

电机制造工艺学

(试用教材)

下

重庆大学电机系翻印

一九七六年五月

73.2
27/1
71

毛主席语录

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

第五章 电机常用绝缘材料

§5-1 绝缘材料概述

在电机中所使用的材料可以分为导电材料、导磁材料、绝缘材料和半导电材料等。本章将只讨论绝缘材料。

所谓绝缘材料，就是一类电阻系数很高，导电能力很低的物质。一般认为电阻系数在 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ 的材料为导电材料，在 $10^{-2} \sim 10^2$ 的材料为半导体材料，而电阻系数在 $10^9 \sim 10^{22}$ 的材料为绝缘材料。

绝缘材料在电机中的主要作用是：把导电部分（如铜线）与不导电部分（如铁心）隔开，或把不同电位的导电体隔开（如绕组匝间绝缘）等。

电机绝缘在电机制造中占有极为重要的地位，这一方面是由于它是电机材料中的最主要最贵的材料之一，例如一台2.5万千瓦汽轮发电机的定子绕组中绝缘材料的成本费（包括材料，加工，修理费用）就占整个绕组的成本的60%；另一方面，由于国内所使用的绝缘材料大部分为有机材料，它的耐热性和使用寿命远比铜线、铁心等要低得多，这就使它直接地影响和决定了电机的允许温升和使用寿命，因此绝缘材料直接地影响了电机的质量和成本。从发展的观点看，电机的制造水平。

近几十年来，随着电力技术的发展，对绝缘材料提出了更高的要求。

（电机绝缘）
日益广泛。

在无产阶级文化大革命以前，由于刘少奇一伙的反革命修正主义路线，推行洋奴哲学、爬行主义的毒果，压制了广大工人阶级的创造性，使我国绝缘材料发展缓慢。经过无产阶级文化大革命，我国工人阶级坚定地执行毛主席革命路线，决心在不太长的时间内，赶上和超过世界先进水平，遵照毛主席“工业学大庆”的伟大教导，自力更生，艰苦奋斗，发挥了集体

智慧，促进了电机制造业的突飞猛进的发展，新技术新工艺日益推广，新材料新产品层出不穷。许多过去以为很神秘的绝缘材料如聚酰亚胺塑料、硅有机材料、无卤阻燃剂等已得到日益广泛的应用，玻璃纤维制品的使用，节约了大量的棉纱及贵金属进口物质云母，对希特勒也是一个有力打击。

随着科学技术的飞跃发展，大智慧电站设备，高压电设备，通讯雷达电子设备，以及在矿山、铁路、轧钢、化工、船舶、飞机、火箭等。设备上的各种名牌电机，要求绝缘材料具有许多相当高的机械电气强度和耐热性能，许多新型绝缘材料正在研制之中，相信不久的将来，电机绝缘将已第一类分为之一新。

§5-2 绝缘材料的分类

电机所用绝缘材料是多种多样，分类方法也很多，电机制造业的分类方法是按材料的耐热程度来划分等级的。根据第一机械工业部标准 JB794-66 的规定，绝缘材料分为以下七级。

Y级。允许最高工作温度为 90°C ，主要包含一些天然有机材料如棉纱、丝绸、纸板、木材等，但它们一般都要经过浸渍处理，这时绝缘等级提到A级。

A级。允许工作温度 105°C ，常用的有氧化点在 110°C 左右的酚醛类漆、虫胶漆类、漆桐、油性漆类、漆素，沥青漆类以及Y级绝缘经过浸渍处理以后的材料。

E级。允许工作温度 120°C ，常用的有聚酯薄膜、环氧树脂、聚乙稀、酚醛漆类、漆素等。

B级。允许工作温度 130°C ，常用的有云母带、B级胶粉云母带，绝缘漆处理的玻璃纤维及其制品，聚酯漆类、漆素，103漆素等。

F级。允许工作温度 155°C ，目前应用的不多，例如以耐热性能优良的环氧树脂浸渍的玻璃纤维及其制品等。

H级。允许温度 180°C ，主要为硅有机类及聚酰亚胺类材料，如硅有机漆、硅橡胶、以及硅有机树脂处理的玻璃、石棉制品等。

C级。允许工作温度在 180°C 以上，主要是一些无机材料，如云母、陶瓷、石棉、玻璃纤维以及聚四氟乙烯等。

绝缘材料的编号方法，目前应用较多的是以四位数字表示，例如1032、3230等，四位数字的意义如下。

左起第一位数字表示绝缘材料分类，如1——表示绝缘漆、树脂和胶

类；2——表示绝缘层厚度标准和薄厚度；3——表示绝缘层压制品类；4——表示绝缘压塑料类；5——表示绝缘压制品类。

左起第二位数字表示同类材料的不同品种，如同样绝缘素中就分有聚素、聚素素、半导电素、硅树脂素等4，它们靠第五位数字来加以区别。

左起第三位数字表示材料的绝缘等级，如1—A级；2—E级；3—B级；4—F级；5—H级；6—C级。

左起第四位数字表示序号，即同类同等级绝缘材料在配方、成分及性能上的差别。

以下举例说明。例如，

1032，1031——“1”表示绝缘素，“0”表示聚素素，“3”表示B级，第四位“2”表示第二种聚素素，成分为三聚氰胺聚素素；“1”表示第一种聚素素，成分为丁基酚聚素素。

3240——“3”表示压制品，“2”表示层压板材料，“4”表示F级，“0”为序号，这个牌号的成分为芳基酚醛层压玻璃布板。

绝缘材料的分类，除了上述可按绝缘等级来分以外，往往还要从化学成分来区分为有机材料与无机材料等，这样便于从内部结构上弄清它们的区别和联系，以后我们将按分类方法分别介绍各类材料。

所谓无机绝缘材料，是指一系列金属和非金属的无机物组成的物质，如玻璃、石棉、云母等，它们大多性质坚硬而脆，耐热性强（一般为C级）无显著老化现象，长期置于火中燃烧，温度足够高时可能熔化。

所谓有机绝缘材料，是指一系列碳氢化合物以及由碳氢化合物通过类似的结构形成或衍生的物质，如树脂、环氧树脂、棉纱等。它们一般由分子中原子数目比无机物多得多，由几十个、几百个以至达到几十万几百万个，这样复杂的分子结构组成的有机物，与无机材料比一般耐热性较差，长时间老化，电、光等作用下会因化学变化改变性能（称为老化现象）大多数有机材料可以燃烧，其中有些是天然的，如棉、丝等也有不少是人工合成的，如塑料、酚醛树脂等。

§5-3 绝缘材料的电气性能

毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不是在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”

绝缘材料具有各不相同的电气性能，是由它们的化学成分和结构决定的。在我们确定了电机对绝缘材料的要求以后，为了合理选用材料，除了必须

国家的政策、材料价格、资源条件等，必须对材料的质量和性能有一个全面的评价。

绝缘材料可分为电气性能和机械、物理、化学性能两方面。电气性能指标有以下几个指标。

一、绝缘强度

绝缘强度也叫击穿电场强度，简称击穿强度，它是指绝缘材料单位厚度的承受电压。绝缘强度用E表示，单位一般取为(千伏/毫米)。在研究绝缘材料在电场中的性质时我们称之为电介质。绝缘强度是反映电介质抗电能力的一个指标。电介质在较低电压之下基本是不导电的，因为电介质内部并不像一些金属导体那样，电荷可以自由移动。然而当外加电压更强时，电介质内部就要发生变化，原有的绝缘性能便会丧失而转变为导电体，这就是击穿现象，它导致电介质的破坏。很明显，电介质的绝缘强度越高，它的耐电压的能力越强。

固体电介质的绝缘强度与以下几个因素有关系。

(1) 击穿强度与材料种类有关。不同材料具有不同的抗电性能，这与材料本质的性质有关，例如1032漆的击穿强度为70KV/mm，而4330酚醛玻璃压塑料为13KV/mm。

(2) 击穿强度与材料厚度有关系。由于材料一般不会是绝对均匀的，内部总难免有气孔等缺陷，它降低材料抗电性能。另外厚度增加时，由于内部存在损耗(这问题下已讲)发生的能量不散发出去而导致内部温度升高。由于内部发热而使结构破坏(这现象称为热击穿)，因此材料厚度增加，虽不能使材料的击穿电压成正比的增高，即是说越厚的材料，其单位厚度的击穿电压(即击穿强度)越小。几种材料的击穿强度与厚度的关系见表5-1。

正因为如此，在作击穿强度试验时被试材料的厚度有规定的数值，在规定的厚度内，电场是均匀的条件下，下式成立即

$$E = \frac{U}{d}$$

在这里U代表材料的击穿电压，(KV)。

d代表材料厚度，(mm)

(3) 温度对击穿电压的影响。由于绝缘材料的击穿与散热条件有关，故材料周围温度直接影响材料的击穿强度。很明显，温度越高，击穿强度越低。这就要求我们必须注意到运行条件下温度对绝缘强度的影响，例如

高压定子绕组, 在作绝缘单件试验及下线过程中检验时, 是在室温下作耐压试验的, 而最后的出厂试验, 则应在电机温升试验后立即进行, 这样可以使试验结果接近于运行的情况。

表5-1 几种材料击穿强度与厚度的关系 (试验温度 $90\pm 2^{\circ}\text{C}$)

材 料	厚 度 mm	击穿强度 KV/mm
3230 酚醛层压玻璃布板	0.5 ~ 1	14
	1.1 ~ 2	12
	2.1 ~ 3	10
3240 环氧酚醛层压玻璃布板	0.5 ~ 1	22
	1.1 ~ 2	20
	2.1 ~ 3	18
3025 酚醛层压布板	0.5 ~ 1	4
	1.1 ~ 2	3.5
	2.1 ~ 3	2

(4) 水分对绝缘强度的影响。材料中有水分存在将显著降低绝缘性能, 增加其介质损耗, 从而降低绝缘强度。因此水分对绝缘材料是极为有害的。

(5) 击穿强度与外加电压的关系。电压作用的时间越长, 材料内部温度升高可能越高, 越容易发生击穿, 因此作击穿试验时的加电压时间应有规定。

(6) 与电场的均匀程度关系。在不均匀电场中击穿电场强度将大大降低, 在电场较弱的地方首先发生击穿。

此外电压的交流频率对击穿强度也有影响, 交流电压下的击穿强度要比直流时低。

综上所述, 材料的击穿强度与多种因素有关, 了解了这一点后, 就可以想办法尽可能的提高绝缘强度。例如使材料结构致密可靠, 消除杂质杂质, 改善运行条件 (防止高温、潮气、和对受潮的电机进行烘干处理), 改进结构尽量避免在绝缘材料附近出现尖端, 造成电场不均匀等, 从而达到避免击穿, 延长绝缘寿命的目的。

二、绝缘电阻

如前所述, 电介质的导电能力极差, 但是并不存在绝对不导电的物质

因此电介质仍存在一个“电阻”大小问题。与金属导体不同的是它的电阻放置板数大得多，所以才称为绝缘电阻，以兆欧(MΩ)为单位。另外，电介质与电阻情况在电介质表面和电介质内部是不一样的。在使用中不同场合下二者对绝缘性能的影响大小也不一样，必须把二者分别讨论。

在电介质两端加一个直流电压U，就会有微弱的电流（在此电流稳定后称为泄漏电流）通过，此电流一部分流经电介质内部(I_V)，一部分流经表面(I_S)，那么电介质的绝缘电阻就可分为：

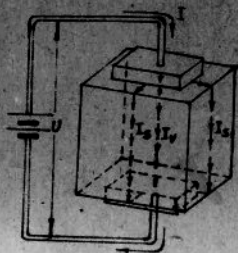


图5-1 电介质的导电情况

总绝缘电阻
$$R = \frac{U}{I}$$

其中
$$I = I_V + I_S$$

体积电阻
$$R_V = \frac{U}{I_V}$$

表面电阻
$$R_S = \frac{U}{I_S}$$

绝缘电阻与材料种类、形状尺寸都有关系。为了更清楚地说明材料的绝缘性能，以便不同材料进行比较，我们就要测量它的体积电阻系数与表面电阻系数。

取一个立方体的绝缘材料样品，在它的相对两面各放两个电极加以直流电压U（图5-2a），则有体内泄漏电流 I_V 流过，它的体积电阻系数按下式计算：

$$\rho_V = R_V \frac{S}{d} (\Omega \cdot \text{cm})$$

式中

$R = \frac{U}{I}$ 材料之体积电阻 (Ω)

S ——极板的面积 (cm^2)

d ——两极板间距离，即材料厚度，(cm)

如果我们把两板板间置材料一侧的面板（如图5-2(b)），则在直流电

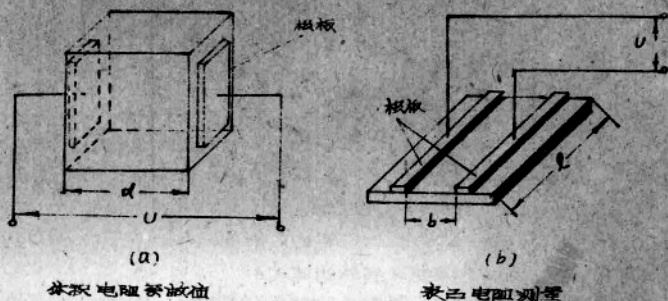


图5-2 测量体积电阻系数与表面电阻系数示意图

压 U 作用下，将有表面泄漏电流 I_s 流过，那么材料的表面电阻系数按下式计算。

$$\rho_s = R_s \frac{l}{b} (\Omega)$$

式中 $R_s = \frac{U}{I_s}$ 为材料的表面电阻 (Ω)

l — 板极长度 (cm)

b — 板极间距离 (cm)

要注意体积电阻系数与表面电阻系数的单位不同。

本章指出，实际测量 ρ_v 、 ρ_s 的试验方法，要比图5-2所表示的复杂得多，这是因为到了测量体积电阻系数时避免表面电流的影响，以及测量表面电阻系数时，避免由电介质内部穿过的电流的影响，因而采用了一些特殊分流措施。可以查阅JB903—66绝缘材料通用性能试验方法。

影响绝缘电阻的因素，除了因材料种类而不同外，尚有以下几个因素。

(1) 温度的影响。不同的温度下，电介质具有不同的绝缘电阻值。与金属材料相反，随温度的增加，电介质的绝缘电阻不是增大而是减小。这正如毛主席教导我们的“外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。”温度对导体和绝缘体的电阻发生不同影响，这是因为二者导电的过程并不相同。金属导电是依靠自由电子的运动完成的，温度升高后物质分子不规则运动加剧，对电子运动形成更大的阻力，故金属电阻随温度升高而增大，而电介质则不然，它的导电情形比较复杂，它与金属材料不同，没有那么多容易移动的电子，即使在电压作用下，电荷

的流动也是十分困难的。随着温度的升高，电介质内离子和电子的活动加剧，运动增加，能够移动的电荷也就稍微多一些，电介质的导电能力相对地增强了。

(2) 水分和表面污物的影响。水分对绝缘电阻的影响极大，特别是对表面电阻的降低更为明显。因为我们知道，水是可以导电的，特别是不纯净、含杂质的水导电能力更强，电阻系数很低，绝缘材料受潮后，绝缘材料降低的程度与电介质化学结构有关，它决定了不同材料对水分的吸附能力。例如纤维材料和某些塑料具有多孔性结构，吸水性强，受潮后，表面电阻与体积电阻都要降低。材料表面不光滑，带有杂质和污物后也会导电，电阻系数下降，因为这些杂质往往容易吸收水分。

检查绝缘材料受潮的程度，最简单的就是用兆欧计（摇表）测量其绝缘电阻。在测量时应该注意这样一个现象：即测量开始时电阻值较低，然后逐渐上升，最后稳定。

表5-2 受潮后 P_v P_s 的变化

		环氧玻璃纸 漆布板3240	聚酯亚胺纸 漆布板339
P_s	常态	10^{13}	10^{13}
	受潮	10^{11}	10^{11}
P_v	常态	10^{13}	10^{14}
	受潮	10^{11}	10^{12}

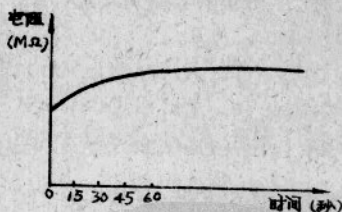


图5-3 绝缘电阻随时间变化的曲线

(如图5-3) 这种孔现象称为吸收孔象（吸收孔象与空间电荷的积聚、分子的极化等有关，参看“电工材料学”）。

对于常用绝缘材料，电阻稳定需要的时间约为1分钟左右，故工程实践中标准中规定测量绝缘电阻以1分钟以后的读数为准。

绝缘材料受潮以后，一方面使绝缘电阻降低，另一方面已吸收孔象变得更严重，即是说，电阻上升很慢，

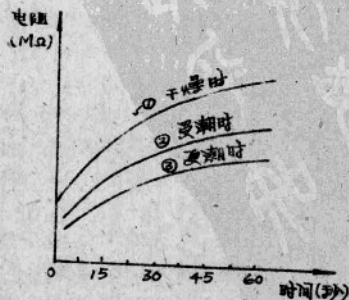


图5-4 绝缘电阻吸收孔象的变化

达到规定的时间而增加。在5—1安培丁材料在干燥时的电阻时间的线。反之我们也可以根据吸收比的变化判断绝缘材料的受潮程度。例如较大的发电机用摇表测量电机绕组的绝缘电阻时，都要测到15秒时的电阻值 R_{15} 和60秒时的电阻值 R_{60} ，并把二者之比 R_{60}/R_{15} 称为绝缘电阻的“吸收比”。从曲线上可看出干燥时吸收比较大，电机制造厂要求 $R_{60}/R_{15} \geq 1.3$ 。进行单位检查电机受潮情况时重新测量 R_{15} 、 R_{60} ，及 R_{60}/R_{15} 。如果这时测得的 R_{60} 比出厂的正常值降低不超过25%，吸收比 R_{60}/R_{15} 的降低也不超过25%则以为电机没有受潮，可以使用。

三、介质损耗

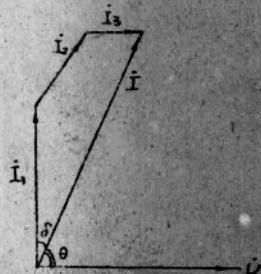
在直流电压作用下，由于存在有泄漏电流，它会引起电介质的发热，损耗一部分能量。在交流电压作用下，情况更要复杂得多。它不仅存在着泄漏电流引起的能量损耗，还有由于电场的交变引起的附加能量损耗。这个问题在工程技术上有重要意义，有必要讨论清楚。所谓介质损耗，主要就是指在交流电压下，电介质本身发热所消耗的能量损耗。

为什么电压交变（或电场交变）将引起附加的能量损耗呢？简单地说，在交流电压作用下，电介质的分子运动状态随电压电场的交变而发生周期性的变化，称为周期性极化，这种周期性极化将消耗一定能量，并引起电介质发热。

下面我们来看各介质损耗的计算方法。

如果没有介质损耗时，通过电介质的电流 I 应领先电压 90° 角，相当于一个理想的电容。但是实际上由于有介质损耗的存在，电流 I 与电压 U 之间的相位差将小于 90° ，如基5-5所示。电流 I 可以看成由三部分组成：

- I_1 ——是电容充电电流，与电压成 90° 角，不消耗能量。
- I_2 ——是周期性极化引起的极化电流，它消耗一部分能量。
- I_3 ——是泄漏电流，由电介质的漏电阻决定，与电压同相，更消耗能量的。



基5-5 介质介质损耗时
电压与电流的向量图

向量图中 θ 为电压 $\dot{U}$ 与电流 $\dot{I}$ 的夹角, 而对我们更有实际意义的是它的余角 δ , 这一点在下节讨论中可以看成。为了简化, 我们可以将电流 $\dot{I}$ 分成有功分量 $\dot{I}_a$ 和无功分量 $\dot{I}_r$ (如图 5-6) 也就是说将电流分解成是由电阻 r 和电容 C 两部分组成 (如图 5-7), 总的等效阻抗为 Z 。

由图 5-6 可知

$$I_a = I_r \operatorname{tg} \delta$$

即

$$\frac{I}{r} = \omega C \operatorname{tg} \delta$$

又

$$\dot{I}_a + \dot{I}_r = \dot{I}$$

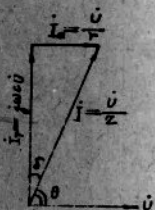


图 5-6 简化的 $\dot{U}$ 与 $\dot{I}$ 向量图

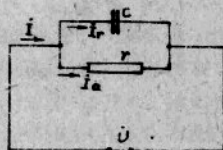


图 5-7 简化的等效电路

即

$$\frac{\dot{U}}{r} + j\omega C \dot{U} = \frac{\dot{U}}{Z}$$

绝对值

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z} &= \sqrt{\left(\frac{1}{r}\right)^2 + (\omega C)^2} = \sqrt{\omega^2 C^2 \operatorname{tg}^2 \delta + \omega^2 C^2} \quad \left(\text{把 } \frac{1}{r} = \omega C \operatorname{tg} \delta \text{ 代入}\right) \\ &= \omega C \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \end{aligned}$$

我们知道, 电路中电压与电流同相时, 其所消耗的有功功率可用下式表示:

$$P = UI \cos \theta$$

$$= \frac{U^2}{Z} \cos \theta$$

θ 为 $\dot{U}$ 与 $\dot{I}$ 的夹角。

$$\cos \theta = \frac{I_a}{I} = \frac{\frac{U}{r}}{\frac{U}{Z}} = \frac{\frac{1}{r}}{\frac{1}{Z}} = \frac{\omega C \operatorname{tg} \delta}{\omega \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}$$

把这个关系代入到上式中，并把 $\frac{1}{Z}$ 也代入

$$\begin{aligned} \therefore P &= \frac{U^2}{Z} \cos \theta \\ &= U^2 \cdot \omega C \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \cdot \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta \end{aligned}$$

从这个公式中可以看出损耗功率与那些因素有关，式中 $\omega = 2\pi f$ 为电源的角频率， C 为这种绝缘结构的等效电容与材料的种类和尺寸形状有关， U 为交变电压，而角 δ 是电压与相位角 θ 的余角，称为介质损耗角，它的正切值 $\operatorname{tg} \delta$ 称为损耗角正切。

$\operatorname{tg} \delta$ 反应了电介质的在能量损耗方面的性质，工程上常用 $\operatorname{tg} \delta$ 作为衡量材料质量好坏的一个指标。

必须指出上式中的等效电容 C 是个有量纲量，与所测的等效电路种类以及频率等都有关。

$\operatorname{tg} \delta$ 值的测量方法，可用专门仪器——西林电桥来测量，西林电桥是一种高压交流电桥，其结构、线路和工作原理比较复杂，其工作原理在这里就不介绍了，具体的实验方法可参阅 JB903-66。

电介质产生介质损耗的实际物理过程远比上述等效电路所描述的复杂。由于介质损耗是由电介质的极化，电介质的不均匀性，以及电介质的不均匀性等因素所共同产生，所以材料的介质损耗 $\operatorname{tg} \delta$ 与外界条件（如温度、电压、频率等）的关系，也因材料的种类不同而有很大的差别。

总的看来可以归纳为以下几个变化趋势。

(1) 损耗与温度的关系：一般情况下 $\operatorname{tg} \delta$ 随温度升高而增大，可以认为温度增高时电阻的减小，即导电性的增强对损耗增大起了很大影响。例如 6000 伏的电缆绝缘线在室温时 $\operatorname{tg} \delta = (2 \sim 5)\%$ ，而在 105°C 时则为 15% 左右；B 级绝缘线在室温时 $\operatorname{tg} \delta = (1 \sim 2)\%$ ，在 130°C 时为 $5 \sim 8\%$ 。

(2) 与电压的关系。 $\operatorname{tg} \delta$ 之所以可能随电压变化，这是由于材料的不均匀性，即其内部有气孔存在而引起的。因为气体的耐压能力较低，而在高压下它却往往要求更高的电压，此时气体中孔放电现象，并随放电发热而产生而使损耗大量增加。材料内部气孔越多，则 $\operatorname{tg} \delta$ 随电压 U 的

增加而增大的很快, 我们测 $\tan \delta$ 在不同电压下测这种变化称为介电损耗角增量, 即 $\Delta \tan \delta$, $\Delta \tan \delta$ 规定为 1.5 倍额定电压与 0.5 倍额定电压下 $\tan \delta$ 的差值。 $\Delta \tan \delta$ 的值可以用来检查高压绝缘材料的质量, 因为高压绝缘绝缘是由很多层绝缘带组成, 如果处理的不完善, 中间将会存在着极少量散开空气间隙, 这时 $\Delta \tan \delta$ 值得加大。

(3) $\tan \delta$ 还与频率有关, 但此种关系比较复杂, 这里不再具体分析。由于不同频率下具有不同的损耗, 故测量 $\tan \delta$ 值因所用电压必须选定一定频率。在电机中所用的材料, 一般都是测量其工频 ($f=50$ 赫) 之下的介电损耗角。

(4) $\tan \delta$ 对受潮的反应很灵敏, 因此可根据 $\tan \delta$ 的变化判断受潮情况, 这主要是由于受潮后绝缘电阻大量降低, 有功电流分量增加所引起的。材料受潮后 $\tan \delta$ 可增加 10~20 倍。

$\tan \delta$ 与温度、水分的关系可参考表 5-3。

表 5-3 $\tan \delta$ 随温度、受潮而变化

		有机绝缘材料 玻璃布板 3250	二苯硅玻璃布板 338
$\tan \delta_{50\text{Hz}}$	常 态	0.04	0.03
	180℃	0.12	0.1
	受潮	0.3	0.2

由于介电损耗不仅消耗电能, 而且会引起绝缘材料发热使其老化, 所以我们希望电机绝缘具有尽可能小的 $\tan \delta$ 值, 这一方面要以材料选择使用上改善, 另外在电机制造上提高工艺质量, 防止受潮等都是十分重要的问题。

四、介电系数

介电系数的意义可以作如下的说明。

如图 5-8 所示我们在两块平行板金属板上加一个直流电压 U , 则两平板分别聚集大量的正负电荷, 在板间则形成电场, 它和南北极板间的主磁场情况很相似, 电场也可以用“电力线”表示, 它的正方向规定为从正电荷面发出指向负电荷, 与磁场磁力线完全相似。电场强度则用 E 表示, 极板带电荷多少称为电量, 用 Q 表示。如果平行板之间距离为 d , 则电压

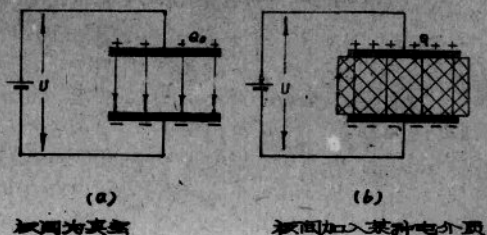


图5-8 平行板间的电荷变化

与电场强度有以下关系

$$U = Ed$$

如果对加电压为 U ，板间为真空时，板间电场强度为 E ，每块板带的电量为 Q_0 ，则当板间放入某种电介质后，因电压 U 不变，所以电场 E 也不变，然而每板上所带的电荷却增加了，由 Q_0 变为 Q_1 ，我们把由于电介质的加入，引起的每板所带的电荷数量的变化而得故，称为这种电介质的介电系数 ε ，用公式表示为

$$\varepsilon = Q_1 / Q_0$$

在电工学中我们已知对上边每一种情形，如果外加电压 U 变化后，则电量 Q 也成正比的变化，即

$$Q = CU$$

式中 C 是一个比例系数，即我们所熟悉的电容，与材料、板板的形状、尺寸、距离等有关，对于板间为真空时：

$$Q_0 = C_0 U$$

板间加入电介质后

$$Q_1 = C_1 U$$

因此

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{C_1 U}{C_0 U} = \frac{C_1}{C_0}$$

由这里就可得到一个重要概念，即所谓介电系数实际上是指放入某种电

介电常数比真空时的电容增大的倍数。加入一种电介质可使电容增加，所以又叫做电介质的电容率。不同电介质具有不同的介电系数，完全是由电介质内部分子结构所决定的。

如果外加的是交流电压，则极板电荷 Q 也发生大小和符号周期性变化，这就是电容的充放电作用。

介电系数越大，则同样条件下的电容越大，因此在制造电容时希望所用的电介质材料的介电系数越大越好，几种材料的 ϵ 值见表 5-4。

表 5-4 几种材料的 ϵ 值

材 料	ϵ
空气 (一大气压)	1.00058
云母	6-6.7
聚脂薄膜	3.2
聚四氟乙烯薄膜	3
玻璃丝	1.8-2
陶瓷	2.5-3
环氧树脂	3-3.5

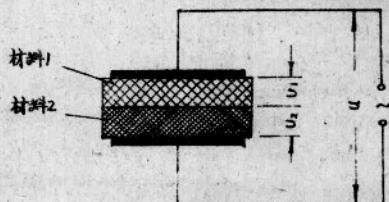


图 5-9 复合绝缘材料的电压分布

介电系数在电机制造中还有另外的意义，这就是对於不同材料的复合绝缘之直接影响电压的分布。设两种绝缘材料电容率分别为 ϵ_1 、 ϵ_2 ，电容分别为 C_1 、 C_2 ，厚度为 d_1 、 d_2 。如果材料的绝缘电阻很大，不致有漏电电流而只成电容性充电电流，这时两极板电量 Q 大小相等。我们可以认为是两个电容 C_1 与 C_2 串联，则

$$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2$$

$$\text{因 } C_1 = \frac{\epsilon_1 S}{d_1}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_2 S}{d_2}, \quad (S \text{ 为极板面积})$$

$$\text{故 } \frac{\epsilon_1 S U_1}{d_1} = \frac{\epsilon_2 S U_2}{d_2} \quad \text{即} \quad \epsilon_1 \frac{U_1}{d_1} = \epsilon_2 \frac{U_2}{d_2}$$

$$\text{也就是 } \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2, \quad \text{或} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

由此我们可知：在交流电压下两种材料的复合绝缘中电场强度按介电系数的平方根分配；当厚度相同时，则电压也按介电系数成反比。

选择在高压电机制造时必须改善每种材料的介电系数，从而改善复合绝缘中每种材料合理分担电压。另外，由于空气的绝缘电阻很高，同时空气的介电系数与真空时极为接近（例如一个大气压下空气的 $\epsilon=1.00058$ ），这比一般材料的 ϵ 为小，因此在高压交流电机定子绕组绝缘与定子槽底之间的空气隙中，以及绝缘结构内部的气孔中往往积聚较高电压，因此这些电场强度过高，这些地方的空气在很强大的电场作用下将气孔间隙击穿，同时伴随发出较暗的蓝光，这就是电晕现象，空气间隙将产生臭氧(O_3)和二氧化氮(NO_2)等气体，它们容易腐蚀绝缘材料，使绝缘发生化学变化，绝缘性能逐渐变坏，最后电机不能工作，这称为绝缘的老化，因此高压电机（如10500伏以上的发电机）定子绕组在制造过程中必须严格进行真空浸胶反烘处理，其目的就是要尽可能去除绝缘层间的空气隙。我厂还采用半导体漆，槽底加半导体垫条，打入半导体楔块都是为了排除或减少气孔与铁心之间的空气隙，以免过高的电场加在空处空气上，产生不利绝缘的电晕现象。

35-4 绝缘材料的物理化学机械性能

除了电气性能外，绝缘材料的物理、化学、机械性能也是很重要的，因为不同材料这些性能有极大的差别，这决定了材料的使用价值，反而影响使用寿命，这些性能指标很多，凡在介绍以下各节：

1、耐热性。由于电机运行时要不可避免的因素损耗而产生热，电机使用的绝缘就必须具有一定的耐热性，它直接决定了电机的允许温升，如本章开始我们所提到的，绝缘材料的等级就是根据耐热性而分为七级的。但这样划分的耐热等级，是根据绝缘材料的正常工作寿命要求而定的，如要寿命不改变，或者可以缩短材料寿命来进行，则耐热等级的绝缘材料可以作高耐热等级的材料来使用，如把A级材料作作B级用，根据资料统计A级材料每增高 $8^{\circ}C$ ，其使用寿命缩短一倍。

大多数材料受热后不是很快熔化，而是变软，有的由固态逐渐变到液态，材料软化到一定程度时的温度称为软化点，它是耐热性的一个指标，其测定方法因材料而不同。对于压塑制品和层压制品通常用马丁氏，即一固定尺寸形状的被试材料加以 50 kg/cm^2 的弯曲压力，在缓慢升温的过程中材料将受热软化，因弯曲力作用而变形。当变形达到一定数值时的温度，

即称为马丁耐热温度，例如3240有机硅压层压板与市板的马丁耐热不低于200℃，而4250有机硅石棉压塑料为300℃。对于绝缘漆类则是用另外的试验方法，它是将漆膜置于一定温度下，经过一定时间后，漆膜弹性将降低到规定程度（以弯曲后而不裂开为准），则以这一温度值和所经受的时间作为绝缘漆类的耐热指标。例如在150±2℃时，1010环氧漆耐漆性不少于7小时，1022环氧漆耐漆性为30小时。

对于某些很易软化的绝缘性物质如环氧胶等，则是用另一种方法来测定其软化点，称为环球法，它是将被试的环氧胶固化后填塞在一个一定尺寸的钢环内（如直径5-10），在冷硬后上面盖上一个一定直径（小丁钢环内径）的钢球，在钢球下一定距离放一平板，然后开始加热，当有胶就逐渐软化滴落，试验规定当胶刚滴到下面平板上的时候温度称为胶的软化点。这种方法在制造面环氧浸渍的绕组时经常用到。

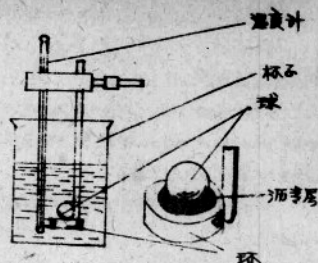


图5-10 用环球法测量软化点示意图

2. 吸水性。水分对于绝缘材料是有害的，会降低绝缘性能，增加其损耗等，因此我们总是希望材料吸水性越小越好。

材料的吸水能力与材料的结构有关。例如多孔性纤维材料如布板、纸板等纤维制品质地较松，内部容易有细孔和缝隙，很容易吸收水分。

材料吸水性的测定方法，主要是将一定标准试样材料放在20±2℃的蒸馏水中浸透24小时后，测定其吸收水分的数量多少。对于绝缘漆、层压制品类采用下式计算方法

$$\omega = \frac{G_2 - G_1}{G_1} \times 100\%$$

式中 G_1 ——材料浸水前的重量，(克)

G_2 ——材料浸水后的重量，(克)

对于绝缘压塑料一类制品，则用下式计算方法

$$\omega_s = \frac{G_2 - G_1}{S} \quad (\text{克/分米}^2)$$

式中 G_1 、 G_2 的意义与前已相同， S 为被测物件的表面积（分米²）。

几种材料吸水性如表5-5所示。