



## 第2章 不同电压形式下空气的绝缘特性

- 2.1 电场分布的分析与电场调整
- 2.2 持续作用电压下空气的绝缘特性
- 2.3 雷电冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.4 操作冲击电压下空气的绝缘特性
- 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 本章核心概念：

高场强与高电压、非均匀场、电场分布的调整、雷电与操作冲击电压、50%放电电压、伏秒特性、空气的电气强度、高真空绝缘、SF<sub>6</sub>绝缘

## 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

- 汤逊理论建立了放电起始与电场强度的关系！

某处场强超过介质耐受值，则该处发生碰撞电离、产生放电

需要放电的电场调控：如高压电除尘、静电喷涂等

不需要放电的电场调控：各类高压输变电设备，如GIS

需要从不放电到突然放电的电场调控：如场畸变开关

各类放电过程的分析：如电晕放电、极性效应的分析

各类绝缘介质的挑选，如SF<sub>6</sub>替代气体的寻找

## 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 2.5.1 改进电极形状

改善电场结构，抑制放电发展

对稍不均匀场：

增大电极曲率半径，提高电场均匀程度，提高间隙击穿电压；

对极不均匀场：

改变电极形状，尽量避免不对称电场，提高间隙击穿电压；

或增大电极曲率半径，提高电晕起始电压、减少电晕（对击穿电压影响不大）

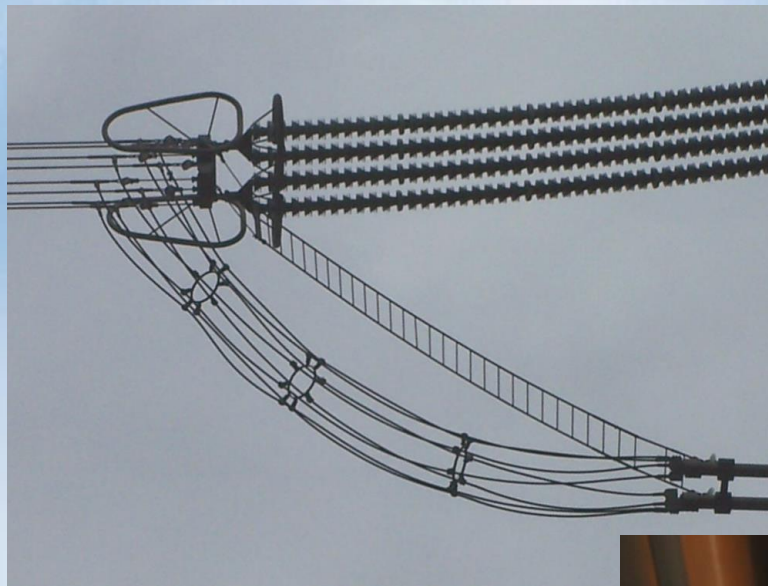
对需要降低放电电压、增加放电效果的则反之



## 加大高场强电极的曲率半径 避免电晕的产生







调整电场分布、  
控制局部高场强

减小高场强电极的曲率半径  
诱发电晕更早发生





用特斯拉变压器进行的放电表演  
(希望得到尽可能长的放电火花)





用特斯拉变压器进行的放电表演  
(希望得到尽可能长的放电火花)



身穿防护服的小提琴演奏者

希望得到尽可能长的放电火花

巴黎时装秀上，开场身着金属网衣（法拉第笼）的模特与模拟闪电（特斯拉线圈）起舞



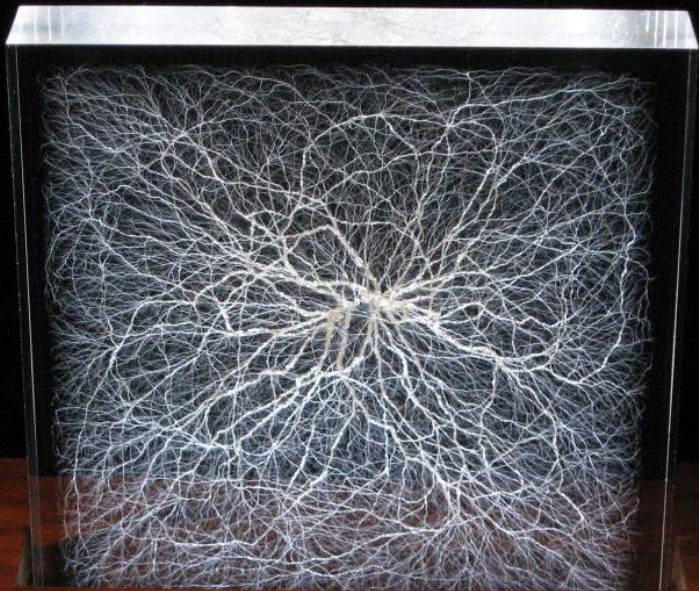
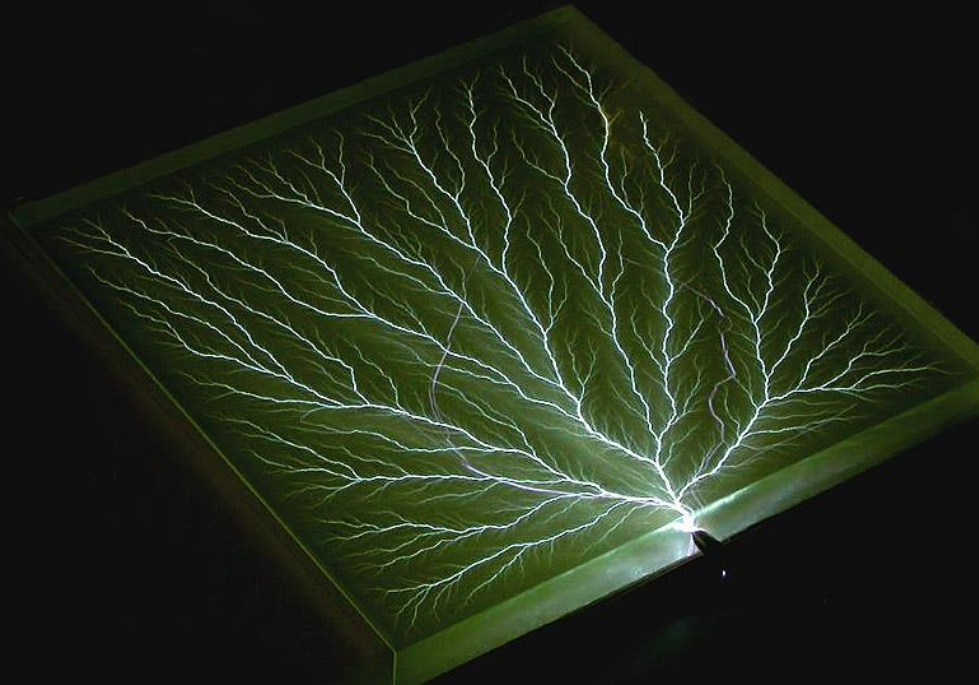




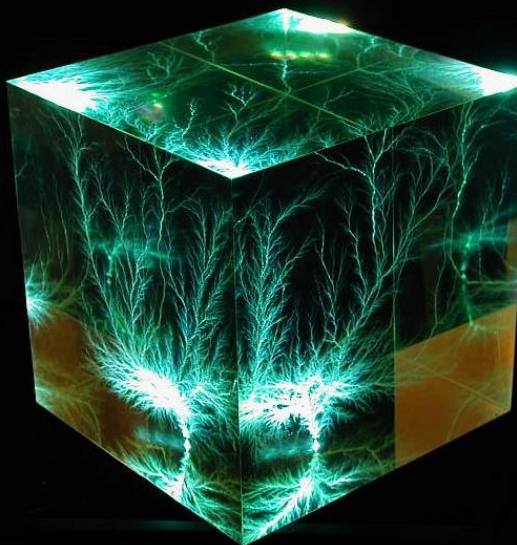
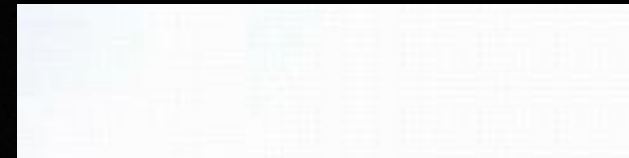
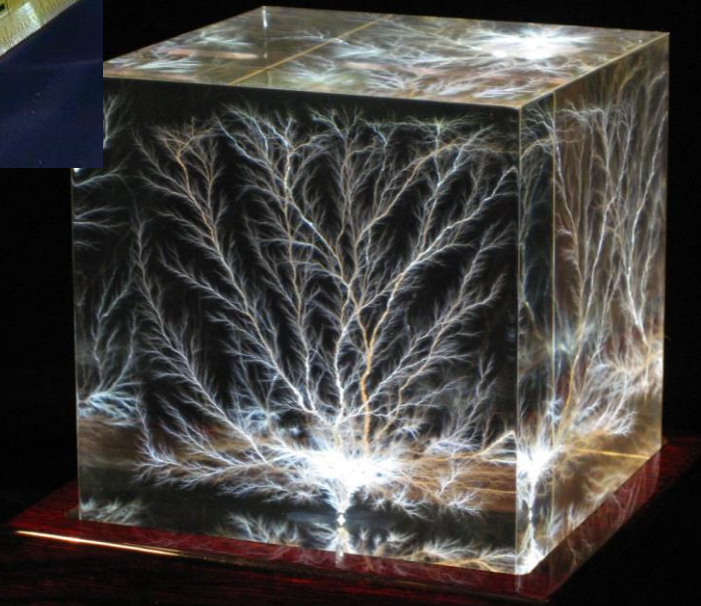
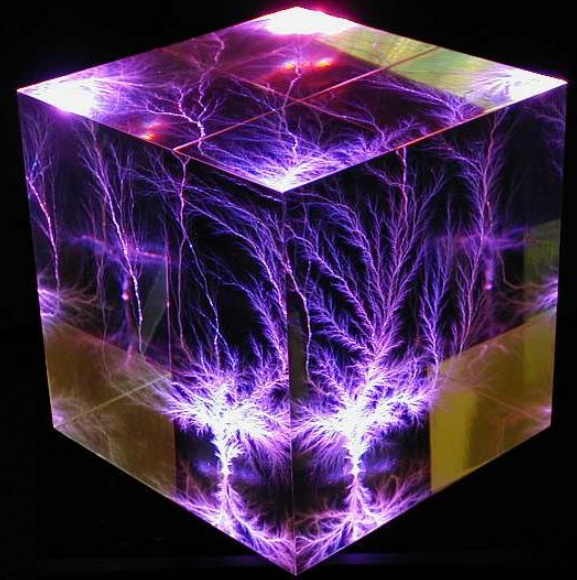
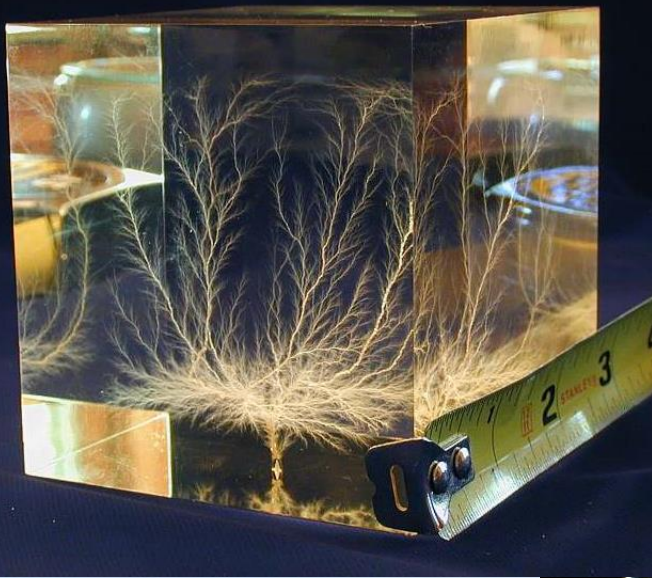
澳大利亚彼得·特伦用50万伏电压，创造出现代版《思考者》：  
陷入沉思状态的“思考者”释放出智慧火花



Lichtenberg figure







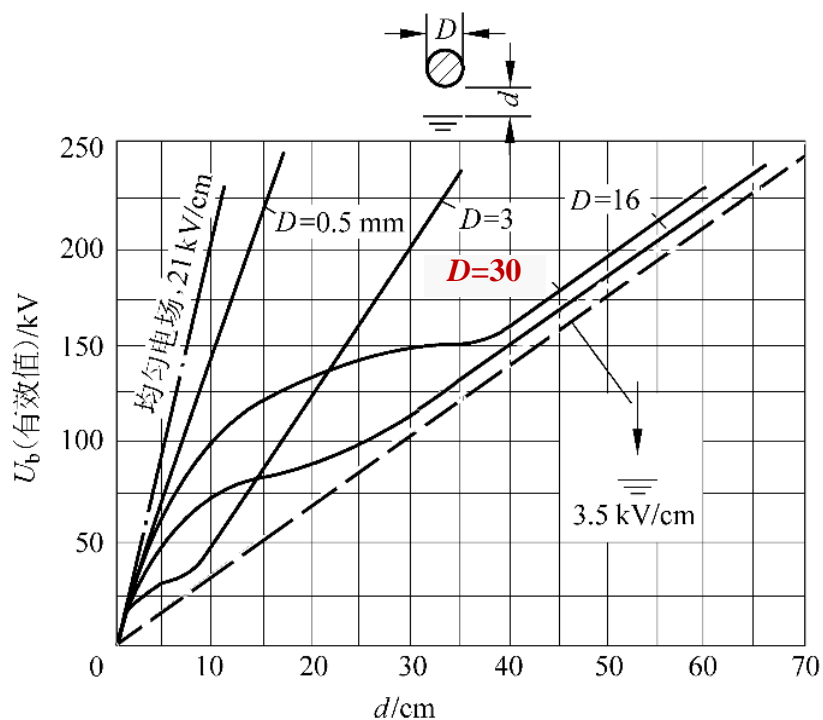
Lichtenberg  
Figure  
Sculpture



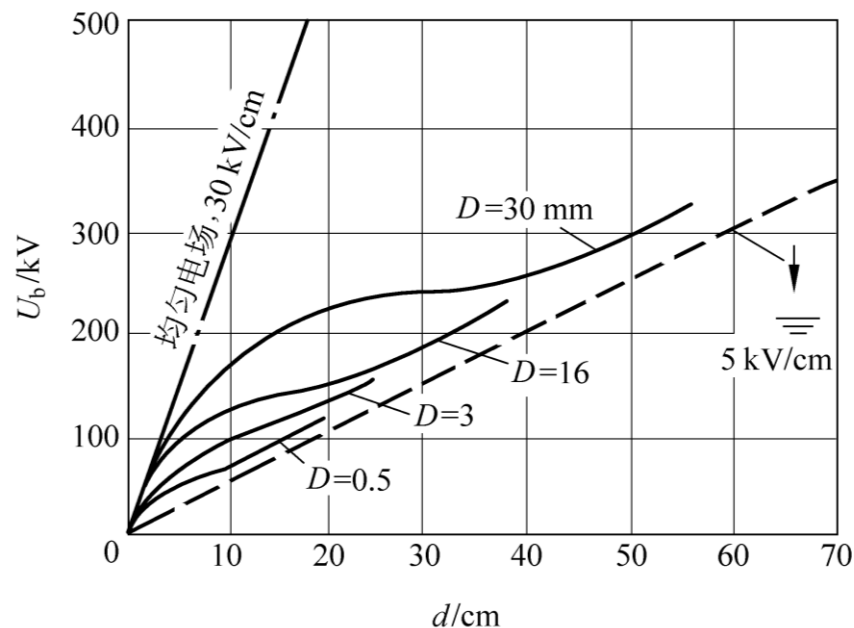


## 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 2.5.2 利用空间电荷



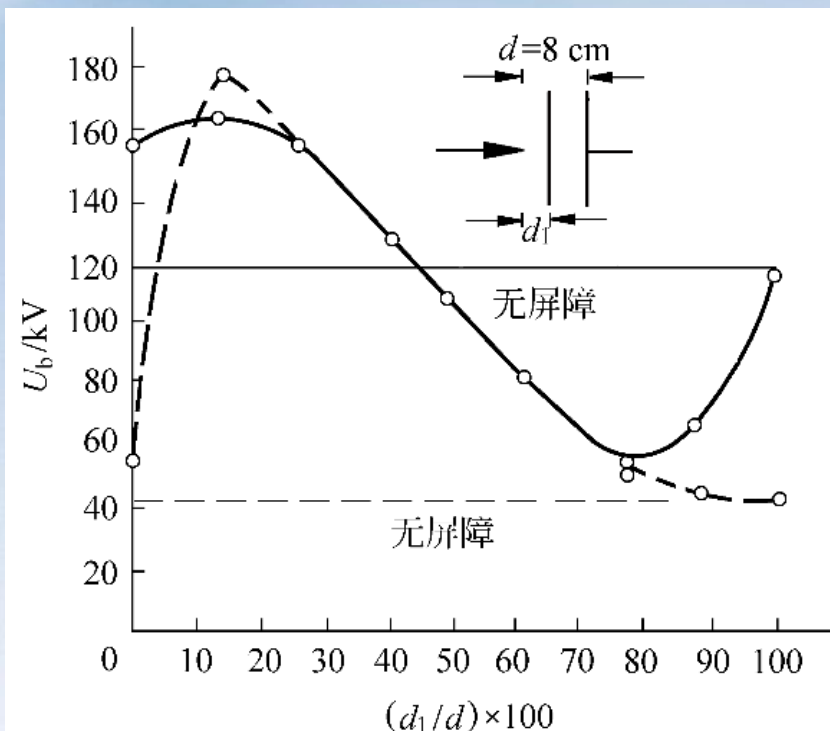
导线-平板空气间隙的工频  
击穿电压与间隙距离



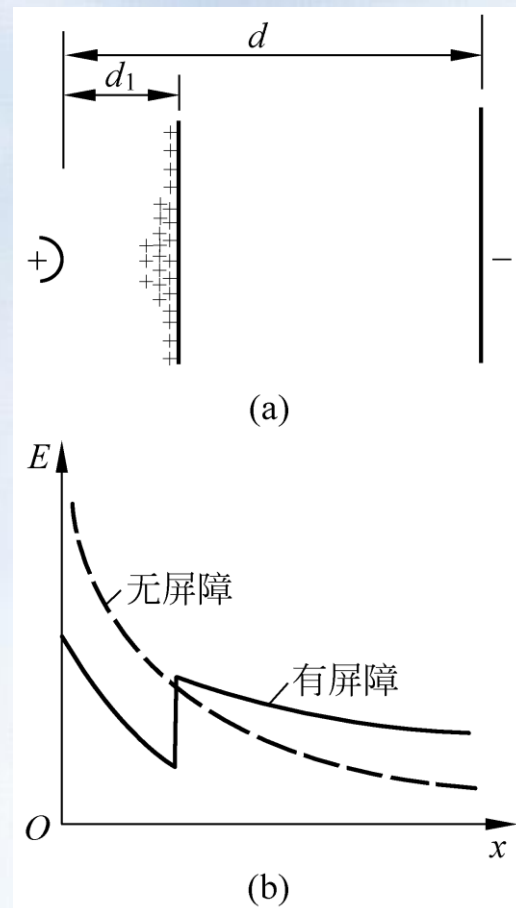
导线-平板空气间隙的雷电  
冲击击穿电压与间隙距离

## 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 2.5.3 极不均匀场中屏蔽的采用



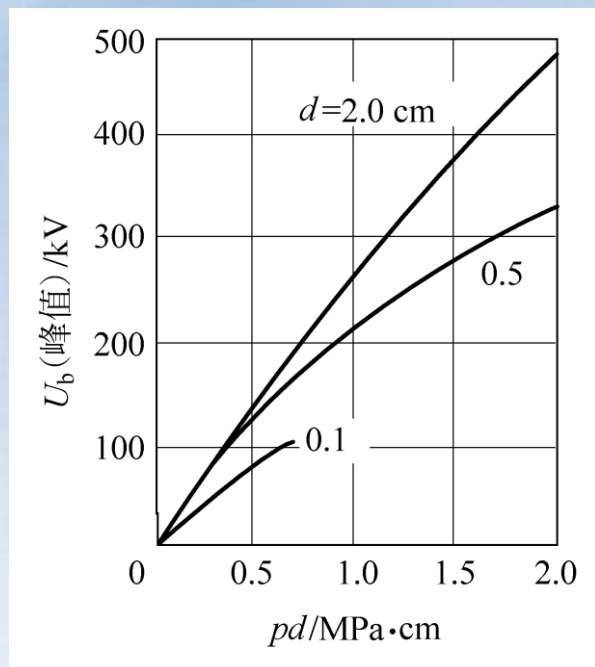
屏障对正尖-板空气间隙  
直流击穿电压的影响  
(实线-负极性；虚线-正极性)



屏障对正尖-板间隙中  
电场分布的影响

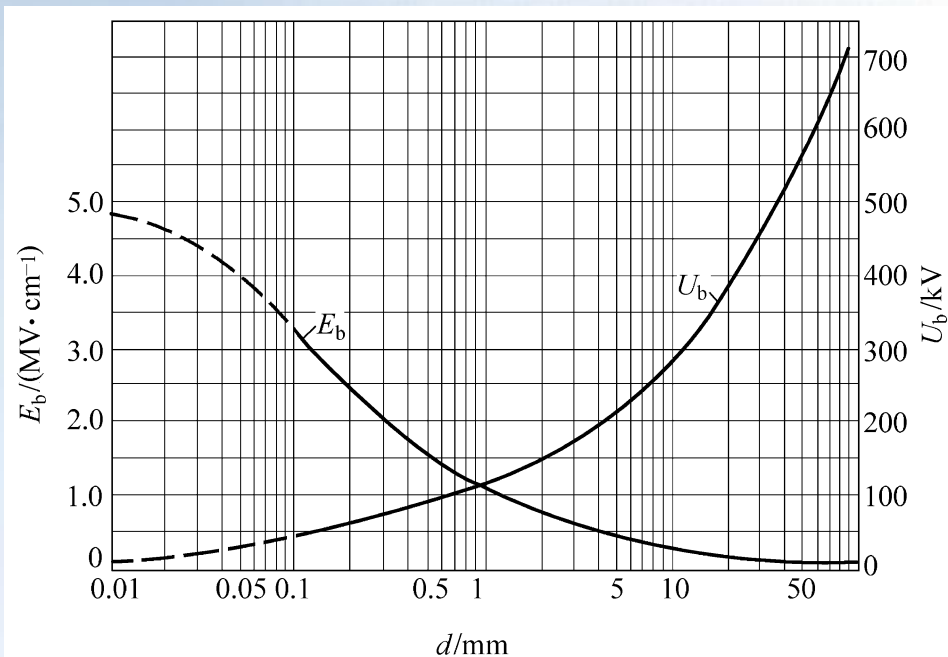
## 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 2.5.5 高气压的采用



均匀电场中不同间隙距离下  
空气的击穿电压和 $pd$ 的关系

### 2.5.6 高真空的采用



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



## 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 2.5.6 高真空的采用

真空断路器以往用在10-35kV  
现在向高电压等级发展



### 8VN1 – 145kV Blue GIS

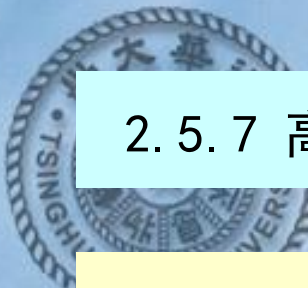
- 世界首台采用真空单断口145kV灭弧室+洁净空气绝缘技术的145kV GIS
- 采用非常规电子式互感器能进一步优化设备体积，减少占地空间
- 首台设备已于2019年9月交付给挪威客户，目前有来自美国、西班牙和挪威等国的25台在手订单

## 2.5 提高气体间隙击穿电压的措施

### 2.5.6 高真空的采用

西门子245kV/63kA  
和170kV/50kA  
单断口真空灭弧室  
2018在CIGRE展出





### 2.5.7 高电气强度气体 ( $\text{SF}_6$ ) 的采用

六氟化硫 $\text{SF}_6$ 、四氯化碳 $\text{CCl}_4$ 、氟利昂 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ 等含卤族元素的气体化合物，通常称为高电气强度气体。

#### 电力工业应用最多的为什么是 $\text{SF}_6$ ?

- 当初的几种非 $\text{SF}_6$ 气体
- $\text{SF}_6$ 的基本物理特性
- $\text{SF}_6$ 优异的电气绝缘性能、灭弧能力、易于液化运输
- $\text{SF}_6$ 最大的问题

想想汤逊放电理论，哪些气体的电气强度更高、绝缘性能更好？

如何利用汤逊放电理论寻找电气性能更好的新气体？



### 2.5.7 高电气强度气体 (SF<sub>6</sub>) 的采用

六氟化硫SF<sub>6</sub>、四氯化碳CCl<sub>4</sub>、氟利昂CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>等含卤族元素的气体化合物，通常称为高电气强度气体。

表2-1 几种气体的相对电气强度

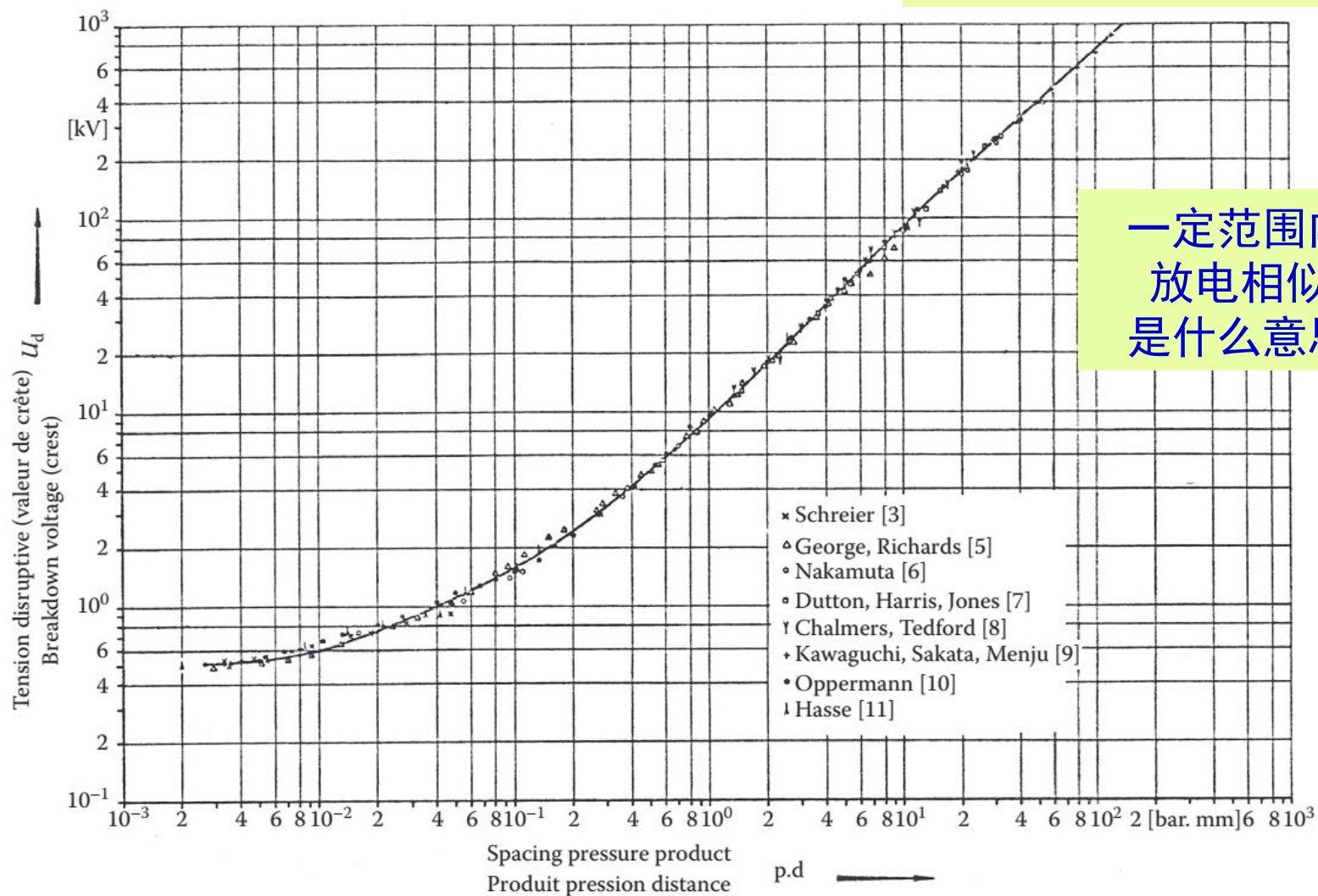
气体	N <sub>2</sub>	SF <sub>6</sub>	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	CCl <sub>4</sub>
相对电气强度	1.0	2.3 ~ 2.5	2.4 ~ 2.6	6.3
1大气压下液化温度(°C)	-195.8	- 63.8	- 28	76

SF<sub>6</sub>首次合成于1900年，是一种无色、无味、无毒、非燃性的惰性化合物，没有腐蚀作用，加热到500°C仍不会分解。在中等压力下，SF<sub>6</sub>气体可以被液化，便于贮藏和运输。 SF<sub>6</sub>电气强度高、灭弧性能好，但价格高，且GWP值太高22800，对设备密封要求高。

60年代以后广泛用于大容量高压断路器、高压充气电缆、高压电容器、高压充气套管以及全封闭组合电器GIS中，设备尺寸及变电站用地大为缩小。

## 2.5.7 高电气强度气体 (SF<sub>6</sub>) 的采用

巴申曲线的表达方式  
有什么好处？



一定范围内的  
放电相似性  
是什么意思？

FIGURE 4.30 Paschen's curves in SF<sub>6</sub>. (From Dakin, T.W. et al., *Electra*, 32, 61, 1974.)

## 2.5.7 高电气强度气体 (SF<sub>6</sub>) 的采用

巴申曲线的表达方式  
有什么好处？

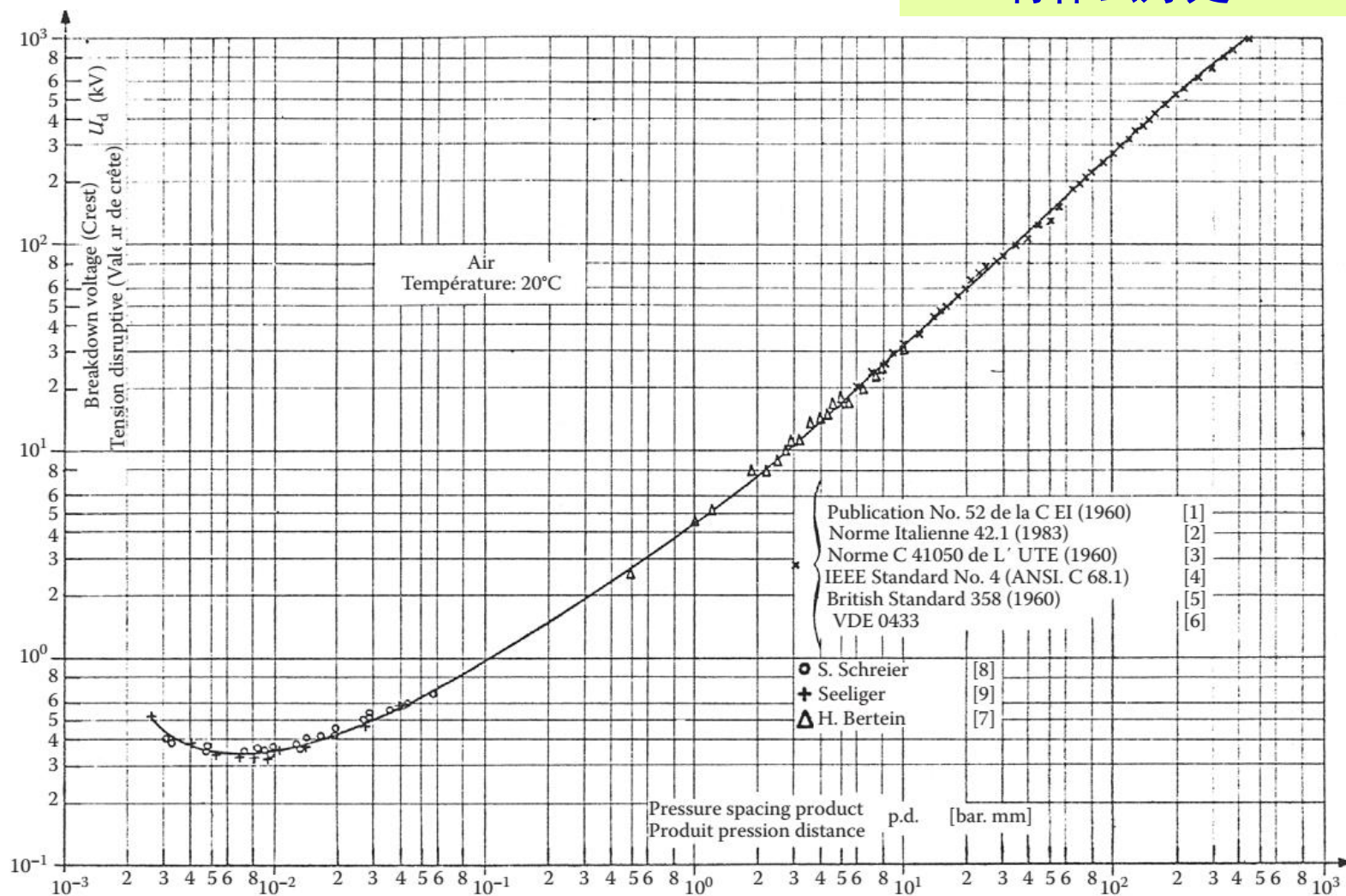


FIGURE 4.29 Paschen's curves in air. (From Dakin, T.W. et al., *Electra*, 32, 61, 1974.)



## 2.5.7 高电气强度气体 (SF<sub>6</sub>) 的采用

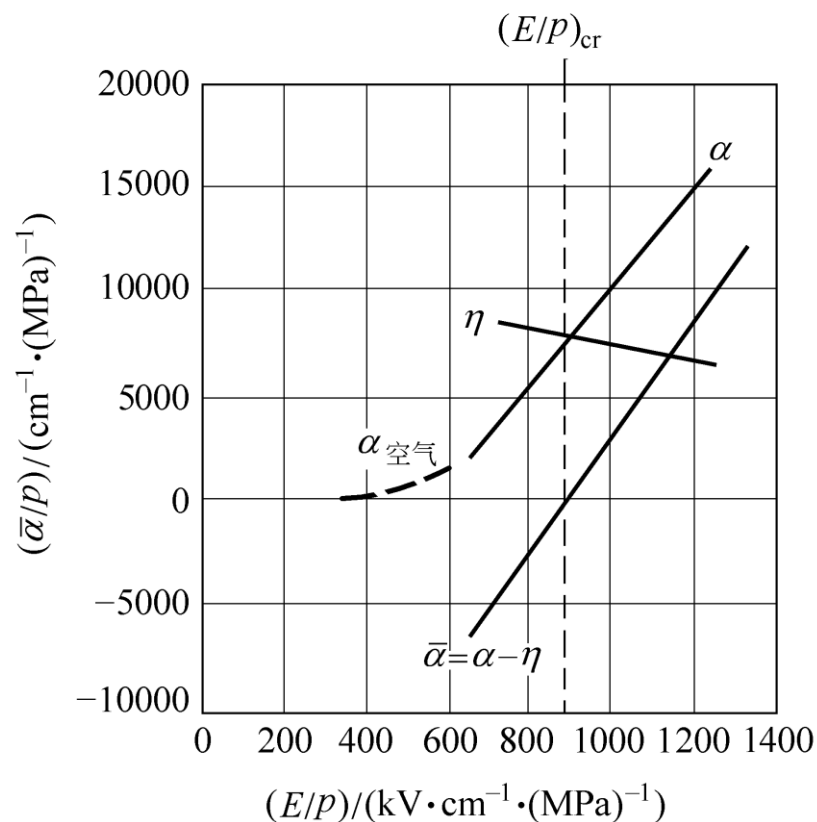
电负性气体为何电气强度高？

$\eta$  电子附着系数：一个电子在电场方向单位长度行程内可能被吸附的次数

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta$$

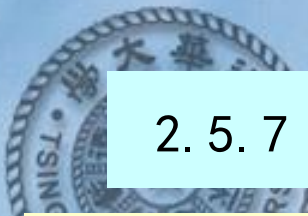
( $E/p$ )若低于临界值 ( $E/p$ )<sub>cr</sub> =  
885 kV/(cm·MPa)

则有效电子碰撞电离系数为负  
放电发展不起来



SF<sub>6</sub>的 $\bar{\alpha}/p$ 与 $E/p$ 关系

SF<sub>6</sub>的碰撞电离对电场强度的敏感性远超空气！



## 2.5.7 高电气强度气体（SF<sub>6</sub>）的采用

卤化物气体（电负性气体）具有高电气强度（与空气相比）的原因：

- （1）气体中含有卤族元素，具有很强的电负性，气体分子容易和电子结合成为负离子，从而削弱了电子的碰撞电离能力，同时又加强了复合过程。
- （2）气体分子量大，分子直径大，碰撞截面大，电子在气体中的自由行程大大缩短，不易积聚能量，从而减少了电子碰撞电离能力。
- （3）电子在和这些气体的分子相遇时，还易引起分子发生极化等过程，增加电子的能量损失，从而减弱其碰撞电离能力。

这也是探索六氟化硫替代气体的原理（分子计算软件可以计算了！）

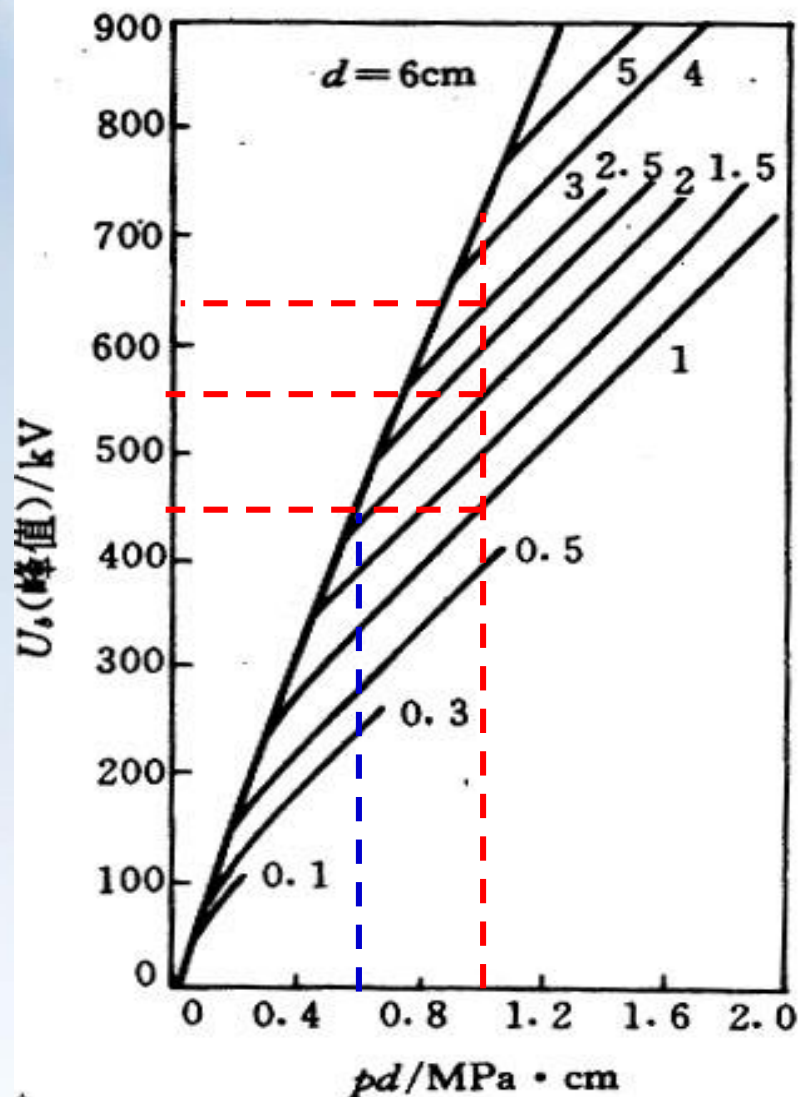
电负性气体分子量大，因此正、负离子的迁移率也远低于空气。

## 2.5.7 高电气强度气体 ( $\text{SF}_6$ ) 的采用

- $pd$  乘积相同的不同间隙，在气体压力较大时击穿电压不再相同，会偏离巴申曲线
- 电场不均匀程度对 $\text{SF}_6$ 气体击穿电压的影响远大于对空气间隙的影响

$\text{SF}_6$ 的间隙击穿电压与 $pd$ 的关系

偏离巴申曲线后，  
放电相似性怎么样了？





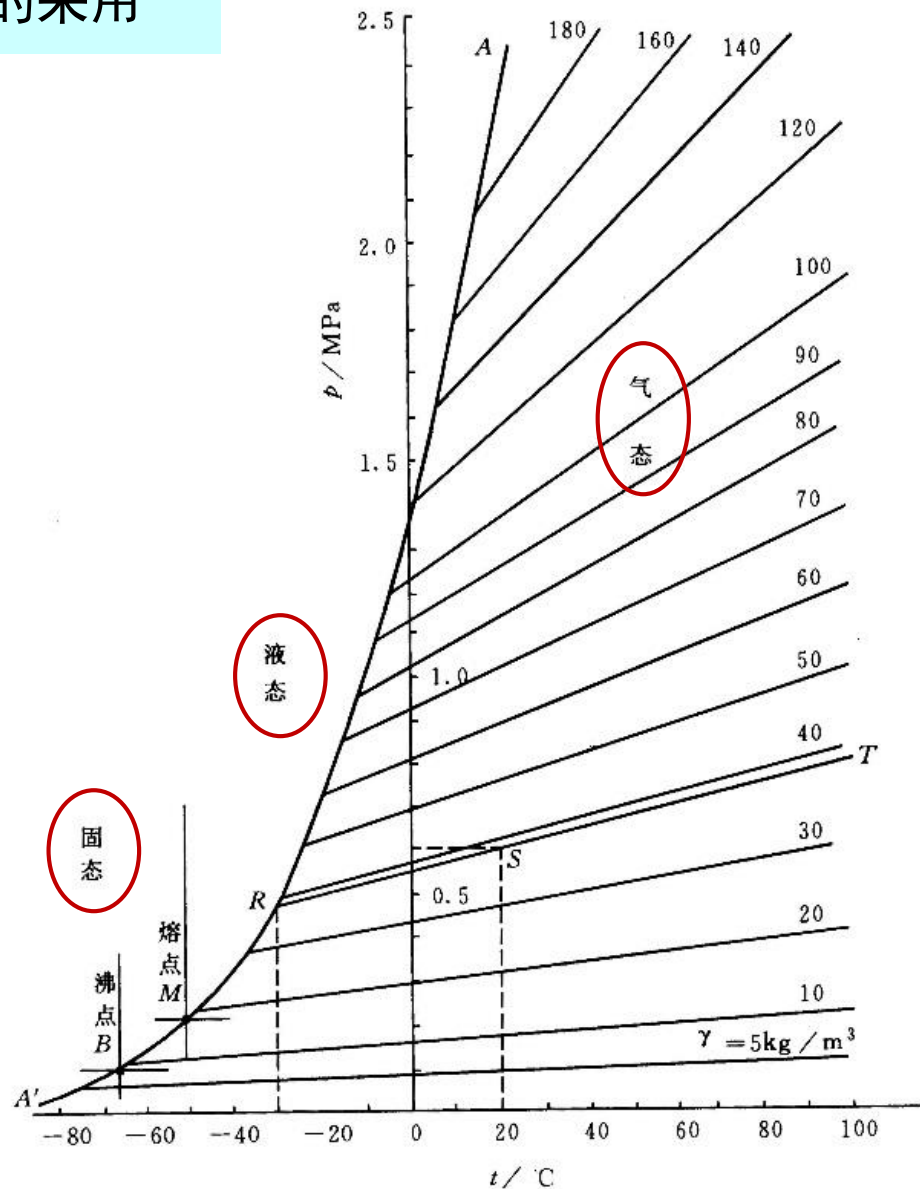
## 2.5.7 高电气强度气体 ( $\text{SF}_6$ ) 的采用

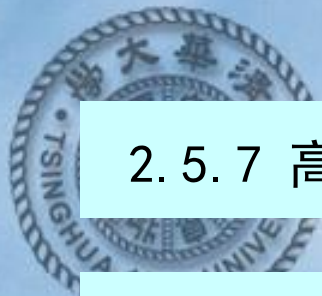
在中等压力下， $\text{SF}_6$  气体可以被液化，便于贮藏和运输。

高电压设备制造时充入的  $\text{SF}_6$  越多，密度和压力越大，设备能够保持绝缘性能的最低环境温度反而越高。

液化是  $\text{SF}_6$  使用中必须注意的另一重要问题， $\text{SF}_6$  的使用压力不宜过高

$\text{SF}_6$  的气体状态参数





## 2.5.7 高电气强度气体 ( $\text{SF}_6$ ) 的采用

### $\text{SF}_6$ 最大的问题

$\text{SF}_6$ 是1997年《京都议定书》被禁止排放的6种温室气体之一，其全球变暖潜能(Global Warming Potential)GWP值是6种禁排气体中最高的，其20年、50年100年的GWP值高达16300、22800和32600。由于其极高的化学稳定性，在大气中的留存时间长达3200年。

因此， $\text{SF}_6$ 设备对密封要求极严，对设备管理要求很高。

各国近年不仅积极探索降低 $\text{SF}_6$ 泄漏、减小 $\text{SF}_6$ 设备体积以少用 $\text{SF}_6$ 的措施，而且积极探索 $\text{SF}_6$ 替代方案，即采用混合气体、GWP值很低的非 $\text{SF}_6$ 气体、或真空绝缘、高气压绝缘的高电压等级设备等方案。

仍然是汤逊理论碰撞电离的思路！

## SF<sub>6</sub>最大的问题

全球大气中 SF<sub>6</sub> 气体浓度 1973 - 2008 增加了 1 倍，2010 - 2015 增加了 20%。  
据不完全统计，2010 年全球电力行业 SF<sub>6</sub> 气体使用量超过 10000 吨。  
以近 20 年投运的设备估计，每年泄漏的 SF<sub>6</sub> 大约相当于 2350 万吨 CO<sub>2</sub> 气体

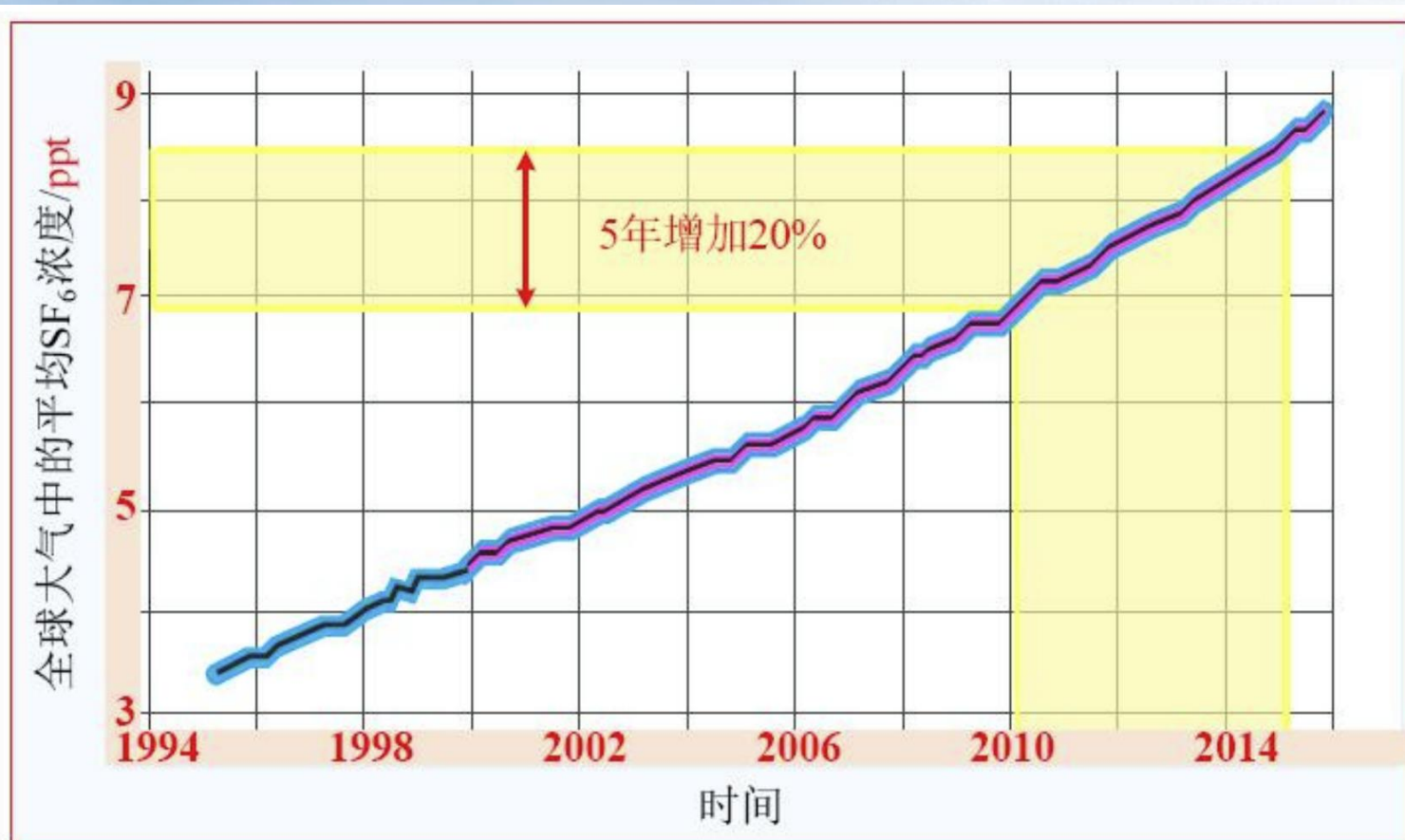


图 1.1 全球大气中的 SF<sub>6</sub> 气体浓度

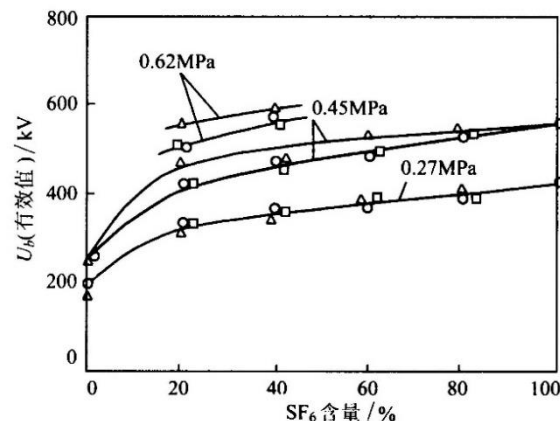


## 2.5.7 高电气强度气体 ( $\text{SF}_6$ ) 的采用

**(1)  $\text{SF}_6$ 混合气体:** 采用小比例 $\text{SF}_6$ 与其他气体混合, 尽量减少 $\text{SF}_6$ 的用量

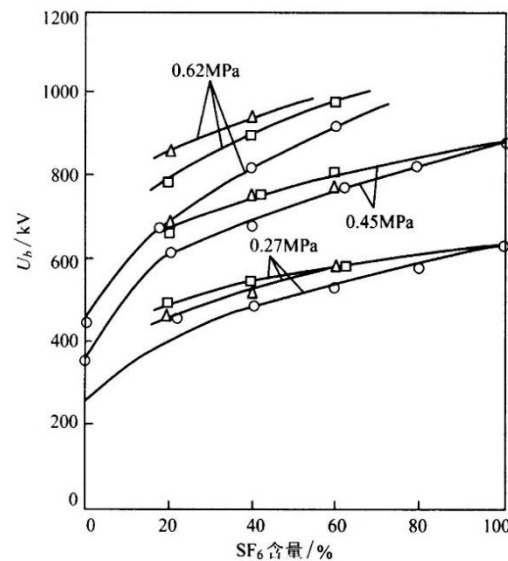
图2-46 稍不均匀场中 $\text{SF}_6$ 含量改变时 $\text{SF}_6$ 混合气体击穿电压的变化

(a) 工频击穿电压



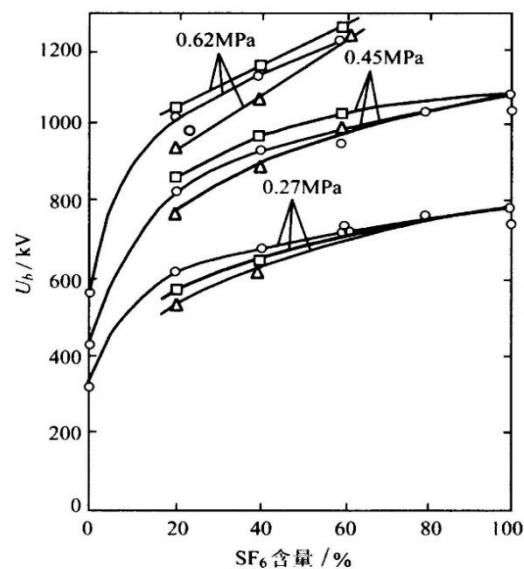
(a)

(b) 操作冲击( $-250/2500\mu\text{s}$ )击穿电压



(b)

(c) 雷电冲击( $-1.2/50\mu\text{s}$ )击穿电压

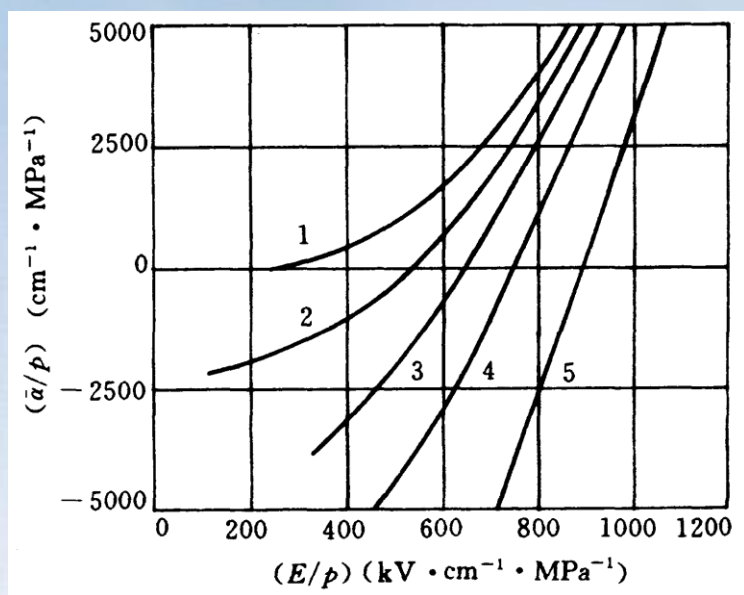


(c)

- —  $\text{N}_2$ - $\text{SF}_6$ ;
- — 空气- $\text{SF}_6$ ;
- △ —  $\text{CO}_2$ - $\text{SF}_6$

## 2.5.7 高电气强度气体 ( $\text{SF}_6$ ) 的采用

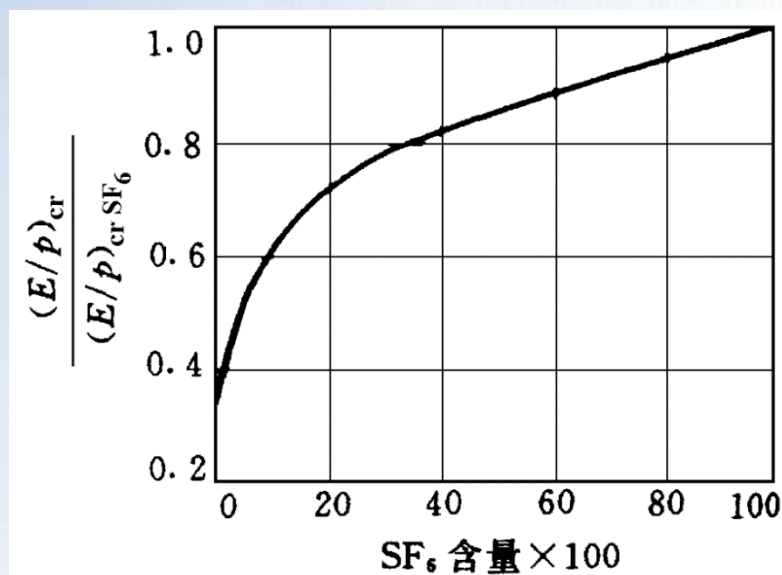
**(1)  $\text{SF}_6$ 混合气体:** 采用小比例 $\text{SF}_6$ 与其他气体混合, 尽量减少 $\text{SF}_6$ 的用量



$\text{SF}_6$ - $\text{N}_2$ 混合气体的  $\bar{\alpha}/p$  与  $E/p$  的关系

$\text{SF}_6$ 含量:

1-0%; 2-10%; 3-25%; 4-50%; 5-100%



$\text{SF}_6$ - $\text{N}_2$ 混合气体的  $(E/p)_{\text{cr}}$  与  $\text{SF}_6$ 含量的关系

## 少用或不用SF<sub>6</sub>的几种选项：

- SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体绝缘、压缩空气绝缘、真空断路器、替代气体

## 筛选SF<sub>6</sub>替代气体的基本方向：

- 从电负性出发
- 电气绝缘性能、熄灭电弧性能
- 液化温度、放电之后的稳定性、毒性、
- 尽量低的GWP值， G3(Green Gas for Grid)气体
- 新型气体或混合气体尽量与SF<sub>6</sub>电气性能基本相当



## 2.5.7 高电气强度气体 ( $\text{SF}_6$ ) 的采用

### (2) $\text{SF}_6$ 替代气体:

完全不用  $\text{SF}_6$ ，而是采用GWP值比  $\text{SF}_6$  低很多的其他人工合成气体。

希望具有低GWP值、高电气强度、高导热性、低液化温度、低毒性、良好的灭弧性能。

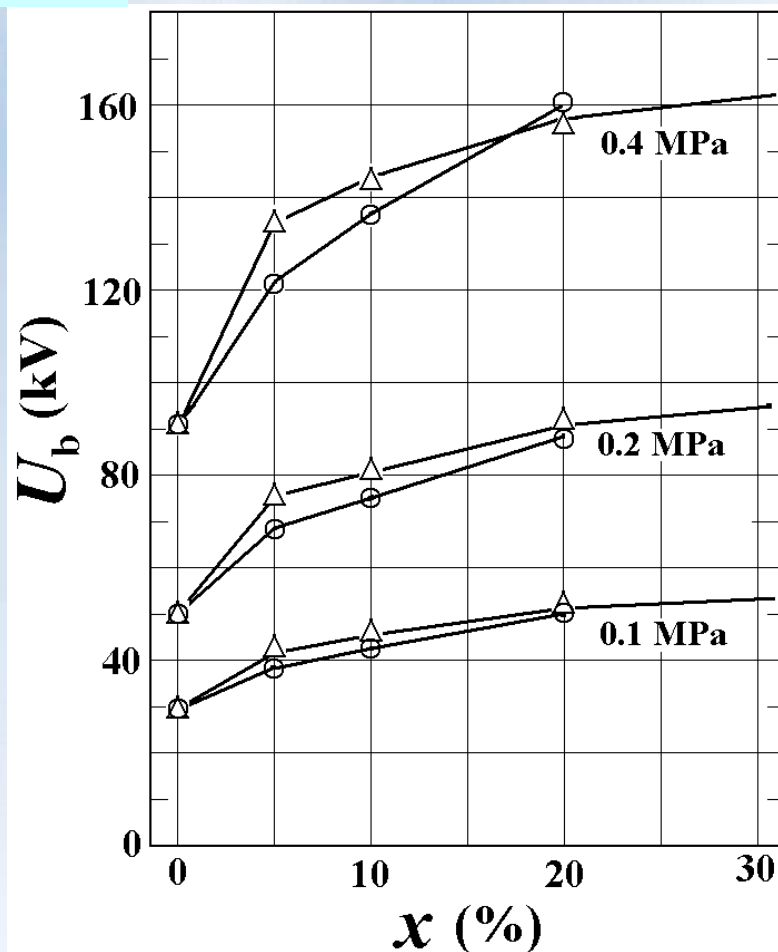
八氟环丁烷 ( $\text{c-C}_4\text{F}_8$ )，液化温度高，价格贵，GWP8700

八氟丙烷 ( $\text{C}_3\text{F}_8$ )

六氟乙烷 ( $\text{C}_2\text{F}_6$ )

三氟碘甲烷 ( $\text{CF}_3\text{I}$ )

G3 (Green Gas for Grid) 气体等



混合气体工频击穿电压  $U_b$  与  
气体中  $\text{C}_4\text{F}_8$  或  $\text{SF}_6$  含量  $x$  的关系

○ —  $\text{C}_4\text{F}_8\text{-N}_2$ ; △ —  $\text{SF}_6\text{-N}_2$



## 几种SF<sub>6</sub>替代气体的 理化参数

气体	分子结构	GWP	大气寿命/年	液化温度/°C	相对介电强度
CF <sub>3</sub> I		1~5	0.005	- 22.5	1.2~1.3
c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>		8,700	3,200	- 8	1.3~1.4
C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O		1	0.042	26.5	2
C <sub>6</sub> F <sub>12</sub> O		1	0.014	49	2.8
C <sub>4</sub> F <sub>7</sub> N		2,210	30	- 4.7	2.1
HFO-1234ze(E)		<1	0.05	- 19.2	0.98
SF <sub>6</sub>		23,500	3,200	- 63.9	1
CO <sub>2</sub>		1	100	- 78.5	0.3
N <sub>2</sub>		0	∞	- 195.8	0.38
O <sub>2</sub>		0	∞	- 183	0.33
干燥空气	-	0	∞	- 193	0.36

(2) **SF<sub>6</sub>替代气体**：完全不用SF<sub>6</sub>，而是采用GWP值比SF<sub>6</sub>低很多的其他人工合成气体。

如3M公司开发的Fluoroketone系列气体，C6FK、C5FK、C4FK。

C6FK沸点太高、C4FK毒性大。C5FK的GWP值最低，约为1，但液化温度仍然偏高。

C5 FK (1,1,1,3,4,4,4- heptafluoro-3-(trifluoromethyl)butan-2-one)  
named 3M™ Novec™ 5110 Dielectric Fluid (figure 1).

very good dielectric performance and the boiling point of 26.9°C combined with the high vapour pressure of 94 kPa (@25°C) allows gas mixtures which are suitable for

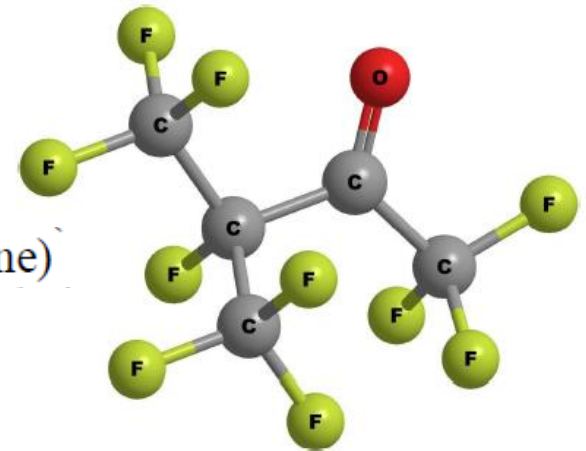
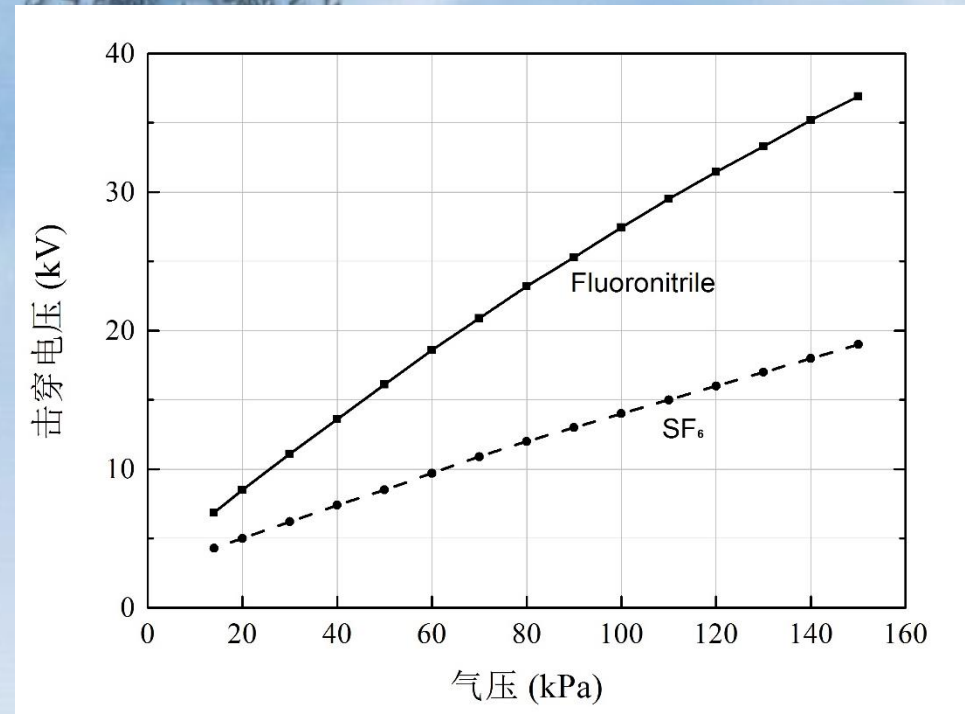


Figure 1. C5 fluoroketone 3M Novec 5110 Fluid



(2) SF<sub>6</sub>替代气体：完全不用SF<sub>6</sub>，而是采用GWP值比SF<sub>6</sub>低很多的其他人工合成气体。



The second substance is the fluoronitrile (2,3,3,3-tetrafluoro-2-(trifluoromethyl)-propanenitrile). As with the fluoroketones, this substance has a boiling point in the operation temperature range of electric equipment. Compared to the fluoroketones, its boiling point is significantly lower at -4.7°C and the vapour pressure is quite high at 252 kPa (@25°C). This allows for a higher concentration of the fluoronitrile in a gaseous mixture and lower operation temperatures than for the fluoroketones. The dielectric performance of the pure gas is higher than for the fluoroketones. On the other hand, the GWP of 2210 is measurably higher than for the fluoroketones but is still significantly lower than that of SF<sub>6</sub>. 3M has developed a product based on this substance as well named 3M™ Novec™ 4710 Dielectric Fluid (figure 2).

Fluoronitrile与SF<sub>6</sub>在不同气压下电气强度的比较

全氟异丁腈 (CF<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-CF-CN, C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N  
分子量195，沸点-4.7°C，GWP<sub>100</sub>=2210

电科院国家重点研发计划课题选定C4/CO<sub>2</sub>混合气体，已完成气体制备、物性测试、电气测试、特高压混合气体GIL模型试验

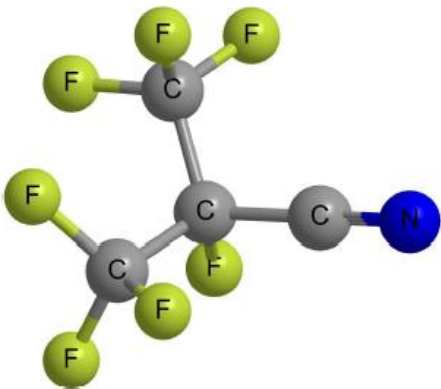


Figure 2. fluoronitrile 3M Novec 4710 Fluid

## 少用或不用SF<sub>6</sub>的几种选项：

- SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体绝缘、压缩空气绝缘、真空断路器、替代气体

## 筛选SF<sub>6</sub>替代气体的基本方向：

- 从电负性出发
- 电气绝缘性能、熄灭电弧性能
- 液化温度、放电之后的稳定性、毒性、
- 尽量低的GWP值， G3(Green Gas for Grid)气体
- 新型气体或混合气体尽量与SF<sub>6</sub>电气性能基本相当

综合考虑 GWP 值、绝缘强度、液化温度、放电副产物毒性等工程应用的关键要素，全氟异丁腈/二氧化碳C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体成为看好的替代气体方案，完全不用SF<sub>6</sub>。



(a) 420kV GIL

(2017 年投运, 英国)



(b) 145kV GIS

(2018 年投运, 法国)



(c) 245kV CT

(2017 年投运, 德国)



(d) 10kV 环网柜

(2021 年投运, 国家电网)



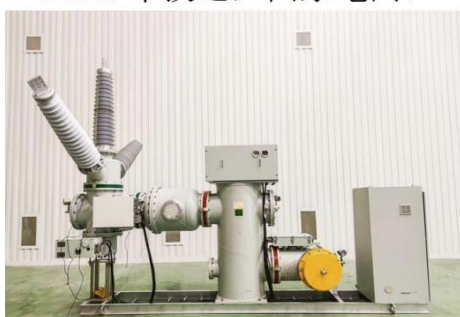
(e) 220kV 母线

(2021 年投运, 南方电网)



(f) 10kV 开关柜

(2021 年投运, 南方电网)



(g) 126kV GIS

(2021 年, 南方电网)



(h) 10kV 环网柜

(2021 年投运, 国家电网)



(i) 1100kV GIL

(2021 年, 国家电网)

图 1.3  $C_4F_7N/CO_2$  混合气体绝缘设备



2022.4.5欧盟委员会提出限制温室气体修改提案，  
给出禁止使用GWP大于10的含氟气体时间表

2022.12.20美国3M公司宣布2025年底前  
退出全氟及多氟烷基物(PFAS)的生产

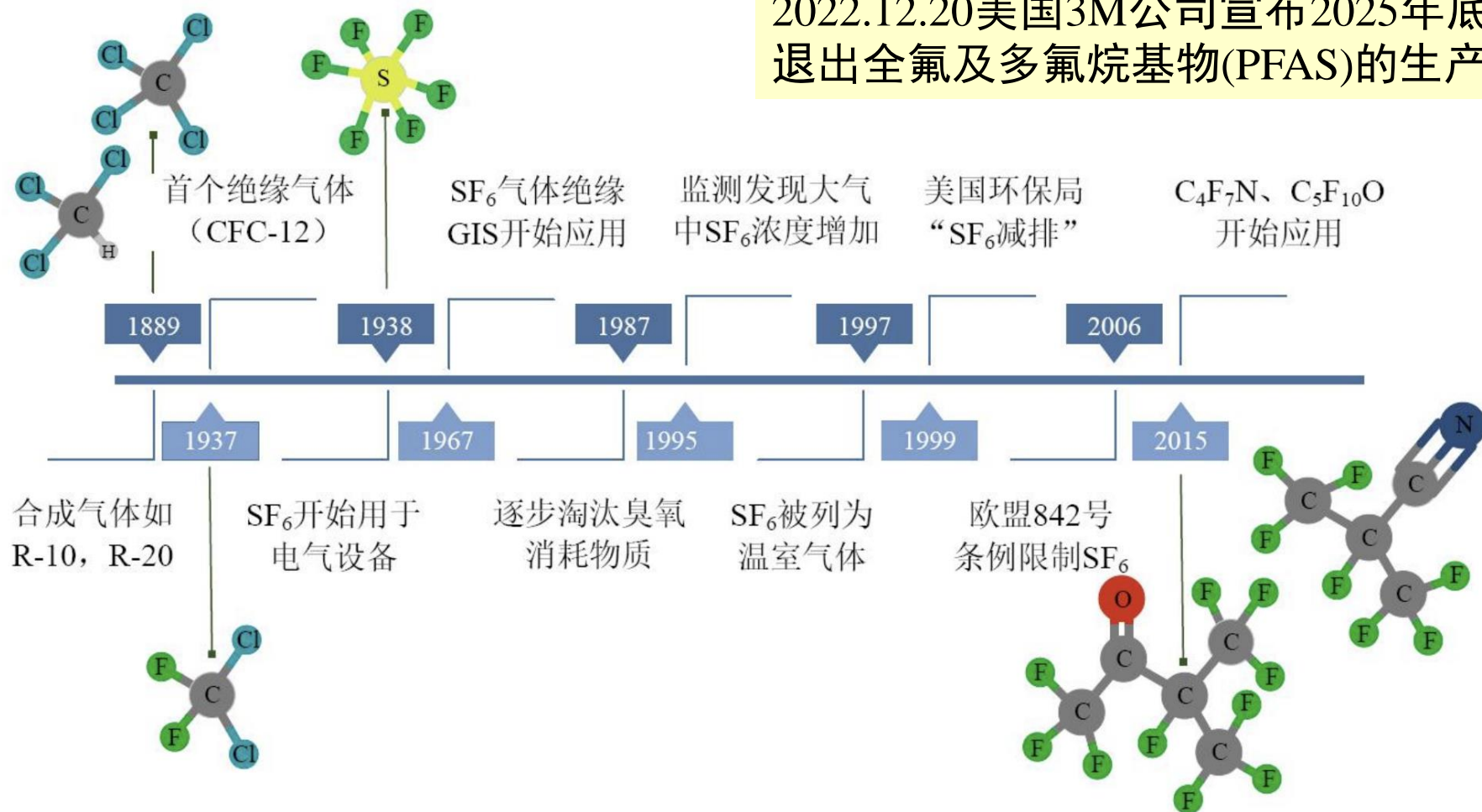


图 1.2 电力设备用绝缘气体应用进程