



高电压技术教研室
HIGH VOLTAGE INSTITUTE

《高电压技术》

高电压绝缘

Ch3 气体间隙的击穿强度



目 录

3

气体间隙的击穿强度

3.1

稳态电压下的击穿

3.2

雷电冲击电压下的击穿

3.3

操作冲击电压下的击穿

3.4

SF₆气体间隙中的击穿

3.5

提高气体间隙击穿电压的措施





3.1 稳态电压下的击穿

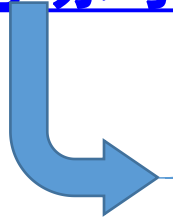
基本概念

* 气体间隙**击穿电压**与**外施电压的种类、电场类型**有关。

其中，**稳态持续电压**：在放电发展所需的时间范围内，外施电压变化率很小。（如：直流、工频电压，作用时间持续的）

其余：**雷电冲击电压**和**操作冲击电压**作用时间很短，放电发展速度不能忽略不计，这时间隙的击穿特性具有新的特点。

不同电场均匀度的空气间隙在**稳态电压**下的击穿特性。

- 
- 均匀电场
 - 稍不均匀电场
 - 极不均匀电场



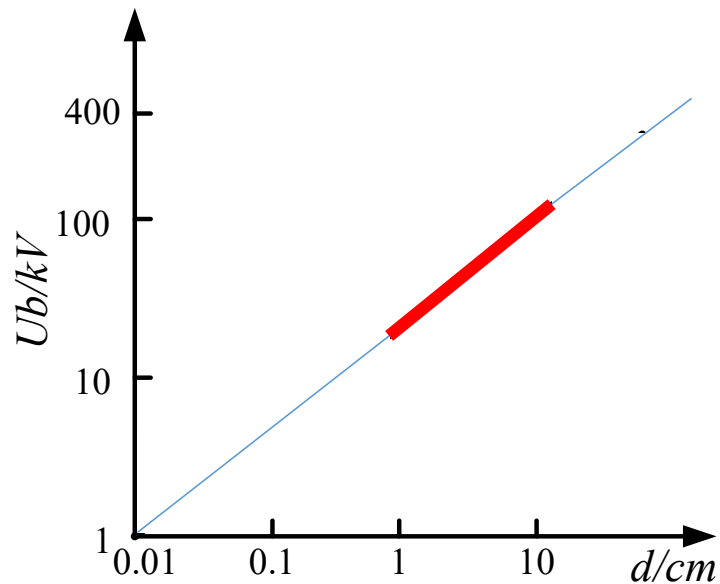
3.1.1 均匀电场中的击穿

特点:

1. 击穿无极性效应。（电极对称）
2. 击穿时间短。（气隙各处电场强度等）
3. 击穿电压的**分散性**很小。
4. 直流击穿电压、工频击穿电压及50%冲击击穿电压相同。

冲击系数:

50%冲击击穿电压和持续作用电压下击穿电压之比(均取峰值)
称为**冲击系数**。



**d 在1-10cm的范围内
， 击穿强度 E_b 约为
30kV/cm。**

均匀电场中空气间隙
击穿电压 U_b 与击穿场强 E_b 和间隙距离 d 的关系

$$U_b = 24.22\delta d + 6.08\sqrt{\delta d} \text{ kV} \quad (1\text{cm} \leq d \leq 10\text{cm})$$



3.1.2 稍不均匀电场中的击穿

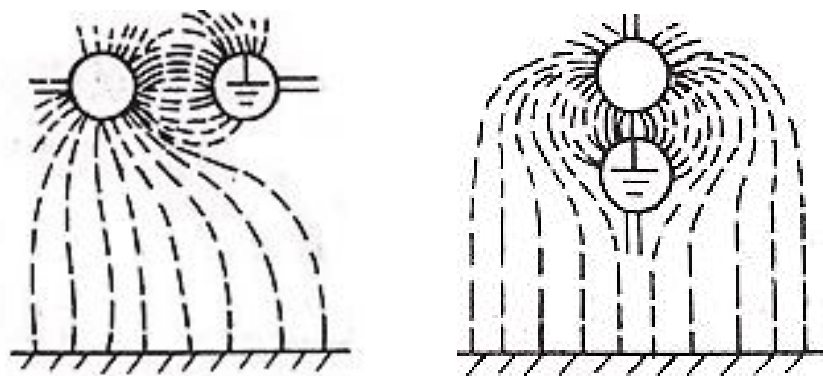
特点:

- 直流、工频 (峰值)以及50%冲击击穿电压基本一致
- 击穿电压的分散性不大
- 稍不均匀电场中击穿前不发生电晕 (也可认为电晕即击穿)
- 稍不均匀电场中也存在极性效应,
击穿电压**负低正高(电晕/击穿)**
- 电场不对称时, 极性效应不很明显

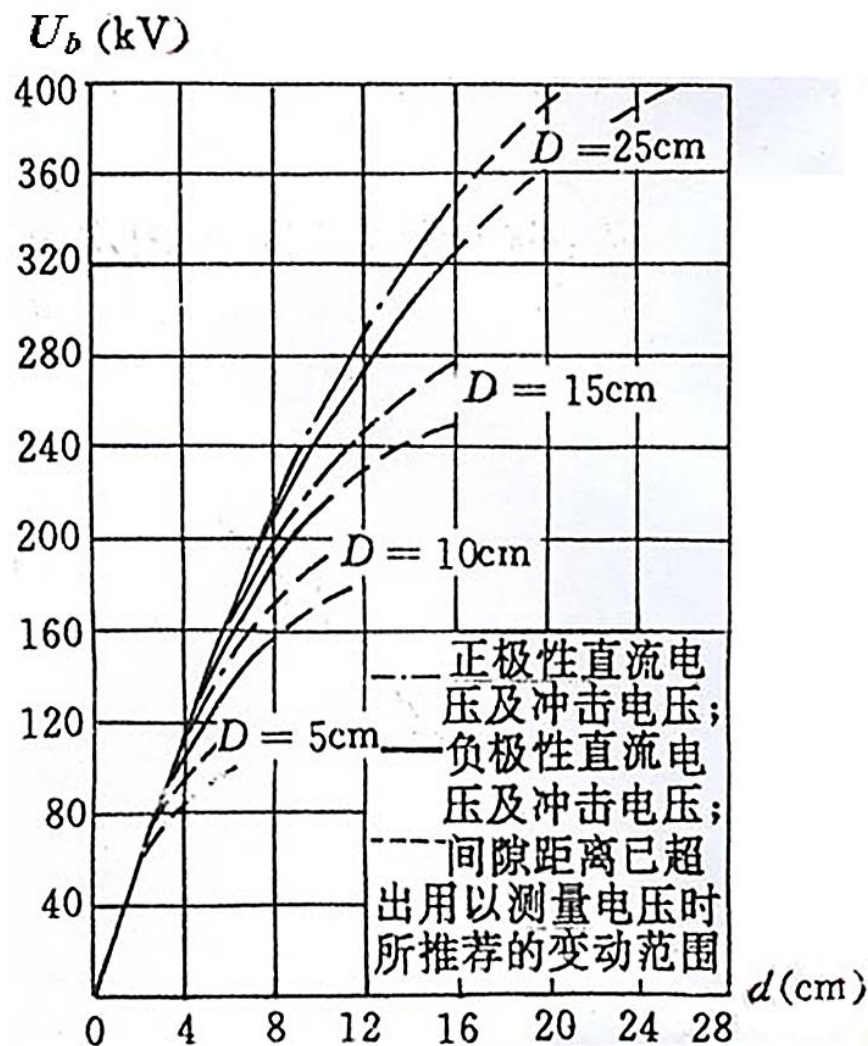


1.球-球间隙

一球接地时，受地影响，
电场分布不对称，有极性效应。



- 1) $d < D/4$ 时，电场均匀，直流、交流和冲击电压击穿电压相同
- 2) $d > D/4$ 时，电场不均匀程度增大，击穿场强下降，出现极性效应：负低正高；
- 3) 直径愈大(相同间隙距离的情况下)，击穿电压愈高
- 4) 球隙测压器的工作范围 $d \leq D/2$ ；否则因放电分散性增大，不能保证测量的精度。





2. 同轴圆柱电极

外筒内半径 $R=10\text{cm}$ ，改内筒外半径 r 之值，气隙起始晕电压 U_c 和击穿电压 U_b 随内筒外径 r 变化规律如图所示。

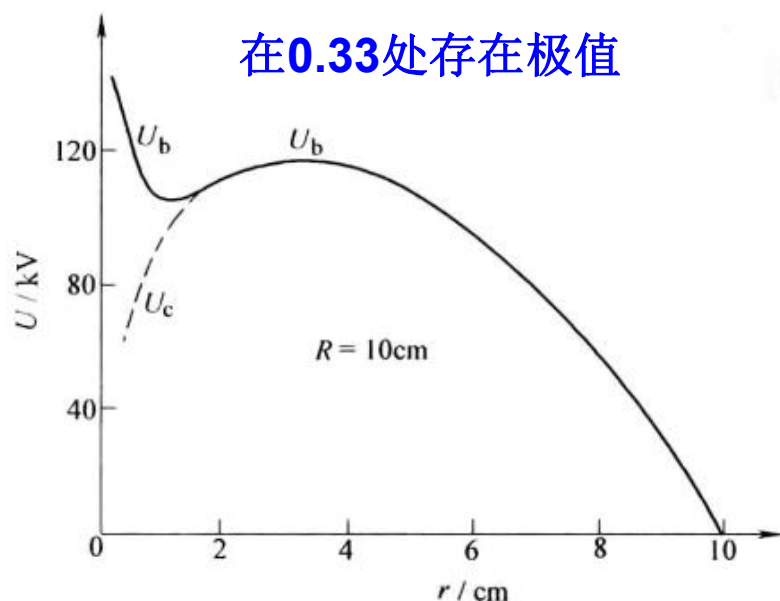
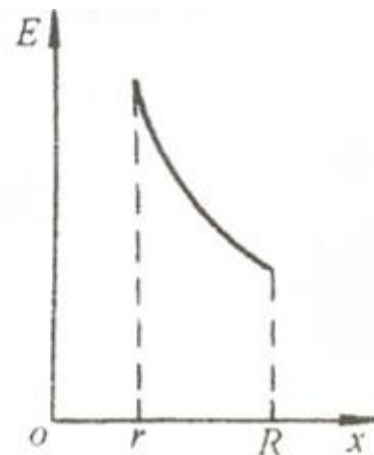
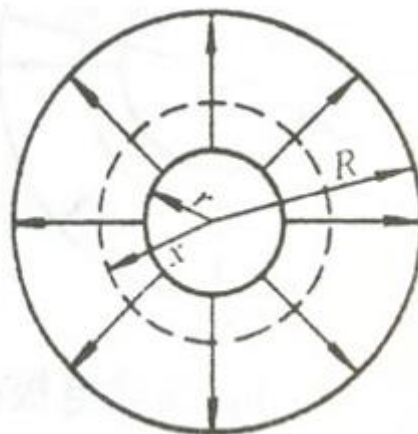


图 3-4 空气中同轴圆柱电极的电晕起始电压 U_c 及击穿电压 U_b 与内电极半径 r 的关系（内电极为负极性）

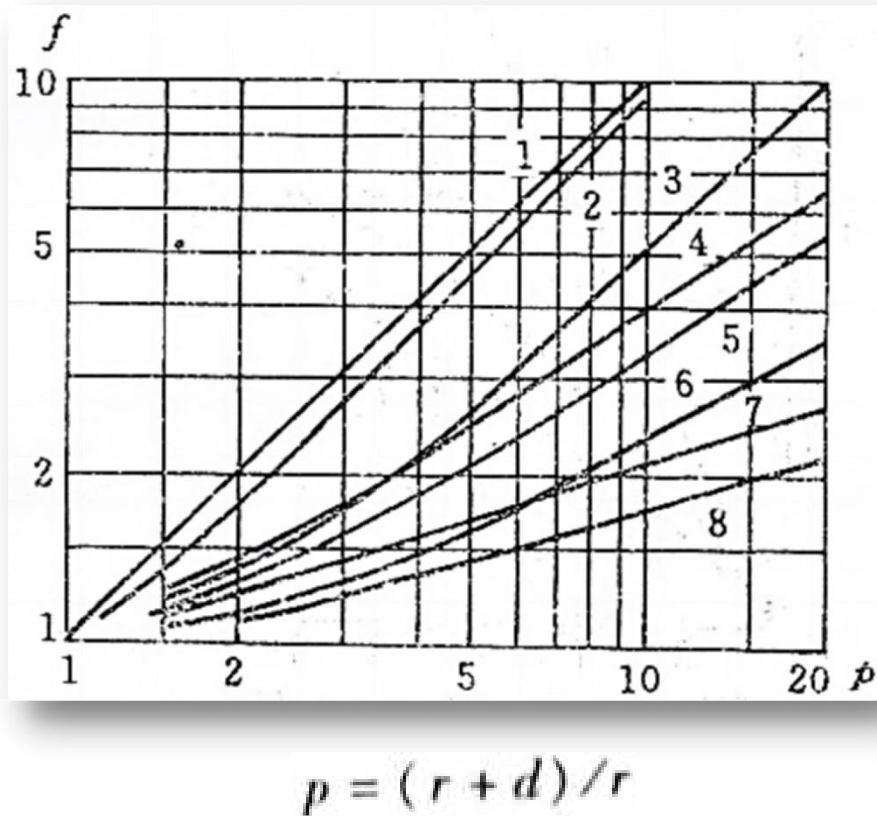


$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{R}{r}}$$

电场由极不均匀场变为稍不均匀场，起晕电压和击穿电压重合。

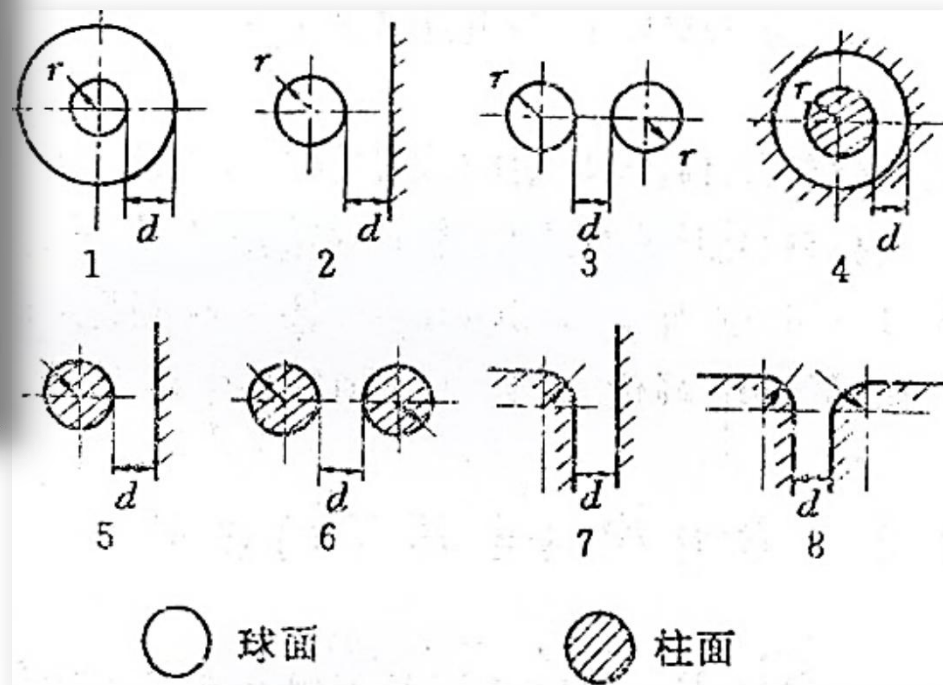


3.其它形状的电极布置



1. 球状电极的电场不均匀系数大于相同半径的圆柱电极

2. 间隙距离增大时，电场不均匀系数也增大。





3.1.3 极不均匀电场中的击穿

特点:

➤ **在间隙距离很大时，极不均匀电场中，电极形状的影响不大。**

极不均匀间隙中，影响击穿电压的主要因素是间隙距离。这是因为击穿前发生了电晕，此后放电就是在电晕空间电荷已经强烈畸变了外电场的情况下发展之故。

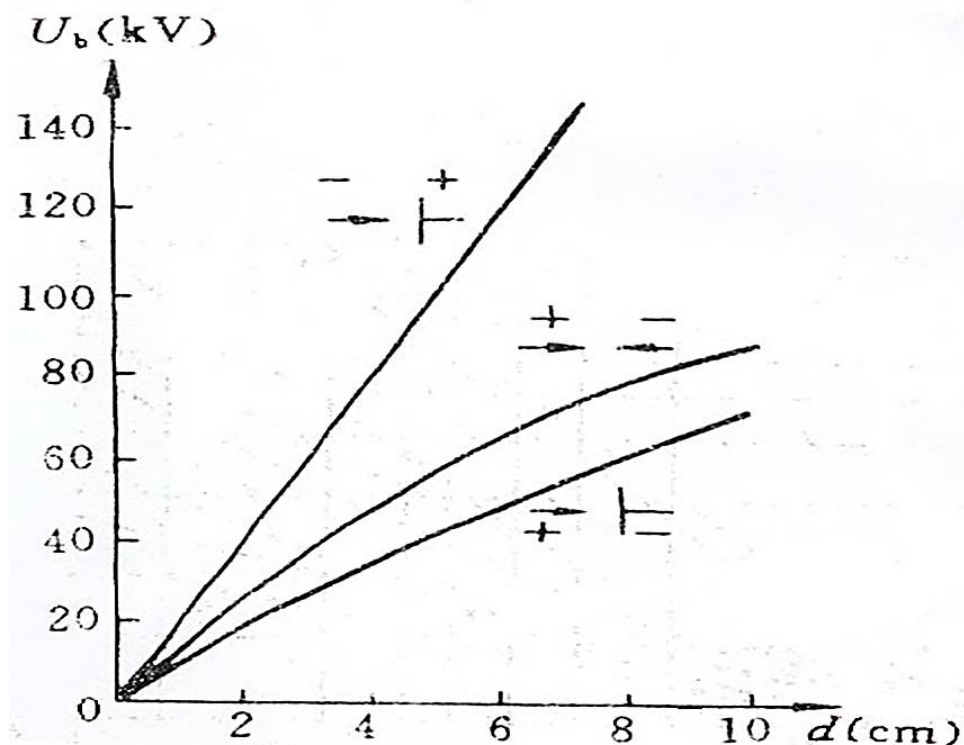
➤ **取棒-棒电极和棒-板电极作为典型电极。**

电场分布不对称→参照棒-板电极

电场分布对称→参照棒-棒电极



直流电压下的击穿电压



尖-板和尖-尖空气间隙的直流击穿电压

•正尖-板最低

•尖-尖居中

•负尖-板最高

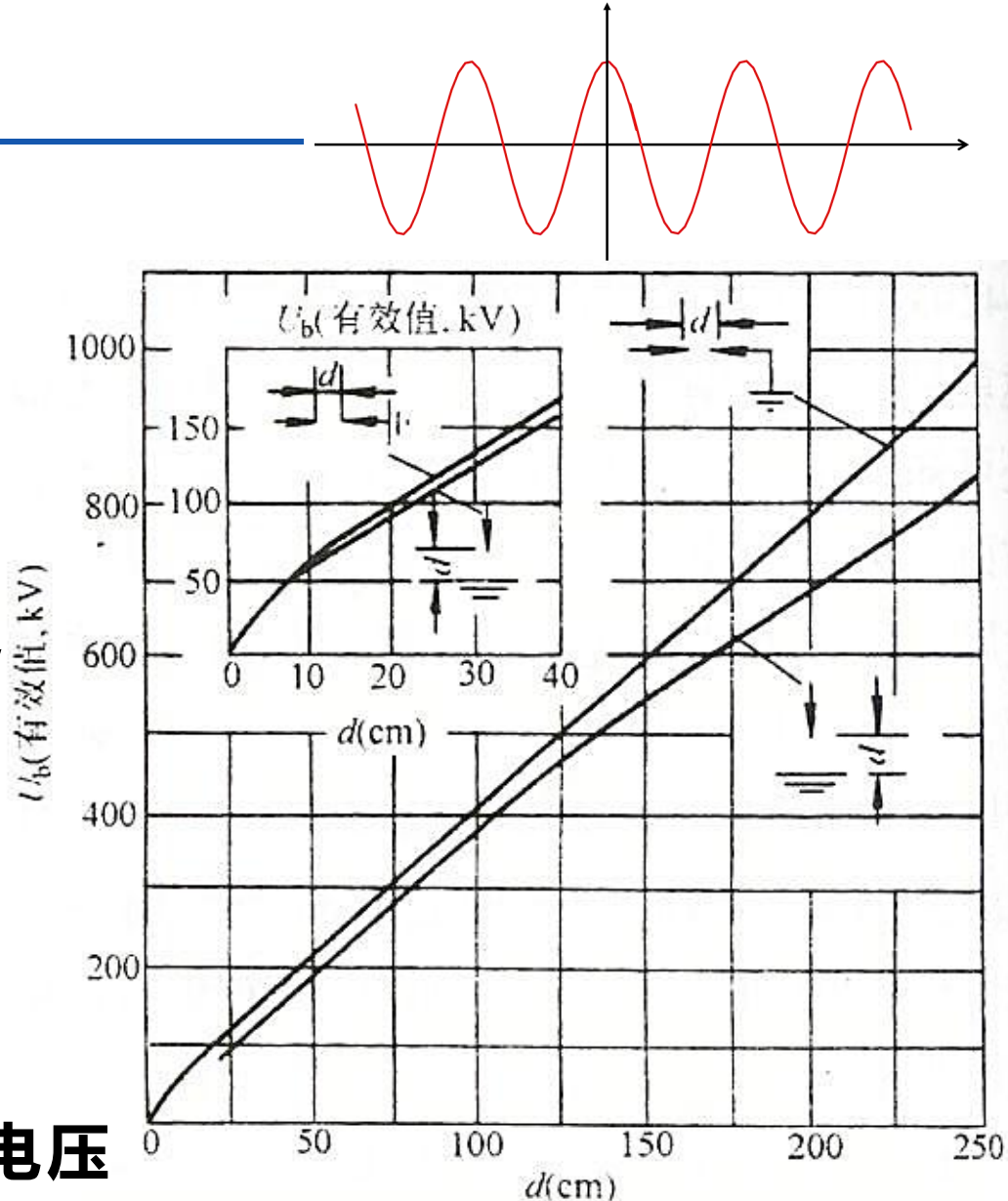
**极不均匀场间隙的极性
效应明显（稍不均匀反）**



交流电压下的击穿电压

棒-板电极间施加工频电压时，击穿总是在棒的极性为**正**、电压达到**峰值**时发生，并且其击穿电压(峰值)和直流电压下正棒-负板的击穿电压相近。

除了起始部分外，击穿电压和图示距离近似成线性关系。



棒 - 棒和棒 - 板空气间隙的工频击穿电压 (有效值)

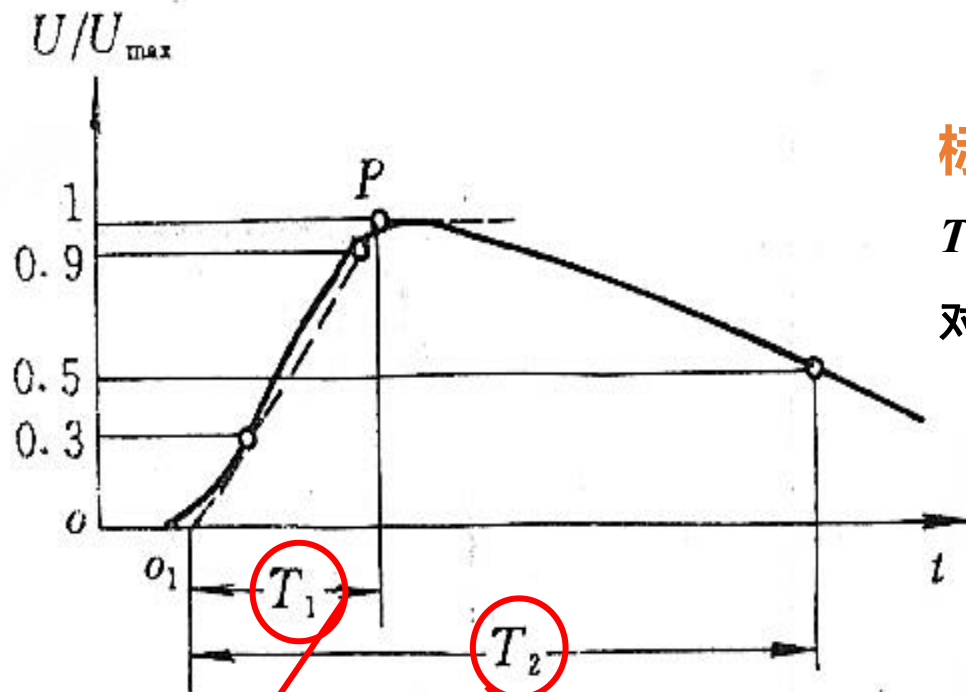


3.2 雷电冲击电压下的击穿

3.2.1 冲击电压的标准波形

雷电过电压是持续时间**极短**的脉冲电压。

用**冲击电压发生器**产生的冲击电压须采用**标准波形**。



波前时间

半峰值时间

标准雷电冲击的波形：

$$T_1 = 1.2 \mu\text{s} \pm 30\%, \quad T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$$

对于不同极性：+1.2/50 μs 或-1.2/50 μs

标准操作冲击的波形：

$$T_1 = 250 \mu\text{s} (1 \pm 20\%)$$

$$T_2 = 2500 \mu\text{s} (1 \pm 60\%)$$



3.2.2 放电时延

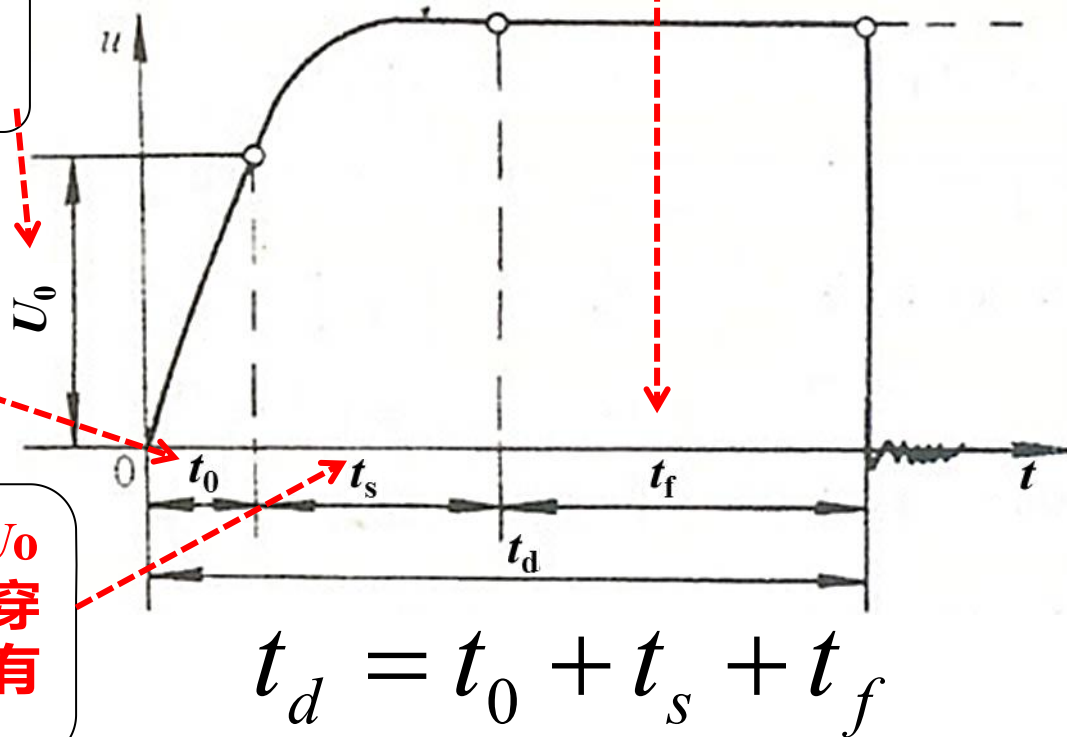
在冲击电压的作用下，要造成击穿，不仅需要**足够的电压**，而且还必须有**充分的电压作用时间**。

放电形成时延 t_f ：从出现第一个有效自由电子时起，到放电过程完成所需时间，即电子崩的形成和发展到流注等所需的时间

临界
击穿电压

升压时间 t_0 ：电压升高到持续作用电压下的击穿电压 U_0 的时间

统计时延 t_s ：从外施电压达 U_0 时起，到出现一个能引起击穿的初始电子崩所需的第一个有效电子所需时间





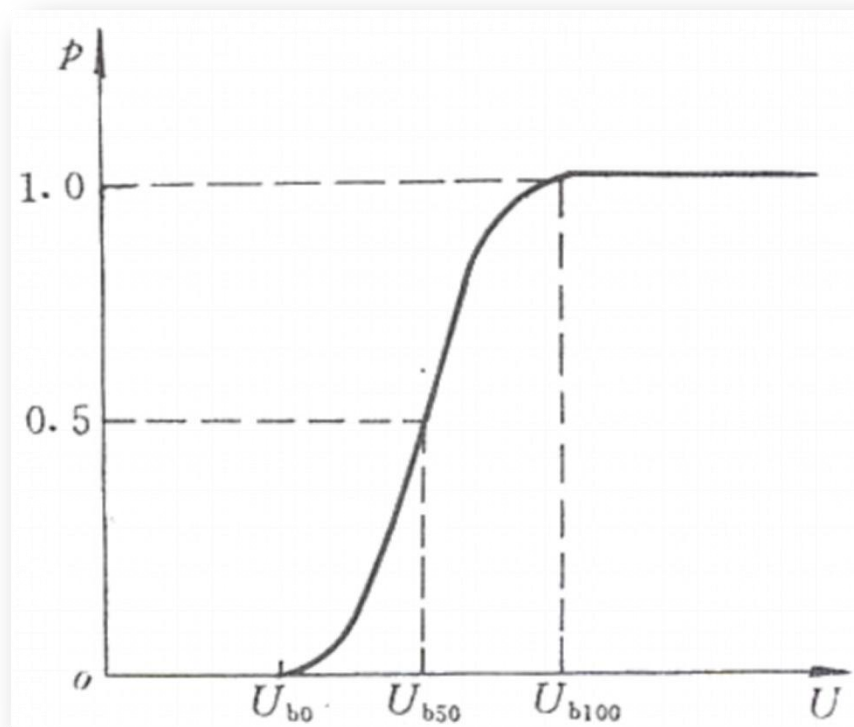
3.2.3 50%击穿电压及冲击系数

50%击穿电压：多次施加电压时有半数会导致击穿的电压值 U_{b50} 。

$$U_{b0} = U_{b50} - 3\delta$$

在实验中决定冲击击穿电压时，施加电压次数越多越准确。施加多次冲击的方法有多级法、升降法等。

最简单的方法是：调整电压至施加10次电压中有4-6次击穿，这个电压值就可作为50%冲击击穿电压。这对于工程上近似估算雷电冲击强度，基本上可以满足要求。采用50%冲击击穿电压决定绝缘距离时，显然应根据分散性的多少，保持一定的裕度。





冲击系数：同一间隙的50%冲击击穿电压与稳态击穿电压之比

均匀电场及稍不均匀电场的雷电冲击50%击穿电压

均匀电场和稍不均匀电场中的击穿电压：冲击系数等于1。
由于放电时延短，50%击穿电压下，击穿通常发生在波头峰值附近。

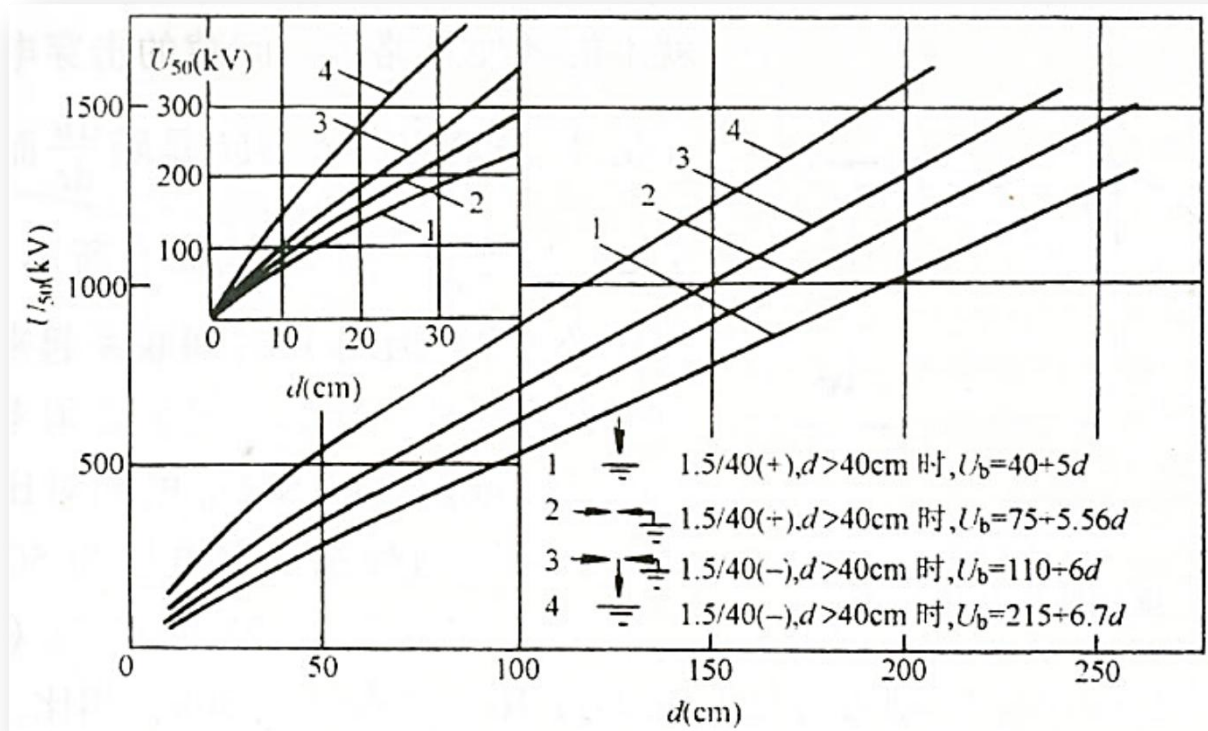
棒-板及棒-棒空气间隙的雷电冲击50%击穿电压

极不均匀电场中的击穿电压：在极不均匀电场中，由于放电时延较长，通常冲击系数大于1。

在50%击穿电压下，当间隙较长时，击穿通常发生在波尾。



棒-板及棒-棒空气间隙的雷电冲击50%击穿电压



负极性击穿电压
高于正极性击穿
电压

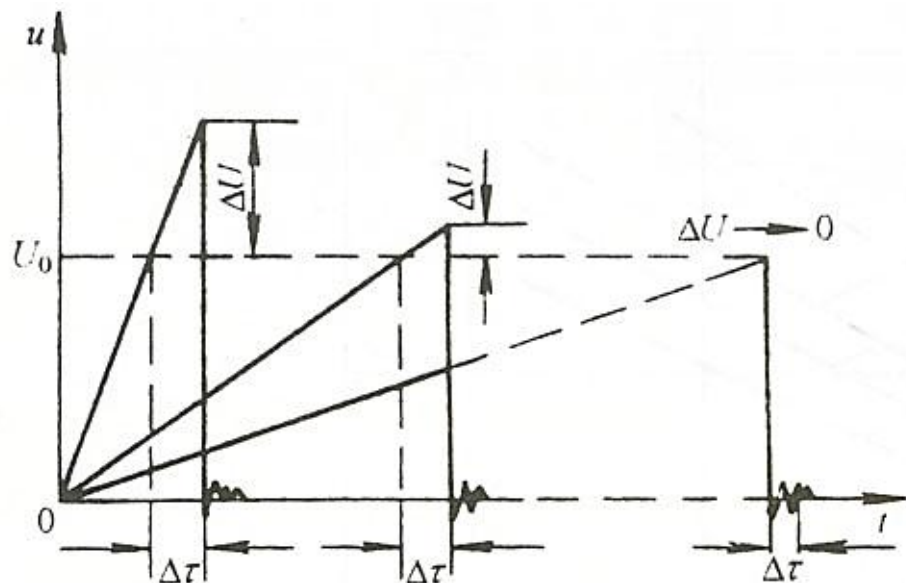
棒-板电极的极性
效应较棒-棒电极
更为明显

棒棒及棒板空气间隙的雷电冲击50%击穿电压和
间隙距离的关系



3.2.4 伏-秒特性

伏 - 秒特性： 在同一冲击电压波形下，击穿电压值与放电时延（或电压作用时间）有关的特性。即：反映了放电时延对间隙击穿的影响



击穿电压和电压陡度的关系
(时间坐标轴上虚线前后比例尺不同)

➤ 两个间隙并联，在不同峰值的冲击电压作用下，就**不一定是击穿电压低**的那个间隙击穿。

➤ 同一个间隙，在不同陡度的冲击冲击电压作用下，**表现出的击穿电压不一样**。



伏秒特性的制定方法

工程上用间隙上出现的**电压最大值**和**放电时间**的关系来表征间隙在冲击电压下的击穿特性，称为伏秒特性。

波尾击穿：击穿点时间——冲击电压峰值

波头击穿：击穿点时间——击穿电压值

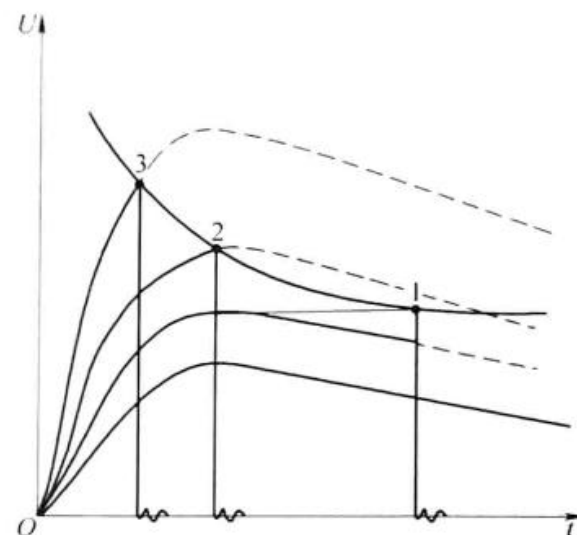
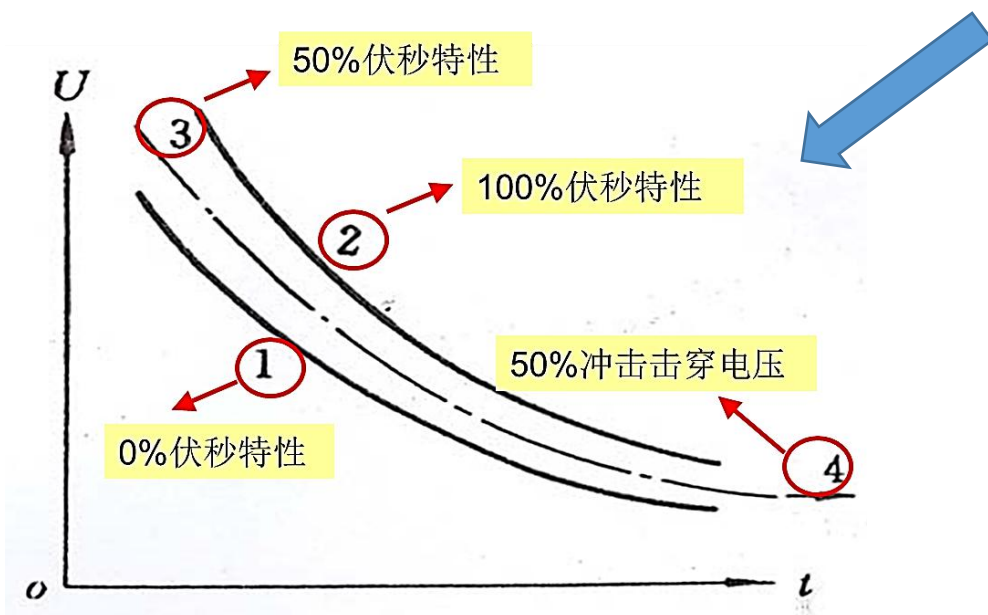
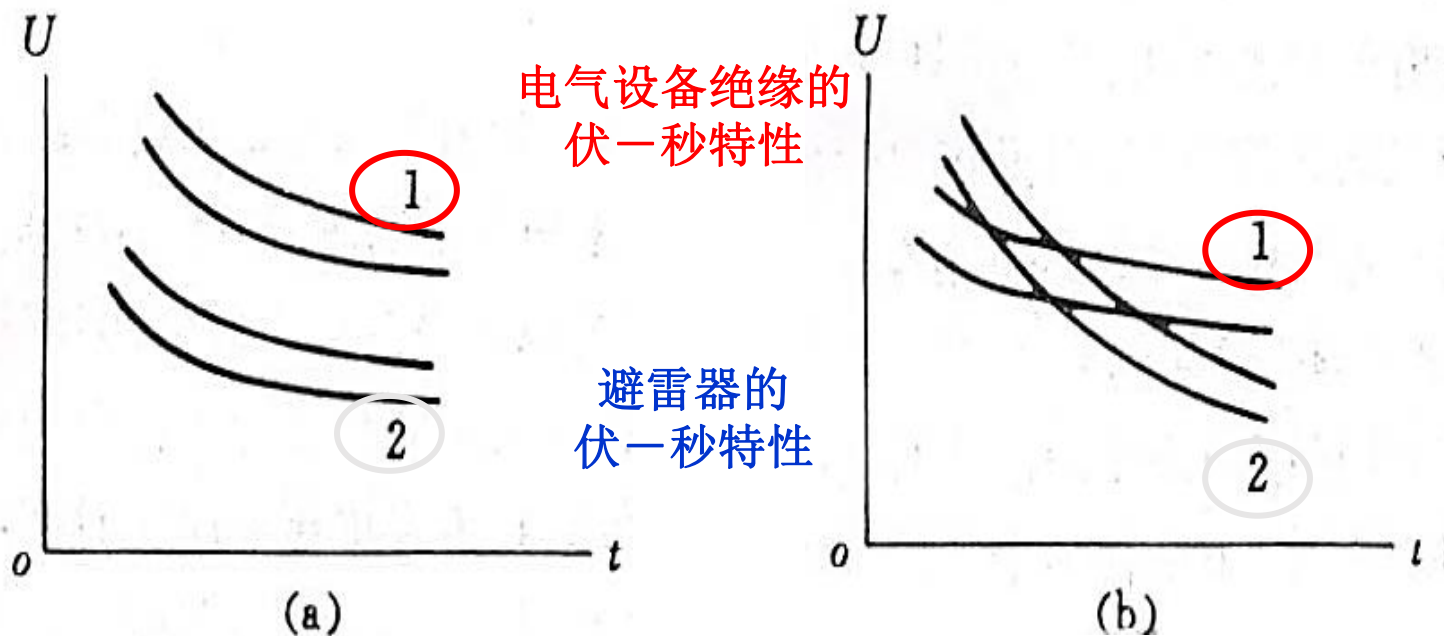


图 3-12 确定间隙伏-秒特性的方法



伏秒特性的用途：绝缘配合



电气设备绝缘伏-秒特性和避雷器的伏-秒特性
(a) 正确配合 (b) 不正确配合



3.3操作冲击电压下的击穿

操作冲击电压下气体绝缘的击穿电压也具有分散性，也采用50%击穿电压反映间隙的介电强度。考虑绝缘配合时，也应采用伏秒特性。

均匀电场和稍不均匀电场中的击穿电压

均匀电场及稍不均匀电场中，气体间隙的操作冲击50%击穿电压和雷电冲击50%击穿电压以及工频击穿电压(峰值)差不多，击穿电压的分散性也较小，击穿同样发生在峰值。



3.3.1 操作冲击电压下的U形曲线

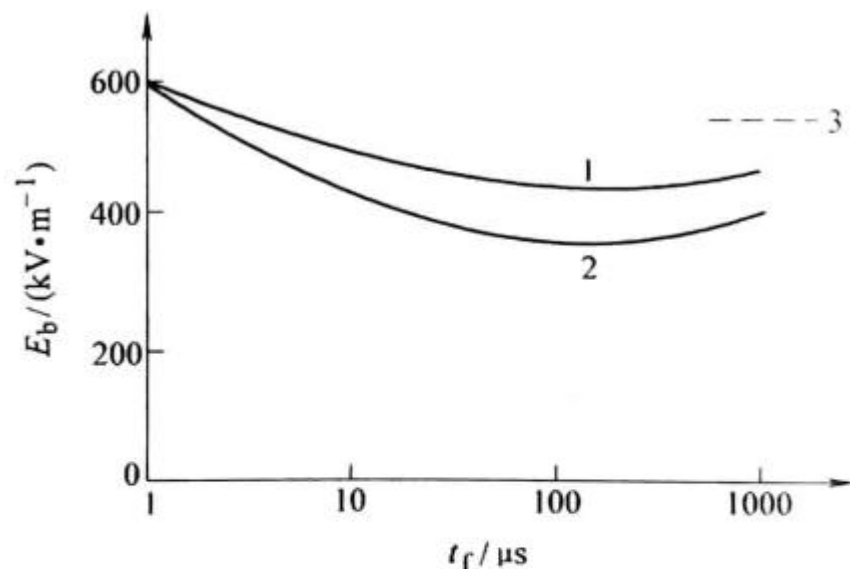


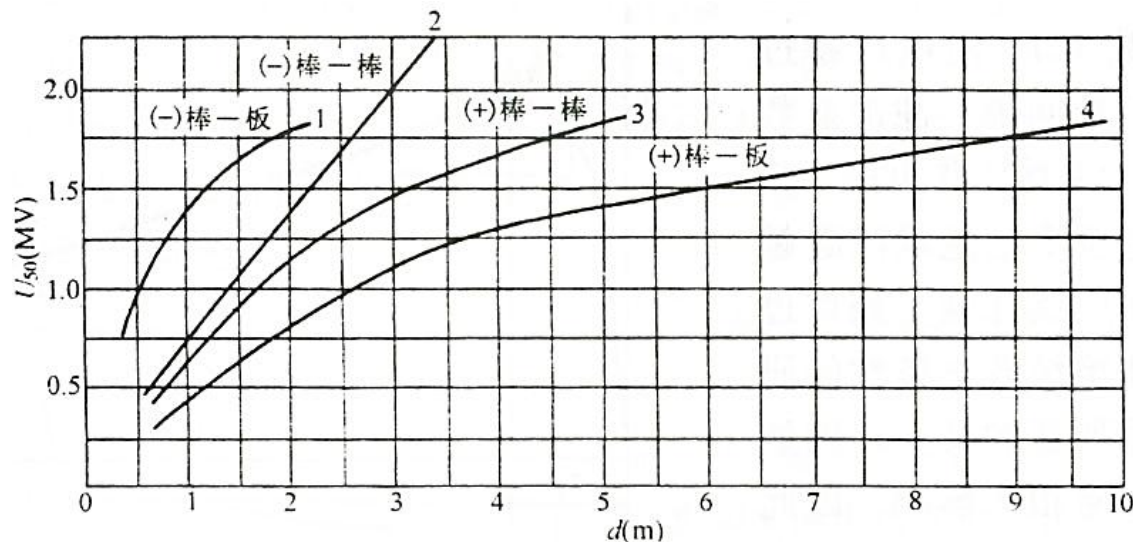
图 3-15 3m 空气间隙的平均击穿场强与操作冲击的波前时间的关系
1—棒-棒（一极接地） 2—导线-板间隙
3—工频击穿场强

雷电冲击击穿场强高于工频击穿场强

操作冲击波前为100-300 μs 时，击穿场强出现最小值，比工频击穿场强低。

出现击穿场强极小值的波前时间随间隙距离增大而增大

U形曲线的形成机制与放电时延和空间电荷的形成与迁移有关



操作冲击电压 (500/5000 μ s) 作用下棒板及棒棒
空气间隙的50%击穿电压和间隙距离的关系

1、4—10×10mm²钢棒，地面铺7×7m²钢板；2、3— ϕ 50mm钢管，上棒长5m，下棒长6m

电场分布情况对操作冲击击穿电压影响很大。

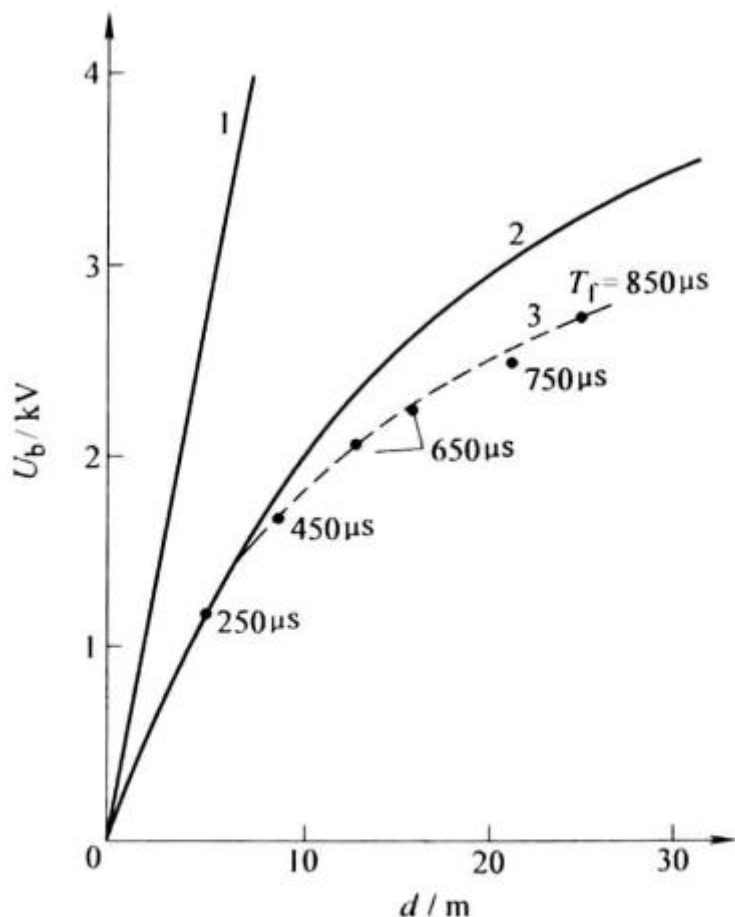
接地物体靠近放电间隙会显著降低其正极性击穿电压，但能多少提高一些负极性击穿电压，即存在显著的“邻近效应”。电极形状对间隙的击穿电压也有很大影响。

和工频电压下类似，极不均匀电场中操作冲击击穿电压和间隙距离的关系具有明显的“饱和”特征。这也是因为形成先导后，放电易于发展之故。

但对于雷电冲击电压，则由于作用时间太短，间隙距离加大后，需要提高先导发展速度，才能完成放电，因而导致击穿电压提高，所以雷电冲击击穿电压和距离大致呈线性关系。



3.3.3 长空气间隙在操作冲击下的击穿强度



雷电远高于操作

操作冲击击穿电压在5m以上间隙距离时有明显的饱和趋势

间隙距离25m时，操作冲击的最低击穿强度仅为1kV/cm

$$U_{\min} = \frac{3.4}{1 + 8/d} \quad d \text{ 为 } 1\text{m} \sim 20\text{m}$$

图 3-16 空气中棒-板间隙在正极性雷电冲击和操作冲击波下的击穿电压
1—1.2/50 μs 波 2—250/2500 μs 波
3—最小击穿电压



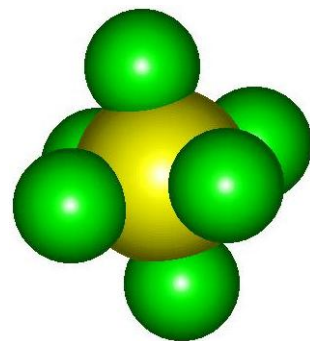
3.4 SF₆气体间隙中的击穿

SF₆由卤族元素中最活泼的元素氟(F)原子与硫(S)原子结合而成，其分子结构是六个F原子处于顶点位置而S原子处于中心位置的正八面体，S和F以共价键联结，键距 $1.58 \times 10^{-10}\text{m}$ 。

表 5-1

SF₆ 的物理特性

分子量	146.06
相对介电常数 (0.1MPa, 20℃)	1.002049
介质损耗因数 (0.1MPa)	$< 5 \times 10^{-6}$
密度 (0.1MPa, 20℃)	6.164g/l
临界压力	3.68MPa
临界温度	45.5℃
比热 (30℃)	5.01J/g·K
热导率	$0.81 \times 10^{-5}\text{J/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$
在 1cm ³ 油中溶解度	0.297cm ³
在 1cm ³ 水中溶解度	0.001cm ³
水在 SF ₆ 中的溶解度 (质量比, 30℃)	0.05 ± 0.010



- ① 无毒性
- ② 化学稳定性好
- ③ 密度约为空气的5倍，灭弧能力为空气的100倍以上



3.4.1 均匀和稍不均匀电场中的击穿

电负性气体的流注放电判据

$$\int_0^{x_c} (\alpha - \eta) dx = \ln N_{cr} = K$$

对SF₆气体 $K = 10.5$

对均匀电场:

$$(\alpha - \eta)d = K$$

$$c = 28 \text{ kV}^{-1}; \quad (E/p)_0 = 88.5 \text{ kV} / (\text{MPa} \cdot \text{mm})$$

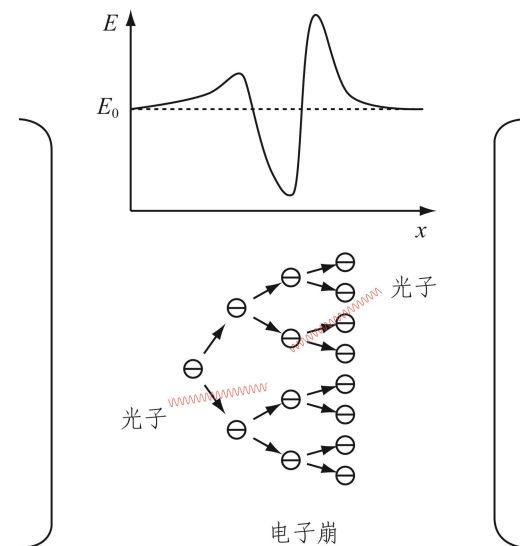
$$\bar{\alpha} / p = (\alpha - \eta) / p = c(E / p - (E / p)_0)$$

$$U_b = \left(\frac{E}{p} \right)_0 pd + \frac{K}{c} = 88.5pd + 0.38$$

$$U_b = \left(\frac{E}{p} \right)_0 pd = 88.5pd$$

$$\frac{E_b}{p} = \left(\frac{E}{p} \right)_0$$

工程应用中 $pd > 1 \text{ MPa} \cdot \text{mm}$



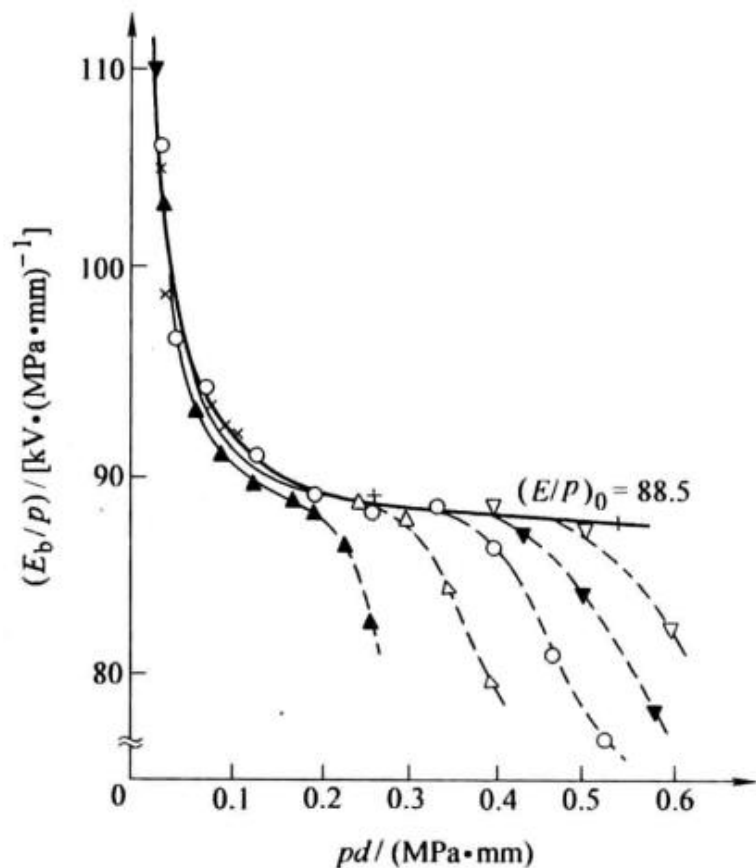


图 3-19 平行板电极中 SF_6 的 E_b/p 与 pd 值的关系

实验气压 p 值: \times —3333 Pa

▲—6665 Pa \triangle —9998 Pa \circ —13330 Pa
▼—16663 Pa ∇ —19995 Pa +—26660 Pa

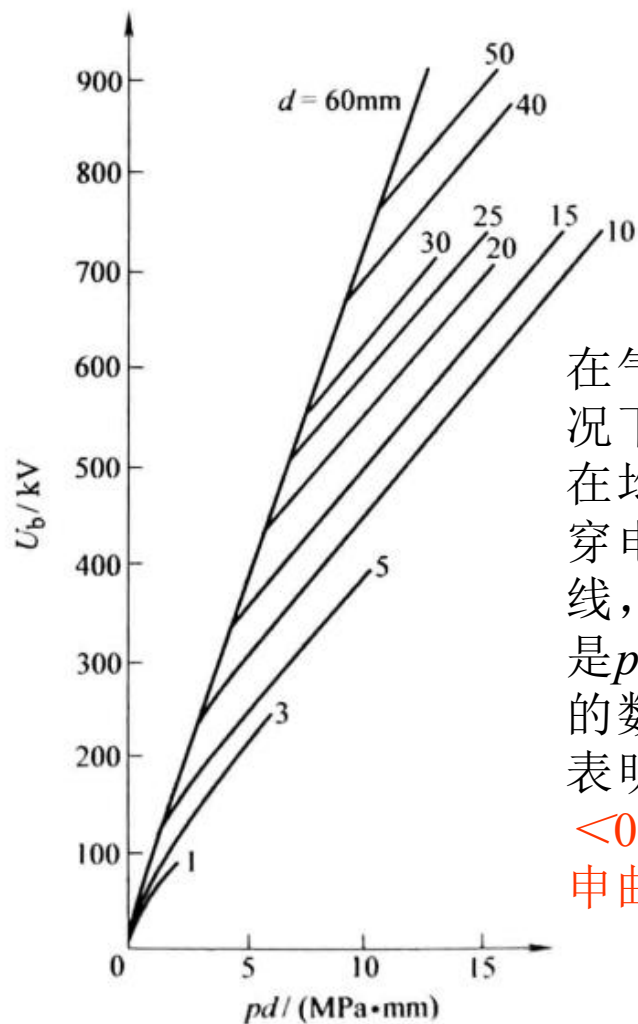


图 3-20 SF_6 在气压较高时 ($p > 0.2 \text{ MPa}$) 偏离巴申曲线的情况

在气压不太高的情况下，大部分气体在均匀电场中的击穿电压符合巴申曲线，即击穿电压只是 pd 乘积而与 p 和 d 的数值无关。实验表明， SF_6 气体在 $p < 0.2 \text{ MPa}$ 时遵循巴申曲线。

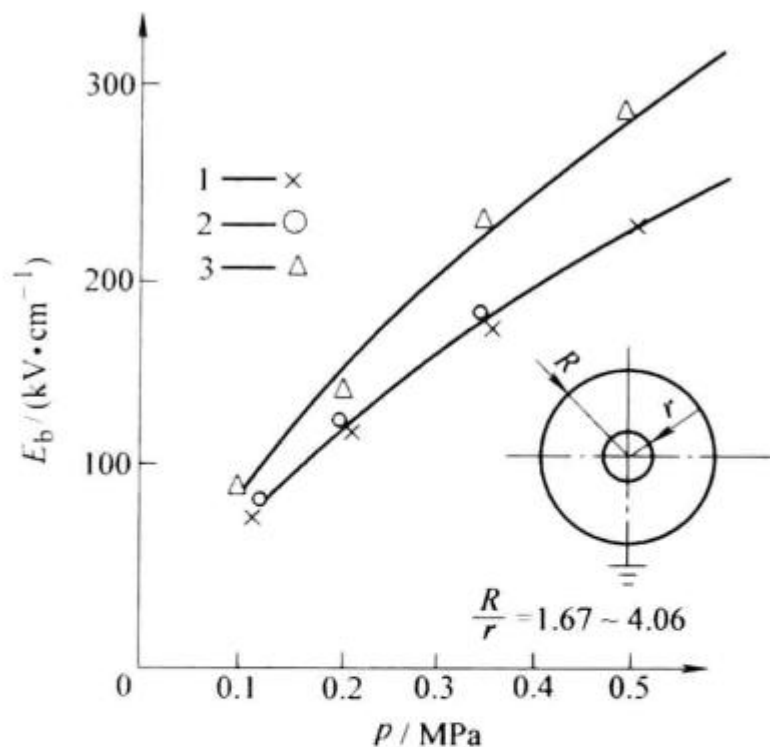


图 3-21 同轴圆柱电极中 SF_6 气体的击穿场强与气压的关系 ($t = 20^\circ\text{C}$)

试验点: 1—工频电压 1min (峰值)

2— $-190/3600\mu\text{s}$ 操作冲击波

3— $-1.2/500\mu\text{s}$ 雷电冲击波

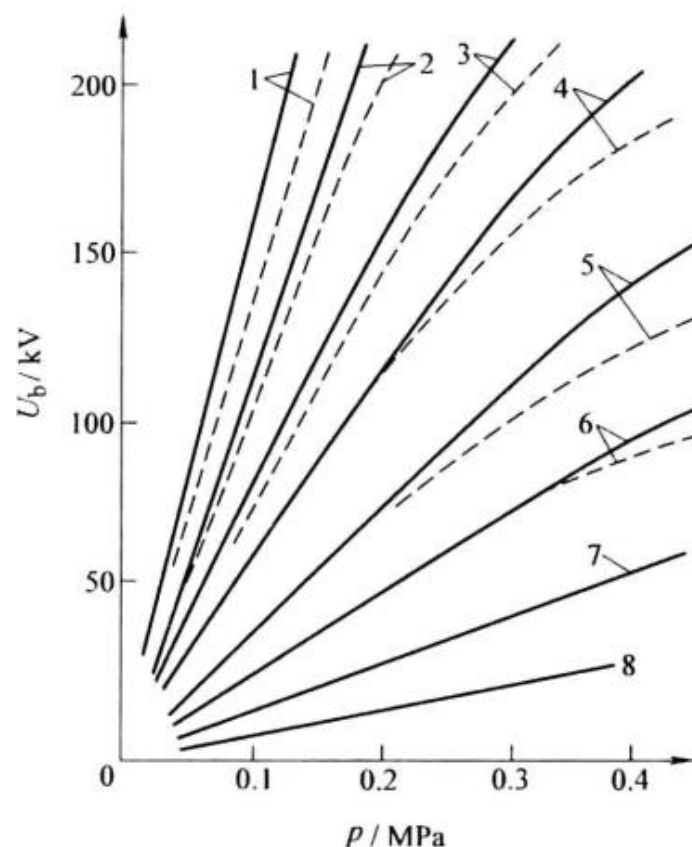


图 3-22 球-板间隙 (球半径为 15mm) 中 SF_6 气体的击穿电压

实线为正极性, 虚线为负极性

d 为间隙距离 1— $d = 20\text{mm}$ 2— $d = 15\text{mm}$ 3— $d = 10\text{mm}$

4— $d = 7.5\text{mm}$ 5— $d = 5\text{mm}$ 6— $d = 3\text{mm}$ 7— $d = 2\text{mm}$ 8— $d = 1\text{mm}$



3.4.2 极不均匀电场中的击穿

SF₆气体在极不均匀电场中的击穿存在异常：

- 1、随着气压的升高击穿电压并不总是增大的（驼峰现象）
- 2、在驼峰气压范围内雷电冲击击穿电压明显低于稳态击穿电压

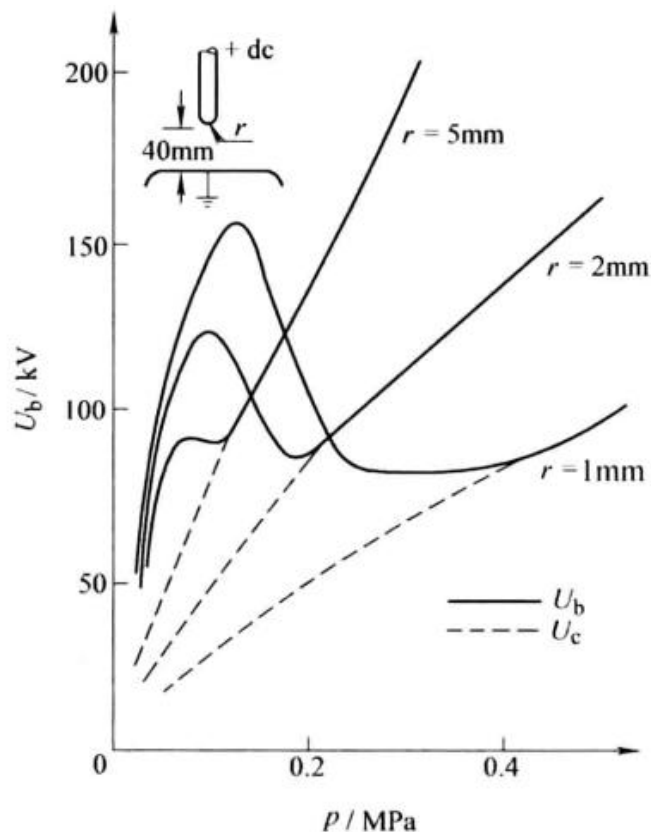


图 3-23 SF₆ 的直流电晕起始电压 U_c 和击穿电压 U_b 随气压 p 的变化

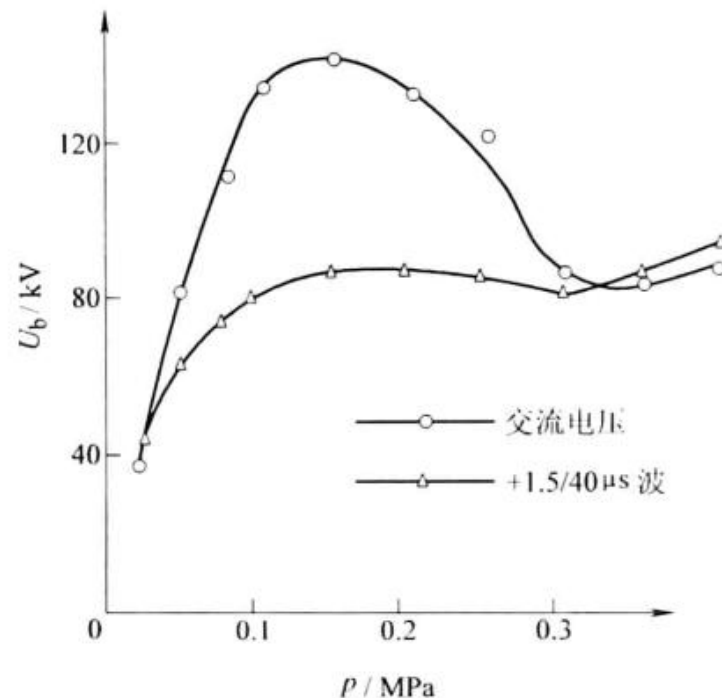


图 3-24 30mm 尖-球间隙中 SF₆ 的交流击穿电压（峰值）与正冲击击穿电压的比较（锥尖端部曲率半径为 1mm，球半径为 50mm）



3.4.3 影响击穿场强的因素

1、电极表面缺陷的影响

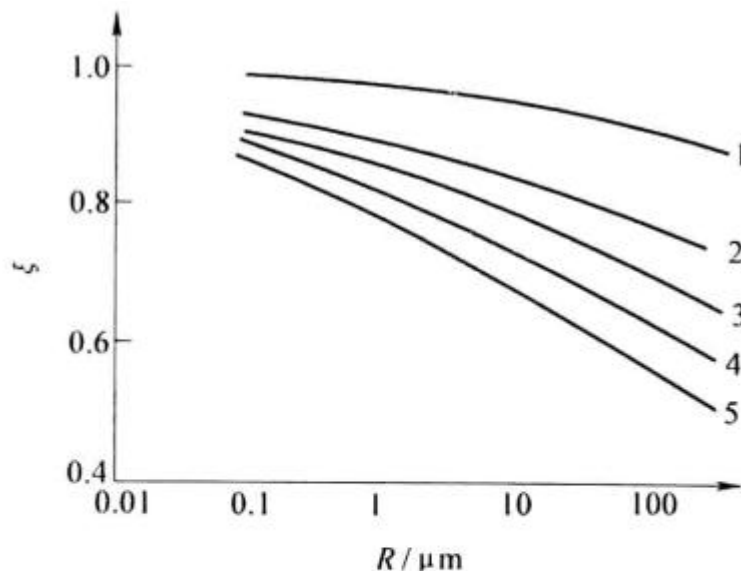


图 3-25 SF_6 中电极表面粗糙度系数 ξ 与电极表面粗糙度 R 的关系

1—0.05 MPa 2—0.1 MPa 3—0.15 MPa
4—0.25 MPa 5—0.4 MPa

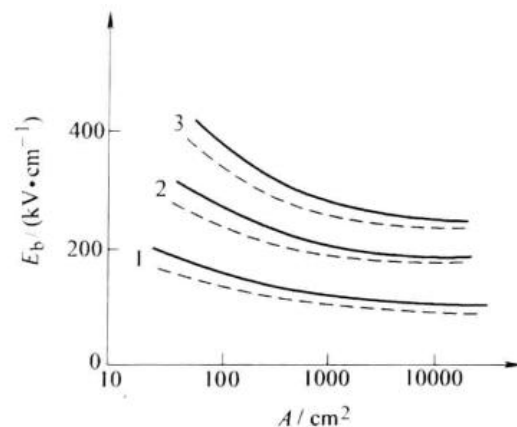


图 3-26 SF_6 中击穿场强与电极面积的关系

1—0.2 MPa 2—0.4 MPa 3—0.6 MPa
实线为 $R = 0.5 \mu\text{m}$ 虚线为 $R = 20 \mu\text{m}$

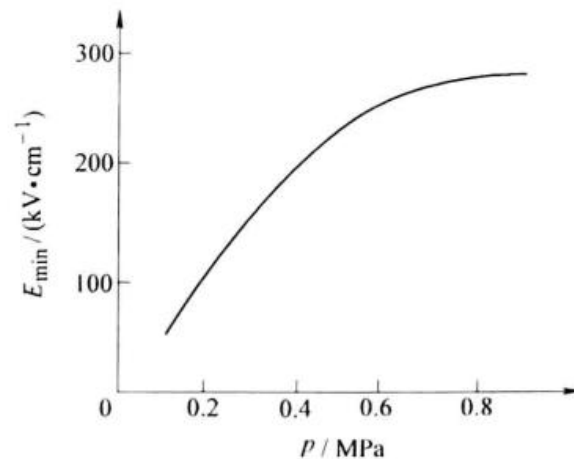


图 3-27 电极面积很大时 SF_6 的最小击穿场强与气压的关系



2、导电微粒的影响

3、固体介质表面状态的影响

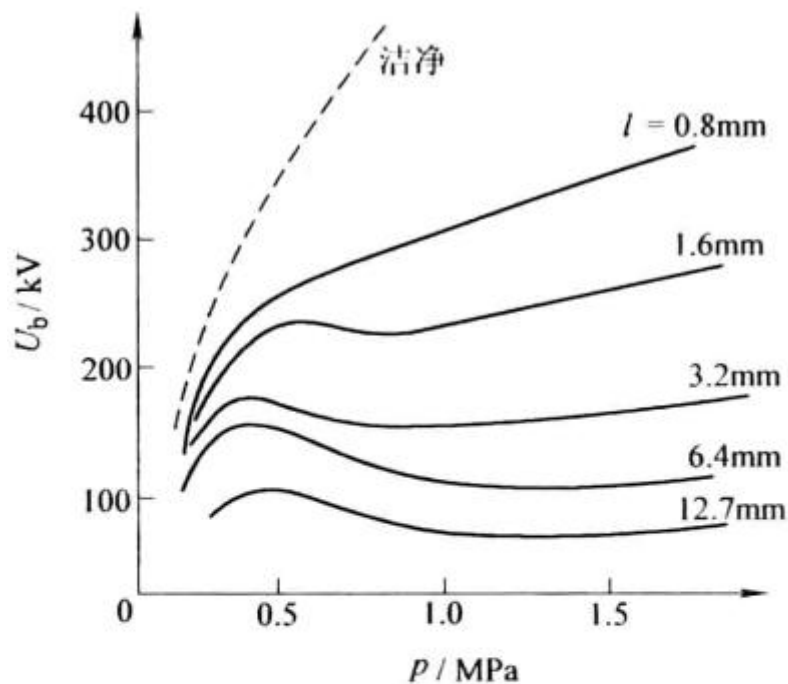


图 3-28 同轴圆柱电极 (150/250mm)
中由自由导电微粒引发的交流击穿电压
(有效值) 与气压的关系
实验所用铜导线直径为 0.4mm,
虚线表示无导电微粒情况



3.5 提高气体间隙击穿电压的措施

提高气体击穿电压的途径

The way to improve the gas breakdown voltage

➤ **改善电场分布，使之尽量均匀。**

改进电极形状；

消除电极表面毛刺；

改善电极的对称性；

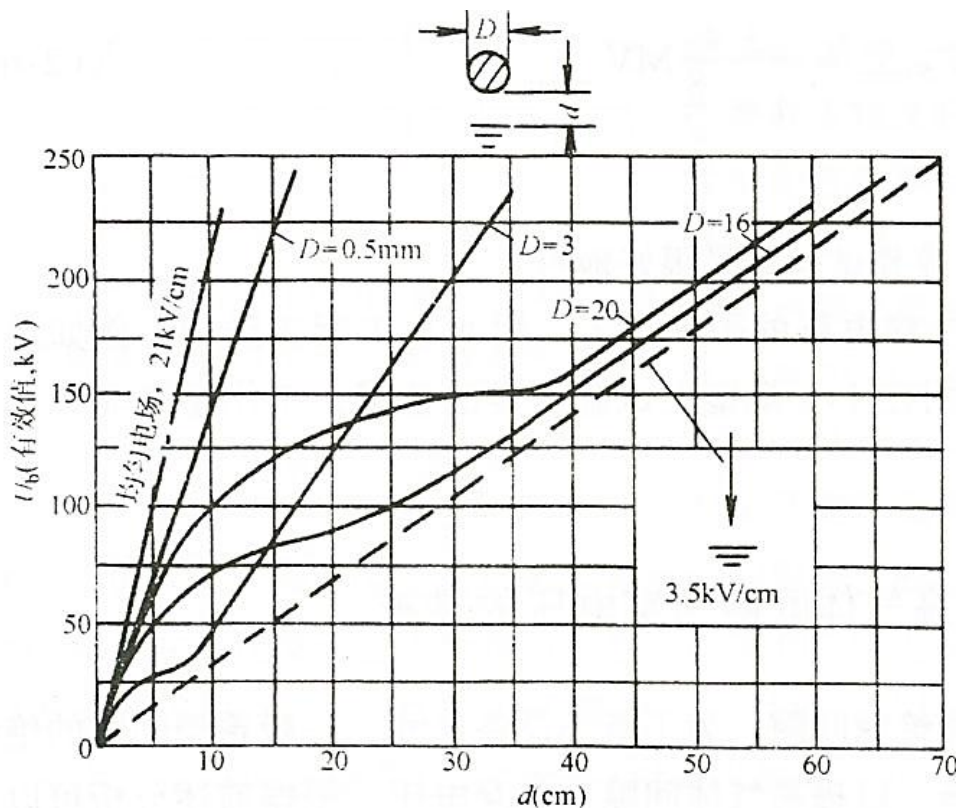
利用气体放电本身的空间电荷畸变电场；

➤ **利用其他方法（高气压/真空、电负性气体）来削弱气体中的电离过程。**





1) 利用空间电荷对电场的畸变作用: 细线效应 (Thin line effect)



导线——板空气间隙的工频击穿电压和
间隙距离的关系

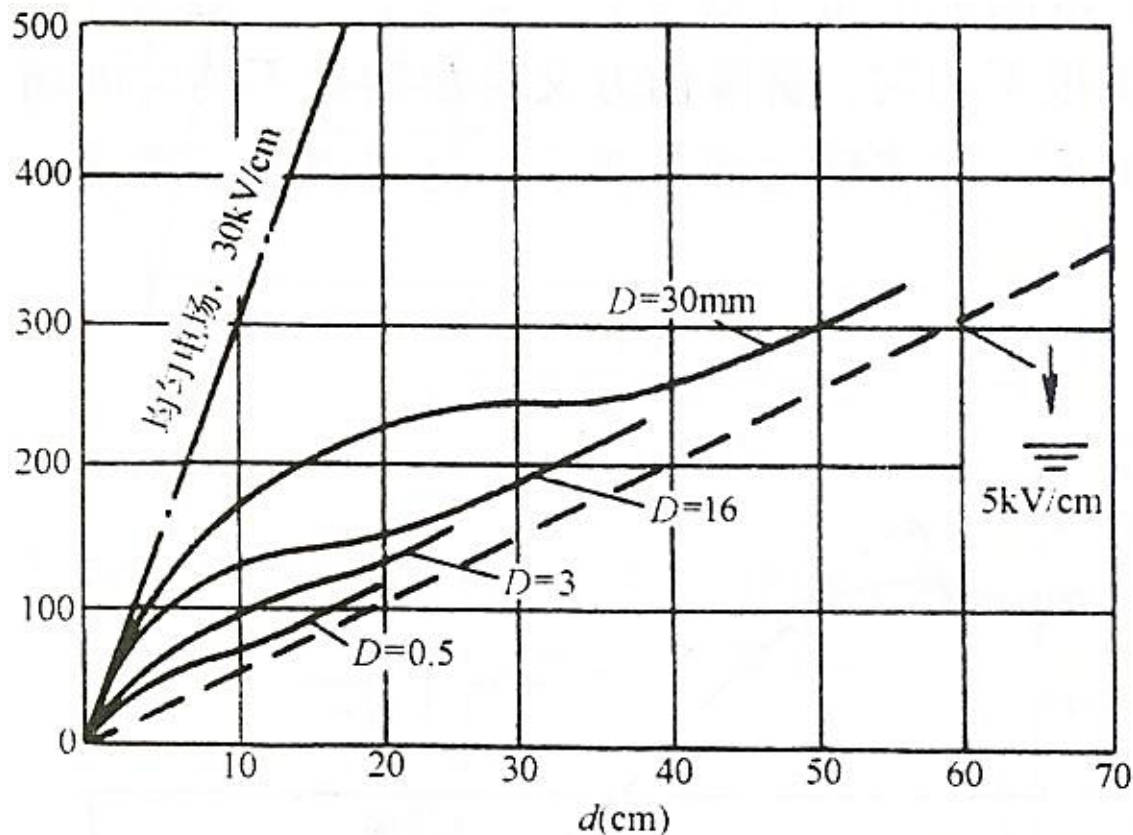
• 直线部分

• 导线的直径减小, 击穿电压的直线部分的陡度却大大增加。

• 细线效应的存在范围



雷电冲击电压下无细线效应



导线——板空气间隙的正极性雷电冲击
击穿电压和间隙距离的关系

原因:

这主要是因为雷电冲击电压作用**时间太短**, 来不及形成充分的空间电荷层的缘故。



2) 极不均匀电场中屏障的作用

什么是屏障效应? Barrier effect

在电场极不均匀的空气间隙中, 放入薄片固体绝缘材料(称为屏障, 例如纸或纸板), 在一定条件下, 可以显著提高间隙的击穿电压。

出现屏障效应的原因?

屏障效应不是由于屏障分担电压的作用而造成的。屏障本身的击穿电压没有重要意义。屏障的作用和电压种类(直流、交流、冲击)有关。



3) 高气压的采用 High atmospheric pressure

优点：提高绝缘能力

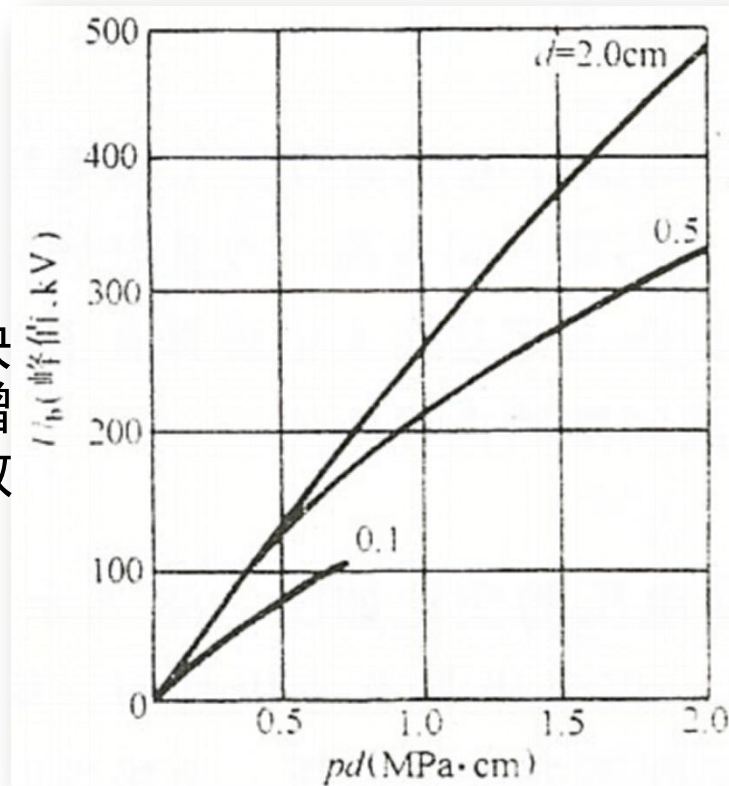
缺点：对机械强度提出了要求

均匀电场

当间隙距离不变时，击穿电压随压力提高而很快增加，但当压力增加到一定程度后，击穿电压增加的陡度逐渐减小，说明此后继续增加压力的效果就逐渐下降了。

不均匀电场

- 提高气压后，也能提高间隙击穿电压
- 在高气压，电场不均匀程度对击穿电压的影响比在大气压下显著得多，不均匀程度增加，击穿电压将剧烈降低。



均匀电场中不同间隙距离下
空气的击穿电压和 pd 的关系



4) 高介电强度气体的采用

表 2-8

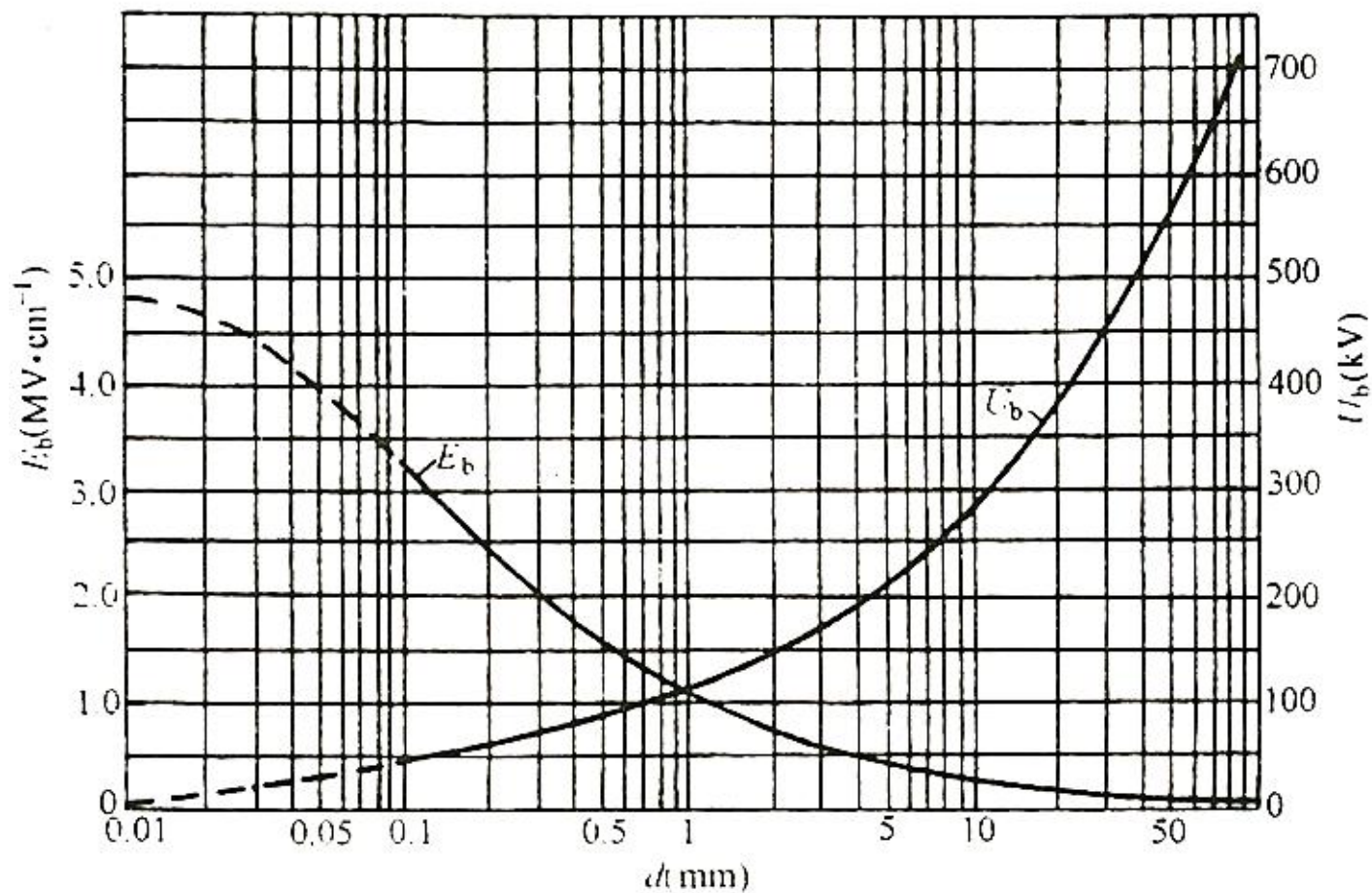
几种气体的相对介电强度

气 体	化学组成	分子量	相对介电强度	液化温度 (℃)
氮	N_2	28	1.0	-195.8
二氧化碳	CO_2	44	0.9	-78.5
六氟化硫	SF_6	146	2.3~2.5	-63.8
氟利昂	CCl_2F_2	121	2.4~2.6	-28
四氯化碳	CCl_4	153.8	6.3	76



5) 高真空的采用

*真空放电机理请参阅其它教材



真空中直流电压下，球板间隙的击穿电压及击穿场强和间隙距离的关系



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

本部分内容结束！

