



高电压技术教研室  
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

# 《高电压技术》

## 高电压绝缘技术

Ch4 气体中的沿面放电和高压绝缘子



# 目 录

## 4

## 气体中的沿面放电和高压绝缘子

### 4.1

界面电场分布的典型情况

### 4.2

均匀电场中的沿面放电

### 4.3

极不均匀电场中的沿面放电

### 4.4

受潮表面的沿面放电

### 4.5

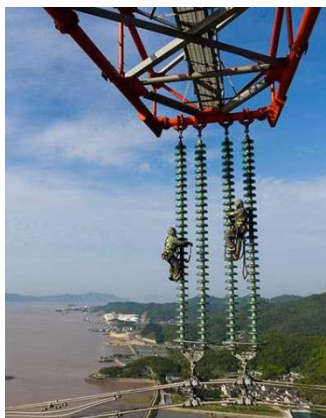
脏污绝缘表面的沿面放电



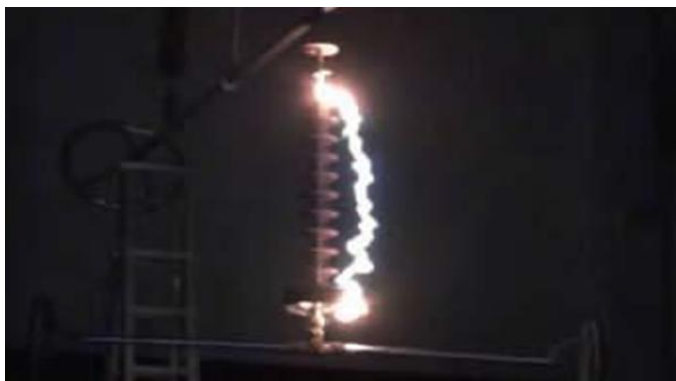


# 背景知识与概念

## 绝缘子、套管与闪络



机械上: **相互连接**  
电气上: **相互绝缘**



**闪络:** 沿整个固体绝缘表面发生的放电



气体绝缘设备中，不光有气体放电击穿问题，还都有气体沿固体**绝缘表面**放电的问题。

**绝缘子：**用以支撑或悬挂高压导体的固体绝缘材料。

**套管：**高压导体穿过接地隔板、电气外壳或墙壁时，用以固定的绝缘材料。

**闪络：**沿整个固体绝缘表面发生的气体放电。

在放电距离相同时，沿面闪络电压低于纯气隙的击穿电压。  
工程中，很多事故是由沿面闪络造成。



## 4.1 界面电场的分布类型

三种典型情况：

界面：气体介质与固体介质的交界面

(1) 均匀电场；

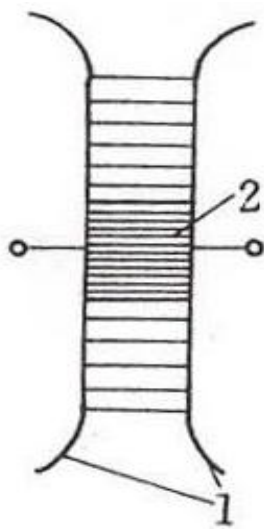
(2) 强垂直分量；

(3) 弱垂直分量。



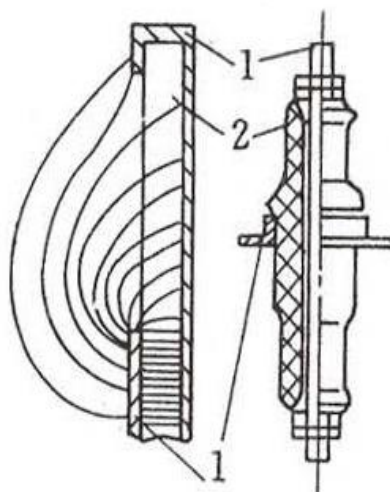
开孔

(1) 固体介质处于均匀电场中，且界面与电力线平行。



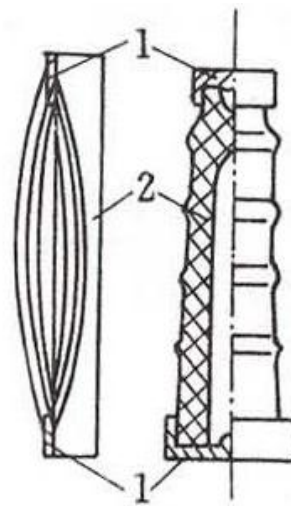
(a)

(2) 固体介质处于极不均匀电场中，且电力线垂直于界面的分量比平行于表面的分量要大得多。



(b)

(3) 固体介质处于极不均匀电场中，电场强度平行于界面的分量要比垂直分量要大，如 (c)。



(c)

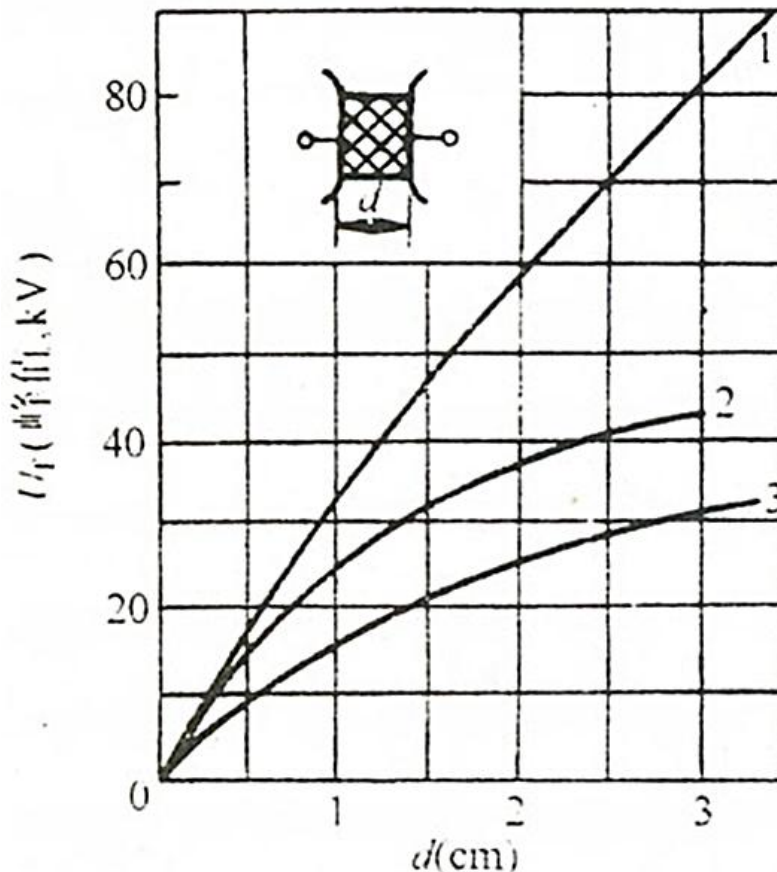


## 4.2 均匀电场中的沿面放电

### Flashover in uniform electric field

疑问?

当介质表面平行于电力线时，介质的存在并不会影响电场分布，然而放电总是发生在固体、气体介质交界面，且闪络电压比纯空气的击穿电压低很多。

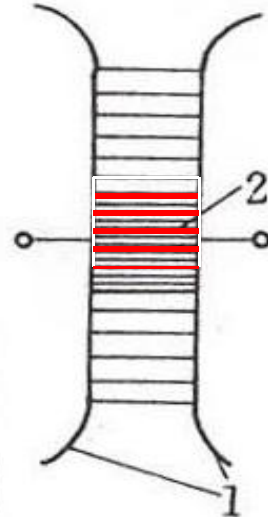


空气中沿玻璃表面的闪络电压

1. 空气间隙;

2. 雷电冲击沿面闪络电压;

3. 工频沿面闪络电压





## Flashover in uniform electric field

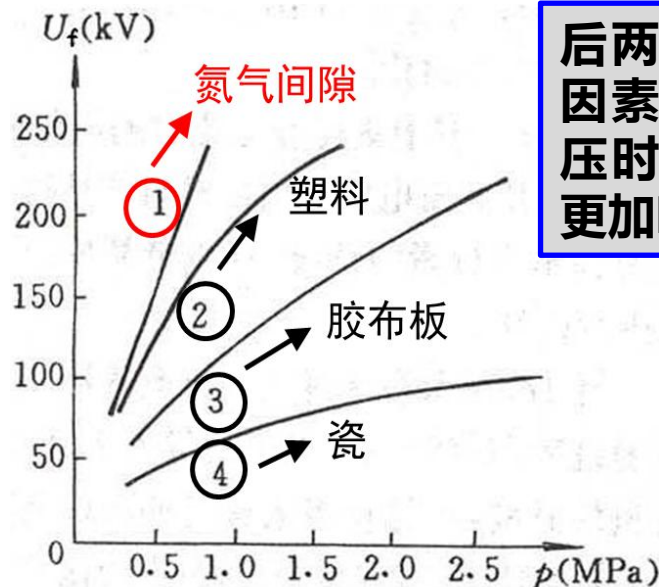
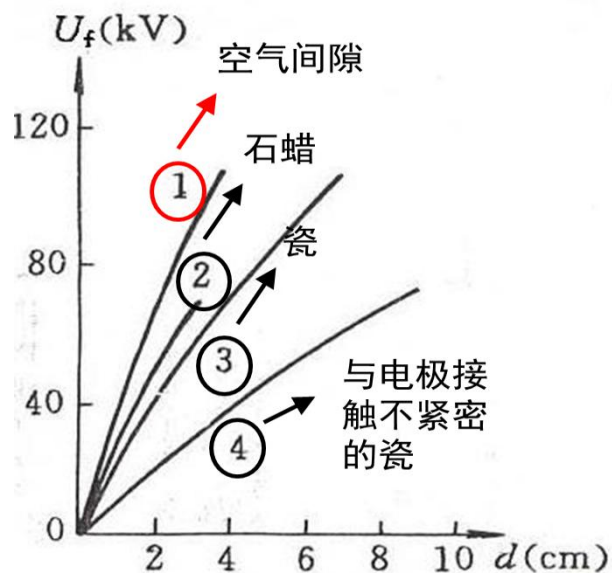
### 原因、解释如下:

(1) 固体介质与电极接触不良, 可能存在气隙。由于气体的介电常数比固体介质低, 气隙中场强比平均场强大得多, 将发生局部放电。放电产生的带电质点扩散到固体介质表面, 畸变电场分布, 降低了沿面闪络电压。

(2) 空气湿度及固体介质吸附水分的能力对闪络电压也有显著影响。介质吸收水分形成水膜, 导致沿面电压不均匀, 因而使闪络电压低于纯气隙击穿电压。

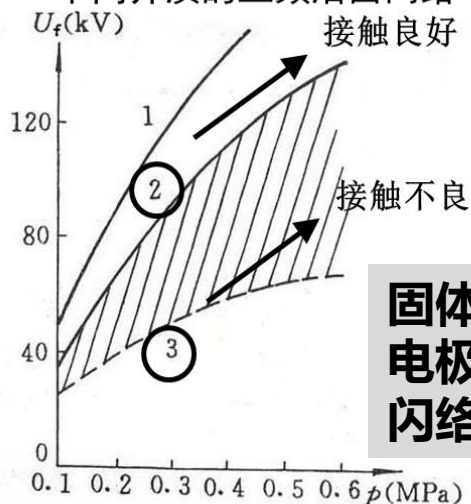
(3) 介质表面电阻不均匀和介质表面粗糙, 也都会畸变电场分布, 使闪络电压降低。





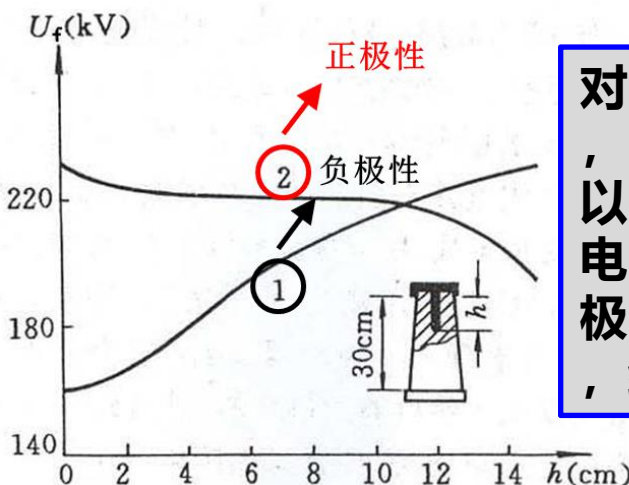
后两点影响因素在高压时表现得更加明显。

不同介质的工频沿面闪络电压



固体介质是否与电极紧密接触对闪络电压有影响

气压对氮气中沿面闪络电压的影响



对于支柱绝缘子，内屏蔽电极可以提高沿面闪络电压。内屏蔽电极有一最佳深度，约10cm左右。

充 $\text{SF}_6$ 气体的同轴圆柱电极中支撑与电极接触的好坏对沿面闪络电压的影响

支柱绝缘子的内屏蔽电极深度对雷电冲击闪络电压的影响

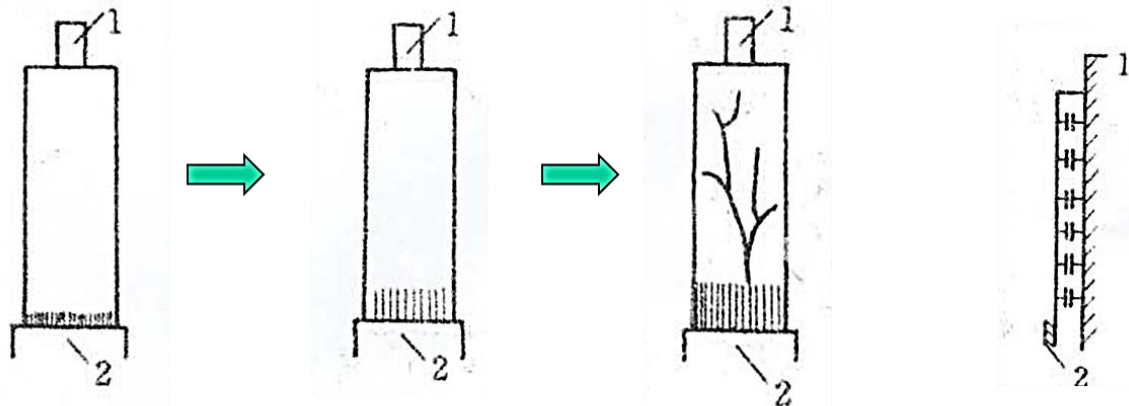




## 4.3极不均匀电场中的沿面放电

### 1.具有强垂直分量时的沿面放电

#### 沿面放电现象



(a) 电晕放电 (b) 细线状辉光放电 (c) 滑闪放电 (d) 套管表面电容

沿套管表面放电的示意图



(a) 法兰 (图中2) 边缘微弱光圈

(b) 电晕延伸, 形成火花细线组成的光带

(c) 超过临界值, 个别细线迅速增长, 转变为树枝状、紫色、较明亮的火花。

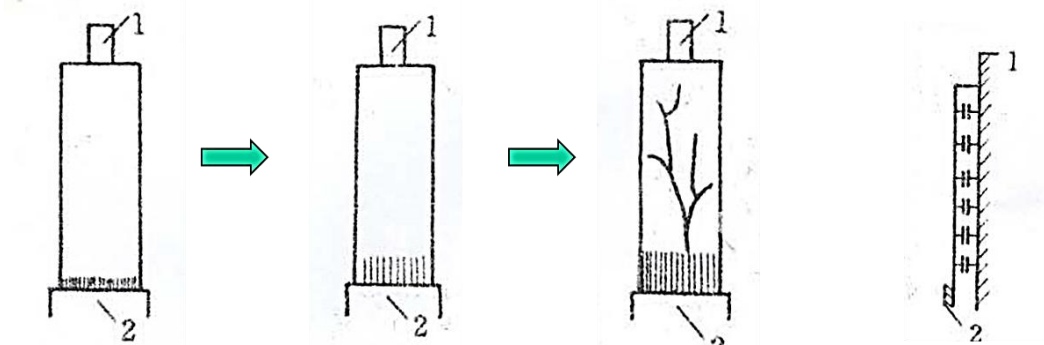


## 1.具有强垂直分量时的沿面放电

### 滑闪放电的机理及影响因素

滑闪放电是以介质表面放电通道中发生**热电离**作为特征的。

放电起始阶段，细线通道内因**碰撞电离**存在大量带电质点。在较强的电场**垂直分量**作用下，带电质点不断**撞击**介质表面，使局部温度升高。一定电压下，当温度高达足以引起气体**热电离**时，通道中带电质点剧增、电阻剧降，通道头部场强也剧增，导致通道迅速增长，放电转入**滑闪放电**阶段。



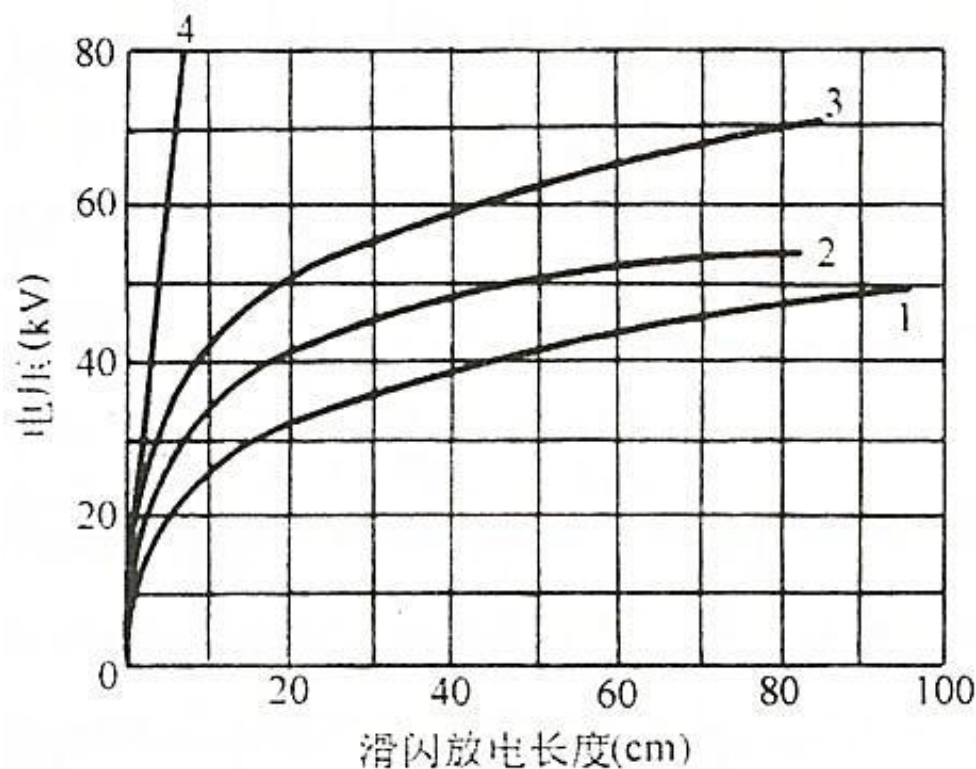


## 滑闪放电的影响因素

(1)滑闪放电现象在交流和冲击电压下表现得很明显。

(2)随着电压增加，放电长度增加得越来越快，因此单纯靠加长沿面距离来提高闪络电压的效果较差。

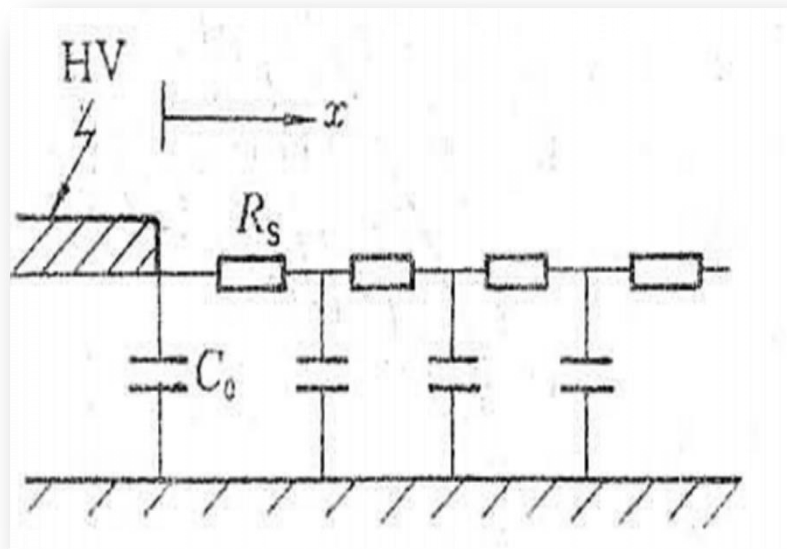
(3)玻璃管管壁减薄，滑闪长度增加。



雷电冲击电压下玻璃管表面滑闪长度与电压关系

1.直径为0.79/0.95cm; 2.直径为0.63/0.9cm;

3. 直径为0.6/1.01cm; 4.空气间隙击穿电压



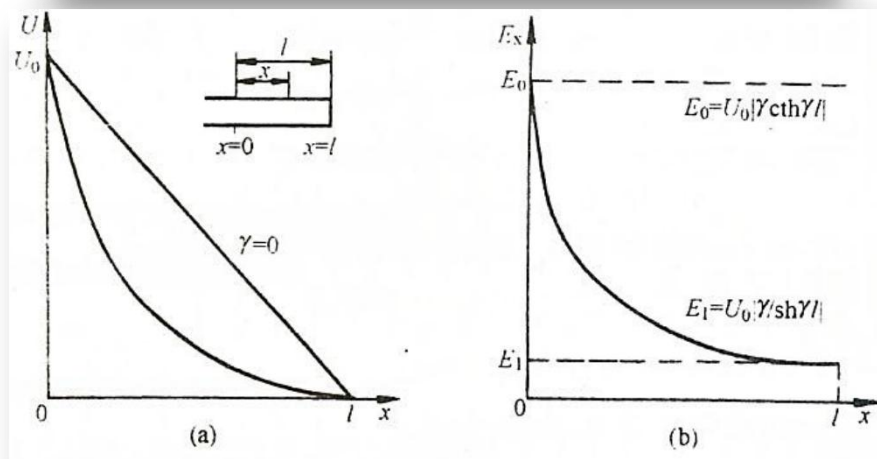
## 套管沿面放电的等效电路与分析

比电容  $C_0$ : 介质表面单位面积与另一电极 (导杆) 间的电容值。

$R_s$ : 单位面积的介质表面电阻

$$C_0 = \frac{\epsilon_r}{4\pi \times 9 \times 10^{11} R \ln \frac{R}{r}} (F/cm^2)$$

$r$ 、 $R$  为圆柱形介质的内、外半径 (cm)



$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_0}{\sqrt{\omega C_0 \rho_s}}$$



## 套管沿面放电的等效电路与分析

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{E}_0}{\sqrt{\omega C_0 \rho_s}}$$

- ①电压变化快， $\omega$ 大，放电电压低；
- ②介质厚度 $d$ 小，相对介电常数 $\varepsilon_r$ 大，即比电容 $C_0$ 大，放电电压低；
- ③介质表面电阻率 $\rho_s$ 大，表面电压分布不均匀，放电电压低。

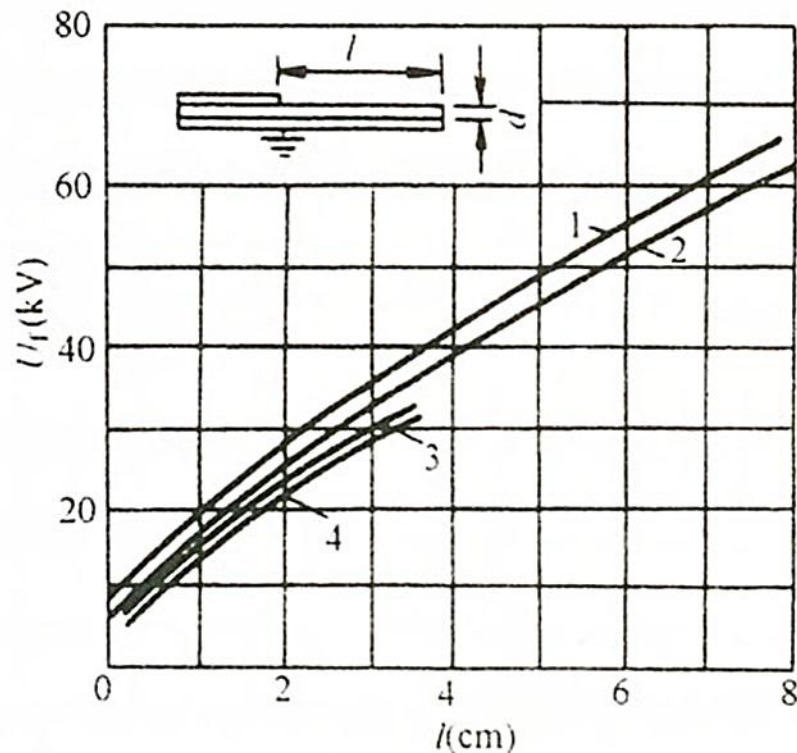
## 提高套管的电晕起始电压和滑闪放电电压的方法：

- ①减小比电容 $C_0$ ，即增加绝缘厚度 $d$ ，采用介电常数小的介质；
- ②减小介质表面电阻率 $\rho_s$ ，如在靠近法兰处涂上半导体漆或者上半导体釉





## 直流电压下没有明显的滑闪放电现象



沿胶纸表面的直流闪络电压与沿面距离的关系

- 1、正极性,  $d=4\text{mm}$ ; 2、负极性,  $d=4\text{mm}$ ;
- 3、正极性,  $d=1\text{mm}$ ; 4、负极性,  $d=1\text{mm}$

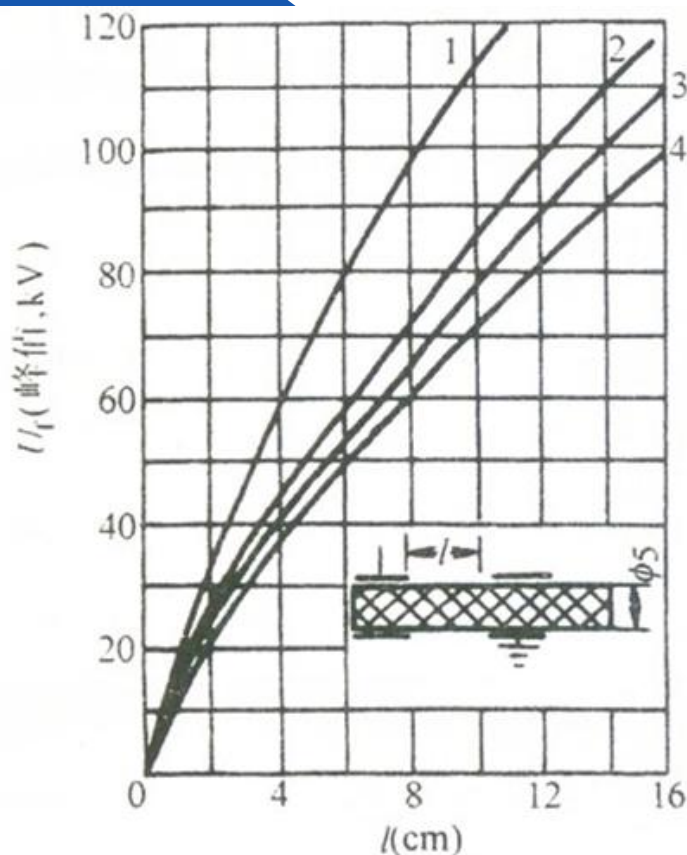


## 2.具有弱垂直分量时的沿面放电

### 特点:

沿面闪络电压与空气击穿电压的差别比前述两种电场情况都要小得多。

因此这种情况下，为提高沿面放电电压，主要从改进**电极形状**以改善电极附近的电场着手。



沿不同材料圆管表面的工频闪络电压与极间距离的关系  
1 - 空气隙击穿; 2 - 石蜡; 3 - 胶纸; 4 - 瓷和玻璃



**线路绝缘子是输配电线路固定导线用的绝缘部件。**

针式、悬式、瓷横担。



**悬式绝缘子串：绝缘子片数的问题**

**串接绝缘子的数目决定于线路所要求的绝缘水平。**

35kV 2-3片

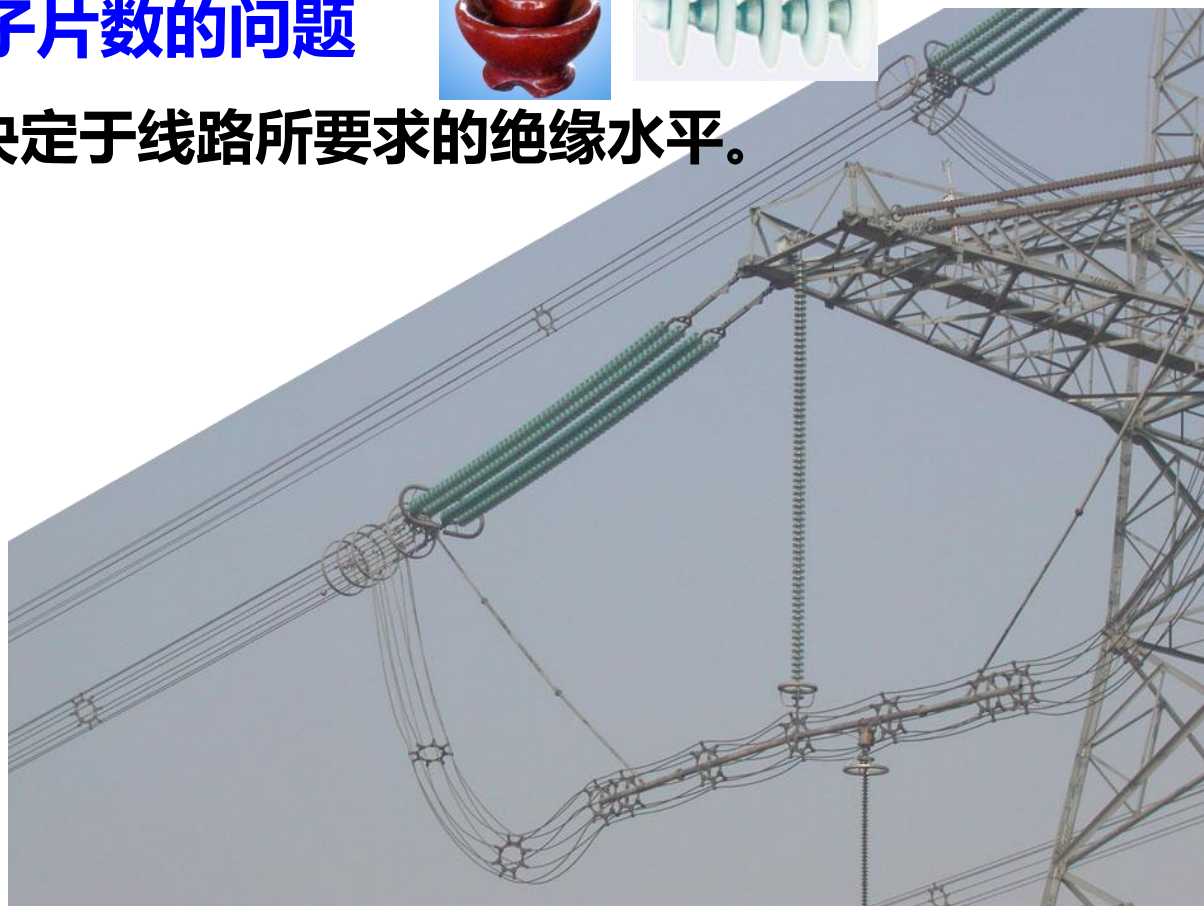
110kV 7片

220kV 13-14片

330kV 19-22片

**特殊情况**

- 增加1-2片
- 并联使用





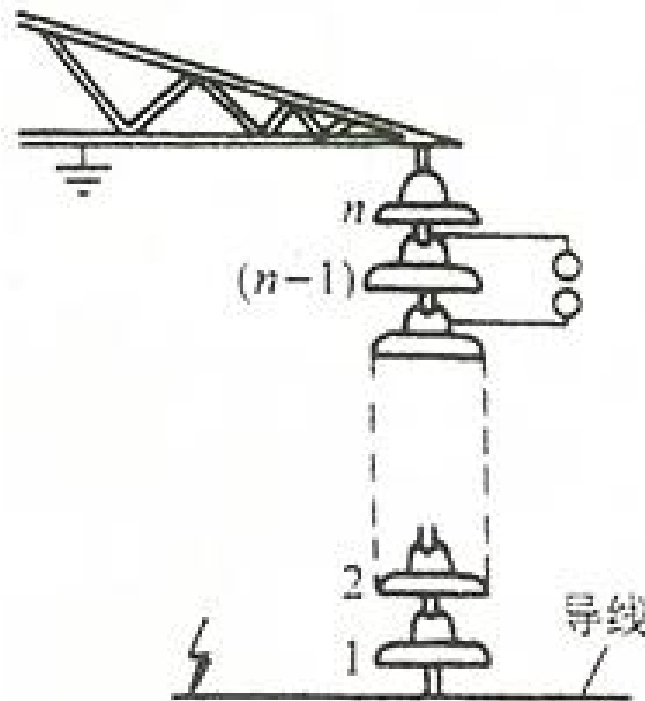
## 悬式绝缘子问题

存在电位分布不均匀的情况

$$U_{\max} \gg U_n / n$$

## 后果

绝缘子上电压降过高时可能会产生电晕，它将干扰通信线路，也会产生氮的氧化物腐蚀附件和污染绝缘子的表面。





## 悬式绝缘子串电位分布不均的原因

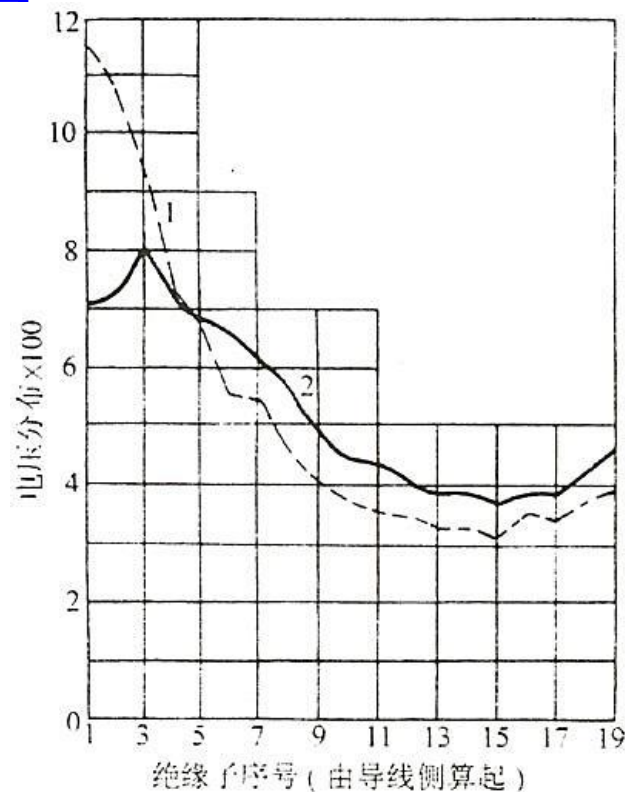
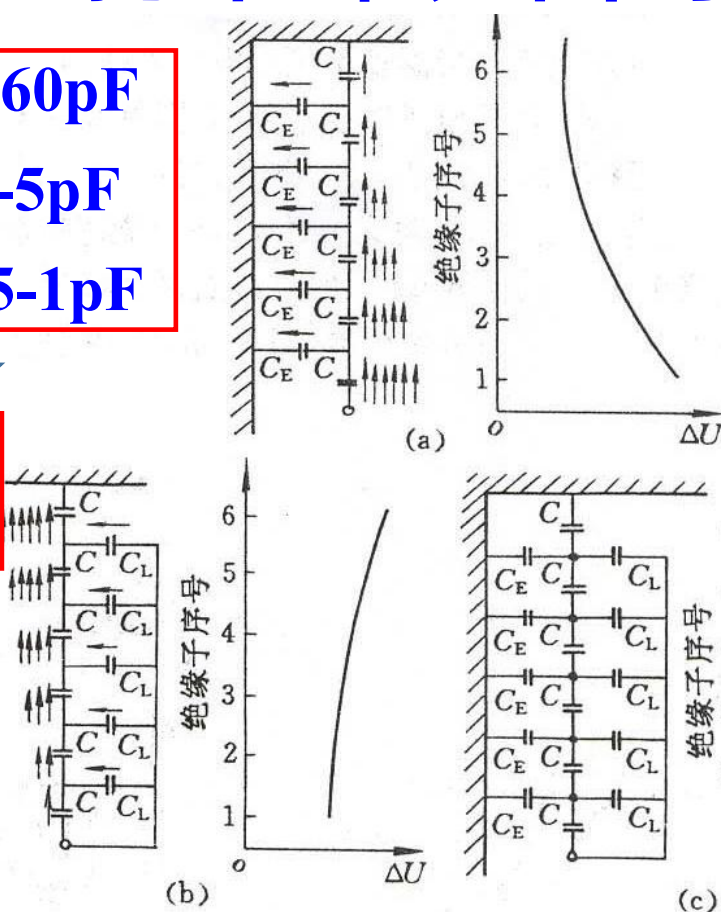
$C$ : 30-60pF

$C_E$ : 4-5pF

$C_L$ : 0.5-1pF



增大 $C_L$   
可均压



悬式绝缘子串 (19XP-7) 的电压分布  
1、无均压环; 2、有均压环

绝缘子串的等效电路及各绝缘子承受的电压

(a) 只考虑对地电容 $C_E$  (b) 只考虑对导线电容 $C_L$  (c) 同时考虑 $C_E$ 及 $C_L$

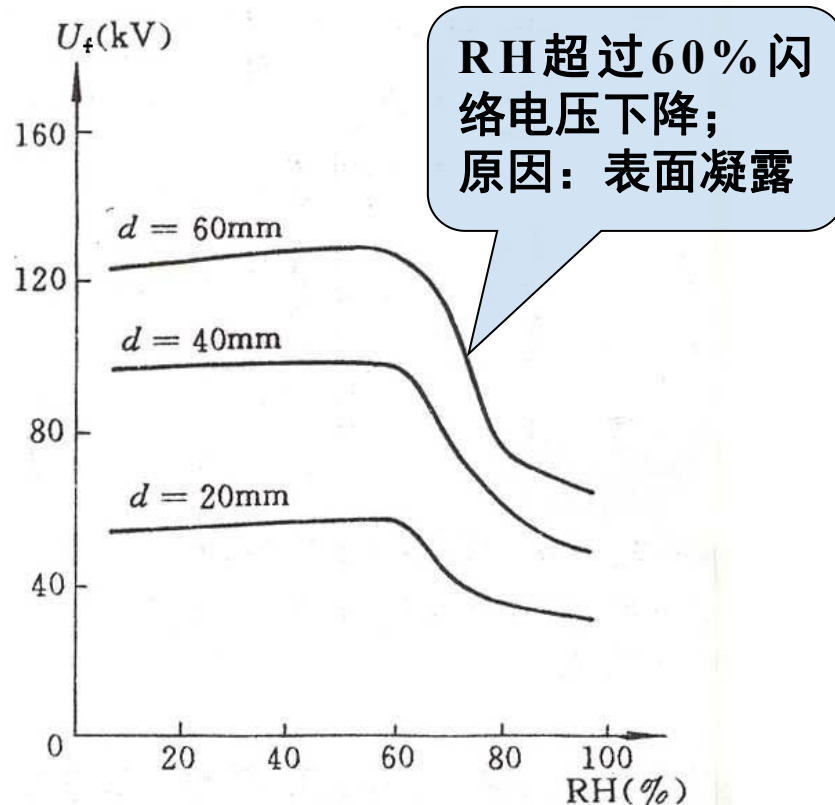




## 4.4受潮表面的沿面放电

### 1. 表面凝露对沿面放电的影响

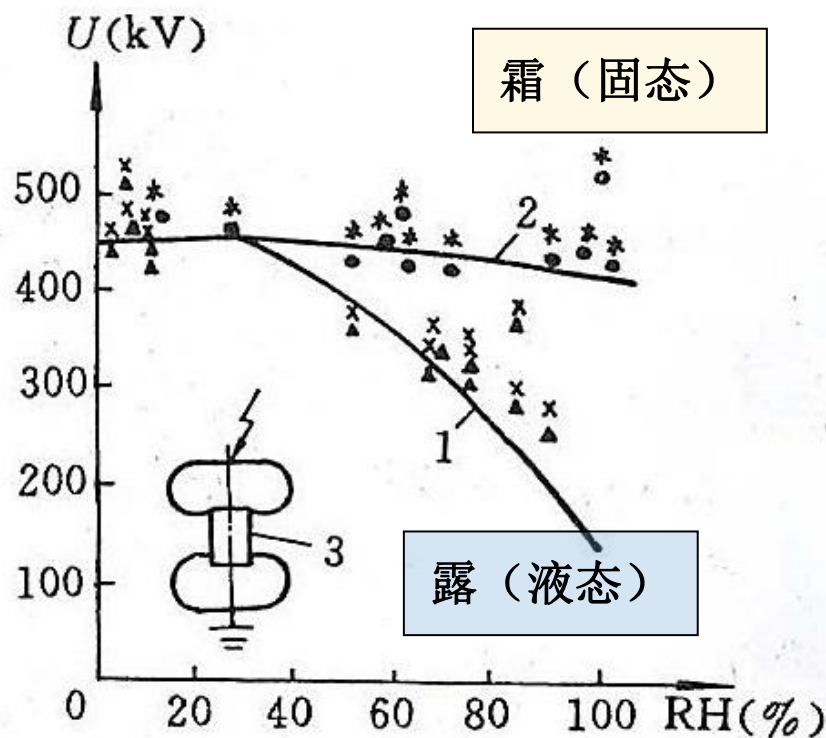
- 介质表面未发生凝露，绝对湿度的增大，使沿面闪络电压升高。
- 介质表面发生凝露时，沿面闪络电压随相对湿度的增大而迅速降低



不同放电距离时清洁的环氧树脂支柱绝缘子的交流闪络电压（环境温度为30°C）



- **绝对湿度：** 单位体积湿空气中所含水蒸气的质量。
- **相对湿度：** 湿空气的绝对湿度与相同温度下可能达到的最大绝对湿度之比。



SF<sub>6</sub>中支撑绝缘子工频沿面闪络电压  
(气压0.35MPa)

1—气温为-2°C~+4°C

2—气温为-29°C~-2°C

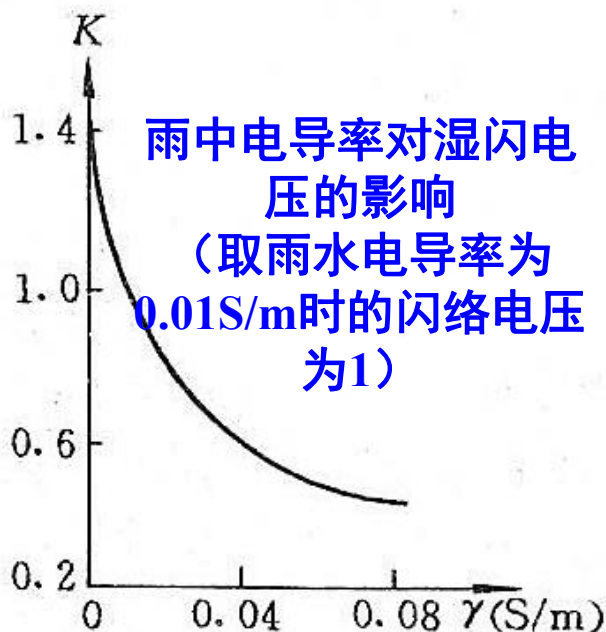
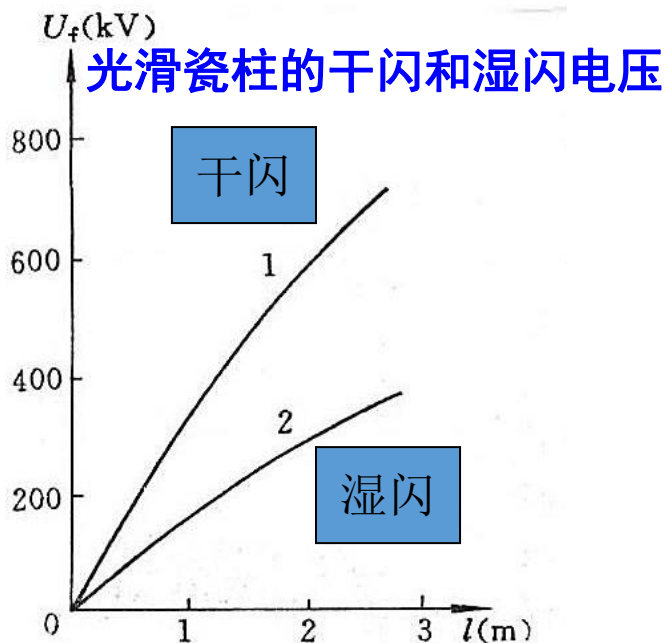
3—环氧树脂绝缘子



## 2. 表面淋雨对沿面放电的影响

介质表面完全淋湿时，雨水形成连续的导电层，**泄漏电流**增大，**闪络电压大大降低**。因此，淋雨状态下的闪络电压，即**湿闪络电压**是户外绝缘子的一项重要性能指标，也是决定户外绝缘子外形的重要因素。（伞裙等）

**泄漏电流**：运行电压下表面受潮后流过绝缘子表面的电流，它是电压、气候（气压、温度、湿度）、污秽三要素综合作用的结果。



要提高绝缘子的湿闪电压，户外绝缘子都有**伞裙**，使介质，表面有一部分不直接受雨淋。



## 4.5 脏污绝缘表面的沿面放电

### 1. 污秽闪络——污闪

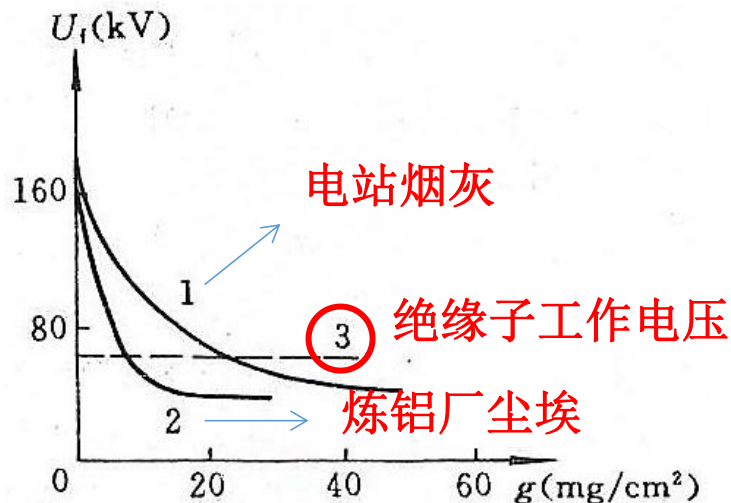
#### 绝缘子污秽

户外绝缘子常会受到工业污秽或自然界盐碱、飞尘、鸟粪等的污染。

#### 污秽闪络

干燥情况下污秽物的电阻较大，但当大气湿度较高，在毛毛雨、雾、露、雪等不利气候条件下，污秽物被润湿时，其表面电导和泄漏电流剧增，使绝缘子的闪络电压显著降低，甚至可在工作电压下闪络，影响电力系统的安全运行。

绝缘子闪络电压与污染程度（以单位面积的污量表示）的关系：

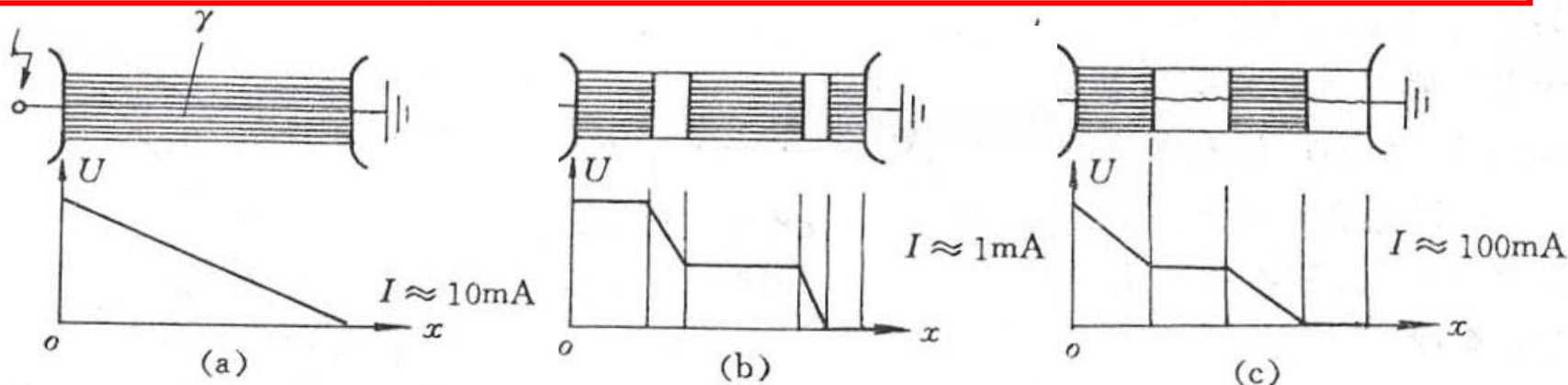




## 2. 污闪的发展过程

**爬电距离（泄漏距离）：**沿绝缘表面放电的距离。（最短距离）  
所安装的带电两导体间的最短绝缘距离应大于允许的最小爬电距离。

- (1) 污层刚受潮时，介质表面有明显的泄漏电流流过，电压分布是较均匀；
- (2) 污层不均，电阻不均，高电阻的发热多，形成的“干燥带”，使泄漏电流减小，并在干燥带形成很大的电压降；
- (3) 当干燥带的电位梯度超过沿面闪络场强时，干燥带发生放电，放电热量使干燥带扩大、剩余湿润区缩小，电流增大引起热电离，出现局部电弧的阶段。



外施电压越高或剩余湿污层的电阻越小，则越容易发展成闪络。





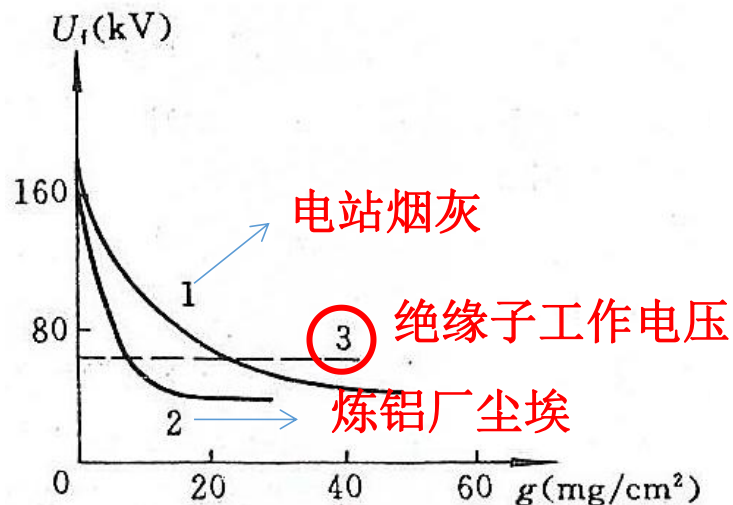
### 3. 影响污闪电压的因素

#### (1) 污秽物性质与污染程度

- 最强：含有可溶性盐类或酸、碱的积尘  
化工、冶炼企业的排污；海岸盐雾聚集

- 其次：粘附性强的积尘  
水泥厂飞尘

- 最弱：一些含可溶性盐类少、不粘附的积尘  
电站烟灰、尘土



绝缘子闪络电压与污染程度（以单位面积的污量表示）的关系：



### 3. 影响污闪电压的因素

#### (2) 大气湿度

- 干燥

绝缘子闪络电压并不降低。

- 湿度大

当空气相对湿度超过50-70%时，随湿度增加，绝缘子闪络电压迅速下降。实际运行表明，绝缘子污闪事故都发生在雾、露、融雪和毛毛雨等高湿度天气。

- 大雨

绝缘子表面集积的污秽，特别是水溶性导电物质容易被雨水冲掉，表面仍有较高的电阻，绝缘水平并不降低。



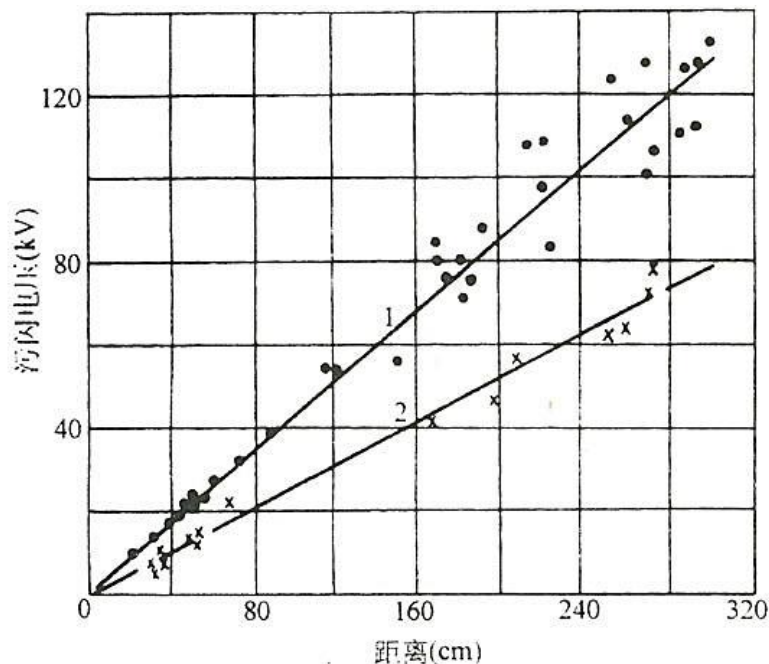
### 3. 影响污闪电压的因素

#### (3) 爬电距离

◆ 爬电距离增加时污闪电压也增加，两者近似呈正比关系。

#### 原因

因为爬电距离大，要形成闪络，局部电弧长度必然要大，而要使较长的电弧不熄灭，就要求较大的泄漏电流和较高的电压。



绝缘子污闪电压与爬电距离的关系  
1-炉灰, 10mg/cm<sup>2</sup>; 2-水泥, 10mg/cm<sup>2</sup>



### 3. 影响污闪电压的因素

#### (4) 电压形式

- ◆ 由于污闪是局部电弧不断拉长的过程，因此电压作用时间越短就越不容易导致闪络。（最不易造成闪络的电压类型是？）

#### (5) 绝缘子直径

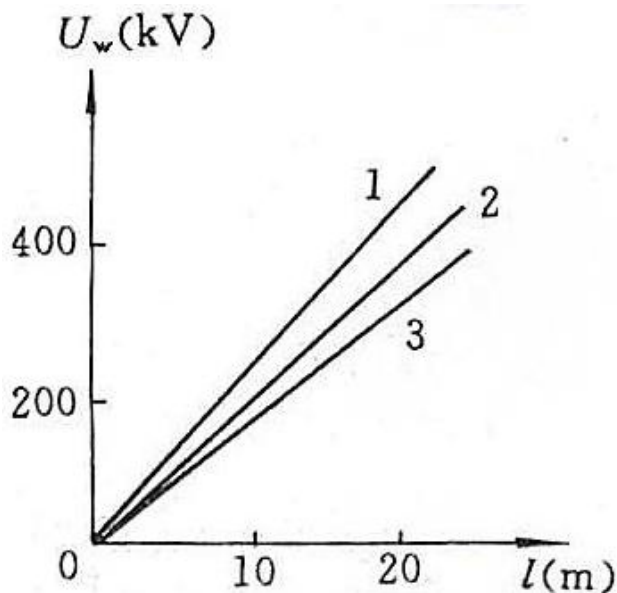
- ◆ 同样的污染、受潮情况下，尽管爬电距离相同，**但直径大的绝缘子的表面电阻小些**，因而污闪电压也会低一些。对大的电器瓷套等绝缘件，应考虑污闪电压随绝缘子直径增加而下降的特点。



## 4. 污秽等级的划分

**污秽等值附盐密度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) :**

- ◆ 与绝缘子表面单位面积上污秽物导电性相当的等值盐 ( $\text{NaCl}$ ) 量。用一个参数同时表征污秽性质及污秽量，以简化对污秽严重程度的描述。



500kV套管及支柱绝缘子的污秽耐受电压和泄漏距离的关系  
附盐密度: 1 -  $0.03\text{mg}/\text{cm}^2$ ; 2 -  $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ ; 3 -  $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$





## 4. 污秽等级的划分

### 线路和发电厂、变电所污秽等级

污秽等级	污湿特征	盐密(mg/cm <sup>2</sup> )	
		线路	发电厂 变电所
0	大气清洁地区及离海岸盐场50km以上无明显污染地区	≤0.03	-
I	大气轻度污染地区，工业区和人口低密集区，离海岸盐场10km ~ 50km地区，在污闪季节中干燥少雾（含毛毛雨）或雨量较多时	>0.03~ 0.06	≤0.06
II	大气中等污染地区，轻盐碱和炉烟污秽地区，离海岸盐场3km ~ 10km地区，在污闪季节中潮湿多雾（含毛毛雨）但雨量较少时	>0.06~ 0.10	>0.06~ 0.10
III	大气污染较严重地区，重雾和重盐碱地区，近海岸盐场1 ~ 3km地区，工业与人口密度较大地区，离化学污源和炉烟污秽300m ~ 1500m的较严重污秽地区	>0.10~ 0.25	>0.10~ 0.25
IV	大气特别严重污染地区，离海岸盐场1km以内，离化学污源和炉烟污秽300m以内的地区	>0.25~ 0.35	>0.25~ 0.35



## 5. 减少污秽闪络的方法

### (1) 定期清扫

清扫/带电水冲洗/更换绝缘子

#### ↓ 湖南宁乡直升机带电水冲洗



#### ↑ 曲靖局带电水冲洗





## 5. 减少污秽闪络的方法

人工清洁







## 5. 减少污秽闪络的方法

### (2) 涂憎水性防尘涂料

有机硅油, 有机硅脂, 地蜡, 复合涂料

### (3) 加强绝缘和采用耐污绝缘子

增加绝缘子片数/耐污型绝缘子

### (4) 采用硅橡胶复合绝缘子

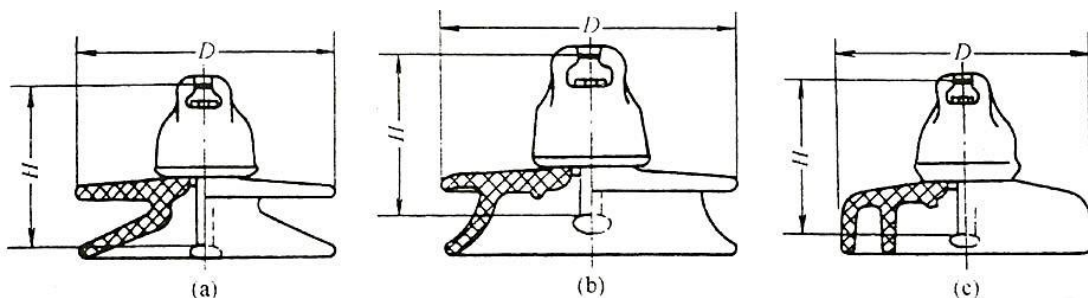


图 3-42 线路耐污盘形悬式绝缘子

(a)  $H = 146\text{mm}$ ,  $D = 255\text{mm}$ ; (b)  $H = 160\text{mm}$ ,

$D = 280\text{mm}$ ; (c)  $H = 160\text{mm}$ ,  $D = 255\text{mm}$

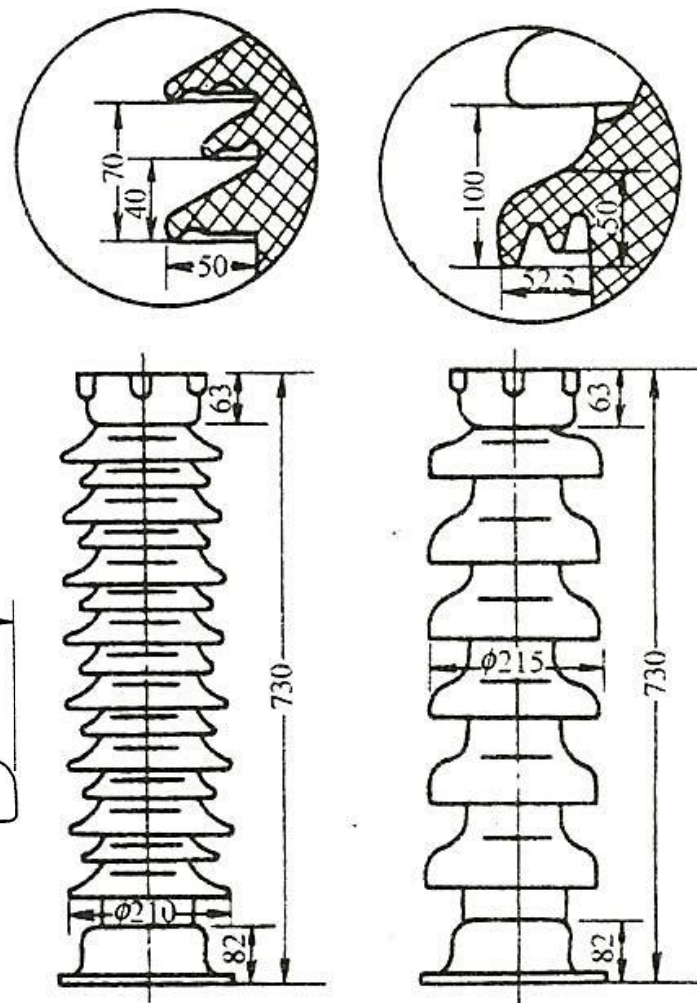


图 3-43 耐污棒形支柱绝缘子



**The end**



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY