

838157

52733

10092

T.1

六氟化硫电器设备 气体质量监督与安全管理

(SF₆专集) 上



北京市劳动保护科学研究所编

2733

0092

1

中国古代陶瓷科学技术成就

李家治 陈显求 张福康 郭演仪 陈士萍 等著

Scientific and Technical Achievements in Ancient Chinese Pottery and Porcelain

Li Jiazhi Chen Xianqiu Zhang Fukang Guo Yanyi Chen Shiping et. al

上海科学技术出版社

Shanghai Scientific and Technical Publishers

前 言

电力能源建设是国民经济发展的基本物质、技术前题和保证,是我国“七五”期间乃至其后若干年的重点开发领域。

在当前国家城市电网改造和设备更新换代的过程中,六氟化硫(SF₆)电气设备以其优异的电气性能和运行可靠性受到国内外普遍重视,发展极为迅速。

为了适应六氟硫电器迅速发展的迫切需要,切实加强对六氟化硫气体质量的监督和管理,大力普及提高有关SF₆气体的分析检测和安全管理知识乃势在必行。为此北京市劳动保护科学研究所受水电部生产司、机械委电器局的委托在已有近十年研究、开发工作的基础上参阅国内外有关文献资料和经验编辑出版了“六氟化硫电气设备气体质量监督与安全管理”“六氟化硫及其设备的国外文献译文集”两个专辑,供有关单位和读者参阅。

参加编辑工作的有王继宗、岳辅鹏、杨存金、张文俊、岑洁、王立、邓卓森、史彦芬等同志,由王继宗统一校阅整理。

限于水平和时间,遗漏、欠妥之处在所难免,恳请广大读者和专家、同行批评指正。

编者 1988.1.

目 录

前言

第一章 绪论

- 1.1 SF₆在高压电器及其它领域的应用 (1)
- 1.2 SF₆气体质量及其影响 (1)

第二章 六氟化硫气体的制备及其重要特性

- 2.1 SF₆气体的制备方法 (4)
- 2.2 SF₆的重要物理化学性质 (5)
 - 2.2.1 物理性质 (5)
 - 2.2.2 重要物理化学性质 (5)
 - 2.2.3 重要电气性能 (7)
- 2.3 关于SF₆的毒性和微量SF₆气体的分析监测方法 (8)
 - 2.3.1 关于SF₆的毒性问题 (8)
 - 2.3.2 空气中SF₆含量的分析监测方法 (9)

第三章 六氟化硫在电弧作用下的分解

- 3.1 SF₆的电弧分解过程及其主要化学反应 (10)
- 3.2 影响SF₆分解过程的主要因素 (11)
 - 3.2.1 电弧能量的影响 (11)
 - 3.2.2 电极材料的影响 (12)
 - 3.2.3 水分的影响 (13)
 - 3.2.4 氧气的影响 (14)
 - 3.2.5 设备绝缘材料的影响 (15)
- 3.3 电弧作用下SF₆主要分解产物的性质和毒性 (16)
 - 3.3.1 四氟化硫 (SF₄) (16)
 - 3.3.2 氟化硫 (S₂F₂) (17)
 - 3.3.3 二氟化硫 (SF₂) (17)
 - 3.3.4 十氟化二硫 (S₂F₁₀) (17)
 - 3.3.5 氟化亚硫酸 (SOF₂) (17)
 - 3.3.6 二氟化硫酸 (SO₂F₂) (18)
 - 3.3.7 四氟化亚硫酸 (SOF₄) (18)

第四章 六氟化硫新气质量检验方法

4.1 SF ₆ 中酸度的分析测定方法和技术	(19)
4.1.1 碳酸根对分析测定的影响	(19)
4.1.2 指示剂的选择	(19)
4.1.3 采样方法的确认	(21)
4.1.4 酸度分析及注意事项	(22)
4.2 SF ₆ 中可水解氟化物的分析测定方法和技术	(23)
4.2.1 气体采样方法	(24)
4.2.2 比色分光光度法	(25)
4.2.3 离子选择电极法	(27)
4.2.4 关于SF ₆ 中可水解氟化物测定准确度的几点看法	(28)
4.3 SF ₆ 中空气(氧、氮)、四氟化碳分析测定方法和技术	(28)
见5.3 气相色谱(GC)分析	
4.4 SF ₆ 中水分含量分析测定方法和技术	(28)
见5.5 SF ₆ 气体中微量水测定方法和技术	
4.5 SF ₆ 中油含量分析测定方法和技术	(28)
4.5.1 方法原理	(29)
4.5.2 实验部分	(29)
4.5.3 分析的精密度和准确度	(34)
4.5.4 引起定量误差的原因	(34)

第五章 六氟化硫气体中多种痕量杂质的采样方法和分析监测技术

5.1 SF ₆ 中各类杂质的主要来源及其危害	(35)
5.1.1 杂质的主要来源	(35)
5.1.2 杂质的分类	(35)
5.2 SF ₆ 气体的采样方法和技术	(35)
5.2.1 一般注意事项	(35)
5.2.2 样品采集方法	(36)
5.2.3 采样仪器	(36)
5.2.4 采样效果	(36)
5.3 气相色谱分析	(37)
5.3.1 色谱柱的选择	(38)
5.3.2 载气及柱温的选择	(39)
5.3.3 检测器的选择	(39)
5.3.4 热导检测器与火焰光度检测器串联测定法	(41)
5.3.5 定性定量分析测定	(42)
5.4 质谱、气相色谱—质谱、红外光谱和核磁共振波谱分析及其在SF ₆ 痕量杂质定性确认中的应用	(48)

5.4.1 综述.....	(48)
5.4.2 气相色谱—质谱和色谱制备—红外光谱联用技术的分析原理.....	(49)
5.4.3 SF ₆ 中杂质组分的定性分析.....	(52)
5.5 SF ₆ 气体中微量水分测定的方法和技术.....	(61)
5.5.1 SF ₆ 气体中微量水分的危害.....	(61)
5.5.2 SF ₆ 高压电器设备内部水分的主要来源.....	(63)
5.5.3 SF ₆ 气体中微量水分检测方法.....	(63)
5.5.4 SF ₆ 气体中微量水分的标准.....	(66)
5.5.5 微量水分仪的校正方法.....	(66)
5.5.6 SF ₆ 气体的微量水分在分析中值得探讨的几个问题.....	(67)
5.6 气体检测管.....	(71)
5.6.1 采气方法.....	(71)
5.6.2 检测管.....	(72)
5.7 SF ₆ 检测检漏仪.....	(72)
5.7.1 漏气的原因及危害.....	(72)
5.7.2 检测和检漏.....	(73)
5.7.3 检测仪的类型和使用.....	(74)
5.7.4 国内外SF ₆ 检测检漏仪简介.....	(74)

第六章 六氟化硫体中有害杂质和水份的吸附净化方法

6.1 气体吸附净化的基本知识.....	(77)
6.2 SF ₆ 气体中有害杂质的吸附净化方法.....	(78)
6.2.1 被吸附物质特点.....	(78)
6.2.2 吸附剂及其吸附性能.....	(79)
6.2.3 吸附剂的使用方法.....	(86)
6.3 SF ₆ 气体中水分的吸附干燥方法.....	(89)
6.3.1 水的物性和分子的缔合.....	(89)
6.3.2 常用干燥剂.....	(89)
6.3.3 SF ₆ 气体吸附干燥方法和所用吸附干燥剂.....	(89)
6.4 新型高强度 SF ₆ 气体净化用吸附剂——SF—I 型吸附剂.....	(92)
6.4.1 SF—I 型吸附剂的制造和吸附净化原理及物化参数.....	(93)
6.4.2 SF—I 型吸附剂的特点和吸附特性.....	(93)

第七章 六氟化硫气体的质量监督

7.1 质量监督与安全管理的几个主要环节.....	(97)
7.1.1 SF ₆ 新气的质量监督与管理.....	(97)
7.1.2 SF ₆ 设备的检漏.....	(98)
7.1.3 设备运行中对SF ₆ 气体的质量监督.....	(98)
7.1.4 设备解体时的安全技术措施.....	(98)

- 7.2 SF₆设备中水分和分解气的管理和去除..... (99)
- 7.3 SF₆质量管理几项重要措施..... (99)

附录

1. 新六氟化硫的规范和验收IEC出版物376 (1971) (101)
2. 电气设备中六氟化硫气体检验导则IEC出版物480 (1974) (127)
3. 六氟化硫气体技术条件 (试行) 化工局二字第81号文附件一..... (143)
4. 六氟化硫 (SF₆) 气瓶及气体使用安全技术管理规则 (试行) (145)
化工局二字第81号文附件二
5. 用于电气设备的SF₆气体质量监督与运行管理导则..... (146)
机械委 (88) 机电发字第8号, 水电部 (88) 生供字第2号。
6. 六氟化硫电气设备气体监督条例 (试行) (157)
机械委 (88) 机电发字第8号, 水电部 (88) 电生供字第2号
7. 六氟化硫电气设备制造运行及试验检修人员安全防护暂行规定..... (158)
机械委 (88) 机电发字第8号, 水电部 (88) 电生供字第2号。

第一章 绪 论

1.1 六氟化硫在高压电器及其他领域中的应用

直到十九世纪末,六氟化硫(化学分子式为 SF_6)即使对于化学家来说也还是一种陌生的化合物。人们在自然界中未发现它的存在。

1900年法国Moisson和Lebeau首次用元素硫和氟气直接反应合成出 SF_6 气体并对其物理化学性质进行了初步研究^[1],发现 SF_6 是一种可以与氮气和他其他惰性气体相比拟的化学上极稳定的物质,而且具有优异的电气绝缘能力。

本世纪卅年代以后,随着科学技术的发展, SF_6 气体日益引起人们的兴趣和关注,并对其进行了大量的科学实验研究工作。

1937年法国首先将 SF_6 应用于高压绝缘电气设备^[2],1951年美国Westing-House公司获得 SF_6 断路器的生产专利。西德在此期间也开始了该领域的研究工作,并于1964年推出第一台220KV SF_6 断路器。进入六十年代, SF_6 电器绝缘设备的优越性已为世人所公认,各发达国家竞相研制开发该类型设备。法、日、西德、美国、瑞士等国的大型电气设备制造公司相继研制开发出多种类型和等级的 SF_6 气体绝缘(GIS)设备。仅1971年至1976年世界生产之GIS设备就增长了近10倍^[3]。

以 SF_6 为介质的电器有断路器、高压开关、电压互感器、电流互感器、避雷器、全封闭组合电器、变压器、充气电缆等几乎无所不包,电压等级已突破1000KV,至今其发展势头不衰。

我国六十年代开始研制 SF_6 电器设备,各种等级型号的国产和进口设备陆续投入运行。进入八十年代机械电力部门已将 SF_6 电气设备作为电网装备更新换代的主要目标。可以预见 SF_6 电器设备在我国必将得到日益广泛的应用,具有广阔的发展前景。

此外,六氟化硫气体在高能物理领域也有重要应用,例如我国刚刚通过国家级验收(1987.8.14)的大型串行加速器,端电压13兆伏一次充入的绝缘气体(SF_6)量为23吨。在铸造冶金行业, SF_6 作为新型的熔炼保护气氛业已普遍应用。至于 SF_6 早已在气象、环境部门(作为示踪气体)以及在医学方面(人工气胸)的应用则更不待言。

1.2 六氟化硫气体质量及其影响

现已公认 SF_6 除因其比重大(约为空气的5倍),可能在下部空间积聚引起缺氧窒息外,其纯气是无毒无害的。但是在其生产过程中或者在高能因子例如高温、高能粒子的作用下,则会分解产生若干有毒有害、甚至剧毒、强腐蚀性物质,而且体系中的某些共存物质例如、水分、空气(氧)、电极材料、设备材料等,均会导致上述过程的复杂化,致使分解产物的数量和种类明显增加,其危害自然也显著加大。

SF_6 气体杂质的危害主要表现在(1)某些酸性物质特别是 HF 、 SO_2 等可引起设备材质

表1—1 SF₆气体质量标准举例

杂质名称	IEC标准	日本旭硝子 公司标准	西德Katio Chemie 标准	苏联M3K 标准	意大利	美国 ASTMP 2472—71	我国暂行标准
空气(氮、氧)	<0.05%(重量)	<0.05%	<0.02%	<0.05%	31ppm	<0.05%	≤0.05%
	<0.25%(体积)						
CF ₄	<0.05%(重量)	<0.05%	10ppm(重量)	<0.05~ 0.01%	0.02—0.04%		≤0.05%
	<0.1%(体积)						
水	<15ppm(重量)	<8ppm	<5ppm	<0.0015%	露点* -55°C	露点** -50°C (-58°F)	≤8ppm
游离酸(用 HF表示)	<0.3ppm(重量)	<0.3ppm	<0.1ppm	3×10 ⁻⁶ %		<0.3ppm	≤0.3ppm
可水解氟化物 (用HF表示)	<1.0ppm(重量)	<5ppm	<0.3ppm	—			≤1.0ppm
矿物油	<10ppm(重量)	<5ppm	<1ppm	0.010%		<5ppm	≤10ppm
SF ₆ 纯度	—	99.8%以上	99.9%以上	—	99.9864%	99.8%	≥99.8%

* 相当于2.5ppm ** 相当于4.8ppm

的腐蚀；〈2〉某些杂质特别是水分的存在，在一定条件下可能导致电器性能劣化，甚至造成严重设备事故，⁽⁴⁾例如美国VEP公司500KV系统中SF₆断路器曾因水份增加造成绝缘闪络，使断路器在1966年的三个月时间内发生五次事故；〈3〉SF₆中存在的诸如SF₄、SOF₂、SF₂、SO₂F₂、HF等均为毒性和腐蚀性极强的化合物，对人体危害极大，S₂F₁₀则属剧毒物质，其空气中最高容许浓度为0.025ppm。我国也曾发生过因上述物质引起的恶性人身事故。此外还应该指出，我国科学工作者近年来发现在SF₆气体产品中经常含有S₂F₁₀O，有时其含量甚至达数百ppm，尽管目前对其有毒有害性尚未能确认，但值得引起注意。

有鉴于此，对SF₆气体施行严格的质量监督与安全管理是确保设备可靠运行和人身健康安全的重要保证。为此国际电工委员会(IEC)于1971和1974年颁布了SF₆气体质量标准和对SF₆新气和经电弧作用后之气体的标准分析方法⁽⁵⁾(见附录1·2)；我国于1982年5月公布了《六氟化硫气体技术条件》(见附录3)，此外国外许多SF₆气体重要生产厂家均制定了各自的质量标准，以此作为市场竞争的重要依托。表1—1列举了若干SF₆产品的质量标准供读者参考。

为了监督检验SF₆中的杂质组分和含量，必须建立起准确可靠的分析检测方法和技术，此乃是实现SF₆气体质量控制的技术基础和前提。在该领域国外自七十年代以来有若干文献发表。我国已发表综述文章⁽⁶⁾。北京市劳动保护科学研究所自1978年以来进行了SF₆气体质量分析检测技术的综合研究和开发工作⁽⁷⁻¹²⁾，并编辑了该领域的重要文献资料。

SF₆气体使用安全保证的另一重要环节是建立、健全系统的气体质量管理体系。它包括各类条例、标准、规程的制定实施，各级质量检验机构的建立，各级负责人和实验操作人员的技术培训等内容。只要能紧紧抓住技术和管理这两个基本环节，SF₆气体的安全使用和电气设备的安全运行是可以得到可靠保证的。

第二章 六氟化硫气体的制备 及其重要特性

2.1 六氟化硫气体的制备方法

迄今为止在工业上普遍采用的 SF_6 制备方法是熔融态的单质硫磺与过量气态氟直接化合，即 $\text{S} + 3\text{F}_2 \longrightarrow \text{SF}_6 + \text{Q}$ 。该反应为放热反应，故反应温度不宜过高，一般控制在 $120^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 。如此合成的粗品中含有多种杂质，其组成和含量可因原材料纯度、生产设备、工艺条件等因素而有很大差异，但杂质总量一般不超过5%。其组成有硫氟化合物如 S_2F_2 、 SF_4 、 SF_4 、 S_2F_{10} 等，硫氟氧化物如 SOF_2 、 SOF_4 、 SO_2F_2 、 SO_2 、 $\text{S}_2\text{F}_{10}\text{O}$ 等以及随原料氟带入的杂质如 HF 、 OF_2 、 CF_4 、 C_2F_6 、 N_2 、 O_2 等。此外还可能有微量水份进入。

为了净化粗品中的杂质，合成气体需要经过水洗、碱洗、热解（主要去除剧毒的十氟化物），吸附剂净化等一系列净化处理过程方能得到纯度在99.8%以上的精品（合格产品），该产品存入储气柜，充装时将气体用压缩机加压充入温度降至 -80°C 左右的钢瓶内。在钢瓶中 SF_6 大部以液态存在，使用时经减压放出，呈气态充入设备。 SF_6 生产工艺流程简图见图2—1所示。

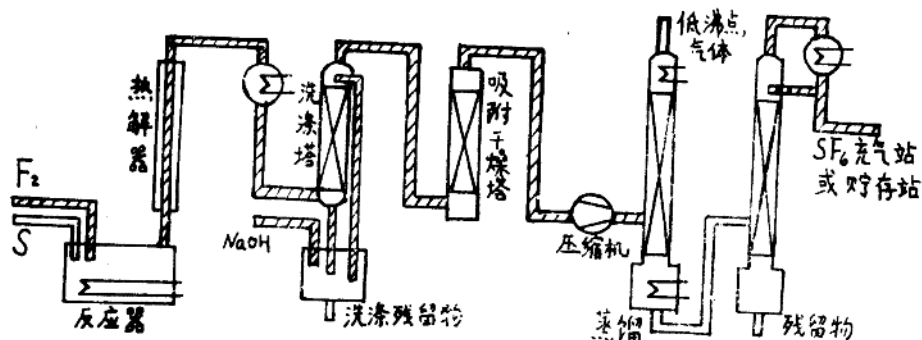


图2—1 SF_6 生产工艺流程图

采用该生产过程影响产品质量和成本的一个重要环节是氟气的获得。氟气是通过电解无水氟化氢的方法制得的。氟电解槽材质可为碳钢或蒙乃尔合金。通常以无定形碳为阳极，碳钢或其他合金材料为阴极，中间用膜隔开。电解质为 $\text{KF}-\text{HF}$ 。电解温度控制在 $80-110^\circ\text{C}$ ，电压 $8-12\text{V}$ 。大型工业氟电解槽容量可达 6000A ，电槽寿命可达 14×10^6 安培-小时，碳极寿命可在15个月以上，电流效率 $90-95\%$ ，高者可达 $97-98\%$ ，电流密度一般在 $0.15-0.18\text{A}/\text{cm}^2$ 。

其他合成 SF_6 的方法还有：(1) 硫化羰化（氧硫化碳法），即以无水 HF 为氟源，硫化羰（ COS ）为硫源，直接电解合成 SF_6 ；(2) 直接电解法，即将硫、 SCl_2 、 S_2Cl_2 、 CS_2 或 H_2S 等硫化物加入无水 HF 中以镍为阳极进行电解、制取 SF_6 ；(3) 氟化钴法即将硫或硫的化合物与氟同时加入装有 COF_2 和 COF_2 混合物的反应器中在 100°C 以上进行反应，可连续制备 SF_6 ，此法副产物少，产率高、生产成本低。但是以上方法因工艺、设备、成本等方面尚存在一定问题，故均未实现工业化。

目前世界 SF_6 产量数以千吨计，一些大公司例如日本的氟素化学公司和旭硝子公司在七十年代的年生产能力就已达二、三百吨，我国有 SF_6 生产厂家有四川酸厂，江苏吴县化工厂、化肥厂，浙江慈溪化肥厂、814厂等七、八个单位，总生产能力在百吨以上。

2.2 六氟化硫的重要物理化学性质

2.2.1 物理性质：

SF_6 在通常状态下是一种无色、无嗅、无味、无毒、不燃的气体。它的分子是由一个硫原子和六个氟原子组成的。其分子结构为以硫原子为中心，六个氟原子处于顶端位置的正八面体。（见图2—2）

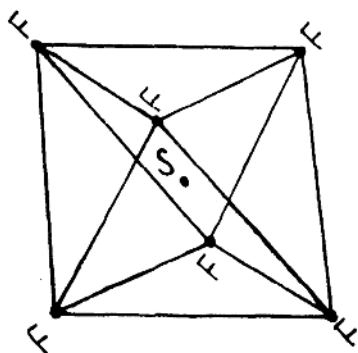


图2—2 SF_6 分子结构示意图

SF_6 气体的密度为6.139克/升（ 20°C ），约为空气密度（1.29克/升）的五倍。由于 SF_6 比空气重得多，因此空气中的 SF_6 易于自然下沉，致使下部空间的 SF_6 浓度升高，且不易扩散稀释，这是造成某些 SF_6 引起窒息事故的重要原因，值得引起注意。

在同一类型的容器中以相同速度流动的 SF_6 气体之热传导率约为空气的四倍，与氢气气体相似。

六氟化硫的重要物理常数列于表2—1

2.2.2 重要物理化学性质

(1) 溶解度： SF_6 在水中的溶解度很低，只有 5.5×10^{-3} ml/ml. 水，和氮气、氩气、氦气等惰性气体相当，但它在某些有机溶剂中的溶解度还是比较高的。（见表2—2）

表2—2 SF_6 在不同溶剂中的溶解度（ $t = 25^\circ\text{C}$ ， $p = 1$ 大气压）

溶 解	水	正庚烷	异辛烷	甲苯	四氯化碳	三氟三氯乙烷	二硫化碳
溶解度 (摩尔分数 $\times 10^4$)	0.05	100.55	153.5	33.95	65.54	278.6	9.25

(2) 热稳定性： SF_6 在常温甚至较高温度下一般不会发生自分解反应，它的热分解温度在 500°C 左右，热分解时形成的组分十分复杂，且因温度不同而异，此问题将在以后的有关部分中做进一步说明。

(3) 高能粒子辐照下的化学反应： SF_6 在多种高能粒子辐照下例如： γ 射线、红外线、

表2-1

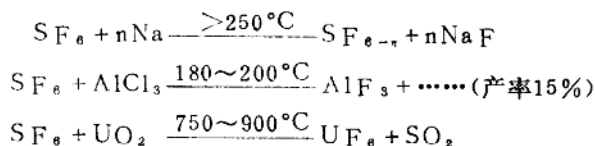
六氟化硫的重要物理常数(SF₆)

名 称	SF ₆	N ₂
熔点, °C	-50.3 (2.36kg/cm ² 时)	-210
升华温度, °C	-63.3 (760mm/Hg)	-196(沸点)
临界温度, °C	45.642 (45.55*)	-146.8
临界压力、大气压	37.193 (38.24*)	33.5
溶解热, 千卡/摩尔	1.201 (1.39*, 1.1*)	-
升华热, 千卡/摩尔	5.64, 5.57* (-63.8)	-
气, 克/升	6.45	1.250
密度 (0°C, 1大气压)	1.37(20°C)、1.722(-20°C)、1.878(-50°C)	0.801(-195.8°C)
液, 克/厘米 ³	2.683(-195°C)、2.51(-50°C)	1.026(-252.8°C)
固, 克/厘米 ³	0.74	-
临界, 克/厘米 ³	11.63(-50°C)、8.02(-20°C)	6.2(-183°C)
表面张力, 达因/厘米	气体: 0.0157(1大气压, 31.16°C), 液体: 0.205(1大气压, 13.5°C)	0.0174(20°C)
粘度, 厘泊	3.36 × 10 ⁻⁵	5.1 × 10 ⁻⁵
热传导率, 卡/秒·厘米·°C (1大气压, 30°C)	1.002094 (1大气压, 25°C)	5.8 × 10 ⁻⁵ (0°C); 7.5 × 10 ⁻⁵ (100°C)
介电常数ε (公制单位)	5 × 10 ⁶ 以下(1大气压)	-
介电质因子tan δ	13.94(100°K, 1大气压)、28.56(1大气压, 230°), 23.22 (300°K)	6.86
比热(Cp), 卡/克分子·度	3 × 10 ⁻²⁰	0
偶极矩CGS (公制单位)	(-0.300 ± 0.003) × 10 ⁻⁶	-0.42 × 10 ⁻⁶
磁化率CGS 单位	1.088 ~ 1.057	1.4 ~ 1.35
绝热指数 (1大气压, 0~1000°C)	134	349
音速, 米/秒		

紫外线以及低能电子的轰击下作为一种特殊的电子受体以这样或那样的方式影响反应最终产物的组成。例如在水的 γ 辐射分解过程中, 如有 SF_6 参加, 则会产生大量的氟离子; 而当 SF_6 与 NO 的混合物在红外线的照射下则会产生 SO_2F_2 ; SF_6 在光子 ($n\gamma$) 的作用下又会产生 SF_6^+ 、 SF_5^+ 、 F 等离子或原子。总之, SF_6 的辐射产物在不同条件下其组成同样是复杂多样的。

(4) 高温下的反应举例:

SF_6 在一定温度下可以与若干化学活性强的物质发生氧化还原 (SF_6 为氧化剂)、置换和其他反应, 例如:



用差热分析法确定绝大多数金属在 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 时均可以明显的速度与 SF_6 反应生成各类金属的氟化物。

2.2.3 重要电气性能

(1) 绝缘性能: 如前所述, SF_6 分子结构是以一个硫原子为中心, 六个氟原子处于各顶端的正八面体, 而氟原子又是一个在各元素中电负性名列前茅的元素, 也就是说它的电子捕获截面极大, 具有极强的吸附电子的能力。而且一个 SF_6 分子中有六个氟原子之多, 可想而知, 它的电负性是十分可观的 (SF_6 的电子亲和力为 $\text{EA} = 3.4\text{eV}$)。

正是出于上述理由人们日益关心 SF_6 的电性能, 并进行了大量的实验研究工作, 证实了它的确是一种电绝缘性能超群的化合物。1937年法国首先将其作为绝缘介质用于高压绝缘电器设备。

实验表明, 在相同的压力和温度下 SF_6 的绝缘耐力 (击穿强度) 为空气的2~3倍, 在三个大气压下可与常压下的绝缘油相匹敌。

SF_6 气体的绝缘特性见图2—3。

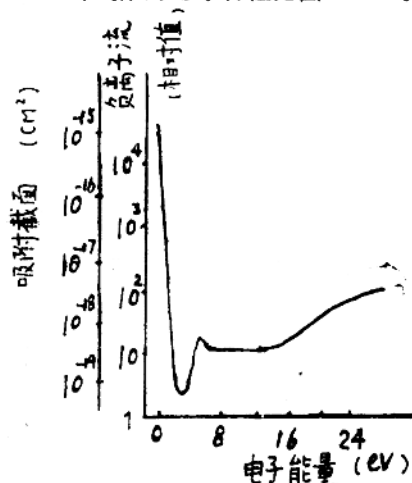


图2—3 SF_6 气体的电子吸附 (捕获) 截面

(2) 灭弧性能: SF_6 气体广泛应用于高压开关系统的重要原因之一就在于其优越的灭弧性能。灭弧时在电弧过零的瞬间, 电极间的电子, 借助于 SF_6 分子的强电负性而附着其上。由于 SF_6 分子质量为电子质量的几十万倍故它移动得很慢, 不能获得使电子再次冲击的速度, 从而使电弧熄灭。 SF_6 的灭弧能力约为空气的100倍, 因此特别适用于高电压大电流的开断。

SF_6 的灭弧能力较空气、绝缘油等介质的优越之处具体表现为:

(a)、即使在电弧作用下发生分解时它也不会象绝缘油那样产生能导电的碳原子, 而是产生出极微量的电性能类似于 SF_6 的含硫低氟化合物。

(b) 电弧时间常数是反映灭弧速度的一个重要指标。对圆柱形电弧而言,该值与电弧半径的平方成比例。即使在静止状态下 SF_6 的电弧时间常数也是极小的,要比空气等介质的性能优越两个数量级以上。正由于其极小的电弧时间常数,加上 SF_6 分子在电弧作用下分解后的迅速复合能力($10^{-5} \sim 10^{-4}$ 秒), SF_6 断路器发挥了卓越的绝缘恢复特性,使它可以耐受大电流开断后诸如近区故障那样严酷的恢复电压。

由于 SF_6 分子中各S—F原子间距离均为 $1.58\text{\AA}$,这个“等价的结合”使它能在非导电域温度(限制离子化温度) $\sim 2100^\circ\text{K}$ 附近急速解离,且其温度范围极窄,几乎没有中间物质生成,继之迅即完成再结合过程,其结果反映在气体导热率上,此即构成了其强灭弧能力的原因。而氮气在临界温度范围($300^\circ \sim 7000^\circ\text{K}$)内具有高导热性,因而不会形成狭窄的弧心。在此区域内,径向温度的梯度较缓,熄灭中的电弧直径仍然很大。由此其电弧时间常数大大高于 SF_6 ,其灭弧能力自然劣于 SF_6 。

(3) SF_6 气体绝缘设备的优点:占地面积和空间小、性能稳定可靠、对环境污染低、噪音小、维修周期长等已为人们所公认。表2—3、表2—4为 SF_6 设备与其它设备的重要性能参数的比较。

表2—3

SF_6 与空气和绝缘油之比较

项 目	与 空 气 比 较	与 绝 缘 油 比 较
绝缘耐力	2~3倍	在3气压下与油相同
电弧时间常数 μs	空气: 1, SF_6 : 10^{-2}	——
介电常数	同等	在与固体组合的情况下 不如绝缘油
电弧作用下的分解	SF_6 会生成有毒的分解物	因电弧分解而可能爆炸(油)
比重	5倍	1/140
不燃性	——	着火点 140°C (油)
冷却性	比空气好	热导率为油的1/4.5
防音性	比空气好	比油好
热稳定性	200°C 以下(SF_6)	105°C 以下(油)
热损坏	在 SF_6 气氛中不发生材料的劣化变质	油本身发生劣化损坏

2.3 关于六氟化硫的毒性和微量 SF_6 气体的分析监测方法

2.3.1 关于 SF_6 的毒性问题:

由于 SF_6 是由易于生成有毒有害物质的硫和氟这两个元素组成的,而且在 SF_6 分子中氟原子多达六个。再加上曾发生过与 SF_6 使用有关的中毒事故,因此在不熟悉者当中存在一种当然的疑问,担心甚至误认为 SF_6 本身就是个有毒有害物质。为此国内外均做过大量的生物染毒试验,并采用了十分苛刻的条件,即把 SF_6 取代空气中的氮气,用79%的 SF_6 和21%的

· 非导电域温度(限制离子化温度)系指在该温度下电子密度下降到其导电能力可忽略不计的程度。

表2—4 SF₆气体绝缘开关设备与过去的空气绝缘方式之体积面积比较举例

电 压		66kv	154kv	275kv
体 积 (m ³)	SF ₆ 设备		133	381
	以往的设备		5160	38115
	缩小率	3.1%	2.6%	1.0%
面 积 (m ²)	SF ₆ 设备	15	29.6	52.5
	以往的设备	123.5	312.5	1390
	缩小率	12%	9.5%	3.8%

氧气混合后，通入动物染毒缸。用五只白鼠在其中暴露24小时，然后再在新鲜空气中放置观察72小时，结果动物均未出现中毒症状。能通过上述实验的物质，卫生学上称无毒物质，药理学上称非活性气体。

此外SF₆可在医学上作人工气胸时使用，这也可作为它无毒无害的一个佐证。

国际上将有毒物质分剧毒、高毒、中等毒性、低毒、基本无毒、实际无毒六级，并规定有相应确认标准。

如上所述，目前国际上公认SF₆气体无毒无害，可安全使用。仅仅提出，由于SF₆气体比空气重五倍而且容易液化，因此有可能造成SF₆在低凹处滞留而引起局部缺氧或在密闭容器中充气过量的问题，对此应予以注意。

美国1977年规定工作现场空气中SF₆允许浓度为1000ppm。

2.3.2 空气中SF₆含量的分析监测方法：

在SF₆电器设备现场对SF₆含量进行分析监督的目的主要是①发现和防止SF₆气体的泄漏以避免造成经济损失甚至设备运行故障；②防止SF₆气体在空间底层积留而引起窒息事故；③通过对SF₆本身的浓度检测，可以间接监督其中有害杂质的可能扩散情况，防止职业中毒。

SF₆是一种含硫的卤族化合物，同时又是一种电负性极强的物质。目前国内外检测微量SF₆的仪器装置和简易测试手段大多是利用了SF₆的上述特性。

气相色谱仪是一种对微量SF₆定量测定的最佳手段之一，使用电子捕获或火焰光度检测器可定量测定ppb级甚至更低气体中SF₆的浓度。此外，红外分光光度计也可以定性、定量的测定气体中微量SF₆。

专用的SF₆气体检测仪器国内外已有若干产品。在国内已进口有西德、日本、美国等SF₆检漏仪。这些仪器虽质量尚可满足要求，但价格昂贵（有的上万美元），而且体积大，笨重（如西德SIEMENS H5531A型重达48公斤），我国上海唐山仪表厂生产的SF₆检漏仪在质量上尚存一定问题。401研究所最近研制成功了SF₆报警器可作定性报警用。北京市劳动保护研究所已研制成功ISJ—3301型SF₆检测检漏仪可完成报警和定量测定的需要，体积小，重量轻（不到一公斤）最低检出量可达1ppm且价格便宜，有一定的竞争能力。这方面的详细内容将在第六章中阐述。

第三章 六氟化硫在电弧作用下的分解

如前所述,六氟化硫在通常状态下是一种化学性质稳定的、无色无嗅、无毒的气体物质。然而大量的研究和实践表明,在大电流电弧的作用下六氟化硫会发生分解产生某些低氟化合物,这些分解物又会与电极材料,水份和氧气等进一步反应生成组分十分复杂的多种化合物。这些物质对设备和人身均会带来不良后果。美国曾报导过与此有关的设备事故,我国也曾发生过与此有关的中毒问题。因此为了确保设备的正常运转和有关人员的安全和防止环境污染,有必要对电弧作用下 SF_6 分解的问题给予应有的重视。

以下着重论述六氟化硫在电弧作用下的分解过程、影响该过程的主要因素以及 SF_6 主要分解产物的物理化学性质和毒性。

3.1 六氟化硫的电弧分解过程及其主要化学反应

SF_6 在通常状态下是一种可与氮气相比拟的十分稳定的气体。它的分子结构是一个以硫原子为中心、六个氟原子在各项上的正八面体。

SF_6 的自分解温度在 500°C 左右,不同温度下 SF_6 热分解的产物可由 S 、 F 、 e 、 SF_5 、 SF_4 、 SF_3 、 SF_2 、 SF 、 S_2 、 F_2 、 S^+ 、 S^{+2} 、 F^+ 、 F^- 、 S^- 等物质组合而成。 1000°K 时 SF_4 和 F 占 6×10^{-6} ,分子氟占 1×10^{-6} ,到 3000°K 时 SF_6 已完全消失,这时的分解成分主要是 S^+ 、 F^+ 、 F^- 、 S^- 。到 5000°K 时 SF_6 亦消失, 7500°K 时形成由电子、原子或离子态的硫和氟组成的等离子体。

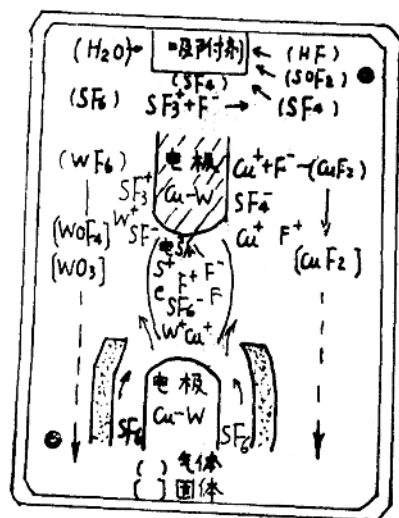


图 3—1 断路器中 SF_6 分解模型

在断路器开断和避雷器发生电弧放电时, SF_6 气体在电弧的高温作用下(约 4000°K 左右)发生分解,并以硫和氟的单原子状态存在。这些单原子态的物质在消弧后的瞬间(10^{-5} 秒以内)大部分迅速复合而成 SF_6 分子,即存在着 $\text{SF}_6 \rightleftharpoons \text{S} + 6\text{F}$ 的化学过程。

然而在此复合过程中也会有极少部分的分解物与电极材料或系统中存留的水份,空气等杂质发生反应而不能恢复原状。这样的分解反应大体上可以分成三类,即氧化还原,非均化和水解。这个反应过程以模型的形式示于图3—1。这三种反应在实际电弧分解过程中所占的地位依电弧能量、设备材质等因素而定。分解物质的组分和含量也自然与上述各因素直接有关。

不少研究者认为电弧作用于 SF_6 分解的主