



高电压技术教研室  
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

# 《高电压技术》

## 高电压绝缘技术

Ch5 液体和固体介质的电气特性



# 目 录

## 5 液体和固体介质的电气特性

4.1

电介质的极化、电导与损耗

5.2

液体介质的击穿

5.3

固体介质的击穿

5.4

组合绝缘的特性

5.5

绝缘的老化



液体和固体介质广泛用于高压电气设备中。

**内绝缘：**变压器油、电容器油、植物油、电缆油。

绝缘纸、绝缘纸板、塑料薄膜。

**外绝缘：**云母（电机绝缘）、环氧树脂。

电瓷、玻璃、硅橡胶等。

表征液体和固体介质电气特性的参数中，除了气体介质中关心的击穿场强 ( $E_b$ ) 外，还有介电常数 ( $\varepsilon$ )、电导率 ( $\gamma$ )、介质损耗角正切 ( $\tan\delta$ )。

上述为描述电介质电气特性的**四大参数**。



# 5.1 电介质的极化、电导与损耗

## 一、电介质的极化

### 极化基本概念：

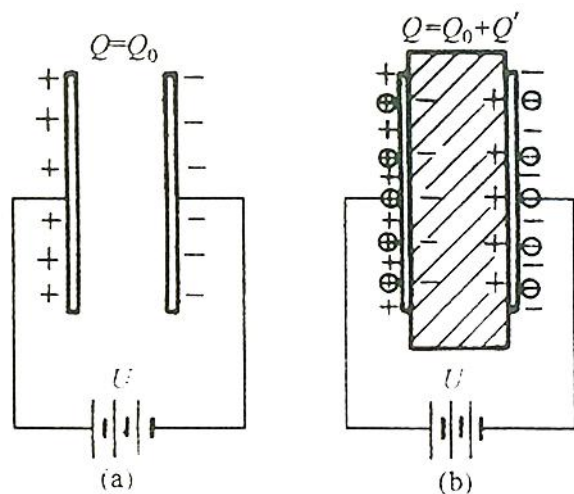
一般情形下，未经电场作用的电介质内部的正负束缚电荷平均说来处处抵消，宏观上并不显示电性。

在外电场的作用下，束缚电荷的局部移动导致宏观上显示出电性，在电介质的表面和内部不均匀的地方出现电荷，这种现象称为极化，出现的电荷称为极化电荷。



## 极化及相对介电常数:

中和的正、负电荷产生位移, 形成电偶极矩, 使介质表面出现了束缚电荷, 相应地便在极板上另外吸住了一部分电荷 $Q'$ , 所以极板上电荷增多, 并造成电容量亦增大。



极化现象

(a) 电极间; (b) 电极间有介质

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad D_0 = \frac{Q_0}{A} = \epsilon_0 E$$

单位面积电荷量

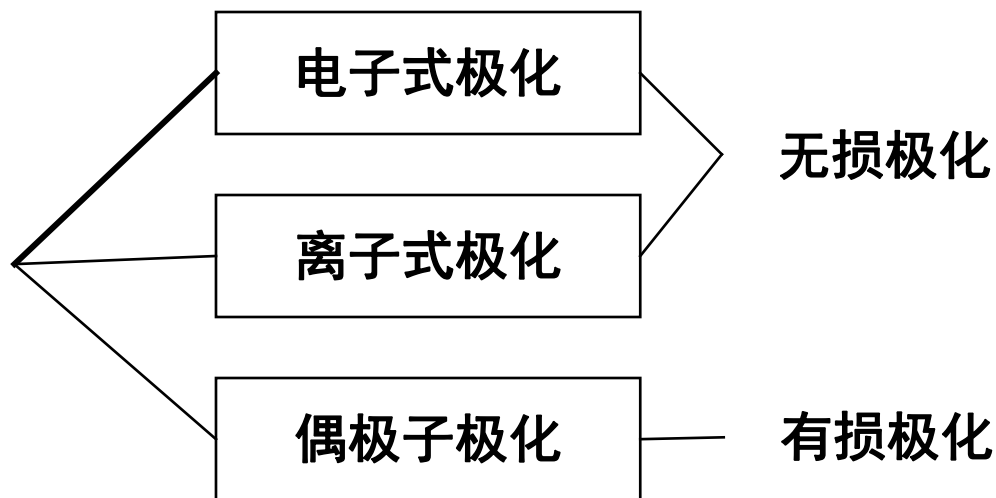
$$C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad D = \frac{Q_0 + Q'}{A} = \epsilon E$$
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{Q_0 + Q'}{Q_0}$$

表征了由于“极化作用”而多产生后的总与原电荷数的比——存储电荷的能力



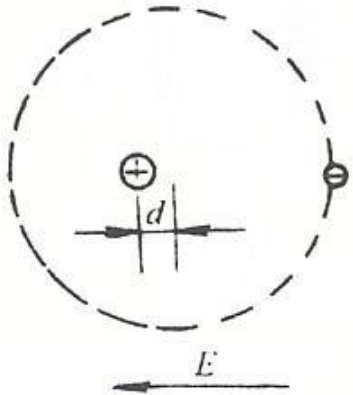
## 电介质的极化种类

各种电介质除了 $\varepsilon_r$ 的数值各不相同外， $\varepsilon_r$ 与温度、电源频率的关系也不一致，这是因为极化有多种类型。极化最基本的形式有电子式、离子式和偶极子极化三种，影响介质的介电常数、介质损耗和介质的电导。另外还有夹层介质界面极化和空间电荷极化等。





- 1) 电子式极化 物质原子里的电子轨道受到外电场的作用时，它将相对于原子核发生位移而形成极化，这就是电子式极化。特点为：

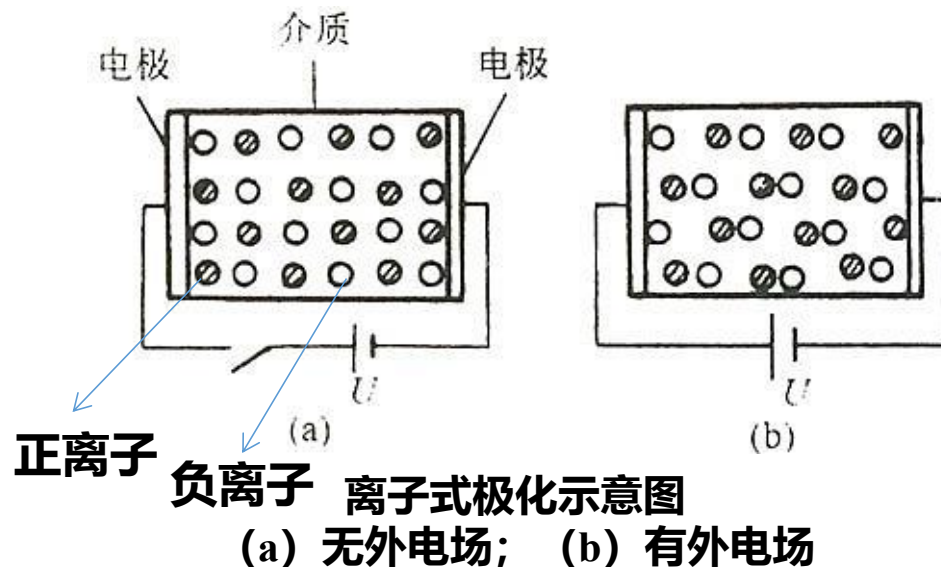


- ①形成极化所需的时间极短，故其 $\epsilon_r$ 不随频率变化；
- ②它具有弹性，当外电场去掉后，依靠正、负电荷间的吸引力，作用中心又会马上重合而整个呈现非极性，所以这种极化没有损耗。
- ③ $\epsilon_r$ 具有不大的负温度系数。



## •2) 离子式极化

在外电场作用下，**正、负离子发生偏移**，使平均偶极矩不再为零，介质呈现极性。



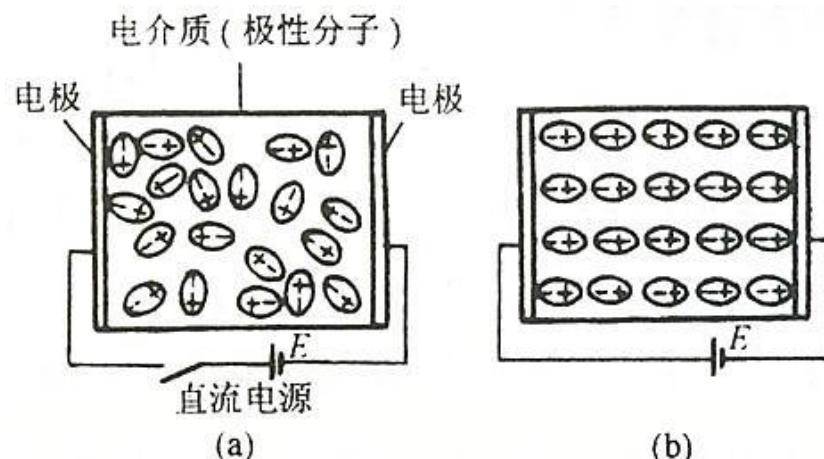
- ①形成极化所需的时间也很短，故其 $\epsilon_r$ **不随频率变化**；
- ②它具有弹性，几乎**没有损耗**。
- ③ $\epsilon_r$ 具有不大的**正**的温度系数。





### •3) 偶极子极化

在电场作用下，原来混乱分布的极性分子顺电场**定向排列**，因而显示出极性。这种效果称为偶极子极化。



偶极子极化示意图

(a) 无外电场; (b) 有外电场

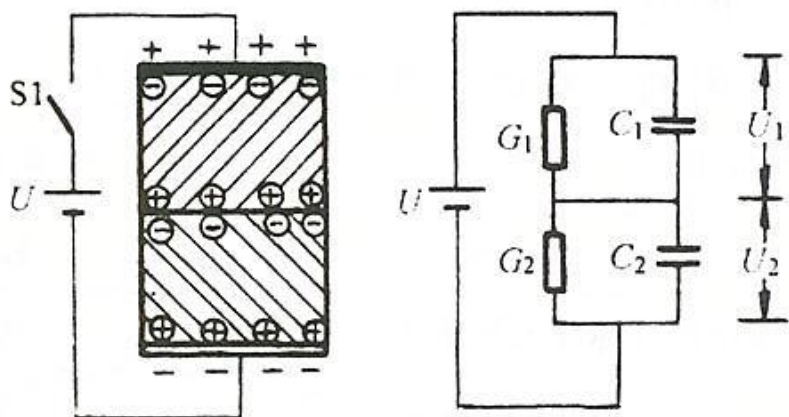
①偶极子极化是非弹性的，极化时**消耗的电场能量**。

②极化所需的时间也较长( $10^{-10}$ - $10^{-2}$ s)，故其 $\epsilon_r$ **与电源频率有较大的关系**，当频率**很高时偶极子来不及转动**，故 $\epsilon_r$ **减小**。

③极性液体、固体介质的 $\epsilon_r$ **在低温下先随温度的升高而增加**，以后当热运动变得较强烈时，又**随温度上升而减小**。



#### •4) 夹层介质界面极化 绝缘往往由多层介质组成, $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$ ; $\gamma_1 \neq \gamma_2$



S1合闸后, 一瞬间, 相当于施加高频电压, 按电容;  
稳定后, 按电阻分压。

**? 为何电容分压器不能测直流?**

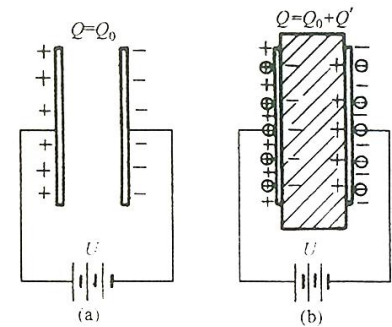
图 6-7 夹层介质界面极化现象

$$\left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow 0} = \frac{C_2}{C_1} \neq \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{t \rightarrow \infty} = \frac{G_2}{G_1}$$

- ①极化过程比较缓慢, 只有在工频或低频时才有可能;
- ②伴随能量损耗。



## •5) 空间电荷极化



介质内的**正、负自由离子**在电场作用下改变分布状况时，将在电极附近形成空间电荷，称为空间电荷极化。它和夹层介质界面极化现象一样都是**缓慢进行的**，**低频至超低频阶段都有**，而在**高频时因离子来不及移动，就没有这种极化现象**。



表 6-1

常用电介质的介电常数

材 料 类 别		名 称	相对介电常数 $\epsilon_r$ (工频, 20℃)
气体介质 (标准大气条件)		空气 (大气压)	1.00059
液体介质	弱极性	变压器油	2.2~2.5
		硅有机液体	2.2~2.8
	极 性	蓖麻油	4.5
	强极性	丙酮	22
		酒精	33
		纯水 (20℃)	81
固体介质	中性或弱极性	石 蜡	2.0~2.5
		聚乙烯	2.25~2.35
		聚苯乙烯	2.45~3.1
		聚四氟乙烯	2.0~2.2
		松 香	2.5~2.6
		沥 青	2.6~2.7
	极 性	油浸纸	3.3
		酚醛树脂塑料	4~4.5
		聚氯乙烯	3.2~4.0
		聚甲基丙烯酸甲酯 (有机玻璃)	3.3~4.5
	离子性	云 母	5~7
		电 瓷	5.5~6.5
		钛酸钡	几千
		金红石	100



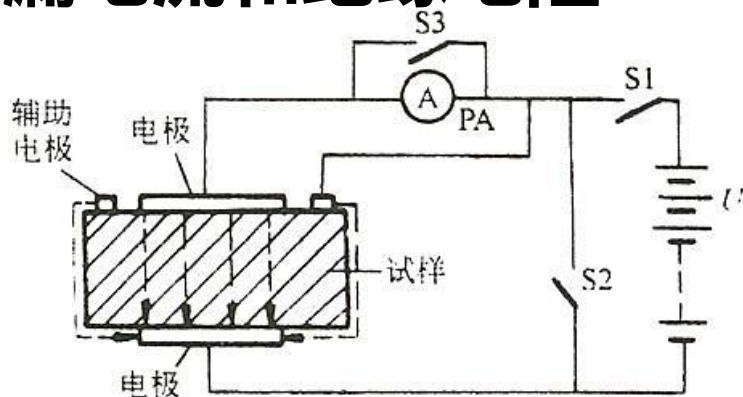
## 讨论电介质极化的意义

- (1) 选择用于电容器中的绝缘材料时，一方面要注意介电强度，另一方面希望材料的 $\epsilon_r$ 大。在使用电容器等电容量很大的设备时，必须特别注意吸收电荷可能对人身安全造成的威胁。
- (2) 交流及冲击电压作用下，串联介质中场强 $E$ 的分布与 $\epsilon_r$ 成反比。
- (3) 材料的介质损耗与极化类型有关，而介质损耗是影响绝缘劣化和热击穿的一个重要因素。
- (4) 夹层介质界面极化现象在绝缘预防性试验中可用来判断绝缘受潮情况。

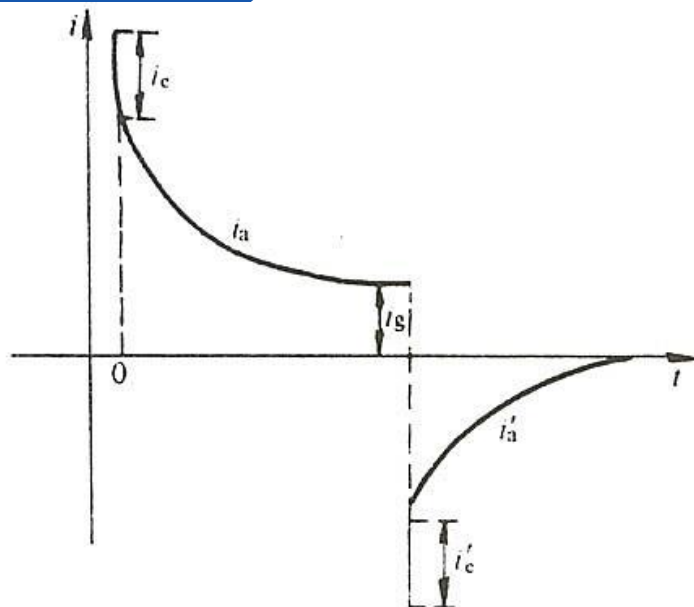


## 二、电介质的电导

### 泄漏电流和绝缘电阻



测量介质中电流的电路图



固体介质中电流与时间关系

吸收电流 $i_a$ 完全衰减至恒定泄漏电流 $i_g$ 往往需要数分钟以上的时间（夹层及空间电荷极化），有些材料甚至需几小时至几天的时间。 $i_g$ 称为泄漏电流，它由介质的绝缘电阻所决定。 $i_a$ 与 $i_g$ 的比值达数倍至数十倍。

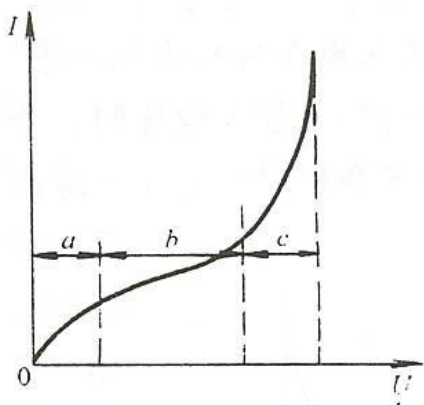
所以测量绝缘电阻需要等1分钟或10分钟再测，否则会偏小。



## 二、电介质的电导：液体介质电导

### 液体电介质的电导

液体介质中构成电导的因素：一是由液体本身的分子和杂质的分子解离为离子，构成**离子电导**；另一种是液体中的胶体质点(如变压器油中悬浮的小水滴)吸附电荷后，形成带电质点，构成**电泳电导**。



液体介质中电流  
与外加电压关系

高电场电导的可能机理(区域C，类似气体)：

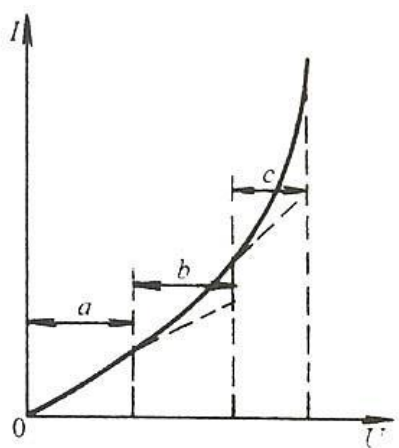
- ①**解离**，液体分子或杂质分子在电场下解离为离子；
- ②**电极逸出电子**，由于高电场或由于肖特基效应(指在电场作用下热电子发射增加)从电极逸出电子；
- ③**碰撞电离**，电子碰撞液体分子时使液体分子电离。

**影响工程用液体介质电导的外界因素：①杂质、②温度**



## 二、电介质的电导：固体电介质的体积电导

### 固体电介质的体积电导



固体介质中电流与  
外加电压关系

**区域a:**电压与电流的关系服从欧姆定律;

**区域b:**电流与电压几乎成指数关系;

**区域c:**电流将随电压更急剧增加直至击穿。

与气体、液体介质相比，它明显地无饱和区。

**导电粒子：**从电极中逸出的电子；介质中产生的离子、传导电子、空穴等。

**影响固体电介质体积电导的因素：①杂质、②温度**





## 讨论电介质电导的意义

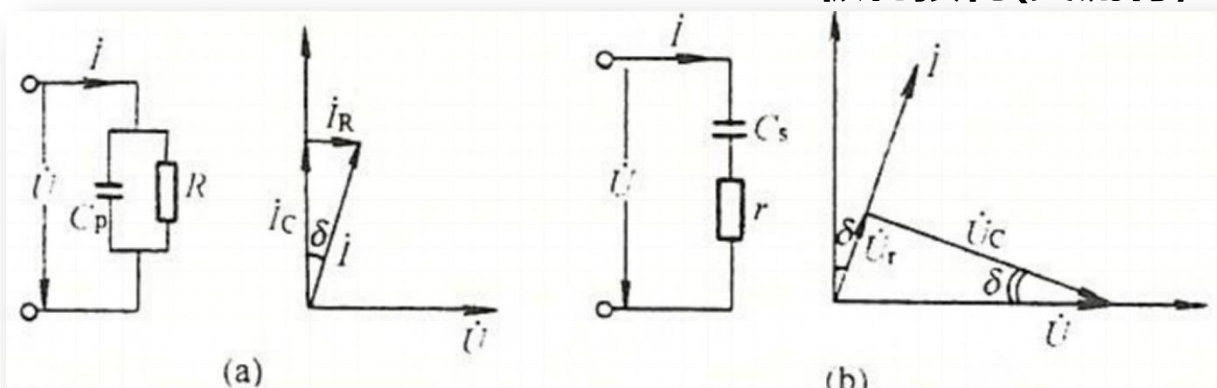
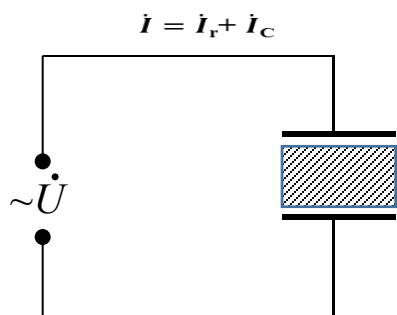
- (1) **绝缘电阻和泄漏电流**，判断绝缘是否受潮或有其他劣化现象。
- (2) 设计用于直流的设备时，要注意所用**介质的电导率**。
- (3) 设计绝缘结构时要考虑到环境条件，特别是**湿度的影响**。
- (4) 对于某些能量较小的电源，如静电发生器等，要注意**减小绝缘材料的表面泄漏电流**以保证得到高电压。
- (5) **并不是所有情况下都希望绝缘电阻高**，有些情况下要设法减小绝缘电阻值。如在高压套管法兰附近涂上半导体釉。



### 三、电介质的能量损耗

## 电介质损耗及介质损失角正切

介质损耗：电导损耗(交直流下均有)，  
极化损耗(交流有，直流无)



有损介质并联和串联等值电路和相量图

如果损耗主要是电导引起的，则常应用并联等值电路；如果损耗主要由介质极化及连接导线的电阻等引起，则常用串联等值电路。

### 并联公式

$$\tan \delta = \frac{U/R}{U\omega C_p} = \frac{1}{R\omega C_p}$$

$$P = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C_p \tan \delta$$

### 串联公式

$$\tan \delta = \frac{Ir}{I/\omega C_s} = \omega C_s r$$

$$P = \frac{U^2 \omega C_s \tan \delta}{1 + \tan^2 \delta}$$



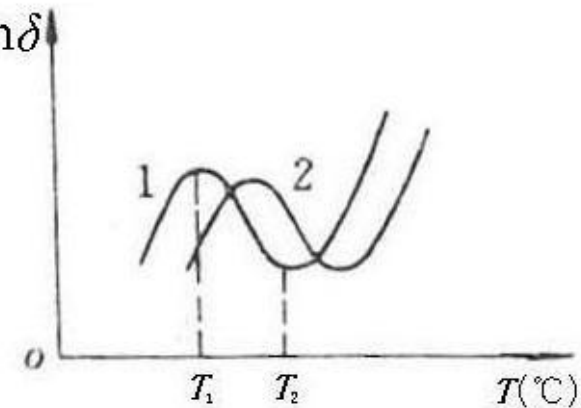
## •气体电介质的损耗

当场强不足以产生碰撞电离时，气体中的损耗是由电导引起的，损耗极小。所以常用气体作为标准电容器的介质。当外施电压超过放电起始电压  $U_0$  时，将发生局部放电，损耗急剧增加。

## •液体电介质的损耗

中性或弱极性液体介质的损耗主要起因于电导  $\tan\delta$ ，所以损耗较小，与温度的关系也与电导相似

极性液体介质具有电导和极化两种损耗，介质损耗较大，而且和温度、频率都有关系。





## • 固体电介质的损耗

固体介质常分为分子式结构介质、离子式结构介质、不均匀结构介质和强性电介质大类。

### 1) 分子式结构介质：

**中性**(损耗主要是电导且电导损耗小)石蜡、聚乙烯、聚苯乙烯、聚四氟乙烯等

**极性**( $\text{tg } \delta$ 较大，与温度和频率有关)纸、纸板、聚氯乙烯、有机玻璃、酚醛树脂

### 2) 离子式：

**结构紧密的离子晶体：**主要是由电导引起的损耗，所以 $\text{tg } \delta$ 很小，如云母。

**结构不紧密的离子结构：**存在离子松弛式极化现象， $\text{tg } \delta$ 较大，玻璃、陶瓷。

### 3) 不均匀结构的介质：

不均匀结构的介质在交流设备中经常遇到，例如云母和纸或布以及漆、油浸纸、胶纸绝缘等。它们的损耗取决于各成分的性能和数量间的比例。



## 讨论介质损耗的意义：

- (1) 绝缘结构设计时，必须**注意到绝缘材料的 $\tan\delta$** 。如过大会引起严重发热，使材料容易劣化，甚至可能导致热击穿。
- (2) 在绝缘预防性试验中， **$\tan\delta$ 是一基本测试项目**，当绝缘受潮或劣化时， $\tan\delta$ 急剧上升。
- (3) **介质损耗引起的发热有时也可以利用**，例如电瓷泥坯两端加上适当的交流电压，可以利用介质损耗发热加速干燥过程。
- (4) 用于**冲击测量的连接电缆**，其绝缘的 $\tan\delta$ 必须很小，否则波形将发生严重畸变，影响测量精确度。



## 5.2 液体电介质的击穿

### 一、纯净液体电介质的击穿理论

**纯净的液体介质：**击穿过程与气体击穿的过程很相似，但其击穿场强高（很小的均匀场间隙中可达到 $1\text{MV/cm}$ ）

**工程用的液体介质：**击穿场强很少超过 $300\text{kV/cm}$ ，一般在 $200\text{kV/cm}\sim 250\text{kV/cm}$ 的范围内

### 纯净液体电介质的击穿包括：电击穿理论、气泡击穿理论

#### •电击穿理论：

在阴极，因强电场发射或因肖特基效应发射的电子在电场中被加速，它碰撞液体分子，使液体分子产生电离，电子倍增。

此外，因碰撞电离产生的正离子在阴极附近形成空间电荷层，又增强阴极表面的电场，使阴极发射的电子数增多。



# 一、纯净液体电介质的击穿理论

## •气泡击穿理论：

外施电场较高时，液体介质内可能由下述各种原因产生气泡，而气泡的发展和气泡内的放电导致液体介质击穿。纯净液体中产生气泡的原因：

- ①由阴极的**强场发射**及肖特基效应发射的**电子电流**加热液体介质，使它分解出气体
- ②由电场加速的电子**碰撞**液体分子，使液体分子解离产生出气体；
- ③静电排斥作用。在电极表面所**吸附的气泡**的表面上积有电荷，当它在电场作用下产生的静电斥力足以克服液体的表面张力时，便使气泡变大；
- ④电极上尖的或不规则的凸起物上的**电晕放电**引起液体气化。



## 二、工程液体电介质的击穿：“小桥”理论

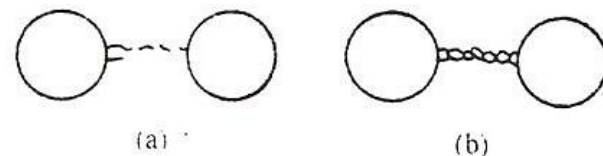
工程用液体电介质总或多或少含有一些**杂质**。例如油中常因受潮而含有水分，此外还含有油纸或布脱落的纤维。

(a) 由于水(81)和纤维(6-7)的介电常数很大，使它们容易极化而沿电场方向**定向排列**，如果定向排列的纤维贯穿于电极间形成连续**杂质小桥**，则由于水分及纤维等的电导大而引起**泄漏电流增大、发热增多**，促使水分汽化、**气泡扩大**；

(b) 如果纤维尚未贯穿整个电极间隙，则由于纤维的介电常数大而使纤维端部油中**场强显著增高**，**高场强下油电离分解出气体形成气泡**；气泡电离并因发热而扩大，电离的气泡排成**气体小桥**。

无论(a)(b)工程用液体电介质最后是在**气体通道**中击穿的。

**另外，冲击电压下不存在小桥，来不及形成。**



击穿过程：杂质小桥和气体小桥

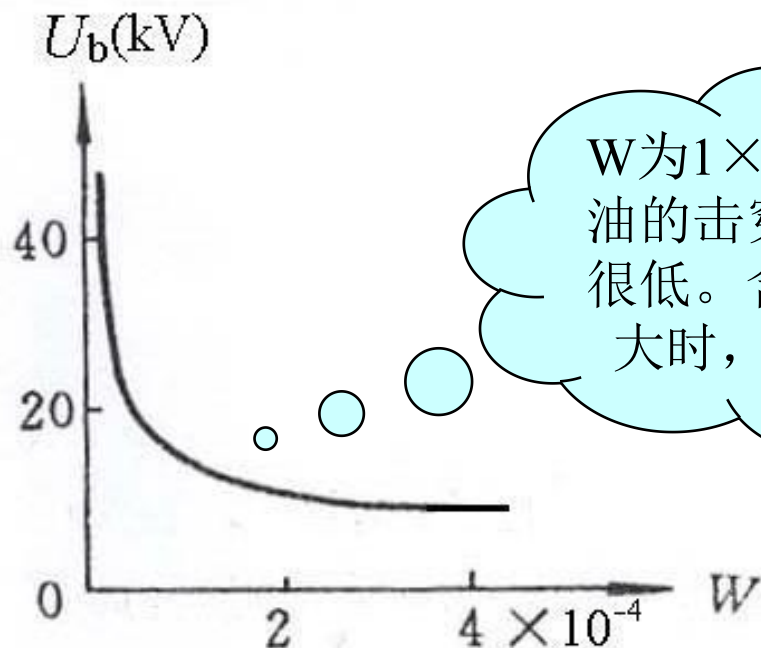
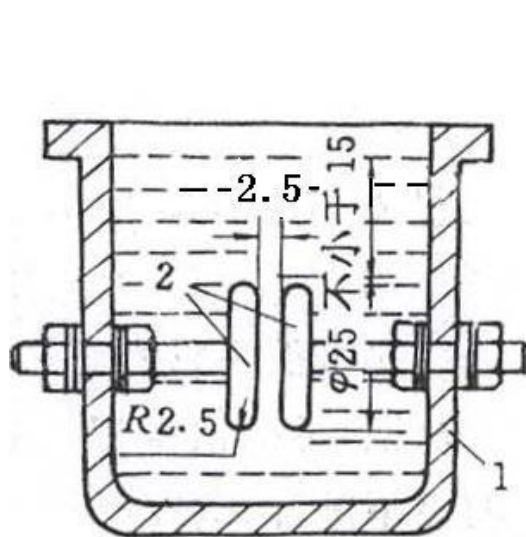




## 三、影响液体电介质击穿电压的主要因素和防护

### (1) 杂质的影响

**水分：**极微量的水分可溶于油中，对油的击穿强度没有多大影响。影响油击穿的是呈悬浮状态的水分。



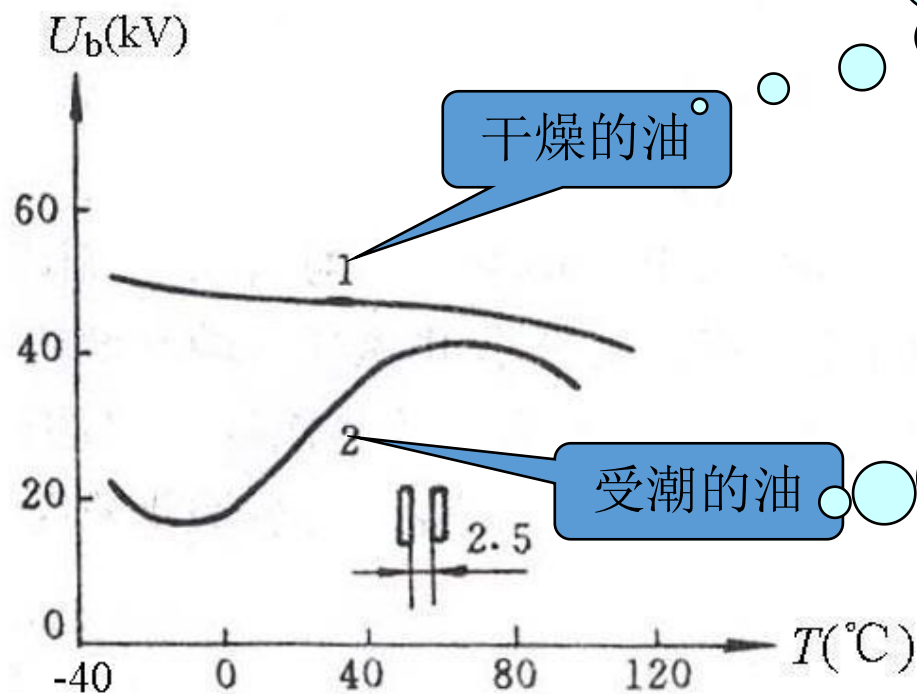
W为 $1 \times 10^{-4}$ 时已使油的击穿强度降得很低。含水量再增大时，影响不大

标准油杯中变压器油的工频击穿电压 $U_b$ 和含水量 $W$ 的关系



### 三、影响液体电介质击穿电压的主要因素和防护

#### (2) 温度的影响



干燥油的击穿强度与温度没有多大关系

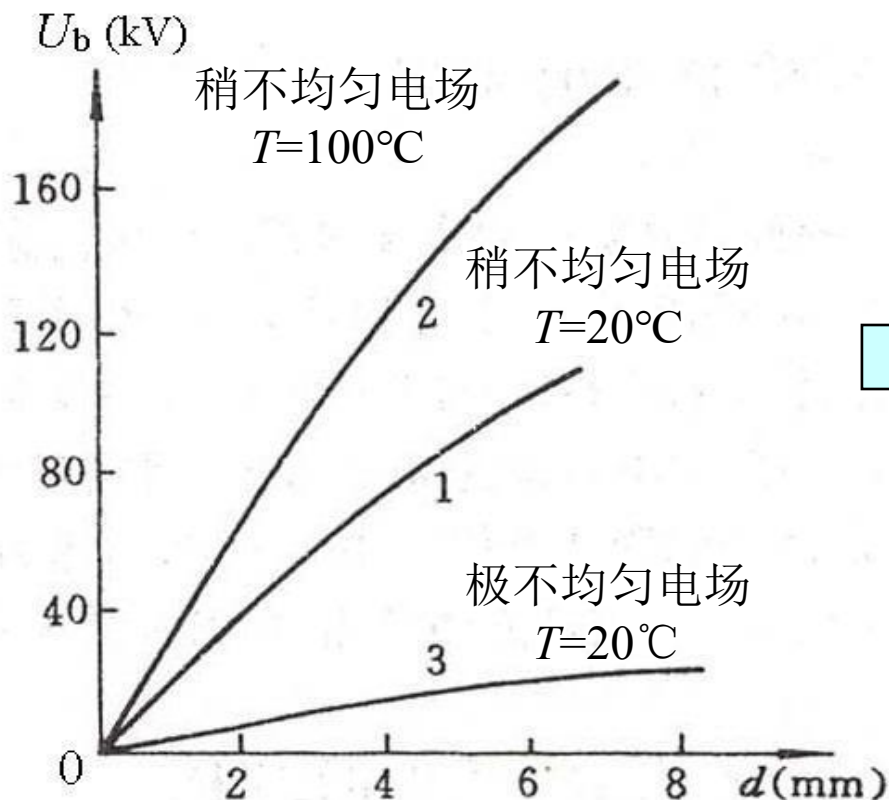
0~80°C,  $U_b$  提高 (水分溶解度增加) 温度再升高,  $U_b$  下降 (水分汽化); 低于 0°C,  $U_b$  提高 (水滴冻结成冰粒)

标准油杯中变压器油工频击穿电压与温度的关系



## 三、影响液体电介质击穿电压的主要因素和防护

### (3) 油体积的影响



随着间隙长度的增加变压器油的击穿场强下降

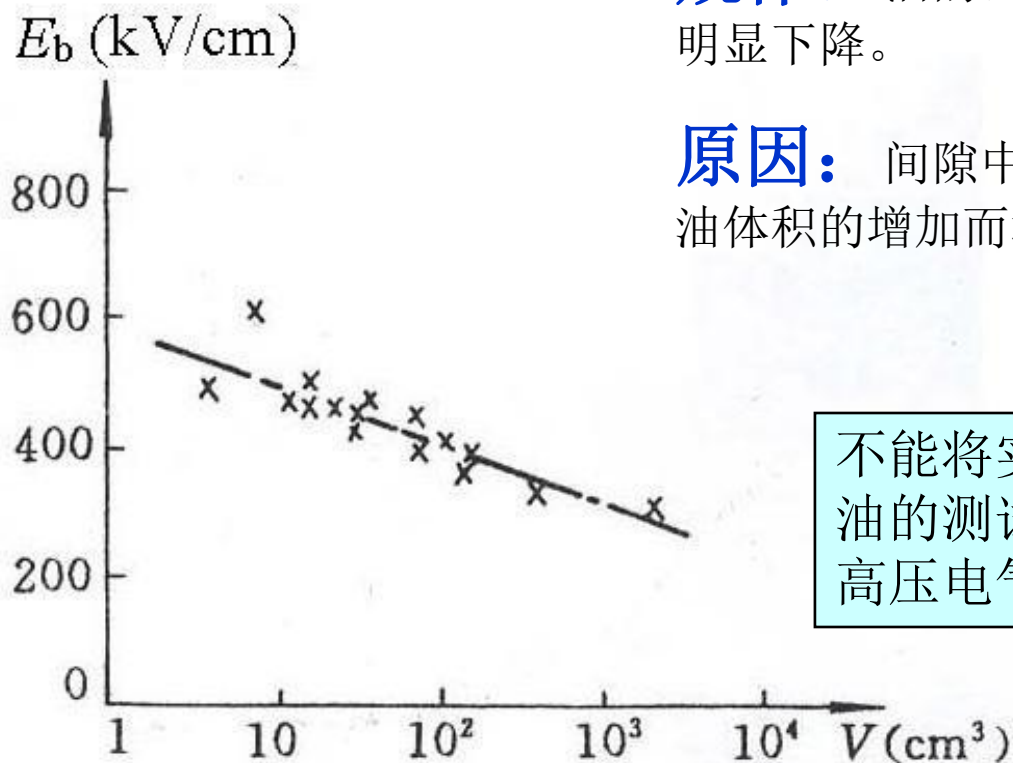
变压器油中水分含量为 $31 \times 10^{-6}$ 时的 $U_b$ 与 $d$ 的关系



### 三、影响液体电介质击穿电压的主要因素和防护

**规律：** 油的击穿强度随油体积的增加而明显下降。

**原因：** 间隙中缺陷(即杂质)出现的概率随油体积的增加而增大。



不能将实验室中对小体积油的测试结果，直接用于高压电气设备绝缘的设计

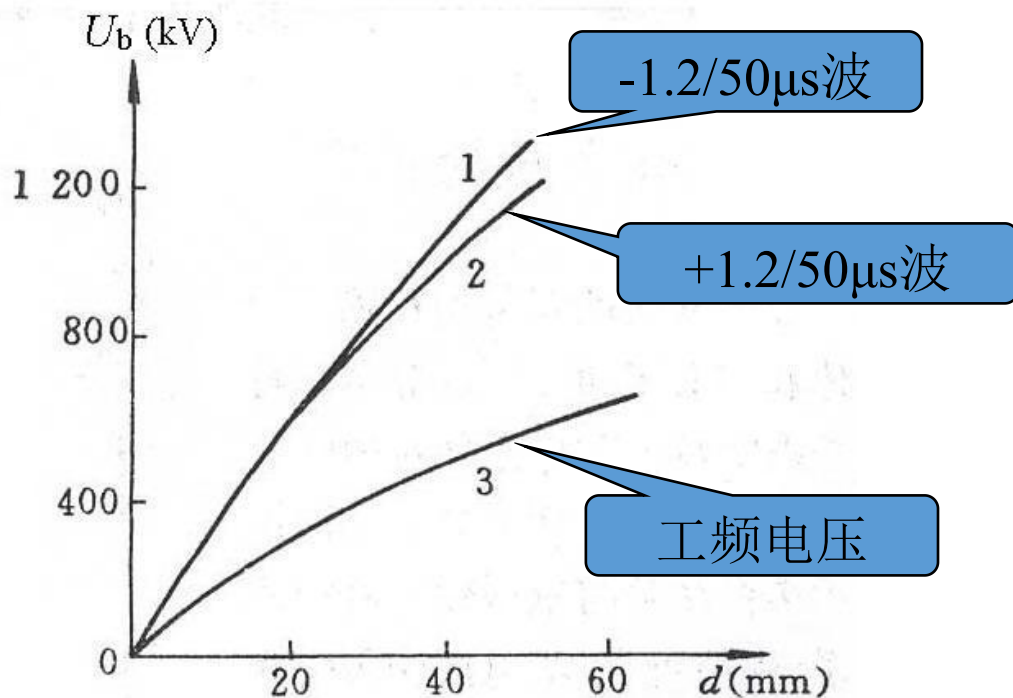
均匀电场中油 ( $T=90^{\circ}\text{C}$ ) 的冲击击穿场强  
与油体积的关系



### 三、影响液体电介质击穿电压的主要因素和防护

#### (4) 电压形式的影响

杂质形成小桥所需的时间，比气体放电所需时间长，因此油间隙的冲击击穿强度比工频击穿强度要高得多。极不均匀电场中冲击系数约为1.4~1.5，均匀场中可达2或更高



稍不均匀电场中变压器油的击穿电压与间距的关系



## 三、影响液体电介质击穿电压的主要因素和防护

### 减小杂质影响的措施

**(1) 过滤** 使油在压力下通过滤油机中的滤纸，即可将纤维、碳粒等固态杂质除去，油中大部分水分和有机酸等也会被滤纸所吸附。

**(2) 防潮** 绝缘件在浸油前必须烘干，必要时可用真空干燥法去除水分。

**(3) 祛气** 将油加热，喷成雾状，并抽真空，可以达到去除油中水分和气体的目的。

**(4) 用固体介质减小油中杂质的影响** 常用措施为覆盖层、绝缘层和屏障。



## 5.3 固体电介质的击穿

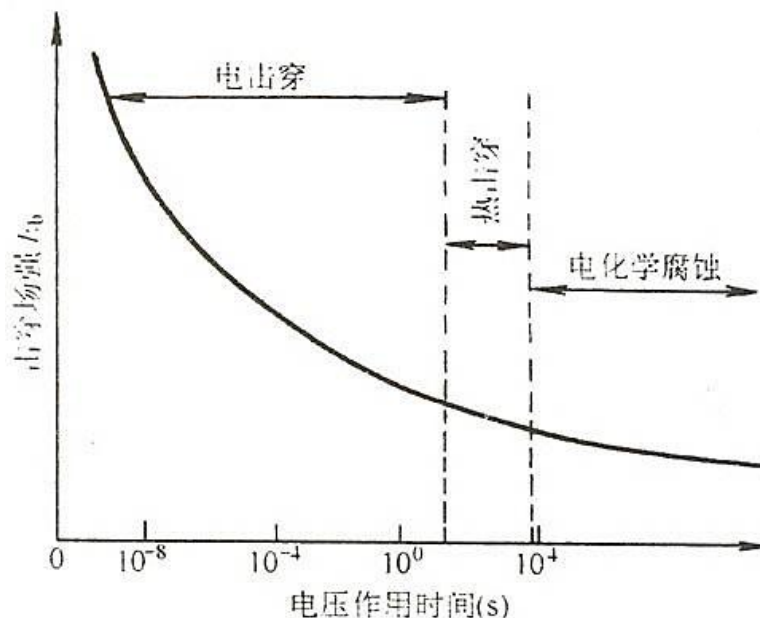
### 固体电介质击穿的形式

•**电击穿**：固体介质中发生碰撞电离

特点：电压作用的时间短，击穿电压高，电介质温度不高

•**热击穿**：介质分解、炭化等，最终导致介质击穿。

•**电化学击穿**



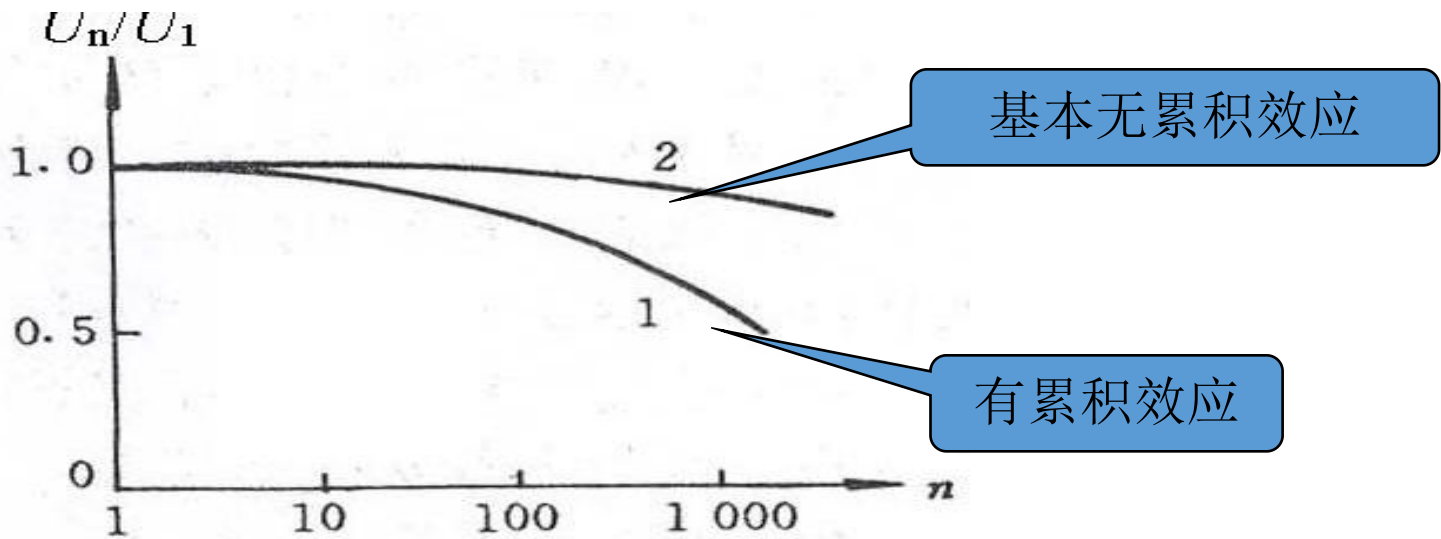
固体电介质为非自恢复绝缘



## •电击穿:

碰撞电离形成电子崩，当电子崩足够强时破坏介质晶格结构导致击穿

固体介质在冲击电压多次作用下，其击穿电压有可能低于单次冲击作用时的值。因为固体介质为非自恢复绝缘，如每次冲击电压下介质发生部分损伤，则多次作用下部分损伤会扩大而导致击穿。这种现象为**累积效应**。







## 热击穿

绝缘介质在电场作用下，会因电导电流和介质极化引起介质损耗，使介质发热。介质电导率随温度的升高而急剧增大，因此介质的发热因温度的升高而增加。如果介质中产生的热量总是大于散热，则温度不断上升，造成材料的热破坏而导致击穿。

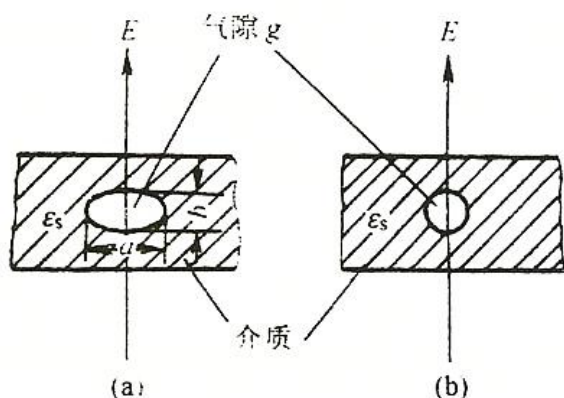
### 特点：

- (1) 击穿所需时间较长，常常需要几个小时，即使在提高试验电压时也常需要好几分钟。
- (2) 在直流电压下，正常未受潮的绝缘很少发生热击穿。



## 电化学击穿

长时间击穿电压(或最终击穿电压)是指经过一定的加压时间后, 击穿电压几乎不再随时间下降时的恒定值。如外施电压低于此值, 即使加压时间再长, 通常亦不引起击穿。长时间击穿电压较低的主要原因往往是在绝缘内部有**局部放电(PD, partial discharge)**所致。局放的危害包括:

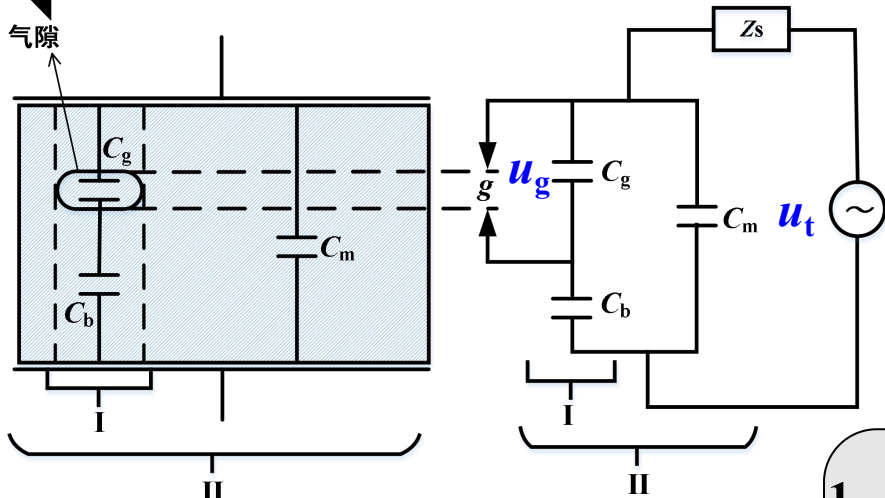
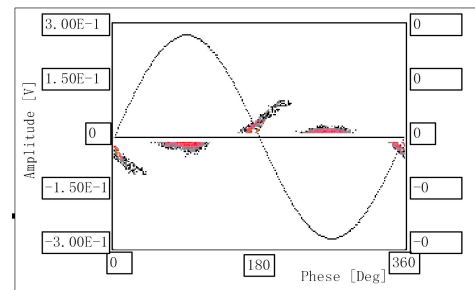


场强高、强度低,  
因此在空气隙内先开始放电

- ①带电粒子对介质表面的撞击, **切断分子构造**;
- ②由于带电粒子撞击介质, 引起介质局部的温度上升, 使**介质加速氧化**, 对于高分子材料, 由于氧化等而引起裂解以致平均分子量下降, 材料的**机械、电气性能下降**;
- ③局部放电产生的活性气体 $O_3, NO, NO_2$ 等对介质的**氧化作用使介质逐渐劣化**。



# 局部放电

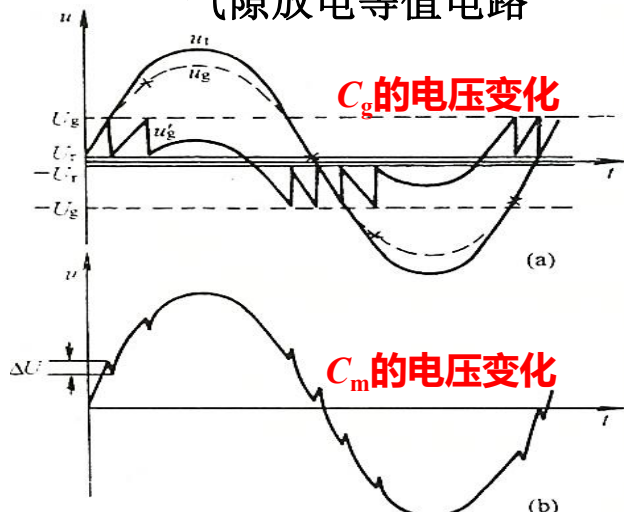


$u_g$ : 气隙上承受的电压;  
 $u_t$ : 外加电压;  
 $U_g$ : 气隙放电电压

$$C_m \geq C_g \geq C_b$$

$$C_a = \left( C_m + \frac{C_g C_b}{C_g + C_b} \right) \approx (C_m + C_b)$$

气隙放电等值电路



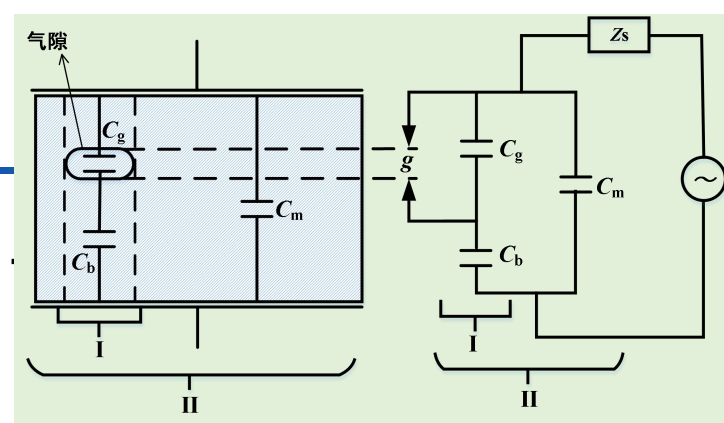
气隙放电时气隙上电压变化

- 1、气隙上电压随外加电压的增加，达到 $U_g$ ，气隙放电，气隙两端电压急剧下降， $C_b$ 被充电；
- 2、 $u_g$ 下降到一定程度，放电熄灭，但 $u_t$ 继续增加， $C_g$ 上的电压又充到 $U_g$ ，继续放电；

- 3、 $u_t$ 经过峰值后下降，致使 $u_g$ 也下降，当下降到一定程度时，电压值低于 $C_b$ 上在之前放电时被充上的电压值， $C_b$ 向 $C_g$ 反向放电。



# 局部放电



$C_g$ 在 $U_g$ 时开始放电,  $C_g$ 上的电压急剧降低至 $U_r$  (残余电压), 电路有电感, 电源不会立刻补充电荷, 则此时相当于 $C_g$ 对其余两个电容放电。

**真实放电量**  $q_r = (C_g + \frac{C_m C_b}{C_m + C_b})(U_g - U_r) \approx (C_g + C_b)(U_g - U_r)$

$C_g$ ,  $C_b$ ,  $C_m$ 均无法直接测到, 所以真实放电量无法得到

把 $C_g$ 看成一个电压源,

$U_g - U_r$ :  $C_b$ 和 $C_m$ 串联部分的电压降;

$\Delta U$ :  $C_m$ 上的电压降;

$$\frac{U_g - U_r}{\Delta U} = \frac{C_m}{\frac{C_b C_m}{C_b + C_m}} \Rightarrow \Delta U = \frac{C_b}{C_b + C_m} (U_g - U_r)$$

$$C_a = (C_m + \frac{C_g C_b}{C_g + C_b}) \approx (C_m + C_b)$$

**视在放电量**  $q = C_a \Delta U = C_b (U_g - U_r) = \frac{C_b}{C_g + C_b} q_r$



## 5.4组合绝缘的特性

### 一、组合方式

液体与固体的组合绝缘，不仅取决于各自的绝缘强度，还与组合方式有关。

#### 一、油—屏障绝缘

油—屏障绝缘以油为主要绝缘介质，屏障的作用主要是均匀电场分布和阻止杂质小桥的形成。

矛盾：屏障个数与介质的散热情况。

#### 二、油纸绝缘

以固体介质为主要绝缘介质。油仅作为气隙的填充剂。



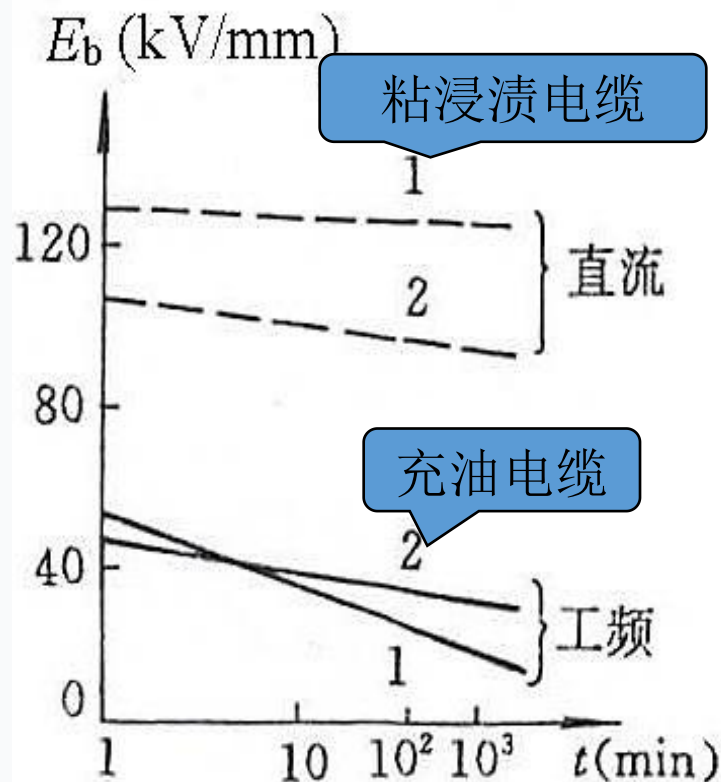
## 二、交流与直流的击穿特性

- **直流比交流的击穿场强要高得多。**
- **直流下油和纸中场强分配比交流时合理。**

**交流中，场强与介电常数成反比。** 固体介电常数大，所以场强小，与实际不符。

**直流中，击穿场强与体积电阻率成正比，** 固体电阻率高，所以场强大，与实际相符。

● **注意：** 直流条件更有利于介质的绝缘特性，所以为直流设计的绝缘不一定能用于交流，相反，**为交流设计的定能用于直流。**



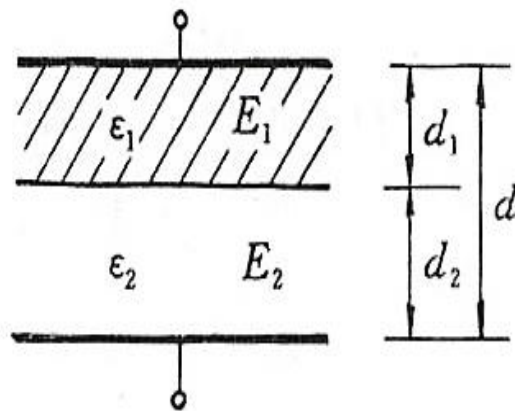


### 三、多介质系统中的电场

以简单的平板电极中双介质的情况加以说明。

#### 1) 介质界面与等位面重合

- 在极间绝缘距离  $d = d_1 + d_2$  不变的情况下，增大  $\epsilon_2$  时使  $E_2$  减小，但却使  $E_1$  增大。



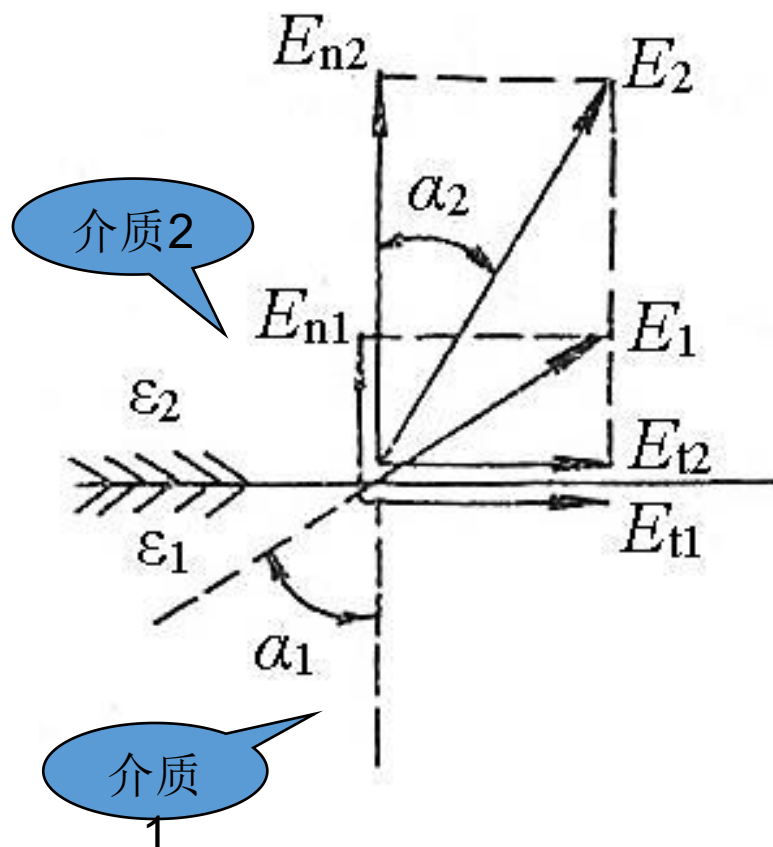


### 三、多介质系统中的电场

#### 2) 介质界面与电极表面斜交

电力线会在第二种介质中发生折射。

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{E_{n1}}{E_{t2}} = \frac{E_{n2}}{E_{t1}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

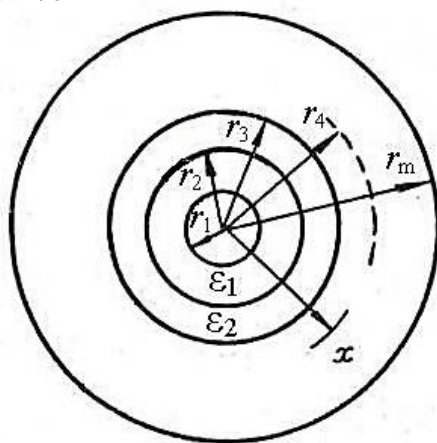




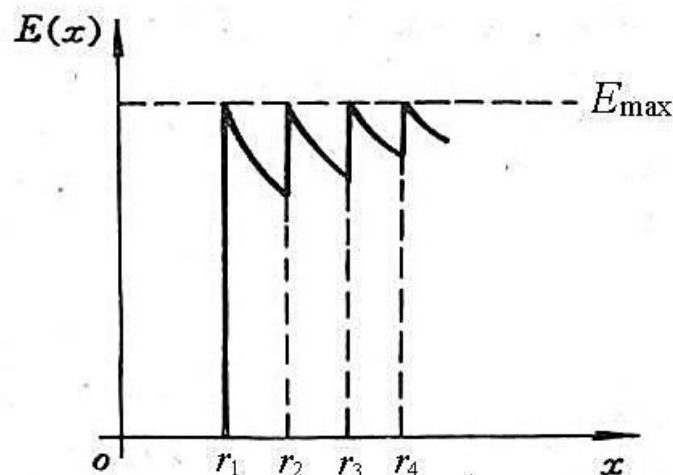


## 四、电场调整的方法

- 若对于电力电缆的绝缘层较厚时，如采用相同的绝缘材料则电缆的场强从圆心往外延降低。
- 由多介质电场分布规律，可采用分阶绝缘的方法来降低缆芯附近的场强，以均匀场强。



(a)



(b)

$\epsilon_1 > \epsilon_2 > \dots > \epsilon_n$ , 且  $\epsilon_1 r_1 = \epsilon_2 r_2 = \dots = \epsilon_n r_n = \text{常数}$ 。离缆芯较远的介质层也能得到充分的利用，因此可使电缆尺寸缩小。



## 5.5 绝缘的老化

### 老化的概念和原因

#### ➤ 绝缘的老化

固体和液体介质在长期运行过程中会发生一些物理变化和化学变化，导致其机械和电气性能的劣化。

#### ➤ 绝缘老化的原因

热老化、电老化、机械力的影响、环境的影响



**The end**



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY