

# 高电压技术

屠幼萍

☎ +80795842, 13691145432

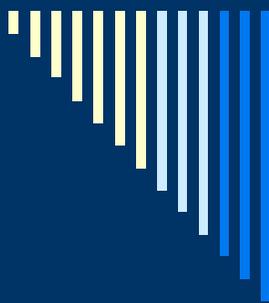
✉ [typ@ncepu.edu.cn](mailto:typ@ncepu.edu.cn)



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



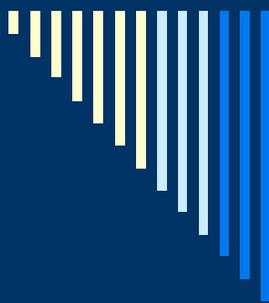
高电压与电磁兼容研究所



80795842, 13691145432



typ@ncepu.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

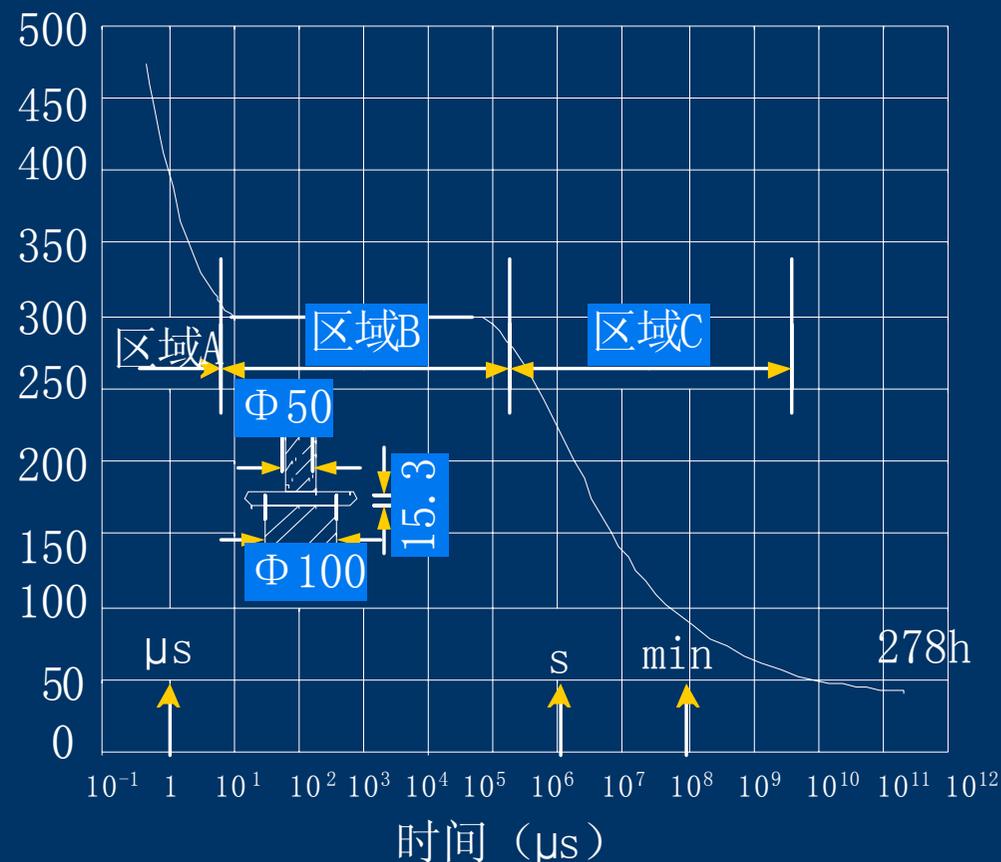
## ➤ 固体电介质击穿特性的划分

**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

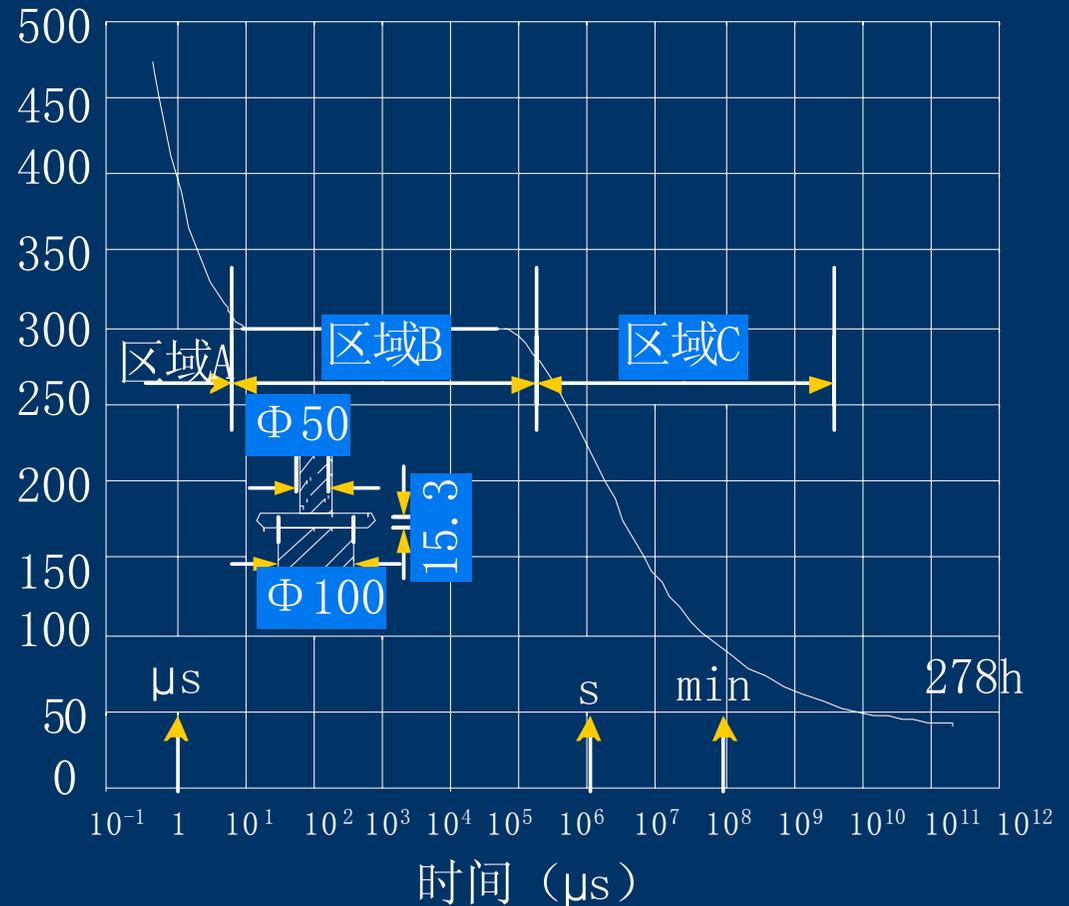
**区域D：**C区以外，击穿时间在几十个小时以上，甚至几年，介质的物理、化学性能发生不可逆的劣化

**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

- 固体电介质中发生**碰撞电离**———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
- 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

**作用时间** 电压作用时间短，击穿电压高

**介质特性** 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：**电场的均匀程度影响极大

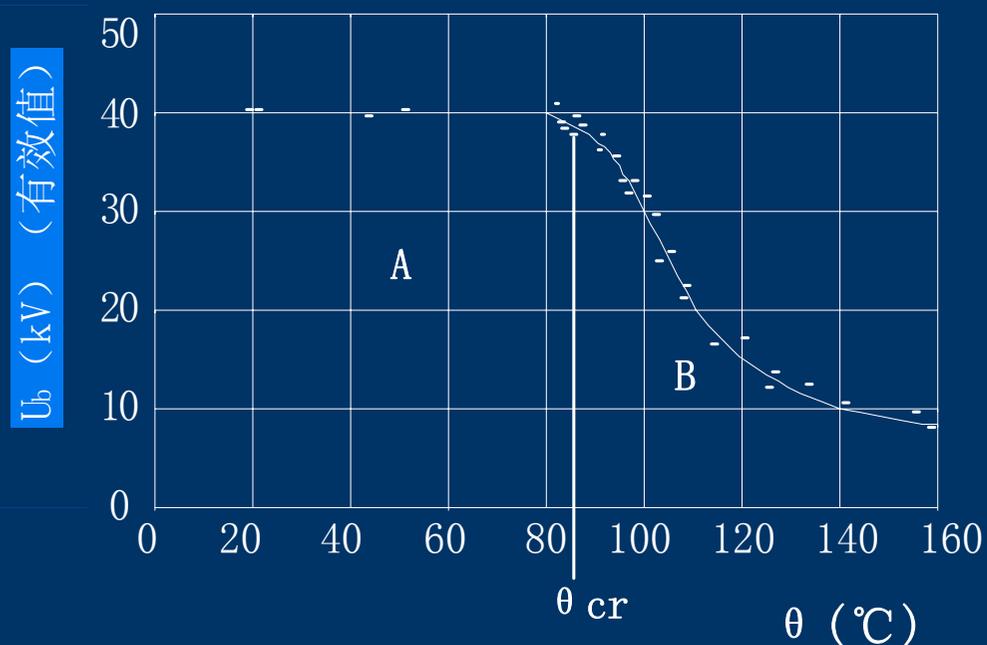
**累积效应** 在极不均匀电场中、冲击电压作用下，介质有明显的不完全击穿现象，导致绝缘性能逐渐下降，称为累积效应。介质击穿电压会随冲击电压施加次数的增多而下降

**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：

**电介质不断发热升温过程：** 介质损耗-----介质逐渐发热升温-----介质电阻的下降，使电流进一步增大-----损耗发热也随之增大

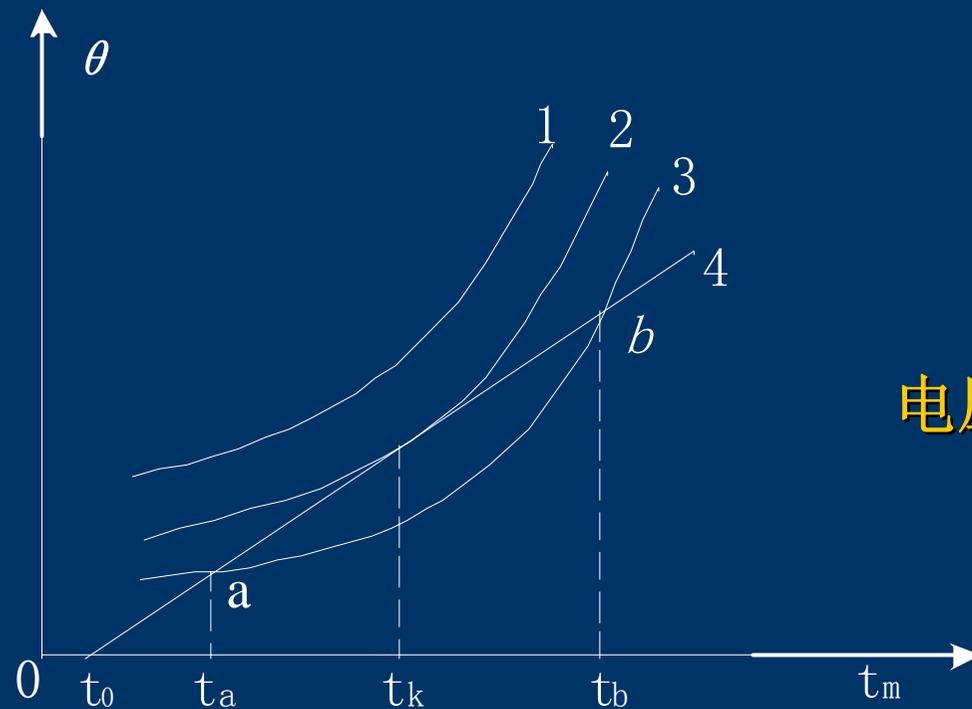
**电介质向外不断散热的过程：** 通过电极及其它介质向外散热

**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

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：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

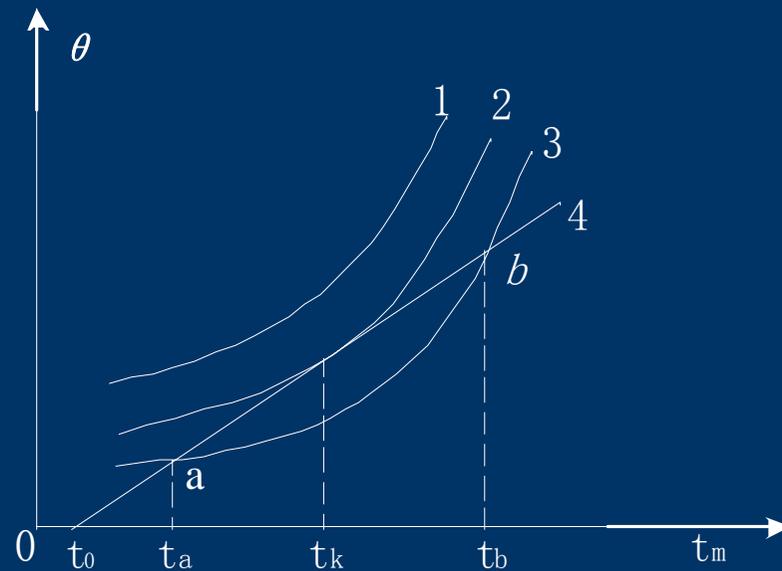


电压： $U_1 > U_2 > U_3$

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



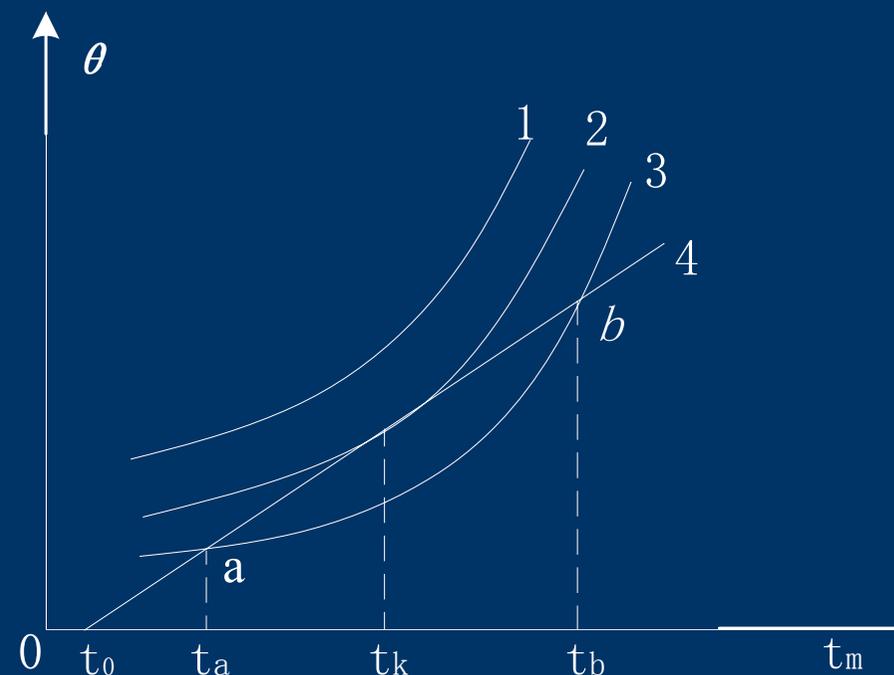
不同外施电压下介质发热散热与介质温度的关系

## 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

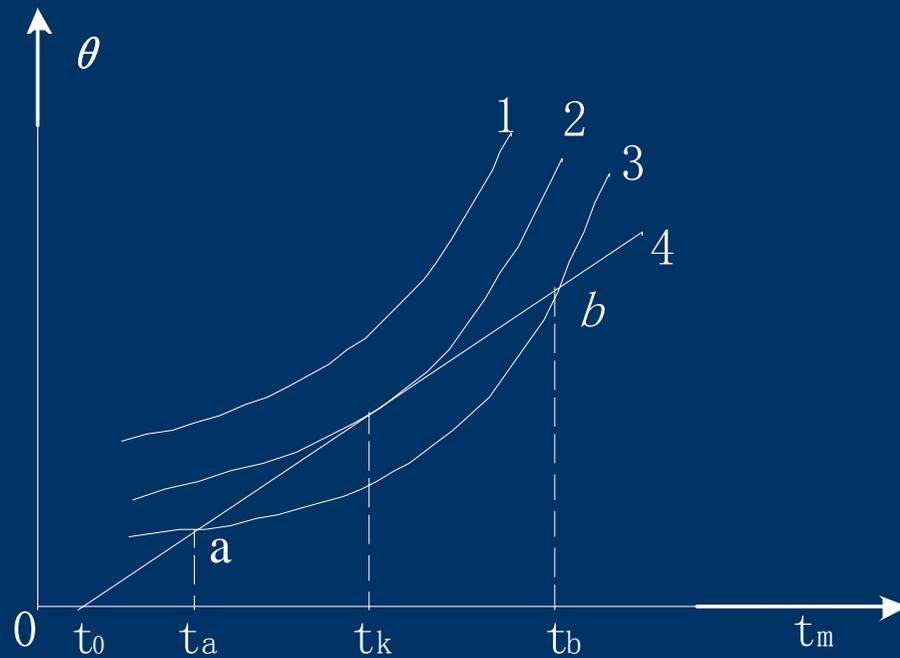
$t_0 \leq t < t_b$  时：通过周围介质的散热调节，介质温度将逐渐稳定在  $t_a$ ，称  $t_a$  为稳定热平衡点



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

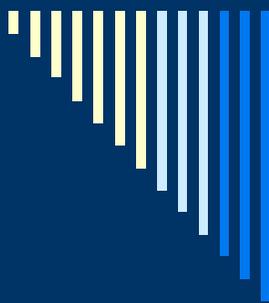
在发生热击穿时, 采取加厚绝缘的办法并不一定能起到提高电介质击穿电压的作用, 因而是经济的

# 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

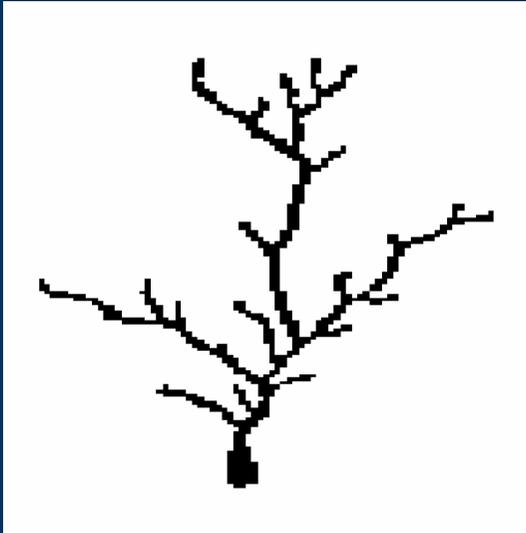
**电离性老化：**介质夹层或介质内部存在气隙或气泡，发生电离，造成邻近绝缘物的分解、破坏，表现为**变酥、炭化**等形式，并沿电场方向逐渐向绝缘层深处发展，在有机绝缘材料中会呈树枝状发展，称作“电树枝”

## 二、有机绝缘材料的树老化

### ➤ 树老化的原因

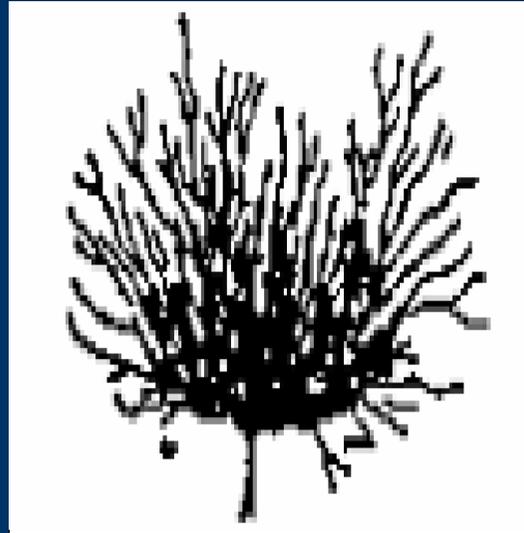
**电导性老化：**介质中存在液态导电物质（例如水），当该处场强超过某定值时，该液体会沿电场方向逐渐深入到绝缘层中，形成近似树枝状的痕迹，称作“水树枝”

## 树枝老化的一般形状



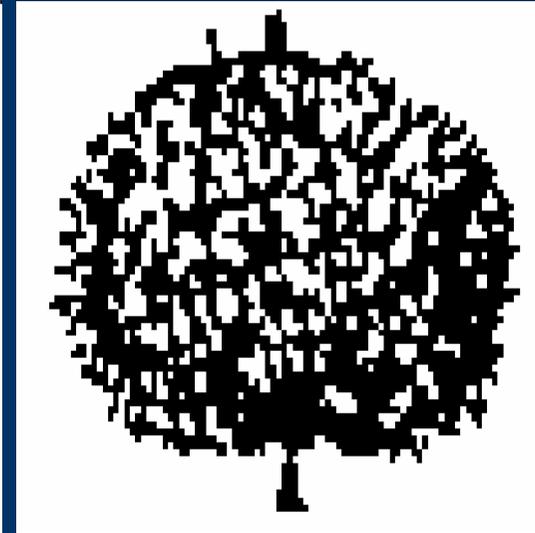
**Tree-like**

树枝状



**Bush-like**

灌木丛状

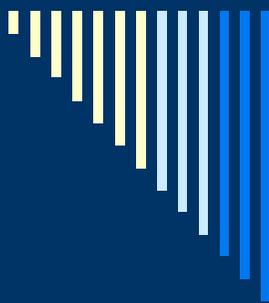


**chestnut-like**

栗子状

## 电介质中的树枝老化



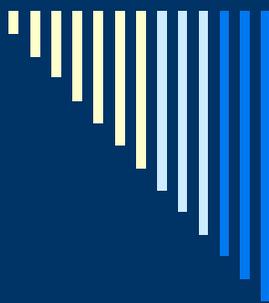


# 主要内容

- 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



# 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@ncepu.edu.cn