

清华大学  
Tsinghua University

复习、作业、预习

- 复习：4.1（续）、4.2
- 作业：4-1、4-2、4-3、4-4、4-7、4-10、补充3道（见网络学堂）
- 预习：4.3-4.7

1



清华大学  
Tsinghua University

网络教学直播方式：雨课堂

高电压工程—  
之液、固电介质电气性能（续）

周远翔  
zhou-yx@tsinghua.edu.cn  
MB: 13911097570  
清华大学电机工程与应用电子技术系

2




EEA 清华大学电机工程系  
Department of Electrical Engineering

专题：特高压试验基地

周远翔  
zhou-yx@tsinghua.edu.cn  
MB: 13911097570  
清华大学电机工程与应用电子技术系


3



特高压试验基地

- 1 武汉特高压交流试验基地
- 2 北京特高压直流试验基地
- 3 昆明国家特高压工程与技术实验室
- 4 西藏高海拔试验基地
- 5 特高压力学实验室
- 6 西安交流大容量开断实验室
- 7 国家电网仿真中心
- 9 特高压直流输电工程成套设计研发（实验）中心
- 8 清华大学高电压实验室

4



■ 国家电网公司研发建设了“四个试验基地，两个研发中心”，形成了国际上可试参数最高的试验检测能力。南方电网公司与清华大学共建国家特高压工程与技术实验室。西电集团也建立了大电流实验室。使得我国高电压、强电流试验能力大幅提升

- 特高压交流试验基地
- 特高压直流试验基地
- 高海拔试验基地
- 特高压工程力学试验基地
- 国家电网仿真中心
- 特高压直流输电工程成套设计研发（实验）中心

5



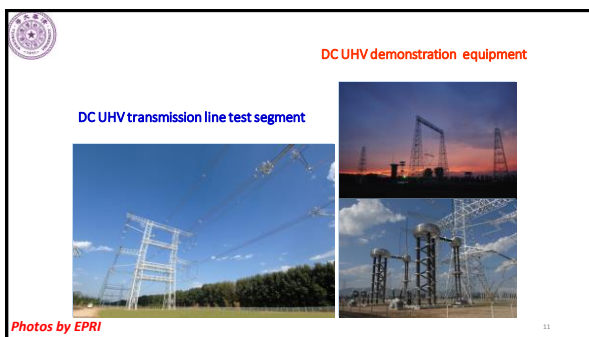
1 武汉特高压交流试验基地

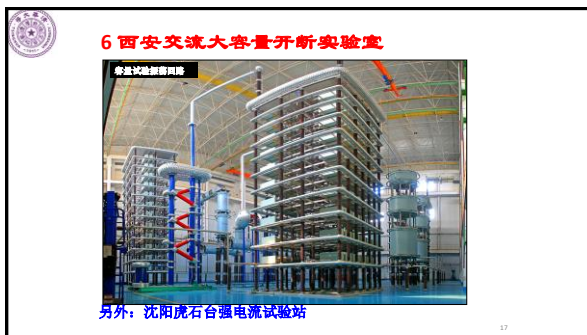
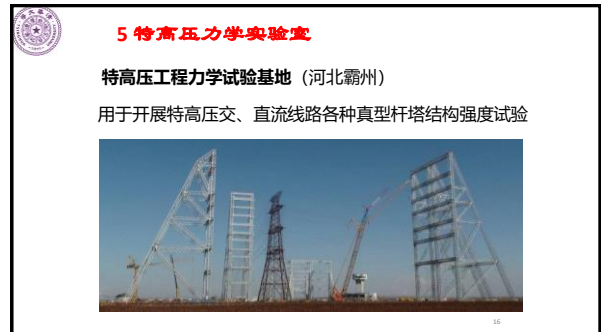
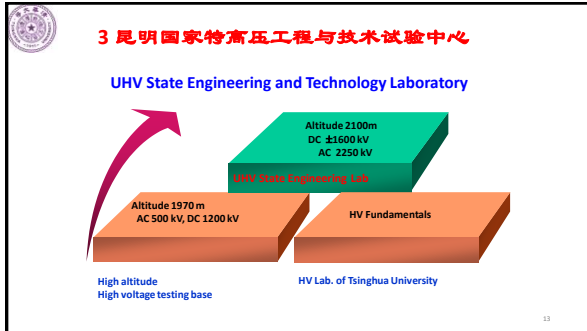
国家电网公司投入巨资，建设四个试验研究基地。边建设，边研究，获得了一批具有国际领先水平的成果，从技术上为工程建设提供了有力支撑。

武汉特高压交流试验基地



6







### 8 特高压直流输电工程成套设计研发（实验）中心

特高压直流输电工程成套设计研发（实验）中心（北京）

用于开展直流工程成套设计和仿真实验



19



### 9 清华大学高电压实验室

High Voltage Laboratory at THU  
A 500 kV HV Laboratory



20



### Foundation of HV Lab at THU: 1950 s



21



### HV testing hall



22



### Laboratory equipment and apparatus



High Voltage Lab  
Tsinghua University

23



### Space charge measuring system



### Defect simulation and FTIR system

24



### 特高压试验基地的作用

- 1 特高压输电工程预研
- 2 长空气间隙放电特性
- 3 外绝缘特性
- 4 电磁环境
- 5 过电压与绝缘配合
- 6 电晕特性
- 7 带电作业
- 8 电气设备考核

25



### 第4章 液体、固体电介质的电气性能

#### 4.1 电介质电气性能的基本概念

#### 4.2 液体、固体电介质的极化、电导与损耗

##### 4.2.1 电介质的极化及相对介电常数

##### 4.2.2 电介质的电导、电阻及电导率、电阻率

##### 4.2.3 电介质中的能量损耗及电介质损耗角正切

#### 4.3 液体电介质的电导

#### 4.4 固体电介质的电导

#### 4.5 电介质中的空间电荷

#### 4.6 组合绝缘

#### 4.7 电介质的其他性能

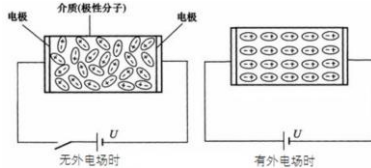
26



#### 4.2.1 电介质的极化及相对介电常数

##### 1. 极化的基本概念

电介质在电场作用下，正、负电荷作微小位移而在电场方向上产生偶极矩，或在电介质表面出现感应束缚电荷的现象称为电介质极化



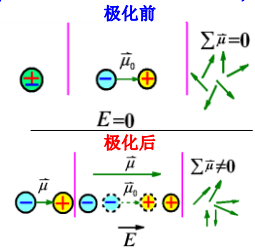
27



##### 2. 电介质极化的基本类型（以粒子种类和运动特征划分）

电介质的极化有5种基本形式

- (1) 电子位移极化
- (2) 离子位移极化
- 二者统称位移极化 (displacement polarization)
- (3) 转向极化 (orientation)
- (4) 空间电荷极化
- (5) 夹层电介质界面极化
- 后两者统称移动极化



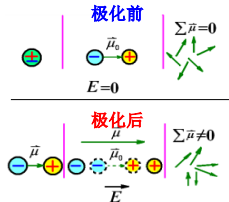
28



##### (1) 电子位移极化

电介质的原子、分子或离子中的电子在外电场的作用下使电子轨道相对于原子核发生位移，从而产生感应电矩的过程

- ✓极化的微观粒子：电子
- ✓存在的电介质类型：一切介质
- ✓建立极化时间： $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ s}$
- ✓极化弹性：弹性
- ✓消耗能量：无
- ✓极化程度的影响因素  
电场强度：决定作用  
电源频率：无关  
温度：无关
- ✓外电场去掉后极化可恢复



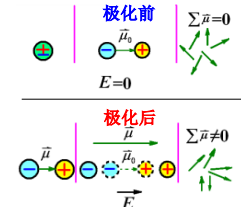
29



##### (2) 离子位移极化

离子电介质内的正、负离子在外电场的作用下产生微小位移，平均地具有了外电场方向的偶极矩

- ✓极化的微观粒子：离子
- ✓存在的电介质类型：离子结构的电介质
- ✓建立极化时间： $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ s}$
- ✓极化弹性：弹性
- ✓消耗能量：无
- ✓极化程度的影响因素  
电场强度：决定作用  
电源频率：无关  
温度：增加， $\epsilon_r$ 一般具有正的温度系数
- ✓外电场去掉后极化可恢复



30

**(3) 转向极化:**

又称偶极子弛豫极化或取向极化。在极性电介质中, 分子中的正、负电荷作用中心不重合, 就单个分子而言, 已具有偶极矩, 称偶极分子。无外电场作用时, 偶极分子处于热运动状态, 对外平均不具有偶极矩。在外电场作用下偶极分子在电场方向的取向概率增加, 对外平均具有了电场方向的偶极矩

- ✓极化的微观粒子: 偶极子、离子
- ✓存在的电介质类型: 偶极性和结构不紧密的离子性电介质
- ✓建立极化时间:  $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ s}$
- ✓极化弹性: 非弹性
- ✓消耗能量: 有
- ✓极化程度的影响因素
  - 电场强度: 决定作用
  - 电源频率: 有关
  - 温度: 有关, 极化随温度升高呈先增后降的特性
- ✓外电场去掉后极化不可恢复

31

**(3) 转向极化:**

又称偶极子弛豫极化或取向极化。在极性电介质中, 分子中的正、负电荷作用中心不重合, 就单个分子而言, 已具有偶极矩, 称偶极分子。无外电场作用时, 偶极分子处于热运动状态, 对外平均不具有偶极矩。在外电场作用下偶极分子在电场方向的取向概率增加, 对外平均具有了电场方向的偶极矩

- ✓极化的微观粒子: 偶极子、离子
- ✓存在的电介质类型: 偶极性和结构不紧密的离子性电介质
- ✓建立极化时间:  $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ s}$
- ✓极化弹性: 非弹性
- ✓消耗能量: 有
- ✓极化程度的影响因素
  - 电场强度: 决定作用
  - 电源频率: 有关
  - 温度: 有关, 极化随温度升高呈先增后降的特性
- ✓外电场去掉后极化不可恢复

32

<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1818350116>

**(4) 空间电荷极化**

电介质内的电子、正负离子在电场的作用下移动, 改变分布状况, 在电极之间形成空间电荷

- ✓极化的微观粒子: 复杂
- ✓存在的电介质类型: 工程电介质
- ✓建立极化时间: 很长
- ✓极化弹性: 非弹性
- ✓消耗能量: 有
- ✓极化程度的影响因素
  - 电场强度: 决定作用
  - 电源频率: 有关, 低频时有效
  - 温度: 有关
- ✓外电场去掉后极化不可恢复

33

**(5) 夹层电介质界面极化概念**

合闸瞬间两层电介质的电压比由电容决定。稳态时分压比由电导决定

当  $t=0$  时  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$

当  $t=\infty$  时  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{G_2}{G_1}$

如果  $\frac{C_2}{C_1} = \frac{G_2}{G_1}$

则双层电介质的表面电荷不重新分配。但实际上很难满足上述条件, 电荷要重新分配, 这样在两层电介质的交界面处会积累电荷, 这种极化形式称夹层电介质界面极化

34

**夹层电介质界面极化特性**

- ✓极化的微观粒子: 复杂
- ✓存在的电介质类型: 不均匀夹层介质
- ✓建立极化时间: 很长
- ✓极化弹性: 非弹性
- ✓消耗能量: 有
- ✓极化程度的影响因素
  - 电场强度: 决定作用
  - 电源频率: 有关, 在低频时存在极化
  - 温度: 有关
- ✓外电场去掉后极化不可恢复

35

**3. 电介质的介电常数**

> 介电常数 (dielectric constant) 及其物理定义: (permittivity, permittivity; relative dielectric constant, 相对介电常数; dielectric coefficient, 介电系数; specific inductive capacity 电容量)

在有电介质存在的情况下, 电介质内部的电场强度是极化电荷引起的电场与电极上的真实电荷引起的电场的总和。

36



真空  $+ \sigma$  Vacuum  $E_0$   $- \sigma$   $+ \sigma'$   $- \sigma'$  电介质平板  $E$

✓真空时：电极单位面积的电荷  $\sigma$   
真空中场强  $E_0 = \sigma / \epsilon_0$

✓插入电介质板后：电介质表面极化电荷密度  $\sigma'$   
电介质中场强  $E = (\sigma - \sigma') / \epsilon_0$

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

$\epsilon_r$  即是插入的电介质的相对介电常数

➤电介质的介电常数 $\epsilon$ 的特性

电工术语上称作介电常数 $\epsilon$ 和相对介电常数 $\epsilon_r$

- $\epsilon$ 并不是常数
- ✓ $\epsilon$ 与构成电介质的微观粒子性质和数量有关
- ✓ $\epsilon$ 随温度、频率、电场等而变化
- ✓ $\epsilon$ 是一虚数，分实部和虚部
- 工程上通常使用的是实数部分
- 既然 $\epsilon$ 并不是常数，工程上为什么把电容器的电容量当作常数？

(1) 气体的相对介电常数

部分气体的相对介电常数（工频，20℃，1 atm）

气体种类	相对介电常数
氢	1.000072
氦	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

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

(2) 液体电介质的介电常数

常见液体电介质的相对介电常数（工频，20℃）

极性	名称	相对介电常数 $\epsilon_r$
非极性和弱极性	变压器油	2.2~2.5
	硅有机液体	2.2~2.8
极性	蓖麻油	4.5
	氯化联苯	4.6~5.2
强极性	丙酮	22
	酒精	33
	水	81

非极性和弱极性：1.8-2.8  
偶极性：3-80，其中3-6可用作绝缘电介质

例 极性电介质介电常数同温度和频率的关系

➤根据转向极化的特点，可对介电常数随温度及频率变化的趋势作出解释

✓ $f$ 不变， $T$ 升高 $\epsilon_r$ 先增大后减小（热运动相关）

✓ $T$ 不变， $f$ 增大 $\epsilon_r$ 减小

频率  $f_3 > f_2 > f_1$

氯化联苯，现已不用

投票 最多可选1项

同一温度下，频率增大，介电常数减小。这是因为频率增大，极化时间减小了。

A 同意

B 不同意

提交

**(3) 固体电介质的介电常数**  
部分固体介质的相对介电常数（工频，20℃）

✓非极性或弱极性电介质 (一般2.0~2.7)	✓高子性或强极性电介质 (一般5~8, 强极性除外)
石蜡 2.0~2.5	云母 5.0~7.0
聚乙烯 2.25~2.35	电瓷 5.5~6.5
聚苯乙烯 2.45~3.1	钛酸钡 几千至上万
松香 2.5~2.6	金红石 100
沥青 2.6~2.7	

✓偶极性电介质 (一般3~6)	
油浸纸	3.3
酚醛树脂塑料	4.0~4.5
聚氯乙烯	3.2~4.0
聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)	3.3~4.5

43

**3. 讨论极化的意义**

➤ **选择绝缘**：在实际选择绝缘时，除了考虑电气强度外，还应考虑介电常数 $\epsilon_r$ 。对于电容器，若追求同体积条件下有较大电容量，要选择 $\epsilon_r$ 较大的电介质。对于电缆，为减小电容电流，要选择 $\epsilon_r$ 较小的电介质。

➤ **多层电介质的合理配合**：对于多层电介质，在交流及冲击电压下，各层电压分布与其 $\epsilon_r$ 成反比，要注意选择 $\epsilon_r$ ，使各层电介质的电场分布较均匀，从而达到绝缘的合理应用。

➤ **研究电介质损耗的理论依据**：极化形成和电介质损耗有关，要掌握不同极化类型对电介质损耗的影响。

➤ **电气设备预防性试验**：项目的理论根据。

➤ **其他**：如驻极体、铁电体、压电体、热电体、储能等新型材料的研发与应用。

44

**专题讨论：极化在绝缘设计中的应用**

**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38kV（有效值）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，问此时会发生间隙击穿现象否？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。

**例**

45

**解**：

(1) 插入前： $E_0 = U_0/d = 38/2 = 19 \text{ kV/cm}$  (有效值)  $= 27.5 \text{ kV/cm}$  (峰值)

(2) 插入后： $U_0/U_s = \epsilon_r/\epsilon_0$ ，得  $U_s = 2.3U_0$   
 $U_0 = U_s + U_p = 3.3U_s$   
 $U_s = U_0/3.3 = 55/3.3 = 16.7 \text{ (kV)}$  (峰值)  
 $E_s = 16.7 \text{ kV/cm}$  (峰值)  
 $U_p = U_0 - U_s = 55 - 16.7 = 38.3 \text{ (kV)}$  (峰值)  
 $E_p = 38.3 \text{ kV/cm}$  (峰值)  
 大于30 kV/cm的空气击穿场强，故插入聚乙烯板后空气间隙击穿  
 此时：  
 空气中电场为？  
 聚乙烯中电场为？（有效值）

46

投票 最多可选1项

对于交流同轴电缆，若可采用多层电介质，在靠近内电极处采用介电常数大的电介质作为绝缘电介质好，还是采用介电常数小的电介质好？

A 介电常数小的好  
 B 介电常数大的好  
 C 没有区别  
 D 不一定

提交

47

**电介质极化应用实例二**：对于交流同轴电缆，若可采用多层电介质，在靠近内电极处采用介电常数大的电介质作为绝缘电介质好，还是采用介电常数小的电介质好？

**例**

48



#### 4.2.2 电介质的电导、电阻及电导率、电阻率

##### 1. 电介质中的漏导电流和极化电流

> **电气传导电流概念**：是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（总电流）含漏导电流和极化电流两个分量

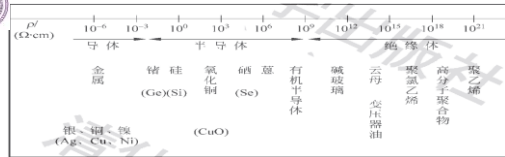
✓ **漏导电流**：由电介质中自由的或联系弱的带电质点在电场作用下运动造成的

✓ **极化电流**：

由电介质位移极化和快速转向极化造成的**瞬时电流** & 较慢速转向极化及移动极化造成的**吸收电流**

49

#### > 几种材料的电导特性与电阻率

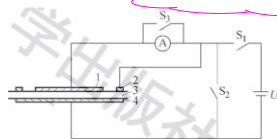


- ✓ **电介质电导（漏导电流引起的电导）**：电导主要由离子造成，电阻率  $\rho$  约为  $10^9 \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ ，**温度升高电阻率下降**
- ✓ **半导体电导**：电导主要由离子造成，电阻率  $\rho$  约为  $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ ，**温度升高电阻率下降**
- ✓ **金属电导**：电导主要由电子造成，电阻率  $\rho$  约为  $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ，**温度升高电阻率增大**？

50

#### > 测量电介质样品电流的方法：三电极法

By What, Why and How?

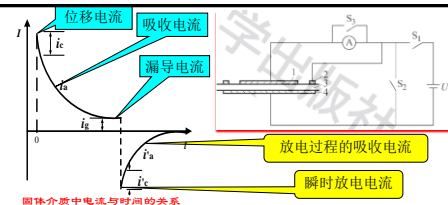


测量电介质中电流的电路图

1—上电极(圆板)； 2—辅助电极(圆环)；  
3—被试电介质； 4—下电极(圆板)

辅助电极用来消除沿介质表面的泄漏电流

51



固体介质中电流与时间的关系

注意：

- (1) 测量时，仪表应避免开瞬态充电电流  $i_c$  和放电电流  $i_d$  以避免过大的瞬时值损坏仪表；
- (2) 通常电力设备绝缘电阻是由施加电压规定时间后（1 min 或 10 min）的电流求得的，没有实际的物理意义，只有工程经验意义

52

#### 2. 体积电导和表面电导的测量GB 1410

> **体积电阻率**：

用三电极法测量介质的  $\rho_v$  为

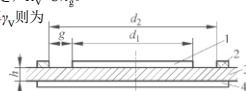
$$\rho_v = R_v \frac{A}{h} = R_v \pi (d_1 + g)^2 / 4h$$

单位  $\Omega \cdot \text{cm}$

式中  $A$  为测量电极的有效面积， $h$  为介质厚度， $R_v$  由测量的漏导电流  $i_g$  及电压值决定， $R_v = U/i_g$ 。

那么介质的**体积电导率**  $\gamma_v$  则为

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



53

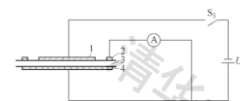
#### > **电介质的表面电阻率和电导率**：

改变三电极的回路，即可测量表面电阻

$$\text{电阻率 } \rho_s = R_s \frac{p}{g}$$

$$\text{电导率 } \gamma_s = \frac{1}{\rho_s}$$

$g$  代表两电极间距， $p$  代表有效电极长



54



3. 气体电介质的电导

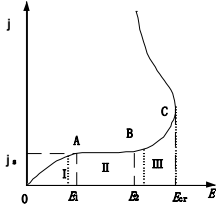
- ✓吸收特性：气体中无吸收电流
- ✓电导构成：带电粒子在电场中运动
- ✓气体离子的浓度：由外电离因素造成，约为500~1000对/cm<sup>3</sup>
- ✓电阻率：10<sup>22</sup>Ω·cm

55



✓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≤5×10<sup>3</sup> V/cm，电流密度j随着E增加而增加；
- ◆区域2：当E进一步增大，j趋向饱和；
- 以上两者的电阻率的10<sup>22</sup>Ω·cm量级。
- ◆区域3：当场强超过E<sub>3</sub>≤10<sup>3</sup> 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



56

投票 最多可选1项

设置

气体间隙击穿后外施电场减小放电电流反而急剧增加，这是由于电压源的内阻造成外电路电压下降所致。

- ☒ A 同意
- ☐ B 不同意

提交

57



4. 液体电介质的电导

- ◆吸收特性：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
- ◆电阻率：
  - ✓非极性10<sup>18</sup>Ω·cm
  - ✓弱极性10<sup>15</sup>Ω·cm
  - ✓偶极性10<sup>10</sup>Ω·cm~10<sup>12</sup>Ω·cm，由于损耗太大，实际上不使用。
  - ✓强极性如水、乙醇等实际上已是离子性导电液，不能用作绝缘材料
- ◆温度特性：
  - 离子性电导随温度的升高而增加

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

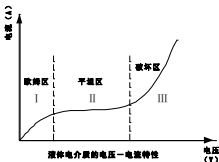
58



✓液体电介质中电压—电流特性（分成三个区）

纯净液体电介质的电压与电流特性

- 区域1：液体电介质的电导在电场比较小的情况下，遵循欧姆定律
- 区域2：随着场强的增大，与气体相似，有一平坦区域
- 区域3：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



59



工程液体电介质的电压与电流特性

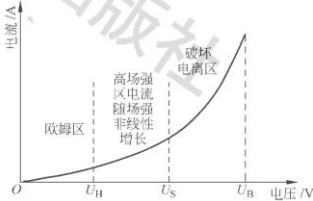



图 4-8 工程液体电介质中电流与电压的关系  
(U<sub>B</sub> 为击穿电压)

60



### 5. 固体电介质的电导


✓ **吸收特性:** 固体介质中电流的吸收现象比较明显

✓ **电导构成:** 离子电导（电导的机理及规律和液体类似），无电泳电导

✓ **电阻率**

- 非极性或弱极性：主要由杂质离子造成电导。纯净介质的电阻率可达  $10^{17} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$
- 离子性：  
结构紧密，洁净的电介质，电阻率为  $10^{17} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{19} \Omega \cdot \text{cm}$   
结构不紧密且含单价小离子的电介质的电阻率仅达  $10^{13} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$
- 偶极性：因本身能解离，此外还有杂质离子共同决定电导，故电阻率较小，较佳者可达  $10^{15} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$

61

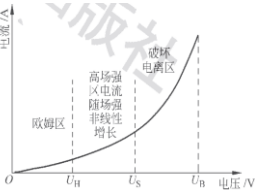


✓ **固体电介质的电压—电流特性**（分三个区域）  
与工程液体电介质的电压与电流特性相似


- ◆ **区域1:** 符合欧姆定律，也称低场强领域
- ◆ **区域2:** 电流随场强非线性增加
- ◆ **区域3:** 出现破坏先导电流

◆ **特点:**

- 区域2、3也称高场强领域
- 和气体、纯净的液体不同，固体中的电压—电流特性没有饱和状态



62

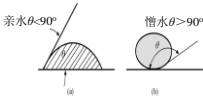


### 6. 固体电介质的表面电导

固体电介质除了体积电阻外，还存在表面电导。干燥清洁的固体电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。电介质吸附水分的能力与自身结构有关，所以电介质表面电导也是电介质本身固有的性质


✓ **表面状态分类:** 固体电介质可按水滴在电介质表面的浸润情况分为**亲水性**和**憎水性**两大类

- **亲水性:** 水滴的内聚力小于水和电介质表面的亲和力，表现为水滴的接触角小于  $90^\circ$ 。亲水性材料的表面电导大，受环境湿度的影响大，表面电阻率  $\rho_s: 10^{13} \sim 10^{15} \Omega$
- **憎水性:** 水滴的内聚力大于水和电介质表面的亲和力，表现为水滴的接触角大于  $90^\circ$ 。憎水性材料的表面电导小，表面电阻率  $\rho_s: 10^{15} \sim 10^{17} \Omega$

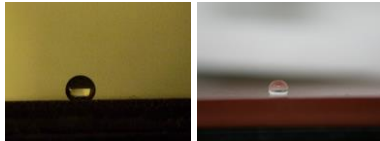


水滴在两类介质上的分布状态  
日常生活中在哪见到球状水珠？


63



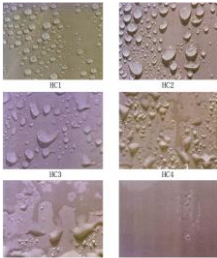
✓ **憎水性表面水滴状态**




64



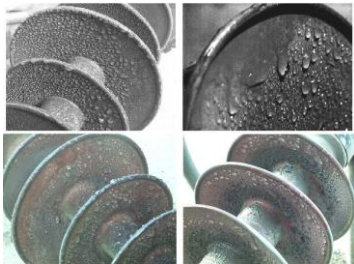
✓ **憎水性与亲水性宏观现象**



65



✓ **现场运行合成绝缘子表面憎水性的变化**



66

## 7. 讨论电介质导电的意义

- ▶ **电气设备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
- ▶ **绝缘配合**：**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
- ▶ **运行维护**：注意环境湿度对固体电介质表面电阻的影响，注意亲水性材料的表面防水处理

从电场分布角度看，直流电缆靠近导杆的绝缘层选择电阻率大的还是小的更合理？

67

## 4.2.3 电介质中的能量损耗及电介质损耗角正切

## 1. 电介质损耗角正切

## ✓ 直流电压下的损耗

- 损失类型：在直流电压作用下电介质的损失仅有漏导损失
- 表征方式：可用体积电阻率 $\rho_v$ 或表面电阻率 $\rho_s$ 表征

## ✓ 交流电压下的损耗

- 损失类型：在交流电压作用下电介质的损失除了漏导损失外，**还有极化损失**
- 表征方式：仅有 $\rho_v$ 或 $\rho_s$ 不够，需要另外的特征量来表示电介质在交流电压作用下的能量损耗

68

## ✓ 电介质的交流电压—电流向量图

由于存在损耗， $U$ 和 $I$ 之间的夹角不再是90°的关系， $I_R$ 代表流过电介质总的无功电流， $I$ 代表流过电介质的总有功电流， $I_R$ 包括了漏导损耗和极化损耗

## ✓ 电介质损耗角正切

$\tan\delta$ 仅反映电介质本身的性能，和电介质的几何尺寸无关 $\tan\delta=I_R/I_C$

电介质的电压电流向量图

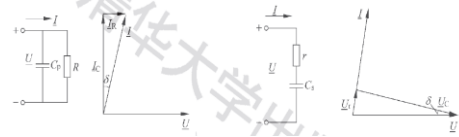
$\tan\delta$ 反映电场变动一周内的能量损失

不仅与几何尺寸无关，也与施加电压（场强）大小无关

69

## 2. 电介质的串、并联等值回路

分析电介质在交流电压作用下的能量损耗，常用两种等值回路，**并联等值回路和串联等值回路（需要注意：等值回路没有物理意义，仅仅是数学的解决办法）**



并联等值回路

串联等值回路

70



## ✓ 并联等值回路

- 电介质损耗角正切 $\tan\delta=I_R/I_C=1/\omega C_p R$
- 功率 $P=U^2/R=\omega C_p U^2 \tan\delta$

## ✓ 串联等值回路

- 电介质损耗角正切 $\tan\delta=U_r/U_C=\omega C_s r$
- 功率 $P=I^2 r = \frac{\omega C_s U^2 \tan\delta}{1 + \tan^2\delta}$

## ✓ 电介质损失率的定义

单位体积电介质的功率损耗  $p = \frac{f \epsilon_r \tan\delta}{1.8 \times 10^{12}} E^2$

71

## 3. 气体电介质的损耗

- ✓ 损耗极小
- ✓ 常用来构成标准电容器
- ✓ 注意避免放电的发生


## 4. 液体和固体电介质的损耗

## ✓ 非极性或非弱极性

- 损耗决定于漏导
- 损耗小， $\tan\delta$ 约为 $10^{-4}$
- 代表性电介质有聚乙烯、聚苯乙烯、硅橡胶、云母等
- ✓ 偶极性液体、固体和结构不紧密的离子性固体
- 损耗决定于漏导和极化损失
- 损耗和温度、频率等因素有关，关系复杂

损耗与电介质的极性有关

72



例

松香油

✓低温时：电导损耗和极化损耗都小

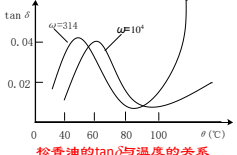
✓温度升高：偶极子转向容易，极化损耗显著增加，电导损耗略有增大

✓极值温度：电介质损耗达到最大值

✓温度继续升高：分子热运动妨碍偶极子顺电场定向排列，极化损耗减小。此时电导损耗虽增大，但增幅比极化损耗的减幅小幅度小，电介质损耗总体减小


✓温度的进一步升高：电导急剧增大，电导损耗起主要作用，电介质损耗也因之急剧增大

•此时电介质损失率 $p$ 的温度特性与电导损耗的温度特性相同



松香油的 $\tan\delta$ 与温度的关系

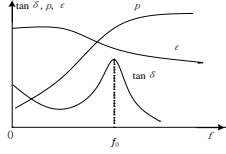
73



综

✓低频时：弛豫极化充分， $\epsilon$ 较大

✓高频时：弛豫极化跟不上电场变化， $\epsilon$ 决定于位移极化，较小




极性液体介质中的损耗与频率的关系

由以下关系式可分析 $p$ 和 $\tan\delta$ 与频率 $f$ 的关系

$$\rho = \frac{f\epsilon_r \tan\delta}{1.8 \times 10^{12}} E^2 \rightarrow \tan\delta \propto \frac{p}{f\epsilon_r}$$

74




5. 讨论损耗的意义

✓选择绝缘材料： $\tan\delta$ 过大会引起绝缘电介质严重发热，甚至导致热击穿。例如用蓖麻油制造的电容器就因为 $\tan\delta$ 大，而仅限于直流或脉冲电压下（水是否绝缘？）使用，不能用于交流

✓预防性试验中判断绝缘状况：如果绝缘受潮或劣化， $\tan\delta$ 将急剧上升，在预防试验中可通过 $\tan\delta \sim U$ 的关系曲线来判断是否发生局部放电

✓均匀加热：当 $\tan\delta$ 大的材料需加热时，可对材料加交流电压，利用材料本身电介质损耗的发热。该方法加热非常均匀，如电缆生产中对泥坯加热即用这种方法


75



本节内容总结

- 电介质的基本概念
- 极化的基本概念和形式
- 漏导电流和极化电流的基本概念
- 三电极法测量体积电导的方法
- 电导电流的变化过程
- 表面电导的测量方法
- 气、液和固体电介质的电导特性
- 表面电导特性及其影响因素
- 电介质损耗角正切的概念，其在电介质特性参数中的固有特性
- 电介质损耗角正切的串、并联等效电路
- 电介质损耗角正切、介质损失率与温度和频率的关系
- 介电常数与温度和频率的关系

76



清华大学  
Tsinghua University

高电压工程一

之液、固电介质电气性能 (2)

第2讲 The End

谢谢！

77