



高电压技术

屠幼萍

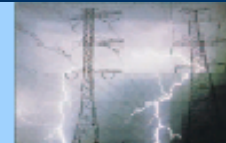
 +80798656, 13691145432

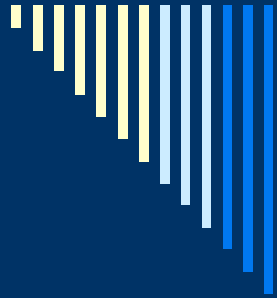
 typ@ncepubj.edu.cn



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

(一)

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



+80798656, 13691145432



typ@ncepubj.edu.cn

第6讲 电介质的电气性能

- 研究电介质电气性能的意义
 - 设备绝缘的基础
 - 超高压大容量的发展
 - 新材料促进了电力工业的进步
 - 我国绝缘材料发展的现状
 - 加强绝缘材料的研究，促进科技发展

第6讲 电介质的电气性能

■ 电介质电气性能的划分

- **极化特性**：介电常数 ϵ
- **损耗特性**：介损 $\tan \delta$
- **电气传导特性**：载流子移动、高场强下的电气传导机理等，电导 G 或电阻 R
- **电气击穿特性**：包括击穿机理、劣化、电压--时间特性曲线 ($V-t$) 等，击穿电压 U_C 或击穿场强 E_C

第1节 电介质的极化及介电常数

- 电介质物质结构的基本形式
- 极化 (polarization)与电介质 (dielectrics)
- 电介质极化的基本类型
- 电介质的介电常数
- 讨论极化的意义

1、电介质物质结构的基本形式

- 电介质的分类（根据化学结构）：分子及各聚集态（气、液、固态）的性质和它的键的形式密切相关

离子键：强极性键，**离子结构电介质** 玻璃、陶瓷

共价键：非极性共价键（电负性相同），非极性分子

非极性电介质 聚四氟乙烯、氮气

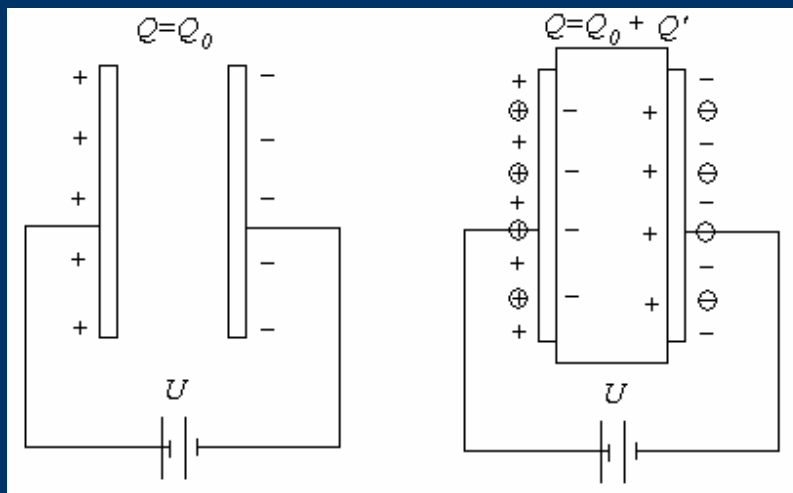
极性共价键（电负性不同），极性分子

极性电介质 环氧树脂、三氯联苯

弱极性电介质 聚苯乙烯

存在分子异构或支链

2、极化与电介质



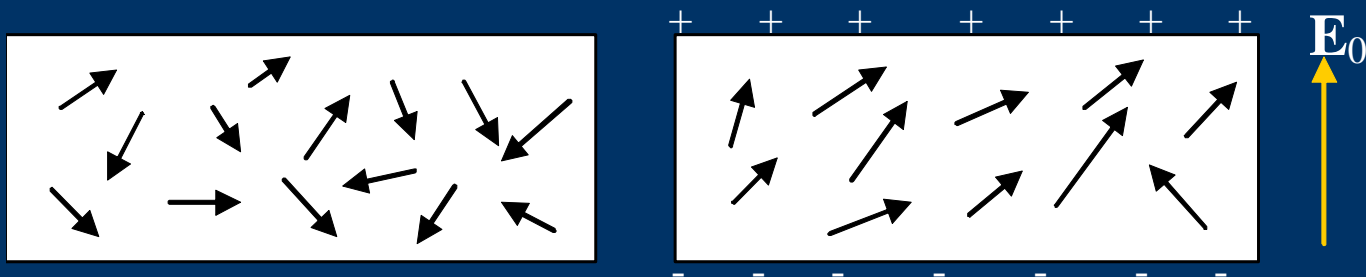
平板真空电容器电容： $C_0 = \frac{Q_0}{U}$

插入固体电解质后电容： $C = \frac{Q_0 + Q'}{U}$

电容量增大的原因在于电介质的极化现象， Q' 是由电介质极化引起的束缚电荷

极化与电介质

极化现象： 电场中有电介质时，由于电场的作用在沿电场方向表面出现束缚电荷，形成**电偶极矩**的现象



极化前

极化后

-
- 用极化强度 P 来表征极化的强度，定义为单位体积的电极矩，与外加电场强度有关
 - 极化强度 P 与介电常数 ε 的关系：

$$P = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_r - 1) \cdot E$$

$$C_0 = \frac{Q_0}{U} = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

$$C = \frac{Q_0 + Q'}{U} = \frac{\varepsilon A}{d}$$

3、电介质极化基本类型

电介质的极化有五种基本形式：

电子位移极化

离子位移极化

转向极化

空间电荷极化

夹层介质界面极化（归到空间电荷极化）

■ 电子位移极化

极化机理：电子偏离轨道

介质类型：所有介质

建立极化时间：极短， $10^{-14}\sim 10^{-15}\text{s}$

极化程度影响因素：

电场强度（有关）

电源频率（无关）

温度（无关）

消耗能量：弹性极化、无损

■ 离子位移极化

极化机理：正负离子位移

介质类型：离子性介质

建立极化时间：极短， $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s

极化程度影响因素：

电场强度（有关）

电源频率（无关）

温度（随温度升高而增加）

离子间结合力 ↑↑

离子密度 ↓

消耗能量：弹性极化、无损

■ 转向极化（偶极弛豫极化）

极化机理：极性分子转向

介质类型：极性介质、离子弛豫性极化的离子性介质

建立极化时间：需时较长， $10^{-6}\sim 10^{-2}$ s

极化程度影响因素：

电场强度（有关）

电源频率（有关）

温度（温度较高时降低，低温段随温度增加）

消耗能量：非弹性极化、有损

■ 夹层介质界面极化

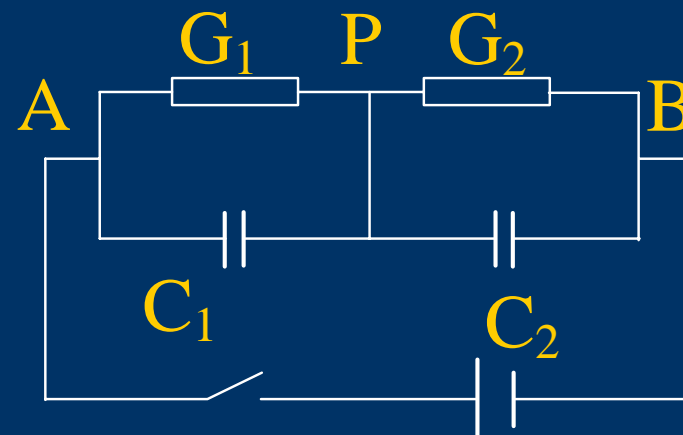
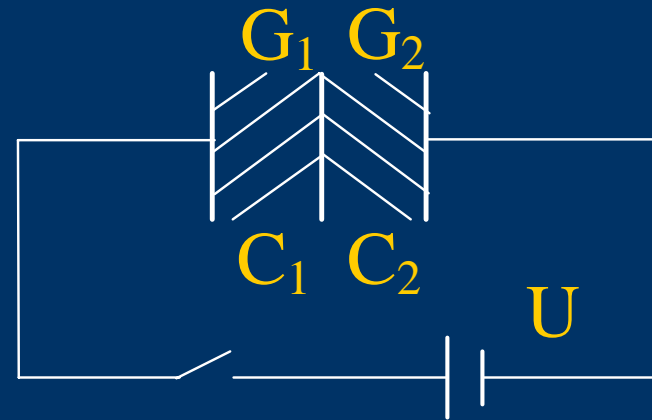
夹层介质界面极化概念:

当 $t=0$:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

当 $t=\infty$:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{G_2}{G_1}$$



一般有

$$\frac{C_2}{C_1} \neq \frac{G_2}{G_1}$$

- 电荷重新分配，在两层介质的交界面处有**积累电荷**
- 夹层界面上电荷的堆积是通过介质电导G完成的，高压绝缘介质的电导通常都很小，这种性质的极化只有在**低频**时才有意义
- 介质的等值电容增大

■ 夹层介质界面极化

极化机理：带电质点移动

介质类型：不均匀夹层介质中

建立极化时间：很长

极化程度影响因素：

电场强度（有关）

电源频率（低频下存在）

温度（有关）

消耗能量：非弹性极化、有损

■ 空间电荷极化

极化机理：正、负自由离子或电子移动

介质类型：含离子和杂质离子的介质

建立极化时间：很长

极化程度影响因素：

电场强度（有关）

电源频率（低频下存在）

温度（有关）

消耗能量：非弹性极化、有损

4、电介质的介电常数

■ 相对介电常数及其物理意义

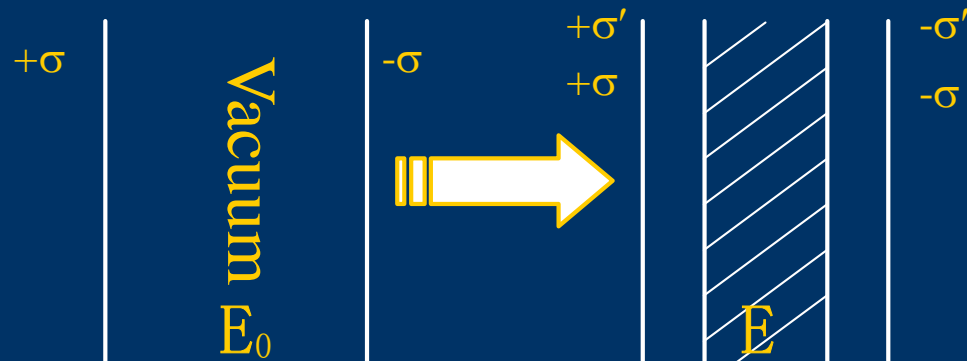
图中：

单位面积的电荷： σ

真空中： $E_0 = \sigma / \epsilon_0$

极化电荷密度为： σ'

介质中： $E = (\sigma - \sigma') / \epsilon_0$



$$\frac{E_0}{E} = \frac{\sigma}{\sigma - \sigma'} = \epsilon_r \quad \epsilon_r \epsilon_0 = \epsilon$$

相对介电常数是反映电介质极化程度的参数

■ 气体电介质的介电常数

- 气体分子间的距离很大，密度很小，气体的极化率很小，一切气体的相对介电常数都接近1
- 气体的介电常数随温度的升高略有减小，随压力的增大略有增加，但变化很小

部分气体的相对介电常数（环境条件 20°C, 1atm）

气体种类	相对介电常数
氦	1.000072
氢	1.000027
氧	1.00055
氮	1.00060
甲烷	1.00095
二氧化碳	1.00096
乙烯	1.00138
空气	1.00059

■ 液体电介质的介电常数

➤ 非极性和弱极性电介质

如石油、苯、四氯化碳、硅油等， ϵ_r 数值不大，在**1.8~2.5**范围内

ϵ_r 和温度的关系相似单位体积中的分子数与温度的关系

➤ 极性电介质

如蓖麻油、氯化联苯等， ϵ_r 数值在**2~6**范围内。
还能用作绝缘介质

■ 液体电介质的介电常数

➤ 强极性电介质

如酒精、水等， $\epsilon_r > 10$ ，其电导也很大，不能用做绝缘材料。用作电容器浸渍剂时，可使电容器的比电容增大，但通常损耗都较大

➤ 介电常数同温度和频率的关系（氯化联苯）

根据**转向极化**的特点，
对介电常数随温度
及频变化的趋势作
出解释：

T不变

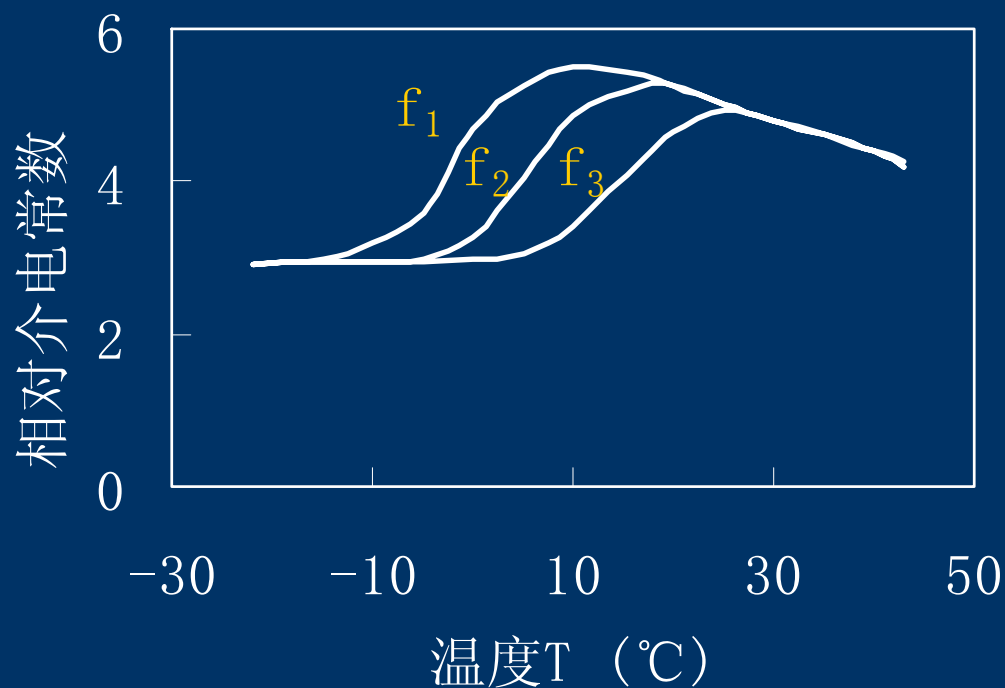
f 增大， ϵ_r 减小

f 不变

T升高， ϵ_r 先增后减

粘度（分子间联系）

分子热运动



■ 固体电介质的介电常数

➤ 非极性和弱极性固体电介质

如聚乙烯、聚丙烯、聚四氟乙烯、聚苯乙烯、石蜡、石棉、无机玻璃等

电介质只有电子式极化和离子式极化， ϵ_r 在 **2.0~2.7**范围

ϵ_r 与温度的关系相似单位体积内的分子数与温度的关系

■ 固体电介质的介电常数

➤ 极性固体电介质

树脂、纤维、橡胶、虫胶、有机玻璃、聚氯乙烯和涤纶等

ϵ_r 较大，一般为**3~6**， ϵ_r 和T及f的关系和极性液体的相似

➤ 离子性电介质

如陶瓷，云母等，相对介电常数 ϵ_r 一般在**5~8**左右

5、讨论极化的意义

■ 选择绝缘

在实际选择绝缘时，除考虑电气强度外，还应考虑介电常数 ϵ_r

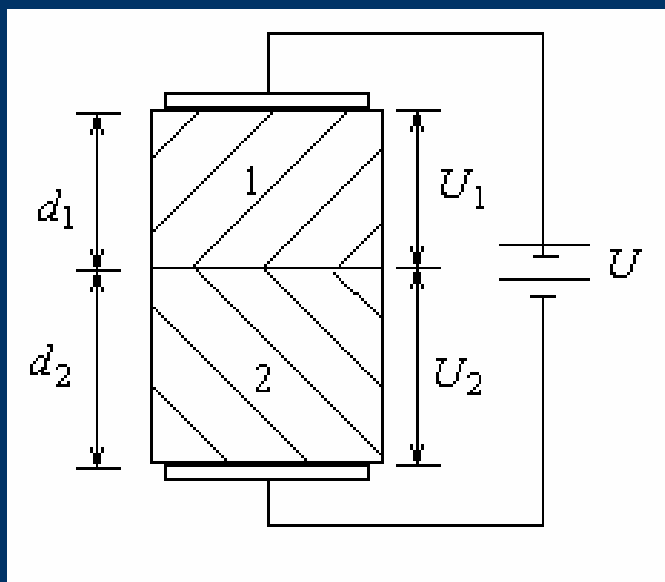
对于电容器，若追求同体积条件有较大电容量，要选择 ϵ_r 较大的介质

对于电缆，为减小电容电流，要选择 ϵ_r 较小的介质

5、讨论极化的意义

■ 多层介质的合理配合

对于多层介质，在交流及冲击电压下，各层场强分布与其 ϵ_r 成反比，要注意选择 ϵ_r ，使各层介质的电场分布较均匀，从而达到绝缘的合理应用



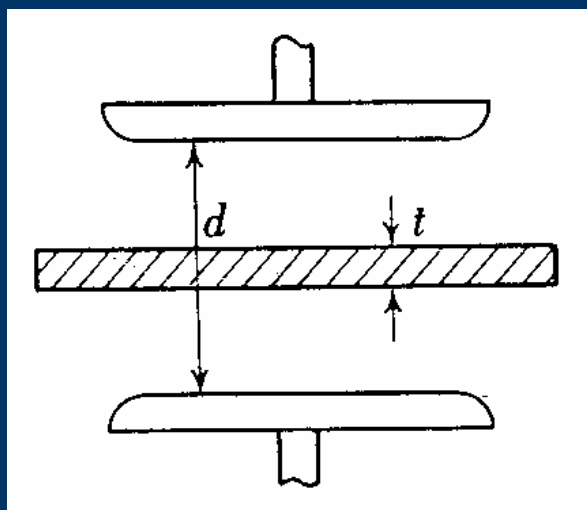
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

如果固体绝缘中存在气泡，由于气体的 ϵ_r 是最小的，所以气泡将承受较大的电场强度，首先在气泡处发生电离，引起局部放电，使整体材料的绝缘能力降低。如采用油浸方式能改善电场分布

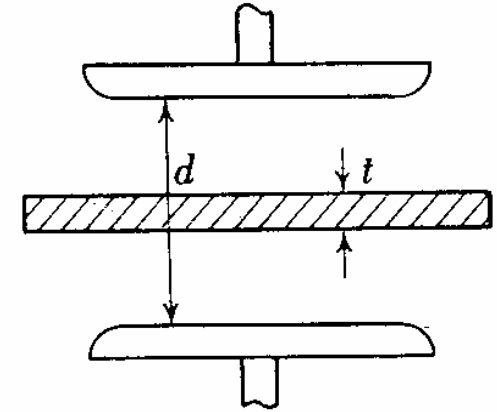
在电缆芯处使用 ϵ_r 较大的材料，可减小电缆芯处场强，电缆中电场分布均匀一些，从而提高整体的耐电强度

电介质极化应用实例一

平行平板电极间距离为2cm，在电极上施加55kV的工频电压时未发生间隙击穿，当板电极间放入一厚为1cm的聚乙烯板($\epsilon_r=2.3$)时，问此时是否会发生间隙击穿现象？为什么？并请计算插入聚乙烯板前后的各介质中的电场分布



解:



(1)插入前: $E_a = V_0/d = 55/2 = 27.5 \text{ kV/cm}$

(2)插入后: $V_s/V_a = \epsilon_a / \epsilon_s$, 得 $V_a = 2.3V_s$

$$V_0 = V_s + V_a = 3.3V_s$$

$$V_s = V_0/3.3 = 55/3.3 = 16.7 \text{ (kV)}$$

$$E_s = 16.7 \text{ kV/cm}$$

$$V_a = V_0 - V_s = 55 - 16.7 = 38.3 \text{ (kV)}$$

$E_a = 38.3 \text{ kV/cm} > 30 \text{ kV/cm}$ 的空气击穿场强

故插入聚乙烯板后空气间隙击穿

电介质极化应用实例二

对于同轴电缆，可采用多层介质，在靠近内电极处采用介电常数大的好处是什么？为什么？从介电常数的角度来分析油纸绝缘在套管中是如何改善电场分布的。目前固体绝缘的套管方兴未艾，你是如何考虑材料的选择呢？

谢谢!

Q & A

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



80798656, 13691145432



typ@ncepubj.edu.cn

温度对转向极化的影响



- 温度较高时

分子热运动加剧，极化减弱

- 温度过低

液体、固体电介质，考虑分子间联系紧，极化较为困难，极化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，极化又随温度上升而较小