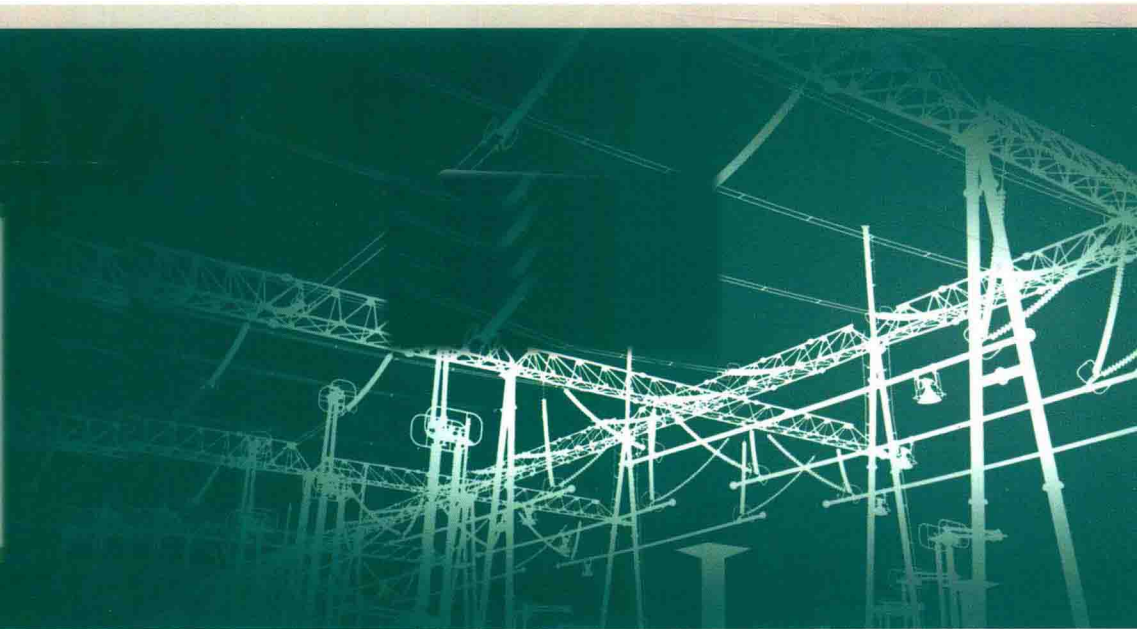


电网设备状态检测技术培训教材



SF₆气体检测

国网技术学院 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网设备状态检测技术培训教材



SF₆气体检测

国网技术学院 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为切实提高电网设备状态检测人员技术水平,确保状态检测人员技术集中培训工作规范、有序实施,国家电网公司组织编写了《电网设备状态检测技术培训教材》丛书。丛书目前有六个分册,本分册为《SF₆气体检测》。

本分册主要包括电容型设备相对 SF₆ 气体检测分析原理、SF₆ 气体纯度、湿度和分解产物带电检测、SF₆ 气体检测结果分析判断。附录包括练习题库、作业指导书、实际操作考核标准、现场检测报告、变电站(发电厂)第二种工作票、SF₆ 气体露点温度和体积分数换算对照表和 SF₆ 气体湿度测量结果的温度折算表。

本书可供电力系统工程技术人员和管理人员学习及培训使用,也可作为电力职业院校教学及新入职员工培训的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

SF₆ 气体检测 / 国网技术学院编. —北京: 中国电力出版社, 2015. 5

电网设备状态检测技术培训教材

ISBN 978-7-5123-7565-9

I. ①S… II. ①国… III. ①六氟化硫气体-检测-技术培训-教材 IV. ①TM561.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 072776 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 5 印张 79 千字

印数 0001—6000 册 定价 17.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

《电网设备状态检测技术培训教材》

编 审 人 员

吕 军 彭 江 冀肖彤 张祥全 周新风

杨本渤 徐玲玲 闫春雨 焦 飞 程 序

杨 柳 杨 健 陈威斋 张 鑫 赵义术

马志广 战 杰 牛 林

《SF₆ 气体检测》 分册

编 写 人 员

主 编 李艳萍 (国网技术学院)

副 主 编 黄金鑫 (国网技术学院)

编写人员 颜湘莲 (中国电力科学研究院)

何 洁 (中国电力科学研究院)

焦 飞 (中国电力科学研究院)

赵 也 (国网安徽省电力公司)

李 群 (泰普联合科技开发有限公司)

孙学锋 (国网山东电力集团公司)

薛启成 (国网山东电力集团公司)

王宏信 (国网山东电力集团公司)

鲁国涛 (国网技术学院)

马梦朝 (国网技术学院)

张 彦 (国网技术学院)

崔金涛 (国网技术学院)

潘俊香 (国网技术学院)



前 言

近年来,国家电网公司大力推行电网设备状态检测技术,为切实提高电网设备状态检测人员技术水平,确保状态检测工作规范、扎实、有效开展,公司先后于2013年和2014年委托国网技术学院组织开展了状态检测人员技术集中培训并积累了一定经验。为确保后续培训规范、有序实施,国家电网公司组织专家编写了《电网设备状态检测技术培训教材》丛书。

本丛书编写坚持系统、精炼、实用、配套的原则,整体规划,统一协调,分步实施。目前已完成《红外热像检测》《电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量》《开关柜暂态地电压与超声波局部放电检测》《GIS特高频与超声波局部放电检测》《油中溶解气体分析》和《SF₆气体检测》六个分册,每个分册主要由学习任务、练习题库、作业指导书、技能操作考核、检测报告、变电站(发电厂)第二种工作票组成。

本丛书是在国网技术学院两年集中培训试用基础上经过修改完善形成的任务导向型培训教材,也是国家电网公司各单位状态检测技术研究及应用成果的结晶。本丛书可供电力系统工程技术人员和管理人员学习及培训使用,也可作为电力职业院校教学及新入职员工培训的参考资料。

由于时间仓促,书中疏漏之处在所难免,望广大读者批评指正。

编 者

2015年4月



目 录

前言

任务一

SF ₆ 气体检测分析原理	/ 1
一、SF ₆ 气体特性	/ 2
二、SF ₆ 新气质量验收	/ 5
三、故障下的 SF ₆ 气体分解产物	/ 7
四、SF ₆ 气体的影响	/ 12
五、SF ₆ 气体管理	/ 13

任务二

SF ₆ 气体纯度、湿度和分解产物带电检测	/ 14
一、SF ₆ 气体纯度检测技术	/ 14
二、SF ₆ 气体湿度检测技术	/ 17
三、SF ₆ 气体分解产物检测技术	/ 19
四、SF ₆ 气体综合检测仪使用	/ 22
五、现场检测安全防护	/ 26

任务三

SF ₆ 气体检测结果分析判断	/ 27
一、现场检测数据的换算和分析	/ 27

二、基于 SF ₆ 气体检测的设备状态判断	/ 30
三、现场应用的典型案例分析	/ 33

附录 A SF ₆ 气体检测练习题库	/ 41
附录 B SF ₆ 气体检测试验作业指导书	/ 53
附录 C SF ₆ 气体检测实际操作考核标准	/ 61
附录 D SF ₆ 气体现场检测报告	/ 64
附录 E 变电站（发电厂）第二种工作票	/ 65
附录 F SF ₆ 气体露点温度和体积分数换算对照表	/ 68
附录 G SF ₆ 气体湿度测量结果的温度折算表	/ 70
参考文献	/ 72



● **学习情境描述** 本学习情境为电气设备 SF₆ 气体纯度、湿度和分解产物检测分析原理学习,开展 SF₆ 气体纯度、湿度和分解产物检测试验,利用 SF₆ 气体检测结果进行设备内部状态判断。

● **教学目标** 熟悉电气设备 SF₆ 气体基本理论和相关规定,掌握 SF₆ 气体纯度、湿度和分解产物检测方法,明确 SF₆ 气体纯度、湿度和分解产物检测的操作流程,掌握利用 SF₆ 气体检测结果进行设备内部状态判断技术。

● **教学环境** 多媒体教室,相关音像资料, SF₆ 气体检测实训室。

任务一 SF₆ 气体检测分析原理

教学目标 通过本任务的学习,掌握 SF₆ 气体的物理化学性质和电气性能,能在现场实际中熟练应用 SF₆ 气体状态参数曲线;掌握 SF₆ 新气纯度、湿度和分解产物有关的质量验收指标;熟悉 SF₆ 电气设备存在潜伏性故障或缺陷时的 SF₆ 气体分解产物特征组分;了解 SF₆ 气体对环境、健康和安全的影响。

任务描述 本任务为 SF₆ 气体检测分析理论学习。学习 SF₆ 基础知识、SF₆ 气体状态参数曲线的现场应用、SF₆ 新气质量验收指标、SF₆ 电气设备存在潜伏性故障或缺陷时的 SF₆ 气体分解产物特征组分,以及 SF₆ 气体对环境、健康及安全的影响。

任务准备 预习 SF₆ 气体基本物理化学性质和 SF₆ 气体状态参数曲线,了解 SF₆ 气体分解产物组分及其基本性质,了解相关标准和规程对 SF₆ 新气验收的具体要求,了解 SF₆ 气体对环境、健康及安全的影响。

任务实施 系统学习 SF₆ 气体物理化学性质，通过实例讲解 SF₆ 气体状态参数曲线的应用以及 SF₆ 电气设备存在潜伏性故障或缺陷时产生的 SF₆ 气体分解产物特征组分。梳理国家标准、行业标准等相关标准和规程对 SF₆ 新气验收的具体要求，讲解 SF₆ 气体的影响。

相关知识 GB/T 8905—2012《六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则》，GB/T 12022—2014《工业六氟化硫》，DL/T 595—1996《六氟化硫电气设备气体监督细则》，DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》，DL/T 941—2005《运行中变压器用六氟化硫质量标准》，Q/GDW 470—2010《运行电气设备中六氟化硫气体质量监督与管理规定》，Q/GDW 232.18—2008《国家电网公司生产技能人员职业能力培训规范 第 18 部分：电气试验》，GB 50150—2006《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》，IEC 60480—2004《六氟化硫电气设备中气体的检测处理导则和再利用规范》，DL/T 639—1997《六氟化硫电气设备运行、试验及检修人员安全防护细则》，DL/T 941—2005《运行变压器用六氟化硫质量标准》，DL/T 1032—2006《电气设备用六氟化硫（SF₆）气体取样方法》，DL/T 1205—2013《六氟化硫电气设备分解产物试验方法》。

一、SF₆ 气体特性

1 基本性质

(1) 物理化学特性。六氟化硫气体的化学分子式为 SF₆，常温常压下是一种无色、无味、无毒、不可燃也不助燃的气体，在 20℃、1 个标准大气压下的密度为 6.16g/L，约为空气的 5 倍。

在 SF₆ 分子中，6 个氟原子围绕着 1 个中心硫原子呈正八面体排列，键合距离小、键合能量高，在不太高的温度下，接近于惰性气体。SF₆ 的分子结构决定了 SF₆ 气体具有独特的物理化学性质如下。

SF₆ 气体在水中的溶解度低，且溶解度随着温度的升高而降低；虽然难溶于水，却易溶于某些有机溶剂中。

SF₆ 气体的导热系数比空气小，但其定压比热为空气的 3.4 倍，因此其对流散热能力比空气好得多，故其综合表面散热能力比空气更优越。

纯净 SF₆ 气体常温下一般不会发生化学反应。在运行电气设备的最高允许温度 150℃ 环境中，SF₆ 气体稳定；当温度超过 150℃ 时，SF₆ 气体可能与有机材料

发生微弱的化学反应；温度达到 200℃ 及以上时，开始与铝和铜慢慢发生反应，但与其余的金属不发生急剧的化学反应。SF₆气体本身的分解温度为 500℃，达到 500~600℃ 时，绝大多数金属可与 SF₆ 气体反应，生成各类金属氟化物。当温度高于 727℃ 时，高纯度的 SF₆ 气体才发生热离解，使不同的硫-氟键合物变成单质的硫和氟或其离子。

(2) 电气特性。由于氟原子的高负电性及 SF₆ 分子的大质量，使得 SF₆ 具有优异的电气性能。SF₆ 气体为电负性气体，氟原子是极强的电负性元素，形成的 SF₆ 分子保持着较强的负电性，具有极强的吸收电子能力；另外，SF₆ 分子质量大、直径大，因而具有电子捕获的截面大、正负离子复合概率高的特点，因此 SF₆ 气体的绝缘强度高、灭弧性能优异。

在 25℃、标准大气压下，SF₆ 气体的介电常数为 1.002，当气体压力上升至 2MPa 时，其介电常数值上升 6%。

在均匀电场中，SF₆ 气体的绝缘强度约为空气的 2.5~3 倍。气压为 294.2kPa 时，SF₆ 气体的绝缘强度与变压器油大致相当。SF₆ 气体的击穿电压与频率无关，是超高频设备选用的理想绝缘介质。

与空气和绝缘油的灭弧原理不同，SF₆ 气体主要依靠自身的强电负性和热化特性灭弧。SF₆ 分子容易吸收自由电子形成负离子，与放电产生的正离子结合，造成带电粒子迅速减少，提高了气隙的击穿电压，快速恢复绝缘强度，从而使电弧熄灭。SF₆ 气体的灭弧能力约为空气的 100 倍。

自 21 世纪 60 年代起，SF₆ 气体已被成功应用于高中压开关等电气设备中作电流保护及绝缘介质。

2 状态参数

(1) 临界常数。在一定温度下，实际气体压力与体积的关系曲线称为实际气体的等温线。实际气体的等温线平直部分正好缩成一点时的温度称为临界温度，表示气体可被液化的最高温度。在临界温度时，使气体液化所需的最小压力称为临界压力。SF₆ 气体的临界压力和临界温度较高，临界压力为 3.84MPa，临界温度为 45.54℃，此时的密度是 7.3g/L。

(2) 状态参数曲线及应用。由于 SF₆ 气体分子量大，分子间作用力强，理想气体状态方程的计算结果与实际偏差较大。为便于工程应用，通常把 SF₆ 气体状态变化的温度、压力和密度间的关系绘成状态参数曲线图，查阅图中曲线可求出



SF₆气体参数。图 1-1 为 SF₆气体状态参数曲线图，电气设备常用的温度为 -50~+100℃，压力范围为 200~1000kPa，通常只取其工作部分。

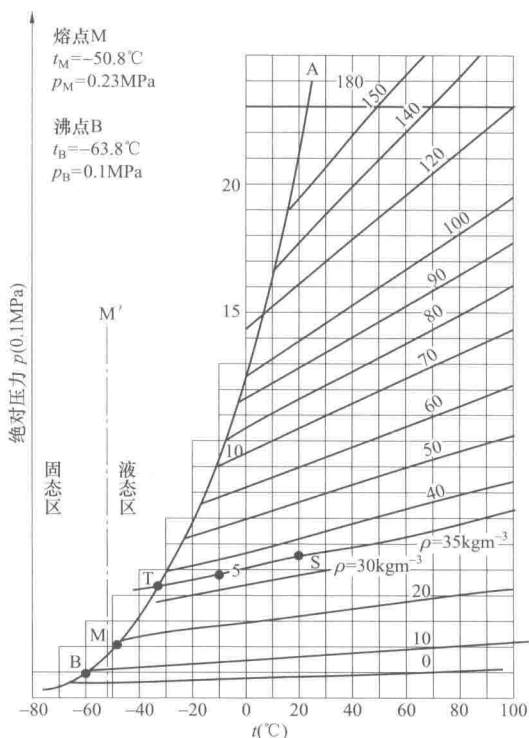


图 1-1 SF₆气体状态参数曲线图

M—熔点， $t_M = -50.8^\circ\text{C}$ ， $p_M = 0.23\text{MPa}$ ；B—沸点， $t_B = -63.8^\circ\text{C}$ ， $p_B = 0.1\text{MPa}$

应用图 1-1，当其中两个参数已知时，可方便地计算出 SF₆气体的状态参数，并求取其液化或固化的温度。

1) 计算断路器内 SF₆气体的充气体积。

【例 1】某 SF₆气体断路器，在 20℃ 时工作压力为 0.45MPa（表压），SF₆气体充装量为 31kg，求断路器内部充气体积。

解：绝对压力 = 0.45 + 0.10 = 0.55（MPa）；

查图 1-1 可知，SF₆气体密度 $\rho = 35$ （kg/m³）；

计算得到断路器内部充气体积 $V = 31/35 = 0.886$ （m³）。

2) 求 SF₆气体断路器充气工作压力随环境温度变化的允许范围。

【例2】在20℃时，充气工作压力为0.45 MPa的SF₆气体断路器，环境温度在-10~30℃变化时，若保持密度 $\rho=35\text{kg/m}^3$ 不变，求SF₆气体断路器的充气工作压力变化的允许范围。

解：由图1-1可知：当密度 $\rho=35\text{kg/m}^3$ 时，温度为-10℃时，绝对压力为0.49MPa；温度为30℃时，绝对压力为0.58 MPa。

结果表明，环境温度为-10~+30℃时，扣除大气压0.1MPa，SF₆气体断路器的充气工作压力（表压）的允许范围可选择0.39~0.48MPa。

3) 求取不同工作压力下的SF₆气体液化温度。

【例3】SF₆气体的温度为20℃，在压力为550kPa时，求SF₆气体的液化温度。

解：SF₆气体的压力为表压，绝对压力=0.55+0.1=0.65（MPa）；

根据绝对压力查图1-1可知，相应的密度值为44g/mL，其液化点与AMB线的交点对应于横轴的温度为液化温度，其值为-24℃。

由图1-1可知，SF₆气体的温度不变，压力上升时，液化温度升高；当SF₆气体压力增加到某个值时，可能在常温液化，所以电气设备的SF₆气体压力不能充装过高。同时，若SF₆气体温度太低，也容易液化，因此在高寒地区，SF₆电气设备要采取保温措施。

二、SF₆新气质量验收

① SF₆气体主要杂质的来源

SF₆气体中主要的杂质及其来源见表1-1。

表1-1 SF₆气体中主要杂质及其来源

使用状态	杂质产生的原因	可能产生的杂质
SF ₆ 新气	生产过程中产生	空气（Air），矿物油（Oil），H ₂ O，CF ₄ ，可水解氟化物，HF，氟烷烃
检修和运行维护	泄漏和吸附能力差	Air，Oil，H ₂ O
开关设备	电弧放电	H ₂ O，CF ₄ ，HF，SO ₂ ，SOF ₂ ，SOF ₄ ，SO ₂ F ₂ ，SF ₄ ，AlF ₃ ，CuF ₂ ，WO ₃
	机械磨损	金属粉尘，微粒



续表

使用状态	杂质产生的原因	可能产生的杂质
内部电弧放电 (故障)	材料的熔化和分解	Air, H ₂ O, CF ₄ , HF, SO ₂ , SOF ₂ , SOF ₄ , SO ₂ F ₂ , SF ₄ , 金属粉尘, 微粒, AlF ₃ , CuF ₂ , WO ₃ , FeF ₃
设备绝缘缺陷	局部放电: 电晕和火花	HF, SO ₂ , SOF ₂ , SOF ₄ , SO ₂ F ₂

(1) 来自 SF₆新气。来自 SF₆新气的杂质有在合成制备过程中残存的杂质和加压充装过程中混入的杂质。

(2) 来自检修和运行维护。对设备进行充气和抽真空时, SF₆气体中可能混入空气和水蒸气; 设备的内表面或绝缘材料可能释放水分到 SF₆气体中; 气体处理设备(真空泵和压缩机)中的油也可能进入到 SF₆气体中。

(3) 来自开关设备。开断电流期间, 由于高温电弧的存在, 导致形成 SF₆气体分解产物、电极金属和有机材料的蒸发物或其他杂质。同时, 这些产物间发生化学反应, 也形成杂质。分解产物的量取决于设备结构、设备开断次数和吸附剂的使用情况。开关设备中也可能出现触头开断时接触摩擦产生的微粒和金属粉尘。

(4) 来自故障设备内部电弧放电。设备内部发生故障时产生电弧放电, 在故障设备中发现的杂质与经常开断的设备中产生的杂质类似, 区别在于杂质的数量。当杂质含量较大时, 会产生潜在的毒性。另外, 金属材料在高温下会产生汽化, 可能形成较多的反应物。

(5) 来自设备绝缘缺陷。由于设备绝缘缺陷存在局部放电, 导致 SF₆气体分解, 产生如 SF₅、SF₄和 F, 这些杂质再与 O₂或 H₂O 发生反应, 形成 SF₆气体分解产物, 主要有 HF、SO₂、SOF₂、SOF₄和 SO₂F₂等。

2 新气质量验收指标

(1) SF₆气体制备方法。工业上普遍采用的 SF₆ 气体制备方法是单质硫与过量的气态氟直接化合, 化学过程如下



近年来, 对无水 HF 中电解产生硫或含硫化合物的合成方法进行了探索。

(2) 新气验收的抽检率。不同标准对 SF₆新气验收的抽检要求见表 1-2。

表 1-2 SF₆新气抽检的标准要求

标准要求	每批气瓶数	抽检最少气瓶数
GB/T 8905—2012 GB/T 12022—2014	1	1
	2~40	2
	41~70	3
	71 以上	4
DL/T 941—2005	1~3	1
	4~6	2
	7~10	3
	11~20	4
	21 以上	5
DL/T 596—1996	每批产品 30% 的抽检率	

(3) 新气质量验收要求。根据 GB/T 12022—2014《工业六氟化硫》的规定，SF₆ 新气质量的标准要求见表 1-3。

表 1-3 SF₆新气质量的标准要求

项 目 名 称	指 标
SF ₆ 纯度（质量分数）	$\geq 99.9 \times 10^{-2}$
空气含量（质量分数）	$\leq 300 \times 10^{-6}$
四氟化碳（CF ₄ ）含量（质量分数）	$\leq 100 \times 10^{-6}$
水（H ₂ O）含量（质量分数）	$\leq 5 \times 10^{-6}$ （-49.7℃）
酸度（以 HF 计）（质量分数）	$\leq 0.2 \times 10^{-6}$
可水解氟化物（以 HF 计）（质量分数）	$\leq 1 \times 10^{-6}$
矿物油含量（质量分数）	$\leq 4 \times 10^{-6}$
六氟乙烷含量（质量分数）	$\leq 200 \times 10^{-6}$
八氟丙烷含量（质量分数）	$\leq 50 \times 10^{-6}$
毒性	无毒

三、故障下的 SF₆气体分解产物

对于正常运行的 SF₆电气设备，非电弧气室中一般没有分解产物，即使在有



电弧的断路器室，因其分合速度快，且 SF₆具有良好的灭弧功能及高复合性（复合率达 99.9% 以上），所以正常运行的设备中没有明显的分解产物。

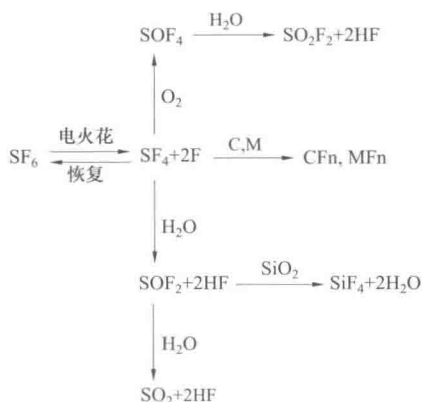


图 1-2 SF₆ 气体分解和还原过程示意图

SF₆电气设备发生故障时，因故障区域的高电弧放电及高温产生大量的 SF₆ 气体分解产物。可见，SF₆ 气体分解产物及含量的检测，对预防可能发生的 SF₆ 电气设备故障及快速判断设备故障部位具有重要意义。放电下的 SF₆ 气体分解和还原过程示意图见图 1-2。

1 不同放电下的主要分解产物

(1) 电弧放电中，SOF₂ 和 SO₂F₂ 为主要分解产物，化学过程见式 (1-2)、式 (1-3)。



(2) 火花放电中，主要分解产物是 SOF₂ 和 SO₂F₂，与电弧放电相比，SO₂F₂/SOF₂ 比值有所增加，能够检测到 S₂F₁₀ 或 S₂OF₁₀ 组分。



(3) 电晕放电中，主要分解产物仍是 SOF₂ 和 SO₂F₂，SO₂F₂/SOF₂ 比值较前两种放电下的比值更高。

表 1-4 列出了不同放电类型产生的 SF₆ 气体分解产物中 SOF₂ 与 SO₂F₂ 生成量的比较。

表 1-4 不同放电类型产生的 SF₆ 气体分解产物中 SOF₂ 与 SO₂F₂ 生成量比较

放电类型	放电时间或操作次数	SO ₂ F ₂ (μL/L)	SOF ₂ (μL/L)	SO ₂ F ₂ /SOF ₂ (比值)
电晕放电 (10~15pC)	260h	15	35	0.43
火花放电 (170kV 隔离开关开断 电容性放电)	200 次	5	97	0.05
	400 次	21	146	0.14

续表

放电类型	放电时间或 操作次数	SO ₂ F ₂ (μL/L)	SOF ₂ (μL/L)	SO ₂ F ₂ /SOF ₂ (比值)
245kV 断路器 开断电弧放电	31.5kA, 5 次	<50	3390	<0.01
	18.9kA, 5 次	<50	1560	<0.03

2 常见故障的可能部位

通过对数百台 SF₆断路器、互感器和 GIS 的故障实例统计分析,将各种设备出现故障的可能部位归纳如下。

(1) 断路器。

- 1) 绝缘拉杆悬浮电位放电,乃至引起拉杆断裂;
- 2) 灭弧室及气缸灼伤乃至击穿;
- 3) 电弧重燃将触头和喷嘴灼伤;
- 4) 动、静触头接触不良;
- 5) 均压罩、导电杆对壳放电;
- 6) 内部螺丝松动,引起悬浮电位放电;
- 7) 断口并联电阻放电;
- 8) 盆式绝缘子中杂质、气泡、裂纹和表面脏污,绝缘严重降低,直至引起对壳放电。

(2) 电流互感器。

- 1) 绝缘支撑柱、绝缘子对壳放电;
- 2) 二次引线电容屏及其固定螺帽悬浮电位放电;
- 3) 二次线圈内部放电;
- 4) 铁芯局部过热和压钉悬浮电位放电;
- 5) 盆式绝缘子中杂质、气泡、裂纹和表面脏污,绝缘严重降低,直至引起对壳放电。

(3) 电压互感器。

- 1) 绝缘支撑柱、绝缘子对壳放电;
- 2) 线圈内部放电;
- 3) 铁芯局部过热和压钉悬浮电位放电;