一极限值时, 会使电流剧增而使电介质发生破坏或分解, 完全失去绝缘性能, 这种现象称为电介质的击穿。电介质发生击穿时的电压称为击穿电压(U_b), 击穿时的电场强度称为击穿强度(E_b), 其单位为kV/cm。在均匀电场中, U_b 和 E_b 的关系为

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (1-13)$$

d 为击穿处电介质的厚度。

2. 固体电介质的击穿及其形式

固体电介质被击穿后, 即使绝缘材料并没有受到电弧的损伤, 但在击穿处会留下孔形的痕迹——穿孔或裂口, 好象曾被尖锐的工具在这里穿过洞孔一般。如果击穿之后, 重新对绝缘材料施加电压, 则原被击穿处很容易重新发生击穿, 且这时的击穿电压比前一次击穿电压小得多。因此, 固体绝缘的击穿, 会造成电气装置的损坏, 必须进行大修, 更换新的绝缘材料。

液体或气体绝缘材料击穿后电压撤去,由于其具有流动性,被击穿的空间立刻有新的绝缘材料重新填满,从而立即可恢复绝缘作用。固体电介质的击穿大致分为电击穿、热击穿和放电击穿三种形式。

(1) 电击穿 在强电场作用下,电介质内部带电质点剧烈运动,发生碰撞电离,破坏分子结构,电导增加,结果使绝缘材料击穿,称为电击穿。

(2) 热击穿 在强电场作用下,电介质内部由于介质损耗而发生热量。如果能量来不及散发出去,由于介质内部温度升高,导致分子结构破坏而击穿,称为热击穿。

(3) 放电击穿 在强电场作用下,电介质内部的汽泡首先发生碰撞而放电,杂质也因受电场加热而汽化产生汽泡,于是汽泡放电进一步发展,导致材料裂解、分解、腐蚀破坏而击穿,称为放电击穿。

为了保证电气设备的安全运行,任何电机和电器设备的绝缘工作电压均应低于其击穿电压。

第三节 绝缘材料的非电性能

绝缘材料的损坏常常是由于材料的品质变坏、变脆及机械损坏造成的。因此,除了解材料的电气性能外,还应了解它们的机械、物理、化学等方面的性能。

一、绝缘材料的热性能

当温度升高时,绝缘材料的多种性能往往趋向恶化。如绝缘电阻、击穿强度等都会下降,而介质损耗、应力变形等却会增大。因此,提高绝缘材料的热性能,对于保证电机、电器的安全运行,延长使用寿命,降低成本,减小尺寸都有重要意义。

绝缘材料的热性能包括熔点、软化点、闪燃点、粘度、耐热性、耐寒性、热稳定性、导热性等。

1. 耐热性及耐热等级

耐热性是表示绝缘材料承受高温作用的能力,即绝缘材料在短期或长期热作用下,不改变其电气、机械、理化等特性的能力。

为了保证绝缘材料安全长久地可靠工作,规定了各种材料的最高允许工作温度、即耐热等级。耐热等级的意义及相当该耐热等级的主要固体绝缘材料见表1-4。

在一般电机、电器的技术规定中,往往并不明确规定它们的最高工作温度,而是规定最高使用温升。温升就是根据耐热等级规定的最高允许工作温度与标准环境温度 40°C 的差值。电机上的绝缘以A级、F级和B级为主。

2. 熔点、软化点和闪燃点

熔点是材料由固态转变为液态时的温度值。

无定形结构的材料没有显著的熔化温度、它们是逐渐由固态转变为液态的,因而无法测出它们的熔点,我们把它们开始变软时的温度称为软化点。

在电气设备工程中,一般要求材料具有较高的熔点或软化点,以保证绝缘结构的刚度、强度和硬度。

液体材料的蒸气与空气相混合,用小火点才能闪光的温度称为闪燃点。了解材料的闪燃点与工作安全有很大关系,如变压器油等液体材料,当温度较高时都容易着火燃烧。

表1-4

主要固体材料的耐热等级

耐热等级	耐热等级的意义	相应耐热等级的绝缘材料
Y	用经过实验证明90℃极限温度下能长期使用的绝缘材料或其组合物所组成的绝缘结构。	未浸渍过的棉纱、丝及纸等材料，或其组合物所组成的绝缘结构。
A	同上，但在105℃极限温度下能长期使用。	浸渍过或浸在绝缘材料中的棉纱、丝及纸等材料，或它们所组成的绝缘结构，如漆布、漆绸、漆管等。
E	同上，但在120℃极限温度下能长期使用。	聚酯薄膜及其纤维漆包线的绝缘漆以布为底料的层压制品。
B	同上，但在130℃极限温度下能长期使用。	以云母片和粉云母纸为基础的材料以及纸或布作衬垫的云母制品，玻璃漆布和玻璃漆管，以玻璃布为底料的层压制品。
F	同上，但在155℃极限温度下能长期使用。	玻璃漆布、玻璃漆管、以玻璃布和石棉纤维为基础的层压制品，以无机绝缘材料做衬垫的粉云母制品。
H	同上，但在180℃极限温度下能长期使用。	玻璃丝漆布、玻璃漆管，以玻璃丝布和石棉纤维为基础的层压制品、以无机材料为衬垫的云母制品。
C	同上，但在超过180℃以上温度下能长期使用。	云母、陶瓷、石英玻璃和玻璃纤维材料，玻璃云母模压制品。

3. 热稳定性和导热性

热稳定性是指材料在温度反复变化情况下，不改变其理化、机械、介电性能，并能保持本身工作的能力，这个性能与材料本身的膨胀系数有很大关系。热膨胀系数大的材料，因膨胀和收缩会使材料开裂破碎。热稳定性对于工作于户外的设备和温度变化频繁的设备绝缘具有重要意义。

导热性表示绝缘材料的导热性能，它是指在相距1cm、温差为1K的横断面(1cm²)轴向上，于1s内所传导的热量，其单位为W/m²·K。它对材料的热击穿及热稳定性等影响很大，因而绝缘材料的导热性是一个重要特性，在电机、电器的设计中有很重大意义。

二、绝缘材料的吸湿性能

绝缘材料在潮湿空气中或多或少都有吸湿的现象，由于水分子的尺寸和粘度很小，能透入各种绝缘材料的裂缝、毛细孔和针孔，溶解于各种绝缘油及油漆中，所以吸湿性是普遍的。水分的存在使绝缘材料的性能大大恶化。为了消除和防止水对绝缘材料的破坏，必须了解绝缘材料的吸湿性能。表示绝缘材料吸湿性能的指标主要有吸湿性、吸水性等。

1. 吸湿性(吸潮性)

吸湿性表示绝缘材料在温度20℃、相对湿度100%的空气中的吸潮程度。在实际工作中，是以材料在温度为20℃、相对湿度为97~100%的情况下，所增加重量的百分数作为吸潮性指标。在绝缘材料中，强极性的，尤其是分子含有OH基的有机纤维材料，以及松散、多孔状材料，其吸湿性很小，甚至不吸湿。绝缘材料的吸潮，必将加速绝缘材料的老

化,缩短绝缘的寿命。例如,油浸纸绝缘水分含量每增加100%,寿命就缩短一半。湿热带地区使用的电气设备的绝缘寿命仅为干热带的60%。

2. 吸水性

吸水性表示材料放在温度为 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的蒸馏水中,经若干时间(一般为24小时)后材料重量增加的百分数。对于在水中工作或直接与蒸馏水接触的电机电器,宜采用不吸水、不透水的绝缘材料作绝缘保护层。

三、绝缘材料的机械性能

由绝缘材料构成的绝缘零件和绝缘结构,在使用时都要承受一种或几种形式的机械负荷,如拉伸、重压、扭曲、弯折、震动等。因此,要求绝缘材料本身要具有一定的机械性能。机械性能包括硬度和强度。强度又包括抗切强度,抗张强度和抗拉强度等。

1. 硬度

硬度表示材料表面受压后不变形的能力。对于涂层和漆膜,是让标准重锤从规定高度落到涂层或漆膜上,由重锤回弹的高度来表示硬度的大小。对于柔韧和可塑材料(如沥青),以针入度表示其硬度大小。即对标准针施加一定力量,使它在规定时间内刺入材料,刺入的深度称为针入度。

2. 抗切强度

抗切强度表示固体绝缘材料在规定的温度、压力和震动下,抗刺、擦和磨的综合能力。对于槽内的绕组或线棒绝缘,则是指抗毛刺磨损的能力。

3. 抗拉、抗压、抗弯强度

它们分别表示在静态下的固体绝缘材料,承受逐步增大的拉力、压力、弯力直到破坏时的最大负荷,单位以 N/m^2 表示。

4. 抗冲击强度

抗冲击强度表示材料承受功负荷的能力。以材料单位面积受冲击破坏时的功来表示,单位为 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^2$ 。抗冲击强度大的材料称为有韧性。

5. 抗劈强度

抗劈强度表示层压绝缘材料层间粘合的牢固程度。抗劈强度高的材料不易开裂、起层、可加工性能好。对于长期受震动并有扭力负荷的绝缘零、部件,如高压开关的拉升杆、电机定子和转子的槽楔等,采用抗劈强度较高的材料。抗劈强度的单位以 N 表示。

四、绝缘材料的老化

绝缘材料在使用过程中,由于受电、热、光、机械、化学等因素的作用,会产生一系列缓慢的不可逆的物理化学变化,从而导致其电性能和机械性能的恶化,最后丧失其使用性能。这种劣变过程,叫做绝缘材料的老化。例如变压器油中形成了氧化物,各种漆膜变硬、发脆等,都是老化现象。

绝缘材料的老化,根据材料和使用条件的不同,可以分为热老化和电老化。

在短时间内温度升高或高温长期作用下,绝缘材料或绝缘体发生缓慢或急剧的化学变化,称为热老化。促使绝缘材料老化的主要因素是热和氧化。

材料在高压电器设备中,因高电场强度造成电离产生的老化属于电老化,促使绝缘材料电老化的主要原因是局部放电。

绝缘材料的老化结果,造成绝缘材料的报废,故而要求绝缘材料应具有一定的抗老化