



高电压技术教研室
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

《高电压技术》

第二章 气体击穿的理论分析和 气体中的击穿现象

汲胜昌 祝令瑜

2021年03-05月



目 录



1

绝缘的基本概念

2

均匀电场中的气体击穿

3

不均匀电场中的气体击穿

4

气体击穿强度

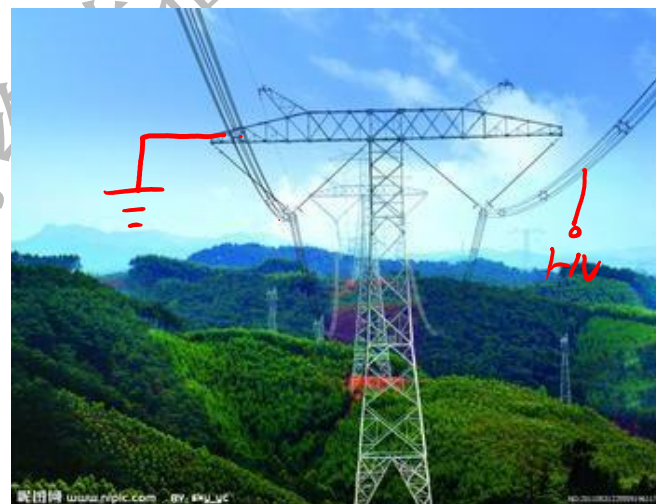


1 绝缘的基本概念

什么是绝缘？

- 电力系统中的主要材料
 - 导体
 - 绝缘材料
- 绝缘的概念
 - 将电位不等的导体分开。
 - 电位差：stress。
 - 能分开的电位差：strength。

半导体



1 绝缘的基本概念

绝缘介质：气体绝缘



SF₆
Greenhouse
gas

극저온
SF₆ 증기
기체



1 绝缘的基本概念

除了气体（包括真空）外，电力设备中使用的绝缘介质还包括：

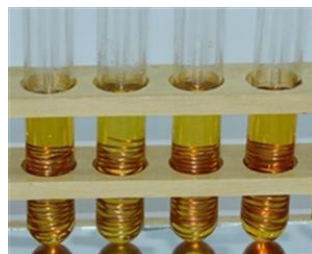
➤ 固体

环氧树脂、瓷、玻璃、硅橡胶、XLPE、绝缘纸等



➤ 液体

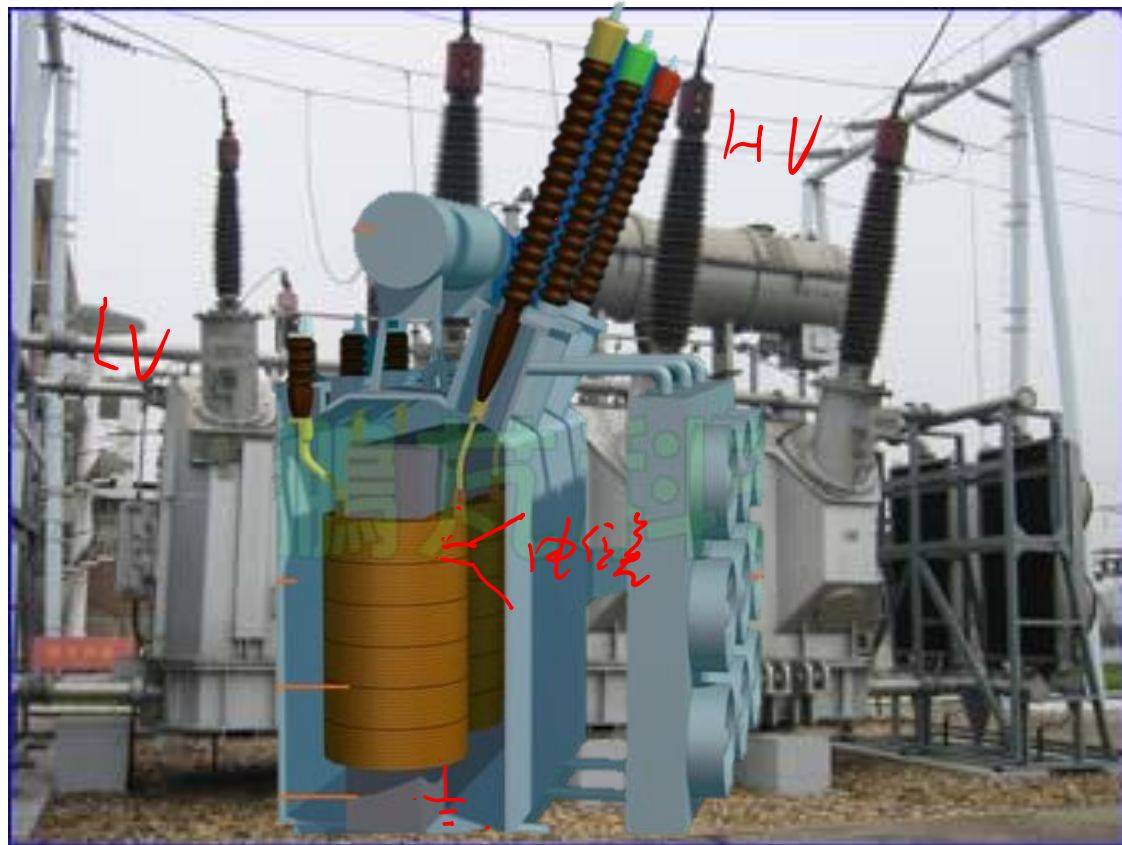
变压器油、电容器油、植物油等



C101 b8T

1 绝缘的基本概念

什么是绝缘?



电力变压器
Power Transformer

• 常用绝缘概念

- 内绝缘
- 外绝缘
- 主绝缘
- 纵绝缘



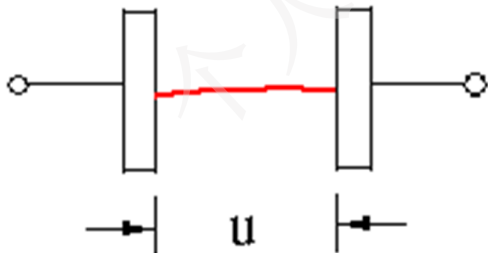
1 绝缘的基本概念

放电、击穿与闪络

- 绝缘介质中流通电流的各种形式统称为放电。
- 放电包括局部放电和贯穿性放电(击穿和闪络)。

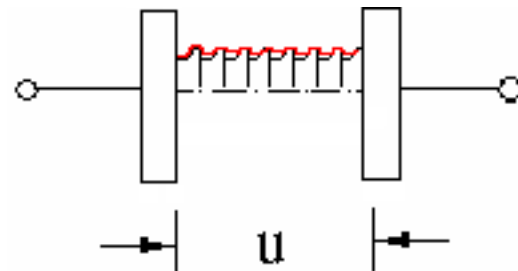
击穿breakdown

- 当 $u > u_b$, 绝缘在整体上变为良导电态, 称为击穿
- 击穿时最低临界电压 u_b 称为击穿电压



闪络flashover

- 当 $u > u_f$ 沿固体介质表面的贯穿放电称为(沿面) 闪络
- 闪络时最低临界电压 u_f 称为闪络电压



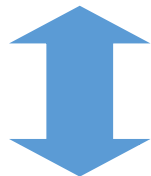


1 绝缘的基本概念

放电是带电粒子不断产生与消失的动态过程。

带电粒子的产生

- 气体电离(碰撞电离、热电离、光电离、附着过程)
- 金属电极过程(光电效应、场致发射、热发射、 γ 过程)



带电粒子的消失

- 迁移(漂移)
- 扩散和复合

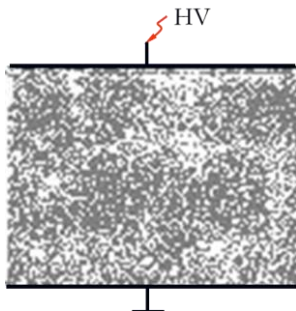


1 绝缘的基本概念

气体中不同的放电形式

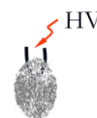
辉光放电

气压低、电源功率小、电流密度小



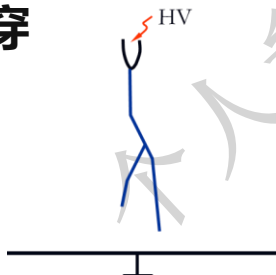
电晕放电

极不均匀电场中，局部电场最强处



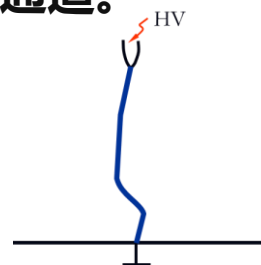
放电形式

明亮且细断续放电通道，间隙仍未被击穿



刷状放电

贯串两极明亮而细断续的放电通道。



火花放电/电弧



1 绝缘的基本概念

气体绝缘为自恢复绝缘介质

自恢复绝缘：在绝缘击穿后，当导致击穿的原因消失后，能恢复其原来绝缘性能的绝缘。如：气体（液体）

非自恢复绝缘：在绝缘击穿后，当导致击穿的原因消失后，无法恢复其原来绝缘性能的绝缘。如：固体

自恢复绝缘气体介质：

绝缘—带电质点的产生、倍增—放电—带电质点的消失—绝缘恢复

带电质点的产生 —— **电离（空间电离、表面电离）**

带电质点的消失 —— **去电离（扩散、复合）**

气体间隙中带电质点的产生方式包括

- ☒ A 碰撞电离
- ☒ B 光电离
- ☒ C 热电离
- ☒ D 正离子轰击阴极 (γ 过程)

Submit



2 均匀电场中气体的击穿

1) 巴申定律和汤逊理论 (电子崩理论)

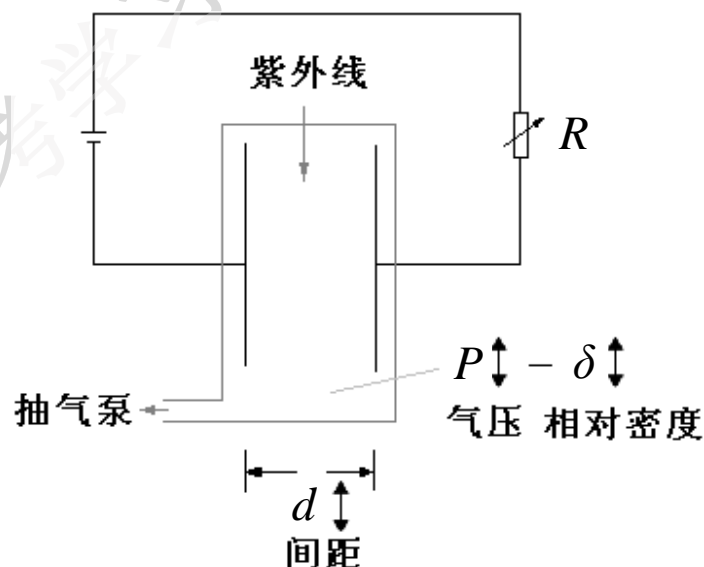
一. 两个重要实验

1. 巴申实验 (1889年)



平板电极
 d 不大

均匀电场 \longrightarrow 气隙中各处电场强度相等



1865年1月，德国。1884-1888年在斯特拉斯堡大学和柏林大学读书。1889年在Annalen der Physik发表文章论述了巴申定律（获博士学位？）。



2 均匀电场中气体的击穿

1) 巴申定律和汤逊理论 (电子崩理论)

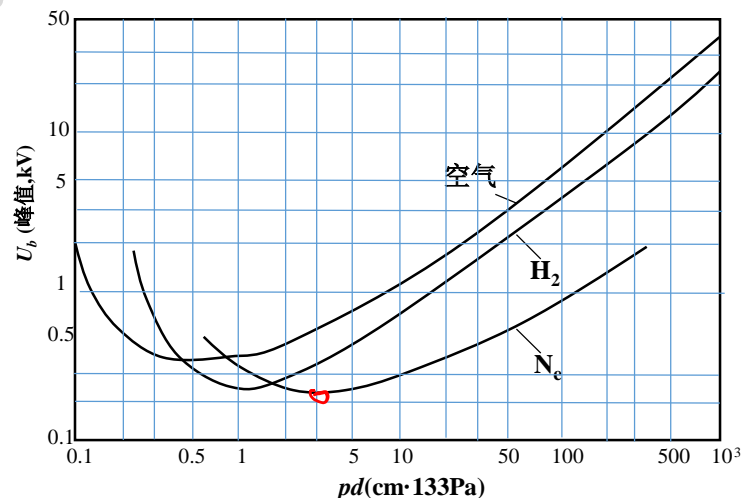
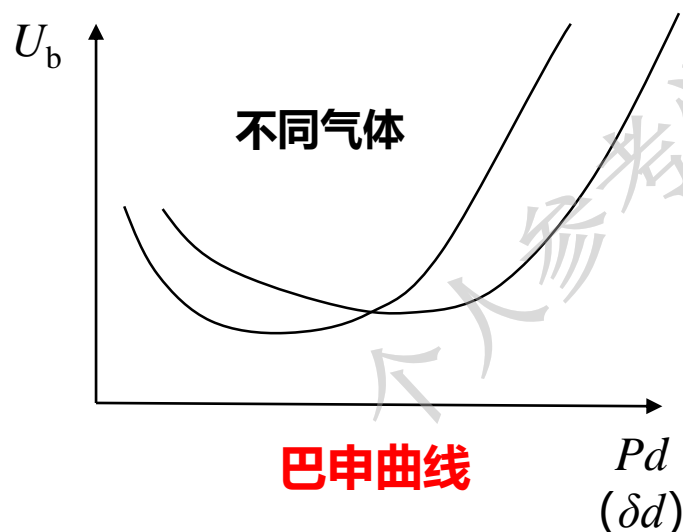
1. 巴申实验 (1889年)

经大量实验： $\begin{matrix} \updownarrow \\ P(\delta) \\ d \end{matrix}$

得出击穿电压： $U_b = f(Pd) = f(\delta d)$

巴申定律

温度不变时均匀电场中气体的击穿电压 U_b 是气体压力和电极间距离的乘积 pd 的函数，而且有极值。



U型巴申曲线：从实验中总结出来的规律，**启示？**

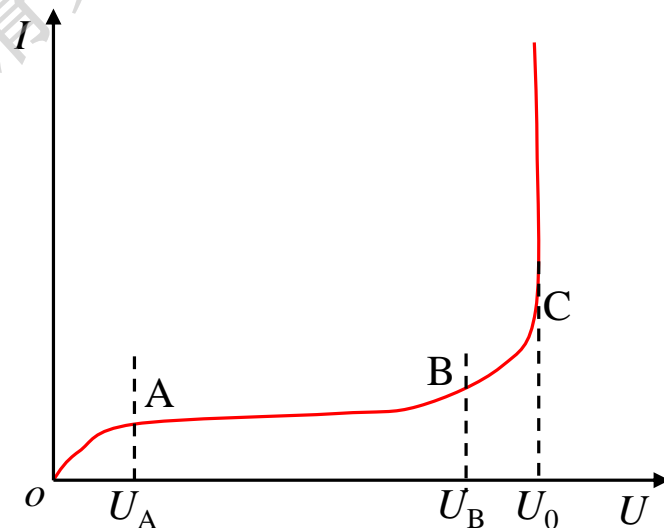
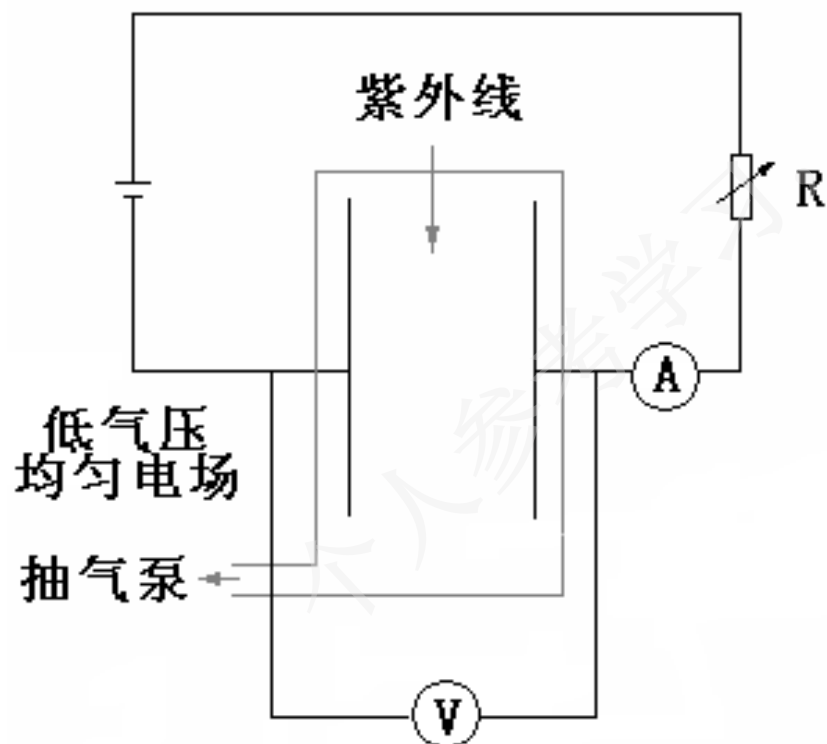


2 均匀电场中气体的击穿

1) 巴申定律和汤逊理论 (电子崩理论)

2. 汤逊实验 (1903年)

得出在直流电压下均匀电场中气隙电流和电压间的关系或电流密度和场强的关系。



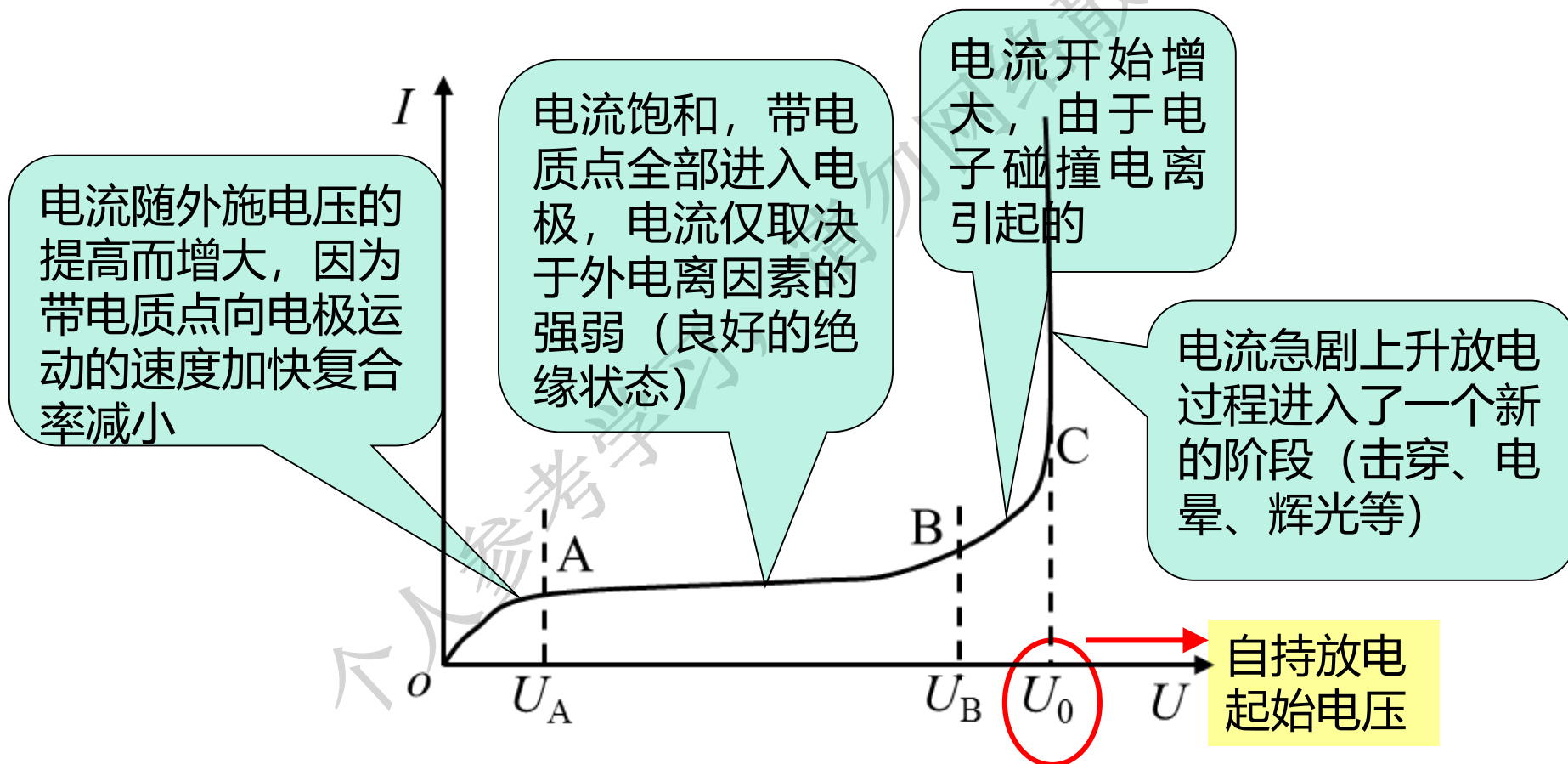
含气体间隙的回路电流与电压的关系



2 均匀电场中气体的击穿

1) 巴申定律和汤逊理论 (电子崩理论)

二. 对 U - I 曲线的解释总结





2 均匀电场中气体的击穿

1) 巴申定律和汤逊理论 (电子崩理论)

三. pd 值较小, 汤逊理论 (电子崩理论)

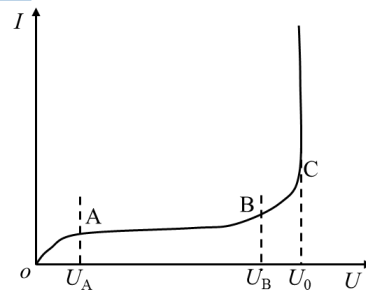
——电子崩发展的规律和自持放电的条件

为了分析引入: **电子倍增的过程—— α 过程**

电离系数 α : 一个电子沿电场方向行经单位长度, 平均发生的碰撞电离次数。

假定: 每次碰撞电离只产生一个电子和一个正离子

意义: 一个电子在单位长度行程内新电离出的电子数或正离子数。



正离子轰击阴极产生二次电子的过程—— γ 过程

- **正离子的形成:** 电子的碰撞电离除了引起电子增殖之外, 还造成正离子。
- **正离子在间隙中造成的空间电离过程不具有显著的作用。**
 - 自由行程比电子的要小得多
 - 分子发生弹性碰撞时容易损失掉从电场中获得的动能
- **γ 过程:** 但是, 大量正离子轰击阴极, 以及光子对阴极的照射释放出的 γ 电子对放电有显著的影响。



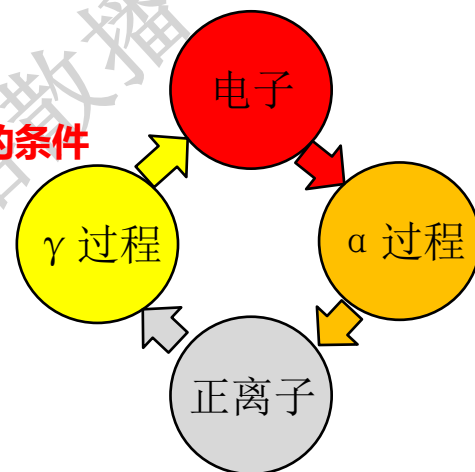
2 均匀电场中气体的击穿

1) 巴申定律和汤逊理论 (电子崩理论)

三. pd 值较小, 汤逊理论 (电子崩理论)

——电子崩发展的规律和自持放电的条件

α 过程和 γ 过程同时引起的电流



自持放电条件及其物理意义, 总结:

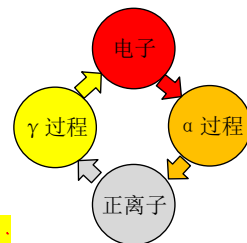
由于外电场不断增强, 阴极发射出的一个电子, 在间隙中引起了如此强烈的碰撞电离(α 过程), 以致电离产生的全部正离子到达阴极中和后, 又能由 γ 过程在阴极上重新释放出至少一个电子。



2 均匀电场中气体的击穿

1) 巴申定律和汤逊理论 (电子崩理论)

三. pd 值较小, 汤逊理论 (电子崩理论)



4. 理论推导 α 过程和 γ 过程同时引起电流

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{-U_i/E\lambda} \quad \lambda \propto \frac{T}{p}$$

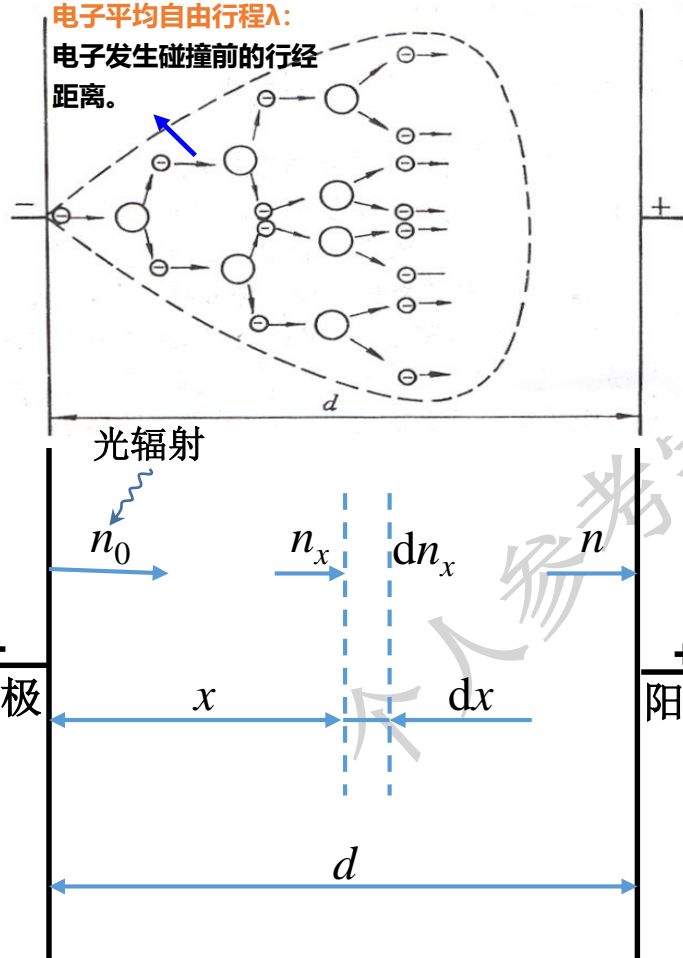
Handwritten notes: 电子平均自由程, 碰撞电离系数

$$\alpha = Ape^{-Bp/E}$$

A, B 与气体种类及温度相关

电子平均自由行程 λ :

电子发生碰撞前的行经距离。



碰撞电离系数 α : 一个电子沿电力线方向行经单位长度时平均发生的碰撞电离次数。若碰撞电离系数 α 已知, 可以计算出电子行经一定距离时对应的电子数增长情况。

n_x 个电子行进 dx 后又会产生 dn 个新电子, 即:

$$dn = n_x \alpha dx \quad \Rightarrow \quad \frac{dn}{n_x} = \alpha dx$$

$$n_x = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx} \quad \Rightarrow \quad n_x = n_0 e^{\alpha x}$$

因此, 到达阳极的电子数为: $n = n_0 e^{\alpha d}$

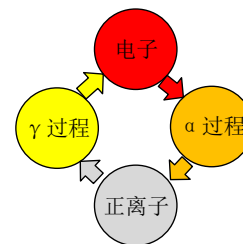
新增电子数为: $\Delta n = n - n_0 = n_0 (e^{\alpha d} - 1)$

到达阴极的正离子数与新增电子数相等。

如 I_0 为外电离因素 (n_0) 引起的初始光电流, 则回路电流为: $I = I_0 e^{\alpha d}$



2 均匀电场中气体的击穿



1) 巴申定律和汤逊理论 (电子崩理论)

三. pd 值较小, 汤逊理论 (电子崩理论)

γ : 折算到每个碰撞阴极表面的正离子, 阴极金属平均释放出的自由电子数。

到达阴极的正离子数与新增电子数相等。 $\Delta n = n - n_0 = n_0(e^{\alpha d} - 1)$

当1个初始电子到达阳极时, 电子崩中的正离子数为: $\Delta n = e^{\alpha d} - 1$

这些正离子到达阴极时, 将产生的二次电子数为: $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$

根据汤逊自持放电理论, 如果二次电子数等于1 (或 > 1), 则放电就可以在无外电离因素的情况下维持下去, 即:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad \text{自持放电}$$

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln\left[\frac{Apd}{\ln\frac{1}{\gamma}}\right]}$$

$$\alpha = Ape^{-Bp/E}$$

巴申定律

$$E = U/d$$

击穿电压和那些因素有关? $f(pd)$

U_b \checkmark $\rightarrow pd$



2 均匀电场中气体的击穿

2) pd 值较大时, 流注理论

汤逊放电理论的适用范围:

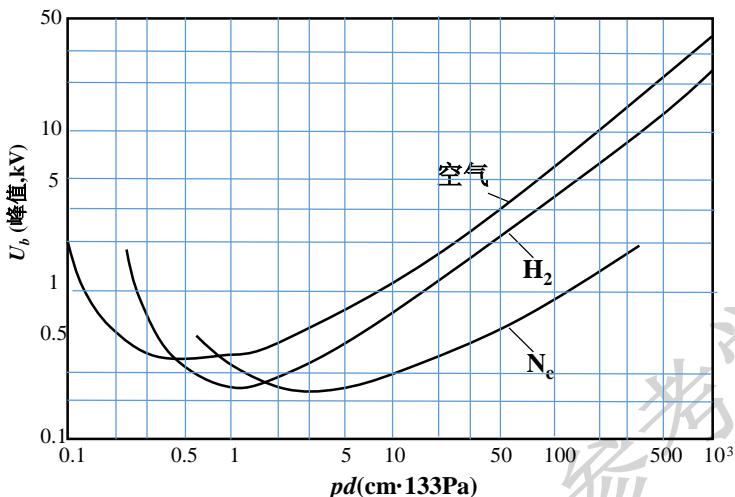
(对于空气来说, pd 值的分界线大约为 $< 260 \text{ kPa} \cdot \text{mm}$)

巴申曲线左支:

pd 值极小时, 碰撞电离 \downarrow , 按碰撞电离学说, U_b 应趋于无穷大 \uparrow 。但是, 在强电场作用下, 阴极会出现强场发射而导致击穿, 也即高真空下击穿的机理改变了。

巴申曲线的右支:

当 pd 值越来越大时, 在电力工程上经常接触到的是气压较高的情况(从一个大气压到数十个大气压), 间隙距离通常也很大, 在这种情况下, 电子崩将会过度发展, 形成汤逊理论无法解释的气体放电现象。





2 均匀电场中气体的击穿

2) pd 值较大时，流注理论

汤逊放电理论的适用范围

工程上更关心压力较高气体的击穿，如：大气压下

① 放电外形

汤逊理论适用情况：均匀连续

pd 值很大的情况：击穿时出现的是带有分枝的明亮细通道。

② 放电时间

若按汤逊理论，二次电子的是由正离子撞击阴极产生的自由电子。

则从施加电压到发生击穿的时间，至少应为正离子穿过间隙的时间。

然而在气压高时，实测的放电时间远小于正离子穿越间隙所需的时间。

③ 击穿电压

pd 较小时，与计算一致； pd 较大时，误差很大

④ 阴极材料的影响

pd 较小时，阴极材料有影响； pd 较大时，与阴极材料无关



2 均匀电场中气体的击穿

2) pd 值较大时, 流注理论

流注放电: 放电过程也是从电子崩开始, 当电子发展到一定阶段后产生电离特强、发展速度更快的新的放电区。

流注理论认为二次电子来源于**光电离**。

1. 流注的形成条件

1) 电子崩发展到足够的程度。原电场明显畸变, 加强了崩头及崩尾处的电场。

2) 电子崩中电荷密度大, 复合频繁, 放射的光子在强电场区易引起光电离。

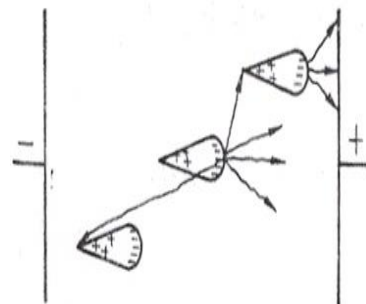
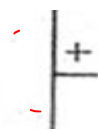
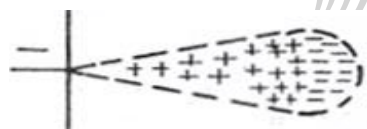


2 均匀电场中气体的击穿

2) pd 值较大时, 流注理论

流注理论放电自持机制:

- 电子碰撞电离 → 阶段: 电子崩阶段
特点: 圆锥形, 发展速度与计算吻合较好
- 空间光电离 → 阶段: 流注阶段
特点: 速度快, 具有分支, 主流注会抑制分流注, 从阳极发展到阴极 (正流注)。
- 空间电荷畸变电场 负流注: 间隙上电压比击穿电压高得多。
电子崩迅速转化为流注, 向阳极发展。

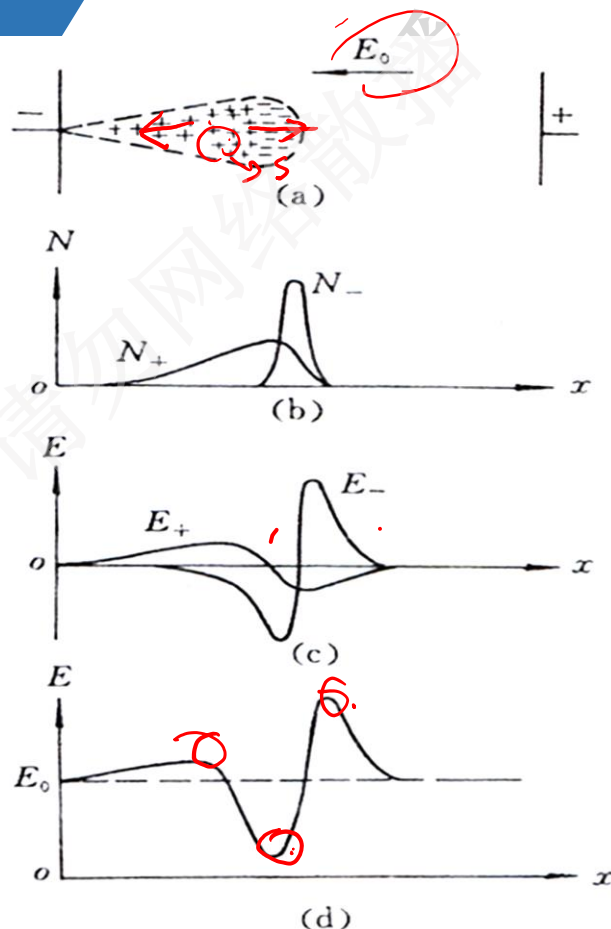




2 均匀电场中气体的击穿

2) pd 值较大时, 流注理论

空间电荷畸变电场



(a) 电子崩示意图 (b) 崩中空间电荷浓度分布

(c) 空间电荷的电场 (d) 合成电场



2 均匀电场中气体的击穿

2) pd 值较大时, 流注理论

空间光电离

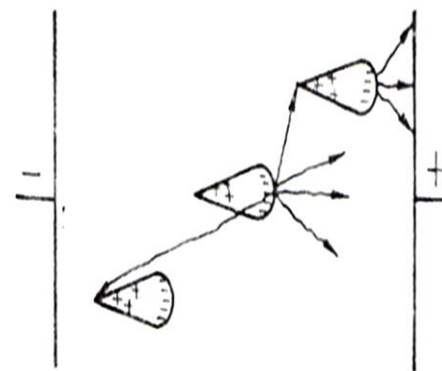
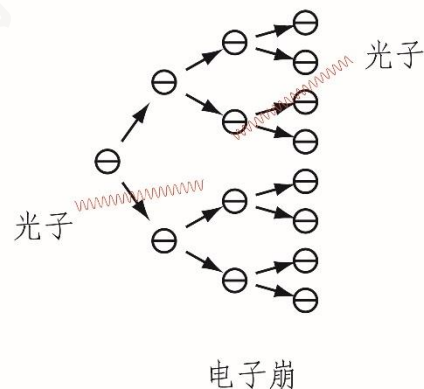
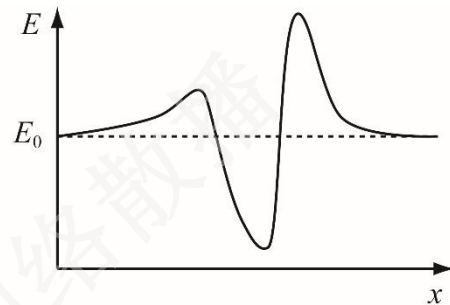
- 崩头:
激励——恢复正常
- 电子崩中部:
电离——复合



光子



二次电子崩





2 均匀电场中气体的击穿

2) pd 值较大时, 流注理论

流注自持放电条件

流注自持放电条件: 初始电子**崩头部电荷**必须达到**一定数量**才能使原电场畸变和造成足够的空间光电离。

$$\gamma e^{\alpha d} = 1 \quad \Rightarrow \quad \alpha d = \ln \frac{1}{\gamma}$$

$e^{\alpha d} = \text{常数} = \frac{1}{\gamma}$

根据实验结果得到空气中流注的自持放电条件: $\alpha d = \ln \frac{1}{\gamma} \approx 20$

这说明初始崩头部电子数要达到 $e^{\alpha d} > 10^8$ 时放电才转入自持。

对于长度为厘米级的平板间隙, 在标准大气条件下, 空气击穿场强约为: 30kV/cm (电压峰值) 均匀电场。



2 均匀电场中气体的击穿

3) 电负性气体的情况

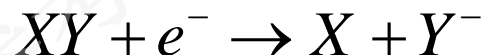
特殊的碰撞事件：碰撞未必一定引起电离外，且还有可能会“附着”。这是一种特殊的“碰瓷事件”。

附着过程：当电子和电负性气体分子碰撞时，非但没有电离出新电子，反而是碰撞电子附着于分子，形成负离子。

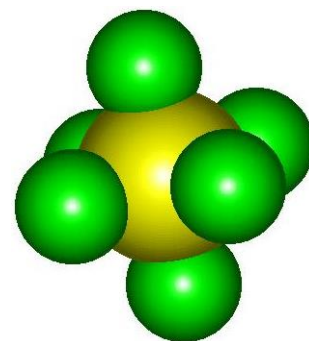
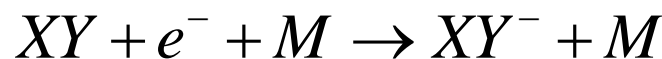
附着



解离附着



三体碰撞



SF₆

【问题】

负离子代替电子带来什么影响？典型的电负性气体SF₆气体。



2 均匀电场中气体的击穿

3) 电负性气体的情况

对于强电负性气体，还应考虑其电子附着过程（ η 过程）。

η 系数：一个电子沿电力线方向行经1cm时平均发生的电子附着次数。

在电负性气体中有效的碰撞电离数： $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$

在均匀电场中达到阳极的电子数为： $n = n_0 e^{(\alpha - \eta)d}$

强电负性气体的工程应用属于流注放电的范畴。 SF_6 0.4MPa/kV

由于强电负性气体中 $\bar{\alpha} < \alpha$ ，所以其自持放电场强比非电负性气体高得多。

以 SF_6 气体为例，在101.3kPa，20°C的条件下，均匀电场中击穿场强为 $E_b \approx 89 \text{ kV/cm}$ ，约为同样条件的空气间隙的击穿场强的13倍。
30 kV/cm

再例如：水蒸气也为弱电负性气体，因此在一定条件下湿度大时气体强度提高。



3 不均匀电场中气体击穿

1) 均匀、稍不均匀和极不均匀电场

电场不均匀系数: $f = \frac{E_{\max}}{E_a}$

$$E_a = \frac{U}{d}$$

$f < 2$: 稍不均匀电场;

$f > 4$: 极不均匀电场。

➤ 均匀电场:

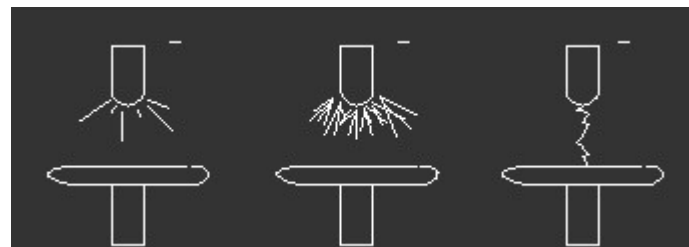
放电达到自持, 间隙就被击穿; 无极性效应

➤ 稍不均匀电场:

放电达到自持, 间隙就被击穿; 略有极性效应

➤ 极不均匀电场:

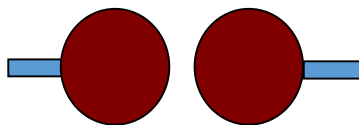
间隙被击穿前有可能存在持续稳定的电晕; 有明显极性效应





3 不均匀电场中气体击穿

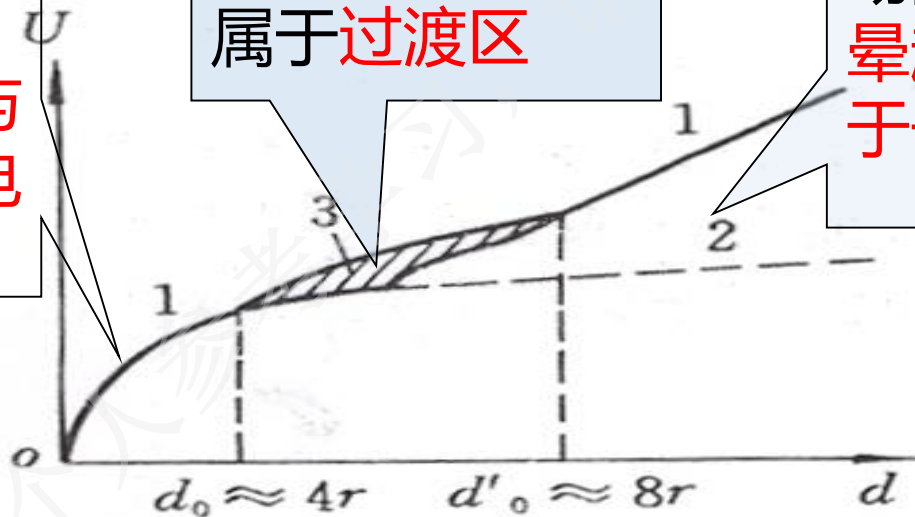
1) 均匀、稍不均匀和极不均匀电场的特征



放电具有稍不均匀场间隙的特点，**击穿电压与电晕起始电压相同**

放电过程不稳定，分散。
属于**过渡区**

放电具有极不均匀场间隙的特点，**电晕起始电压明显低于击穿电压。**



半径为 r 的球间隙的放电特性与极间距 d 的关系

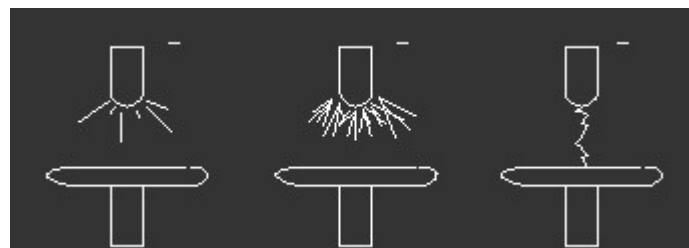


3 不均匀电场中气体击穿

1) 均匀、稍不均匀和极不均匀电场

从放电的观点来看，电场的不均匀程度可以根据能否维持电晕放电来划分

- **均匀电场：理想情况**
- **稍不均匀电场：放电达到自持，间隙被击穿，不能维持电晕**
- **极不均匀电场：间隙被击穿前有可能存在持续稳定的电晕；有明显极性效应**



电场不均匀系数： $f = \frac{E_{\max}}{E_a}$

$$E_a = \frac{U}{d}$$

$f < 2$: 稍不均匀电场;
 $f > 4$: 极不均匀电场。



3 不均匀电场中的击穿

2) 极不均匀电场中的电晕放电

一. 电晕放电现象

- 声
- 光
- 分区(电晕层、外区)

***电晕放电是一种自持放电,但不是一种贯通性的放电**





3 不均匀电场中的击穿

2) 极不均匀电场中的电晕放电

二.电晕放电危害和好处

能量损失

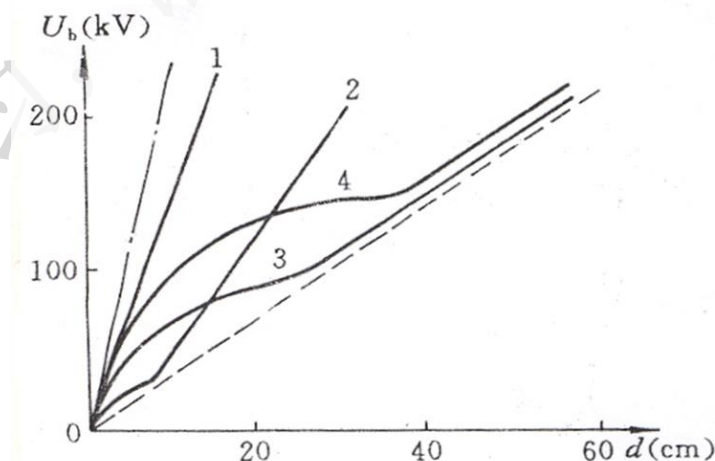
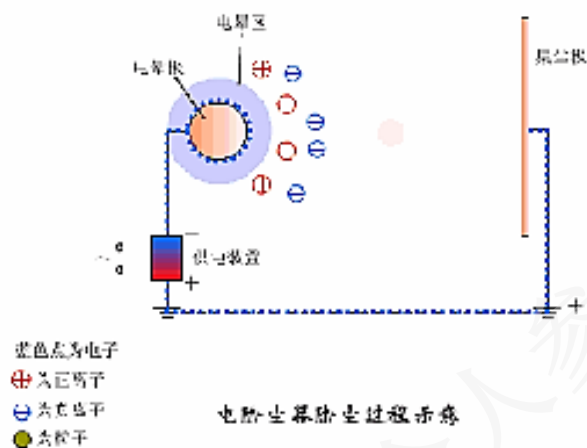
电磁干扰

等离子体化学腐蚀

电晕可降低输电线上雷电冲击电压波的幅值和陡度

电晕诱发化学反应

电晕放电除尘



导线—板电极的空气间隙击穿电压（有效值）与间隙距离的关系

1— $D=0.5\text{mm}$

2— $D=3\text{mm}$

3— $D=16\text{mm}$

4— $D=20\text{mm}$

虚线—尖—板电极间隙

点划线—均匀场间隙



3 不均匀电场中气体击穿

2) 极不均匀电场中的电晕放电

三. 电晕放电的起始场强和起始电压

电晕放电的起始电压在原理上可以根据自持放电计算。

缺点：繁复，且不精确。

实际上电晕起始电压是根据由实验总结出来的经验公式估算的。

Peek公式 平行导线

$$E_c = 30m_1m_2\delta\left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}}\right) \text{ kV/cm}$$

其中：

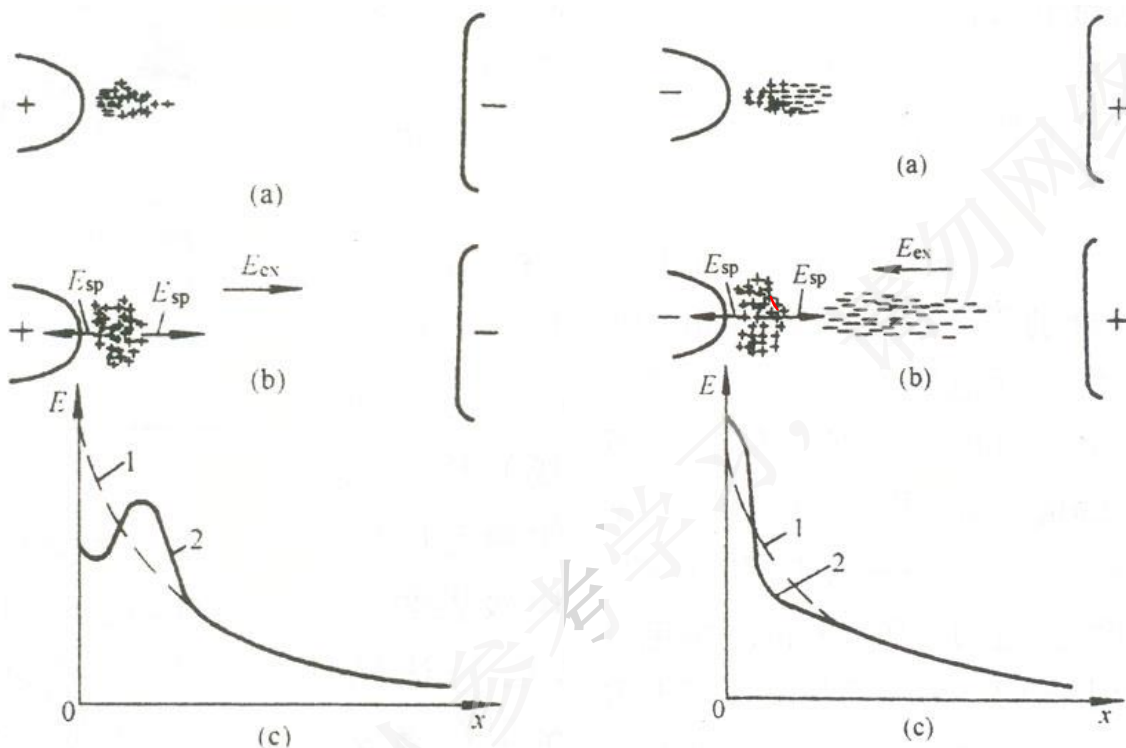
δ 是气体相对密度； m_1 表面粗糙度系数，理想光滑导线取1，绞线0.8~0.9；
好天气时 $m_2=1$ ，坏天气时 m_2 可按0.8估算。



3 不均匀电场中的击穿

3) 极不均匀电场（棒板间隙）中放电的极性效应

起晕的极性效应：空间电荷对棒板电极起晕电压的影响



电子移动快
离子移动慢

电子在外区易变
为负离子（变胖）

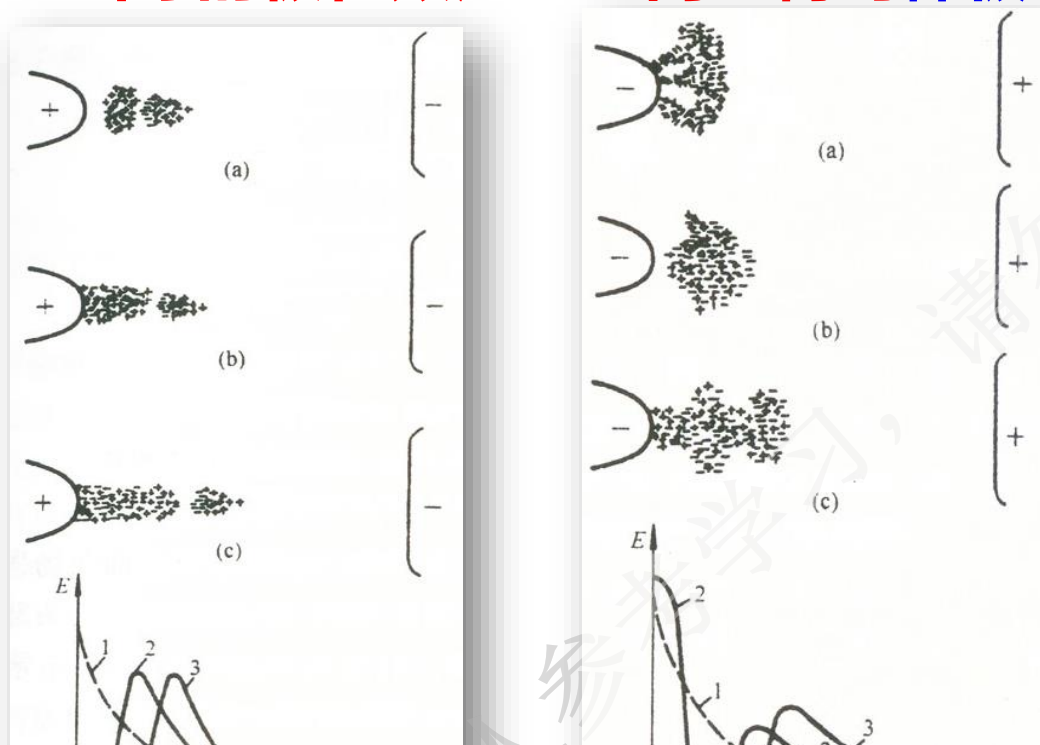
实验表明，棒-板间隙中棒为正极性时电晕起始电压比负极性时略高。



3 不均匀电场中的击穿

3) 极不均匀电场（棒板间隙）中放电的极性效应

击穿的极性效应：空间电荷对棒板电极击穿电压的影响



流注发展阶段

正极性：流注等离子体头部具有正电荷，加强头部前方电场，易于流注推进。

负极性：弥散分布的等离子体层，类似增大了棒极曲率半径，前沿电场受到削弱。

注意：对于稍不均匀电场而言，由于 $U_0=U_b$ ，即电晕起始电压等于击穿电压，所以对稍不均匀场来说，正极性棒的击穿电压比负极性高。

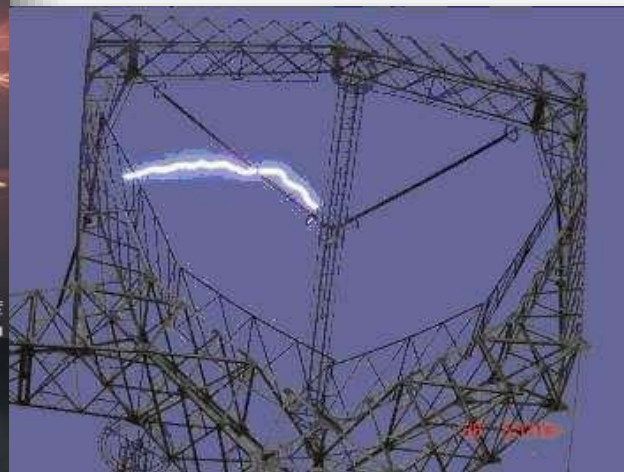
负极性下，通道的发展要困难得多，因此负极性下的击穿电压应较正极性下为高。



3 不均匀电场中的击穿

4) 长间隙放电——先导

随着输电等级的提高，工程上经常遇到长空气间隙绝缘的情况，长空气间隙的击穿与短间隙有所不同。短间隙击穿一般采用流注机理解释，而长间隙放电中，先导机理起着很重要的作用。此外，雷电也是基于先导机理的。





3 不均匀电场中的击穿

4) 长间隙放电——先导

长间隙棒-板间隙是极不均匀电场，这种间隙中，电离过程总是先从棒电极附近开始。

棒的极性不同时，空间电荷的作用是不同的，所以还存在着所谓**极性效应**。（参阅3））

长间隙棒-板间隙放电的发展过程为：

①非自持放电---②流注---③**先导**---④主放电



3 不均匀电场中的击穿

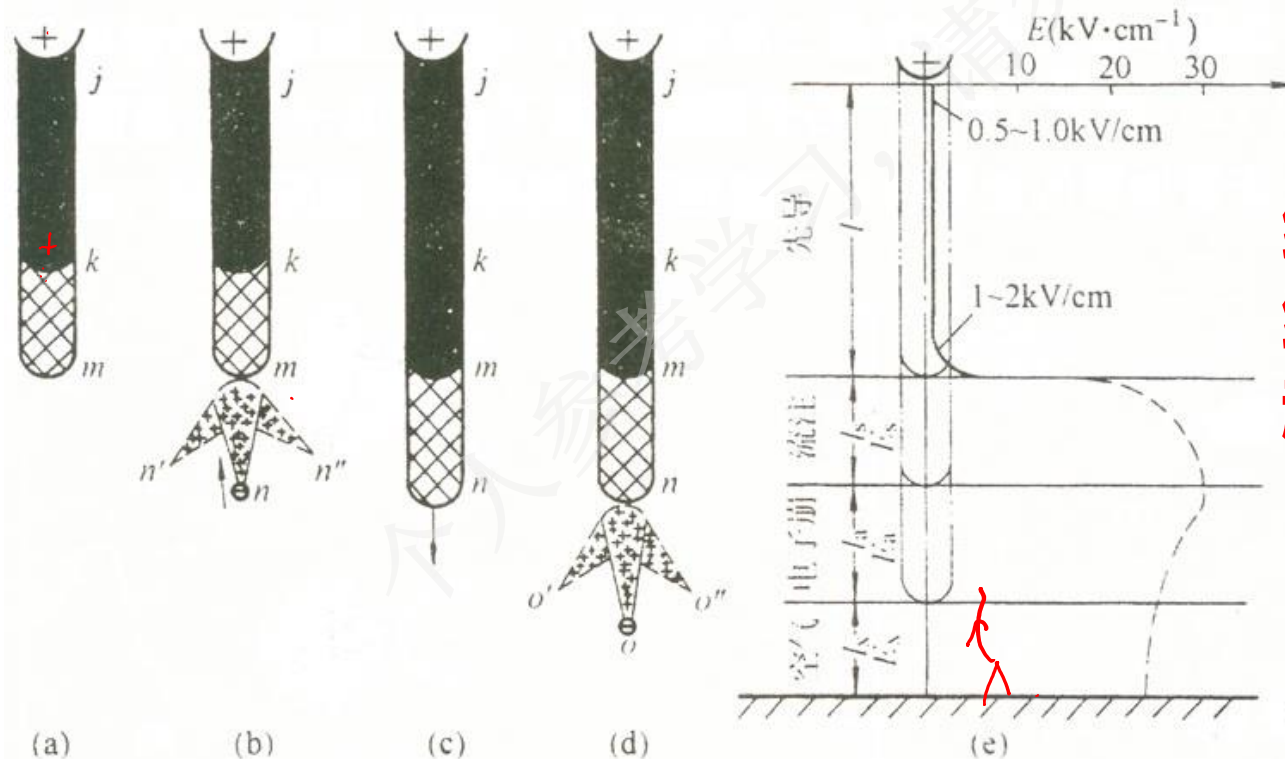
4) 长间隙放电——先导

先导放电

具有热电离过程的通道称为先导。

流注通道根部温度升高，出现热电离。

间隙中如出现先导放电阶段，则平均击穿场强降低，这也就是长空气间隙的平均击穿场强远低于短间隙的原因。

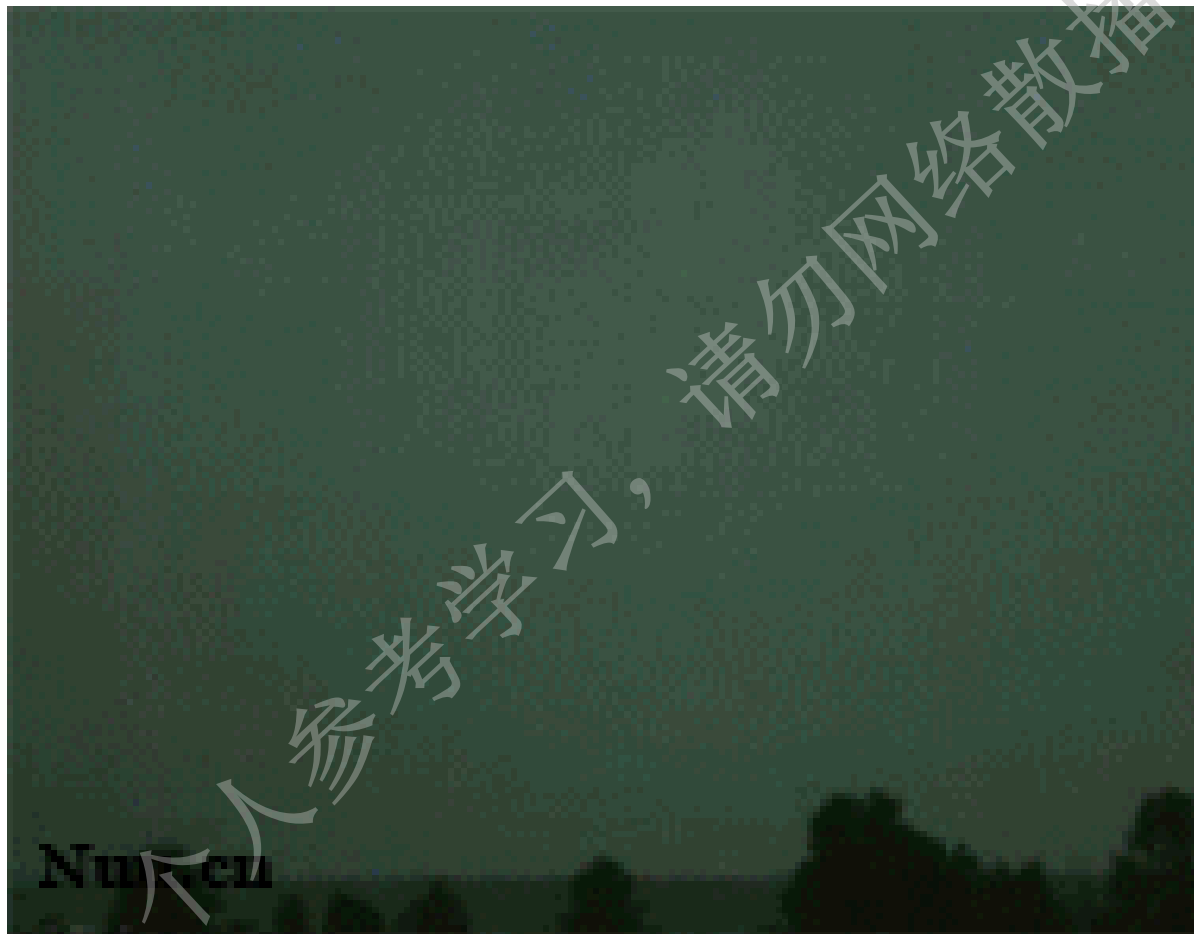


继续提高电力系统的电压等级将越来越困难。



3 极不均匀电场中的击穿

长间隙放电——先导



电晕放电，先导放电（包含电子崩和流注），主放电（也称“最后跳跃”）

1. 请画出含气体间隙的回路电流与电压的关系曲线，并进行解释。
放电 U-I 曲线
2. 请解释极不均匀电场中~~击穿~~的极性效应。*起晕、击穿*
3. 同样条件下，SF₆的击穿强度约为空气击穿强度的多少倍？主要原因是什么？

Open Question is only supported on Version 2.0 or newer.

Answer



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

本部分内容结束！

西安 2021年03月