



高电压技术

屠幼萍

 +80798656, 13691145432

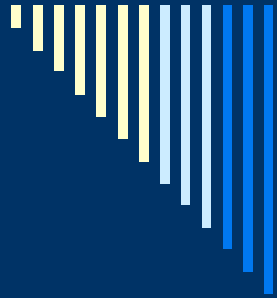
 typ@ncepubj.edu.cn



华北电力大学
North China Electric Power University

高电压与电磁兼容技术研究所
High Voltage & Electromagnetic Compatibility Laboratory





第6讲

电介质的电气性能 (二)

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



+80798656, 13691145432



typ@ncepubj.edu.cn



电介质电气性能的划分

- 极化特性
- 电气传导特性
- 损耗特性
- 电气击穿特性



第2节 电介质的电导特性

- 电介质中的传导电流
- 电介质中的电导特性
- 电介质传导电流的测量
- 电介质的电导
- 讨论电介质电导的意义

1、电介质中的传导电流

- 电气传导电流概念

表征单位时间内通过某一截面的电量

- 传导电流的组成

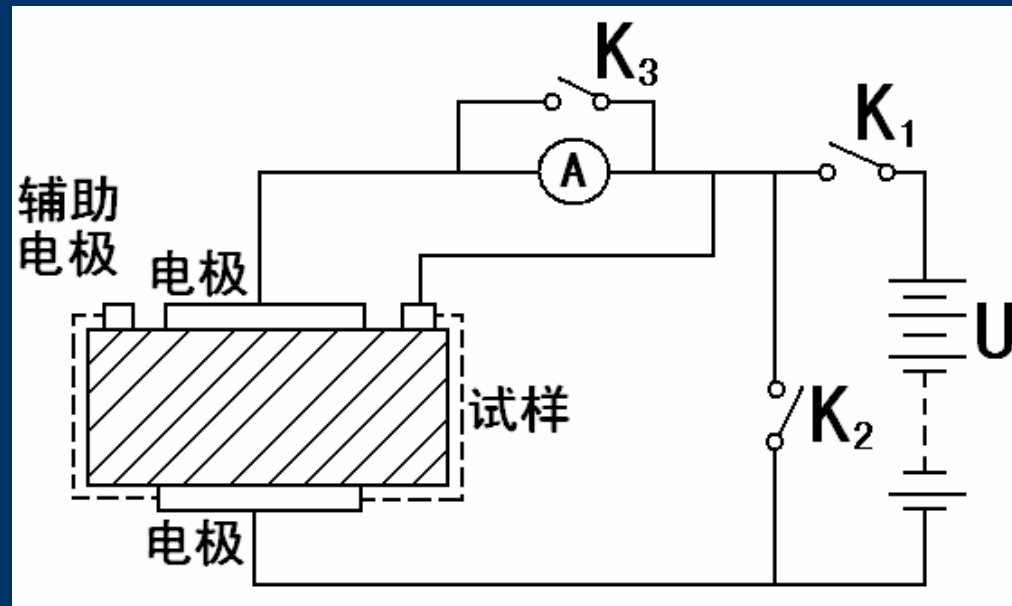
电介质中的传导电流含漏导电流和位移电流两个分量

漏导电流：由介质中自由的或联系弱的带电质点在电场作用下运动造成的，又称**泄漏电流**

位移电流：由电介质极化造成的吸收电流

2、电介质中传导电流的测量

三电极法



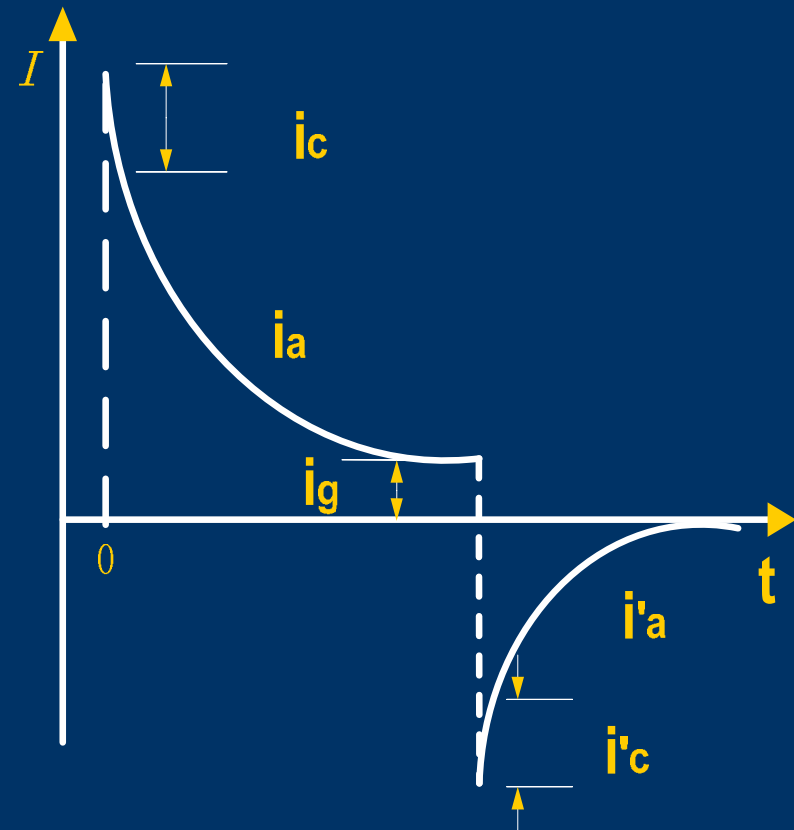
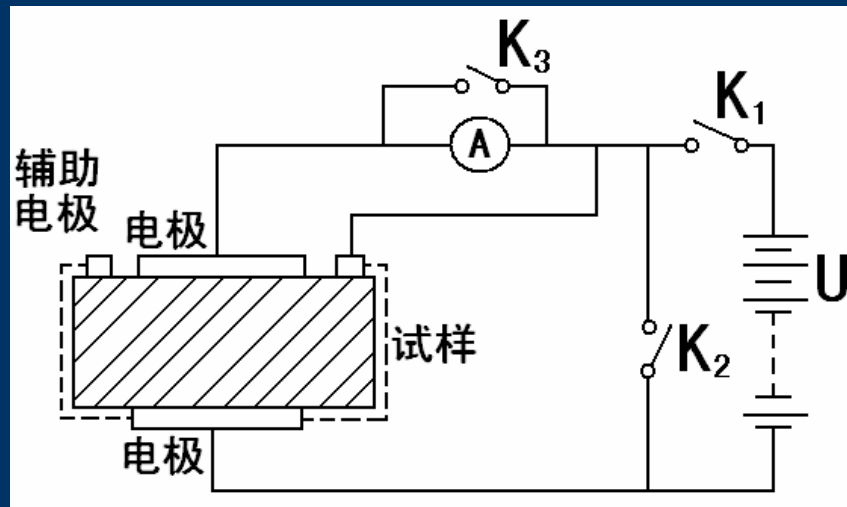
测量介质中电流的电路图

介质中的电流与时间的关系

i_c : 快速极化造成的**充电电流**

i_a : 空间电荷极化等缓慢极化形成的, 又称**吸收电流**

i_g : 趋向稳定值的漏导电流, 又称**泄漏电流**



泄漏电流密度：由迁移中的载流子密度 n 及其迁移速度 v_d 得

$$j = env_d = en\mu E$$

$$v_d = \mu E$$

E ：施加电场强度

e ：载流子的电荷量

μ ：载流子的迁移率

泄漏电导率和电阻率：

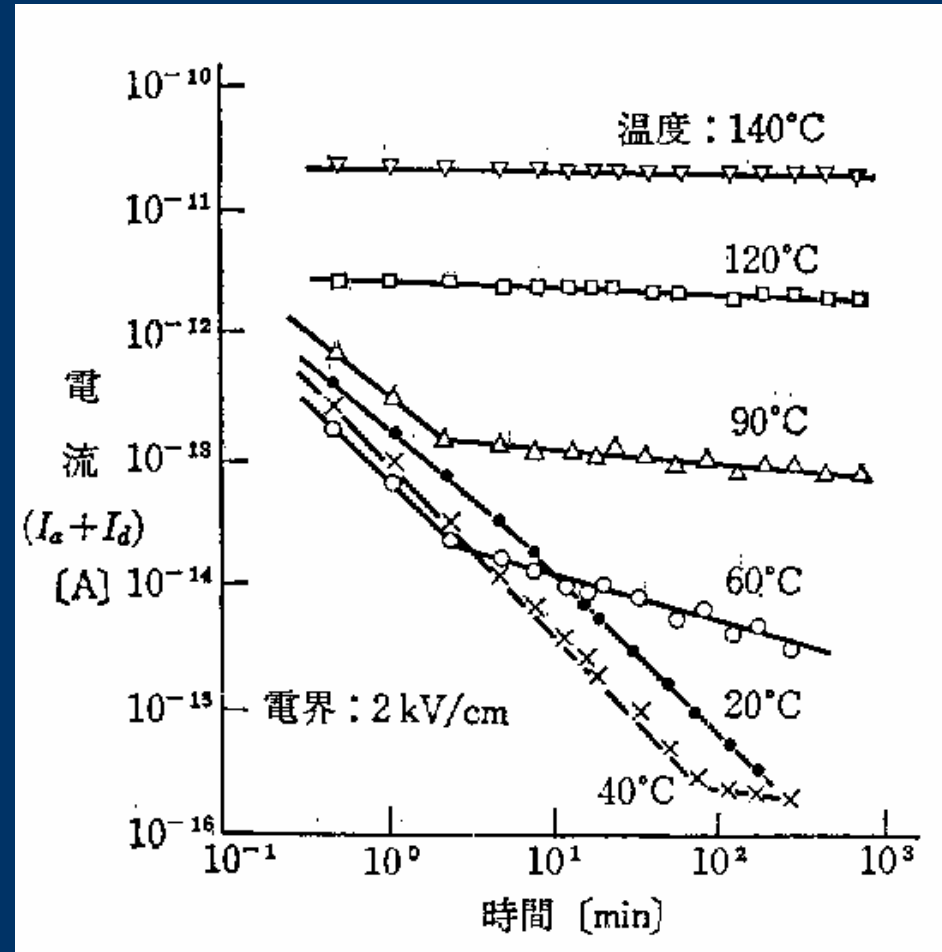
电导率 γ ： $\gamma = \frac{j}{E} = en\mu$

电阻率 ρ ： $\rho = 1/\gamma$

例：聚乙烯的电流-时间特性

在温度高于室温附近，要达到稳定的泄漏电流需要几个小时的时间，在更低的温度下(20°C)，电流很难趋向稳定的漏导电流

通常的**1min绝缘电阻测量**仅仅是为了工程上的方便，实际上并没有物理意义，关于这一点必须注意。



3、介质的体积电导和表面电导

- 三电极法测量介质的体积电阻率 ρ_v 为

$$\rho_v = R_v \frac{S}{d}$$

单位 $\Omega \cdot \text{cm}$

式中 S 为测量电极的面积， d 为介质厚度

R_v 由测量的漏导电流 i_g 及电压值 u 决定， $R_v = U/i_g$

- 介质的体积电导率 γ_v 为

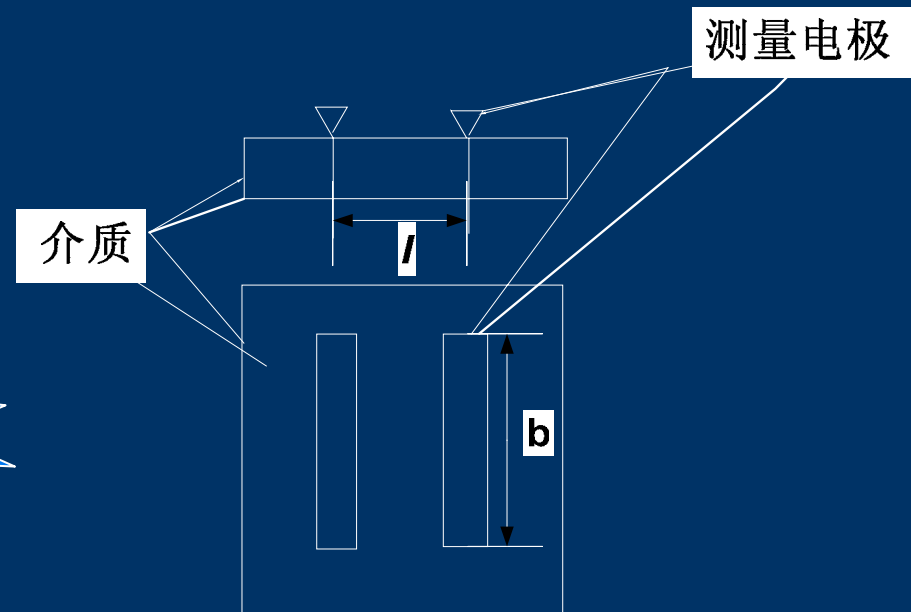
$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v}$$

■ 介质的表面电阻率和电导率

$$\rho_s = R_s \frac{b}{l}$$

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}$$

单位 Ω



l 两电极间距, b 电极长

实际测量时, 因平行电极存在极间场强不均匀的问题需加保护电极, 或者用三电极法上的同心圆环测量

■ 由体积电阻率划分各种介质的结果

导电状态	超导体	导体	半导体	绝缘体
电阻率 [$\Omega \cdot \text{cm}$]		$10^{-6} \sim 10^{-2}$	$10^{-2} \sim 10^9$	$10^9 \sim 10^{22}$
介质		金属	无机、有 机物	无机、油、 有机

4、电介质的电导

- 气体电介质的电导

气体中无吸收电流

气体离子的浓度约为**500~1000对/cm³**

气体电介质中的电流密度—场强特性

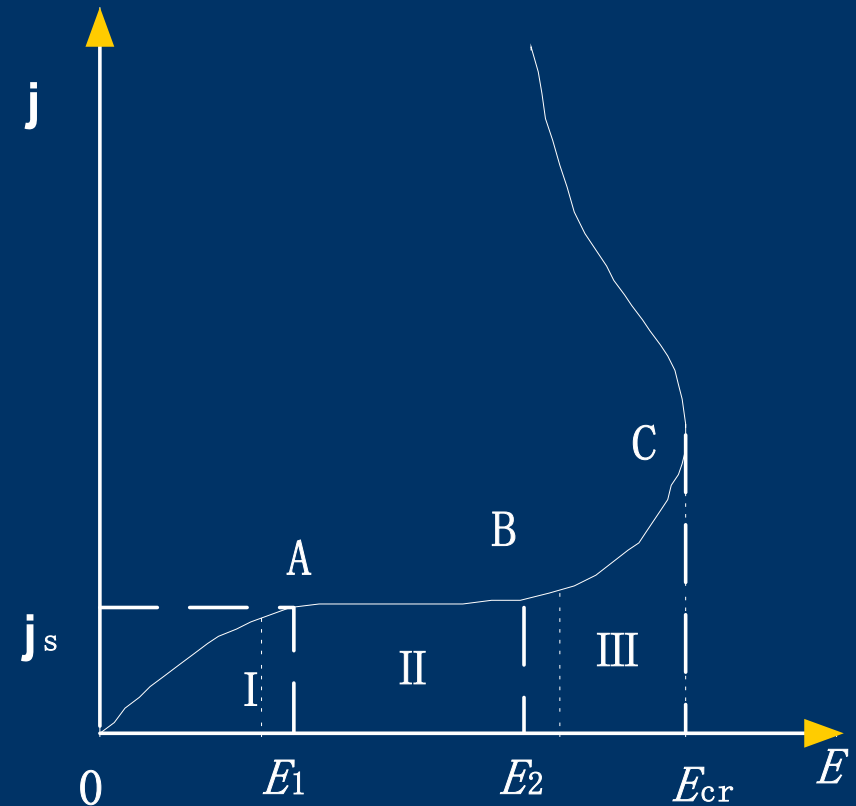
分成三个区域

区域1: $E_1 \approx 5 \times 10^{-3}$ V/cm, 电流密度 j 随着 E 增加而增加

区域2: 场强进一步增大, j 趋向饱和

以上两者的电阻率约 $10^{-22}/\Omega \cdot \text{cm}$ 量级

区域3: 场强超过 $E_2 \approx 10^3$ V/cm时, 气体电介质将发生碰撞电离, 从而使气体电介质电导急剧增大



■ 液体电介质的电导

➤ 液体中极化发展快，吸收电流衰减快

➤ 电导构成：离子电导、电泳电导

离子电导：由液体本身的分子和杂质的分子解离为离子

电泳电导：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

非极性电介质电导率： $10^{-18}/\Omega \cdot \text{cm}$

弱极性电介质电导率： $10^{-15}/\Omega \cdot \text{cm}$

极性电介质的电导率： $10^{-10} \sim 10^{-12}/\Omega \cdot \text{cm}$

由于损耗太大，实际上不使用

极性电介质：如水、乙醇等实际上已是离子性导电液，不能用作绝缘材料

➤ 离子性电导随温度的升高而增加

$$\gamma = Ae^{-B/T}$$

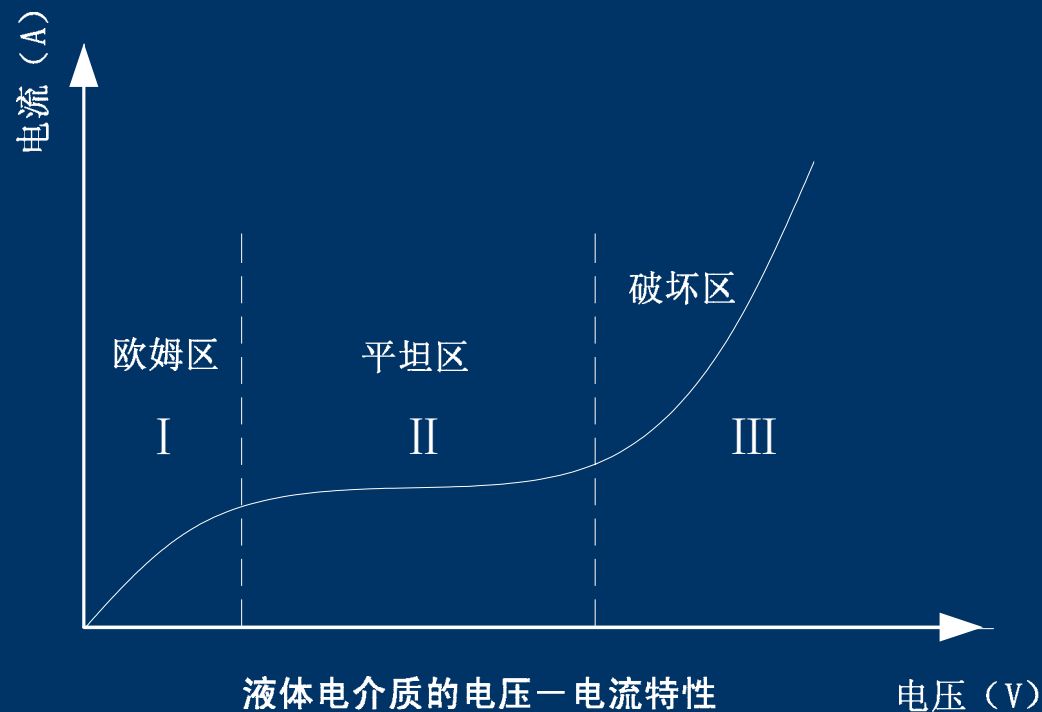
➤ 离子性电导与电场强度的关系

分成三个区域

区域 I: 电导在电场比较小的情况下，遵循欧姆定律

区域 II: 随着场强的增大，与气体相似，有一平坦区域

区域 III: 场强继续增大超过某一极限，因 Shottky 效应电极发射电子引起电流激增，最终击穿



极纯净液体电介质中
电压—电流特性

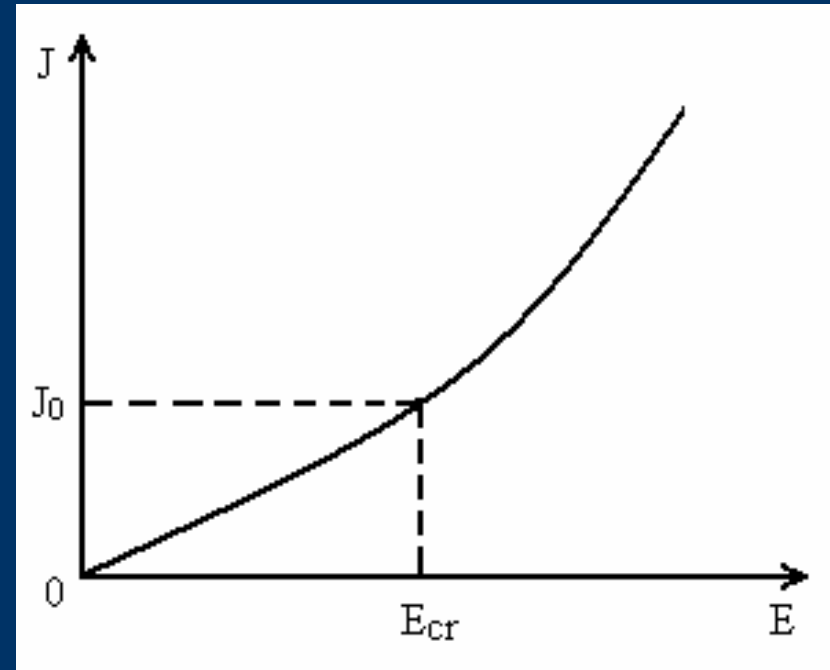
➤ 离子性电导与电场强度的关系

分成两个区域

区域1: 在电场强度小于某定值时，电导基本上为一常数

区域2: 在电场强度超过某定值，离子数剧增，电导迅速增加，电流密度随场强呈指数规律增长

饱和电流段观察不到



工程用纯净液体电介质中
电压—电流特性

■ 固体电介质的电导

- **中性分子电介质的电导**主要是杂质离子引起的，高温时，中性分子可能发生分解产生自由离子，形成电导

纯净介质的电导率可达 $10^{-17} \sim 10^{-19} / \Omega \cdot \text{cm}$

- **偶极性电介质**，因本身能解离，此外还有杂质离子共同决定电导，故电导较大，较佳者可达 $10^{-15} \sim 10^{-16} / \Omega \cdot \text{cm}$

■ 固体电介质的电导

- 离子式电介质的电导主要是由离子脱离晶格而移动，电导的大小和离子本身的性质有关，也与杂质离子有关
- 固体电介质的电导与材料的宏观结构有关，如纤维性材料或多孔性材料因易吸水，一般电阻率较小
- 固体介质中电流的吸收现象比较明显

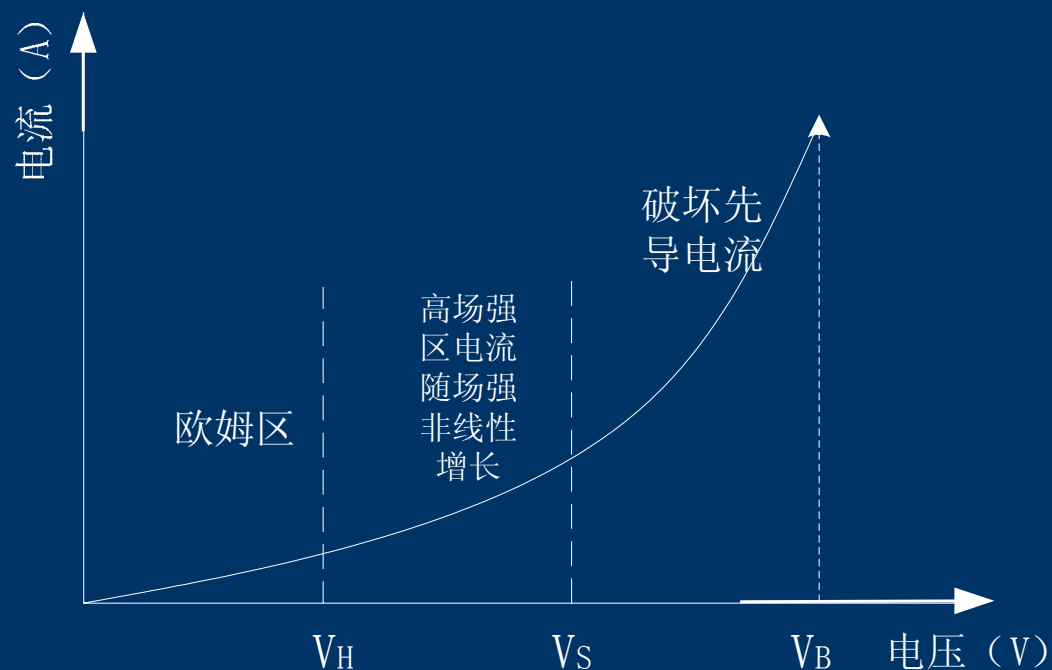
➤ 固体电介质的电压—电流特性

区域1: 符合欧姆定律，
也称低场强领域

区域2: 电流随场强非线性
性增加

区域3: 出现破坏先导电
流

区域2、3也称高场强领域

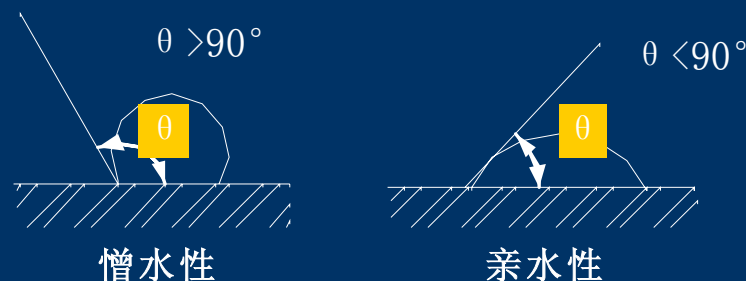


固体电介质的电压—电流特性

和液体、气体不同，固体中的电压—
电流特性没有饱和状态

■ 固体介质的表面电导

固体介质除了体积电阻外，还存在表面电导。干燥清洁的固体介质的表面电导很小，**表面电导主要由表面吸附的水分和污物引起。介质吸附水分的能力与自身结构有关，所以介质表面电导也是介质本身固有的性质**



5、讨论电导的意义

- 绝缘预防性试验的理论依据
预防性试验时，利用绝缘电阻、泄漏电流及吸收比判断设备的绝缘状况
- 直流电压下分层绝缘时，各层电压分布与电阻成正比，选择合适的电阻率，实现各层之间的合理分压
- 注意环境湿度对固体介质表面电阻的影响，注意亲水性材料的表面防水处理



电介质电气性能的划分

- 极化特性
- 电气传导特性
- 损耗特性
- 电气击穿特性

第3节 电介质能量损耗及介质损失角正切

- 介质损失角正切
- 工程介质的介质损耗
- 讨论介质损耗的意义

1、介质损失角正切

- 介质的能量损耗:

 - 电导引起的损耗

 - 周期性极化引起的损耗

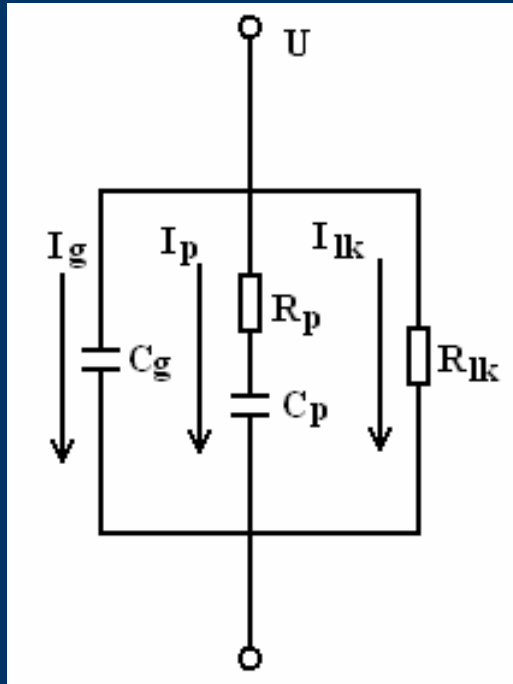
 - 直流 —— 电导损耗 —— R 、 G

 - 交流 —— 电导和极化损耗 —— 介质损耗

- 介质损耗定义

 - 介质在交流电压下的有功功率损耗

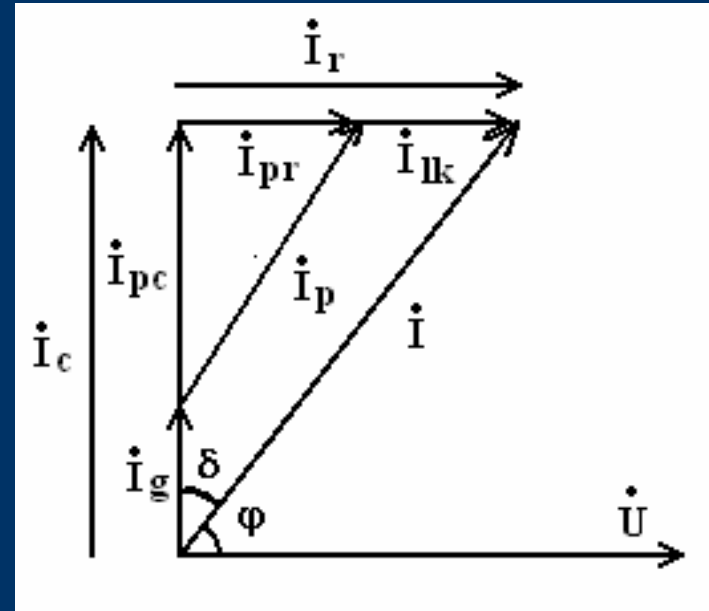
电介质的等效电路



$$S = P + jQ = UI_r + jUI_c$$

对同类试品绝缘 $P \propto \operatorname{tg} \delta$

电介质中的电流和电压矢量



$$P = Q \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

$$P = Q \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

- 用介质损耗 P 来表示介质品质好坏是不方便的
因为从上式中可以看出， P 值与试验电压的平方和电源频率成正比，与试品尺寸、放置位置有关，不同试品之间难以进行比较
- 当外加电压和频率一定时， P 与介质的物理电容 C 成正比，对一定结构的试品而言，电容 C 是定值， P 与 $\operatorname{tg} \delta$ 成正比

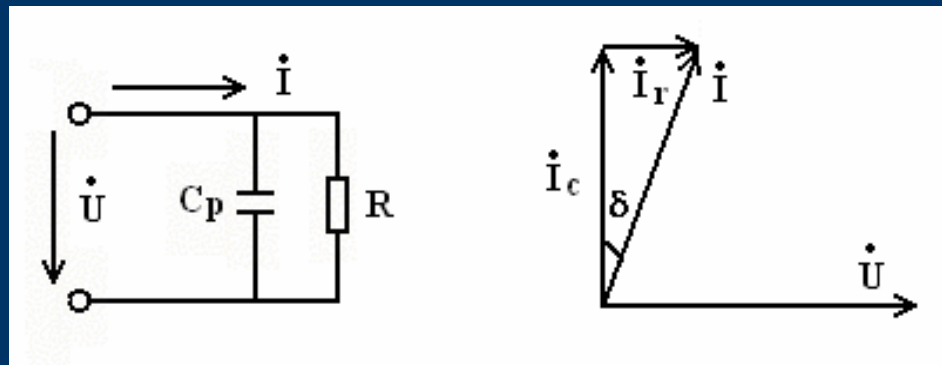
故对同类试品绝缘的优劣，可直接用 $\operatorname{tg} \delta$ 来代替 P 值，对绝缘进行判断

-
- 定义 δ 为介质损失角，是功率因数角 φ 的余角
 - 介质损失角正切值 $\text{tg}\delta$ ，如同 ε_r 一样，取决于材料的特性，而与材料尺寸无关，可以方便地表示介质的品质

$$\text{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C}$$

■ 电介质的并联与串联等值电路

➤ 并联等值电路

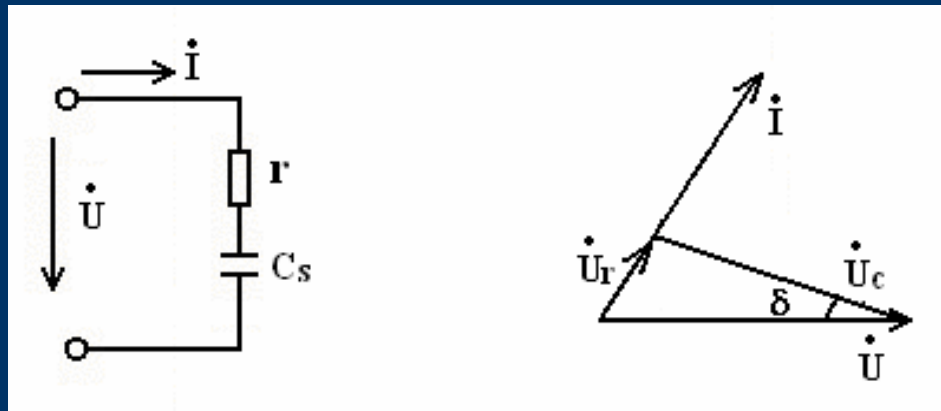


$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C_p} = \frac{1}{\omega C_p R}$$

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

■ 电介质的并联与串联等值电路

➤ 串等值电路



$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_r}{I_c} = \frac{I r}{I / \omega C_s} = \omega C_s r$$

$$P = I^2 r = \frac{U^2 r}{r^2 + (1 / \omega C_s r)^2} = \frac{U^2 \omega^2 C_s^2 r}{1 + (\omega C_s r)^2} = \frac{u^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}$$

- 上述等值电路只有计算上的意义，不能确切地反映介质的物理过程

如果损耗主要是由电导起的，常使用并联等值电路

如果损耗主要是由介质极化及连接导线引起的，常应用串联等值电路

- 电容量计算公式与采用哪一种等值电路有关

绝缘的 $\text{tg}\delta$ 一般很小，并、串联等值电路的介质损耗表达式可用同一公式表示： $P=U^2\omega C\text{tg}\delta$

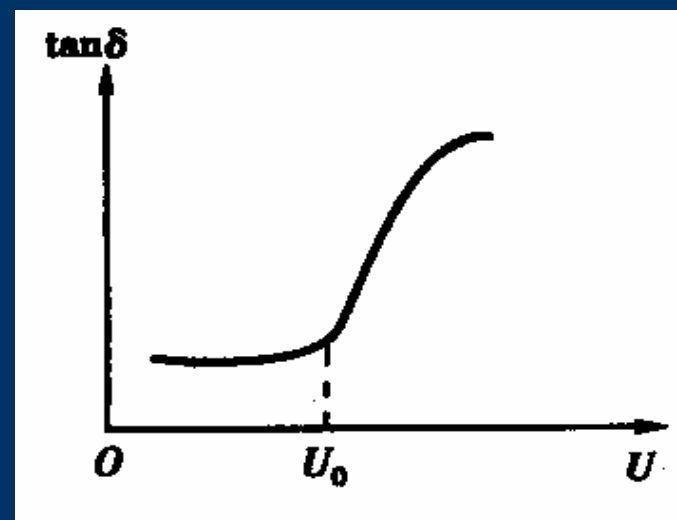
- 实际上电导损耗和极化都是存在的，介质的等值电路应用三支路并联等值电路来等值

2、工程电介质的介质损耗

■ 气体电介质中的损耗

当电场强度小于使气体分子电离所需的值时，气体介质中的损耗极小 ($\tan\delta < 10^{-8}$)，工程中可以略去不计。所以常用气体（如空气， N_2 ； CO_2 ， SF_6 等）作为标准电容器的介质

当外施电压 U 超过起始放电电压 U_0 时，将发生局部放电，损耗急剧增加



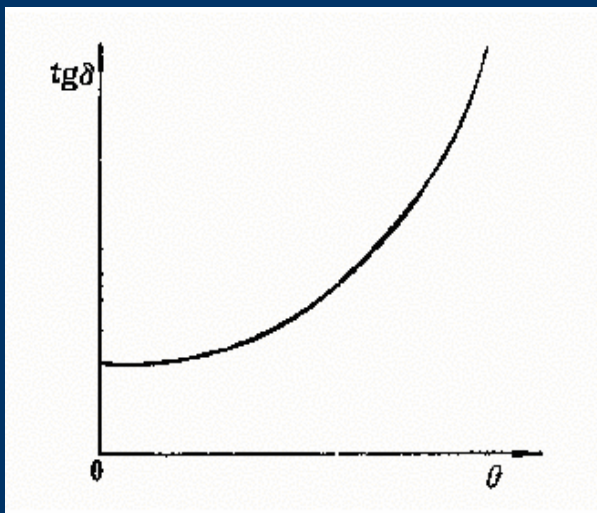
- 在固体介质中含有气泡时，**气泡在高压下会发生电离**，并使固体介质逐渐劣化，常用浸油、充胶等措施来消除固体介质中的气泡
- 对于固体介质与金属电极接触处的空气隙，则经常用适中的方法，使气隙内场强为零

如**35kV瓷套内壁上涂半导体釉**，通过弹性铜片与导电杆相连

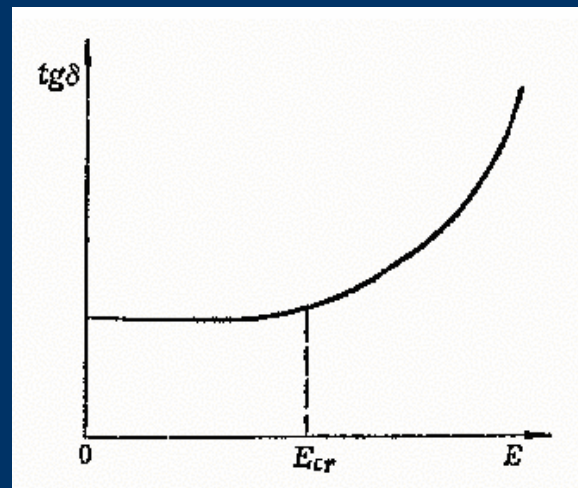
高压电机定子线圈槽内绝缘外包半导体层后，再嵌入槽内等

■ 液体电介质中的损耗

- 中性液体固体电介质中的损耗主要由漏导决定
介质损耗与温度、电场强度等因素的关系决定于电导与这些因素之间的关系



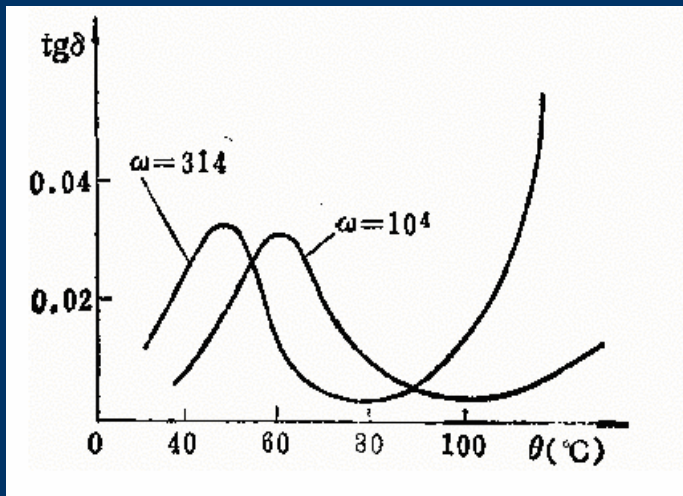
中性液体或中性固体电介质的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系示意图



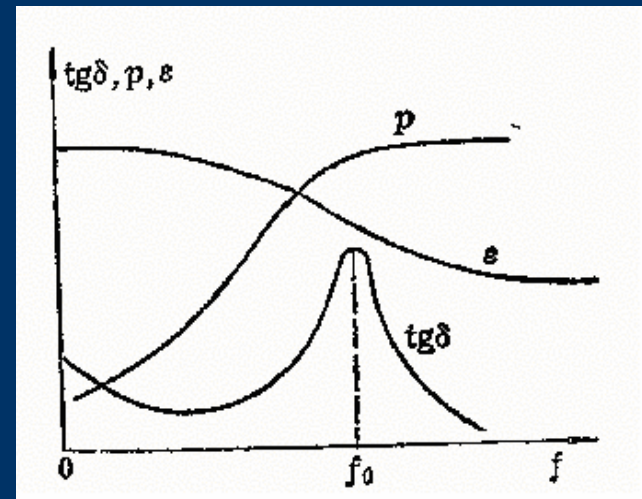
中性液体或中性固体电介质的 $\text{tg}\delta$ 与电场的关系示意图³⁵

- 极性液体介质中的损耗主要包括电导式损耗和电偶式损耗两部分

损耗与温度、频率等因素有较复杂的关系



松香油的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系



介质损耗与频率的关系

■ 固体电介质中的损耗

- **中性电介质**，如石蜡、聚苯乙烯等，其损耗主要由电导引起，通常很小，在高频下也可使用
- **极性电介质**，纤维材料（纸、纤维板等）和含有极性基的有机材料（聚氯乙烯、有机玻璃、酚醛树脂、硬橡胶等）， $\text{tg}\delta$ 值较大，高频下更为严重。与温度、频率的关系与极性液体相似

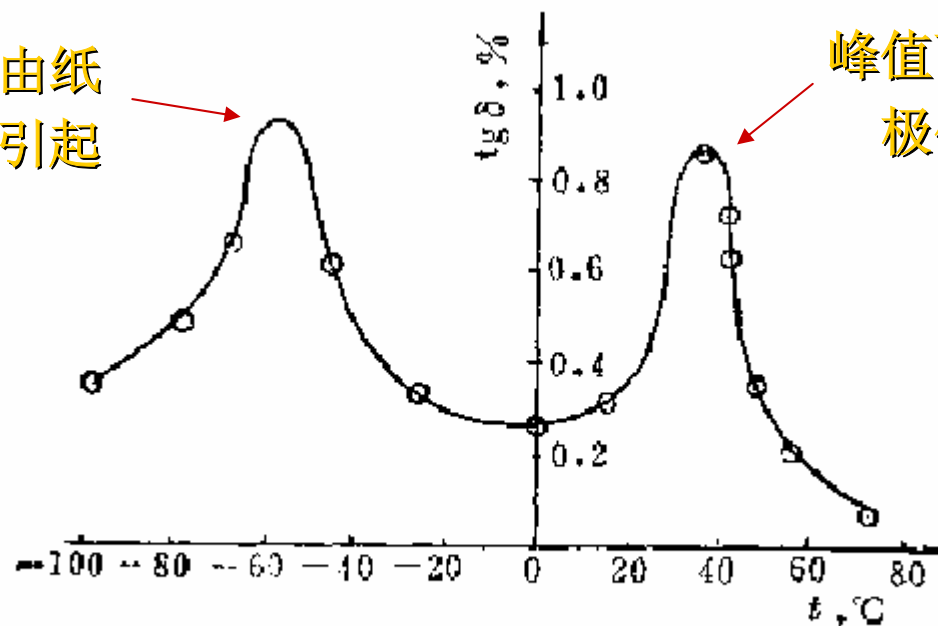
- 离子式结构的介质，其 $\text{tg}\delta$ 与结构特性有关
 - 结构紧密的不含杂质的离子晶体，如云母，其 $\text{tg}\delta$ 主要是由电导引起， $\text{tg}\delta$ 极小，且云母的电气强度高，耐热性能好，耐局部放电性能也好，故云母是优良的绝缘材料，在高频下也可使用
 - 结构不紧密的离子结构中，有极化损耗，故介质的 $\text{tg}\delta$ 较大，玻璃、陶瓷属此类，但随成分和结构的不同， $\text{tg}\delta$ 相差悬殊

■ 不均匀结构的电介质

如电机绝缘中用的云母制品（是云母和纸或布以及环氧树脂所组合的复合介质）、油浸纸和胶纸绝缘等

不均匀结构的电介质的 $\text{tg}\delta$ 取决于其中各成分的性能和数量间的比例

峰值可能由纸极化损耗引起



峰值可能由复合胶极化损耗引起

用复合胶浸渍的电容器纸的 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系

3、讨论介质损耗的意义

- 设计绝缘结构时，应注意到绝缘材料的 $\text{tg}\delta$ 值。若 $\text{tg}\delta$ 过大会引起严重发热，使材料劣化，甚至可能导致热击穿
- 用于冲击测量的连接电缆，其 $\text{tg}\delta$ 必须要小，否则冲击电压波在其中传播时将发生畸变，影响测量精度

3、讨论介质损耗的意义

- 在绝缘试验中， $\text{tg}\delta$ 的测量是一项基本测试项目。当绝缘受潮劣化或含有杂质时， $\text{tg}\delta$ 将显著增加；绝缘内部是否存在局部放电，可通过测 $\text{tg}\delta—U$ 的关系曲线加以判断
- 用做绝缘材料的介质，希望 $\text{tg}\delta$ 小。在其他场合，可利用 $\text{tg}\delta$ 引起的介质发热，如电瓷泥坯的阴干需较长时间，在泥坯上加适当的交流电压，加速干燥过程

谢谢!

Q & A

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



80795842 13691145432



typ@ncepubj.edu.cn