

高等学校教材

电气绝缘结构设计原理

(下 册)

西安交通大学 谢恒堃 编著



机械工业出版社

第一章 电力电容器介质

第一节 基本概念

电容器在现代科学技术及工业中的应用十分广泛，种类也很多。总的说来，根据它工作时通过电流的强弱和外施电压的高低可分为用于弱电工程和用于强电及高电压工程的两大类。这里仅讨论强电和高电压工程中用的电容器，即电力电容器，它主要用于电力系统的输变电设备、冶炼等工业的生产设备以及科学技术试验研究等方面。

在变压器、电缆等绝缘结构中，绝缘材料是对具有不同电位的导体起绝缘及机械固定作用的；而在电容器中，极板之间的绝缘材料通常称作介质，主要是为了储藏能量。因此，对于电容器中所使用的介质，特别要求单位体积（或单位质量）所储藏的能量要大，然后是损耗小、寿命长、工艺性好等共同性的问题。

对于平板电容器，忽略边缘效应时，其电容量为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1-1)$$

式中 ϵ_0 ——真空的介电常数， $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ；

ϵ_r ——极间介质的介电常数；

A ——极板面积 (m^2)；

C ——电容量 (F)；

d ——极间介质厚度 (m)。

电力电容器通常用铝箔作极板，采用卷绕式扁平形元件，如图1-1所示。在这种结构中，材料利用率高、体积小，每个极板（图1-1中的A和B）双面起作用，其电容值约等于该元件展开成平面长条时的二倍，即

$$C = 2 \times 8.86 \times 10^{-12} \frac{\epsilon_r b l}{d} \quad (1-2)$$

式中 b ——铝箔极板宽度 (m)；

l ——铝箔极板长度 (m)；

C ——电容量 (F)；

d ——元件极板间介质厚度 (m)。

由上式可知，当电容器的几何尺寸 b 、 l 和 d 一定时，电容 C 与介质的介电常数 ϵ_r 成正比。因此，为了使电容器做到容量大，而尺寸小、重量轻，采用高介电系数的介质是很重要的一个方面。

在直流电压下，电容器所储能量为

$$W = \frac{1}{2} C U^2 \quad (1-3)$$

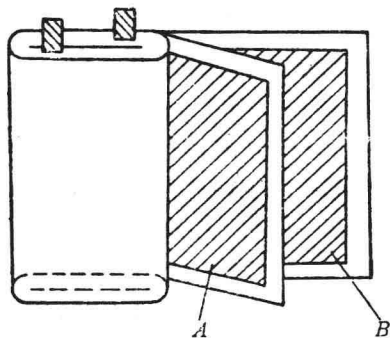


图1-1 卷绕式扁平电容元件示意图

式中 C ——电容器的电容量 (F);
 U ——外施直流电压 (V);
 W ——电容器储能 (J)。

而在交流电压下, 常用无功功率来表示电容器的容量

$$P_c = \omega CU^2 \quad (1-4)$$

式中 ω ——外施交流电压的角频率;
 C ——电容器的电容 (F);
 U ——外施交流电压 (V);
 P_c ——电容器的容量, 即无功功率 (W), 在电容器行业中常用 var 作单位, $1 \text{ var} = 1 \text{ W}$ 。

在实践中由于电力电容器的单台容量较大, 常以 kvar 为单位, $1 \text{ kvar} = 1000 \text{ var}$; 电压以 kV 为单位, 而电容以 μF 为单位。为了便于计算, 上式可用下式代替:

$$P_c = \omega CU^2 \times 10^{-3} \quad (1-5)$$

式中 C ——电容器的电容 (μF);
 U ——外施电压 (kV);
 P_c ——电容器容量 (kvar)。

电容器极板间介质厚度为 d , 外施电压为 U 时, 介质承受的电场强度 $E = U/d$ 。电力电容器在工作电压下的 E 值称为工作场强。将 $E = U/d$ 代入式 (1-3) 和式 (1-4) 中可以得到:

直流电压下电容器所储能量为

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} (Ed)^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 V \epsilon_r E^2 \quad (1-6)$$

式中 V ——极间介质体积 (m^3);
 W ——电容器储能 (J);
 E ——工作场强 (V/m)。

交流电压下电容器的容量 (无功功率) 为

$$P_c = \omega CU^2 = \omega \epsilon_0 V \epsilon_r E^2 \quad (1-7)$$

式中 V ——介质体积 (m^3);
 P_c ——电容器容量 (var);
 E ——交流工作场强 (V/m)。

式 (1-6) 和式 (1-7) 中的 $\epsilon_r E^2$ 称为电容器介质的储能因数。

通常用电容器的储能或容量与体积或重量之比对整台电容器进行评价。这种比值称为电容器的比特性。高压脉冲电容器用比能 (电容器储积的能量与体积之比), J/L (10^{-3} J/cm^3); 交流电力电容器用比无功功率 (电容器的容量与体积或重量之比), kg/kvar 或 kvar/L 作为技术经济指标。按式 (1-6) 与式 (1-7) 可见, 直流电压下电容器的比能

$$\frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad (1-8)$$

而交流电压下电容器的比无功功率

$$\frac{P_c}{V} = \omega \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad (1-9)$$

因此，电容器的比特性主要与储能因数 $\epsilon_r E^2$ 有关。为了提高储能因数和改善比特性，应采用介电常数和允许工作场强高的介质，尤其是高的工作场强对提高储能因数和改善比特性有更重要的作用。因此研究采用 $\epsilon_r E^2$ 大的介质是发展电容器的关键。图1-2示出了随着介质的改变，电容器比特性改善的发展情况。

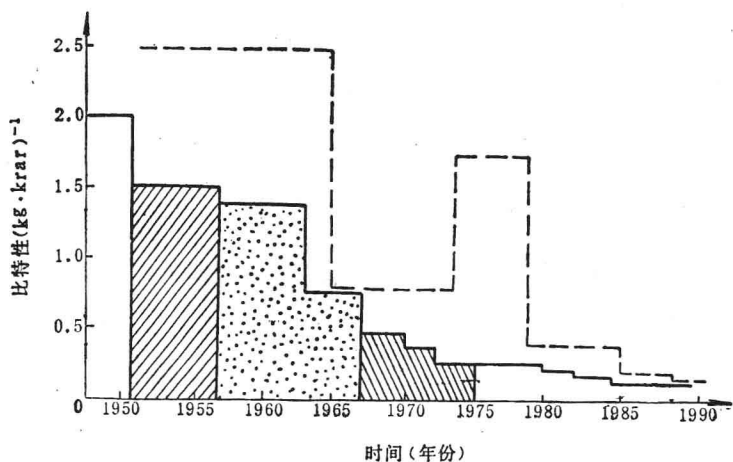


图1-2 移相电容器的比特性的发展概况

- 国际上，1951年氯化联苯代替矿物油，1957年开始生产单台大容量电容器，1960~1967年改进电容器纸的质量，1967年开始用薄膜做介质，1970~1975年改进薄膜质量，增大介质中薄膜所占比例，1982年大量使用新的合成浸渍剂。
- 我国，1965年开始用三氯联苯浸纸介质，1974年禁止使用三氯联苯，恢复用矿物油，1979年开始用烷基苯和硅油浸纸和聚丙烯薄膜复合介质，1985年开始生产二芳基乙烷浸膜纸复合介质电容器，1988年开始生产全膜电容器。

第二节 电力电容器的分类与用途

电力电容器按其用途不同主要可分为移相电容器、串联电容器、电热电容器、耦合电容器、脉冲电容器、直流电容器、断路器电容器、滤波电容器、防护电容器和标准电容器等九个类型。此外，以某些电力电容器为基础，可以发展成多种成套装置，如电容式电压互感器、并联补偿装置、串联补偿装置、冲击电压和冲击电流发生装置。下面对几种主要的电力电容器的特点及用途作一些具体说明。

一、并联电容器

这种电容器又称为移相电容器或余弦电容器，是用途最广、生产量最大、最基本的一种电力电容器。它用于电力设备和系统以提高功率因数。一般工业用电的电流在相位上滞后于电压一个角度，将并联电容器并联于

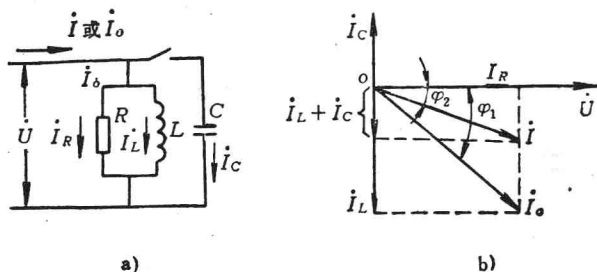


图1-3 并联电容器作用原理图
a) 线路图 b) 相量图

电力系统或用电设备的两端能够补偿电流对电压的滞后效应。图1-3为并联电容器作用原理图， R 和 L 代表感性负荷；有功功率为 P ；并联电容器之前线路电流为 I_0 ，并且滞后于电压 \dot{U} 的相角为 φ_1 ，功率因数为 $\cos\varphi_1$ 。并联电容 C 后，线路电流变为 \dot{I} ，滞后于电压 \dot{U} 的相角为 φ_2 ，功率因数为 $\cos\varphi_2$ 。

由图1-3 b 可见，并联电容器补偿的电容电流 I_c 为

$$I_c = I_0 \sin\varphi_1 - I \sin\varphi_2$$

所并联的电容器的容量为

$$P_c = \omega C U^2 = U I_c = U (I_0 \sin\varphi_1 - I \sin\varphi_2)$$

该负载的有功功率为

$$P = U I_0 \cos\varphi_1 = U I \cos\varphi_2$$

由以上二式消去 I_0 、 I ，可以求出对于一个有功功率为 P 的感性负载，要想把功率因数由 $\cos\varphi_1$ 提高到 $\cos\varphi_2$ 所需并联的并联电容器的容量 P_c 。可用下式计算

$$P_c = P \left(\frac{\sin\varphi_1}{\cos\varphi_1} - \frac{\sin\varphi_2}{\cos\varphi_2} \right) = P (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (1-10)$$

由上述分析知道，接上并联电容器后，线路上电流减小了，即节省了电源的视在功率。节省的视在功率伏安数为

$$\Delta P_s = U I_0 - U I = P \left(\frac{1}{\cos\varphi_1} - \frac{1}{\cos\varphi_2} \right) \quad (1-11)$$

例如某工厂用电负荷为500kW，功率因数从0.7提高到0.9，所需安装的电容器容量为270kvar，节省的视在功率为160kg/kvar。由此可见，安装并联电容器提高功率因数后可节省发电和输配电设备的容量是很大的，同时因为线路电流减小了，线路的损耗和压降也可降低。

并联电容器多数并联使用于6kV、10kV、35kV、66kV等级配电网或并联于工厂变电所400V低压母线上作集中补偿用；或分组并联于各个车间配电线路上。如果每台感应电动机并联装置电容器作单独补偿用，从感应电动机起的整个导线尺寸及配电设备容量都可减小，则更经济合算。

感应电动机的定子线圈与并联电容器并联后还可当作自激运行的异步发电机用，结构简单、转速高、重量轻、价格便宜、维护方便，最适用于农村低水头的小型水电站，可供小城镇或农村分散地区和山区单独供电用。

此外，还有并联电容器成套装置，它是由并联电容器组与可调电抗器并联后组成静止补偿装置（可调电抗器由晶闸管元件与电抗器串联组成）。这种成套装置反应速度极快，按照与它并联的系统需要，可由电容器组供给无功功率，并由可调电抗器吸收过多的无功功率，它可以自动控制设备（例如电炉）的功率因数，并用于输电系统代替同步调相机，控制电压以及提高系统的稳定性。

二、串联电容器

串联电容器又叫纵补偿电容器，串联在输电线或电网中用以补偿输电线路的感抗。图1-4示出接有串联电容器的输电线路图及说明其补偿作用的相量图。图中 U_s 为送电端电压， $\cos\varphi_s$ 为送电端功率因数， R_L 为线路电阻， X_L 为线路感抗， X_c 为串联电容器容抗； U_r 为用电端电压， $\cos\varphi_r$ 为用电端功率因数； I 为负载电流。当输电线较长时， X_L 较大， U_r 可能比 U_s 小很多。加

了串联电容器后, 可使 U_r 和 U_s 相差不多, 即电压调整率 $\left(\frac{U_s - U_r}{U_s} \times 100\%\right)$ 明显改善, 而且功率因数角由 φ_s 变为 φ'_s , 接近于用电端的 φ_r 。

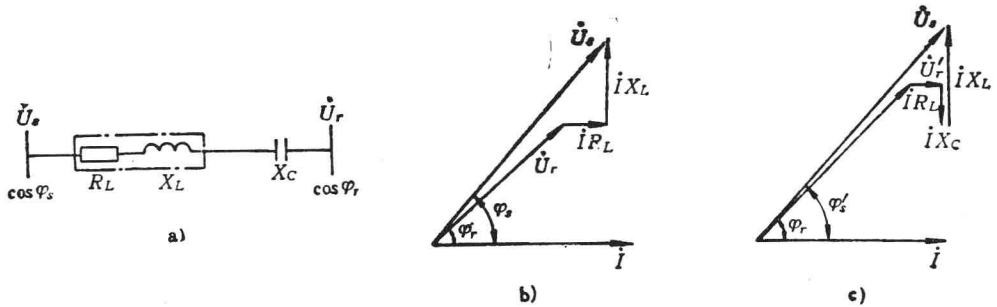


图1-4 串联电容器的补偿作用

a) 串联电容器的应用线路图 b) 未加串联电容器时的相量图 c) 加串联电容器后的相量图

串联电容器直接串联在高压输电电路上, 其负荷 (电流) 随线路负荷而变化。当线路出现过负荷或当线路发生短路故障时, 电流将超过额定电流的若干倍, 从而在串联电容器上引起同样倍数的过电压。因此, 要求串联电容器能经受较高的短时过电压和长期过载。我国串联电容器允许在1.25倍额定电压下运行4 h, 1.5倍额定电压下运行1 h, 5倍额定电压下历时0.2 s 作用后再承受2.5倍额定电压历时30 s。所以设计的工作场强取得较低, 一般比并联电容器的低20%, 以保证其可靠运行。例如 CWF₁-45-1W 串联电容器, 额定电压为1kV, 但出线套管用6kV 级的, 芯子由45个电容元件并联而成, 每个元件上串有熔丝。

三、电热电容器

电热电容器是用于提高各种感应加热设备的功率因数或改善电路特性 (调频)。感应电热设备的功率因数往往很低, 有的尚不到10%, 非用电热电容器来补偿不可。电热电容器的工作频率范围自40~24000Hz。目前我国主要生产频率为1000、2500、4000和8000Hz 的中频电热电容器, 用于精密冶炼、精密浇铸的中频感应电炉以及加热设备中。根据新技术的需要将逐步发展高于8000Hz 的产品, 并扩大50、150及400Hz 等电热电容器的生产。

中频电热电容器因为频率较高, 单位体积的介质发热量大, 散热是主要问题, 其工作场强一般取得较低, 而且频率愈高场强取得愈低。此外还必须采取措施改善散热条件。因此, 电容器的基本结构与并联电容器有许多不同之处。芯子的元件采用突出箔式, 电容器纸宽度较小, 铝箔的厚度较厚, 两个极板分别向相反的方向伸出于介质外面少许, 形成露箔式元件, 全部元件并联组成芯子, 芯子的一个极板接至盖上的接地片, 在这一极板上焊有可通冷却水的蛇形管, 管的两端由盖上伸出; 另一个极板与外壳绝缘, 用联接片与导杆连接, 通过盖上的瓷套引出。频率在4000Hz 及以上时, 箱壳常用黄铜制作以减少涡流损失, 避免电容器外壳过热。

四、耦合电容器

耦合电容器主要用于工频交流输电线路的高频通信、测量、控制保护以及抽取电能装置作部件用。耦合电容器直接接在高压输电线与地之间, 长期承受工频电压, 并且必须能承受高压线路上发生的过电压作用。为了保证工作的可靠性, 工作场强取得较低, 比并联电容器的约低40%左右。耦合电容器的电容温度系数要求小, 选用液体介质时必须考虑这一点。电

容器内部要保持一定的油压，必须确保电容器内部在允许的最低环境温度下不出现负压，以防止潮气渗入，保证介质的电气强度。

耦合电容器是露天安装的，采用机械强度高的瓷套作外壳，并应充分考虑到叠装后能承受最大风力和振动等负荷的作用。

利用耦合电容器可构成电容式电压互感器和电容抽能装置等。电容式电压互感器和电磁式电压互感器比较有许多优越性，在110kV及其以上电压等级造价较低，特别当用于超高压时更为突出。它能承受强的电冲击和大气过电压的作用；它不仅能作电压测量用，还可兼作高频通信，控制及保护用。因此，国外在66~765kV电压等级绝大部分采用了电容式电压互感器，国内除330kV及500kV已全部采用外，66~220kV级也迅速扩大使用，出现逐步取代电磁式电压互感器的趋势。电容抽能装置的基本原理和电容式电压互感器大致相同，但它不作精密测量电压用，而主要用来从高压或超高压输电线上抽取电能，其功率可达几千至几十kVA；线路电压愈高，经济效果愈好。例如它适用于遥远的超高压线路维护站，在那里用电量不大，但又没有低压电源，为此而添置一台超高压小容量变压器又很不经济，在这种情况下采用电容抽能装置是经济合理的。

图1-5示出电容式电压互感器工作原理图，中间变压器及电抗器常装在同一油箱里，两者都有抽头，以便在误差试验时调定。阻尼器是为了抑制次谐波谐振。

五、脉冲电容器

这是一类用途广泛的电容器的总称，用于各种科学技术的试验装置中，例如用于冲击电压发生器、冲击电流发生器、供给瞬时大能量的振荡回路和供给连续脉冲的电源电路等。脉冲电容器由于用途不同，其电压和电容的范围十分宽广，电压有几千伏到几百千伏的，电容有从几十皮法到几百微法。由于工作条件和寿命要求不同，工作场强的取值范围很大，但一般都取得比其它类型的电容器的场强高得多。为使电感减小，采取特殊的引线和出线结构。外形可分铁壳、瓷外壳和胶纸外壳三种，通常以铁壳、高压、大电容的产品用处较多。一般要求其放电寿命不少于1万次。

六、断路器电容器

它主要并联在断路器的断口上作均压用。高压断路器的灭弧室常由几个断口串成，而各个断口对地的电容往往不均匀，因此造成电压分布不均匀。采用断路器电容器后，使断口间的电压分布均匀，以利切断电弧且避免断口损坏，因此，断路器电容器又称作均压电容器。断路器电容器基本结构与耦合电容器相似。我国目前生产电压40、60、100、300/ $\sqrt{3}$ kV的断路器电容器的电容为0.0015、0.0018 μ F，其外形比耦合电容器小得多。除了浸油式断路器电容器外，还发展了不必浸油的高介陶瓷制作的断路器电容器，体积更小，电感也小，无油，特别适合用于SF₆断路器。

七、直流电容器

这种电容器主要用于直流电滤波、高压电容分压器和电气铁道供电装置等，有很宽的工作电压（从低压到几百千伏）及电容（从几百皮法到几十微法）范围。根据不同工作温度范围要求，采用不同的结构和浸渍剂。直流电容器工作时一般仍有一定交流电压分量作用，但基

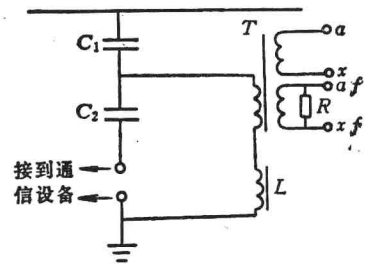


图1-5 电容式电压互感器原理图

C₁—耦合电容器 C₂—分压电容器 T—中间变压器 L—电抗器 R—阻尼装置

本上处于较稳定的直流电压下工作，因此允许较高的工作电场强度。

以上仅对几种主要产品作了一些简单介绍，由上述可见由于各种电力电容器的用途不同，工作条件不同，所选工作场强差别很大。但是各种电容器内部元件结构，制造工艺及基本绝缘性能要求极为相似。

第三节 电力电容器的介质及其性能

一、液体介质

液体介质在电力电容器中用作浸渍剂，以填充固体介质中的空隙，从而提高介质的耐电强度，改善局部放电特性和散热条件等。

选用电容器的液体介质时，应考虑下列几方面的性能要求：

(1) 电气性能要求击穿场强较高，吸气性能好，介电常数较高， $\tan\delta$ 较小， ϵ 及 $\tan\delta$ 随温度的变化较小， ρ_r 较高等。

(2) 物理性能要求粘度小，凝固点低，挥发性小，闪点高，难以燃烧或不燃烧。

(3) 化学性能要求稳定性好，能与电容器内其他材料稳定共存，特别是与薄膜介质的相容性好，无毒或毒性很小。

(4) 经济性方面要求来源广，价格便宜。

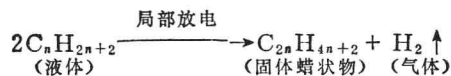
(5) 工艺性方面要容易处理。显然，要同时满足上述要求往往是很困难的。但是，不同用途的电容器对介质性能的要求也往往不同。例如，脉冲电容器主要要求介质的介电常数和击穿场强度高；并联电容器则要求液体介质的吸气性好，介质损耗小；耦合电容器还要求 ϵ 及 $\tan\delta$ 随温度的变化要小，等等。因此，必须根据不同用途的电容器选用合适的液体介质，以充分利用介质的特性。

这里要指出，通常液体介质的击穿场强是指液体击穿试验用标准电极间隙为2.5mm时的数据，随着间隙减小击穿场强将增高，薄油层的击穿场强很高。表1-1列出了几种液体介质在不同油层厚度 d 时的击穿强度 E_b 。

表1-2列出了几种液体介质的性能，可供设计时参考。

(一) 电容器油

这是以前用得最多的电容器液体介质，常称为矿物油。纯净的电容器油的基本成分可分为芳香烃、环烷烃和烷烃。含环烷烃和烷烃多的电容器的化学稳定性及热老化性能较好；含芳香烃多的电容器油的电老化性能较好。但是电容器油的耐热性和电老化性能都较差，工作温度不超过80℃，特别是在高电场以及过电压作用下容易分解并析出气体，当电容器击穿时可能引起爆炸和燃烧。在高电场作用下油中产生局部放电，油分解而析出气体的过程为



现在我国已基本上不用电容器油（矿物油）作浸渍介质。

表1-1 几种液体介质薄油层的击穿场强
(有效值)

液体介质类型	E_b (MV/m)		
	$d = 1 \text{ mm}$	$d = 1 \mu\text{m}$	$d = 0.2 \mu\text{m}$
电容器油	24	350	650
聚异丁烯	34	380	660
硅油	22	280	470

表1-2 几种液体介质的性能

名称	凝固点 (°C)	密度 (15°C时) (g/cm ³)	粘度 (40°C时) (mm ² /s)	导热系数 (W/(cm· °K))	体积膨胀系数 (1/°C)	酸值小于 (KOHmg/ g)	气 稳 定 性	闪点不低于 (°C)	外观	ϵ_r (60°C)	$\tan \delta$ (60°C, 50Hz时) 不大于	ρ_V (20°C) 不小于 ($\Omega \cdot m$)	U_b (2.5mm厚时 击穿电压) 不小于(kV)
电容器油	-45	0.86~0.89	5.5	0.11~0.20	6.5×10^{-4}	0.02	差	135	淡黄~无色 透明	2.15	0.004 (100°C时)③	1×10^{12}	60
苯甲基硅油	-65	1.01~1.08	25	0.14	7.5×10^{-4}	0.013	良	280	无色透明~ 淡黄	2.63~2.8 (20°C时)②	0.00032 (25°C时)③	1×10^{12}	45
蓖麻油	-17	0.96	14 (60°C时)①	0.17	5×10^{-4}	1.5	良	250	无色透明	4.2 (20°C时)②	0.02	1×10^{10}	45
聚异丁烯	-60	0.83	24 (100°C 时)①	—	—	0.3	优	151	无色透明	2.2	0.0008	1×10^{12} (100°C时)④	60
煤基苯 (AB)	-60	0.87	5.5	0.20	7.8×10^{-4}	0.01	良	135	无色透明	2.25~2.3	0.0005	5×10^{12}	60
甲基硅油	-50	0.97~ 0.975	18	0.14	1×10^{-3}	0.0034	差	155~300	无色透明	2.2~2.8	0.00016 (25°C时)③	2.5×10^{18}	45
二芳基乙烷 (PXE)	-47.5	0.989	5.6	—	—	—	优	148	无色透明	2.53 (80°C时)②	0.0003 (80°C时)③	2.5×10^{12} (80°C时)④	60
异丙基联苯 (MIPB)	-55	0.988	5.3	—	—	—	优	143	无色透明	2.56 (80°C时)②	0.0006 (80°C时)③	5.3×10^{11} (80°C时)④	60
苯基甲苯 (MBT/DBT)	-55	1.0	3.9	—	7.6×10^{-4}	0.01	优	144	微黄色	2.65 (80°C时)②	0.004 (100°C时)③	9×10^{12} (100°C时)④	70
三氟联苯 (PCB)	-18	1.38	7 (60°C时)①	0.11	6.7×10^{-4}	0.02	优	180	无色透明	5.2	0.03 (90°C时)③	5×10^{10}	45

① 表中另有温度说明时,以其作为测定介质粘度值的测定温度。
 ② 表中另有温度说明时,以其作为测定介电系数数值的测定温度。
 ③ 表中另有温度说明时,以其作为测定tan δ 值的测定温度。
 ④ 表中另有温度说明时,以其作为测定 ρ_V 值的测定温度。

(二) 三氯联苯

它是由联苯经过氯化制成的，因为介电常数高，工作温度较高，导热性好、不燃烧、在高电场下不易电老化而使用它浸渍的介质可选用较高的工作场强，从而使电容器的比特性特别好，因此很长时间内认为它是较理想的电容器浸渍剂。但是由于其毒性，已停止使用三氯联苯了。

(三) 烷基苯

禁止使用三氯联苯后，各国都积极研究新的液体介质，我国首先研究了烷基苯（简称AB）并用以代替矿物油作为过渡性浸渍剂而广泛用来制造电力电容器，目前主要用于制造低压电容器、高压电容器和耦合电容器等。

烷基苯是合成洗涤剂的中间体，制取方法有：由四聚丙烯合成硬质烷基苯；由石油蒸馏成份（ $C_{10} - C_{14}$ ）经氯化加苯合成软质烷基苯；由蜡裂解后的 α 烯烃（ $C_{10} - C_{14}$ ）和苯合成软质烷基苯。合成的烷基苯经精制后是很好的绝缘油。与电容器油（矿物油）相比，烷基苯最主要的优点是：它是合成油，成分纯，易精制，分子中芳香烃成分高，在高电场下的稳定性较好；粘度低，容易浸渍； $\tan\delta$ 小，击穿强度高；热稳定性好。

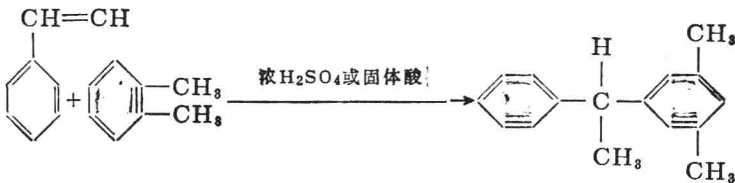
烷基苯还可与矿物油混合使用，有效地改善矿物油的电老化性能、氧化稳定性以及减少对铜的腐蚀作用。

(四) 苯甲基硅油

禁止使用三氯联苯后，曾用苯甲基硅油作为高压电力电容器的浸渍剂。苯甲基硅油的电老化稳定性好，用它浸渍的纸的起始局部放电场强和熄灭场强比矿物油浸纸的高10%以上，因此可以取较高的工作场强。同其他的液体介质相比，硅油的突出优点是：耐热性高（ $200 \sim 250^\circ\text{C}$ 或更高），不易燃烧，化学稳定性好，高频及低温的性能较好， $\tan\delta$ 小， ϵ_r 较高，并且 ϵ_r 及 $\tan\delta$ 在很宽的频率范围（ $10^3 \sim 10^8 \text{Hz}$ ）和温度范围（ $-40 \sim +110^\circ\text{C}$ ）内变化很小。它适合作耦合电容器及中频电热电容器的浸渍剂。由于价格较贵，目前已不用于浸渍一般的电力电容器。

(五) 二芳基乙烷

简称PXE，是一种合成油，国内采用的合成反应是



二芳基乙烷的粘度低，有利于浸渍；介电常数较高， $\tan\delta$ 很低，击穿强度较高；分子结构中芳香烃成分高，吸气性好，因此耐局部放电的性能好，用它浸渍的纸和聚丙烯薄膜可以取较高的工作场强，是目前用来代替三氯联苯的一种较好的浸渍剂，它易被生物分解，对环境无污染。二芳基乙烷与聚丙烯薄膜的相容性好，在 120°C 下聚丙烯薄膜浸于二芳基乙烷、烷基苯、矿物油中进行比较，其中二芳基乙烷对膜的强度及伸长率影响最小；二芳基乙烷在膜层间的扩散速度是矿物油的两倍，渗透聚丙烯膜的能力是矿物油的5~6倍，聚丙烯膜对二芳基乙烷的吸油率最小。因此它特别适合于浸渍全膜电容器。

图1-6给出了几种液体介质的吸气性能的对比结果，由图可见，二芳基乙烷的吸气性比前面介绍的浸渍剂的都好，适合作为高压移相电容器的浸渍剂。图1-7和图1-8分别示出了二芳基乙烷的 ϵ 及 $\tan\delta$ 的温度关系曲线和热老化性能。热老化的温度是115°C，通过测量 $\tan\delta$ 的增大来判断其是否老化，由图1-8可见，未加稳定剂的二芳基乙烷老化较快，但添加了稳定剂后老化性能很好。

使用二芳基乙烷时应注意以下几点：①二芳基乙烷污染后用活性白土处理时的温度不能高，以20~35°C为宜，白土量约为0.5%~1%。若温度高，白土中的微量不纯物会起催化作用，发生副反应，生成蒽醌类化合物，使性能恶化。②二芳基乙烷易吸湿，与空气接触会氧化。③二芳基乙烷是一种极好的溶剂，对很多有机物及某些无机物的溶解能力相当强，必须注意在制造电容器过程中对某些材料的接触问题，例如不可与纯铅、铜、银和丁腈橡胶接触，(但可接触焊锡)，高温时不能与聚乙烯共存。④测量它的 $\tan\delta$ 时所用电极应清洗，其程序为：二甲苯→乙醇→蒸馏水煮1h→蒸馏水冲洗→干燥→热二芳基乙烷浸泡或冲洗数次。⑤工作场地尽量通风，注意避免进入体内。

二芳基乙烷虽然在国内外已普遍用作电力电容器的浸渍剂，但它还存在一个问题，这就是低温下的局部放电性能不够好，例如用二芳基乙烷浸渍的电容器在-25°C下的局部放电电压比20°C时的下降三分之一。另外，它是一种易燃的浸渍剂。为解决低温局部放电问题，可在二芳基乙烷中加入一定量的磷酸三甲苯酯(TCP)，这还可使油的介电常数从2.5左右提高到4.5，但同时会使油的粘度及 $\tan\delta$ 上升。也有人从化学结构上进行改进，合成一种PXE的同分异构体，其介电性能与PXE相近，而粘度、凝固点以及对聚丙烯薄膜的膨胀率均比PXE的低，-25°C下的局部放电电压仍较高。

(六) 异丙基联苯

简称IPB和MIPB，这也是含芳香烃的浸渍剂，分子结构为

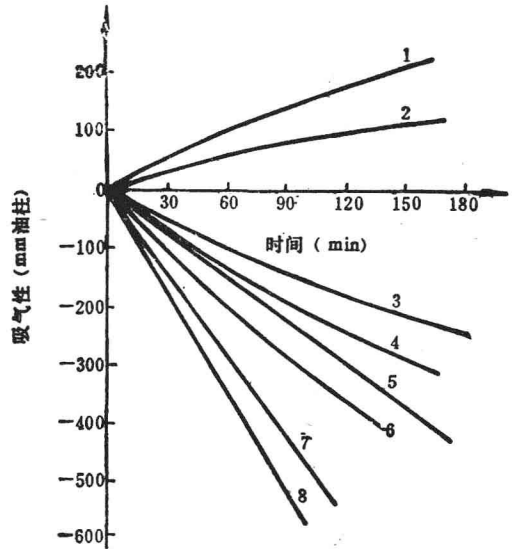


图1-6 几种液体介质吸气性对比 (试验条件: 80°C, 10kV, 50Hz)

- 1—液体石蜡 2—矿物油 3—偏苯三酸三辛酯 4—苯
- 甲基硅油 5—烷基苯 6—三氯联苯 7—二芳基乙烷
- 8—异丙基联苯

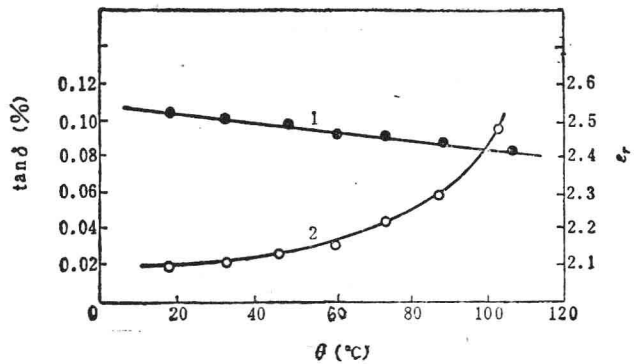
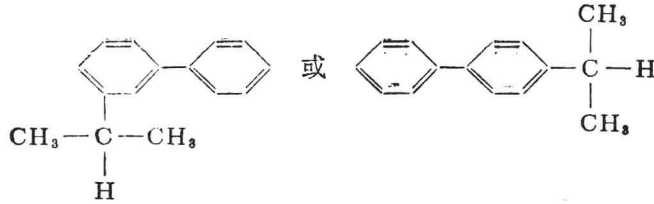


图1-7 二芳基乙烷的 ϵ 和 $\tan\delta$ 随温度的变化
1— ϵ , 2— $\tan\delta$



它的性能与二芳基乙烷基本相同，而且异丙基联苯含芳香烃比例比二芳基乙烷还高，因此，在高电场作用下的吸气性和耐局部放电性能比二芳基乙烷的还好，适合用作高压移相电容器的浸渍剂。

(七) 苯基甲苯

简称 MBT/DBT，它是单苯基甲苯 (MBT) 和二苯基甲苯 (DBT) 的混合液体，即

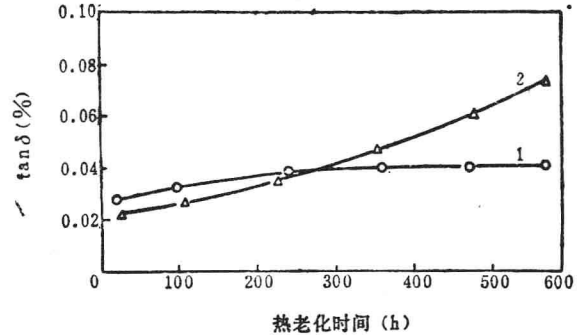
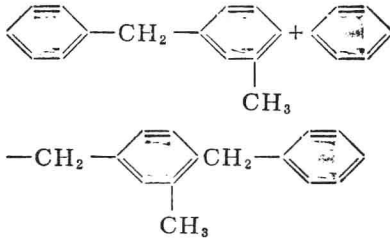


图1-8 二芳基乙烷的热老化特性 (温度115°C)

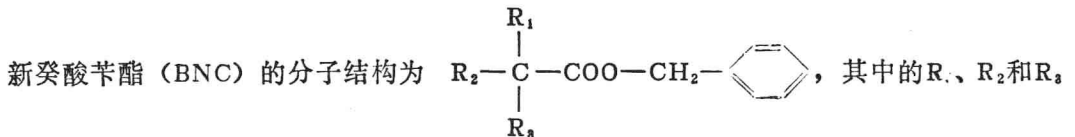
1—加了稳定剂 2—未加稳定剂

其芳香烃含量比 PXE 及 IPB 的都高，低温时的粘度、局部放电性能比 IPB 的还优良，与聚丙烯薄膜的相容性也比 IPB 及 PXE 的优良。国际上已广泛用作电力电容器的浸渍剂，其商业牌号为 UGILEC-100；我国也研制成功此种浸渍剂，并开始使用。

(八) 酯类浸渍剂

现在使用的酯类浸渍剂有磷酸酯类绝缘油 (例如磷酸三甲苯酯，即 TCP)、新癸酸苄酯 (BNC) 和邻苯二甲酸酯 (DOP) 等。

用作绝缘油的磷酸酯类浸渍剂不燃烧、介电常数高，直到击穿仍看不到可视气体发生，吸气性能优良；缺点是精制处理困难，常使 $\tan \delta$ 大。为降低其粘度，通常把酯类油与芳香烃绝缘油混合使用。混合油仍然具有难燃性，并且其电气性能优良。例如 PXE 和 TCP 的混合油， ϵ_r 可达 4.5 (80°C)， $\tan \delta$ 约为 8×10^{-3} (80°C)，击穿强度高，于 65kV/2.5mm，出现可视气体的场强大于 65MV/m，难燃烧。用这种混合油制造的聚丙烯薄膜电容器的 $\tan \delta$ 在高温下的值很小 (80°C 时才 2×10^{-4})，长期耐电压的值比用单一的油时高 40% 左右。为了得到难燃性，混合油中的 TCP 的量应在 40%~50% 以上 (容积比)。



是有 8 个碳原子的烷基团，羧基邻边的碳原子被季化了，这就能抑制酯的水解作用。新癸酸苄酯的粘度低、凝固点低，闪点高 (155°C)，介电常数较高 (20°C 时为 3.8)，击穿强度高，在高电场作用下的吸气性好，与聚丙烯薄膜有较好的相容性，因此可以用作高压电力电容器的浸渍剂。其缺点是 $\tan \delta$ 较大，工频 20°C 时约为 0.02。

(九) 蓖麻油

它的介电常数约为4.2, 不易燃烧, 气稳定性好, 耐电弧能力强, 击穿时无凝粒, 在高温高电场下它会在极板表面生成一层聚合物薄膜保护层, 使电容器寿命较长, 适合用作寿命长的脉冲电容器的浸渍剂。它的缺点是粘度较大, 体积电阻系数不够高, 工频时的 $\tan\delta$ 较高。在使用中应特别注意锡对蓖麻油的热老化有明显的催化作用。

(十) 其他浸渍剂

一些醚类油例如丁基一二苯醚、二甲苯醚(即“Baylectrol-4900”)和邻苯酚基(OPP)烷基醚都曾试用作高压电容器的浸渍剂。聚异丁烯和氟油的高温电气性能优异, 前者的介电性能随温度变化很小, 后者具有高的介电常数(4.1), 可作为较高使用温度的浸渍剂。

二、固体介质

固体介质是电力电容器的主要介质材料。对固体介质的要求是: 导电微粒和弱点很少, 耐电强度高; 介电系数大; 介质损耗小; 能做得很薄, 厚度均匀, 机械强度高, 便于卷绕; 浸渍性能好又能耐油; 来源广、价格低廉等。目前常用的固体介质主要是电容器纸和塑料薄膜。

(一) 电容器纸

电容器纸是用硫酸盐木纸浆制成。它的特点是厚度薄、公差小、密度(也称紧度)和厚度范围大等。对电容器纸的一般要求是表面要平整, 无裂口、针孔、纤维堆积、死折子及机械损伤等。

电容器纸按使用要求不同分为A和B两类, 按紧度不同分为I和II等型号。A类电容器纸主要用于电子工业用电容器; B类电容器纸主要用于电力电容器, 它又分为B和BD(高温低损耗纸)两类。B类电容器纸的性能见表1-3。

表1-3 电力电容器纸的一些性能指标

指 标 名 称	B-I型			B-II型			BD-I型			BD-II型			BD-0型		
	10	12	15	8 0.4	10	12	15	10	12	15	8 0.5	10		12	15
厚度 (μm)	10	12	15	8 0.4	10	12	15	10	12	15	8 0.5	10	12	15	15
允许误差 ($\pm\mu\text{m}$)	0.7	1.0	1.0	0.5	0.6	0.7	1.0	0.7	1.0	1.0	0.4	0.6	0.7	1.0	0.8
紧度 (g/cm^3)	1.0			1.2			1.0			1.2			0.8		
允许误差 ($\pm\text{g}/\text{cm}^3$)	0.05			0.05			0.05			0.05			0.05 0.04		
纵向断裂长 (m) 不小于	7000	7000	7000	8000	7500	7000	7000	7000	7000	7000	3000	7500	7000	7000	7000
透气度 (ml/min) 不大于	7	5	5	3	3	3	2	7	5	5	3	3	3	2	5
工频交流击穿电压 (V) 不小于	300	325	350	310	350	380	430	300	325	350	310	350	380	430	380
导电质点 ($\text{个}/\text{m}^2$) 不大于	300	150	80	800	400	200	100	300	150	80	800	400	200	100	50
$\tan\delta$ (60°C时) 不大于	0.0017			0.0020			0.0014			0.0020			0.0011		
水分 (%)							4~10								
灰分含量 (%) 不大于							0.35								
水抽出物酸度 (%) 不大于							0.007								
水抽出物碱度 (%) 不大于							0.007								
水抽出物电导率 ($\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$) 25°C时 不大于							4 $\times 10^{-3}$			2 $\times 10^{-3}$					
水抽出物氯化物含量 (%) 不大于							0.004								

电容器纸在常温下化学稳定性很好，但温度在 120°C 以上会明显氧化，温度高达 $150\sim 160^{\circ}\text{C}$ 时即很快分解，但在真空下分解较慢。因此电容器的芯子必须在适当温度下进行干燥，以防纸的性能变坏。

纸的电气性能决定于纸浆的成分及造纸工艺。纸浆中 α 纤维素含量越多、导电杂质越少，纸的电气性能就越好。纸浆中还有树脂成分、灰分、半纤维素及木质素等杂质，它们对介电性能不利。因此造纸过程中应尽量减少这些杂质，并减少机械杂质和污染物混进纸浆中，同时要避免纤维束状堆积、斑点、皱纹、针孔以及厚度不均匀等等，以利于提高纸的电气性能。

电容器纸低温时的 $\tan \delta$ 主要是极化损耗，其值取决于 α 纤维素的含量。 α 纤维素含量越高，半纤维素和木质素的含量愈少，低温下的 $\tan \delta$ 就愈小。电容器纸浆中 α 纤维素含量应控制在90%以上。高温时电容器纸的 $\tan \delta$ 是由纸中夹杂的无机盐低价金属阳离子（主要是 Na^+ 、 K^+ ）及低价阴离子（ Cl^- 和 SO_4^{2-} ）产生的电导损耗。经验指出，高温下纸的 $\tan \delta$ 与纸中低价金属离子含量之间有近似线性关系，当金属离子含量降低到某一程度时， $\tan \delta$ 可以很小。因此，在造纸过程中使用的水需经阳离子、阴离子及混合离子多次交换，以求除去水中的杂质离子。例如BD-0纸用脱盐水冲洗使含钠量在6ppm以下，含钾量在2ppm以下时，干纸在 100°C 时的 $\tan \delta$ 可低于0.0011。

电容器由于损耗产生的热量与介质的 $\tan \delta$ 成正比。这些热量必须散发掉，否则将造成热不稳定，导致热击穿。如果在高温下纸的 $\tan \delta$ 大，电容器就只能在较低的温度下热稳定，允许的工作温度也就较低。反之，如果在高温下电容器纸的 $\tan \delta$ 很小（这种纸称为高温低损耗纸，即BD纸），则电容器即可在较高的温度下热稳定，允许工作温度可相应提高，电容器的容量可大大提高。

采用高温低损耗纸制造电容器不仅能提高产品的热稳定性和寿命，而且可大大提高单台容量，改善比特性。图1-9为我国BD纸的损耗温度关系标准曲线。

纸的密度增大时，其击穿场强、介电系数和 $\tan \delta$ 都会增大。

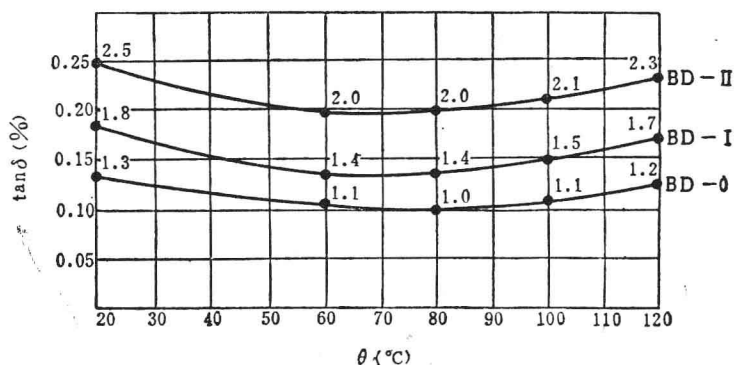


图1-9 高温低损耗纸的 $\tan \delta = f(\theta)$ 标准曲线

近年来金属化纸在电力电容器制造中正在得到推广使用，详见后面“金属化纸和金属化薄膜”部分内容。

(二) 塑料薄膜

塑料薄膜的特点是机械强度高、耐电强度和绝缘电阻都很高；中性和弱极性薄膜的 $\tan \delta$ 很小， ϵ_r 及 $\tan \delta$ 几乎与频率无关。极性和某些非极性薄膜的耐热性往往比纸高。薄膜的主要缺点是难以浸渍。电力电容器中采用的几种薄膜的性能见表1-4。

对于电力电容器用的薄膜最主要的要求是：①平均厚度与标称值差别极小，在大面积范围内是均匀的。为了控制电容器的电容的分散性在标准所规定的范围内（例如 $-5\%\sim 10\%$ ），必须使薄膜的厚度不均匀性也控制在此范围内。②浸渍性和与浸渍剂的相容性好。薄

表1-4 几种塑料薄膜介质的性能

薄膜名称	密度 (g/cm ³)	吸潮 (%)	抗张强度 (N/mm ²)	延伸率 (%)	收缩率 (%)	长期工作温度 (°C)	ϵ_r (工频时)	ϵ 的温度系数 (1/°C)	$\tan \delta$ (工频时) 不大于	ρ_v ($\Omega \cdot m$) (20°C时) 不小于	E_b (MV/m) 不低于	导热系数 (W/(m \cdot °K))
聚丙烯	0.91	<0.01	纵向>100 横向>140	20~100	2	100	2.2	2×10^{-4}	0.0003 (23°C)	10^{14}	200	0.22
聚苯乙烯	1.05	<0.03	40~75	2~4	—	60	2.5	7×10^{-5}	0.0004	10^{15}	110	0.25
聚酯	1.39	0.3~0.4	>140	40~130	3	120	3.2	5×10^{-4}	0.003	10^{14}	160	0.15
聚碳酸酯	1.2	<0.01	50~70	100	—	125	3.0	3.5×10^{-4}	0.002	10^{14}	160	0.25

膜用作电力电容器介质时，很重要的是极板之间不能留下未浸渍部分。因薄膜浸渍性差，一般在膜层之间夹入电容器纸，或者铝箔、薄膜做成凹凸不平的表面，使浸渍剂充满极板间的空间而不留下空隙。其次是薄膜介质不会因与浸渍剂共存而变质、溶解和膨胀使薄膜被破坏；同时也不会使浸渍剂变质。③介电常数高，介质损耗小。介电常数高可使电容器的比特性提高，介质损耗小可以减少交流电容器中的发热从而保证热稳定性。④不含杂质和弱点，耐电强度高。电容器要有承受长期电压作用的能力，主要是靠极板间的固体薄层介质。希望薄膜介质有优良的耐局部放电性能。耐局部放电性能越好，电容器的寿命就越长，交流长时间的击穿强度也就越高。根据以上要求，下面来讨论目前用得较多的几种薄膜介质。

1. 聚丙烯薄膜 电容器用的聚丙烯薄膜是用聚丙烯树脂挤压成厚片后再经双轴定向拉伸或吹塑成膜。根据聚丙烯分子中甲基的结合方式，聚丙烯有三种结构形式：反式立构，结晶态，甲基在卷曲面的同侧；反式立构，结晶态，但甲基在两侧无规则分布；无规聚合物，是无定形态，甲基在两侧作无规则分布。用于电容器的双轴拉伸膜几乎都是等规结构，有极少量的非结晶态的非等规结构。聚丙烯薄膜的特点是耐电强度高，储能因素可以大，介质损耗小，机械强度高，有优良的化学稳定性、耐热性及电老化性能。聚丙烯的来源广，价格比较低，是电力电容器比较理想的固体介质材料，正在逐渐取代电容器纸，现在有不少国家已制造全聚丙烯薄膜介质的电力电容器。

聚丙烯薄膜有光膜与粗化膜二种。光膜表面光滑难于浸渍，前几年多与电容器纸复合后再浸油，薄膜所占比例（一般膜纸复合介质中膜占60%~75%）越高，工作场强可以取得越高。为了改进浸渍性能，铝箔可以压花或用粗化膜。目前已比较多地生产全膜电容器。

使用聚丙烯薄膜介质时应注意浸渍剂和聚丙烯薄膜之间的相互作用，其中包括溶解性、膨胀和浸润性等。

薄膜浸油后，油分子慢慢向膜中扩散，造成薄膜吸油，同时膜中非结晶和非等规部分逐渐被溶解。显然这二种过程进行的快慢与浸渍剂的性质、温度和时间有关。随着浸渍时间的增长，吸油和溶解都逐渐趋于饱和。温度升高，吸油量和溶解量都加大。浸渍剂的分子结构、分子量、粘度都会影响吸油和溶解的速度和数量。吸油可以提高膜的性能，并使电容器浸透，这是有利的；但是过多的吸油将会使膜过量膨胀，反而恶化膜的性能，所以希望膜的吸油率要适量。根据薄膜浸渍不同的油前后的质量和厚度变化，吸油率和厚度膨胀率可计算如下

$$\text{吸油率} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100\% \quad (1-12)$$

$$\text{膨胀率} = \frac{d_2 - d_1}{d_1} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中 W_1 、 W_2 ——分别为浸渍前后薄膜的质量 (g)；

d_1 、 d_2 ——分别为浸渍前后薄膜的厚度 (mm)。

用烷基苯 (AB)、二芳基乙烷 (PXE) 和异丙基联苯 (IPB) 浸渍的国产粗化聚丙烯薄膜在不同温度下的吸油率和厚度膨胀率见图1-10和图1-11。按聚丙烯薄膜经浸渍后吸油率不大于12%考虑, 二芳基乙烷和异丙基联苯浸渍温度以及电容器运行的温度都不宜超过85°C, 用烷基苯作浸渍剂时, 温度还应低些。由于薄膜的溶胀而增厚, 可能造成电容器中膜层之间以及膜层和铝箔电极之间的油道被阻塞, 影响浸渍剂进到膜层间或膜与铝箔间的中间部分, 因此设计电容器时应根据浸渍后薄膜的溶胀情况来选取压紧系数。如果膜的溶胀率为12%, 则压紧系数宜取小于0.85的值。

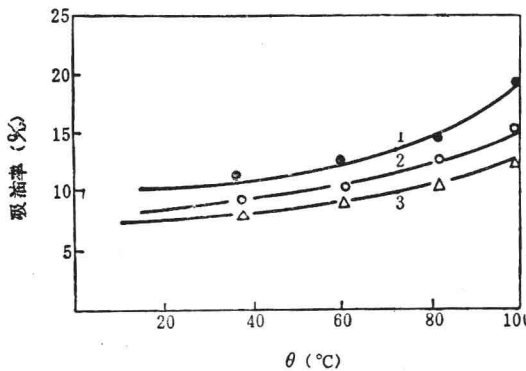


图1-10 使用不同的浸渍剂时, 聚丙烯薄膜的吸油率与浸渍温度的关系

1—浸烷基苯 2—浸异丙基联苯 3—浸二芳基乙烷

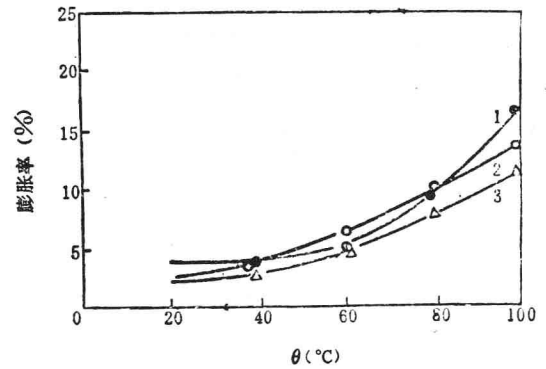


图1-11 用不同浸渍剂浸渍的聚丙烯薄膜的膨胀率与浸渍温度的关系

1—浸烷基苯 2—浸异丙基联苯 3—浸二芳基乙烷

电容器用聚丙烯薄膜作介质, 重要的是要考虑其浸渍性。电容器元件都是卷制并经压紧的, 浸渍剂在膜层间的扩散如同毛细管现象一样, 与薄膜的可湿润性、表面状况以及浸渍剂的表面张力等因素有关。粗膜的表面有很多细小沟道有利于浸渍剂的扩散, 粗化沟道越均匀、越细密, 浸渍性能就越好。光膜表面光滑, 卷成元件后的膜层间相互吸牢则不利于浸油, 要改善其浸渍性能, 常常是在膜层间夹纸, 纸起灯芯作用使浸渍剂充满膜层之间。粗膜或夹纸的光膜元件浸渍的速度是较快的, 一般在15 h都可浸透整个元件。

薄膜浸渍后, 薄膜中非结晶、非等规部分以及灰分杂质等溶解于浸渍剂中。溶解量一般较小, 对浸渍剂和薄膜的介电常数不会有明显的影响。但是, 膜中的抗氧化剂和杂质溶于浸渍剂中则会使浸渍剂的 $\tan \delta$ 增大, 增大的程度与浸渍剂的溶解能力以及膜中加入的抗氧化剂成分和杂质情况有关。试验表明: 烷基苯、二芳基乙烷、异丙基联苯浸渍聚丙烯薄膜时, 浸渍剂和薄膜的介电常数变化甚微, 而浸渍剂的 $\tan \delta$ 有所增大, 此外由于溶胀使膜变厚, 击穿电压也有所提高。

浸渍时溶于浸渍剂中的杂质除膜本身所含的之外, 还有元件卷制过程中薄膜表面吸附的灰尘等。为了减少溶于浸渍剂中的灰分杂质, 一方面要求膜中灰分含量低, 目前电容器用的聚丙烯薄膜的灰分含量可小于30ppm; 另一方面要求聚丙烯薄膜元件的卷制在超净化间进

行。聚丙烯薄膜元件卷制时，车间灰尘含量对膜的击穿强度的影响见图1-12。薄膜中的灰分杂质不但在浸渍薄膜时会使浸渍剂的 $\tan \delta$ 增大，更重要的是膜中的灰分是形成膜中缩孔(这将成为耐电压的弱点)的核心，为了提高膜的耐电强度也要求含灰分量低。前面提到聚丙烯薄膜浸渍时会溶胀，如果过分膨胀，则可能使膜层间的间隙全部堵塞，这对浸渍十分不利，压紧系数取小虽然可弥补膜膨胀带来的坏作用，但是压紧系数不可能取得很小(否则元件松散，体积过大)，因此希望浸渍时薄膜的膨胀率小些。目前的聚丙烯薄膜已能做到用二芳基乙烷在 100°C 下浸48h后的膨胀率低于10%，膜的溶解部分约为2%。使用这种低膨胀率的聚丙烯薄膜可以采用较高的浸渍温度和稍大的压紧系数。

目前我国用聚丙烯薄膜与纸复合介质的并联电容器极板间介质的平均工作场强已超过 $30\text{MV}/\text{m}$ ，全膜的还高，显著地改善了电容器的比特性。另外由于聚丙烯薄膜的 $\tan \delta$ 很小，耐短时过电压的特性好，适用于制造单台大容量的高压并联电容器，国内单台并联电容器的容量已达到 5000kvar 。利用聚丙烯薄膜的优良的耐短时过电压特性，可以制造运行可靠的串联电容器。如果用聚丙烯薄膜制造低压电容器，则应使用薄的膜或用金属化薄膜(厚约 $6\mu\text{m}$)才能充分利用其耐电强度高的特点，从而提高电容器的比特性。

2. 聚酯类薄膜 这包括聚对苯二甲酸乙二酯(简称聚酯)、对苯二甲酸丁酯、聚碳酸酯等薄膜。它们是极性介质， ϵ_r 约3.5，但是工频及 $80\sim 100^{\circ}\text{C}$ 时 $\tan \delta$ 较大，耐局部放电性能较差，不适用于交流电力电容器。但是由于介电常数和体积电阻系数较高，耐热性好，长期以来已用于低压电容器。它们可用作直流和脉冲电容器的介质，提高电容器的比能、绝缘电阻及工作温度。

3. 其他薄膜 用于电力电容器的薄膜还有聚苯乙烯和聚二氟乙烯薄膜。聚苯乙烯薄膜较早广泛用于高频和电容量要求稳定的场合。在电力方面，由于 $\tan \delta$ 很小，曾用于制造电热电容器，这样可用空气自然冷却，使结构简化，但选择聚苯乙烯电容器的浸渍剂有一定困难，要求浸渍剂的芳香烃含量少，显然目前常用的烷基苯、二芳基乙烷及异丙基联苯都不适合用于浸渍聚苯乙烯薄膜，过去用液体石蜡浸渍。聚丙烯薄膜大量用于电力电容器后，聚苯乙烯已很少用于电力电容器。聚二氟乙烯薄膜具有亚乙烯基，介电常数大($\epsilon_r \approx 10$)，但 $\tan \delta$ 也大，可以用于直流电容器和脉冲电容器。

(三) 金属化纸和金属化薄膜

金属化纸和金属化薄膜是在纸或膜表面上靠蒸发金属而喷涂上一层 $30\sim 50\text{nm}$ 厚的铝或锌或锡一铅层做电极，其特点是具有自愈性，即当金属化纸或金属化膜的某处被击穿时，极板之间产生短路电流而使击穿部位周围的金属层熔化并蒸发，从而恢复极板间介质的绝缘性能。使用金属化纸或金属化薄膜的电容器，介质的工作场强可以提高，从而改善比特性，

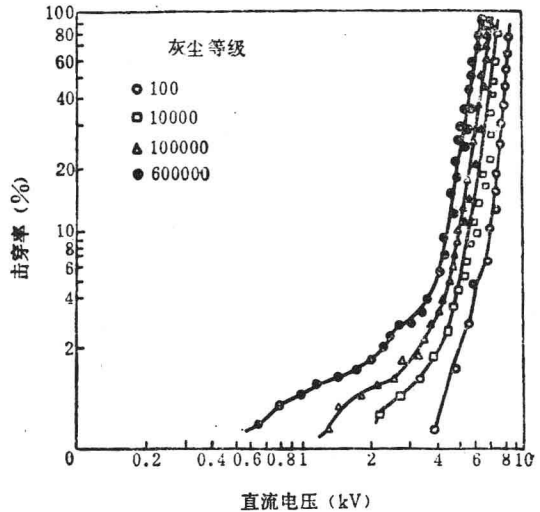


图1-12 卷制车间灰尘对聚丙烯薄膜的直流击穿强度的影响(聚丙烯薄膜厚 $9\mu\text{m}$)