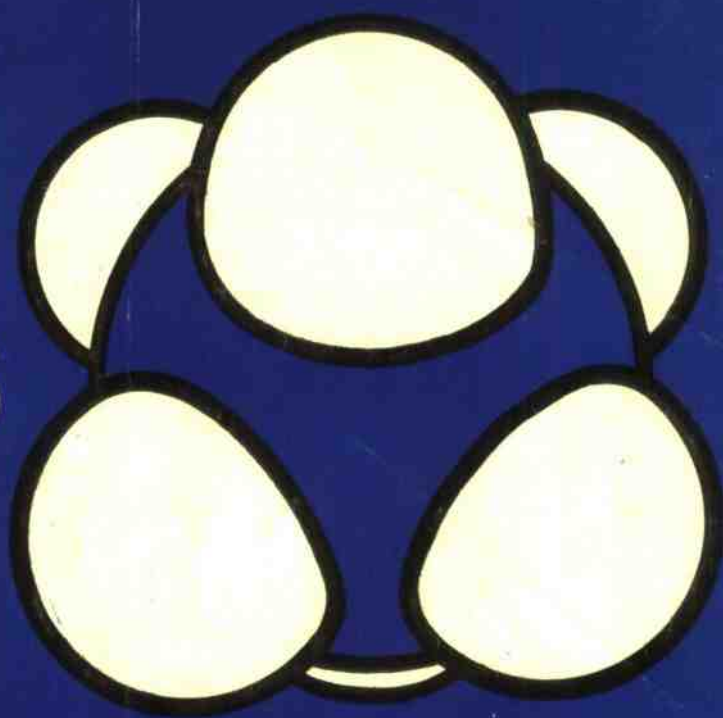


[印度]

V·N·马勒
M·S·奈达

编著

SF₆



六氟化硫的 高压绝缘 及其灭弧性能

高压电器情报网总网

试验所

54

六氟化硫的高压绝缘及其灭弧性能

V.N. 马勒 著
〔印度〕 M.S. 奈达

王聿琮 朱士全 徐家宗 译
凌 霄 许锦娥 许善钧
李建基 校

高压电器科技情报网
西安高压电器研究所

译 言

印度V. N. 马勒和M. S. 奈达编著的“Advances in high voltage insulation and arc interruption in SF₆ and vacuum” (1981版), 论述了SF₆和真空在用作高压绝缘和灭弧方面的进展情况。其中, 讲SF₆部分内容丰富, 占全书篇幅三分之二以上。本集将SF₆部分全文译出, 并将原名改现名。

SF₆部分共分五章: 第一章 SF₆气体特性及处理, 由王聿琮译; 第二章 SF₆气体中的高压击穿, 由朱士全译; 第三章 SF₆中的电弧, 由徐家宗、凌霄译; 第四章 SF₆气体绝缘的开关设备, 由许毓娥译; 第五章 SF₆气体绝缘设备, 由许善钧译。整个五章由李建基校对。

由于译者水平所限, 加上多人分章翻译, 难免有不确切或不统一之处, 请读者多加指正。

译 者

目 录

译 言

第一章 SF₆气体的特性及处理

引言	(1)
一般特性	(1)
物理特性	(1)
化学特性	(6)
热传导特性	(7)
毒性	(9)
电特性	(9)
SF ₆ 气体的处理	(13)
SF ₆ 气体的充入	(13)
SF ₆ 分解物的吸附	(15)
参考文献	(17)

第二章 SF₆气体中的高压击穿

概述	(19)
击穿机理	(19)
SF ₆ 中均匀电场的击穿	(23)
电晕及不均匀电场的击穿	(26)
实际系统中击穿电压的确定	(31)
SF ₆ 与其他气体组成的混合气体的击穿	(35)
杂质引起的击穿	(38)
影响SF ₆ 气体击穿强度的诸因素	(41)
SF ₆ 中绝缘隔板的沿面闪络	(46)
参考文献	(50)

第三章 SF₆中的电弧

引言	(54)
电弧的基本现象	(55)
SF ₆ 中简单开断电弧	(55)
SF ₆ 中的气吹电弧	(60)
SF ₆ 中的电流截断	(72)
对SF ₆ 中电弧开断目前所作的研究工作	(74)
SF ₆ 与其它气体混合气体中的电弧开断	(74)
参考文献	(76)

第四章 SF₆气体绝缘的开关设备

导言	(79)
SF ₆ 断路器的优点	(79)
双压式断路器	(80)
压气式断路器 (765kV及以下)	(83)
压气式断路器的设计考虑	(84)
压气式断路器的操动机构	(91)
灭弧室的几何形状	(92)
喷嘴几何形状的设计	(93)
自能灭弧式断路器	(96)
维护要求与可靠性	(97)
SF ₆ 气体断路器的未来趋势	(98)
金属壳封闭式SF ₆ 开关设备	(98)
SF ₆ 绝缘变电站的优点	(99)
SF ₆ 绝缘的金属铠装开关设备的技术要求	(99)
一般的设计考虑	(100)
气体绝缘开关设备和元件的结构设计	(105)
气体绝缘开关设备和元件的结构介绍	(107)
SF ₆ 气体的充入	(112)
SF ₆ 气体处理设备	(113)
SF ₆ 气体变电站的绝缘配合	(116)
GIS的未来趋势	(117)
参考文献	(118)

第五章 SF₆气体绝缘设备

导 言	(120)
SF ₆ 绝缘气体电缆	(120)
SF ₆ 气体绝缘电流互感器	(128)
SF ₆ 气体绝缘套管	(134)
SF ₆ 气体绝缘设备的一般试验技术	(136)
参考文献	(138)

第一章 SF₆气体的特性及处理

引言

六氟化硫出现于1900年。当时, Moissan和Lebeau报导了这种第一次合成的硫的六卤化物衍生物。用硫在氟的气氛中燃烧时形成六氟化硫。但直到大约1940年, 当 Cooper和他的同事将六氟化硫成功地用作电力设备中的绝缘气体时, 它才引起工业界的一点点兴趣〔2〕。第二次世界大战期间, 麻省理工学院的研究工作使之六氟化硫应用于范德格拉夫静电起电机的绝缘气体, 这是人们对六氟化硫引起迅速发展的起点, 最后导致六氟化硫用于例如高压开关、变压器、电缆和其他特殊用途的电力设备中。

六氟化硫气体具有特别高的绝缘强度和其他物理特征, 这些能促使它在电气设备中获得应用, 因此近廿年来, 人们对SF₆进行了详细的试验研究。

一般特性

SF₆作为绝缘气体具有许多优点。它无毒、不易燃、具有快速冷却电弧的本领。其介电强度远远超过传统的绝缘气体。它还具有优异的灭弧性能, 用在电器设备中, 可消除火灾、大大缩小尺寸, 并且改善电力系统的可靠性。

当然, 它除了具有许多重要优点外, 也存在某些缺点。一个主要问题是它在电弧放电时分解形成硫的低氟化物。这些分解物既有毒又对许多绝缘材料和金属材料有腐蚀。另外, 存在高压力下的液化问题, 成本亦较高。

物理特性

六氟化硫气体的物理特性见表1.1, 此表数据取自不同的参考资料。在某些情况下这些结果是互相矛盾的, 这可能是被测试的SF₆气体化学纯度不同所致。其他硫的氟化物特性列于表1.2, 这些是作为SF₆气体的杂质存在的。所列数据也是从不同参考资料中汇集的。

SF₆气体许多物理特性与CO₂相似, 这从表1.3明显可见。这两种气体都升华并且在几个大气压下液化, 一直到-59.4℃(溶解), SF₆气相与固相平衡, 而液相SF₆是亚稳态的。另一方面, 液体SF₆在临界温度45.7℃以上不复存在。CO₂也存在与此十分类似的关系, SF₆和CO₂的临界体积近似地同它们的分子量成比例

蒸汽压力

该特性限制了气体压力在各种温度下的有效性。图1.1示出SF₆气相与液相或固相处于平衡时的压力-温度范围。由此图可见, 大约14巴0℃时SF₆液化。然而正如图1.2所示, 在为提供高介电强度和灭弧特性所要求的压力温度范围内, 并不存在液化的危险性。这些特性可以利用本书末的附录给出的方程式(1.1)和(1.2)计算出来。

密度

表1.1 SF₆的物理特性〔8〕

分子量	146.06
熔点(°C)	-50.6
升华温度(°C)	-63.8
固态密度(50°C时)	2.51g/ml
液态密度(50°C时)	1.98g/ml
(25°C时)	1.329
气态密度(1bar, 20°C)	6.146g/l
临界温度(°C)	45.6
临界压力(bar)	36.557
临界密度	0.755g/ml
定压摩尔热容(25°C)	7.0gcal/ml°C
表面张力(-50°C)	11.63dyn/cm
膨胀系数(-18.5°C)	0.027
热传导系数($\times 10^4$)	3.38cal/sec/cm ² /°C/cm
气体粘滞系数($\times 10^4$, 25°C)	1.61poise
沸点(°C)	-63
比热(30°C)	0.143cal/g
相对密度(空气=1)	6.10
熔融膨胀	30%
蒸气压力(20°C)	10.62bar
折射率N(0°C)	1.000783
密度(20°C, 1bar)	6.5kg/m ³

表1.2 硫氟化物的物理特性〔8〕

性能	S ₂ F ₄	SF ₄	S ₂ F ₆
气味	硫磺味	无味	无味
熔点(°C)	-105.5	-124	-92
沸点(°C)	-99	-40	29
比重	1.5(-100°C)	-	2.08(°C)
与烧碱的反应	被分解	被分解	不分解
毒性	麻痹	有毒	剧毒
表面张力系数	-	-	13.9dyn/cm
与水的反应	分解	分解	-

SF₆是一种比较重的气体。这气体的密度在20°C和760毫米汞柱压力下每升为6.164克,几乎是同样条件下空气密度的6倍。图1.3表示SF₆在温度从-273°C到45°C的密度。此温度范围包括了SF₆呈固态、液态及处于过饱和蒸汽时的密度。图1.4则是24°C的SF₆气体密度与实际应用压力的函数关系〔4〕。

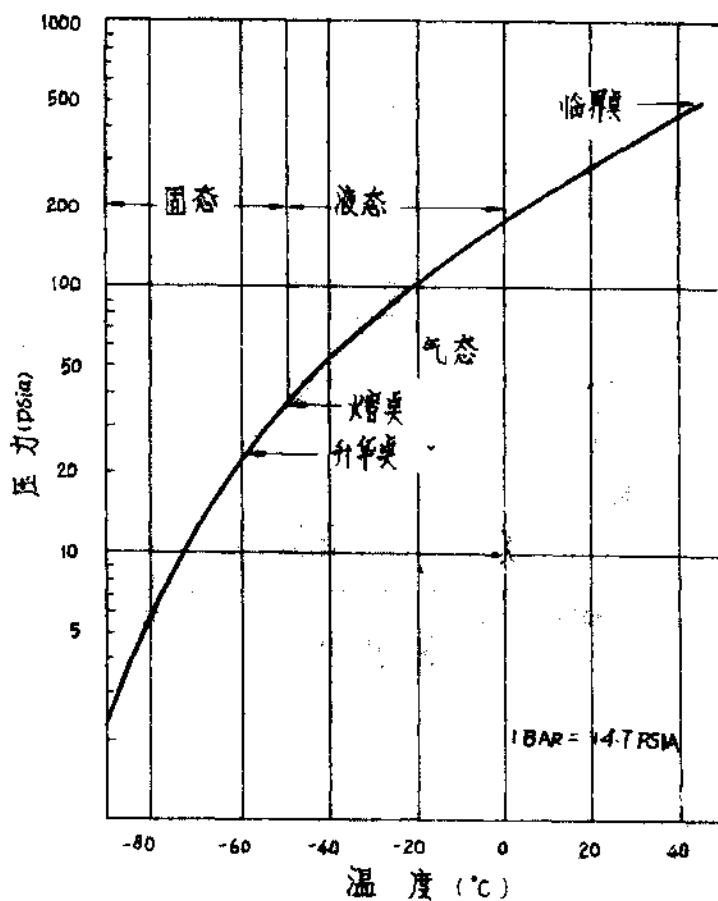
结合著附录给出的Matrin—Hou方程式(1.3)就能够说明气体各状态时的密度问题。方程表示给定气体其压力随温度和比容变的关系。图1.5示出利用这一算法及气

表1.3 SF₆和CO₂的对比〔5〕

特性	SF ₆	CO ₂
升华温度(°C)	-63.8	-78.5
熔点(°C)	-59.8	-68.6
熔点压力(bar)	2.25	5.27
临界温度(°C)	45.65	31.1
临界体积(m ³ /kg)	1.354×10^{-3}	4.599×10^{-4}
分子量kg/mole	66.25	44.01

体的蒸汽压力曲线所取得的数据。恒定密度线（比容的倒数）从蒸汽压线性延伸至单一气体的压力—温度范围内。因此，对于给定的温度和压力，我们就能确定气体的液相是否存在，如果不存在，则可知道气体的密度为多少。若需要密度的内插值，在温度恒定并假定密度随压力线性增加的情况下，就可做到这一点。

液态密度可利用附录中的方程式（1.4）进行计算。给定温度下的饱和蒸汽密度，可

图1.1 SF₆蒸汽和升华压力

以先应用蒸汽压方程 (1.2) 和由Matric Hou方程式 (1.3) 取得的压力和温度计算得到。利用这些数据, 可以计算出已知容积的气缸中液体和蒸汽的相对量。图1.6 示出一定温度下饱和液体密度和饱和蒸汽密度的数值关系。该图中的两条密度曲线的中间线是径向直线。此线用来计算临界密度, 因为在所有实用范围内, 它均为直线。

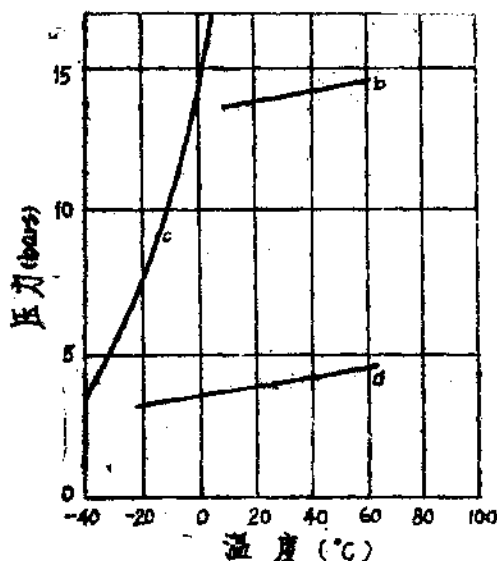


图1.2 SF_6 蒸汽压力与温度的函数关系曲线 (a) 绝缘用压力范围 (b) 灭弧用压力范围 (c) 蒸汽压力[3]

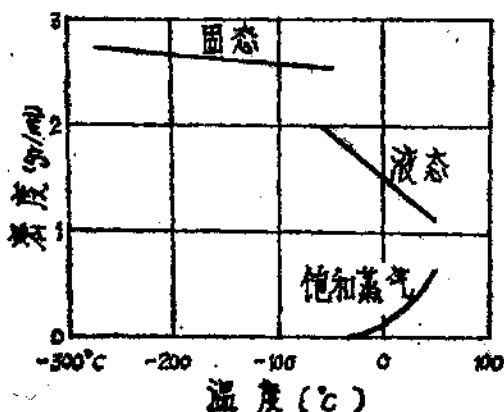


图1.3 SF_6 密度随温度的变化 [3]

SF_6 与其他气体的比较

SF_6 的物理特性同其他一些气体的物理特性, 列于表1.4。此表说明分子量、沸点、比热容和击穿电压之间粗略的关系。总的说来, 分子量大的气体, 其比热容大, 击穿电压亦高。另外, 其沸点也增高。分子量小的气体, 其沸点较低, 介质击穿电压亦较低。

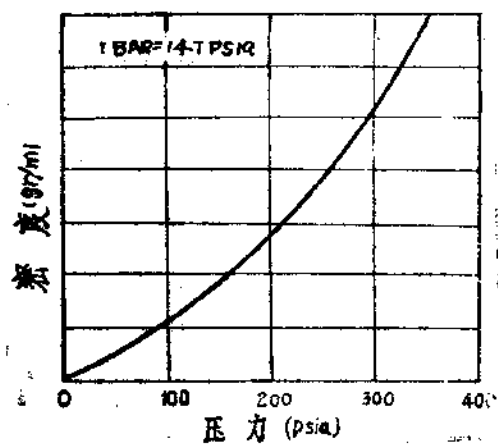


图1.4 SF₆密度随压力的变化〔4〕

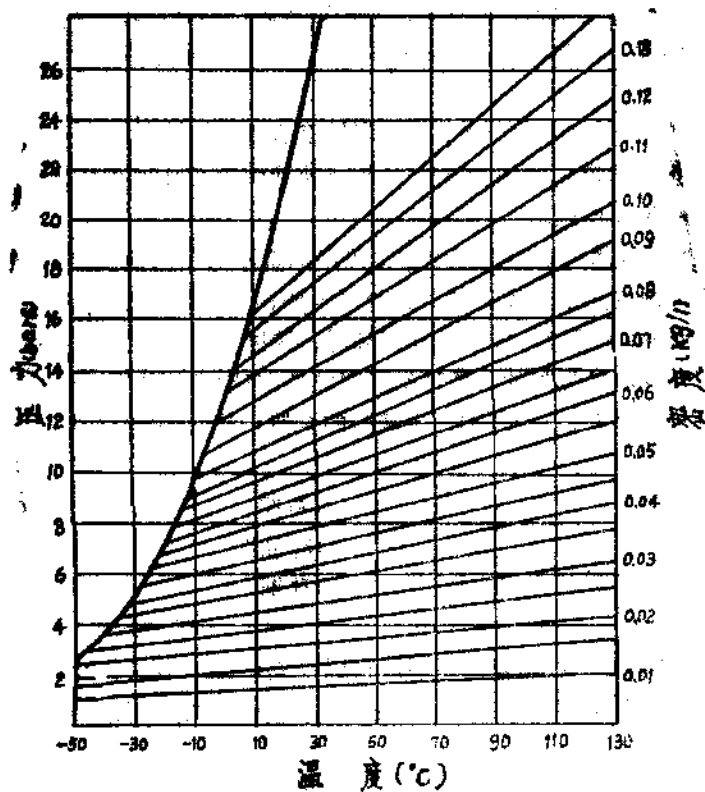


图1.5 SF₆在一定密度下的压力—温度等容线〔5〕

表1.4 SF₆和其他绝缘气体的物理特性〔5〕

气体	沸点 °C	比热容 C _p cal/mol·°C (300K)	击穿电压 (相对值)	分子量
SF ₆	-63.8	23.38	2.6	146.06
CF ₄	-128	14.65	1.1	88.0
C ₂ F ₆	-78.1	25.93	1.8	138.0
C ₃ F ₈	-36.7	35.40	2.0	188.0
CCl ₄ F ₂	-6.0	37.73	2.4	200
C ₂ F ₆ CL ₂	-38.7	26.62	2.8	154.5
CF ₃ CL ₃	-29.8	17.45	2.5	120.9
N ₂	-195.8	6.96	1.0	28.02

化学特性

一般地讲,六氟化硫是很稳定的气体。过去总把它的稳定性评价为如同氮气一样,但当作为绝缘介质考虑时,这种比喻是不妥的且易使人产生误解。这主要是因为分SF₆子中存在氟和硫的缘故。如果它们脱离这种稳定状态,则它们之中任何一个都有严重的化学腐蚀问题。因此,在使用中,要避免SF₆化学分解和绝缘降解。对此,必须在工程技术上作出周密的考虑。

在大气压下和温度至少在500°C以内, SF₆具有高度的化学稳定性。温度更高时,化学不稳定性增加。温度超过500°C时, SF₆迅速地同硅酸玻璃及某些金属作用。在某些情况下,它要与氢起反应。

普遍认为, SF₆气体对电器设备中较常采用的金属如铜、钢铁、铝等,在电气设备运行的正常温度范围内是毫无反应的。试验已表明,各种金属在223°C温度暴露在 SF₆中370天,其腐蚀仍微不足道。例如对硅钢来说,腐蚀速率仅0.00012时/年,这可说微不足道,但这还是反应最强烈的。两种低碳钢样品,在同样条件下,腐蚀速率为0.000016时/年和0.000013时/年,在223°C下作试验的金属,按它们被SF₆腐蚀的增加程度排列如下〔6〕:

- | | |
|--------|--------|
| a) 银 | e) 黄铜 |
| b) 铝 | f) 冷轧钢 |
| c) 不锈钢 | g) 硅钢 |
| d) 铜 | |

Camilli和他的同事们曾使铜的切削件和SF₆气体接触。在500°C时未观察到任何反应。到600°C时发现SF₆较快地分解成SF₂和SF₄。当温度升高到600°C以上时, SF₆中形成的低氟化物增加。

这些情况表明, SF₆热分解的极限危险点在600°C左右。不过,从工程技术观点看,迄今似乎有一点是完全明确的,那就是SF₆至少在A级绝缘温度内(最高105°C)是稳定的。

SF_6 不可燃，无火灾。在电击穿后 SF_6 能自行复合，并没有由于连续燃弧而产生的如无定形碳那样的分解物沉淀。

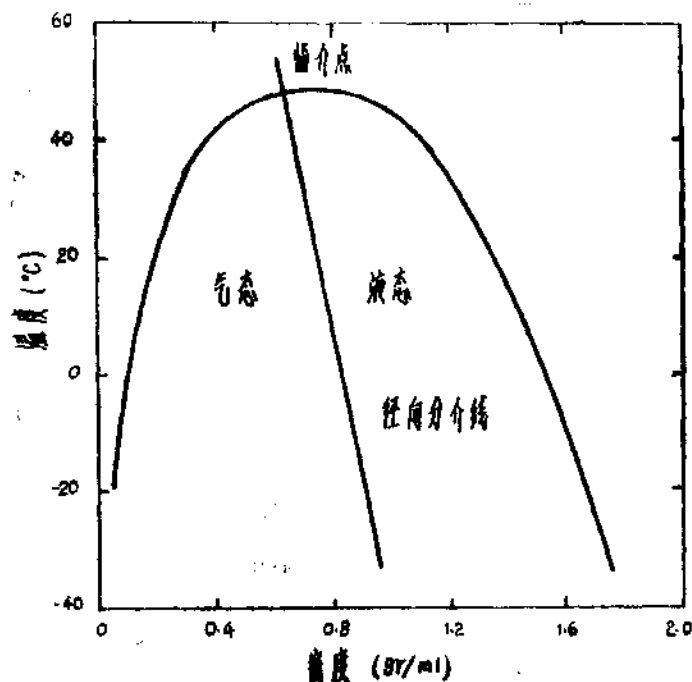


图1.6 SF_6 密度随温度的变化

热传导特性

热传导特性主要包括气体的比热、热传导系数和粘滞系数。一般情况下， SF_6 具有良好的热传导特性。虽然 SF_6 在其热传导系数方面比起空气或氮气不占有实际上的优势〔4〕（图1.7），但比较上述气体的热传导系数就会使人产生误解。例如，氮的热传导系数是 SF_6 的10倍，但是 SF_6 的分子量大加上粘度小使之它通过对流传热比一般的气体更为有效（见图1.9和1.9）。 SF_6 和其他气体在室温下的粘度对比如下：

氮气	$178 \times 10^{-6} \text{poise}$
空气	$172 \times 10^{-6} \text{Poise}$
SF_6	$162 \times 10^{-6} \text{Poise}$

因此，如上所述，从 SF_6 气体的总热特性看，可以预料，随着气体中热梯度的建立， SF_6 大的密度加上小的粘度，在商售气体设备中的同样热条件下，使之它比氮气或空气形成更加广泛的气体环流。结果， SF_6 使热量能更快地从设备的操作部分导散，尽管认为 SF_6 和空气及氮气的基本热特性大致相同。从而，设备充 SF_6 气体时的操作温度较充空气或氮气时为低。实验证明这一点是对的。

甚至用空气和 SF_6 的混合气体也显示出热传导系数远远胜于单用空气的情况。采用67% SF_6 和33%空气，对变压器进行测试指出，低压绕组温度比单用空气时降低19.4℃，

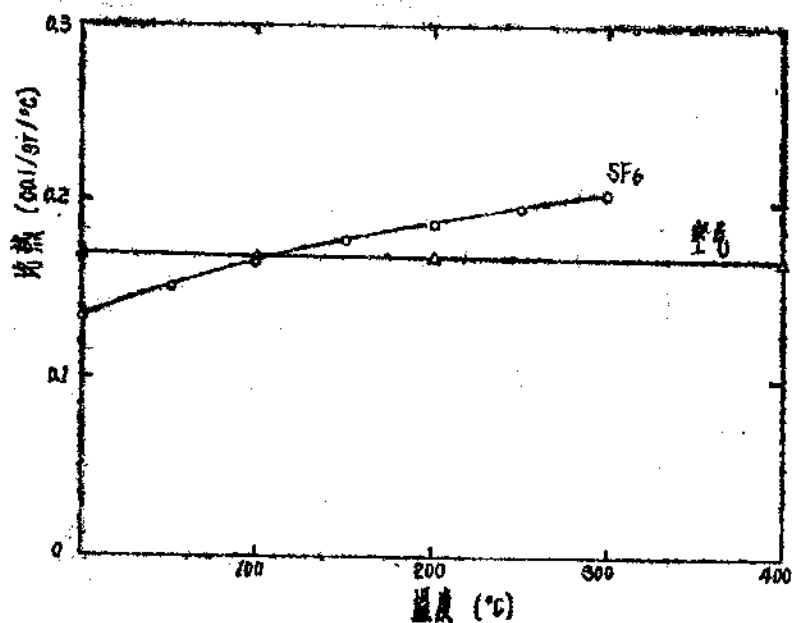


图1.7 SF_6 的定容比热

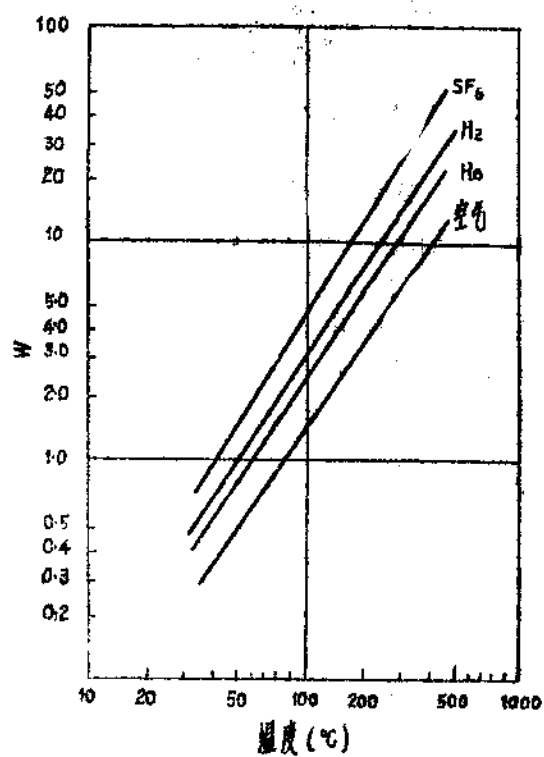


图1.8 对流和辐射的热传导〔6〕

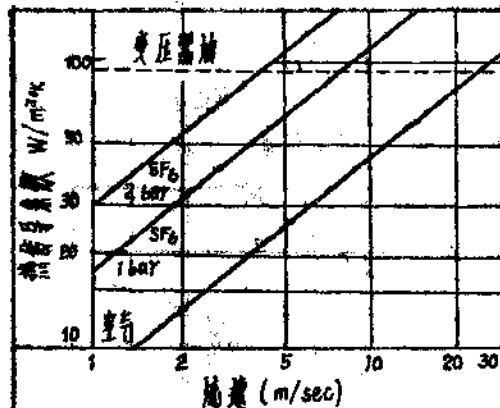


图1.9 自然对流下SF₆、空气和变压器油的热传导系数 [11]

而且雄辩地证明，用SF₆胜于用油。

毒 性

SF₆是无毒气体。它对生物的危害同氮气相似，仅因窒息而发生危险。由于SF₆的密度远大于空气密度的原因，从而可以形成SF₆气体的气阱，使氧气被SF₆所取代。

应用SF₆时所牵涉的有毒性主要是由于存在低氟化物，例如 SF₄、S₂F₄、S₂F₁₀、SF₅和HF等所呈现的毒性。这些物质可由于生产不纯作为杂质而存在，或在电弧放电时形成分解产物而存在。

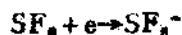
这些分解物的生理效应尚不十分清楚。即使每一种分解物已认为是有毒物，但其中有些毒性仍是轻度的。当SF₆因过热或因大电流电弧而分解时，总是存在着一种或多种被认定的有毒物质，所以在工程技术应用中，始终必须鉴别可能存在的气体的分解物。

电 特 性

已经做了大量的研究工作来鉴定SF₆在各种不同实验条件下的电学性质。在第二和第三章中对此作了较多的论述。本节不过介绍一下一些主要的突出的电学性质。

介电强度

由于SF₆分子对电子具有吸附性，使它具有很高的介电强度。在吸附过程中，自由电子同中性气体分子碰撞形成负离子。反应过程如下：



第一个反应式描述的过程在电子能量0.1eV时发生，并有0.05eV的变化范围。而第二个反应式描述的过程在0.1eV时达到极值。形成的负离子比自由电子重。因此，在给定的电场强度下，离子不会加速到足够能量引起气体雪崩电离。上面的反应过程是消除电子的一种有效方法，要不然就会因雪崩电离使电流剧增而最后导致SF₆气体绝缘击穿。这个性质使SF₆气体具有很高的介电强度。图1.10示出SF₆、氮气和变压器油的介电强度。

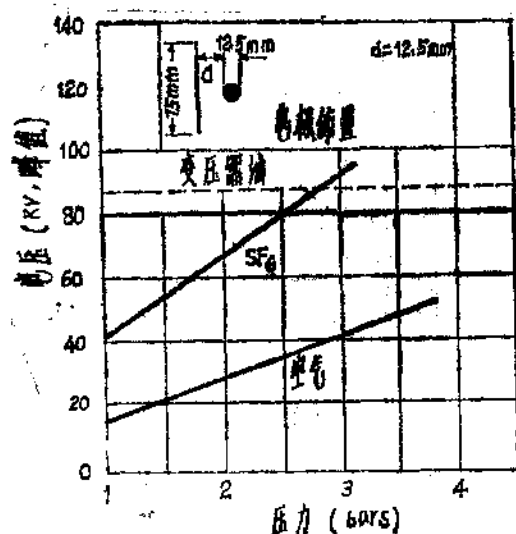


图1.10 SF_6 压力和击穿电压的函数关系

空气的介电强度可以由于补充微量 SF_6 而大为提高。反之，空气对 SF_6 的绝缘强度只有消极的影响。例如，加入10%体积的空气， SF_6 的击穿电压降低约3%。而如果空气的体积百分比增加到30%，击穿电压将降低10%。在实用的交流电压宽广的频率范围内，即工频和通讯频率范围内， SF_6 的介电强度保持在一个十分稳定的数值。在3G Hz频率时， SF_6 介质的承负荷能力十倍于空气。这一性能使 SF_6 成为同轴电缆，波导管等的优异绝缘介质。

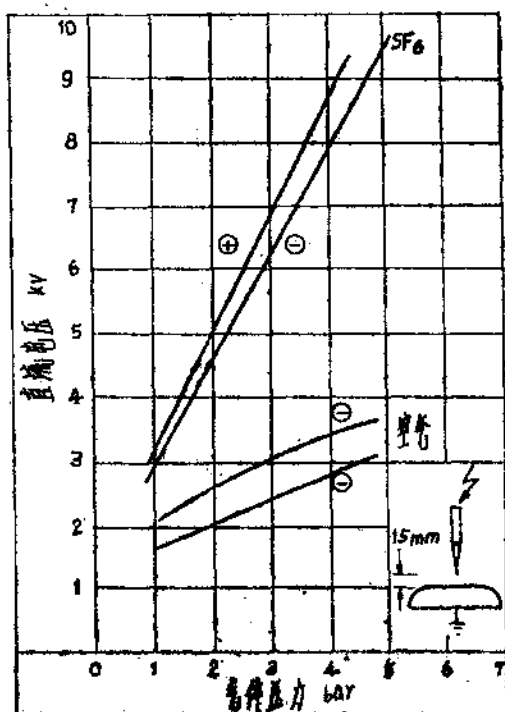


图1.11 SF_6 和空气中正负极性电晕起始电压与压力的关系

电晕起始电压

不均匀电场中， SF_6 的电晕起始电压也比空气高得多。 SF_6 电晕起始电压随着气体压力和尖—板电极系统中尖端电极曲率半径的变化分别示于图1.11和图1.12中。

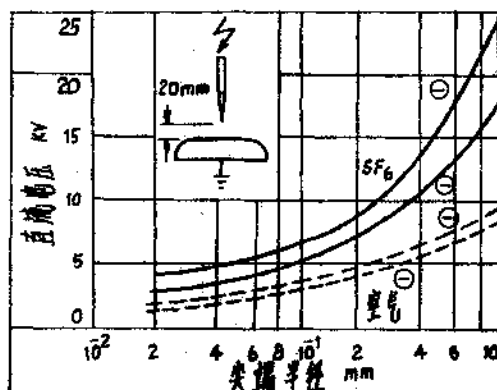


图1.12 在尖—板电极下 SF_6 和空气中电晕起始电压与尖电极半径的关系

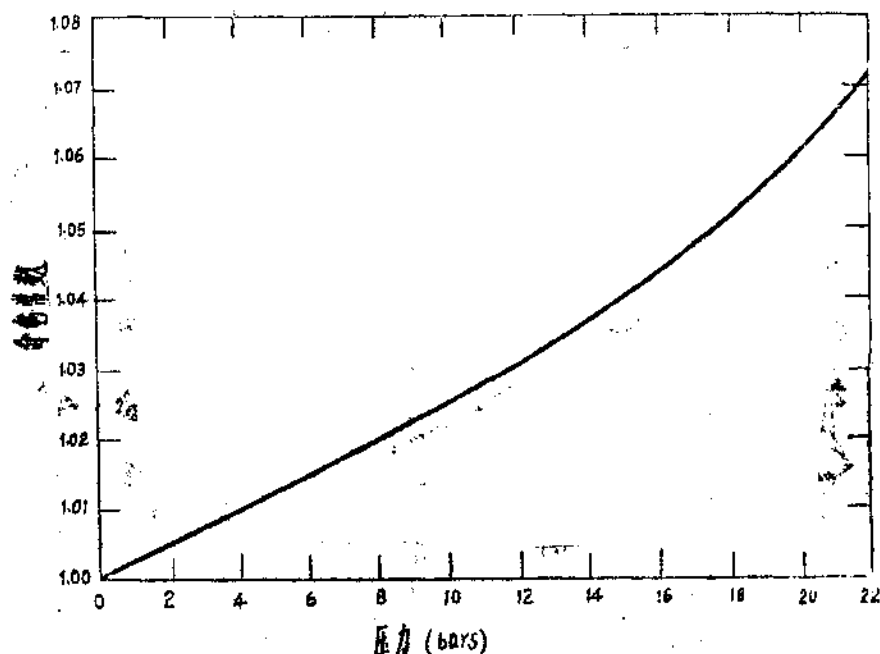


图1.13 SF_6 气体介电常数与压力的关系

介电常数

SF_6 是无极性的（即偶极矩等于零），它的介电常数与施加的电压频率无关。此外，如图1.13所见，在0~22巴的压力范围内，介电常数只大约改变7%。

介质损失角正切

当压力从1巴改变到21巴时，发现损失角正切从 2×10^{-7} 增加到 4×10^{-7} 。

电弧开断能力

SF_6 不仅具有高的介电强度,而且由于火花放电分解的 SF_6 分子在电源通电火花消除后会迅速复合并且恢复其强度。这就使 SF_6 熄弧能力变得无比的有力,大约是空气熄弧能力的100倍。图1.14对比了 SF_6 和空气的熄弧能力⁽⁸⁾。

SF_6 的这一特性可能有各种因素,但主要的是它的电子附着率高。如果电场中的自由电子被吸附,未能获得足够能量进行碰撞而产生附加电子,则 SF_6 击穿机制就可以被衰减甚至完全停止。 SF_6 分子的碰撞直径大,估计为 $4.77 \text{ \AA}$,有利于通过附着过程捕获这些自由电子,从而产生稳定的负离子。能量也贮存在 SF_6 分子的振动和转动能量级

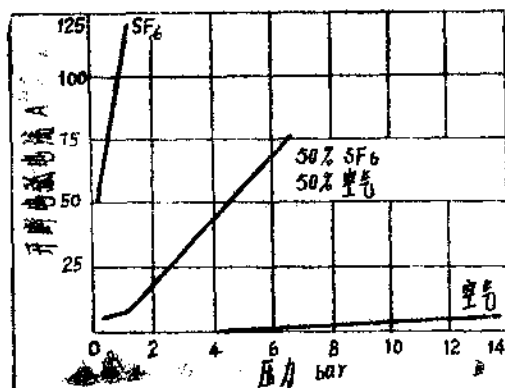


图1.14 SF_6 、空气和两者混合气体的开断电流⁽⁸⁾

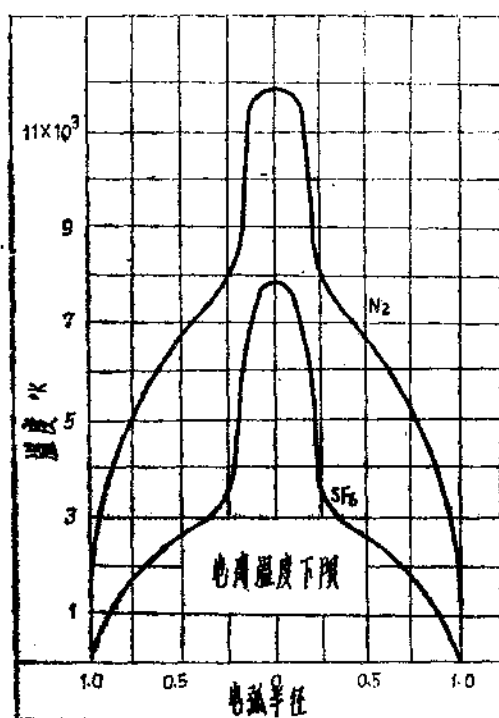


图1.15 相同的电晕电流下温度沿圆柱半径的分布