

电 容 器

下 册

(內 部 資 料)

成都电讯工程学院选編

北京科学教育出版社

1961, 7

前 言

解放以后，特别是近几年来，随着我国无线电电子学事业的飞跃发展，我国的无线电材料和元件工业迅速地建立了起来，并且它的规模还正在日益扩大。

由于这种原因，不但在我国从事无线电材料和元件的人员越来越多，而且还迫切地要求为这方面培养出一支强大的科学技术队伍。因此，编选一套有关这方面的教材，就成了目前一项需要迅速完成的重大任务。

根据这种形势和要求，组织了电容器教材的编选，并且为了首先满足今年下半年的教学需要，先编选了该教材的下册。计划在下册编选结束以后，就开始其上册的编选工作。

按电容器课程的教学时数分配，上下册教材的分量应当大致相等，因此，拟定在上册中包括电容器的一般性能、真空电容器、云母电容器、玻璃电容器和瓷介电容器，而在下册中包括纸介电容器、有机薄膜电容器、电解电容器、电容器的设计和计算以及电容器电气参数的测量。

由于编选人员的实际经验和理论知识的有限，再加上这次教材的编选时间较短，所以在下册内容中定会有很多缺点和错误，并且还会由于先编下册，后编上册的原因，在上下册的内容和图表方面难免出现一些重复。因此希望读者多多提出意见和批评，以使该教材在再版时，能有比较显著的改进和提高。

1961年5月15日

目 录

前 言

第六章 紙介电容器	1
§ 6-1. 紙介电容器的特点	1
§ 6-2. 制造紙介电容器所用的材料及其性能	2
§ 6-3. 紙介电容器的制造工艺	11
§ 6-4. 紙介电容器的型号及結構	27
§ 6-5. 紙介电容器的特性及应用	35
§ 6-6. 金属化紙介电容器的特点	36
§ 6-7. 制造金属化紙介电容器的材料及其性能	37
§ 6-8. 金属化紙介电容器的制造工艺	37
§ 6-9. 金属化紙介电容器的型号及結構	42
§ 6-10. 金属化紙介电容器的性能及应用	45
第七章 有机薄膜电容器	49
§ 7-1. 聚苯乙烯电容器的特性	51
§ 7-2. 制造聚苯乙烯电容器所用的材料及其性能	52
§ 7-3. 聚苯乙烯电容器的制造工艺	53
§ 7-4. 聚苯乙烯电容器的型号及結構	55
§ 7-5. 聚苯乙烯电容器的性能及用途	58
§ 7-6. 聚四氟乙烯电容器	60
§ 7-7. 其他有机薄膜电容器	62
第八章 电解电容器	66
§ 8-1. 电解电容器的一般性能	66
§ 8-2. 电解电容器的結構类型	67

§8-3. 鋁電解電容器的製造.....	71
§8-4. 鋁氧化膜的結構和性能及鋁電解電容器的等效電路.....	91
§8-5. 鋁電解電容器的電氣性能.....	97
§8-6. 鉭電解電容器	102
§8-7. 鈦電解電容器	115
第九章 電容器的設計和計算	118
§9-1. 電容器設計和計算的依據	118
§9-2. 設計電容器的主要過程	119
§9-3. 電容器芯子的設計和計算	120
§9-4. 確定電容器的外部結構	143
§9-5. 計算電容器內各種材料的用量	146
§9-6. 計算電容器的比率體積和比率重量	147
§9-7. 電容器的熱計算	148
§9-8. 計算電容器的散熱系數 α	160
第十章 電容器電氣參數的測量	163
§10-1. 測量電容器的絕緣電阻	163
§10-2. 測量電容器的容量和損耗	168
§10-3. 測量電容器的電容量溫度系數	175
§10-4. 測量電容器的耐壓強度	177
主要參考文獻	182

第六章 紙介电容器

§6-1 紙介电容器的特点

紙介电容器是以电容器紙作为介質的一种电容器。实际上,作为电容器介質的不單是电容器紙,而是經過浸漬料(極性的或非極性的,有液体的,半液体的,也有固体的)浸漬以后的复合介質,这种复合介質称为浸漬紙。

紙介电容器的最大优点是作为电容器介質的电容器紙能制得很薄,并且可以捲繞成卷的带条。这一点大大的优于用在电容器制造业上的无机介質材料。在現代能制成电容器紙的厚度从5~6至20~30微米,但是厚度大于12~15微米的紙現在已經很少采用了,厚度为5~6微米的紙,其机械强度还是很高的,最大拉伸强度能超过1000公斤/厘米²。电容器紙厚度的最低極限值,在不久的将来想必能成功地达到4微米,再要繼續减少想必可能性是不大了,因为断裂应力的限制就不能保証在电容器芯子捲繞时不断裂。同时,紙的厚度减小,紙价也激增,这是因为要使紙張極薄,必須增加打紙漿的时间,因此就增加了电能的消耗,紙的合格率也会大大降低。

至于用在电容器制造业上的无机介質的厚度其最小值远大于电容器紙。例如陶瓷的厚度一般只能做到200微米,即使在所有无机介質中厚度算是最小的云母片也不能低于20微米,而且这种材料产量少,价格貴,限制了电容器生产的發展。如上所述,由于电容器紙厚度很小,故在工作电压不高的条件下可以制成电容量大的而体积小的电容器,即它的比率电容量 $C_{y\pi}$ 大或者說它的比率体积 $v_{y\pi}$ 小。因为电容器的比率体积与介質厚度的平方成反比,所以如果在 ϵ 值相同的条件下,制造一个标称电容量 $C_{\text{ном}}$ 相同的电容器,若以厚度为7微米的單層金属化紙来代替厚度为250微米的陶瓷介質,那么它的比率体积就减小到1/1300,如果与厚度为25微米的云母片介質比較,电容器的比率体积也减小1/13。因此,当 $\epsilon = 5 \sim 10$ 时,用固体无机介質就不能制得标称电容量大而尺寸适当的电容器,例如玻璃和普通陶瓷电容器的最大电容量 $C_{\text{макс}} = 500 \sim 1000$ 微微法,而云母电容器的 $C_{\text{макс}} \leq 0.1$ 微法。但是紙介电容器的电容量很容易达1个微法或10个微法。因此,与无机介質电容器比較起来,紙介电容器的标称电容量范围显然較大。

初看起来,用有超高 ϵ 值的强性陶瓷介質制成的电容器,似乎有与紙介电容器相近的标称电容量。但是在实际生产中,要制造 $C_{\text{ном}}$ 大于0.1微法的强性瓷介电容器,已感十分困难。

所以,当要求标称电容量大的情况下。紙介电容器与无机介質电容器比較起来具有显著的优越性。

在工作电压相当大时,电容器的比率体积 $v_{y\pi}$ 决定于工作电場强度 $E_{\text{раб}}$ 的容許值。 $v_{y\pi}$ 的大小与 $E_{\text{раб}}$ 的平方成反比。所以在这种情况下,最关紧要的是介質的耐压强度。很薄的电容器紙的耐压强度又比无机介質高得多。即使在电极面积很大的情况下(以千平方厘米計),在

短时試驗中，其耐压强度也能达到約300千伏/毫米，比最优良的陶瓷介質高出10倍左右。无机介質中只有云母和玻璃在厚度很薄时，才有与此近似的耐压强度值。所以紙介电容器，即使在它的 ε 值不大的情况下，也能够获得很大的比率能量 $w_{уд}$ 。因此，在高压和大电容量方面，紙介电容器也优于无机介質电容器。

因为电容器紙可以制成成卷的带条，所以就可以在捲繞机上进行电容器芯子的捲繞，便于在电容器制造过程中实现机械化和自动化。

到目前为止，紙介电容器仍然是电容器的主要类型。在頗大的程度上，这不仅决定于电容器紙有相当高的耐压强度和机械强度，而且还由于它的价格相当低廉，因为现代的电容器紙是用木質纖維制成的，因此原料很不缺乏，而且价格又相当低廉。所以，在必要时，电容器紙的生产可以得到很迅速的扩大。目前我国已經能够制造电容器紙，而且已在电容器制造中应用。

紙介电容器与无机介質电容器比較起来也存在着严重的缺点。首先应当指出的是紙介电容器具有相当大的 $tg\delta$ 值，所以它的应用范围只能局限于直流电路或低频（不超过几千赫）电路中。频率增高则 $tg\delta$ 值显著加大，在无电频率时，它的 $tg\delta \approx 100 \sim 200 \cdot 10^{-4}$ 。

紙介电容器的化学稳定性很差，有严重的老化现象，这就使得紙介电容器的耐压强度随时间而逐渐降低。由此之故，紙介电容器的工作电场强度远小于其瞬时耐压强度。虽然如此，紙介电容器的 E_{pas} 还是高于无机介質电容器。

大家知道，有机材料的热稳定性不如无机材料。所以，紙介电容器的工作温度通常在 $85 \sim 100^\circ C$ 以下。在工作电场强度和电容量不大的条件下也只能达到 $125^\circ C$ 。

紙介电容器的另一个严重的缺点是电容量温度系数大。

紙介电容器最后一个缺点是吸湿性很大，即使应用在平常的湿度下，一般也需要密封，这样非但增大了比率体积，而且增加了工艺的复杂性，因而大大的提高了电容器的成本。这种情况对于标称电容量小的电容器，表现得尤为突出。所以，通常較少地制造标称电容量小于0.001微法的紙介电容器。

§ 6—2 制造紙介电容器所用的材料及其性能

I. 制造紙介电容器极板所用的金属箔

A. 錫箔：用来制造紙介电容器的錫箔（更正确地說是加有錫的錫鉛合金箔。加入錫的作用是提高合金箔的压延能力和增大其机械强度）的厚度为7微米，其成分为：84~85%的錫，13~14%的鉛，1~2%的鉛，抗張强度为5.5~6.5公斤/毫米²，断裂时的伸長度为1.5~2%，比电阻不大于25微欧·厘米。

錫箔的优点是容易焊接，并且由于它本身很柔軟因而比較容易地与介質达到紧密貼合。錫箔在常温下，在空气中氧化作用極為微弱，这是因为在它的表面上复盖着一層極薄的氧化層，起着保护作用。水对它沒有影响，稀酸对它的作用也很微弱。另外在直流电压下，錫箔对氯化物催化作用很小，也就是說它对氯化物浸漬的直流电容器是惰性的。錫箔的缺点是压延很大，在电容器的制造过程中受到压力后厚度就会变薄，面积增大，因而使电容器的电容量增大（平扁形电容器芯子），加大了电容器的容差。除此以外，錫箔的价格較高（与鋁箔

比較), 比电阻較大, 导热系数較小。

目前錫箔已很少用在紙介电容器制造中, 最常用的是鋁箔。

B. 銅箔: 在紙介电容器的生产中当要求極板的机械强度較大时就采用銅箔。这种箔大多用来制造电容量不大工作頻率較高的紙介电容器(通常在10匝以下, 箔長小于100毫米)。除此以外, 銅箔还用作普通捲繞式芯子的接触片。这种銅箔的含銅量不应低于99.7%, 其厚度通常在15~50微米的範圍內。

銅箔的优点是机械强度較大和比电阻 ρ 較小 [$\rho = 1.69$ 微欧·厘米 ($20^\circ C$)]。由于它的比电阻 ρ 值相当小, 因而就大大的降低了电容器在高频时的損耗角正切 $\tan \delta$ 。因为銅是一种强烈的催化剂, 在溫度較高的情况下, 对碳氢化合物类的浸漬材料有着强烈的催化作用, 所以用銅箔作極板或接触片时需要用电鍍的方法在其表面上鍍一層錫或銀。当用銅箔作为極板时, 由于它的硬度較大, 因而为了保証極板和介質能很好的紧密貼合, 需要在电容器芯子上加以較大的压力。因为銅箔的边緣上往往存在着毛刺, 有可能戳穿介質而降低了电容器的耐压强度, 所以为了消除它的危害性, 需要将薄条通过滾筒之間的軋輥以去掉毛刺。

用銅箔作極板时, 即使在电容器芯子上加以很大的压力, 也不可能完全消除介質和極板之間的隙縫。在浸漬以后这些隙縫被浸漬料所填滿。因为浸漬料的介电常数 ϵ 大多比电容器介質的介电常数 ϵ 小, 所以, 隙縫的存在会使整个电容器的电容量降低。

由于被浸漬料所填滿的隙縫存在, 使之在極板間出現层間極化, 增大电容器的吸收系数, 引起电容量在低頻範圍內就随頻率的改变而显著的变化。由于在溫度改变时, 电容器的膨脹和收縮使隙縫的大小發生改变, 所以会引起电容量的附加变化, 如果隙縫大小的改变帶有残余性質, 則会引起电容量的不可逆变化。

B. 鋁箔: 在現代电容器制造业上用来作为極板的主要金属箔是鋁箔。鋁箔具有很小的比重(其密度为2.7公斤/厘米³, 比銅箔輕3.5倍), 不大的比电阻($\rho = 2.80$ 微欧·厘米)。鋁的比电阻比銅稍大, 但比錫却小得多。除此以外, 鋁箔的导热系数較大, 压延性能很好, 容易制成很薄的箔片, 价格很便宜。由于以上原因, 現在紙介电容器制造业中都采用鋁箔, 較少的采用銅箔和錫箔。鋁箔的缺点是难于焊接。但現在已經研究成功了焊接鋁箔的焊料, 其配方如下:

- 1) 69%的錫, 30.5%的鎢, 0.3%的鋁和0.2%的銀。
- 2) 67.2%的錫, 31.8%的鋅, 0.64%的鎢和0.36%的鋁。
- 3) 65%的鎢, 35%的鋅。
- 4) 63%的錫, 37%的鋅。

对于用鋁箔捲繞的无感式芯子, 其两端鍍錫用的合金有如下的配方: 61.6%的錫+35.2%的鋅+3.2%的鎢(熔化溫度为150~170 $^\circ C$)或者是57%的錫+20%的鎢+23%的鋅。芯子两端鍍錫以后, 可以采用通常的HOC-40焊料来进行引出綫的焊接。

在選擇極板材料时, 除考虑比电导和机械性能以外, 还必须考虑它对电容器的浸漬料老化的影响。在直流电压和較高的溫度作用下, 鋁箔对氯化物浸漬材料的分解有强烈的催化作用, 因而使紙介电容器的电导迅速增大和显著地縮短了电容器的寿命(圖6-1)。对于非極性碳氢化合物浸漬的紙介电容器, 鋁箔反而比錫鉛箔的催化作用較小(圖6-2)。这种現象可用鋁箔表面上存在着的一層天然氧化膜的保护作用来解釋。因为在交流电压下, 介質中的电解性老化过程很微弱, 因而用鋁箔比用鉛錫箔好, 用鋁箔做的电容器具有相当穩定的电气性能和相当長的寿命, 甚至对于用氯化物材料浸漬的紙介电容器也是如此(圖6-3)。

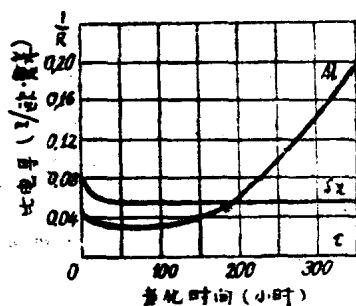


圖 6-1 在直流电压和較高的温度作用下，極板材料对氯化物浸漬的紙介电容器的电导与时间关系的影响
Al—鋁箔； Sn—鉛錫箔。

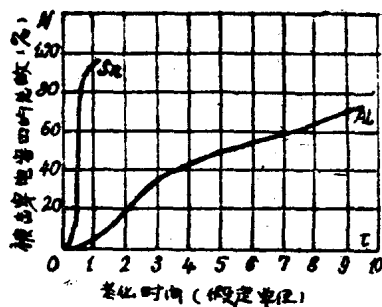


圖 6-2 在直流电压和較高的温度下，極板材料对电容器击穿数目的影响（电容器是用非極性碳氢化合物浸漬的紙介电容器）
Al—鋁箔； Sn—鉛錫箔。

在直流电压和較高的温度下，用鋁箔做的紙介电容器的稳定性可以用在浸漬料中加 0.25~0.5% 的蔥醌的方法得到显著的提高。

用来制造紙介电容器的鋁箔含鋁量为：99.5~99.6%。鋁箔的厚度为 7~8 微米，当它的断裂时的伸長度不小于 0.5% 时，其最大拉伸强度应当不低于 7.5 公斤/毫米²，这种鋁箔称为刚性鋁箔。經退过火后的鋁箔，其断裂时的伸長度可达 2%，但是它的抗張强度却被降低了。有些国家采用厚度为 5~6 微米的鋁箔来制造紙介电容器，但在苏联和我国则大多用这种鋁箔来制造小型化电容器。

必須指出，作为極板材料，銀是最好的。它具有小的比电阻和大的导热系数，但它的价格很貴，除在特殊的情况下很少采用。

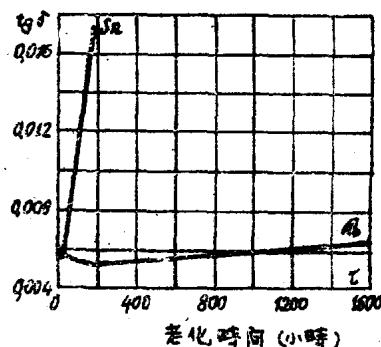


圖 6-3 在交流电压和較高的温度下，極板材料对氯化物浸漬的紙介电容器的损耗角正切与时间关系的影响
Al—鋁箔； Sn—鉛錫箔。

II. 紙介电容器的浸漬材料

A. 浸漬料的分类：

在現代的电容器制造业中，用来浸漬紙介电容器的浸漬材料的种类很多，并且随着科学技术的迅速发展，各种新型的浸漬材料不断出現，所以紙介电容器的浸漬料的品种将还不断的增加。

对于名目繁多和性能各異的各种浸漬料，可按其物理状态和化学特性分类如下：

1) 按常温下的物理状态分为：

a) 固体浸漬材料，

i) 蜡类浸漬材料，

- (1) 非極性的：石蜡，純地蜡，合成石蜡，合成地蜡，
- (2) 極性的：鹵蜡，油蜡。

ii) 树脂类浸漬材料：虫胶，酚醛树脂，聚乙烯吡唑等。

6) 半液体浸漬材料：

i) 非極性的：凡士林，

ii) 極性的：油——松香混合物。

B) 液体浸漬材料：

i) 非極性的：矿物油，硅油等；

ii) 極性的：苏伏油，蓖麻油等。

2) 按浸漬材料的化学成分分为：

a) 飽和碳氢化合物浸漬材料：矿物油，凡士林，石蜡，純地蜡，合成石蜡，合成地蜡等；

b) 氯化芳香族浸漬材料：鹵蜡，苏伏油等；

B) 含有有机酸和醚的浸漬材料：油——松香混合材料，蓖麻油等；

Г) 硅有机化合物浸漬材料；

Д) 半导电性浸漬材料。

Б. 浸漬材料的特性：

非極性浸漬材料的优点是具有較高比电阻和很小的損耗角正切，但是从电容器制造业的观点来看，这类材料的最大缺点是它們的介电常数較低(其值約在2.0~2.5之間)。根据电容器对浸漬料的介电常数的要求，極性材料較好，因为它們的介电常数大。在其他条件相同的情况下，用氯化物材料浸漬比用非極性材料浸漬的电容器，在电容量方面可增大25~50%左右。这种材料的主要缺点是：有毒性，在高温时电气性能不够好，在低温时 ϵ 值有显著的下陷，并且当用鉛箔作極板时，用氯化物浸漬的紙介电容器在直流电压下化学性能不够稳定，氯化物材料發生分解。制造紙介电容器常用的各种浸漬材料的主要特性如表6-1所示：

表6-1 制造紙介电容器常用的各种浸漬材料主要特性

名 称	密 度 克/厘米 ³	熔点或凝固点 t°c	ϵ 1000赫和 20°c时	$\tan \delta \cdot 10^4$ 1000赫和20°c时	P_v 1000赫时欧·厘米
电 容 器 油	0.86~0.89	-40~-45	2.1~2.2	1~2	$10^{12} \sim 3 \cdot 10^{13}$
粘 性 石 油	0.90~0.91	-5~-10	2.1~2.2	1~2	$10^{12} \sim 3 \cdot 10^{13}$
聚 异 丁 烯	1.00~1.01	低于-60	2.2~2.3	0.5~1	$3 \cdot 10^{12}$
卡路林-2 (苏联 生产的一种硅油)	0.92~0.95	低于-30	2.2~2.4	2~5	$3 \cdot 10^{12}$
凡 士 林	0.83~0.88	+30~+40	2.1~2.2	2~3	$5 \cdot 10^{12}$
石 蜡	0.85~0.92	+50~+55	2.1~2.2	3~7	$3 \cdot 10^{12}$
地 蜡	0.88~0.95	+65~+80	2.2~2.5	3~5	$5 \cdot 10^{12}$
合 成 地 蜡	0.91~0.96	+100~+105	2.4~2.6	3~5	$10^{12} \sim 10^{13}$
蓖 麻 油	0.95~0.97	-15~-17	4.2~4.7	10~15	$2 \cdot 10^{10}$
三氯联二苯	1.35	-18	5.5	5~10	$10^{11} \sim 10^{12}$
五氯联二苯 (苏伏油)	1.54	+5~+6	4.6	5~10	$3 \cdot 10^{11} \sim 3 \cdot 10^{12}$
64%五氯联二苯, 36%三氯联二苯	1.51	-35	4.3	5~10	$10^{11} \sim 10^{12}$
氯 化 醚 (PFE-772)	1.65	-35	6.1	2~5	$5 \cdot 10^{11} \sim 10^{12}$
多 氯 化 萘	1.5~1.6	+90~+130	4.5~5.5	5~20	$10^{10} \sim 6 \cdot 10^{11}$
羊 毛 脂 醇	—	+100	10~12	—	—
油 蜡	0.97~0.99	+75~+80	10~20	700~1500	10^{12}
聚 乙 烯 咪 唑	1.2	达+150 单体+60~+70	3	7~10	10^{12}

III. 电容器纸

制造纸介电容器是用厚度极薄、密度很大和含无机杂质（灰分）极少的特种纸——电容器纸。电容器纸的厚度为5~6至20~30微米，但是厚度大于12~15微米的纸现在已经很少应用。在苏联和我国生产的电容器纸，按照密度分为两种规格： $KOH-1$ （比重为1克/厘米³）和 $KOH-2$ （比重为1.2克/厘米³）。第一种纸用来制造交流电容器，第二种纸用来制造直流电容器。电容器纸的最大拉伸强度为1000~1200公斤/厘米²，未浸渍纸的耐压强度为30~35到45~50千伏/毫米（50赫），它的耐压强度随着密度的提高和厚度的减小而增大。品质优良的电容器纸具有极小的透气率（小于2~3厘米³/分钟）和极低的灰分：0.2~0.3%，电容器纸中含铜和铁的总量应当小于0.015%，其中的氯化物和硫酸盐的含量应该减少到最低限度，电容器纸中的水提取物反应应当有近于中性的弱碱性反应，这种提取物的比电导应当小于 $4 \cdot 10^{-5}$ /欧·厘米。电容器纸应当有极高的均匀度和极少的结构上的缺陷。

在以前认为：制造电容器纸必须用长而细的亚麻纤维，短而粗的木质纤维不适宜用来制造机械和电气性能甚高，而且厚度极薄的电容器纸。但是现在已经成功地掌握了用硫酸盐木质纤维来制造电容器纸。用这种纤维所制得的纸在机械和电气性能方面，都与用亚麻纤维制成的电容器纸有相同的指标，并且在耐热性能和抗老化性能方面还优于亚麻纤维纸。这样，应用木质纤维不但是提高了电容器纸的性能，而且更重要的是开辟了大量制造电容器纸的原料来源。

未浸渍的电容器纸在风干状态下，含有空气20~35%和水分5~7%，因此，为了提高纸介电容器的电气性能，在电容器芯子捲绕以后，必须进行干燥与浸渍，以除去其中的水分和空气。这样，浸渍纸就成了纤维层和浸渍料的复合介质。

纤维素的介电常数 $\epsilon_K \approx 6.5 \sim 7$ ，当温度降低时， ϵ_K 值下降（因为纤维素分子的极化减弱）。当频率为50赫和温度降低到 $-40 \sim -50^\circ C$ 以下时， ϵ_K 值开始显著地减小，当频率为1000赫和温度为 $-100^\circ C$ 时， ϵ_K 值可能减小到一半。若再提高频率，则在高于上述温度下， ϵ_K 即将开始显著减小。当温度在零度以上的范围内， ϵ_K 值随温度的增大而几乎成直线性增长。

纤维素的损耗角正切 $\tan \delta_K$ 相当大，当频率为50赫和温度为 $20^\circ C$ 时， $\tan \delta_K \approx 60 \sim 70 \cdot 10^{-4}$ 。在工频时， $\tan \delta_K$ 的最大值出现于低温（约为 $-90^\circ C$ ）， $\tan \delta_{K \text{ max}} \approx 600 \sim 700 \cdot 10^{-4}$ 。当频率增高时， $\tan \delta_{K \text{ max}}$ 值向高温方向移动。在射频时，在 $0^\circ C$ 以上， $\tan \delta_K$ 的数值即已相当大，因此就限制了纸介电容器在高频范围内的应用。

对电容器纸的结构进行了详细的研究以后，得出了这样的结论：电容器纸是由纤维素和空气隙交替串连构成的。因此，对它的电气性能就可采用串联等效电路（图6-4）来进行分析。图中 C_K 相应于纤维素层所形成的电容量， C_B 相应于空气层所形成的电容量。根据图6-4，经过不太复杂的运算就可得出未浸渍纸的介电常数公式如下：

$$\epsilon = \frac{\epsilon_K \epsilon_B}{(1-x)\epsilon_B + x\epsilon_K} = \frac{\epsilon_K}{1-x+x \frac{\epsilon_K}{\epsilon_B}} \quad (6-1)$$

式中： x ——空气隙所占的体积比例， $(1-x)$ ——纤维素所占的体积比例， ϵ_K ——纤维素的介电常数， ϵ_B ——空气的介电常数。

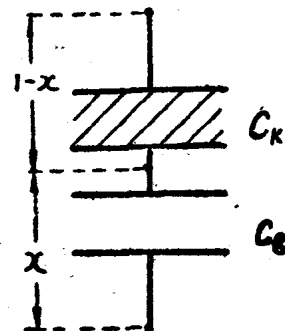


图6-4 未浸渍电容器纸等效电路图

若以 γ 表示电容器紙的密度和 γ_K 表示纖維素的密度，即得出：

$$x = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_K} \quad (6-2)$$

纖維素的密度： $\gamma_K \approx 1.55$ 克/厘米³。

因空气的 $\epsilon_B \approx 1$ ，并考虑到公式 (6-2)，则公式 (6-1) 可改写为：

$$\epsilon = \frac{\epsilon_K}{1 + x(\epsilon_K - 1)} = \frac{\epsilon_K}{\epsilon_K - \frac{\gamma}{\gamma_K}(\epsilon_K - 1)} \quad (6-3)$$

从公式 (6-3) 中就可以清楚的看出，未浸漬的电容器紙的 ϵ 小于纖維素的 ϵ_K ，并且，电容器紙的 ϵ 随着它的密度 γ 的增大而增加。对于 $KOH-I$ 紙： $x \approx 0.35$ 和 $\epsilon \approx 2.2$ ，而 $KOH-II$ 紙： $x \approx 0.22$ 和 $\epsilon \approx 2.9$ 。因此，为了提高电容器紙的性能，須用高介电常数和絕緣强度的浸漬料来进行浸漬。由于浸漬料的性能和物理状态不同（有液体的也有固体的），浸漬后的电容器紙的性能也就各异。

电容器紙經液体浸漬材料浸漬以后，紙內的空气隙完全被液体浸漬料所填满。因此，浸漬紙的等效电路如图 6-5 所示。图中 C_n 相应于液体浸漬材料所形成的电容量。根据图 6-5 所示的等效电路可得出液体浸漬紙的介电常数的如下公式：

$$\epsilon = \frac{\epsilon_K \epsilon_n}{(1-x)\epsilon_n + x\epsilon_K} = \frac{\epsilon_K \epsilon_n}{\epsilon_K - \frac{\gamma}{\gamma_K}(\epsilon_K - \epsilon_n)} \quad (6-4)$$

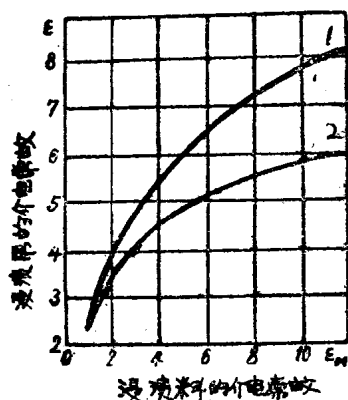


图6-6 浸漬过的 $KOH-I$ 电容器紙的介电常数与浸漬材料的介电常数的关系

- 1——用液体介質浸漬；
2——用固体蜡狀介質浸漬。

$$L_{im} \left| \epsilon \right|_{\epsilon_n \rightarrow \infty} = \frac{\epsilon_K}{1-x} \quad (6-5)$$

当 $\epsilon_n \rightarrow \infty$ 时， $KOH-I$ 紙的 $\epsilon = 10$ ，而 $KOH-II$ 紙的 $\epsilon = 8.3$ 。假若要使电容器

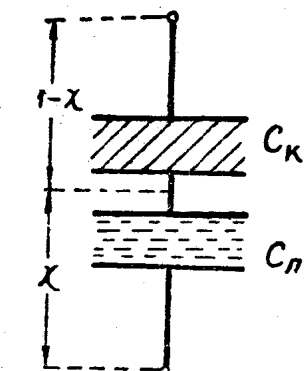


图6-5 液体浸漬的电容器紙的等效电路圖

从公式 (6-4) 中可以看出，液体浸漬紙的 ϵ 随着浸漬材料的 ϵ_n 的增大而增加，但是其增大的规律不是直綫性的，而是逐渐減慢（图6-6），同时 ϵ 值不但与 ϵ_n 有关，而且也与电容器紙的密度 γ 有关，当 $\epsilon_n < \epsilon_K$ 时，紙的密度增大，使 ϵ 增大；但是，当 $\epsilon_n > \epsilon_K$ 时，則随着电容器紙的密度的减小，其 ϵ 增大。在紙介电容器的实际生产中，由于所采用的液体浸漬材料的 ϵ_n 值一般均小于 7，所以采用密度較大的电容器紙来生产直流紙介电容器是恰当的，这样不仅可以提高紙介电容器的比率容量，而且还可提高它的耐压强度。如果力求增大 ϵ_n ，以提高紙的 ϵ 值。当 ϵ_n 接近于无限大时，电容器紙的 ϵ 值也只能达到某一極限数值，这数值可以应用下式計算

紙的 ε 达到这种数值，可用半导电液体（例如，三甲酚磷酸酯和甲酚，它們的比电阻約为 $3 \cdot 10^7$ 欧·厘米）来浸漬。

用固体浸漬材料浸漬的电容器紙与用液体浸漬材料浸漬不同，因为固体浸漬材料在固化时發生收縮，使电容器紙內的空气隙依然部分存在。因此，固体浸漬紙的等效电路可如图6-7所示。如果固体浸漬材料的收縮系数为 y ，浸漬紙的介电常数如下式所示：

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_K}{x(1-y) \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_M} + x(y\varepsilon_K - 1) + 1} \quad (6-6)$$

式中： ε_M 为固体浸漬材料的介电常数。由該式中可以看出，固体浸漬紙的介电常数 ε 与浸漬材料的介电常数 ε_M 、浸漬材料的收縮系数 y 和电容器紙的密度 γ 有关。因此，即使固体浸漬材料与液体浸漬材料的介电常数相同，固体浸漬材料浸漬的电容器紙的介电常数要比用液体浸漬材料浸漬的电容器紙的介电常数小，在圖6-6上就充分說明了这一点，即是用固体材料浸漬的电容器紙的 ε 与 ε_M 的关系曲线低于用液体材料浸漬的 ε 与 ε_M 的关系曲线。当 $\varepsilon_M = 2$ 时，由固体浸漬材料浸漬改用液体浸漬材料时，所制成的紙介电容器的电容量可以增高10~20%；如果用 ε_M 較大的浸漬材料浸漬时，用液体材料浸漬的电容器的电容量的增值就更为显著。当固体浸漬材料的介电常数 $\varepsilon_M = \infty$ 时，浸漬的KOH-I紙的介电常数 $\varepsilon = 7$ ，在前面已經指出，当用介电常数 $\varepsilon_M = \infty$ 的液体浸漬材料时，浸漬的KOH-I紙的介电常数 $\varepsilon = 10$ 。固体浸漬的介电常数 ε 与紙的密度 γ 的关系，其性質与液体浸漬紙的介电常数 ε 与紙的密度 γ 的关系相同，不过固体浸漬紙所得的介电常数的数值比液体浸漬紙的小。

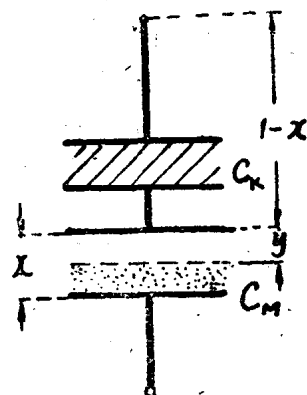


圖6-7 固体浸漬紙的等效电路圖

应用圖6-4就很容易得出未浸漬的电容器紙的損耗角正切的公式为：

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_K}{1 + \frac{\varepsilon_K x}{\varepsilon_B(1-x)}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_B}{1 + \frac{\varepsilon_B(1-x)}{\varepsilon_K x}} \quad (6-7)$$

对于未浸漬的电容器紙可用： $\varepsilon_B \cong 1$ 和 $\operatorname{tg} \delta_B \cong 0$ 。于是上式就可写成：

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_K}{1 + \frac{\varepsilon_K x}{(1-x)}} \quad (6-8)$$

利用公式(6-8)計算得出：KOH-I紙的 $\operatorname{tg} \delta \cong 13 \sim 15 \cdot 10^{-4}$ ，而KOH-II紙的 $\operatorname{tg} \delta \cong 13 \sim 24 \cdot 10^{-4}$ ，即是紙的密度增大使得 $\operatorname{tg} \delta$ 增大，因此用密度較小的KOH-I紙制造交流电容器，而用密度較大的KOH-II紙制造直流电容器。在苏联，当温度为 60°C 和频率为50赫时，对 $\operatorname{tg} \delta$ 的规定值是：KOH-I紙不大于0.0017和KOH-II紙不大于0.002。

应用圖6-5就很容易得出液体材料浸漬的电容器紙的損耗角正切公式为：

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_K}{1 + \frac{\varepsilon_K x}{\varepsilon_n(1-x)}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_n}{1 + \frac{\varepsilon_n(1-x)}{\varepsilon_K x}} \quad (6-9)$$

对于液体材料浸漬的紙，即使用極純淨和極干燥的浸漬料（其 $\operatorname{tg} \delta_n \cong 1.2 \cdot 10^{-4}$ ，即

比 $\lg \delta_K$ 小得很多) 来浸渍, 所得的 $\lg \delta$ 值还是较大 ($\lg \delta \approx 60 \sim 70 \cdot 10^{-4}$)。縱使当温度不高 (不超过 $70 \sim 80^\circ C$), 即是公式 (6-9) 中的等式右边的第二项可以忽略时, 液体浸渍紙的 $\lg \delta$ 也比未浸渍紙的 $\lg \delta$ 大。这可从比較公式 (6-9) 等式中的右边第一项和公式 (6-8) 中清楚的看出, 其原因是由于液体浸渍材料的 ε_n 值比空气的 ε_B 值为大所致。它的物理意义是在紙孔中填满了浸渍材料以后, 由于 $\varepsilon_n > \varepsilon_B$ 的原因, 引起浸渍紙中的电场重新分布, 纖維素上承受的电场强度增大, 并且由于纖維素的损耗角正切很大, 所以电场强度增大以后, $\lg \delta$ 值大为增加。

必須指出, 用 $\lg \delta_n$ 值很大的浸渍材料来浸渍电容器紙时, 特别是在温度較高的情况下, 公式 (6-9) 中的右边的第二项就不能忽略。这样, 液体浸渍紙的 $\lg \delta$ 值較未浸渍紙的 $\lg \delta$ 更为增大。

当浸渍料的比电阻 ρ_n 較小时, 必須考虑到纖維層中对穿小孔的影响, 因为填满这些小孔的液体浸渍材料的电阻与电容量 C_K 并联。由于这种原因, 液体浸渍的电容器紙的 $\lg \delta$ 与液体浸渍材料的比电阻 ρ_n 之間存在着复杂的关系 (圖 6-9)。

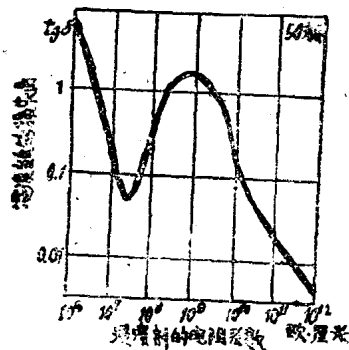


圖 6-9 浸渍紙的损耗角正切与所用液体材料的比电阻間的关系

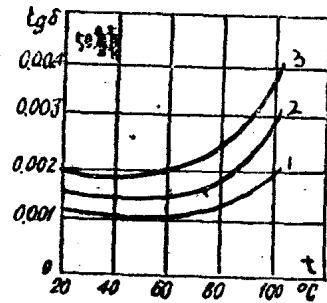


圖 6-8 頻率為 50 赫时, 硫酸盐纖維电容器紙的损耗角正切与温度的关系

- 1 — 干燥未浸渍的紙;
- 2 — 用非極性液体 ($\varepsilon = 2$) 浸渍过的紙;
- 3 — 用極性液体 ($\varepsilon = 5$) 浸渍过的紙。

从圖 6-9 中可以看出, 若适当的選擇液体浸渍材料, 縱使在这种情况下, 还可以得到 $\lg \delta$ 值不太大的浸渍紙。由圖中的曲線看出, 当 $\rho_n \approx 10^7 \sim 10^8$ 时, 浸渍紙的 $\lg \delta$ 出现一个最小值, 因此可以选用适当的半导体液体浸渍材料来浸渍某些类型的低压 (110~220 伏, 50 赫) 紙介电容器。用这种浸渍材料浸渍的紙介电容器的比率容量比用电容器油浸渍大三倍。

由于在固体浸渍材料浸渍的电容器紙中存在着部分空气隙。所以, 当固体浸渍材料和液体浸渍材料有相同的介电常数和损耗角正切时, 用固体材料浸渍的电容器紙的 $\lg \delta$ 值小于用液体材料浸渍的电容器紙。

电容器紙的击穿是当所加电压达到一定数值时, 空气層先被击穿, 然后整个电压都加在纖維層上, 使纖維層击穿, 这时电容器紙完全被击穿, 这个电压即是紙的击穿电压。

将交流电压加于电容器紙上时, 紙內的电场是按各相的介电常数进行分布的。因而得出未浸渍紙的平均耐压强度的公式为:

$$E_{\text{пр сред}} = \frac{U_{\text{пр.в}}}{d} \left[1 + \frac{\varepsilon_B \gamma}{\varepsilon_K (\gamma_K - \gamma)} \right] \quad (6-10)$$

式中: $U_{\text{пр.в}}$ 是紙中空气薄層的击穿电压, 当空气層很薄时 ($6 \sim 8$ 微米或更薄时) $U_{\text{пр.в}}$ 不随空气層的厚度而变化, $U_{\text{пр.в}}$ 的有效值約为 250 伏。

根据同样的理論, 得出在交流电压的作用下, 液体材料浸渍的电容器紙的平均耐压强度

的公式为：

$$E_{\text{пр.сред}} = \frac{U_{\text{пр.п}}}{d} \left[1 + \frac{\varepsilon_{\text{п}} \gamma}{3\varepsilon_{\text{к}}(\gamma_{\text{к}} - \gamma)} \right] \quad (6-11)$$

式中： $U_{\text{пр.п}}$ 是浸渍材料的击穿电压。比较公式 (6-11) 和 (6-10)，就可以看出，浸渍纸的耐压强度高于未浸渍纸的耐压强度，这是由于浸渍料的击穿电压 $U_{\text{пр.п}}$ 大于纸中空气隙的击穿电压 $U_{\text{пр.в}}$ ，除此以外，还由于公式 (6-11) 中的括号内的第二项增大了 $\varepsilon_{\text{п}}$ 倍，因此，在纤维层和浸渍料层之间引起了电场的重新分布，再不象未浸渍纸的那样，所加电压的大部分加在空气层上。当 $\varepsilon_{\text{п}}$ 愈大时，浸渍料层上承受的电压愈小，纤维层上承受的电压愈大，所以整个电容器纸的耐压强度有所提高。

在交流电压的作用下，固体浸渍纸的平均耐压强度的公式为：

$$E_{\text{пр.сред}} = \frac{U_{\text{пр.в}}}{d} \left[1 + \frac{1-\gamma}{y} \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{м}}} + \frac{\gamma}{y(\gamma_{\text{к}} - \gamma)} \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{к}}} \right] \quad (6-12)$$

由公式 (6-10)、(6-11) 和 (6-12) 看出，不论是未浸渍纸、液体浸渍纸或固体浸渍纸的平均耐压强度 $E_{\text{пр.сред}}$ 均是随着纸的密度的增大而增加，随着纸的厚度的增大而减小。并且固体浸渍纸的 $E_{\text{пр.сред}}$ 还随着浸渍料的收缩系数的减小而增高。因为固体浸渍材料在固化时总是有所收缩，所以固体浸渍纸的耐压强度总是低于液体浸渍的纸。从这里也就说明为什么用固体材料浸渍的纸介电容器只能在低压下工作，以及为什么力求选用收缩系数小的固体浸渍材料。

影响纸的平均耐压强度 $E_{\text{пр.сред}}$ 的因素，除了纸的密度和厚度以外，还有电容器纸的结构的不均匀性以及其中的导电和半导电微粒，由于这种原因，纸的 $E_{\text{пр.сред}}$ 的分散性很大，并且使 $E_{\text{пр.сред}}$ 与极板面积有关。当极板面积增大时， $E_{\text{пр.сред}}$ 先是随着极板面积的增大而降低，然后趋向于一定值。另外 $E_{\text{пр.сред}}$ 还随大气压力的增大而提高。

在结束对电容器纸的交流耐压强度的讨论时，必须指出，未浸渍纸的理论公式 (公式 6-10) 与实际情况很相符合，但是液体浸渍纸的理论公式 (公式 6-11) 与实际情况有一定出入，这是因为目前对于很薄的液体层还没有确切的液体层的耐压强度的试验数据之故。

在直流电压下，电容器纸中各相的电场分布与在交流电压下不同，这时的电场分布不是按介电常数，而是按各相的导电。

在直流电压下，未浸渍纸的平均耐压强度的公式为：

$$E_{\text{пр.сред}} = \frac{U_{\text{пр.в}}}{d} \left[1 + \frac{\rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{в}}} \frac{\gamma}{(\gamma_{\text{к}} - \gamma)} \right] \quad (6-13)$$

式中： $\rho_{\text{к}}$ 是纤维素的比电阻， $\rho_{\text{в}}$ 是空气的比电阻。 $\rho_{\text{в}} \cong 10^{15} \sim 10^{18}$ 欧·厘米， $\rho_{\text{к}} \cong 10^{17} \sim 10^{18}$ 欧·厘米 (温度为 20°C 时)。由于 $\rho_{\text{в}}$ 和 $\rho_{\text{к}}$ 的数值很相接近，所以，干燥的电容器纸的直流耐压强度约等于交流耐压强度 (有效值) 的 1.5 倍。

在直流电场下，表示液体浸渍纸的耐压强度的公式为：

$$E_{\text{пр.сред}} = \frac{U_{\text{пр.п}}}{d} \left[1 + \frac{\rho_{\text{к}}}{\rho_{\text{п}}} \frac{\gamma}{(\gamma_{\text{к}} - \gamma)} \right] \quad (6-14)$$

式中： $\rho_{\text{п}}$ 是浸渍材料的比电阻，由于它比 $\rho_{\text{к}}$ 小很多，所以加在电容器纸上的电压主要是落在纤维层上。因此，液体浸渍纸的直流耐压强度远大于其交流耐压强度。

从公式(6-13)和(6-14)中看出,无论是未浸渍纸或浸渍纸的直流耐压强度都与纸的厚度和密度有关。除此以外,还与极板面积及大气压力有关。

在结束本节的讨论时,简单介绍一下电容器纸的耐压强度与电压作用时间的关系(图6-10)。从图中看出,在直流电压的作用下,密度较大的 $KOH-II$ 纸的耐压强度,无论是在短时或长期电压的作用下,都比密度较小的 $KOH-I$ 纸高;但是在交流电压的作用下, $KOH-II$ 的耐压强度只是在短时间电压的作用下才比 $KOH-I$ 纸高,而在电压的长期作用下,它的耐压强度反比 $KOH-I$ 低,这是因为 $KOH-II$ 纸的损耗角正切较大地影响了它的耐压强度之故。也就因此,通常不用 $KOH-II$ 纸来制造交流电容器。根据以上所述,可知超高频雷达技术中的电容器应当用损耗角正切较小的 $KOH-I$ 纸来制造,而用在脉冲技术中的电容器,则应当用 $KOH-II$ 纸来制造,制造直流电容器必须用 $KOH-II$ 纸,并且最好能用密度更高的纸来制造。目前已制造出了一种密度为1.3克/厘米³的电容器纸。用这种纸来制造直流电容器,可以提高它的耐压强度和使用寿命。

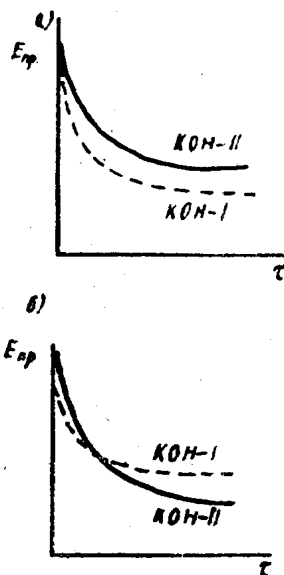


图6-10 电容器纸的密度对纸介电容器的直流(a)和交流(b)耐压强度随时间降低的性质影响
 $KOH-I$ 是标准密度的纸;
 $KOH-II$ 是密度较高的纸。

§6-3 纸介电容器的制造工艺

纸介电容器的制造过程可分为:材料及单件的准备、芯子的卷绕、芯子的干燥与浸渍、装配封焊和检验标印。

I. 材料及单件的准备

1. 电容器纸的准备:电容器纸是由造纸厂制成的,制成长带卷筒状,其宽度有严格标准,苏联电容器纸的宽度规格为:20、25、30、35、40、45、50、60、70、80、90、100毫米,也有特定的更宽的纸。纸的宽度与制造电容器时所要求的宽度不同时,可在切纸机上进行切割(图6-11)。其操作过程如下:将所需切割的整卷纸筒利用松紧套筒装入轴1,

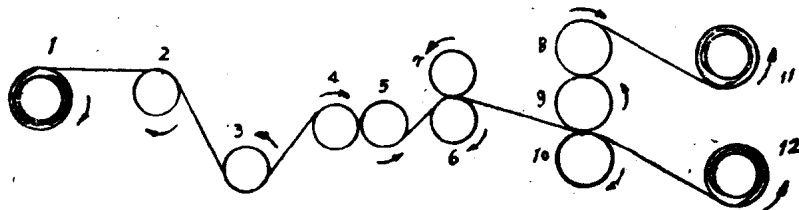


图6-11 切纸机的工作示意图

套筒的两端用螺母扭紧。轴1的右端装有使轴前后移动的装置,用来调整纸卷在切割时的轴

向平行。由紙厂供应的紙卷其两端的外直径不一定完全相同，这是由于紙的厚度不均匀或者当紙捲成卷筒时所形成的。軸1的左端，利用木头軸承的松紧装置，来調整紙帶的拉力。紙卷筒裝好以后，就可以漸次松开，經過軸2和3，依靠軸4拉动，軸4是由裝在軸5右端的齒輪帶動，而軸5依靠主动軸帶動，主动軸由馬達来帶動。軸5又帶動軸6和軸7，在軸7上裝有刀片組。刀片組的間隔即是所需紙的寬度，因此，必須用高度精密的各种不同寬度的隔離圈来固定刀片組。被切開的紙帶通过軸9与軸10之間分成兩路：一路捲在軸12上，另一路通过軸9和軸8之間捲在軸11上。这样分成兩路有很大优点，免得被切開的相邻紙卷由于偶然的原因所产生交叉重叠現象而形成紙卷难以分开的惡果。

紙卷兩端的切边是通过橡皮管用風力来吹去的，風力是由馬達帶動的風扇来供应。至于用風力来吹掉切边，是因为切边很狹窄，易断裂，很难捲到軸上去。在切紙的过程中，必須要切去切边的道理，是因为紙厂制造出来的紙卷，經過搬运等过程，使紙卷两端有损坏，难以直接用来捲繞芯子。

帶動主軸的馬達是通过調速器来起動和調整速度。沒有調速器是很难进行工作的，因为急剧的起動，会使紙帶断裂。調速器与工作盘相連接，工人只要操縱工作盘就可以順利地进行工作。

切紙刀有两种：一种是刀片，另一种是斜口刀，它有上刀和下刀，上下刀的形狀不同。

对切紙机的要求是很严格的，首先要求各軸必須平行，刀片必須与軸垂直，否則会使被切割后的紙的邊緣形成波浪式的不齐，吃刀的深度也不能过大，否則也会引起紙边不齐。此外，主动軸的速度应与紙的張力相适应，拉力过大，紙帶易断裂，拉力过小，使切好的紙卷很松，容易滑动。

2. 極板的准备：現今用来制造紙介电容器的極板，絕大多数是采用鋁箔（无感式芯子有时用鉛鋁箔）。对于厚度較小（7.5微米）的鋁箔，其标准寬度有：19、20、22、25、30、34、38、40、45、80和85毫米，厚度为9~10微米的鋁箔，寬度达到250毫米。若鋁箔的寬度不合設計要求时，也与电容器紙一样，在切箔机上进行切割。切箔机和切紙机在結構上是相同的，只是由于鋁箔比电容器紙硬而脆，所以要求切箔机主动軸的轉速比切紙机慢些，同时刀片刀口的質量要求也較高。

对于电容器極板用的箔料有如下要求：

A. 箔面应光潔平坦，无皺紋、裂縫、刻痕和銹跡等缺陷；

B. 在捲繞时，箔卷能自由平坦地松开，其邊緣应光滑、无毛刺和裂口等缺点。因此，要求切好后的箔卷小心保护，不能使箔卷兩端面有些微损伤，否則在捲繞时就不能达到自由平坦地松开，

B. 箔帶要有一定的抗張强度，保証在捲繞过程中不致断裂，

Г. 箔片不能受潮，以免形成氧化鋁。

3. 引出綫和接触片的准备：用于一般式捲繞芯子中的引出綫有如下几种形式：

A. 按設計要求裁好一定長度的鍍錫銅綫，一端弯折成双股，在双股处裹上几層鋁箔，制成的引出綫象一面小旗子。在弯成双股的弯角处要保持一定的园角，免得銅綫断裂和电场强度过分集中。有时也将双股处的銅綫打扁，免得由于引綫的插入引起芯子的变形而妨碍装配，在打扁处也必須極力防止产生尖角，以免引起电容器耐压强度的降低。在双股銅綫上裹上几層鋁箔的作用是：避免戳穿电容器紙，以提高耐压强度，增大接触面积，以减小电容器的損耗，加大与極板的貼合强度，免得引綫从芯子中脫出。这种引綫用来制造中等容量的园

柱形芯子。

B. 用細絞綫双折轉，折彎處也裹上几層鋁箔。这种引綫用来制造大电容量的扁平形芯子。实际上，这种引綫只起接触片作用，因为它上面还必须焊上引出綫，引出电容器外壳之外。

B. 制造小电容量电容器时，是以鍍錫的紅銅箔条插入芯子作为接触片，然后在銅箔条上焊上引綫。这种紅銅箔的厚度为20~50微米。在切裁机上裁切成所要求的長条形，其邊緣的毛刺必須进行打光。

Γ. 用于无感式繞法芯子的引綫是在引綫的一端制成一个与引綫垂直的螺旋形盘状，制造这种引綫是在簡單的特制机床上进行的。

用来制造引綫的銅綫直徑为0.5~1.0毫米，根据电容器芯子的大小来选定。銅綫外面鍍錫的作用是：防止銅的氧化，使它便于焊接以及消除銅对浸漬料的催化作用。

II. 电容器芯子的卷繞。

(1) 对电容器芯子捲繞車間的要求：

A. 电容器捲繞車間應該光亮，

B. 捲繞車間应保持高度清潔，不应当开啓捲繞車間的門窗，免得塵埃帶入芯子內，加速电容器的老化，降低电容器寿命。捲繞車間的通風应当經過濾塵器。

B. 捲繞車間应当保持一定的标准溫度和不大于50~60%的相对湿度。如果湿度过大，則使芯子受潮，延長浸漬前的干燥時間，拉長生产周期，如果湿度过小，則使紙帶容易断裂，形成捲繞工艺上的困难。所以在現代化的工厂中，捲繞車間是采用人工气候。

Γ. 捲繞車間力求整齐方便，捲繞机床應該依次排列，并且要有方便的过道。

Δ. 捲繞工人的手不能直接触及紙帶和箔帶，因手上难免有手汗，手汗会劇烈的加速电容器的老化。故要求捲繞工人帶橡皮手套。

(2) 捲繞車間的設備及工具。

A. 主要設備：

1) 手搖捲繞机(圖6-15)，用来捲繞小电容量的电容器，

2) 半自动化捲繞机(圖6-16)，其結構大致上与手搖捲繞机相仿，唯有用馬达帶動来代替手搖，并且帶有一套不太复杂的槓杆和齒輪連接离心分离器，使芯子繞到極板長度一半和終了时自动与馬达分开，除此以外，机床上还装有計数器。半自动捲繞机用来捲繞大电容量的芯子之用，

3) 自动捲繞机：其工作原理与半自动捲繞机可以說完全相同，唯一不同之点，就是芯子装卸无需用人工。这种机床适用于捲繞匝数很多并有相同电容量的电容器芯子。

4) 剪刀：在捲繞終了时用来剪断紙和箔，

5) 无酸胶粘物或橡皮环：用来粘結繞好的芯子的外層或套上胶皮环，防止繞好的芯子散开，

6) 毛笔：粘涂无酸胶粘物之用，

7) 放置繞好芯子用的容器：通常应用具有沟槽的木板。

B. 輔助設備：

1) 存放接綫片用的框，

2) 存放方塊紙用的框，