

# 高电压技术

屠幼萍

☎ +80795842, 13691145432

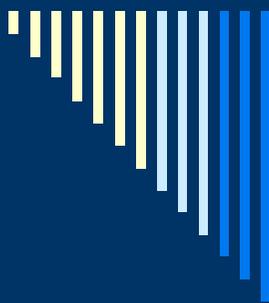
✉ [typ@ncepubj.edu.cn](mailto:typ@ncepubj.edu.cn)



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8讲

## 固体电介质的击穿

屠幼萍



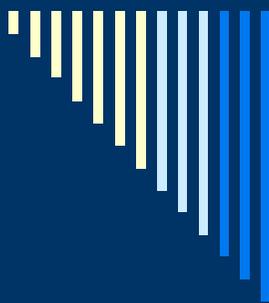
高电压与电磁兼容研究所



80798656, 13691145432



typ@ncepubj.edu.cn



# 主要内容

- 固体电介质的击穿过程
- 有机绝缘材料的电树老化
- 影响固体电介质击穿电压的主要因素
- 电介质击穿过程的空间电荷效应
- 电介质的其它性能

# 概述

- 气、固、液三种电介质中，固体密度最大，耐电强度最高

空气的耐电强度一般在3 ~ 4 kV/mm左右

液体的耐电强度在10 ~ 20 kV/mm

固体的耐电强度在十几至几百kV/mm

- 固体电介质的击穿过程最复杂，且击穿后是唯一不可恢复的绝缘
- 普遍规律：介质的击穿总是从电气性能最薄弱的缺陷处发展起来的，这里的缺陷可指电场的集中，也可指介质的不均匀性

# 一、固体电介质的击穿过程

- 固体电介质击穿特性的划分
- 电击穿
- 热击穿
- 电化学击穿（电老化）

# 一、固体电介质的击穿过程

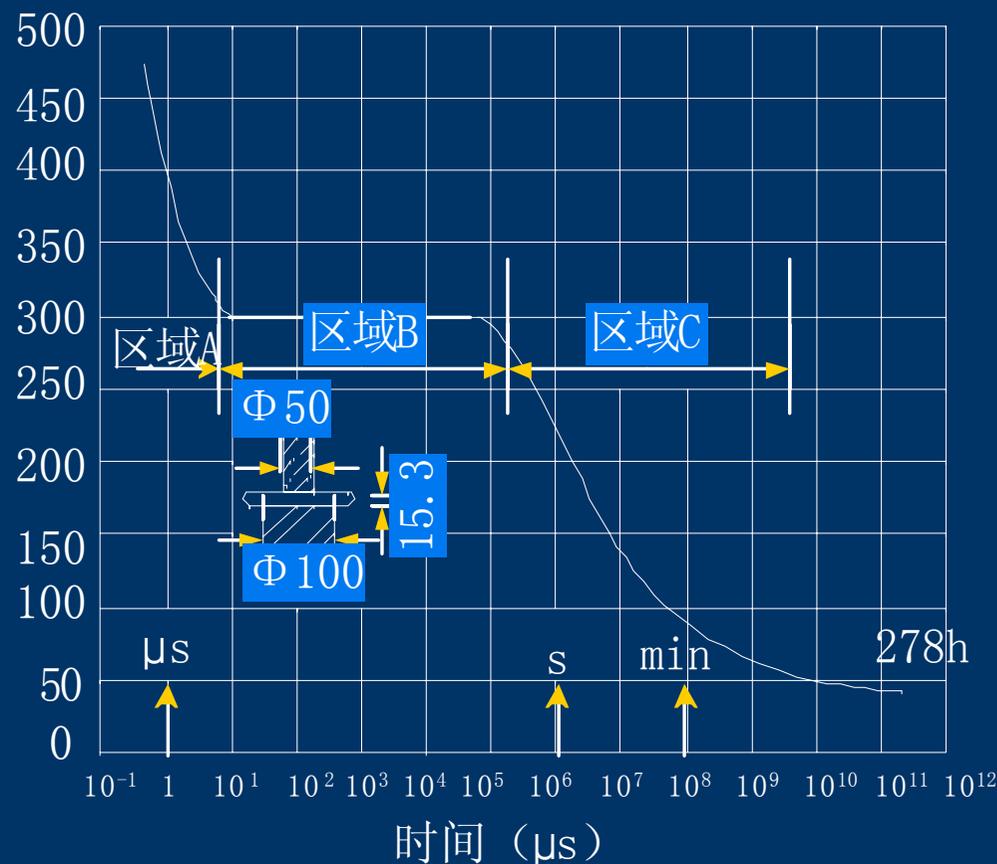
## ➤ 固体电介质击穿特性的划分

**区域A：** 击穿时间小于  $10\mu\text{s}$  的区域，击穿电压随击穿时间的缩短而提高。类似于气体介质击穿的伏秒特性

**区域B：** 击穿时间在  $10\sim 0.2\mu\text{s}$  范围的区域，击穿电压恒定

**击穿都具有电击穿的性质**

击穿电压为一分钟耐压的百分比(%)



电工纸板的击穿电压  
与电压作用时间的关系

**区域C:** 击穿电压随击穿前时间的增加而明显下降, 具有热击穿的特点

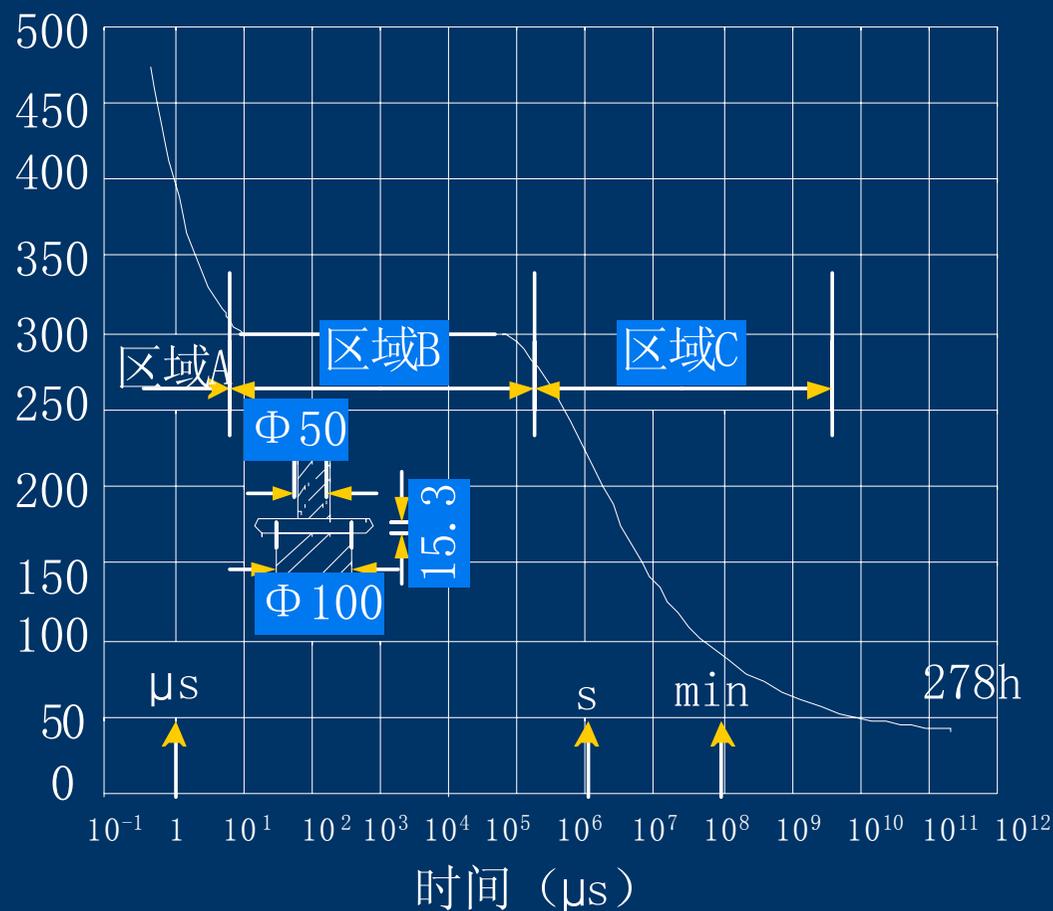
**区域D:** C区以外, 击穿时间在几十个小时以上, 甚至几年, 介质的物理、化学性能发生不可逆的劣化

**A、B区:** 电击穿

**C区:** 热击穿

**D区:** 电化学击穿  
电老化击穿

击穿电压为一分钟耐压的百分比数(%)



## ➤ 电击穿

- 电击穿理论建立在固体电介质中发生**碰撞电离基础上**，固体电介质中存在少量传导电子，在电场加速下与晶格结点上的原子碰撞，从而击穿
- 电击穿理论本身又分为两种解释碰撞电离的理论

**固有击穿理论**

**电子崩击穿理论**

$$A(E, \alpha, T_0) = B(\alpha, T_0)$$

$A(E, \alpha, T_0)$ : 电场作用下单位时间内电子获得的能量

$B(\alpha, T_0)$ : 电场作用下单位时间内电子碰撞损失的能量

$E$ : 电场,  $\alpha$ : 标志电子的状态因子,  $T_0$ : 晶格温度

**固有击穿理论:** 在某一场强值内, 上述关系式成立, 获得和失去的能量平衡, 超过则不成立, 引起破坏, 称之为固有击穿理论

**电子崩击穿理论:** 当上述平衡破坏后, 电子整体上得到加速, 与晶格产生碰撞电离, 反复碰撞形成电子崩, 电场作用下给电子注入能量激增, 导致介质结构破坏, 称之为电子崩击穿理论

## ■ 电击穿的特点

**时间影响：**电压作用时间短，击穿电压高

**介质特性：**如果介质内含气孔或其它缺陷，对电场造成畸变，导致介质击穿电压降低

**电场均匀度：**电场的均匀程度影响极大

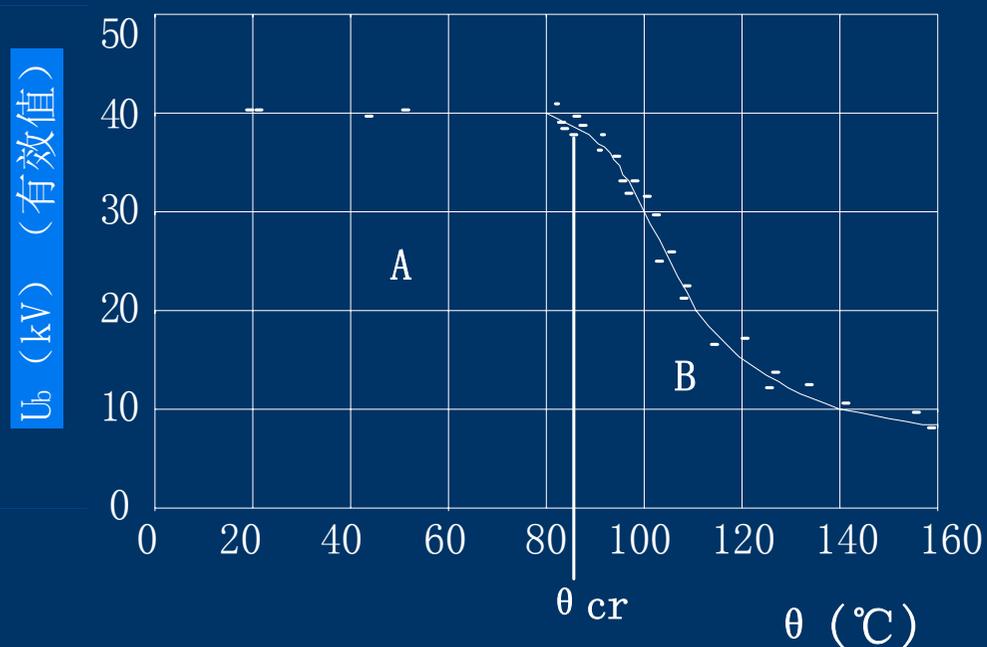
**累积效应：**在极不均匀电场及冲击电压作用下，介质有明显的不完全击穿现象，导致绝缘性能逐渐下降，称为累积效应。介质击穿电压会随冲击电压施加次数的增多而下降

**无关因素：**击穿电压和介质温度、散热条件、介质厚度、频率等因素都无关

## ➤ 热击穿

**A范围：** 击穿电压和介质温度无关，属于电击穿性质

**B范围：** 温度超过某临界值后，击穿电压随介质温度的增加而下降，表明击穿已涉及到明显的热过程



交变电压下电瓷的击穿电压与温度的关系

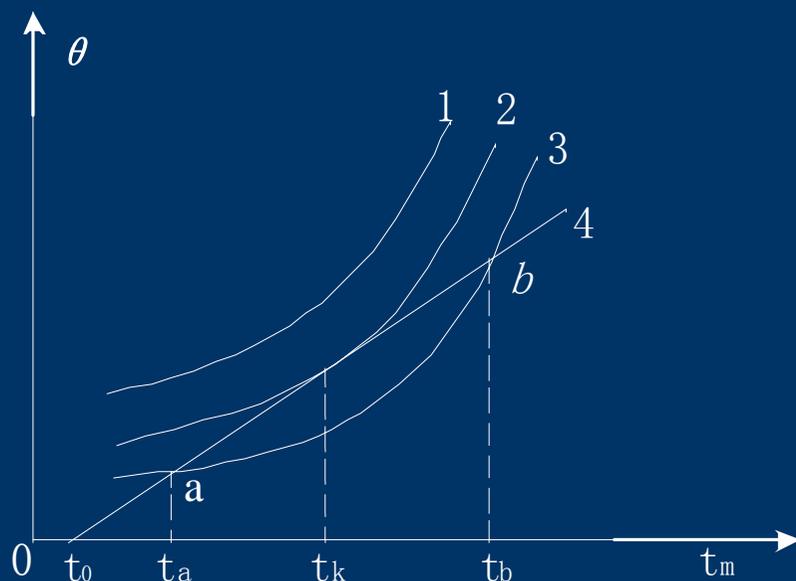
**热击穿的概念：** 由于**介质损耗**的存在，固体电介质在电场中会逐渐发热升温，温度的升高又会导致固体电介质电阻的下降，使电流进一步增大，损耗发热也随之增大。在电介质不断发热升温的同时，也存在一个通过电极及其它介质向外不断散热的过程。**如果同一时间内发热超过散热**，则介质温度会不断上升，以致引起**电介质分解炭化**，**最终击穿**，这一过程称电介质的热击穿过程

## 热击穿的理论分析

电压： $U_1 > U_2 > U_3$

曲线1, 2, 3：电介质发出热量 $Q$ 与介质中最高温度 $t_m$ 的关系

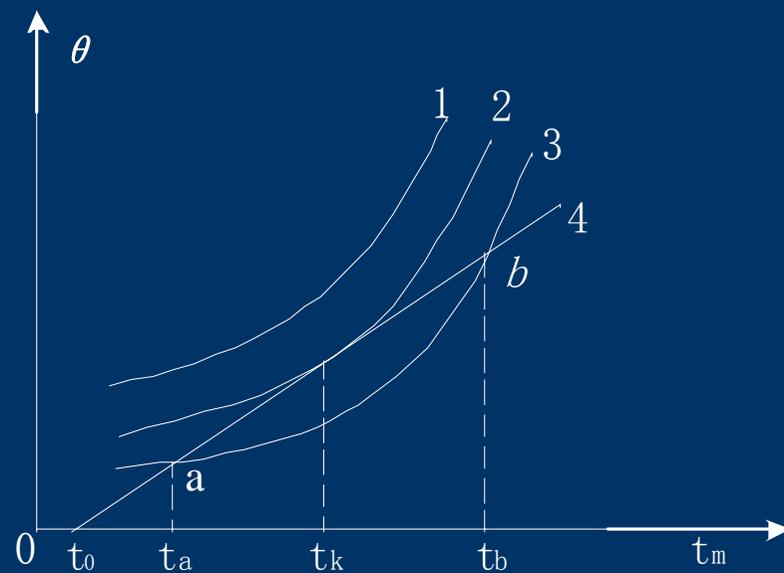
直线4：表示固体介质中最高温度大于周围环境温度 $t_0$ 时，散出的热量 $Q$ 与介质中最高温度 $t_m$ 的关系



不同外施电压下介质发热散热与介质温度的关系

曲线 1:

发热永远大于散热，介质温度将不断升高，在电压  $U_1$  下最终必定发生热击穿



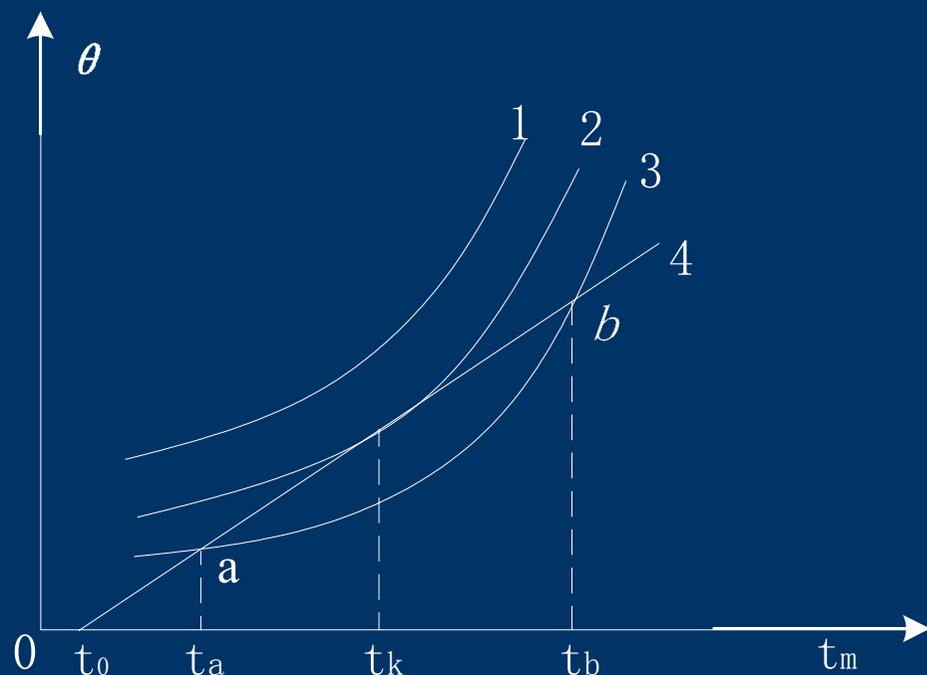
不同外施电压下介质发热散热与介质温度的关系

### 曲线 3：两个热平衡点

**$t > t_b$  时：** 情况类似曲线1，  
最终发生热击穿

**$t = t_b$  时：** 发热等于散热，  
但因扰动使  $t$  大于  $t_b$ ，则介  
质温度上升，回不到  $t_b$ ，  
直至热击穿。称  $t_b$  为**不稳  
定热平衡点**

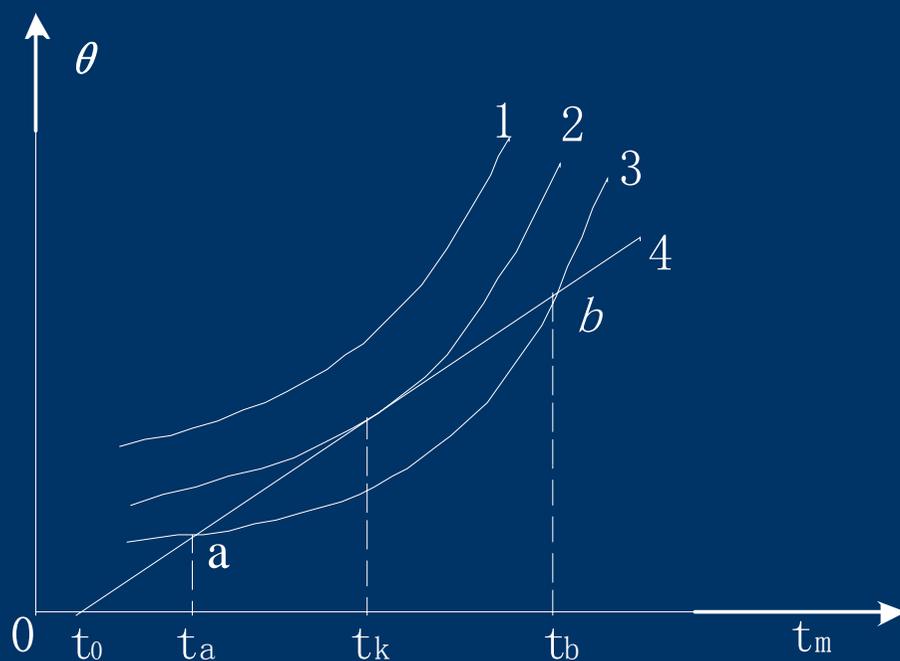
**$t_0 \leq t < t_b$  时：** 通过周围介质的  
散热调节，介质温度将  
逐渐稳定在  $t_a$ ，称  $t_a$  为**稳定  
热平衡点**



不同外施电压下介质发热散热与  
介质温度的关系

曲线 2:

与直线4相切， $U_2$  为临界热击穿电压； $t_k$  为临界热击穿温度



不同外施电压下介质发热散热与介质温度的关系

$\sigma$ : 散热系数

$\lambda$ : 导热系数

热击穿电压 $U_b$ 与各种发、散热因素的关系

$$U_b = 0.342 \times \sqrt{\frac{h \lambda \sigma (t_k - t_0)}{f \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta_0 (\sigma h + 2 \lambda)}}$$

当发热因素 $f$ ,  $\varepsilon_r$ ,  $t_0$ ,  $\operatorname{tg} \delta_0$ 上升或增加时,  $U_b$ 将下降

当散热因素 $\sigma$ ,  $\lambda$ 上升时, 热击穿电压 $U_b$ 将上升

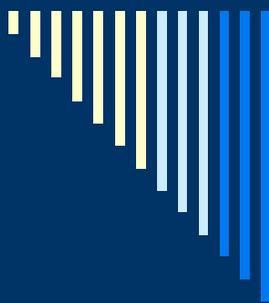
在发生热击穿时, 采取加厚绝缘的办法并不一定能起到提高电介质击穿电压的作用, 因而是经济的

# 一、固体电介质的击穿过程

## ➤ 电化学击穿（电老化）

**概念：** 在电场的长时间作用下逐渐使介质的物理、化学性能发生不可逆的劣化，最终导致击穿，这过程称电老化

**电老化的类型：** 电离性老化、电导性老化和电解性老化。前两种主要在交流电压下产生，后一种主要在直流电压下产生



# 主要内容

- 固体电介质的击穿过程
- 有机绝缘材料的电树老化
- 影响固体电介质击穿电压的主要因素
- 电介质击穿过程的空间电荷效应
- 电介质的其它性能

## 二、有机绝缘材料的树老化

### ➤ 树老化类型

电树老化和水树老化

### ➤ 树老化的原因

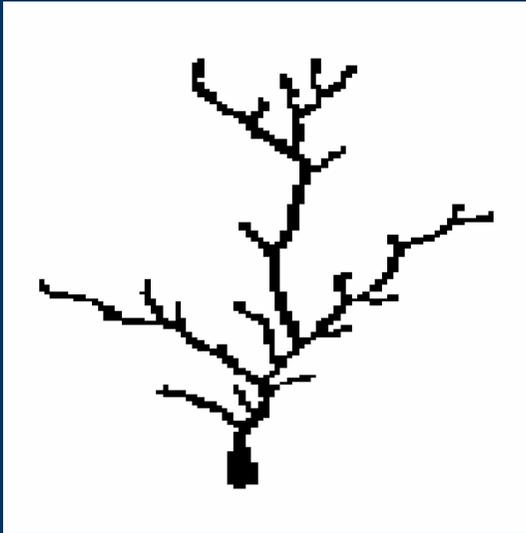
**电离性老化：**介质夹层或介质内部存在气隙或气泡，在交变场下气隙或气泡的场强比邻近固体介质内的场强大得多，而气体的起始电离场强比固体介质低得多，所以在该**气隙或气泡内容易发生电离**。气隙或气泡的电离，造成**邻近绝缘物的分解、破坏**(表现为变酥、炭化等形式)，并**沿电场方向逐渐向绝缘层深处发展**，在有机绝缘材料中会呈树枝状发展，称作“电树枝”

## 二、有机绝缘材料的树老化

### ➤ 树老化的原因

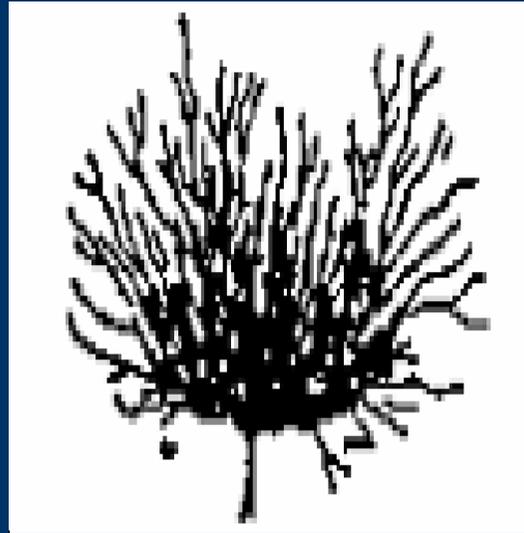
**电导性老化：**在两电极之间的绝缘层中存在**液态导电物质**(例如水)，当该处场强超过某定值时，该**液体会沿电场方向逐渐深入到绝缘层中**，形成近似树枝状的痕迹，称作“水树枝”

## 树枝老化的一般形状



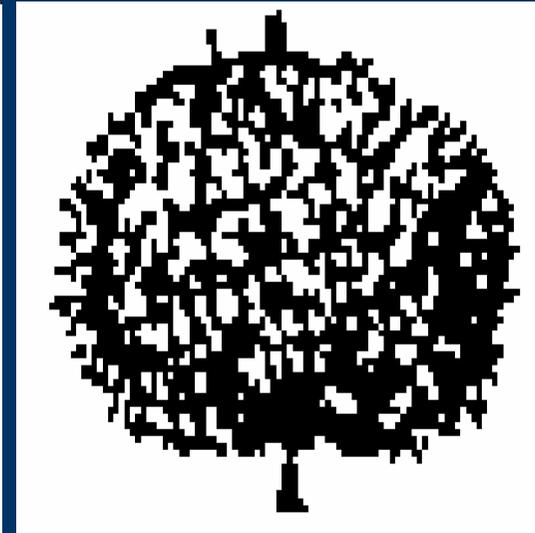
**Tree-like**

树枝状



**Bush-like**

灌木丛状



**chestnut-like**

栗子状

## 电介质中的树枝老化



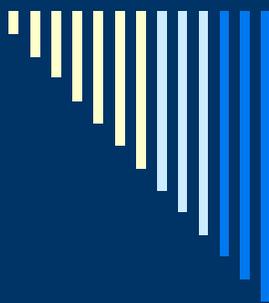
## 树老化的研究

### 难点

设备中树老化  
无法观测  
微观形态控制  
树枝老化观察  
微观形态和树枝  
老化二者的观测

### 特征

试品薄膜化  
控制微观结构  
绝缘缺陷模拟  
树枝老化监测  
树枝老化研究



# 主要内容

- 固体电介质的击穿过程
- 有机绝缘材料的电树老化
- **影响固体电介质击穿电压的主要因素**
- 电介质击穿过程的空间电荷效应
- 电介质的其它性能

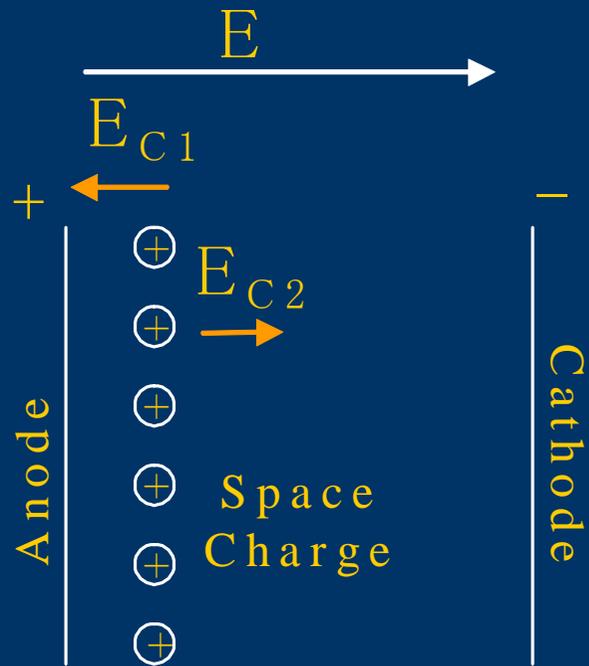
### 三、影响固体介质击穿电压主要因素

- 电压作用时间
- 场均匀程度
- 温度
- 电压种类
- 局部放电
- 累积效应
- 受潮
- 机械负荷
- 二次效应如空间电荷等

## 四、电介质击穿过程的空间电荷效应

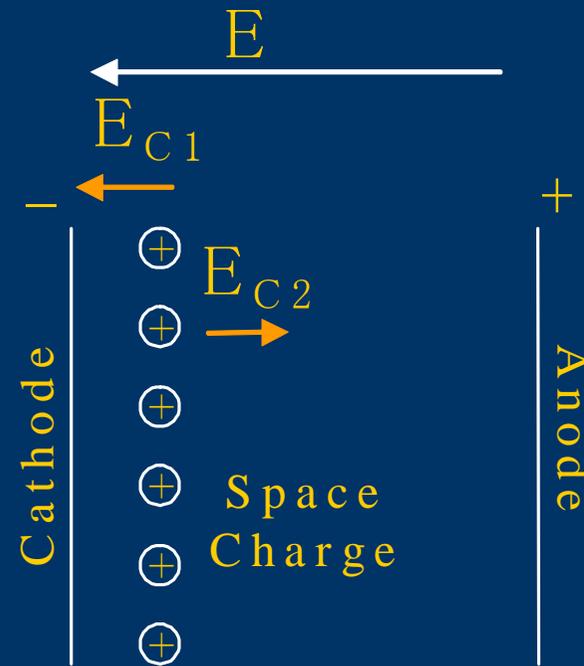
- **电介质中空间电荷**：由于外加电场的作用等原因，在介质内部积聚了电荷，称作空间电荷
- **空间电荷效应**：由于空间电荷的作用引起的一系列变化。在电介质中，空间电荷的直接作用是改变了介质中的电场分布。这种电场畸变的结果导致了介质击穿电压的变化

# 电荷引起电场分布的畸变机理



$$E_{\text{Interface}} = E - E_{C1}$$
$$E_{\text{Bulk}} = E + E_{C2}$$

界面场强被削弱了  
可导致介质击穿电压升高



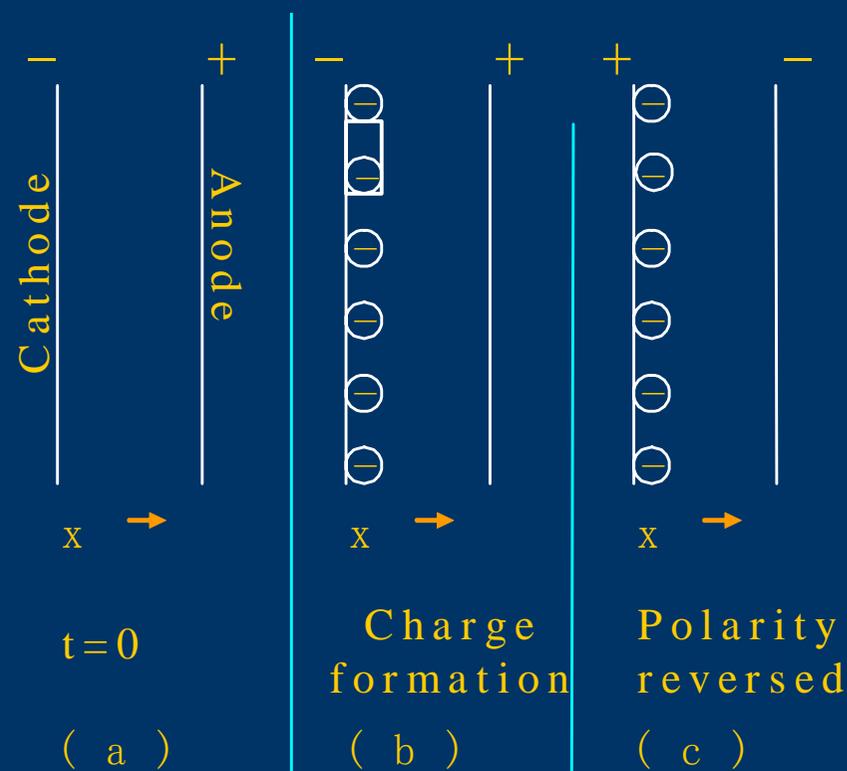
$$E_{\text{Interface}} = E + E_{C1}$$
$$E_{\text{Bulk}} = E - E_{C2}$$

界面场强被增强了  
可导致介质击穿电压下降

## 同极性空间电荷的积累

**概念：**电介质在外加电场的作用下，在金属电极与电介质之间的界面上积聚了与施加在该电极上的电压极性相同的电荷，这些电荷称为同极性空间电荷

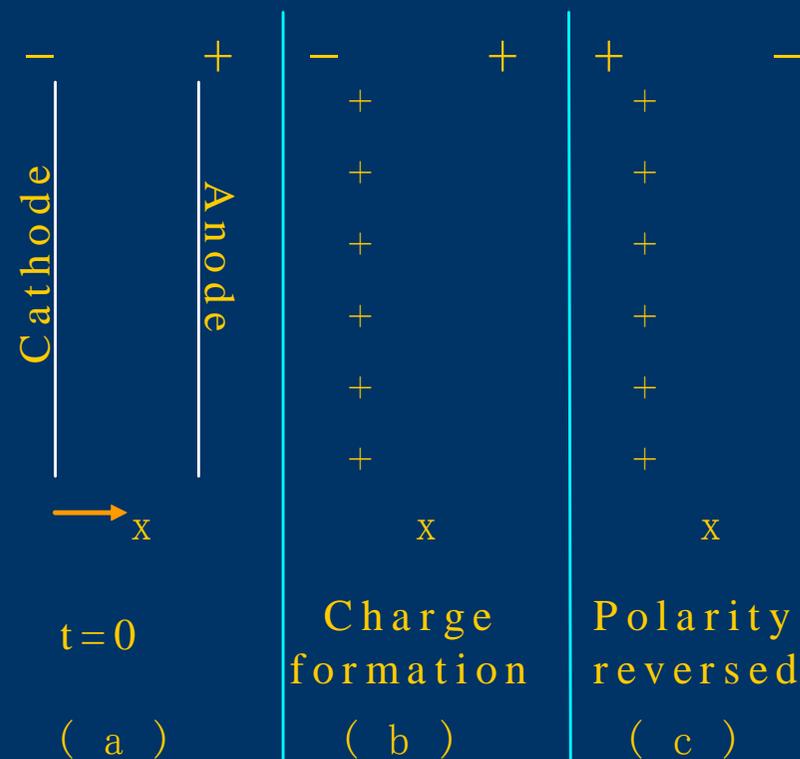
**特点：**同极性空间电荷削弱金属电极与介质间的界面场强，结果可导致介质整体击穿电压的提高，如（b）所示。当极性翻转时，可导致击穿电压下降，如（c）所示



## 异极性空间电荷的积累

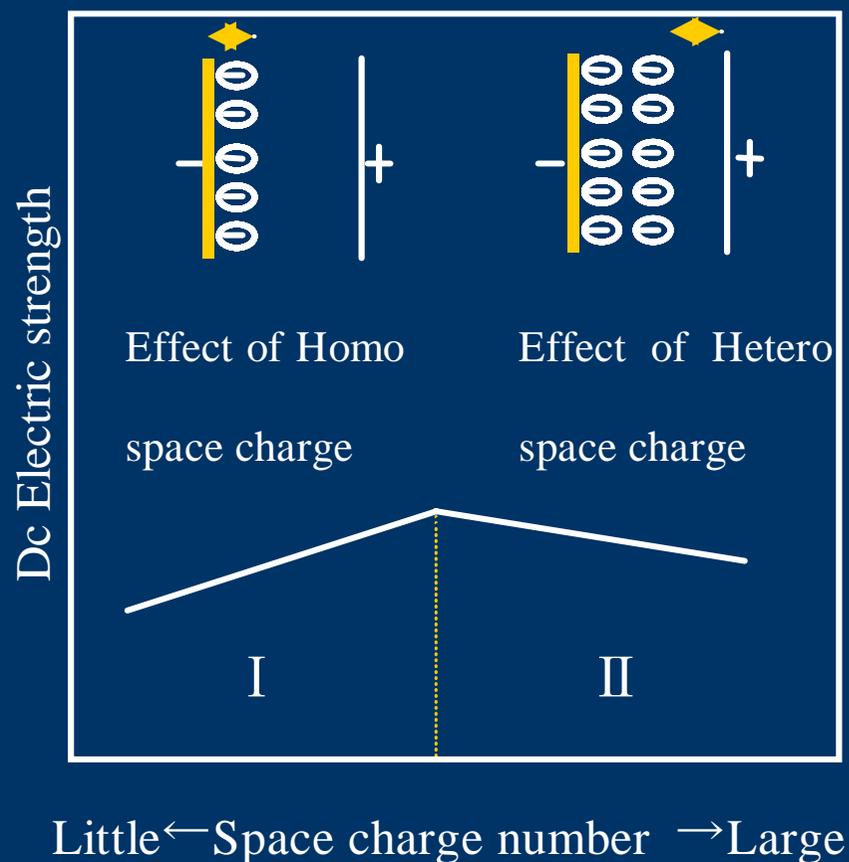
**概念：**电介质在外加电场的作用下，在金属电极与电介质之间的界面上积聚了与施加在该电极上的电压极性相反的电荷，这些电荷称为异极性空间电荷

**特点：**异极性空间电荷增强金属电极与介质间的界面场强，结果可导致介质整体击穿电压的降低，如（b）所示。当极性翻转时，可导致击穿电压升高，如（c）所示



## 薄膜中的空间电荷效应

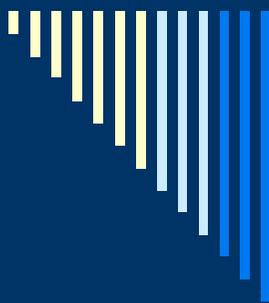
同极性的空间电荷效应在**薄膜中具有特殊性**，当介质中空间电荷的量超过某一定值时，虽然同极性的空间电荷对施加电压的电极起到削弱界面场强的作用，但由于大量的空间电荷积聚对另外一方的电极和介质界面的电场分布得到有效的加强，从而导致介质的整体击穿电压的下降



空间电荷在实际中的问题

电气电子设备中极性转换对器件的危害

直流输电中极性转换对电缆的危害



# 主要内容

- 固体电介质的击穿过程
- 有机绝缘材料的电树老化
- 影响固体电介质击穿电压的主要因素
- 电介质击穿过程的空间电荷效应
- 电介质的其它性能

## 五、电介质的其它性能

- 热性能
- 机械性能
- 吸潮性能
- 化学性能及抗生物性

## ➤ 热性能

**耐热性：**指保证电介质可靠安全运行的最高允许温度

**热劣化：**电介质在稍高的温度下，长时间后发生绝缘性能的不可逆变化

**寿命：**在一定温度下，电介质不产生热损坏的时间称为寿命

**短时耐热性：**

**长期耐热性：**给定寿命下，电介质不产生热损坏的最高允许温度

## 电介质的耐热等级

介质热老化的程度主要决定于温度及介质经受热作用的时间。为此国际电工委员会按照材料的耐热程度划分耐热等级（最高持续工作温度）。如

Y    A    E    B    F    H    C

90   105   120   130   155   180   >180°C

根据这个绝缘耐热等级可以进行设备运行负荷的最佳经济性设计

## ➤ 电介质的耐寒性

耐寒性是绝缘材料在低温下保证安全运行的最低许可温度，否则，固体可能变脆、开裂，液体可能凝固。如10、25、40号变压器油分别表示其凝固温度为-10、-25、-40℃

## ➤ 机械性能

有脆性、塑性和弹性三种

## ➤ 吸潮性能

在潮湿地区要选用吸湿性小、憎水性强的材料。一般而言，非极性电介质吸湿性低，极性电介质吸湿性较强

## ➤ 化学性能及抗生物性

化学性能指材料的化学稳定性如耐腐蚀性气体、液体溶剂等

抗生物性指材料抗霉菌、昆虫的性能，在湿热地区尤为重要

# 谢谢!

## Q & A

屠幼萍



高电压与电磁兼容研究所



80795842 13691145432



typ@ncepubj.edu.cn