

清华大学  
Tsinghua University

**复习、作业、预习**

复习: 4.4-4.7  
作业: 4-15、4-17、4-20、4-21、4-27、补充3道(见网络学堂)  
预习: 5.1-5.4

1




清华大学  
Tsinghua University

**专题: 高压套管的绝缘结构问题与  
高压电流互感器专题**

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

2



清华大学  
Tsinghua University

**目录**

**一、套管的基本概念**

1. 套管的定义

2. 套管的分类

3. 套管的结构

4. 套管的运行特性

**二、套管的应用**

2. 组成电缆系统的套管及连接件

3. 油浸式电力设备用套管

4. 穿墙套管

**三、套管内部的电场控制结构**

1. 电容屏

2. 预制式电缆终端的电应力控制


**四、高压电流互感器**

1. 高压线路中电流的测量问题

2. 高压电流互感器结构

3. 电流互感器均压结构原理

3




清华大学  
Tsinghua University

**一、套管的基本概念**


**1. 套管的定义**  
套管(bushing)是一种将带电导体引入电气设备或穿过墙壁的一种绝缘装置。

**2. 套管分类**  
前者称为电器套管,后者称为穿墙套管。

**3. 套管结构**  
套管结构一般由导体(导杆)、绝缘体和金属法兰三个部分组成。导体沿圆柱形绝缘体的轴线穿过,金属环形法兰则安装在绝缘体外并用以接地。



4




清华大学  
Tsinghua University

**4. 套管的特点**

套管属于具有强垂直电场分量的绝缘结构,在金属法兰处电场强度很大,容易产生电晕放电和沿介质表面的滑闪放电。在法兰和导杆间径向电场强度也很高,容易发生绝缘介质的击穿。

除35kV及以下的套管使用单一固体绝缘材料外,常采用多种绝缘材料或采取电场均匀措施,使轴向和切向电场分布趋于均匀

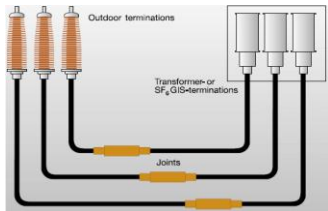
5



清华大学  
Tsinghua University

**二、套管的应用**

**1. 组成电缆系统的套管及连接件**



6



电力电缆附件—终端头



7



2. 油浸式电力设备用套管

变压器、电抗器、电流互感器、电压互感器、电容器

除了油浸式，还有干式、气体绝缘用套管



SIEMENS

Siemens Energy Services Team - Industrial Sector  
Tel: +49 89 6309-1000  
Fax: +49 89 6309-1001  
Email: siemens-energy@siemens.com



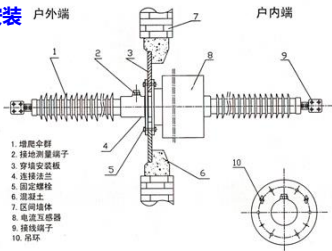
3. 穿墙套管



9



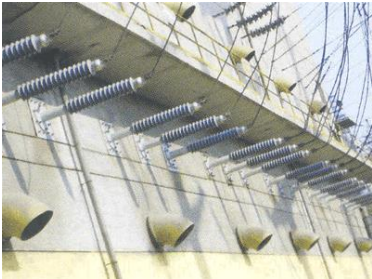
穿墙套管安装



10



电力网套管



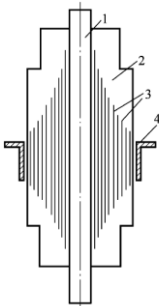
11



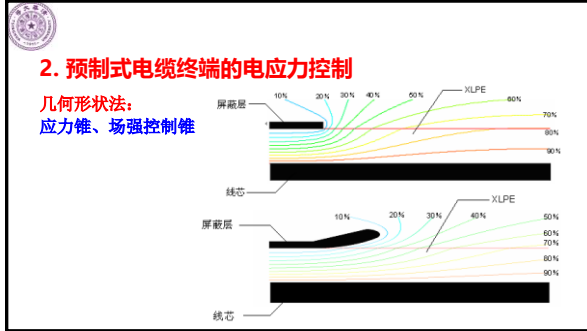
三、套管内部的电场控制

1. 套管内部的电容屏

导电杆  
绝缘纸层  
中间法兰  
均压假板  
末屏



12



**四、电流互感器**

**1. 高压线路中电流的测量问题**

- 高压隔离问题
- 突发短路大电流问题
- 使用电流互感器

➢ 电流互感器的初级绕组与通有被测电流的高压导线相串联，处于高电位

➢ 次级绕组与测量仪表等相连接

➢ 初级、次级绕组间的绝缘层要承受长期工作电压及短暂过电压的作用

**2. 高压电流互感器结构**

- 初级绕组
- 电容屏（均压问题）
- 次级绕组
- 套管（法兰问题）
- 箱壳
- 低压引出端子

**3. 电流互感器结构原理与照片**

可自己查找！

- 电容型电流互感器结构原理图：  
严璋，朱德恒：《高电压绝缘》，清华大学出版社，2002年3月，p. 237，图8-9
- 套管结构与作用：  
《高电压工程》，p. 85，图3-4几种常见绝缘子（包括套筒和穿端套管）；p. 86图3-5电位移线；p. 89图3-9、图3-10穿端套管电场分布及等效电路
- 电容屏结构：高电压工程p. 93
- 电缆终端和连接件的场强控制锥（应力锥）：高电压工程p. 131

清华大学  
Tsinghua University

网络教学直播方式：雨课堂


**高电压工程（第8讲）**

**液体、固体电介质电气性能（3）**

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

**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
- 4.3 液体电介质的击穿
  - 4.3.1 液体电介质的击穿理论
  - 4.3.2 影响液体电介质击穿电压的因素
  - 4.3.3 提高液体电介质击穿电压的方法
- 4.4 固体电介质的击穿
- 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




### 4.3.1 液体电介质的击穿理论

>概述

- 耐电强度**：一般比气体（空气）高且具有良好的散热作用
- 击穿理论研究现状**：远不及气体介质，尚缺乏完善化
- 击穿机理分类**
  - ◆**纯净的液体电介质的击穿机理**
    - 电击穿理论
    - 气泡击穿理论
    - ◆（非纯净）工程用液体电介质的击穿机理


19



### 1. 纯净液体电介质的电击穿理论

- 击穿理论**：液体中因强场发射等原因产生的电子，在电场中被加速，与液体分子发生碰撞电离
- 击穿特点**：和长空气间隙的放电过程很相似


20



### 2. 纯净液体电介质的气泡击穿理论


- 液体电介质中气体产生的原因**
  - ① 电子电流加热液体，分解出气体
  - ② 电子碰撞液体分子
  - ③ 静电斥力，电极表面吸附微气泡表面积累电荷，静电斥力大于液体表面张力，气泡体积变大
  - ④ 电极凸起处的电晕引起液体汽化
- 击穿理论**：由于串联介质中，场强的分布与介质的介电常数成反比，气泡 $\epsilon_r=1$ ，小于液体的 $\epsilon_r$ ，因而气泡承担比液体更高的场强，而气体耐电强度又低，所以气泡先行电离，一旦电离的气泡在电场中堆积成气体通道，则击穿在此通道内发生

21

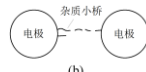


### 3. 非纯净液体电介质的小桥击穿理论

- ✓**油中杂质**：水分、固体绝缘材料（如纸、布）脱落纤维、液体本身老化分解
- ✓**小桥形成**：杂质在电场力的作用下，在电场方向定向，并逐渐沿电力线方向排列成杂质的“小桥”。由于水和纤维的**介电常数分别为81和6~7**，比油的介电常数 $\sim 2.8$ 大得多，从而这些杂质容易极化并在电场方向**定向排列成小桥**




(a) 未形成“小桥”

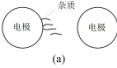


(b) 形成“小桥”

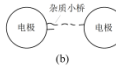
受潮纤维在电极间定向示意图

22





(a) 未形成“小桥”



(b) 形成“小桥”

受潮纤维在电极间定向示意图

- ✓**小桥发热**：组成小桥的纤维及水分电导大，从而使泄漏电流增加，并进而使小桥强烈发热
- ✓**小桥贯穿**：发热结果，使油和水局部沸腾汽化，最后沿此气桥发生击穿

油中杂质-极化形成小桥-小桥发热-汽化-气桥贯穿

23

专题：液体电介质的小桥击穿试验



24



### ✓小桥击穿的特点

- 杂质的影响巨大
- 与热过程紧密相连
- 与电极形状和电场的均匀性有关，电场极不均匀时因扰动而难以形成小桥
- 长间隙难以形成小桥，但因小桥畸变场强而引起间隙击穿电压降低
- 小桥的形成和加压时间及电压种类有关，加压时间长容易形成
- 冲击电压作用下“小桥”来不及形成
- 工程液体电介质击穿电压分散性大：杂质小桥的形成具有统计性

总体上，液体电介质的击穿理论还很不成熟，理论上小桥击穿能够解释一定的击穿规律，工程实际主要靠试验数据

25

### 多选题 1分

设置

引起小桥击穿的原因

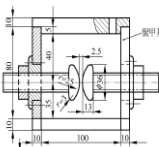
- ☒ A 极化、发热
- ☒ B 汽化、产气
- ☐ C 油扰动
- ☐ D 脉冲电压变化太快

提交

26



### 4.3.2 影响液体电介质击穿电压的因素



标准油杯及其击穿电压

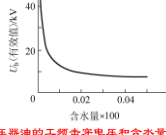
- 标准油杯：GB/T 507
- ✓ 油品质的表征  
工频击穿电压，不用击穿场强
- ✓ 电极：球形或球盖形
- ✓ 间距：2.5 mm
- ✓ 击穿电压：仅表征品质，非计算依据  
变压器油：大于25 kV~40 kV  
电容器油、电缆油大于50 kV~60 kV  
UHV用变压器油大于70 kV

工程上，液体电介质不以电气强度表征其击穿性能，而以品质来表征其性能优劣

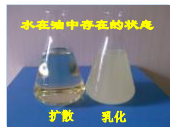
27



### 1. 杂质（是浮水、纤维）



变压器油的工频击穿电压和含水量的关系



水在油中存在的状态

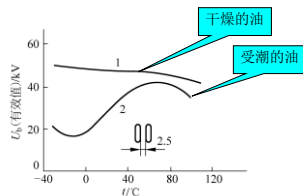
扩散 乳化  
对耐压 对耐压  
无影响 影响大

- ✓ 影响程度：含水量十万分之一即可显著降低击穿电压
- ✓ 油的纯净程度的作用
  - 纯净度较高时：电场越均匀，直流和工频击穿电压越高
  - 品质较差油中：杂质的聚集和排列畸变电场，电场均匀性对击穿电压的提高作用不明显

28



### 2. 温度（受控于温度的受潮油的击穿过程）

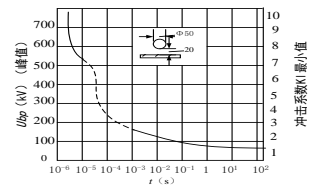


标准油杯中变压器油工频击穿电压与温度的关系  
1-干燥的油； 2-受潮的油

29



### 3. 电压作用时间



稍不均匀电场中变压器油的伏秒特性曲线

- ✓ 冲击电压下：小桥来不及形成，均匀场可提高击穿电压

30



4. 电场均匀程度 (与击穿电压的分散性)

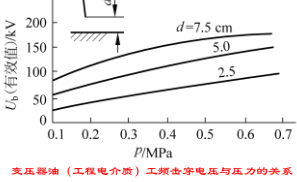
- ✓液体电介质击穿电压的分散性
- 和电场的均匀程度有关, 电场不均匀程度增加, 击穿电压的分散性减小
- 工频击穿电压的分散性在极不均匀电场中常不超过5%, 而在均匀电场中可达30~40%

31



5. 压力

- ✓电介质品质的影响
- 工程液体电介质, 因存在气泡而有影响
- 极纯净液体影响不明显
- ✓冲击下: 均无影响



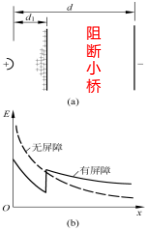
变压器油 (工程电介质) 工频击穿电压与压力的关系

32



4.3.3 提高液体电介质击穿电压的方法

- 应对措施
- 绝缘承受冲击电压作用时应尽可能使电场均匀
- 电压长时间作用时应想办法提高油的品质
- 1. 提高以及保持油的品质
- ✓滤纸过滤、加热真空喷雾滤油机;
- ✓吸附剂过滤器: 天然水合硅胶、硅胶、活性氧化铝、钠氟石。运行中保持品质
- 2. 复叠层: 紧贴在金属电极上的固体绝缘薄层 (<1mm)
- 3. 绝缘层: 电极表面包覆上较厚的绝缘层 (~几十mm)
- 4. 屏障: 放在电极间的固体绝缘板 (还可均匀电场)
- 5. 改善电场分布: 沿面放电时, 滑闪时



33



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
- 4.3 液体电介质的击穿
- 4.4 固体电介质的击穿
- 4.4.1 固体电介质的击穿过程
- 4.4.2 影响固体电介质击穿电压的主要因素
- 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

34



4.4 固体电介质的击穿

- 三态电介质的耐电特性
- 电介质击穿的普遍规律 (弱点击穿)
- 任何电介质的击穿, 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, 也可指介质的杂质、凝聚态结构等的不均匀性
- 三态电介质的击穿特性
- ✓一般情况下, 在气、液、固三种电介质中, 对于良好的绝缘体来说固体密度最大, 耐电强度也最高
- ✓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

35



三态电介质的耐电强度  
空气: 一般在3kV/mm ~ 4 kV/mm

其他气体介质的相对电气强度 (与空气相比较)

气 体	N <sub>2</sub>	SF <sub>6</sub>	CCl <sub>4</sub> F <sub>2</sub>	CCl <sub>4</sub>
电气强度	1	2.3~2.5	2.4~2.6	6.3
液化温度 (1atm, °C)	-195.8	-63.8	-28	76

- ✓液体: 一般在10kV/mm ~ 20 kV/mm
- ✓固体: 一般在十几 kV/mm ~ 几百 kV/mm

36

投票

最多可选4项

设置

你认为哪种气体适合作为密闭电力设备的气体绝缘电介质?

A

CCl<sub>4</sub>

B

CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>

C

SF<sub>6</sub>

D

N<sub>2</sub>

提交

37

4.4.1 固体电介质的击穿过程

1. 固体电介质击穿特性的划分（电、热、老化区域）

电击穿

区域: < 0.2s

热击穿

区域: > 0.2s

电化击穿 (老化击穿)

区域: 数十小时

油浸电工纸板的击穿电压与电压作用时间的关系

38

2. 电击穿

✓电击穿理论的建立: 电击穿理论是建立在固体电介质中发生碰撞电离基础上的。固体电介质中存在的少量传导电子, 在电场加速下与晶格结点上的原子碰撞, 从而击穿

✓击穿过程电子的能量表达式\*  
 $A(E, \alpha, T_0) = B(\alpha, T_0)$   
 $A(E, \alpha, T_0)$ : 电场作用下单位时间内电子获得的能量  
 $B(\alpha, T_0)$ : 单位时间内电子碰撞损失的能量  
 $E$ : 电场  
 $\alpha$ : 标志电子状态的因子  
 $T_0$ : 晶格温度

39

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

✓电击穿理论分类: 电击穿理论本身又分为两种解释碰撞电离的理论, 即固有击穿理论与电子崩击穿理论

• 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

40

✓电击穿的特点及其影响因素

• 时间影响: 电压作用时间短, 击穿电压高

• 电场均匀度: 电场的均匀程度影响极大

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

• 累积效应: 在极不均匀电场及冲击电压作用下, 电介质有明显的不完全击穿现象, 不完全击穿导致绝缘性能逐渐下降的效应称累积效应。电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: 一旦发生电击穿, 击穿电压和电介质温度、散热条件、频率等因素都无关

41

3. 热击穿 (击穿电压与温度有关)

✓在A范围内: 电击穿, 击穿电压和介质温度无关

✓在B范围内: 热击穿, 击穿电压随温度增加而下降

A


B

$\theta_{cr}$

$\theta$  (°C)

交变电压下电介质的击穿电压与温度的关系


42



✓ **热击穿物理过程:**

- 由于**电介质损耗**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**, 则电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**

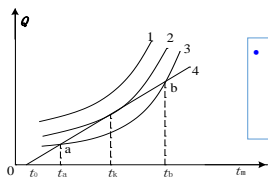
43



✓ **热击穿的过程分析**

- 电介质发热曲线1, 2, 3对应于电压 $U_1 > U_2 > U_3$
- 直线4散出的热量 $Q$ 与介质中温度 $t_m$ 的关系


✓  $t_a$ : 稳定热平衡点;  $t_b$ : 不稳定热平衡点



• **热击穿与绝缘厚度的关系:**  
一旦发生热击穿, 采取加厚绝缘的办法往往不能起到提高电介质击穿电压的作用, 因而是**不经济的**

不同外加电压下介质发热、散热与介质温度的关系

44




4. **电化学击穿 (电老化)**

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

✓ **电 (化学) 老化的类型 (可归纳成四类)**

- (1) **电导性老化 (水树枝老化)**
- (2) **电离性老化 (电树枝老化)**
- (3) **电解性老化:** 离子性无机绝缘材料在直流电压作用下产生, 电解老化
- (4) **表面漏电起痕与电蚀损:** 有机介质表面产生的绝缘破坏现象 (特殊老化)

**耐漏电起痕? 电化学老化**



**树枝老化**是有机固体电介质绝缘故障的普遍形式, 产生水树枝**所需场强**比电树枝的低得多

45




**电介质中的树枝老化**

**HDPE薄膜中的树枝形成**

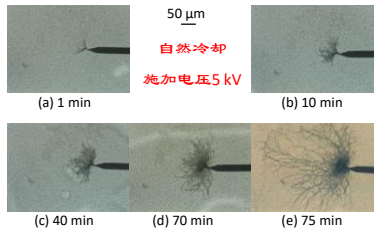


50 μm

46



**HDPE树枝的发展**




50 μm

**自然冷却**

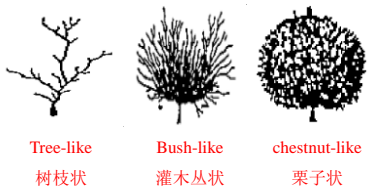
**施加电压5 kV**

(a) 1 min (b) 10 min (c) 40 min (d) 70 min (e) 75 min

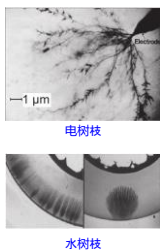
47



**电树枝老化的一般形状 (IEEE)**



Tree-like 树枝状 Bush-like 灌木丛状 Chestnut-like 栗子状



1 μm

**电树枝**

**水树枝**

48





4.4.2 影响固体电介质击穿电压主要因素

1. 电压作用时间
2. 温度
3. 电场均匀程度
4. 电压种类
5. 局部放电
6. 累积效应 (固体的特有性能)
7. 受潮
8. 机械应力

其他: 二次效应如材料的均匀性、杂质、空间电荷等

49

多选题 1分

设置

以下哪种电介质击穿后可以恢复绝缘?

- ☒ A 六氟化硫
- ☐ B 聚乙烯
- ☐ C 聚丙烯
- ☒ D 变压器油

提交

50



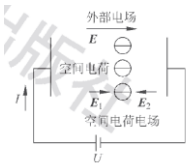
第4章 液体、固体电介质的电气性能

- 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
- 4.3 液体电介质的击穿
- 4.4 固体电介质的击穿
- 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

51



4.5 电介质中的空间电荷



电介质中空间电荷分布及其对电场分布影响示意图  
由于空间电荷的存在, 畸变了电介质内部电场分布, 导致绝缘性能下降

52



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
- 4.3 液体电介质的击穿
- 4.4 固体电介质的击穿
- 4.5 电介质中的空间电荷
- 4.6 组合绝缘
- 4.6.1 组合绝缘中的电场分布与调整
- 4.6.2 组合绝缘的电气性能 (自学)
- 4.7 电介质的其他性能

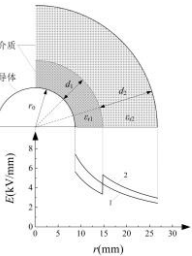
53



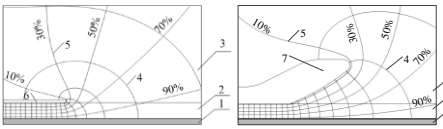
4.6 组合绝缘

4.6.1 组合绝缘中的电场分布与调整

- 交流电压作用下简单几何结构的电场分布与控制
- ✓ 采用均一电介质, 内层绝缘承受的场强比外层绝缘高得多  
额定电压越高, 绝缘层越厚, 二者的差别越大
- ✓ 若采用分阶绝缘, 内层用高密度薄纸,  $\epsilon_r$  较大, 外层用密度较低的厚纸,  $\epsilon_r$  较小。这样各阶绝缘的利用率都较好, 电场分布较为均匀



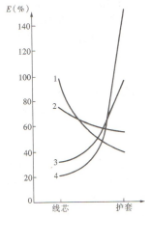
54



- 交流电压作用下电场控制锥（也称应力锥）的电场分布与调整
- 绝缘屏蔽层断口处的电场不仅有垂直于电缆轴向的分量，同时还有沿轴向即沿电缆长度方向分布的不均匀分量。沿电缆长度方向的电场分量在绝缘屏蔽层断口处比较集中，达到最大，该电场分量容易引起绝缘击穿
- 在3.3.4节中，已经介绍了利用电容屏来控制套管的电场分布与调整。
- 实际应用中，110 kV及以上电压等级的电缆附件目前有使用电场控制锥结构来改善电缆连接处绝缘屏蔽层的电场分布。电场控制锥通过将绝缘屏蔽层的切断处进行延伸，使零电位面形成喇叭状，改善绝缘层的电场分布

55

- 直流电压作用下组合绝缘中的电场分布
- 工作在直流电压下的电缆内部电场分布与交流情况不同，场强分布由电阻率决定
- 采用分阶绝缘时，可考虑内层用低电阻率的电介质，外层用高电阻率的电介质
- 直流电缆的场强分布受线芯和护套之间温差的影响
- 直流电缆的场强分布还受空间电荷的影响



绝缘层内外不同温差时直流电缆内的电场分布

1-线芯温度等于护套温度； 2-线芯温度高于护套温度5℃；  
3-线芯温度高于护套温度25℃； 4-线芯温度高于护套温度50℃

56

### 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
- 4.3 液体电介质的击穿
- 4.4 固体电介质的击穿
- 4.5 电介质中的空间电荷
- 4.6 组合绝缘
- 4.7 电介质的其它性能

57

### 4.7 电介质的其它性能

- 1. 热性能
- 2. 机械性能
- 3. 吸潮性能
- 4. 化学性能及抗生物性

任何一种性能的缺陷最终将导致电气性能的大幅下降，甚至无法成为绝缘电介质

58

### 1. 热性能

#### (1) 耐热性

耐热性：指保证电介质可靠安全运行的最高允许温度

- 1) 短时耐热性：在高温下电介质短时不发生损坏的温度
- 2) 热劣化与长期耐热性
  - 热劣化：电介质在稍高的温度下，长时间后会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
  - 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

59

#### (2) 电介质的耐热等级 (GB 11021)

电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最高持续工作温度为耐热程度划分耐热等级。如

Y	A	E	B	F	H	N	R	XXX级
90	105	120	130	155	180	200	220	≥250℃

温度规则

A级温度超过规定8℃、B级10℃、H级12℃，寿命的缩短一半

运行负荷的经济性与寿命

- 根据绝缘耐热等级可以进行设备运行负荷的最佳经济性设计
- 电力设备使用期限定为20-25年

#### (3) 电介质的耐寒性

耐寒性则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，气体可能液化

10、25、40号变压器油：凝固温度分别为-10、-25、-40℃

60

投票

最多可选2项

设置

你认为电力设备合理的经济运行寿命?

A

25年

B

50年

C


100年

D

30年

提交

61



2. 机械性能

有脆性、塑性和弹性三种


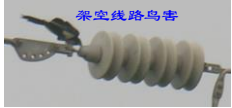
3. 吸湿性能

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

4. 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，抗生物污染、和攻击破坏的能力，在湿热地区尤为重要

架空线路鸟害



62

铤而走险



此处风光独好



开会了



63

为了吃，我容易吗？




来自耗子、白蚁等的攻击



不磨牙，难受




64



本节内容总结

- 液体电介质的击穿
- 固体电介质电击穿理论
- 固体电介质热击穿理论
- 固体电介质电化学击穿理论
- 影响固体电介质击穿电压等电气性能的因素
- 电介质中的空间电荷
- 树枝老化的形成过程
- 组合绝缘的场强分布与控制
- 材料的耐热等级与耐寒性
- 绝缘寿命与经济运行的概念

65



清华大学  
Tsinghua University

高电压工程一

之液体、固体电介质电气性能

第3讲 The End

谢谢！

66