

高电压工程学习

目录阅读

1. 电介质的电气性质
2. 电气设备绝缘实验
3. 电力系统过电压与绝缘配合

电介质的电气性质

绝缘：将电位不同的带电导体隔离，使不存在电气连接。

充当绝缘部分的电介质当两端电压过高时绝缘遭到破坏等，造成损失。

故研究电介质的电气特性

1 气体电介质的绝缘特性

空气是架空输电线和电气设备主要外部绝缘介质。电气设备用具有一定压力的气体作为绝缘介质，如气体绝缘变电站和用六氟化硫气体、压缩空气或真空作为绝缘开关，在一定电压作用下出现气体放电现象。故研究气体放电理论。

1.1 气体带电粒子的产生与消失

带电粒子的产生

气体放电：气体中的带电粒子在电场作用下做定向运动形成导通电流。一般情况下气体总是存在极少量带电粒子，只有当带电粒子数目激增，气体才会失去绝缘特性。

原子激励：由原子物理知，在外界因素（强电场、高温）情况下，吸收外界能量使得电子跃迁，原子为激励态，所需能量为激励能。

电离：由原子物理知，如果吸收能量达到某个限值，则电子完全脱离原子核舒服，为电离。电离后为正离子和电子，所需能量为电离能10~15eV。

电离因素-强电场下电离有碰撞电离、光电离多种形式：

1. 电子或正离子与气体分子的碰撞
2. 各种光辐射
3. 高温

碰撞电离

气体热运动理论：平均自由行程

电场中带电粒子做不规则热运动+碰撞+电场力作用积累动能。由于电子较小，平均自由行程大，则容易被电场加速，易于积累足够能量，其它的粒子相对质量体积大。有足够能量的带电粒子与中性分子碰撞可能使气体分子产生电离。故电子在强电场中运动引起的碰撞电离是气体带电粒子的主要来源。

$$\text{电子在电场中根据自由形成加速：} W = \frac{1}{2}mv^2 = Eqx$$

$$\text{电子与中性气体分子碰撞：} W \geq W_i, \quad W_i \text{为气体分子的电离能}$$

光电离

由原子物理知

$$\text{光子所带能量：} W = h\nu$$

$$\text{光电离条件：} W \geq W_i, \quad W_i \text{为气体分子的电离能}$$

短波长的高能辐射线有较强的电离能力。在放电过程中处于较高能级的激发态原子回到正常状态，以及异号离子复合成中性原子或分子时，都以光子的形式放出多余的能量，也成为导致电离的因素、

热电离

由分子气体动理论中的气体分子速率分布曲线和相关知识知

温度高平均动能大时更容易气体分子间碰撞产生电离，高温气体热辐射光子能量大也容易导致光电离。热电离是碰撞电离和光电离的综合。

$$W = \frac{3}{2}KT$$

当气体分子动能大于气体分子电离能，可能引起热电离，一般明显热电离起始温度 $10^3 K$

表面电离

表面电离或表面发射：在外界电离因素作用下，电子可能从金属电极表面释放

逸出功：电极发射电子所需的能量。与电极材料和气体表面状态有关，1~5eV，小于电离能

表面电离只产生电子

1. 正离子碰撞阴极
2. 光电效应
3. 强场发射(加极强外电场，一般气体间隙击穿过程中不会发生)
4. 热电子(阴极加高温，电子动能大逸出金属)

带电粒子的运动与消失

去电离过程，带电粒子的运动、扩散、负荷以及电子的附着效应。

由于去电离效应，当导致气体电离的因素消失后，去电离过程将气体迅速从导电状态恢复到绝缘过程。

带电粒子的定向运动

没有电场时带电粒子热运动各向随机运动，宏观上各向均匀

有电场时带电粒子定向运动，消失于电极，在外回路中形成电流

带电粒子的扩散

带电粒子从高浓度向低浓度

如果不同区域的带电粒子存在浓度差，总趋势从高浓度向低浓度，带电浓度均匀，故绝缘状态

带电粒子的复合

带有异号电荷的正离子与负离子或电子相遇，发生电荷传递而互相中和，还原为中性分子的过程为复合过程。

容器壁/气体空间都可进行。

复合粒子之间相对运动速度小概率大，故放电空间离容器壁远，正负离子之间复合是主要的。

在带电粒子复合过程中，原先电离吸收的电离能又会以光辐射的形式释放。这种光辐射在一定条件下成为导致电离的因素。

附着效应

气体的附着效应：某些气体的中性分子有较大的电子亲和力，电子与其碰撞时容易吸附成为负离子

氧气、氯气、水蒸气、六氟化硫

由于离子的电离能力远不及电子，电子被分子复活形成质量大速度慢的负离子不易被电场加速电离能力大大降低。电负性气体有较高绝缘强度。

1.2 均匀电场中气体的击穿

非自持放电和自持放电

需不需要外加电离因素才能维持

汤姆逊放电理论

电子崩的形成: 起始电子与中性粒子碰撞产生碰撞电离, 新电离电子和原有电子又因电场加速碰撞电离出新电子, 反复如雪崩

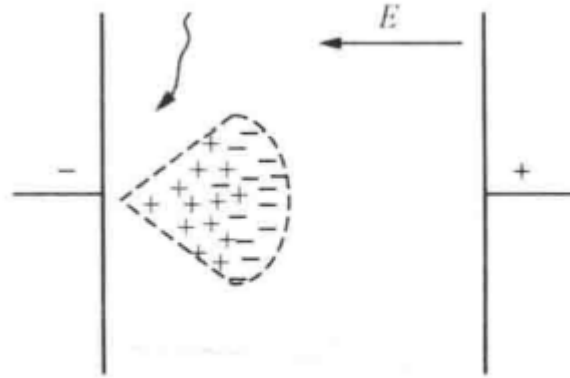


图 1-3 电子崩形成示意图

电子运动速度比离子快两个数量级, 离子扩散作用, 电子崩时间隙电流急剧增大。

α 过程和 γ 过程: 正离子在向阴极移动过程产生电离。与中性粒子发生碰撞电离, 撞击阴极表面产生表面电离, 逸出电子, 电子导致电子崩。使得间隙维持放电状态

α 系数: 一个电子沿电场方向行经单位长度后平均发生的碰撞电离次数。若每次碰撞产生一个电子和一个正离子, 一个电子沿电场方向行经单位长度后平均产生的电子数或离子数。

$$\alpha = \frac{dn}{n dx}$$

$$dn = n\alpha dx$$

$$n = e^{\alpha d}$$

β 系数: 一个正离子沿着电场方向行经单位长度后平均发生的碰撞电离次数, 离子崩。

γ 系数: 一个正离子碰撞阴极表面时从阴极表面逸出的自由电子数。

自持放电过程:

一个电子向右运动总的产生的新的正离子数 $e^{\alpha d} - 1$

这些正离子撞在阴极产生电子 $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$

自持放电条件: $\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1$

则自持放电临界条件: $\alpha d = \ln(1 + \frac{1}{\gamma})$

根据实际物理过程求 α , 想象一个电子行进单位距离1其平均自由行程为 λ , 碰撞 $\frac{1}{\lambda}$ 次, 由气体动理论知电子实际运动距离大于临界碰撞电离所需能量对应距离 $x_1 = \frac{W_i}{qE}$ 的概率为 $e^{-\frac{x_1}{\lambda}}$ 。有效碰撞次数 $\frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_1}{\lambda}} = \alpha$

当温度不变时, 平均自由行程与气压 P 成反比, $\lambda = \frac{1}{AP}$, A 为一常数

$$\frac{\alpha}{P} = A e^{-\frac{W_i}{Eq \frac{1}{AP}}}$$

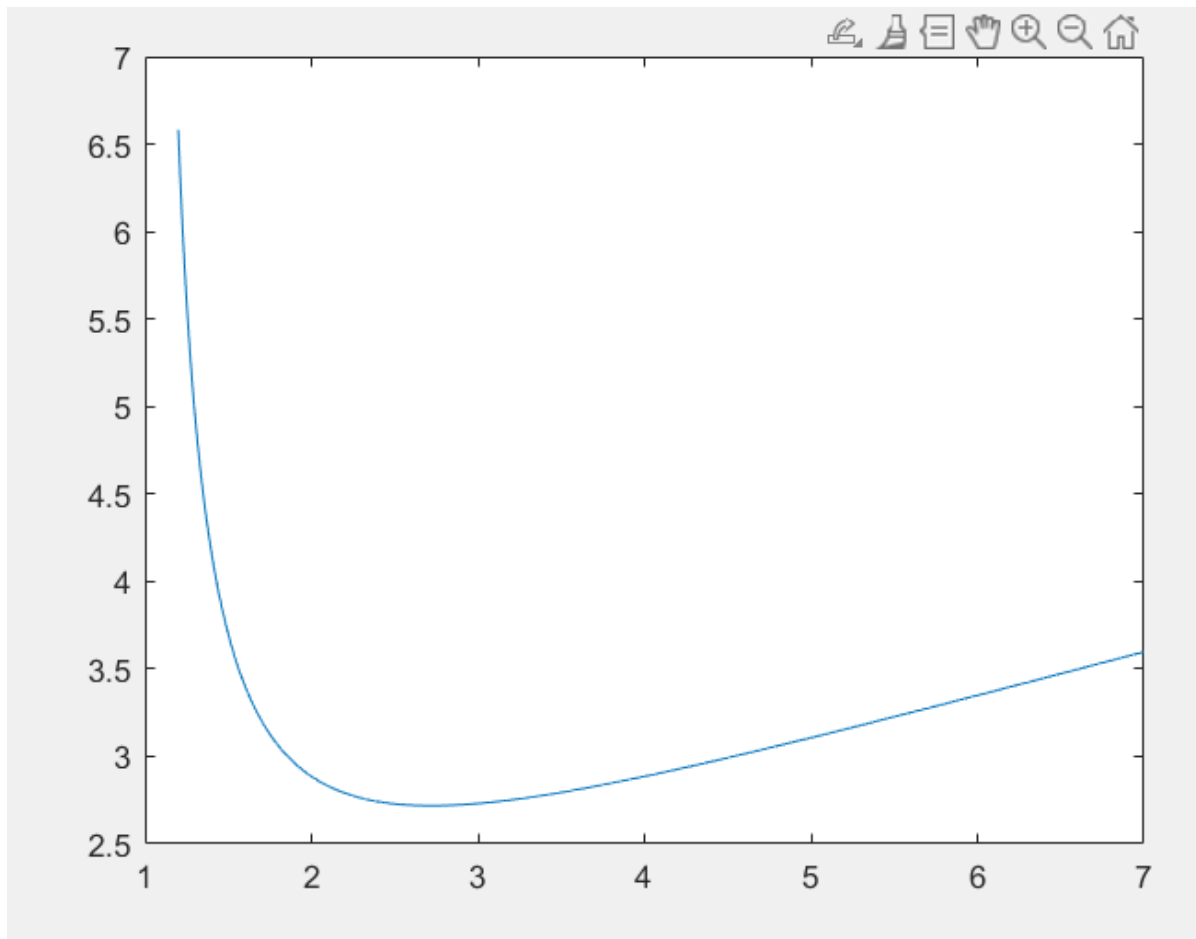
将自持放电临界条件带入, 同时 $E = \frac{U_b}{d}$ 带入, 得到

$$\frac{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}{APd} = e^{-\frac{W_i d}{U_b q \frac{1}{AP}}} = e^{\frac{BPd}{U_b}}, B \text{ 为一常数}$$

从而解得 U_b

$$U_b = \frac{BPd}{\ln \frac{APd}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}}$$

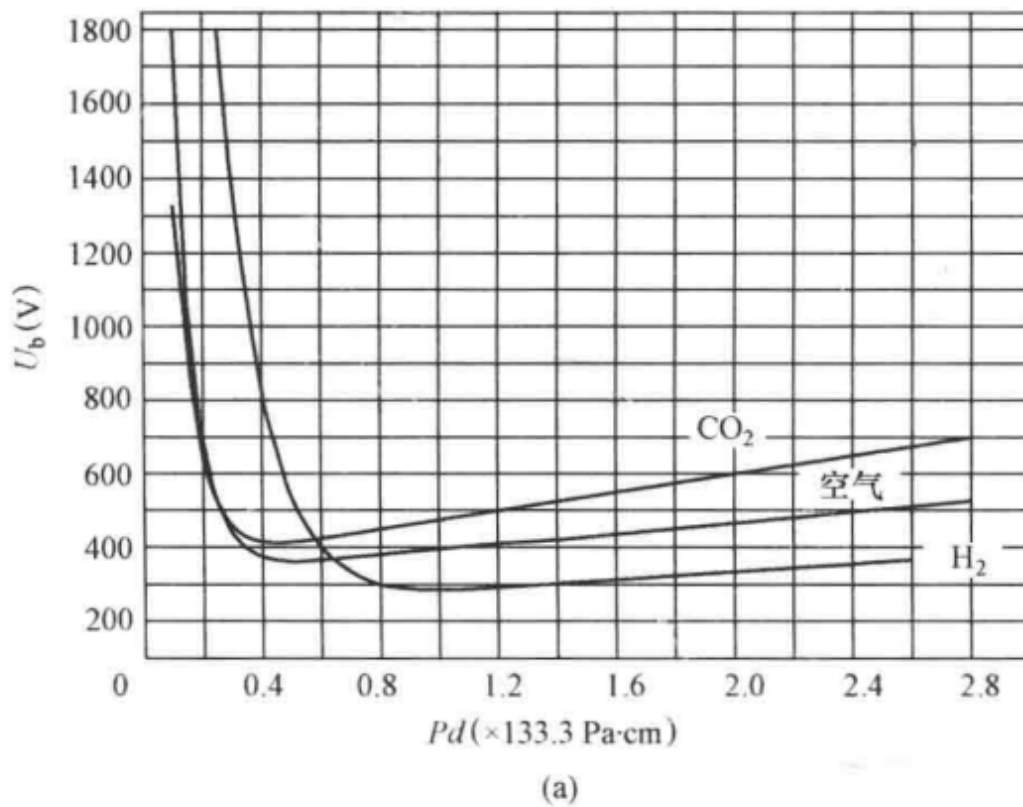
其实 U_b 对 γ 变化不敏感, 主要取决于 Pd 乘积



$$y = \frac{x}{\ln(x)} \text{ 曲线}$$

巴申定律-实验

$$U_b = f(Pd)$$



实验与理论彼此对应

$$(Pd)_{min} = \frac{e \ln(1 + \frac{1}{\lambda})}{A}$$

当气体温度发生变化时，电子平均自由程变化， λ 正比于 T/P ，用气体密度代替压力

$$U_b = f(\delta d)$$

汤姆逊放电理论的适用范围 $Pd > 27kPa \cdot cm$

1. 电离主要因素为空间碰撞电离
2. 正离子碰撞阴极导致表面电离是自持放电的表条件

气压较低，Pd值较小放电基础建立起来，Pd较大高电压长间隙无法使用汤姆逊理论。

1. 放电外形，理论上放电应该在整個间隙均匀连续发展，但是高气压出现的是带有分支的明亮细通道
2. 放电时间，根据汤姆逊理论间隙完成击穿要几次循环，形成电子崩后正离子达到阴极产生二次初始电子...需要一定时间，但实际短
3. 击穿电压，Pd值大时计算值与实际值区别大
4. 阴极材料影响，理论上阴极材料性质对击穿过程起一定作用，实际上大气压下空气实测击穿电压与阴极材料无关

流注理论-高气压气体击穿

达不到最低击穿电压时：

1. 产生电子崩，电子崩畸变，头部电荷密度大
2. 头部易复合放出光子，电子进入阳极，正离子进入阴极

达到最低击穿电压时：电子崩产生-间隙击穿

1. 电子崩产生
2. 电子崩头部接近阳极，崩头崩尾正离子数剧增，崩头强烈电离，激励反激励强，放出大量光子，强烈复合放出大量光子
3. 射到崩尾光子造成光电离产生电子形成二次电子崩
4. 二次电子崩头部电子受到吸引向主电子崩的正空间电荷区域运动，形成充满正负带电粒子的混合通道，即流注

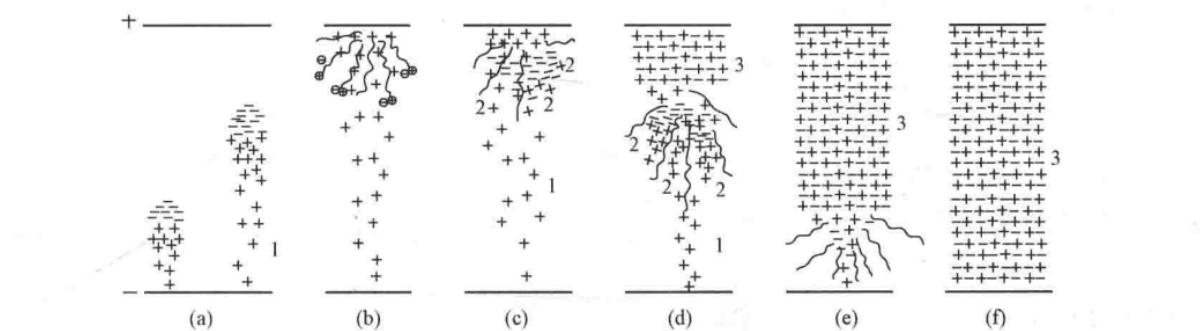


图 1-7 正流注的产生及发展

(a) 形成电子崩；(b) 放射大量光子；(c) 二次电子崩；(d)、(e) 正流注的形成及发展；(f) 完成间隙的击穿

1—起始电子崩（主电子崩）；2—二次电子崩；3—流注

电子崩的空间电荷畸变使得原电场明显畸变，大大加强电子崩头尾处电场

$$e^{ad} \geq 10^8, Pd \geq 27kPa \cdot cm$$

1. 放电外形
2. 放电时间
3. 阴极材料