



第3章 高压外绝缘及沿面放电

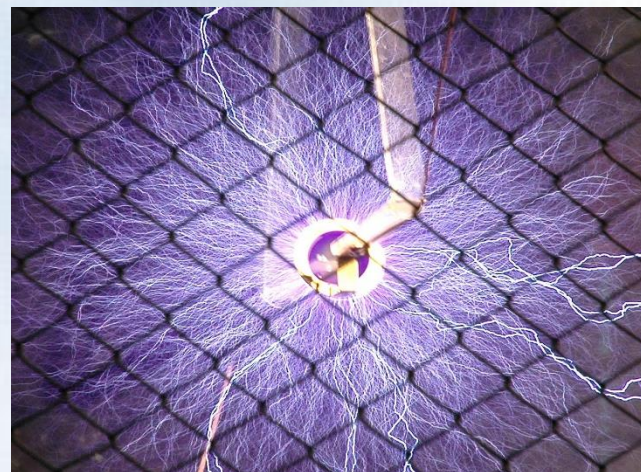
- 3.1 大气条件对空气间隙放电的影响
- 3.2 高压外绝缘及高压绝缘子
- 3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）
- 3.4 绝缘子的雨中放电
- 3.5 绝缘子的污秽放电

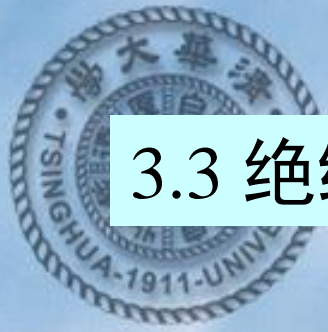
本章核心概念：

大气条件修正、高压绝缘子、外绝缘、沿面放电、滑闪放电、污秽放电、憎水性迁移、硅橡胶有机外绝缘

3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

- 气体放电是气体在高电压、高场强下的特有现象
- 针对某种高压放电情况，从物理现象的观察与确认开始，分析原因、然后推测结果、验证结论，最终确定试验条件与放电现象之间的因果关系
- 针对某种高电压绝缘结构及其绝缘材料，分析、预判在承受不同高电压时可能出现的放电位置、放电特征，指出可能的改进措施
- 沿面放电是“气-固界面”处发生的放电，与气体介质特性、固体介质的体积特性和表面特性、气固绝缘结构都有关系
- “气-固界面”放电的讨论对“液-固界面”的沿面放电也有参考价值





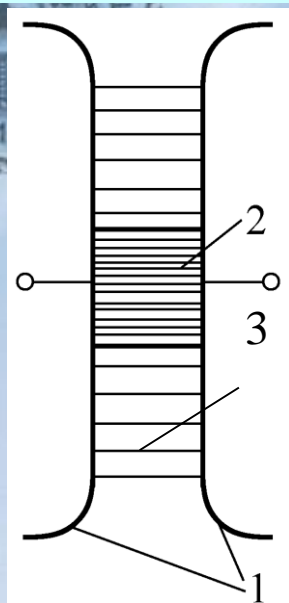
3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

按照固体介质在电极间的位置，形成三种电场结构：

- 均匀电场
- 有弱垂直分量的极不均匀电场(如支柱绝缘子)
- 有强垂直分量的极不均匀电场(如套管、电机出线、电缆终端)

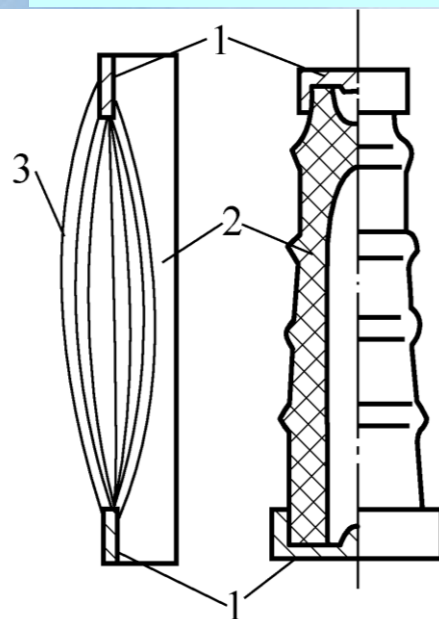
沿面闪络 (flashover)电压比纯空气间隙或纯固体间隙的击穿(breakdown, puncture)电压都低。

均匀电场



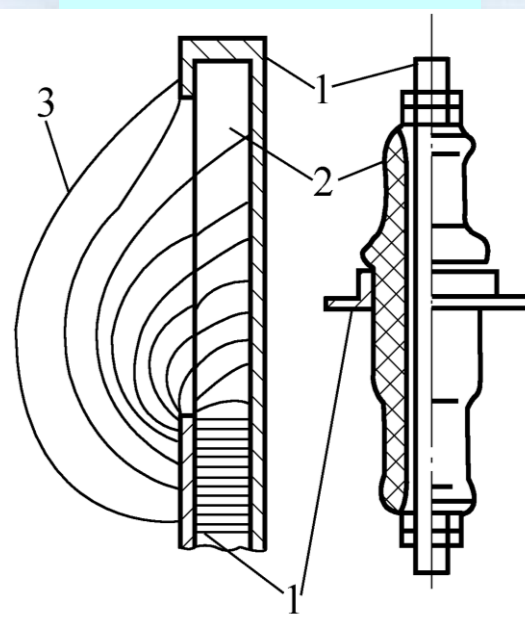
(a)

有弱垂直分量的
极不均匀电场



(b)

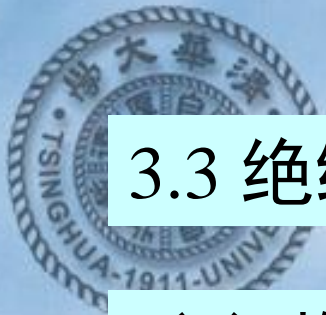
有强垂直分量的
极不均匀电场



(c)

图3-5 固体电介质在电场中的几种典型布置方式

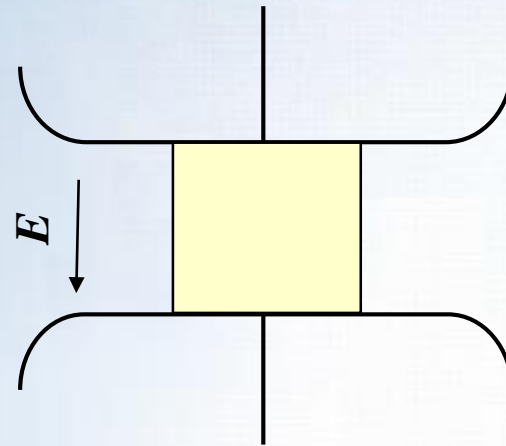
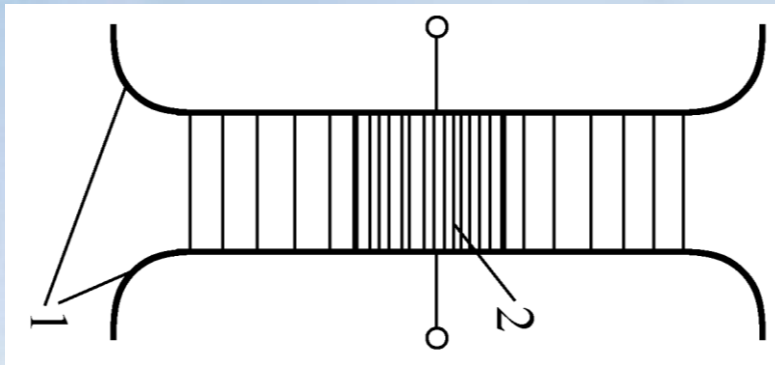
- (a) 均匀电场，场强方向平行于固体电介质表面；
 - (b) 不均匀电场，场强方向大体上与固体电介质表面平行；
 - (c) 不均匀电场，场强方向与固体电介质表面的夹角较大
- 1—电极；2—固体电介质；3—电位移线



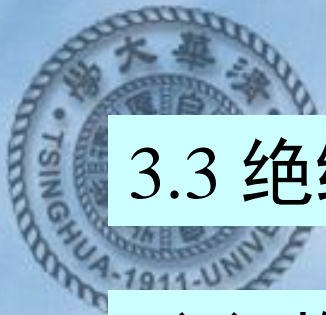
3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

(1) 均匀电场中的沿面放电

放电会从哪里发生？
放电电压受什么影响？



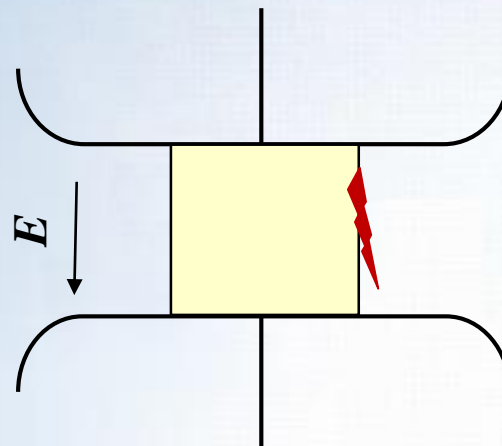
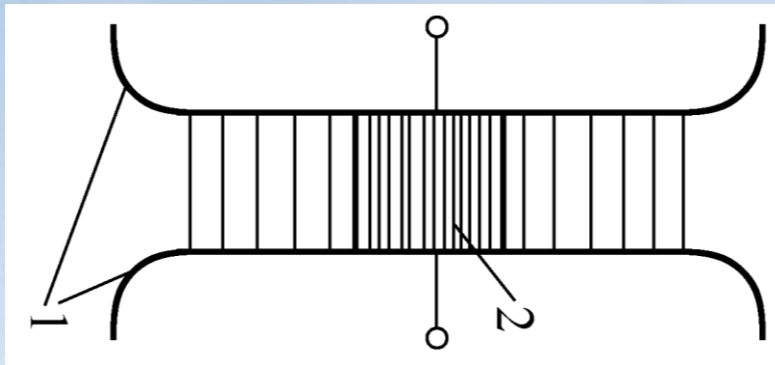
均匀电场中放入固体电介质后，放电会有什么变化？
(固体介质的击穿强度通常比空气高很多)



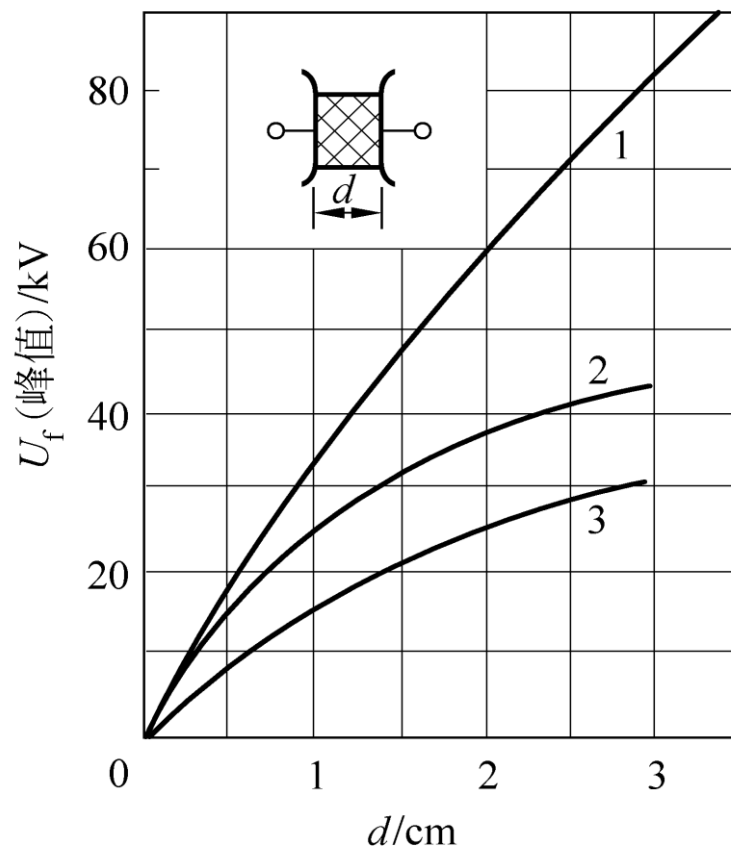
3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

(1) 均匀电场中的沿面放电

放电会从哪里发生？放电电压受什么影响？



沿面闪络 (flashover) 电压比纯空气间隙或纯固体间隙的击穿(breakdown, puncture)电压都低。



- 1—空气间隙击穿
- 2—雷电冲击沿面闪络
- 3—工频电压沿面闪络

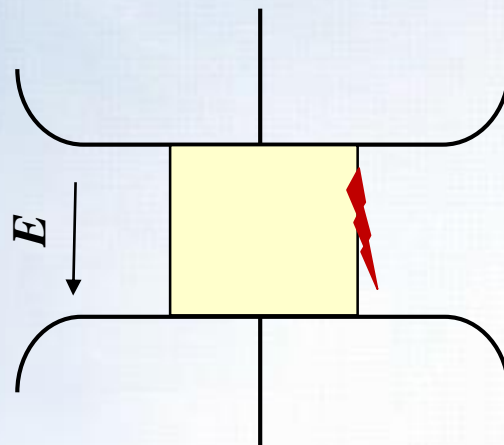
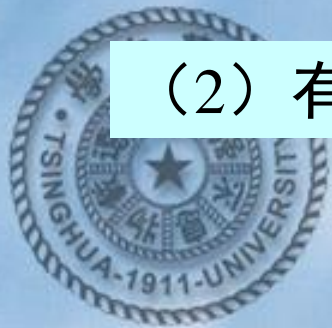


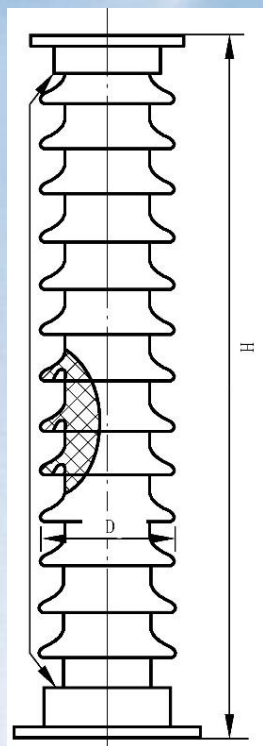
图3-6 均匀电场，沿玻璃表面空气中的闪络电压与闪络距离的关系

为什么？
哪些因素影响？

沿面闪络 (flashover) 电压比纯空气间隙或纯固体间隙的击穿 (breakdown, puncture) 电压都低。



(2) 有弱垂直分量的极不均匀电场的沿面放电



支柱绝缘子：支撑设备、高压母线

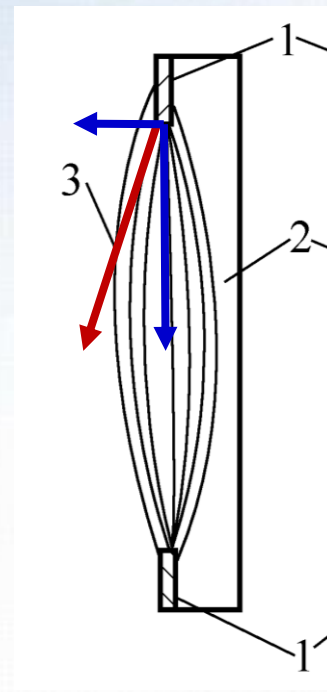
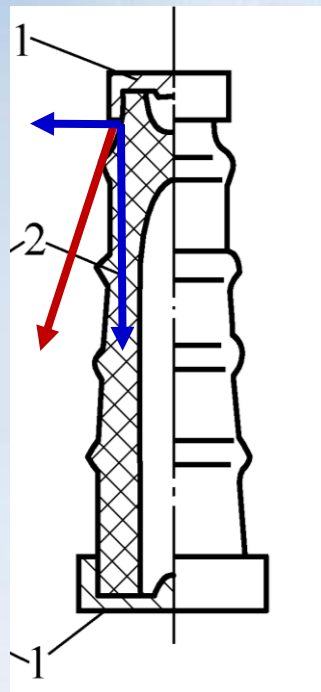
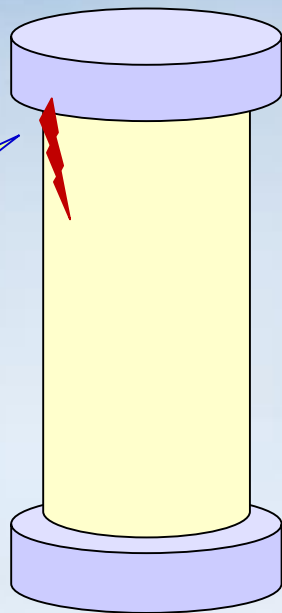
电场特点：大部分区域电力线大体平行于绝缘子表面

3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

(2) 有弱垂直分量的极不均匀电场的沿面放电

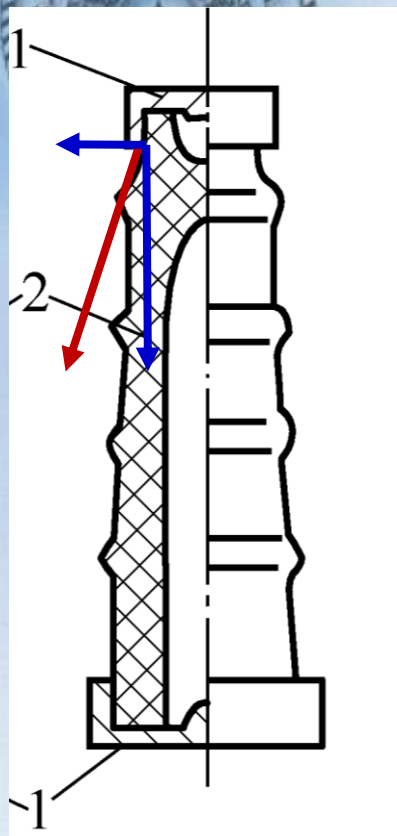
放电会从哪里发生？
放电电压受谁影响？

高场强电极与电介质
相连处的电场分布
主要是切向分量
垂直于介质表面的
法向垂直分量较小

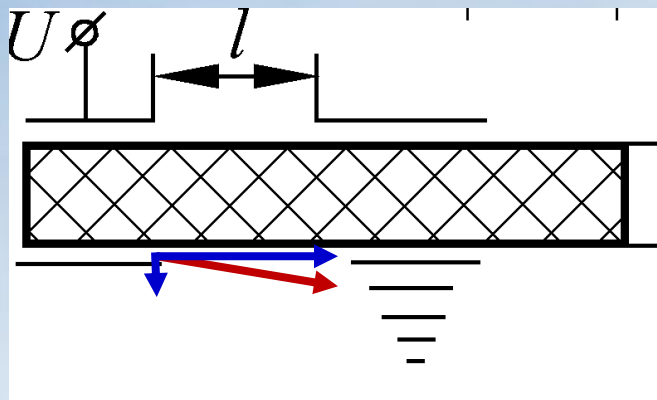


沿面闪络 (flashover) 电压比纯空气间隙或纯固体间隙的击穿(breakdown, puncture)电压都低。

(2) 有弱垂直分量的极不均匀电场的沿面放电



不均匀电场
场强方向
大体上与
固体电介质
表面平行



为什么？
哪些因素影响？

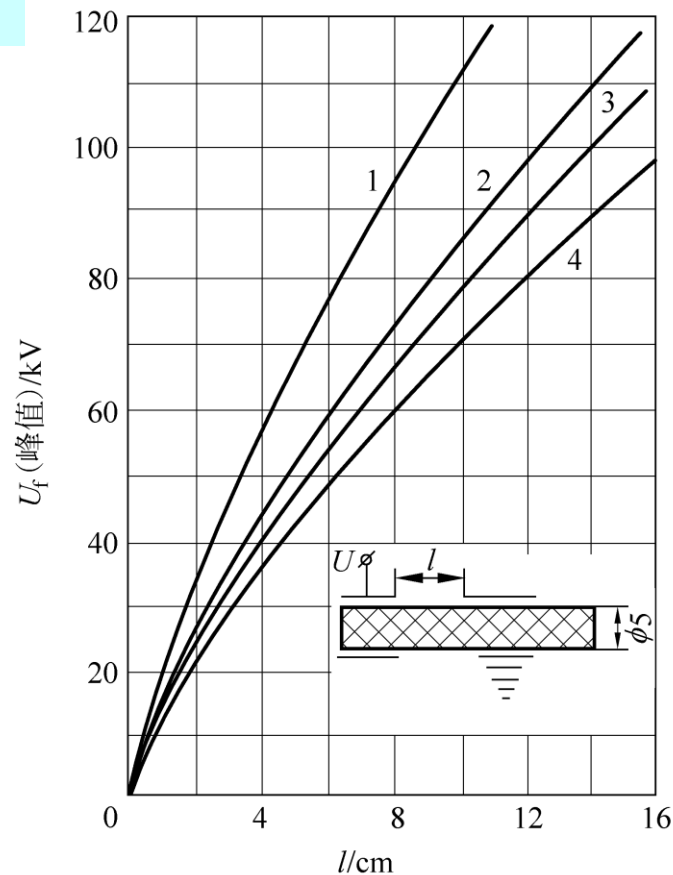
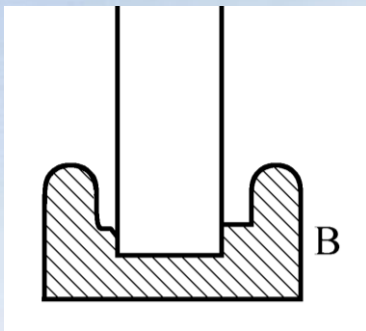
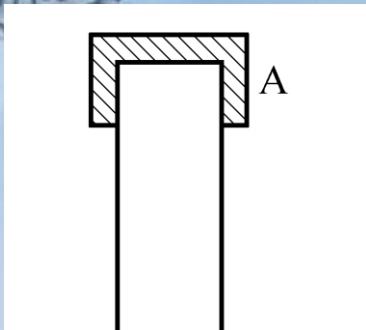


图3-7不均匀电场，沿面工频闪络电压与闪络距离的关系

1— 纯空气隙； 2— 石蜡
3— 胶纸； 4— 瓷、玻璃

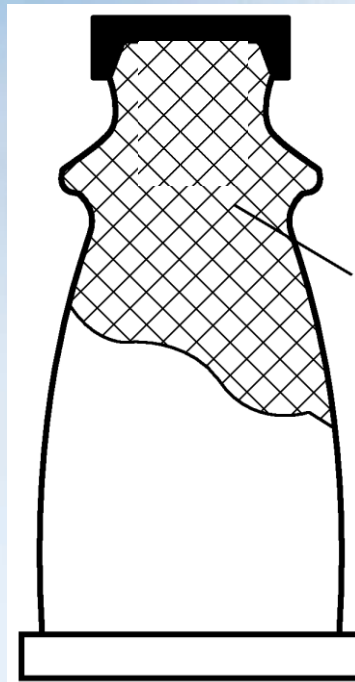
(2) 有弱垂直分量的极不均匀电场的沿面放电

A: 无屏蔽

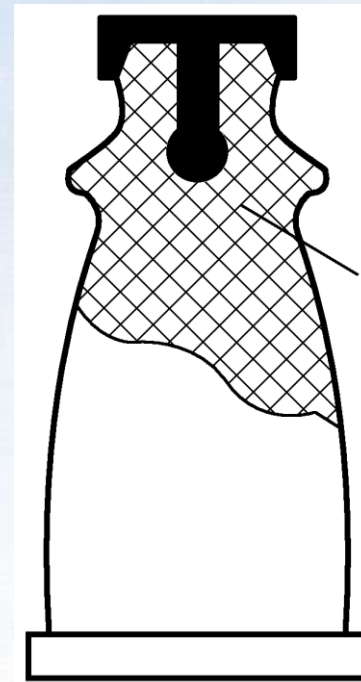


B: 有屏蔽

无内屏蔽



有内屏蔽



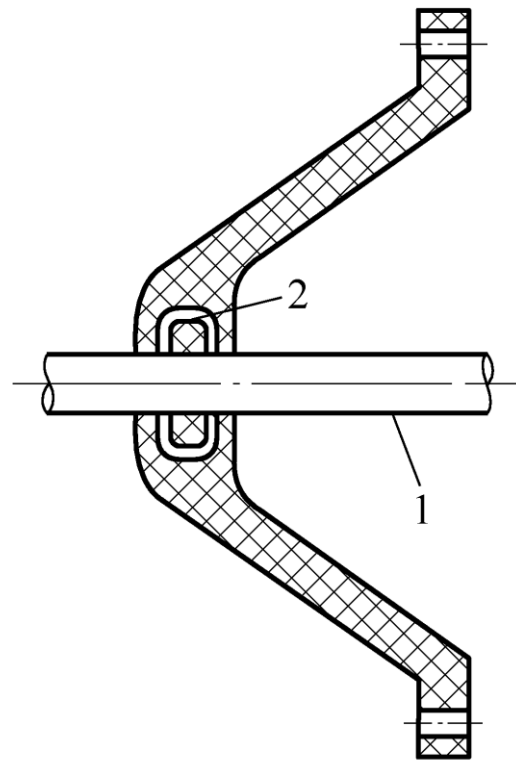
内屏蔽
电极

采用屏蔽电极可提高沿面闪络电压

(上述电极是如何屏蔽原先的高场强区域的?)

(2) 有弱垂直分量的极不均匀电场的沿面放电

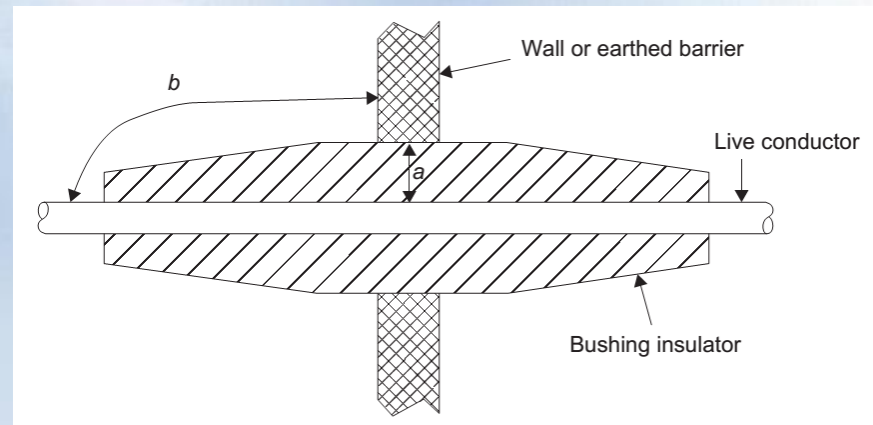
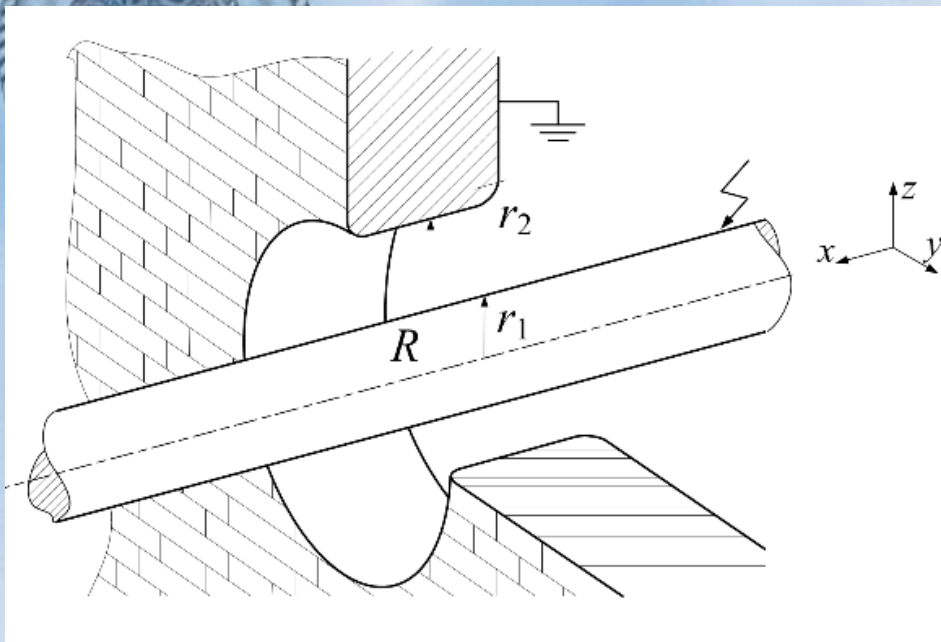
盆式绝缘子的内屏蔽电极



采用屏蔽电极可提高沿面闪络电压

(上述电极是如何屏蔽原先的高场强区域的?)

(3) 有强垂直分量的极不均匀电场的沿面放电



高压导杆穿过接地墙洞的
剖面示意图

当高压导杆需要穿过接地墙壁、接地的设备外壳时，
需要专门的“**高压套管**”

按功能分为：
穿墙套管
变压器套管
GIS出线套管

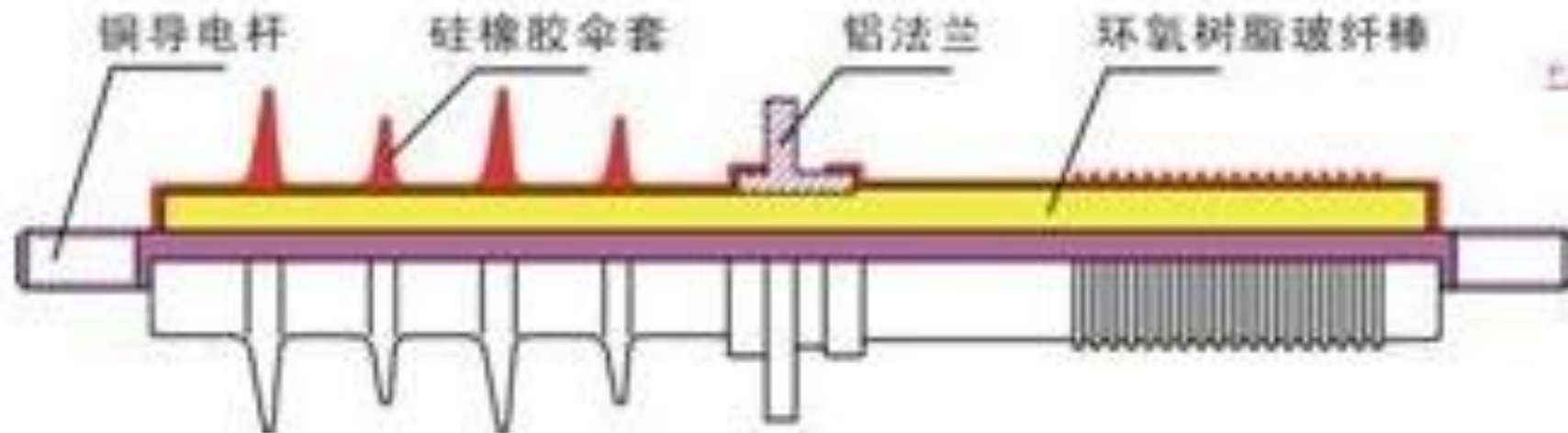
按外绝缘材料分：
瓷套管
硅橡胶复合套管

按内绝缘材料分：
充气 SF_6 套管
充油套管
油浸纸套管
(电容式套管)

穿墙套管 Wall Bushing

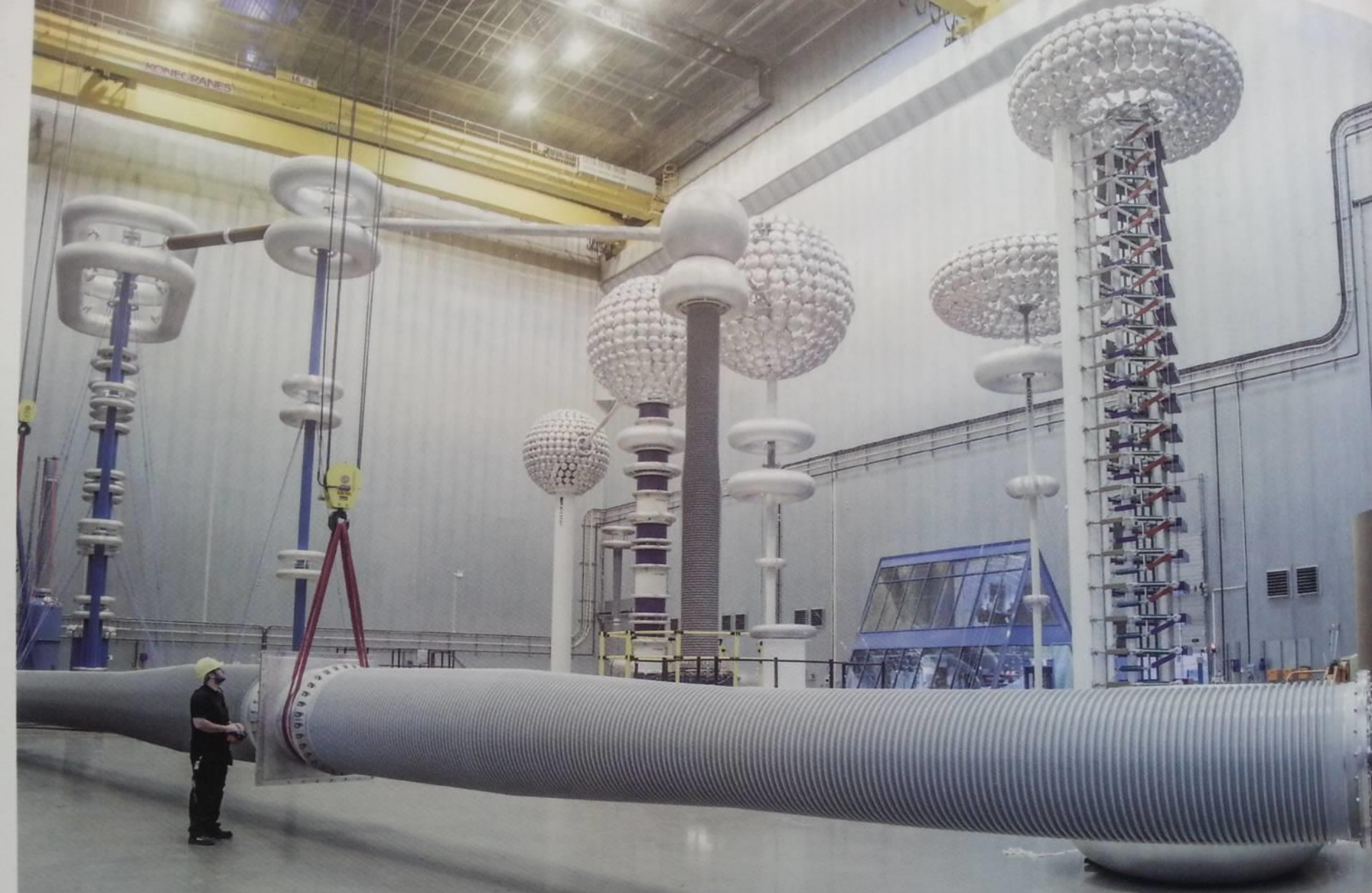
户内部分

户外部分



±500kV穿墙套管
Wall Bushing

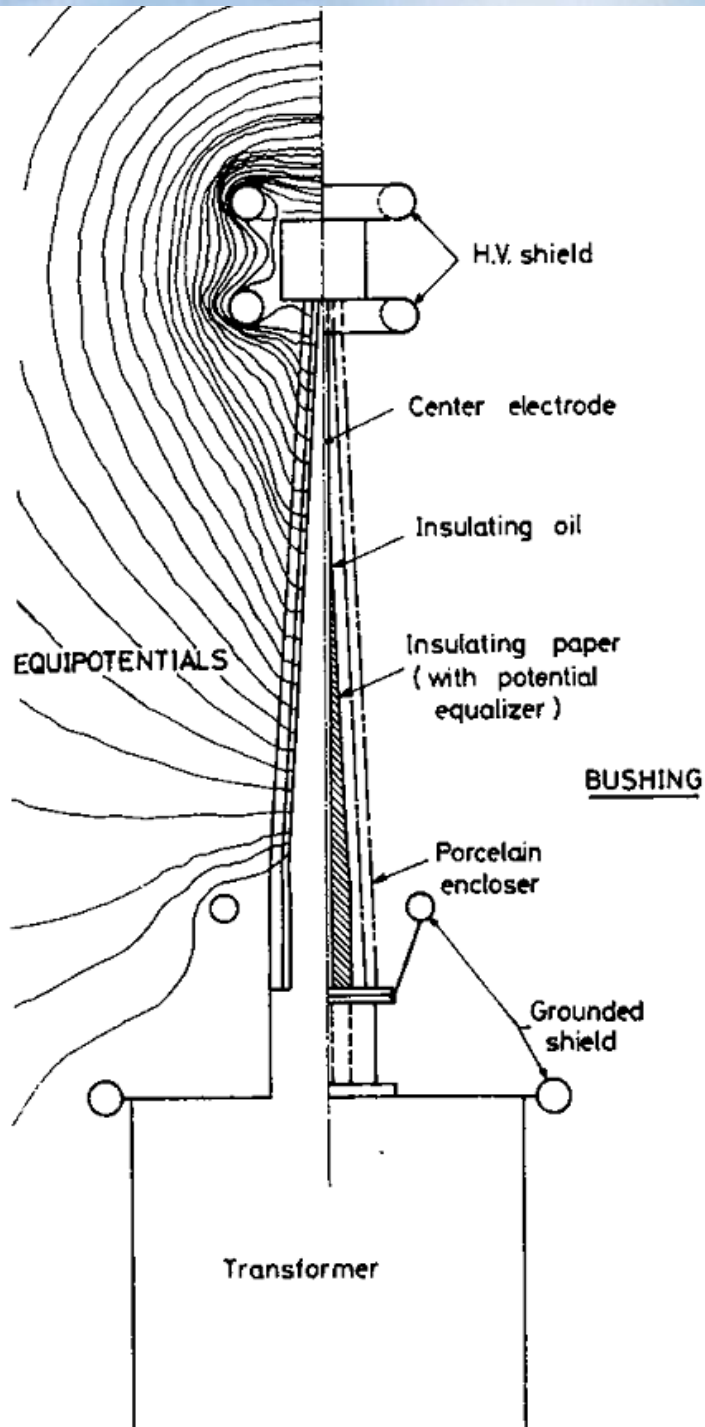
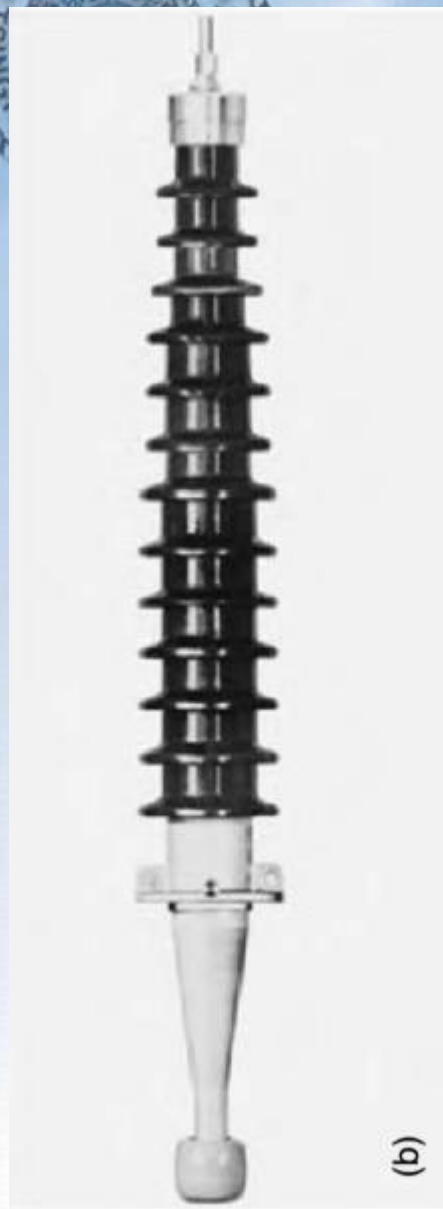




±800kV穿墙套管 Wall Bushing



GIS出线套管、避雷器套筒、电压互感器套筒、支柱绝缘子



变压器套管 Transformer Bushing



500kV单相变压器



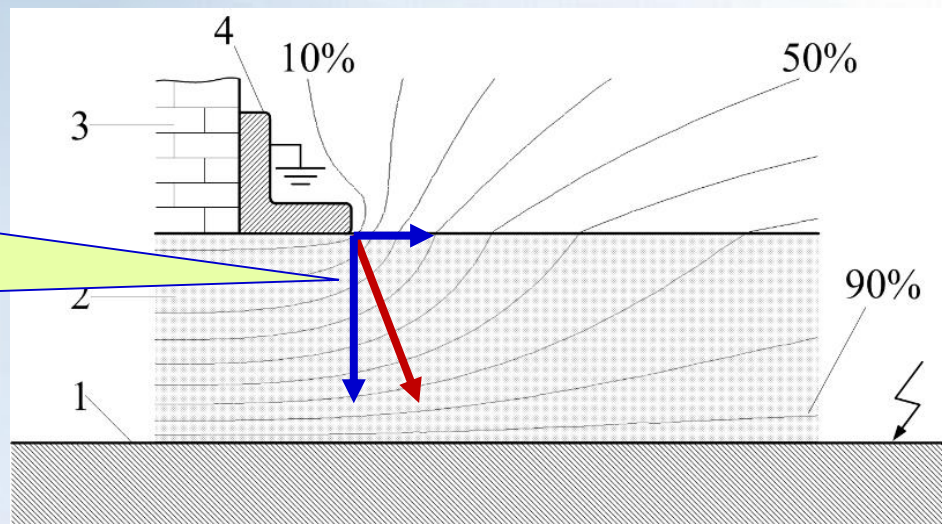
1000kV单相变压器

(3) 有强垂直分量的极不均匀电场的沿面放电

套管的电场特点（具有强垂直分量的极不均匀场）：

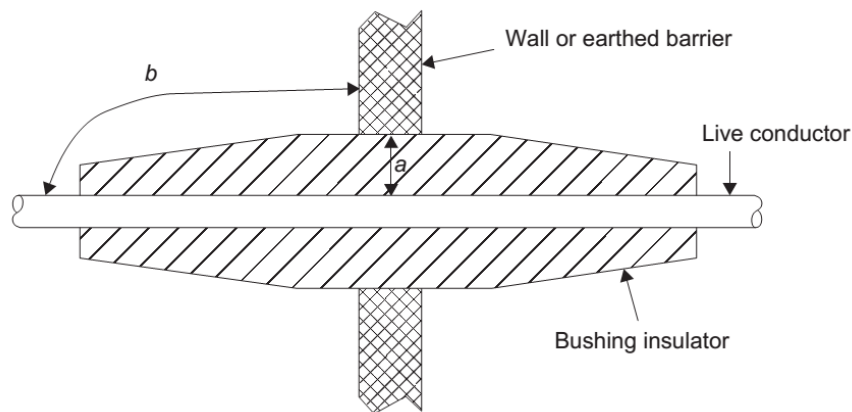
高压导杆穿越接地部件（墙体或外壳），法兰区域电场最集中，
电力线大体垂直于套管表面

高场强电极与电介质
相连处的电场分布
切向分量小
垂直于介质表面的
法向分量很大

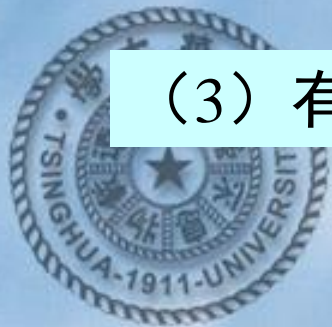


穿墙套管电场结构简化示意图

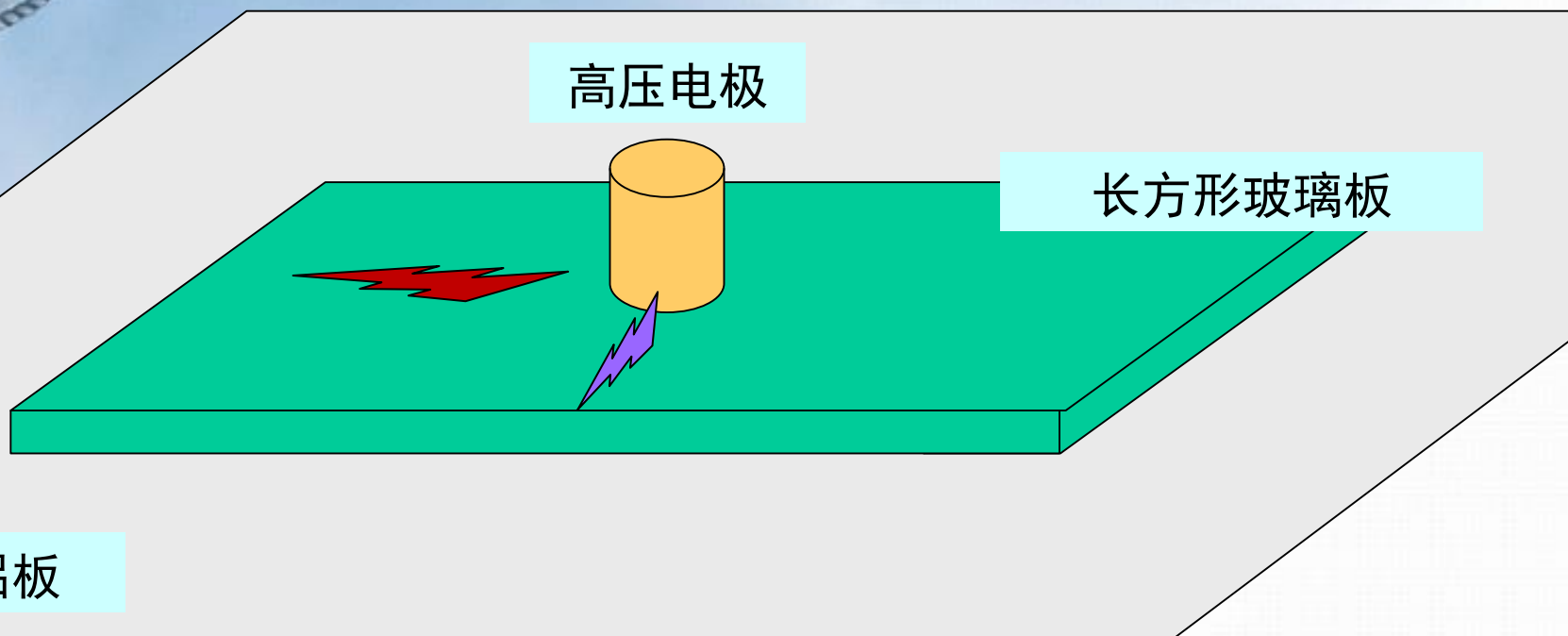
1—高压导杆； 2—电介质；
3—墙体； 4—接地法兰



高压导杆穿越墙洞



(3) 有强垂直分量的极不均匀电场的沿面放电



演示实验中，不同方向的放电有多大差异？

看看滑闪放电视频

滑闪放电演示的电极结构

(3) 有强垂直分量的极不均匀电场的沿面放电

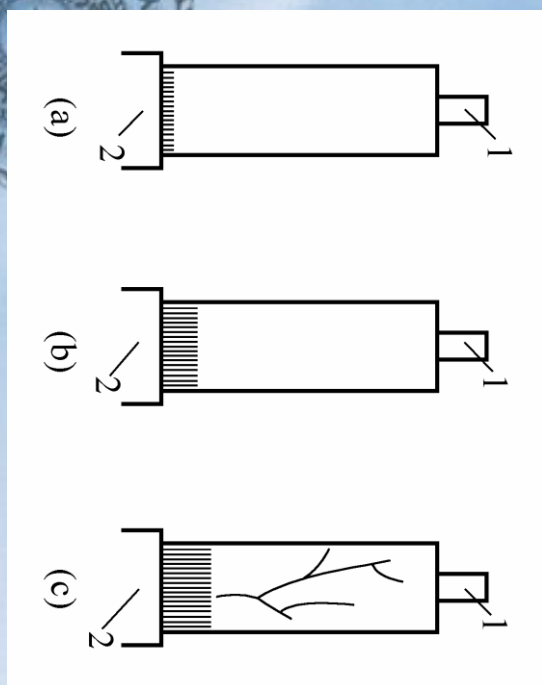


图3-8 工频电压作用下沿面放电发展过程示意图

- (a) 电晕放电
- (b) 细线状辉光放电
- (c) 滑闪放电

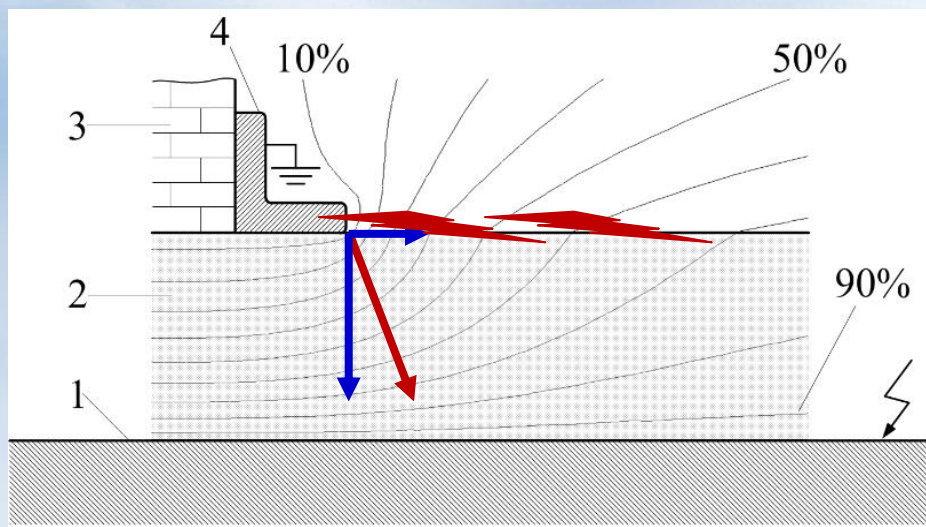


图3-9 穿墙套管电场分布示意图

- 1—高压导杆；2—电介质；
- 3—墙体；4—接地法兰

见滑闪放电视频

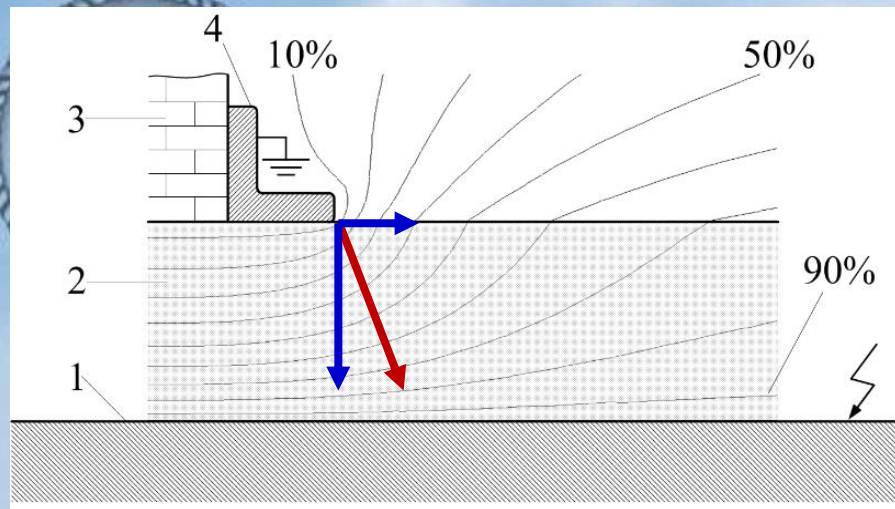


图3-9 穿墙套管电场分布示意图

接地法兰外的沿面场强最高！

滑闪放电的条件：

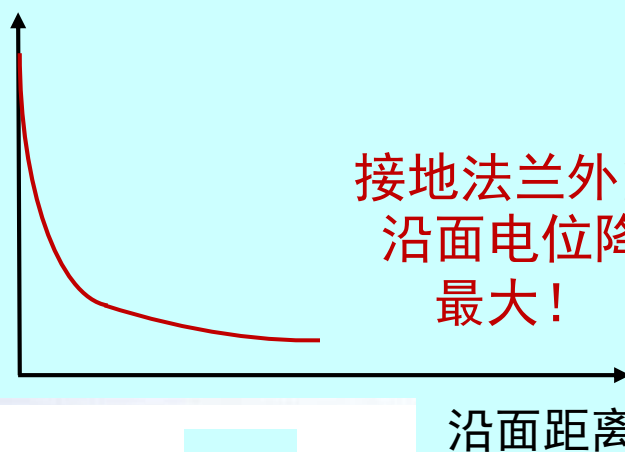
电场有足够的垂直分量和水平分量
电压是交变的

理解滑闪放电现象的关键：

法兰外径向电容电流 i_c 与沿面电阻电流 i_r 之比

沿套管表面电位/电场分布示意

沿面
电位
降



接地法兰外的
沿面电位降
最大！

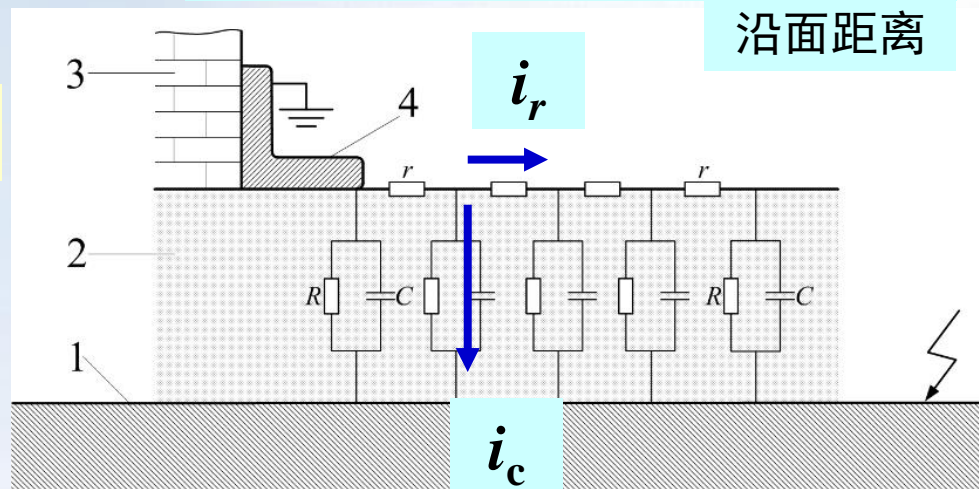


图3-10 穿墙套管等效电路

1—高压导杆；2—电介质；
3—墙体；4—接地法兰

滑闪放电的起始电压 U_0 和各参数的关系

$$U_0 = \frac{E_0}{\sqrt{\omega C_0 \rho_s}}$$

E_0 : 滑闪放电的起始场强;

ω : 电压角频率;

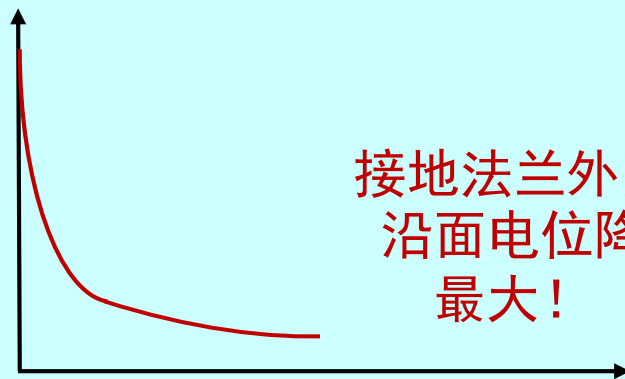
C_0 : 比表面电容; ρ_s : 表面电阻率。

比表面电容即单位面积介质表面与另一电极间的电容值

$$C_0 = \frac{\epsilon_r}{4\pi \times 9 \times 10^{11} \times r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

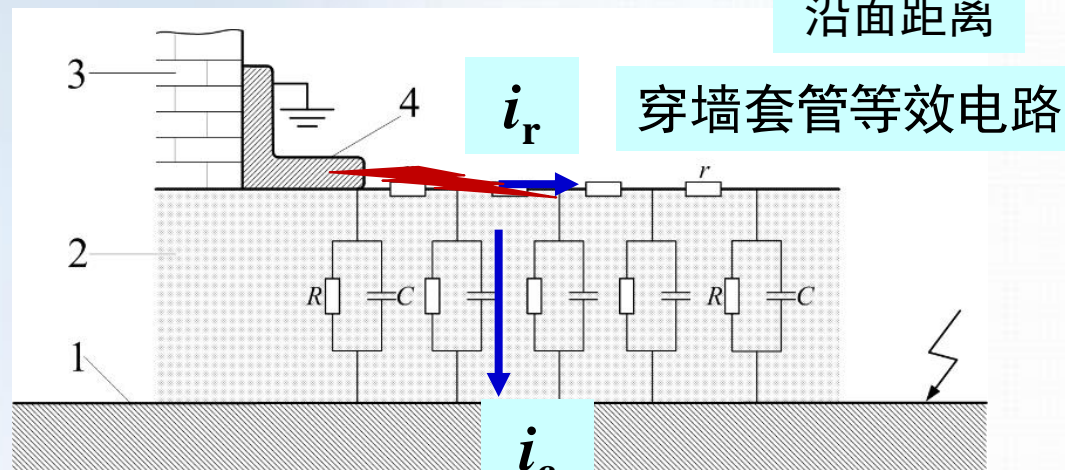
沿套管表面电场分布示意

沿面
场强



接地法兰外的
沿面电位降
最大!

沿面距离



滑闪放电的条件: 电场有足够的垂直分量和水平分量, 电压是交变的。

影响滑闪放电电压的因素:

电压频率、表面电阻率、绝缘厚度、介电常数、沿面距离?

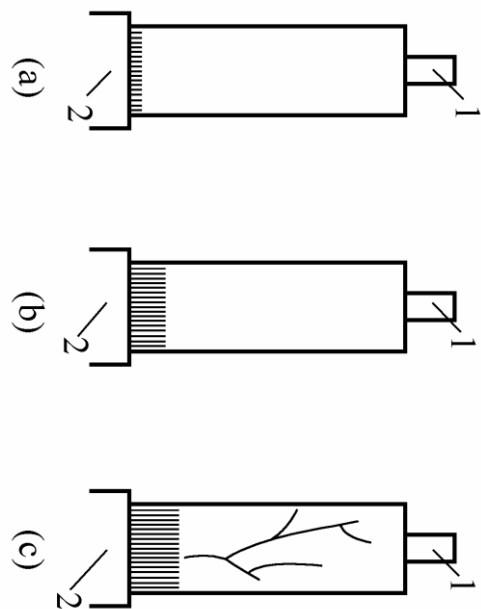


图3-8 工频电压作用下沿面放电发展过程示意图

- (a) 电晕放电
- (b) 细线状辉光放电
- (c) 滑闪放电

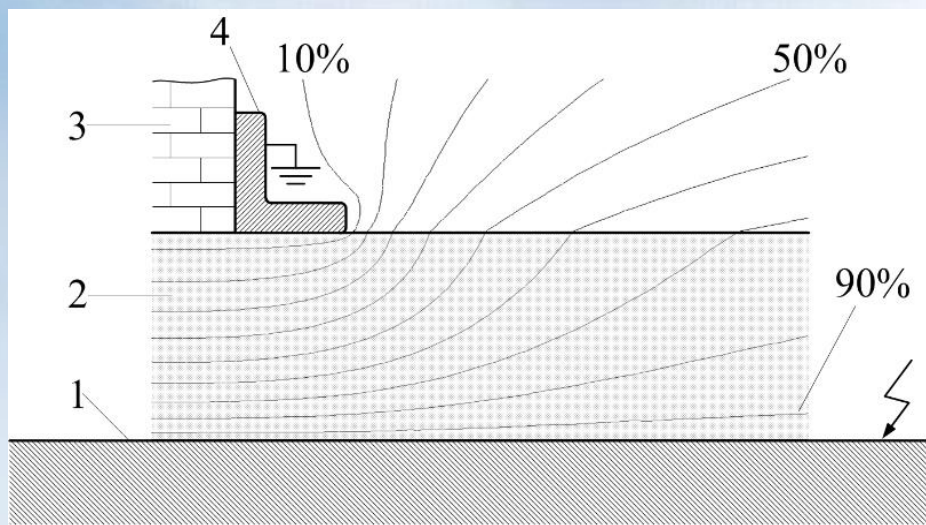


图3-9 穿墙套管电场分布示意图

- 1—高压导杆； 2—电介质；
- 3—墙体； 4—接地法兰

再想想滑闪放电视频

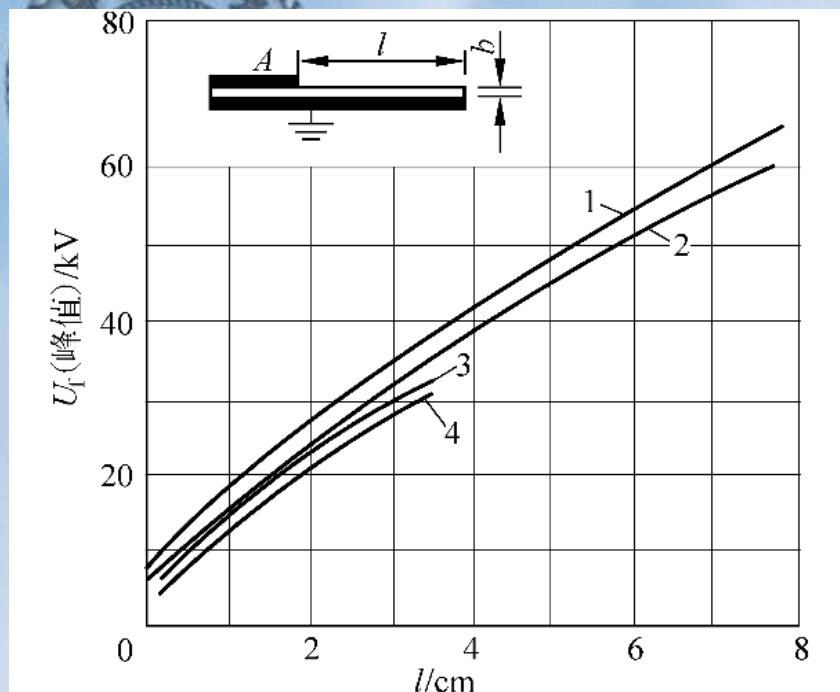


图3-11胶纸板的直流沿面闪络电压与闪络距离的关系

1, 3— 电极A为正；1, 2— $b = 4\text{mm}$ ；
2, 4— 电极A为负；3, 4— $b = 1\text{mm}$

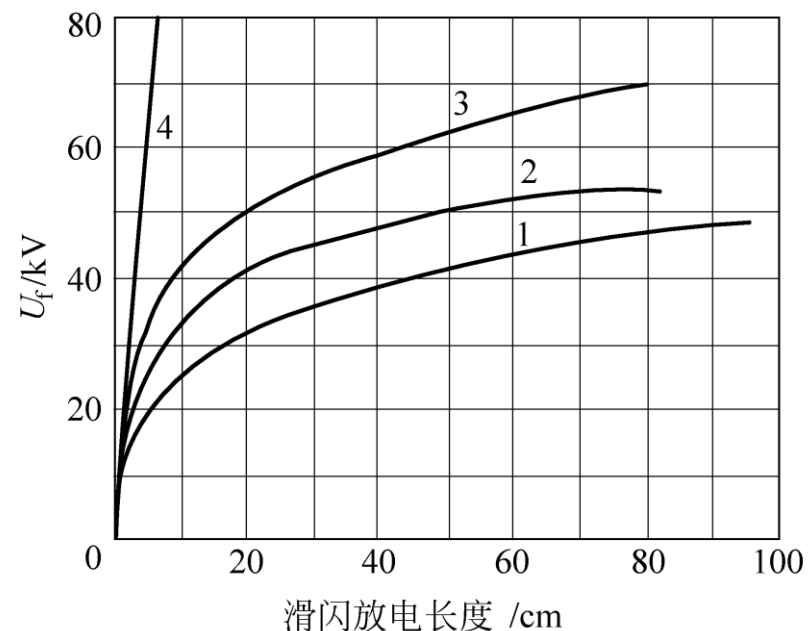


图3-12 雷电冲击电压下沿玻璃管表面滑闪放电长度与电压的关系

玻璃管内、外径 ϕ_1/ϕ_2 (cm)为：1—0.85/0.97；
2—0.63/0.90；3—0.60/1.01；4—空气间隙击穿电压

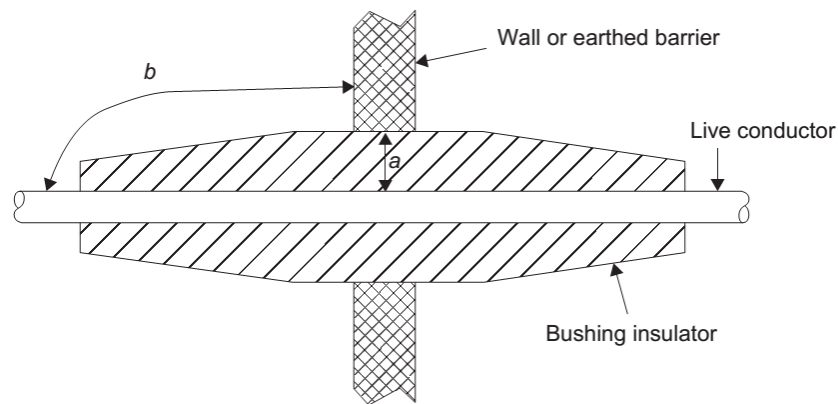


Figure 12.1 Non-condenser bushing

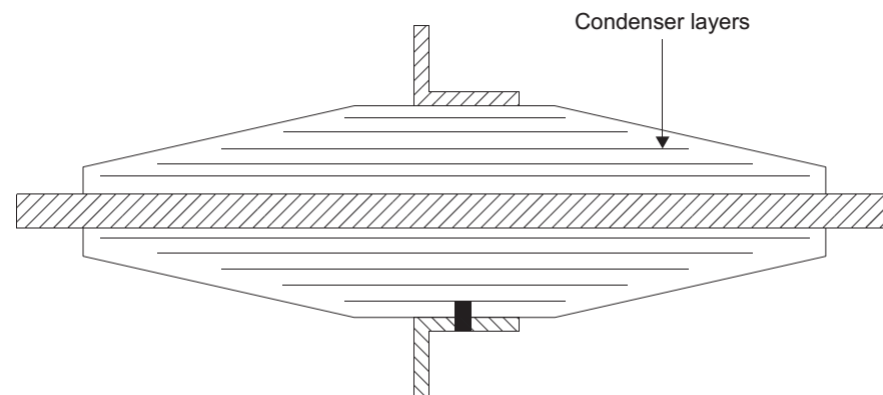


Figure 12.4 Condenser bushing

无电容屏

有电容屏

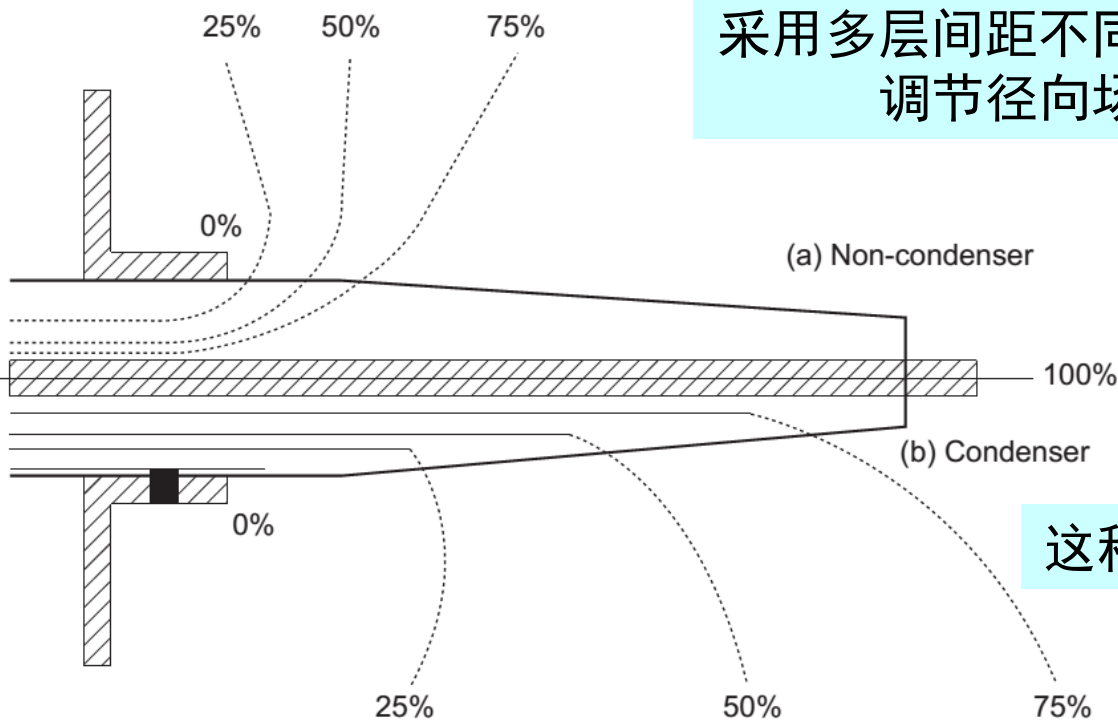


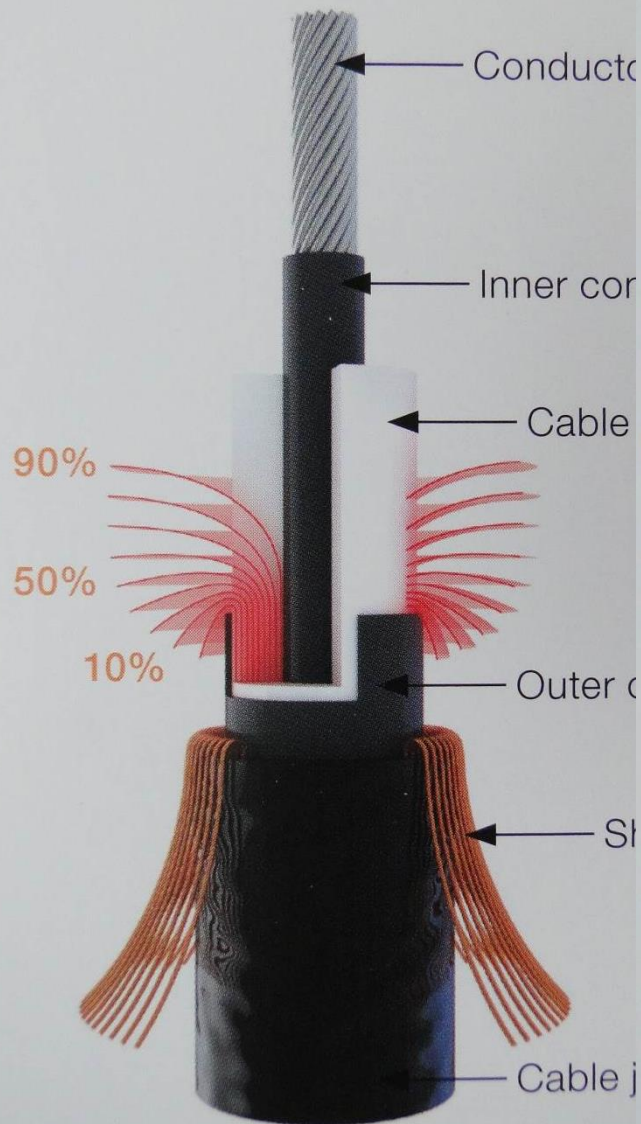
Figure 12.5 Field distribution in non-condenser and condenser bushings

采用多层间距不同、长度不同的电容屏
调节径向场强和沿面场强

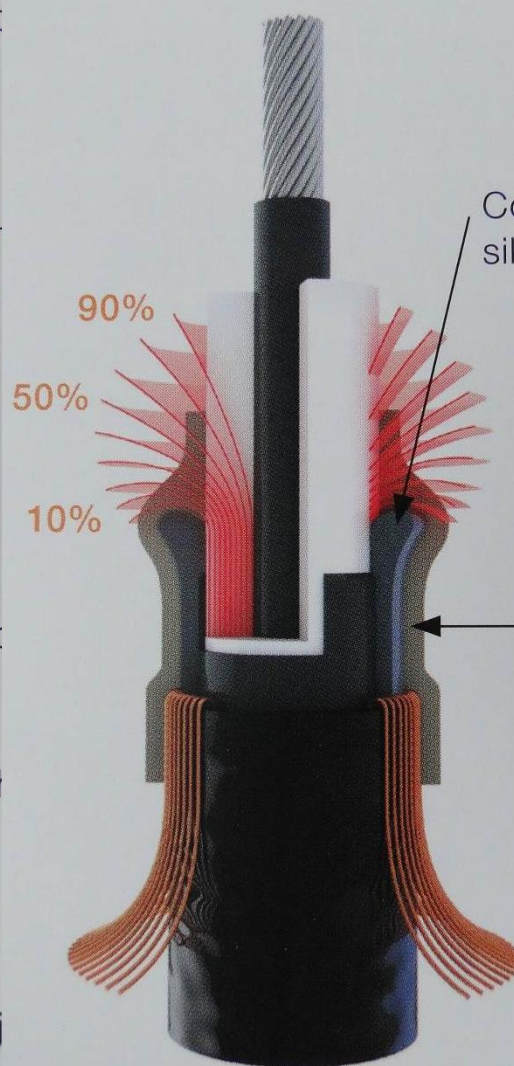
这种套管又称电容式套管

电缆终端还可以采用特定形状的半导体“应力锥”控制场强

Without field control



Capacitive field control



Refractive field control



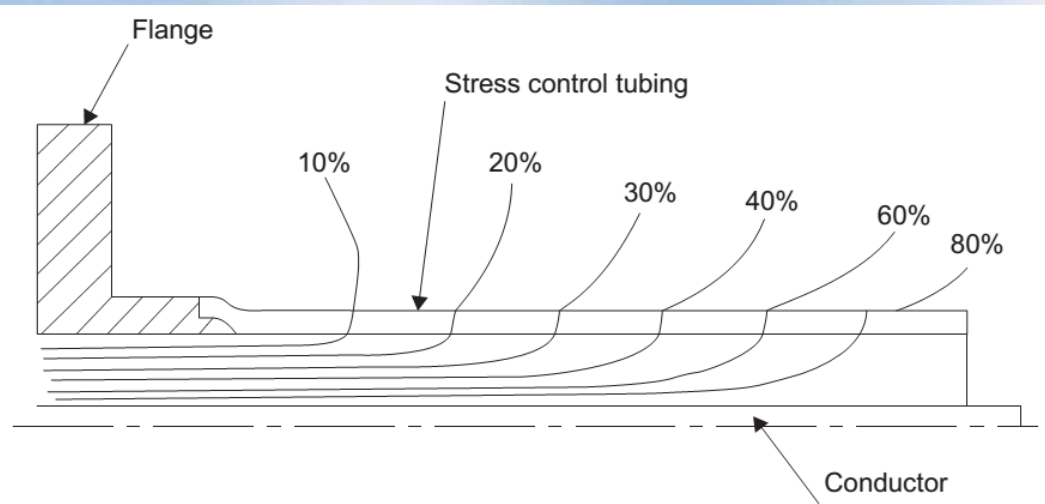


Figure 12.3 Stress control using heat-shrinkable stress control layer

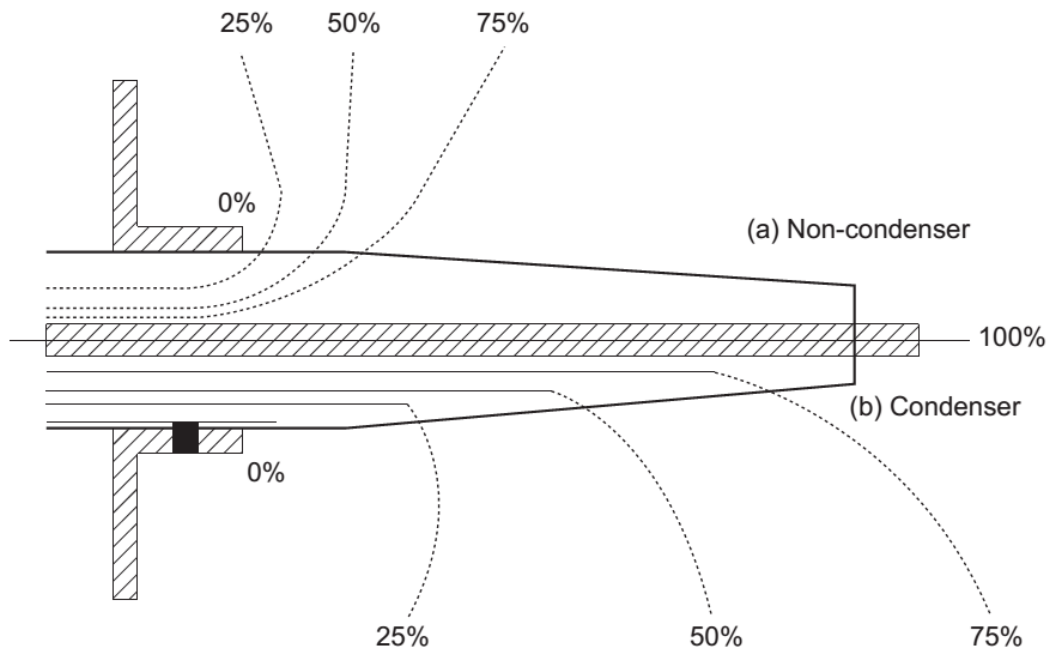


Figure 12.5 Field distribution in non-condenser and condenser bushings



Figure 4.26 Photographs of bushing (courtesy Micafil, Switzerland).
(a) Wall bushing, outdoor–indoor, rated 123 kV/1250 A. (b) Transformer bushing with ‘dry’ insulation, rated 170 kV a.c./630 A, BIL 750 kV



第3章 高压外绝缘及沿面放电

3.1 大气条件对空气间隙放电的影响

3.2 高压外绝缘及高压绝缘子

3.3 绝缘子的沿面放电（清洁干燥表面的放电）

3.4 绝缘子的雨中放电

3.5 绝缘子的污秽放电

往届同学的难点：
从简化的理论模型
到复杂的工程实际

清洁表面的电场、非清洁
表面的电路或场路混合对
放电起始的影响

本章核心概念：

大气条件修正、高压绝缘子、外绝缘、沿面放电、滑闪放电、
污秽放电、憎水性迁移、硅橡胶有机外绝缘

3.4 绝缘子的雨中放电

线路悬式绝缘子在标准雨水电导率
(20°C时100Ωm)和标准雨量(1~2mm/min)
下,雨闪与干闪电压之如下:

雷电冲击电压:

$$U_{\text{雨闪}} = (0.9 \sim 0.95) U_{\text{干闪}}$$

一分钟工频电压:

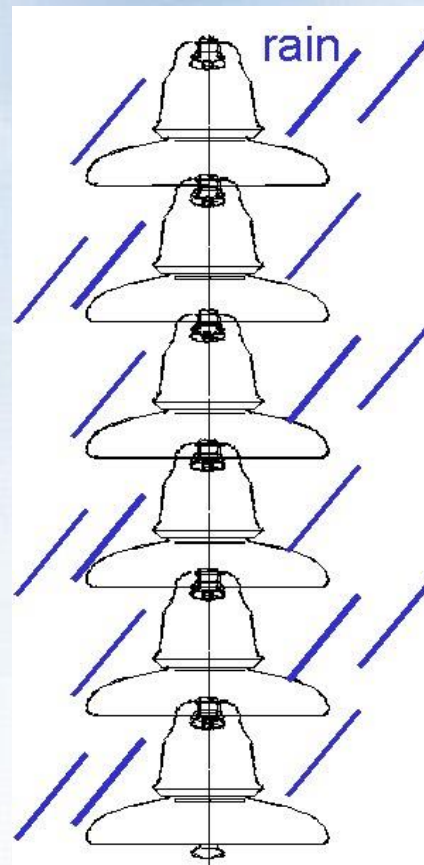
$$U_{\text{雨闪}} = (0.50 \sim 0.72) U_{\text{干闪}}$$

一分钟直流电压:

$$U_{\text{雨闪}} = (0.36 \sim 0.50) U_{\text{干闪}}$$

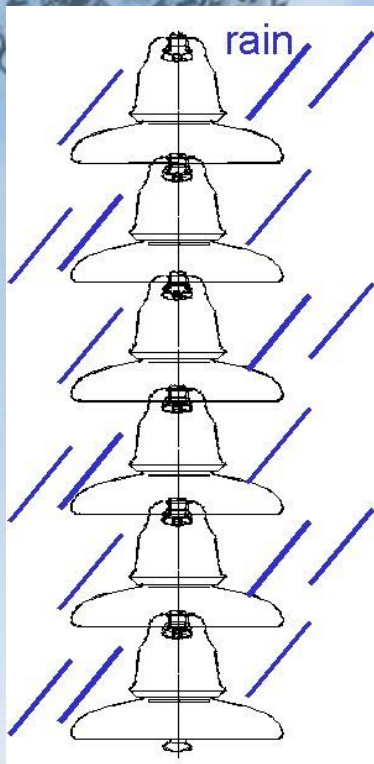
绝缘子的交、直流湿闪电压大幅度下降!

绝缘子的雨闪性能受哪些因素影响?



淋雨是户外绝缘子常见的情况
绝缘子的湿耐受电压必须高于
运行电压,并有足够裕度。
绝缘子伞裙的重要作用之一!

绝缘子的人工淋雨（湿闪）试验方法



模拟雨水的标准电阻率：

$$(100 \pm 15) \Omega \cdot \text{m}$$

降雨方向： $\approx 45^\circ$

降雨量：水平1.0-2.0mm/min

垂直1.0-2.0mm/min

预淋时间：15min

湿耐受时间：1min

大气修正：仅空气密度修正

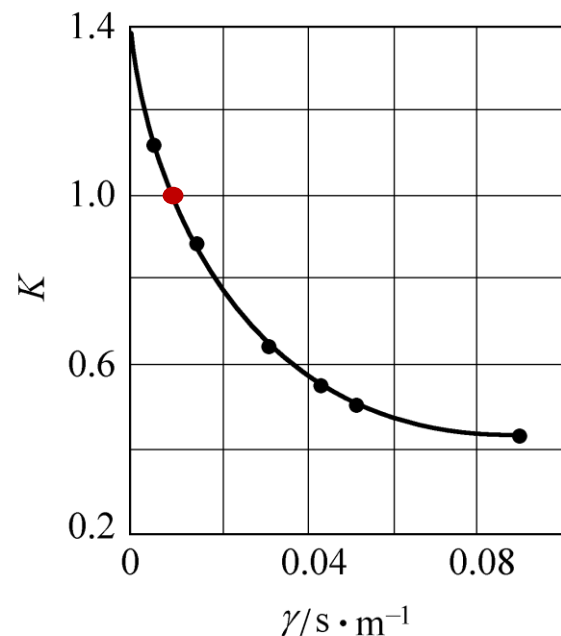


图3-19 雨水电导率
对雨闪电压的影响

实现大范围内符合要求的均匀降雨不容易
特高压绝缘子的湿闪试验难度大

提高湿闪电压的措施：

伞形参数、憎水性表面、大尺寸隔雨伞

取雨水电导率为 $10^{-4} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$
时的闪络电压为1.0