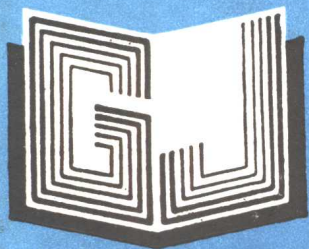
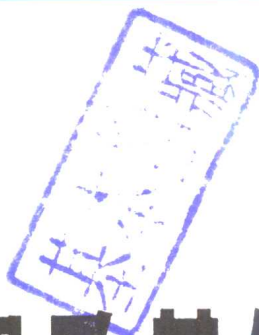


974648

TMB
7786



高等学校教材



GIS装置及其绝缘技术

西安交通大学 邱毓昌 主编



高等学校教材

GIS装置及其绝缘技术

西安交通大学 邱毓昌 主编

水利电力出版社

7 (京)新登字115号

内 容 提 要

本书介绍SF₆电气设备及其绝缘技术, 主要包括: 六氟化硫的基本理化性能, 六氟化硫气体中的放电过程和击穿规律, 电极表面粗糙度和导电微粒对放电的影响, 支撑绝缘子的沿面放电及其影响因素, 气体绝缘电气设备(电缆、变压器、封闭式组合电器、开关柜和其他气体绝缘电气设备), 现场耐压试验方法和绝缘故障诊断技术以及混合气体绝缘特性共七章。在内容安排上注意将基础理论同工业应用的实际问题紧密联系起来。

本书系高等学校高电压技术及设备专业本科生的选修课教材, 也可作为高电压技术专业及相近专业研究生以及电力、电工有关部门工程技术人员的参考书。

高等学校教材

GIS装置及其绝缘技术

西安交通大学 邱毓昌 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 7印张 155千字

1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷

印数 0001—1570 册

ISBN 7-120-00809-9/TM·512

定价 3.35 元

前 言

本书是根据高等学校电力工程专业教学委员会过电压、绝缘及测试教学组在1989年4月上海会议通过的大纲编写的,主要用作“高电压技术及设备”专业本科生选修课教材,也可供“高电压技术”专业和相近专业研究生以及电力、电工有关部门工程技术人员参考。

SF₆气体用作高压电力设备绝缘只有30余年历史,但由于SF₆气体优异的绝缘性能,气体绝缘的金属封闭式组合电器(GIS)等气体绝缘电气设备已成为当前高电压设备绝缘的一个发展方向。因此,开设“GIS装置及其绝缘技术”选修课既是技术发展的要求,也为我国电力建设事业所急需。

全书共分七章。第一章介绍SF₆的基本理化性能,包括气体的电负性、热性能以及气体的分解和含水量的控制。第二章阐述SF₆气体中的放电过程和自持放电判据,以及在不同电场均匀度和不同电压波形下的击穿规律。第三章论述影响SF₆气体耐电强度的因素,主要是电极表面粗糙度和导电微粒的影响。第四章是关于SF₆气体中支撑绝缘子的沿面放电特性,对影响沿面放电的一些因素进行了分析和讨论。第五章介绍气体绝缘电气设备的结构设计特点,内容包括气体绝缘电缆、气体绝缘变压器、封闭式组合电器、气体绝缘开关柜以及其他气体绝缘电气设备。第六章是现场耐压试验和绝缘故障诊断技术,包括击穿故障点定位和早期绝缘故障的诊断。第七章对尚处于研究和开发阶段的混合气体绝缘作扼要的介绍,即混合气体的优点及其在不同电场中的绝缘特性,以及气体的混合特性。

本书编写分工为:邱毓昌写第一、二、五、六、七章,冯允平写第三、四章。在编写过程中,编著者们不仅参考了近年来出版的国内外有关教材和重要文献,而且总结了自己多年来从事SF₆气体绝缘研究所取得的成果和讲授这一选修课的教学经验,使本教材既重视加强基础理论,又注意密切联系生产实际。但限于水平,书中仍不免有不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

本书由清华大学高电压教研室朱德恒教授主审,提出不少宝贵意见,谨在此致以深切的谢意。

编 者

1991年6月

EA1109/1209

目 录

前言

第一章 六氟化硫的基本理化性能	1
第一节 概述	1
第二节 SF_6 气体状态参数间的关系	3
第三节 气体的电负性	4
第四节 SF_6 气体的热性能	5
第五节 SF_6 气体的分解	7
第六节 气体含水量的控制	9
第七节 注意事项	12
第二章 六氟化硫气体中的放电	13
第一节 碰撞电离和电子附着	13
第二节 汤逊放电判据	15
第三节 流注放电判据	17
第四节 均匀电场中的击穿	18
第五节 稍不均匀电场中的击穿	19
第六节 极不均匀电场中的放电	23
第七节 冲击击穿特性	25
第三章 电极表面粗糙度和导电微粒对放电的影响	30
第一节 电极材料对放电的影响	30
第二节 电极表面粗糙度对放电的影响	32
第三节 电极的面积效应	34
第四节 导电微粒污染的影响	35
第四章 六氟化硫气体中支撑绝缘子的沿面放电特性	44
第一节 气体绝缘系统中支撑绝缘子的类别与材料	44
第二节 电场分布及其对沿面闪络电压的影响	46
第三节 屏蔽电极的影响	50
第四节 影响沿面闪络电压的其他因素	52
第五章 气体绝缘电气设备	56
第一节 气体绝缘电缆	56
第二节 气体绝缘变压器	62
第三节 封闭式组合电器	70
第四节 气体绝缘开关柜	78
第五节 其他气体绝缘电气设备	81
第六章 现场耐压试验和绝缘故障诊断	85

第一节 现场耐压试验的目的与方法.....	85
第二节 串联谐振的交流耐压装置.....	87
第三节 振荡操作冲击波发生器.....	89
第四节 内部击穿故障点的定位.....	90
第五节 绝缘早期故障的诊断.....	93
第七章 混合气体绝缘	96
第一节 混合气体的优点.....	96
第二节 均匀电场中的绝缘特性.....	97
第三节 不均匀电场中的绝缘特性.....	99
第四节 气体的混合特性.....	101
主要参考文献	105

第一章 六氟化硫的基本理化性能

第一节 概 述

绝缘气体不但应具有高耐电强度，还要有良好的理化特性。如绝缘气体用作灭弧介质，则还应具有优良的灭弧性能。

SF₆气体的主要物理特性如表1-1所示，它是迄今最理想的绝缘和灭弧介质，其主要优点如下。

1. 耐电强度高

SF₆是强电负性气体，其分子具有很强的吸附自由电子而形成负离子的能力（见本章第三节），因而其耐电强度很高，在较均匀的电场中约为空气耐电强度的2.5倍左右，如图1-1。与传统的敞开式电器装置相比，以压缩的SF₆气体为绝缘的组合电器（GIS）的空间占有率可大大缩小，例如500kV的GIS的体积只有敞开式电器的1/50左右。

表 1-1 SF₆气体的主要物理特性

分子量	146.07
分子直径	$4.56 \times 10^{-10} \text{ m}$
密度 (20℃, 0.1MPa)	6.08 kg/m^3
相对介电常数 (25℃, 0.1MPa)	1.002
介质损失角正切 (0.1MPa)	$< 5 \times 10^{-6}$
临界温度	45.6℃
临界压力	3.76MPa
三态点温度	-50.8℃
升华点温度	-63.8℃
粘度 (30℃, 0.1MPa)	$1.57 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
定压摩尔热容 (25℃, 0.1MPa)	$97.2 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
导热系数 (30℃, 0.1MPa)	$0.014 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
绝热指数	1.07

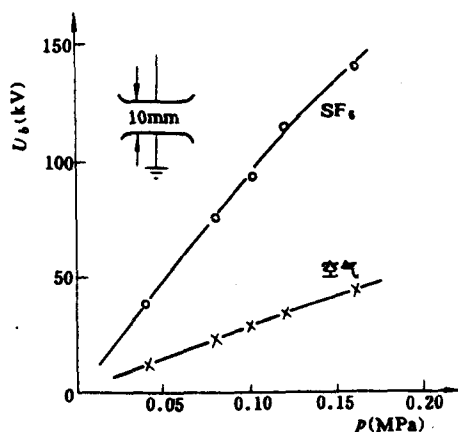


图 1-1 均匀电场中SF₆和空气的交流击穿电压（峰值）比较

2. 灭弧能力强

在交流电弧电流过零时，SF₆气体从导体向绝缘体的转化速度非常快，即弧隙的介质强度恢复得很快。这是因为一方面SF₆气体在高温（>1000K）下发生分解需要大量能量，因而对弧道产生强烈的冷却作用（见本章第四节），另一方面SF₆及其分解气体均具有很高的绝缘强度的缘故。实验表明，静止的SF₆气体的电弧时间常数比同样条件下空气的电弧时间常数小两个数量级，SF₆气体的灭弧能力为空气的100倍以上，如图1-2所示。

3. 通常无液化问题

现代SF₆高压断路器均为单压式，气压在0.7MPa左右。GIS除断路器外其他部分的

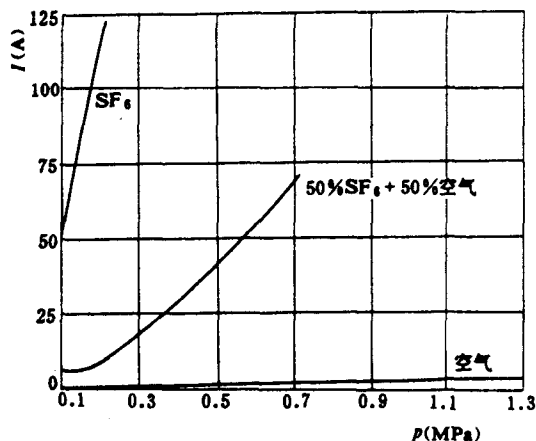


图 1-2 SF_6 、空气和 SF_6 -空气混合气体的开断电流与气压的关系（试验电压为2.3kV，开距为75mm，无气吹）

充气压力一般不超过0.45MPa。由图1-3所示的 SF_6 状态图可见，如20℃时充气压力为0.75MPa，则液化温度为-25℃（容器中气体密度是不变的，所以在图1-3中求 $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$ 的等密度线与饱和蒸汽曲线的交点，即得液化温度）。如20℃时充气压力为0.45MPa，则液化温度为-40℃。所以在大多数工程应用情况下不必担心 SF_6 气体的液化问题。只有在高寒地区，才必须对断路器部分采取加热措施，或采用 SF_6 - N_2 混合气体作为断路器灭弧介质以降低液化温度（见第七章）。

事实上多种弗利昂气体的耐电强度与 SF_6 相当或甚至更高，但它们无法取代 SF_6 。除弗利昂气体在放电时会分解出碳微粒外，液化温度过高也是一个重要原因（弗利昂会破坏大气臭氧层，因此近年来国际上已对它开始抵制和禁用）。

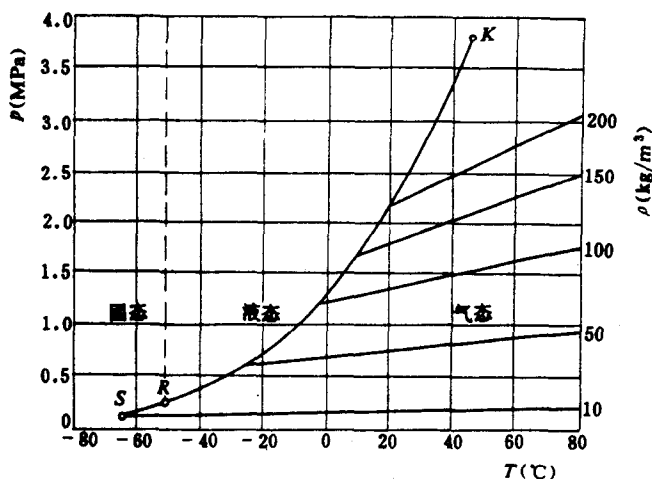


图 1-3 SF_6 的状态图（斜直线为气体等密度线）

K—临界点；R—三态点（熔点）；S—升华点

4. 化学稳定性好

纯净的 SF_6 气体是一种无色、无嗅、无毒和不燃的惰性气体。温度在180℃以下时它与电气设备中材料的相容性和氮气相似。纯 SF_6 气体在温度升高到500℃时也不会分解；但与金属材料共存时，则在200℃时就有可能发生微量分解。电弧高温会使 SF_6 气体分解，但电弧熄灭后绝大部分分解物又重新结合成稳定的 SF_6 分子，只有极少部分与游离的金属

原子及水发生反应，产生金属氟化物和硫的低价氟化物。此外火花放电和电晕也会使 SF_6 分解（见本章第五节）。 SF_6 的最大优点是它不含碳，因此不会分解出影响绝缘性能的碳粒子；且其大部分气态分解物的绝缘性能与 SF_6 相当，所以不会使气体绝缘性能下降。 SF_6 气体分解物有毒，但可以用吸附剂加以清除，只要采取安全措施，不会对运行和检修人员造成危害。

第二节 SF_6 气体状态参数间的关系

SF_6 气体在工程应用的气压范围内已偏离理想气体的特性，因此在高气压和低温下用理想气体的状态方程会带来较大的误差，而必须加以修正。

理想气体的状态方程为：

$$pV = \frac{M}{\mu}RT \quad (1-1)$$

式中 p ——气压；
 V ——气体体积；
 T ——气体的热力学温度；
 M ——气体的质量；
 μ ——气体的摩尔质量；
 R ——普适气体恒量。

国际单位制（SI）中气压的单位是帕（ $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ ），工程中应用千帕（kPa）或兆帕（MPa）作为计量单位（一个标准大气压为 101.33kPa ）。必须注意，有的气体绝缘电气设备的技术文件中给出的气压是指表压力，但本书中气体压力均指绝对气压。

实际上影响碰撞电离过程的因素是气体的分子数密度，而不是气压和温度本身，所以在研究气体放电时常将式（1-1）改写成下列形式：

$$p = NkT \quad (1-2)$$

式中 N ——单位体积内分子数，即分子数密度；
 k ——玻尔兹曼恒量（ $k = 1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ）。

对于非理想气体，在式（1-2）中要引入一个压缩因子 Z （压缩因子是气压和温度的函数），即式（1-2）应改写为：

$$p = ZNkT \quad (1-3)$$

当 $t = 20^\circ\text{C}$ ， $p \leq 1\text{MPa}$ 时， SF_6 气体的压缩因子可用下式表示：

$$Z = 1 - 0.115p - 0.018p^2 \quad (1-4)$$

式中 p 的单位是MPa。

可见， SF_6 的压缩因子随气压的增大而减小。这说明当气体密度增加时，气压并不成正比地增大，而是要略低。出现这一现象的原因在于此时分子间距离减小，因而分子间吸引力增大，使分子与容器壁之间的作用力减小。

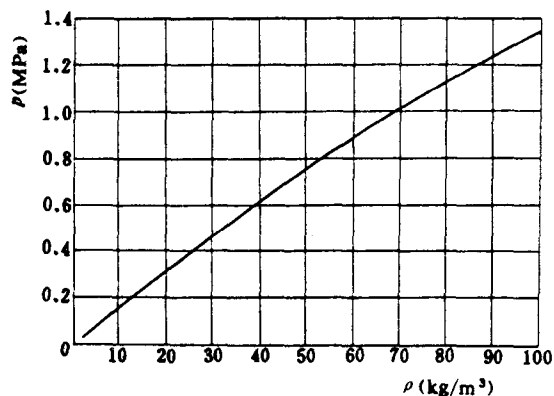


图 1-4 $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 SF_6 气体密度与气压的关系

气体密度 ρ 与分子数密度 N 有如下关系:

$$\rho = \mu N / N_0 \quad (1-5)$$

式中 N_0 ——阿伏加德罗常数, $N_0 = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

因此, SF_6 气体密度与气压、温度的关系如下式所示:

$$\rho = \mu p / Z k N_0 T$$

$$\text{或} \quad \rho = \mu p / Z R T \quad (1-6)$$

图 1-4 给出 $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 SF_6 气体密度与气压的关系曲线。

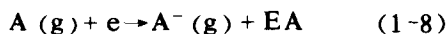
第三节 气体的电负性

SF_6 气体绝缘强度高的主要原因在于它是强电负性气体, 电子与气体分子碰撞时不但会发生碰撞电离, 也会发生电子附着的过程。若以 α 表示碰撞电离系数, η 表示电子附着系数, 则电负性气体中的有效碰撞电离系数 $\bar{\alpha}$ 可用下式表示:

$$\bar{\alpha} = \alpha - \eta \quad (1-7)$$

图 1-5 给出 SF_6 气体的 α/p 、 η/p 和 $\bar{\alpha}/p$ 随 E/p 变化的曲线, 并与空气的 $\alpha_{\text{空气}}/p$ 曲线作比较。由图 1-5 可见, SF_6 气体的 α/p 与空气的并无多大差别, 所以 SF_6 气体耐电强度高的主要原因是电子附着过程。

使基态的气体原子 $A(g)$ 获得一个电子形成 -1 价气体离子 $A^-(g)$ 时所放出的能量, 叫做第一电子亲和能, 简称电子亲和能 (EA)。电子亲和能可用来衡量原子获得一个电子的难易。



卤族元素的外层轨道中增添一个电子时, 即可形成象惰性气体一样的稳定的电子排布结构, 因而具有很大的电子亲和能, 如表 1-2。

表 1-2 卤族元素的电子亲和能和电负性数值

元 素	电子亲和能 (eV)	电负性数值
F	3.45	4.0
Cl	3.61	3.0
Br	3.36	2.8
I	3.06	2.5

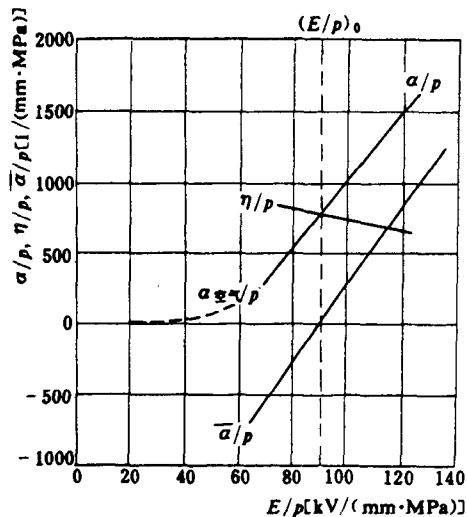


图 1-5 SF_6 气体的 α/p 、 η/p 和 $\bar{\alpha}/p$ 随 E/p 的变化

电子亲和能并未考虑原子在分子中成键的作用,因此鲍林在化学中引入电负性概念。电负性表示元素的原子在分子中对成键电子的吸引程度。元素的电负性数值越大,则原子在分子中吸引电子的能力越大。氟是所有元素中电负性数值最大的元素(见表1-2)。

SF_6 气体中负离子的产生主要有以下几种过程:



式(1-9)表示附着过程,式(1-10)、式(1-11)表示分解附着过程, $(\text{SF}_6^-)^*$ 是不稳定的中间状态。

究竟哪种负离子在气体中占优势,取决于电子能量即外加电场的大小。由图1-6可见, SF_6^- 在0.05~0.1eV时最易形成,而 SF_5^- 的峰值出现在0.1~0.3eV,但其离子数量远小于 SF_6^- (图1-6中 SF_5^- 的量放大了20倍)。当电子能量大于1eV时很难发生电子附着过程,这就解释了为什么 SF_6 的耐电强度在有局部场强过高的情况下会大大下降。

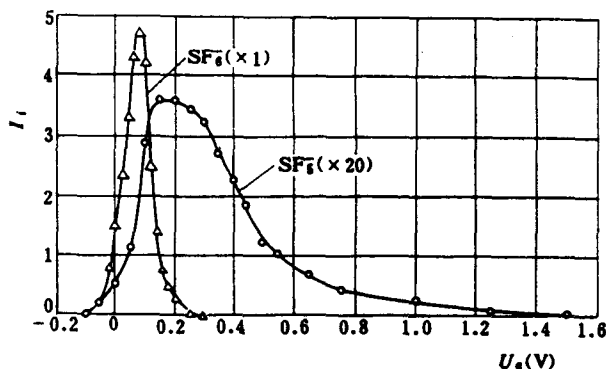


图 1-6 SF_6^- 与 SF_5^- 离子电流与电子加速电压的关系(离子电流坐标表示的是相对值)

第四节 SF_6 气体的热性能

介质的传热性能对于电气设备来说也是十分重要的。根据工程应用的不同特点,对 SF_6 的传热性能分以下三种情况讨论。

一、热传导

气体的热传导是通过气体分子的碰撞,使动能较大的分子将能量传递给邻近的动能较小的分子。理想气体的导热系数 k 可按下式计算:

$$k = \frac{1}{3} \rho v \lambda c_v \quad (1-12)$$

式中 ρ —— 气体密度;

v —— 气体分子的均方根速度;

λ —— 气体分子的平均自由行程;

c_v —— 气体的定容比热。

在工程应用的气压范围内,因为 $\rho \propto p$ 而 $\lambda \propto 1/p$,所以气体导热系数基本上与气压无关。另外,由于气体分子速度与绝对温度的平方根成正比,所以气体导热系数随温度的升高而增大。

由于 SF_6 的分子量比空气大得多,即在同样温度下 SF_6 气体分子运动速度比空气小得多,所

以 SF_6 气体的导热系数比空气小,在 $t = 30^\circ\text{C}$ 时两者导热系数分别为 0.014 和 $0.027\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。

二、对流换热

对流换热是指气体流过热体表面时,对流和导热同时起作用时的热量传递过程。气体

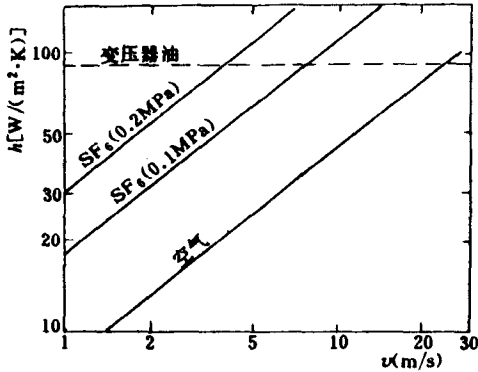


图 1-7 不同流速下 SF_6 和空气的对流换热系数

绝缘的电力变压器就是一个对流换热的例子,按散热要求可采用自然对流或强制对流冷却方式(采用蒸发冷却的不属于所讨论的范畴)。

气体的对流换热系数 h 与多种因素有关,如气体的流速、密度、粘度、导热系数及定压比热等。与空气相比, SF_6 气体的密度大,但粘度却小,因此在气压、温度相同的情况下, SF_6 气体的对流换热系数大于空气。

图1-7给出不同流速下 SF_6 气体和空气的对流换热系数。由图可见,0.2MPa的 SF_6

气体在流速为 4m/s 时传热能力与变压器油的相同。

三、气体热分解时的传热能力

考察 SF_6 气体的灭弧性能时,必须计及气体热分解时导热性能的提高。图1-8为 SF_6 的分解气体质点密度 n 与温度的关系, Σn_i 表示各种质点密度之和。图1-8说明, SF_6 气体

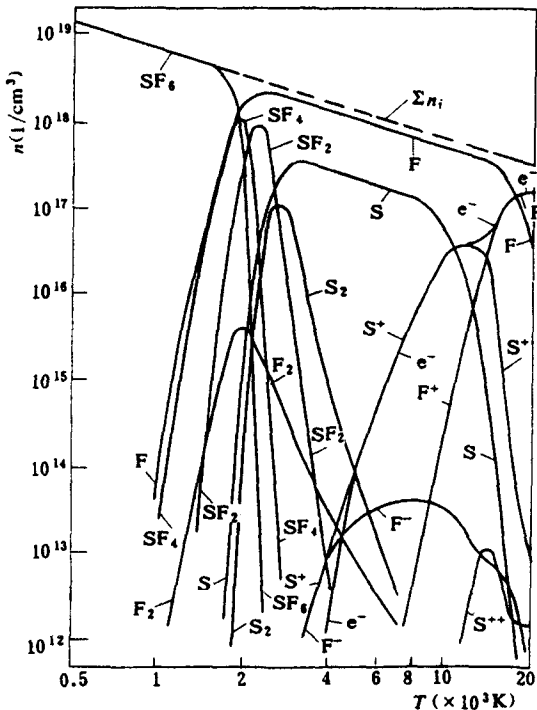


图 1-8 SF_6 的分解气体的质点密度 n 与温度的关系 ($p = 0.1\text{MPa}$)

在 $T = 2000\text{K}$ 附近出现热分解高峰,这时由于分解反应吸收了大量热量。因此,如图1-9所示, SF_6 气体的导热系数也在 2000K 附近出现高峰,而氮气(空气的主要成分)的导热系数高峰出现在 $T = 7000\text{K}$ 附近。因此,对于交流电弧电流过零时弧道的冷却作用,空气远不如 SF_6 气体。

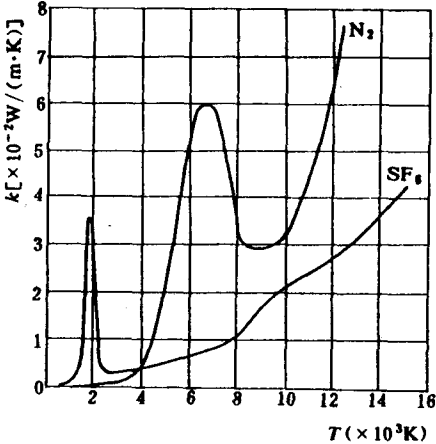


图 1-9 高温下 SF_6 及 N_2 的导热系数 k 与温度的关系

上述分析得到图1-10所示实验结果的证实。图1-10的实验条件是在0.1MPa气体中,用并联的短路火花间隙熄灭100A直流电弧后,测量单位长度弧道电导随时间的变化。测量结果表明:在开始的50 μ s内, N₂中的弧道电导值衰减得比SF₆中快;但50 μ s以后则相反,此时SF₆中弧道电导值衰减得比N₂中快得多。这一结果与图1-9所示两种气体的导热系数高峰出现在不同的温度范围是一致的。

采用气吹可以使SF₆的灭弧性能大大提高。图1-11表明,用具有音速的气流吹弧时,可使电弧时间常数 θ 减小约两个数量级。电弧时间常数是电弧电流突然消失后电弧电阻增大到初始值的2.718倍所需的时间。所以电弧时间常数是衡量电弧间隙开断能力的一个重要参数,电弧时间常数越小说明开断能力越强。

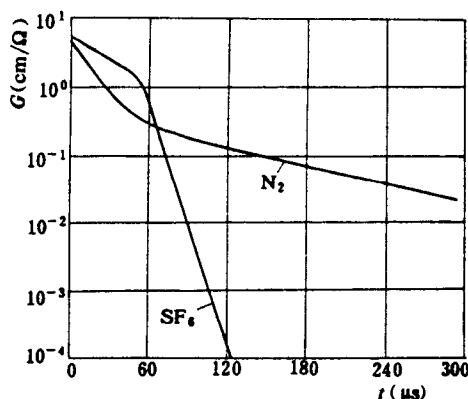


图 1-10 SF₆和N₂中熄灭100A 直流电弧后,单位长度弧道电导随时间的变化

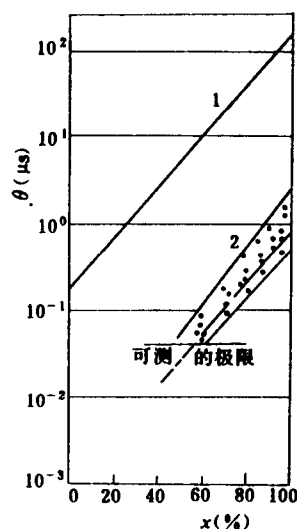


图 1-11 电弧时间常数 θ 随SF₆气体中空气含量 x (体积浓度)的变化

1—静止气体; 2—具有音速的气流

第五节 SF₆气体的分解

SF₆气体本身无毒,与电气设备中的金属和绝缘材料有很好的相容性。但SF₆的分解物有毒,对材料有腐蚀作用,因此必须采取措施,以保证人身安全和设备工作的可靠性。

一、SF₆气体分解的不同过程

使SF₆分解的原因有三种,即电子碰撞引起的分解、热分解和光辐射分解。但在高压电器设备中主要是前两种。GIS(气体绝缘的金属封闭式组合电器)中的放电形式有三种,都会引起SF₆气体分解。

(1) 大功率电弧放电。如断路器开断过程中的电弧,或GIS内部短路故障电弧。这种电弧放电特点是:电流一般在数千安以上,电流持续时间约为数十至数百毫秒,能量约为 $10^5 \sim 10^7$ J。由于电弧温度极高,可达20000K,所以同时发生热分解。高温下SF₆及其气体分解物还会与金属发生反应,形成金属氟化物,如CuF₂、AlF₃、FeF₃或FeF₂以及WF₆(WF₆为气体,其他金属氟化物为粉末状固体)等。SF₆中的杂质如O₂和H₂O对某

些气体分解物（如 SOF_2 、 SO_2F_2 、 SOF_4 和 SO_2 等）的产生有很大影响。此外，如有含硅材料时会形成 SiF_4 ，与有机高分子材料反应会产生 CF_4 。放电使 SF_6 分解的示意图见图1-12。

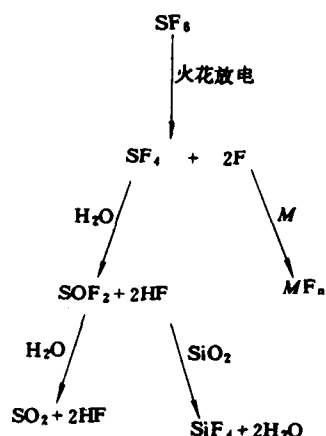


图 1-12 放电使 SF_6 气体分解的示意图(M 表示金属材料)

(2) 火花放电。如高压试验时的击穿，或隔离开关操作时的火花。这种情况下每次放电能量约为 $10^{-1} \sim 10^2 \text{J}$ ，分解气体的量与放电次数有关。

(3) 电晕或局部放电。如电极表面缺陷引起的电场局部集中，存在导电微粒或固体绝缘中有空穴的情况。这种放电的电流仅为微安级，但长时间放电会产生大量分解物。

除上述几种放电引起气体分解外，单纯的热分解在电器设备中也有可能发生，例如GIS中大电流回路中接触电阻过大会引起过热，由于存在金属和绝缘材料， SF_6 气体在约 200°C 时就会发生轻微分解。

二、主要分解物及其毒性

气体分解物可用红外分光仪、气相色谱仪、质谱仪或核磁共振仪检测。不同条件下（放电种类、共存的材料、 SF_6 中的杂质等）的气体分解物并不相同，几种主要的放电生成物如下：

(1) SF_4 。这是主要的一次分解物，常会进一步发生分解（见图1-12）。其极限安全浓度为 0.1×10^{-6} （ SF_6 的极限安全浓度为 1000×10^{-6} ）。

(2) SOF_2 。在三种放电和热分解过程中均会产生。在大功率电弧情况下，它是主要的气体分解物，其产生率差不多与电弧能量成正比。 SOF_2 为有毒气体，有刺鼻的臭气，对肺有侵害作用。关于 SOF_2 毒性的报道尚不一致，有的报道认为 SOF_2 的毒性比 SO_2F_2 大，但也有相反的报道。

(3) SO_2F_2 。在电晕和火花放电时这种生成物的比例较大功率电弧时高，所以它的存在常能说明有低能放电的情况。 SO_2F_2 气体属痉挛性化合物，对肺也有侵害作用，极限安全浓度为 5×10^{-6} 。必须注意的是 SO_2F_2 气体无嗅，因此很难觉察，但实际上它总和其他强刺鼻性气体如 SOF_2 同时存在。

(4) SO_2 。是 SOF_2 与水反应的生成物（见图1-12），其极限安全浓度为 2×10^{-6} 。

(5) S_2F_{10} 。系剧毒气体，其毒性超过光气，它在空气中的极限安全浓度为 0.025×10^{-6} 。 S_2F_{10} 在电晕或火花放电时产生的可能性比大功率电弧时大，因为它在高温时会分解成 SF_4 和 SF_6 ，或分解成 SF_5 。

(6) 粉末状固体生成物。 CuF_2 、 AlF_3 、 FeF_2 等均为固体生成物，它们的极限安全浓度均为 $2.5 \text{mg}/\text{m}^3$ 。

三、分解物对电器安全运行的影响

大部分气态分解物具有很高的耐电强度，例如 SOF_2 、 SO_2F_2 、 SO_2 和 CF_4 的耐电强度与 SF_6 的耐电强度之比为1.4、0.75、1.0和0.42。所以气态分解物对气体间隙的耐电强

度没什么影响。图1-13表明，即使气态分解物的体积浓度达到30 %时，气隙的耐电强度也没什么变化。

图1-13的实验条件是：弧隙长2.5mm，电流为0.75A。因为实验中用玻璃容器，所以分解气体中SiF₄的含量相当高。图中气体的耐压U_b是用12.7mm的球隙测得的（气压为0.1MPa）。

气体分解物的主要问题在于对固体材料的腐蚀作用。例如HF会腐蚀金属，影响操作机构的工作。HF还会与含硅材料反应，所以GIS中环氧支撑的填料不宜用SiO₂，而要用Al₂O₃。

此外，如固态生成物落在绝缘支撑表面且又吸收了气体中的水分时，会使闪络电压下降。固态生成物的问题比气态分解物严重，因为对后者可用吸附剂，而要清除固态生成物，则必须将GIS的隔室打开。

四、吸附剂的使用

使用吸附剂有双重目的，即吸附分解气体和水分。GIS中常用的吸附剂有活性氧化铝和分子筛。分子筛的工作温度高，吸附能力比活性氧化铝强。分子筛是一种合成沸石，它具有微孔，比微孔直径小的分子可以被吸入分子筛内部孔穴，从而使分子直径大小不同的物质得以分开。吸附剂的放置量一般应不小于SF₆气体重量的10 %。

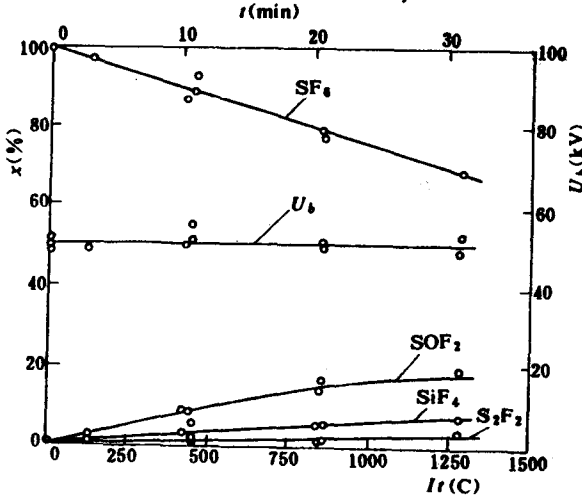


图 1-13 SF₆气体和分解物的体积浓度 x 与放电量 It 的关系 (U_b是含分解物的气体击穿电压值)

第六节 气体含水量的控制

水分是SF₆气体中危害性最大的杂质。表1-3给出了SF₆新气的质量标准。标准规定水分含量按质量比不应大于8×10⁻⁶，这比国际电工委员会（IEC）的标准 15×10⁻⁶ 还要严（表1-3中其他杂质含量值与IEC标准相同）。所以运行中对气体监督的主要项目是含水量的测定和控制。表1-4给出国家标准对电气设备中SF₆气体含水量允许值的规定。必须

表 1-3 SF ₆ 气体质量标准	
杂质、杂质组合及其它项目	规定值（质量比）
空气（N ₂ +O ₂ ）	<0.05%
四氯化碳（CF ₄ ）	<0.05%
水分	<8×10 ⁻⁶
酸度（以HF计）	<0.3×10 ⁻⁶
可水解氟化物（以HF计）	<1.0×10 ⁻⁶
矿物油	<10×10 ⁻⁶
纯度	>99.8%
毒性生物试验	无毒

表 1-4 设备中SF ₆ 气体的水份允许含量（体积浓度）		
隔 室	有电弧分解物的隔室	无电弧分解物的隔室
交接验收值	<150×10 ⁻⁶	<500×10 ⁻⁶
运行允许值	<300×10 ⁻⁶	<1000×10 ⁻⁶

注 摘自GB8905-88《六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则》。

注意这种情况下含水量是以体积浓度来表示的。在国际电工委员会的出版物中含水量的重量比用ppmW表示，体积浓度用ppmV表示。 SF_6 的分子量为146， H_2O 的分子量为18，所以 SF_6 含水量的ppmW与ppmV的换算关系为：

$$1 \text{ ppm W} = 8.11 \text{ ppm V} \quad (1-13)$$

一、含水量过高的危害

SF_6 气体含水量过高会危及电器设备的安全运行，主要表现在以下三个方面。

- (1) 水分的存在影响气体分解物的生成 (图1-12)。
- (2) 水与酸性杂质在一起时，会使材料腐蚀，导致机械操作失灵。
- (3) 水分在低温下会在固体绝缘表面凝露，使沿面闪络电压急剧下降，导致事故。

图1-14说明气体含水量对被 SF_6 气体分解物污染的绝缘子表面的电阻有很大的影响，图中直流电弧 $I = 400 \text{ A}$ ，作用时间 $t = 15 \text{ s}$ ，形成 0.5 mm 厚的粉末状金属氟化物层，用水分的露点温度 τ 来表示含水量。

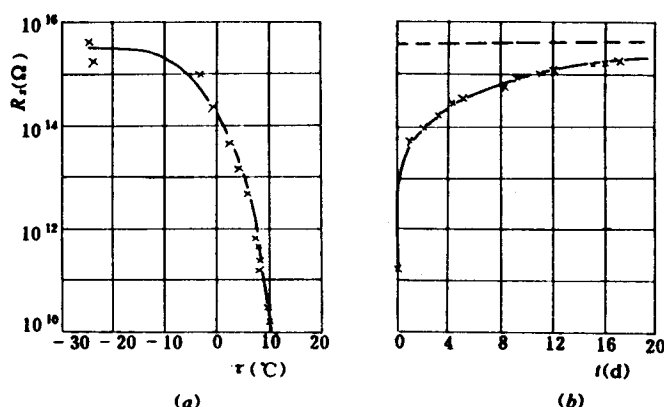


图 1-14 水分对污染绝缘子表面电阻的影响

(a)含水量增大时电阻的下降情况；(b)放置分子筛后不同天数的绝缘电阻回升情况 (初始含水量为 $\tau = 9^\circ\text{C}$ ，虚线表示未受潮时表面电阻值)

图1-15表示含水量对一个盘形绝缘支撑闪络电压的影响。由图可见，露点温度高于 0°C 时沿面闪络电压会急剧下降，但下降大体上只在 0°C 到露点温度这一温度范围。因为如环境温度高于水分的露点温度，则水分不会在绝缘表面凝露；如环境温度低于 0°C ，则绝缘表面的凝露变成冰粒，对闪络电压影响也不大。

二、含水量的测量方法

测定 SF_6 气体含水量的方法有重量法、电解法和露点法等。重量法是最可靠的直接测量方法，可用来校核其他方法，但只能由技术熟练的有经验人员在有空调的室内测量。

电解湿度计的原理是让含水气体通过一个电解池，电解池内装有两个铂电极，极间有一层 P_2O_5 薄膜。 P_2O_5 完全干燥时，极间加直流电压不会有电流通过。 P_2O_5 吸收气中水分后使薄膜导电，将所吸收的水电解而产生 H_2 和 O_2 。由法拉第定律可知，所需电量是所吸入水量的度量。

露点法是最常用的方法,但如气体中还有其他可冷凝的物质时,则测定的不仅是水分,还包括其他能被冷凝的物质。露点法的原理是使气体试样通过一个密闭的槽,在槽内有一温度可人为调节的金属镜面。当镜面温度足够低时,气体中水(或其他可冷凝物质)就在其上冷凝,形成雾或“露”(低温时则为结晶的“霜”)。若冷凝物质是水,则 SF_6 中水的分压即是所测得的露点下水的饱和蒸汽压(SVP)。根据水的分压 p_1 和气体的总压力 p ,即可算得水的体积浓度 x_v 为:

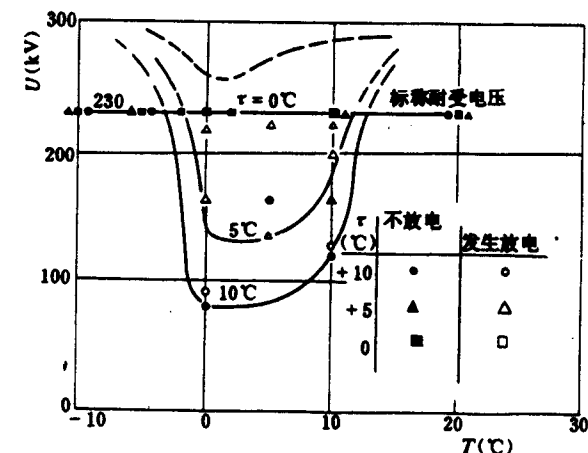


图 1-15 盘形绝缘支撑在不同气体含水量和不同环境温度下的闪络电压

$$x_v = \frac{p_1}{p} \quad (1-14)$$

【例 1-1】GIS 母线筒工作气压为 0.4MPa, 交接试验时在 0.1MPa 气压下测得气体露点温度为 -28°C , 求气体含水量和工作气压下母线筒中气体的露点温度。

解 查 GB8905-88 附录 A 知 -28°C 时纯水的 SVP 为 47Pa。由式 (1-14) 可算得:

$$x_v = \frac{47}{0.1 \times 10^6} = 470 \times 10^{-6}$$

气体含水量与气压无关, 所以母线筒中气体含水量为 470×10^{-6} 是合格的。工作气压下母线筒中水的 SVP 为 $4 \times 47 = 188\text{Pa}$, 所以查表得筒中气体露点温度为 -13.5°C 。

三、运行设备中含水量的控制

运行中电器设备的 SF_6 气体中水分来源为:

(1) SF_6 新气中水分及充气时管路中带入的水分。所以对新气含水量要进行测定, 并在充气时将管路中空气排出。

(2) 安装时带入设备的水分。为避免安装时带入水分, 应避免在湿度大的天气装配。

(3) 固体材料析出的水分。为减少这部分水分, 部件在安装前要经过干燥处理。

(4) 运行中从大气渗入设备的水分。因大气中水蒸汽分压比设备内部高, 所以水分会从大气渗入设备内部。

【例 1-2】GIS 母线筒内水分的体积浓度为 500×10^{-6} , 工作气压为 0.4MPa, 环境温度为 20°C , 大气相对湿度为 60%, 求设备外部和内部水分压的比值。

解 查 GB8905-88 附录 A 知 20°C 时水的 SVP 为 2336Pa。所以大气中的水分压为:

$$p_2 = 0.6 \times 2336 = 1401.6\text{Pa}$$

设备内部的水分压可按式 (1-14) 计算, 得出:

$$p_1 = 500 \times 10^{-6} \times 0.4 \times 10^6 = 200\text{Pa}$$

所以

$$p_2/p_1 \approx 7$$