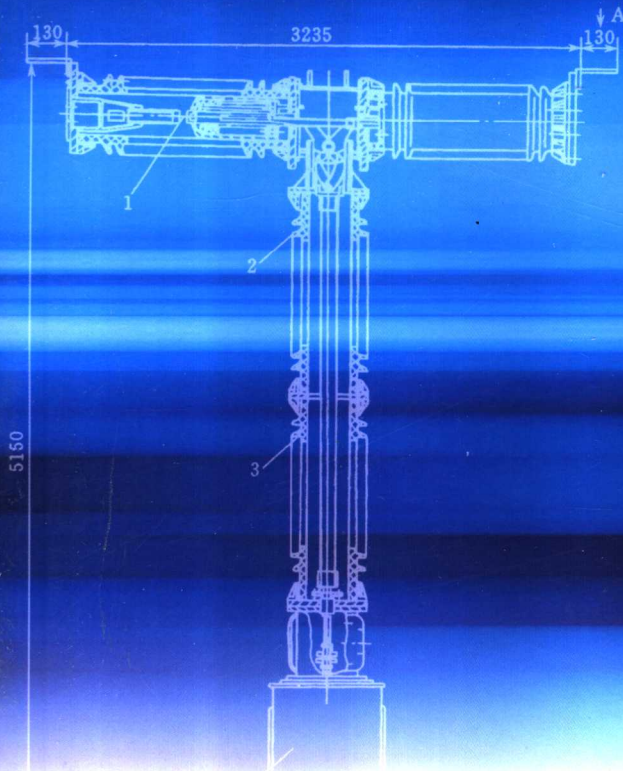




SF₆ 断路器实用技术

主编 陈家斌

SF₆ DUANLUQI
SHIYONG
JISHU



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

SF₆ 断路器实用技术

主编 陈家斌



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共分7章,分别介绍了SF₆气体的性能及应用,SF₆断路器的类型及结构,SF₆断路器及GIS组合电器的安装调试、运行维护及故障处理;SF₆断路器的检修,SF₆电器的气体检漏,SF₆气体应用管理及检测等内容。

本书系统详细地介绍了SF₆断路器的实用技术,可供从事电气设备设计、安装、检修、运行、试验人员阅读,也可供大中专院校电气专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

SF₆断路器实用技术/陈家斌主编. —北京:中国水利水电出版社,2004.3

(电力新技术实用丛书)

ISBN 7-5084-1941-3

I. S... II. 陈... III. 断路器—基本知识
IV. TM561

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第017966号

书 名	电力新技术实用丛书 SF₆断路器实用技术
作 者	主编 陈家斌
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京安锐思科贸有限公司
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 20印张 523千字
版 次	2004年4月第1版 2004年4月第1次印刷
印 数	0001—4100册
定 价	37.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

本书编写人员名单

主 编 陈家斌

副 主 编 刘增良 苏景军 王广辉 郭宝珠

编写人员 杨爱萍 雷 明 罗 召 夏 萍
郑金科 李拥军 高小飞 张海涛
孟凡中 郭宝明 殷竣河 刘竞赛
张 振 崔军朝 马 雁 牛新平
张露江 罗 娜 景 胜 段志勇
张宏宾 季 宏 王云皓 吴 健
魏 华 王德华 葛秦岭

前 言

SF₆ 气体具有良好的绝缘性能和灭弧性能, SF₆ 断路器是利用 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质, 它的应用使高压断路器具有尺寸小、重量轻、容量大、成套速装、维修量少等优点, 传统的油断路器与它无法相比。随着电力工业的迅速发展, SF₆ 断路器作为新技术、新产品以其优越的性能, 在电力系统中得到广泛的应用, 对电力系统的满发多供、安全可靠、稳定运行起到了重要作用。

SF₆ 断路器是近年普及的新产品, 它的安装调试基本上是厂家和施工单位协助进行的。仅仅依靠厂家安装人员的指导和通过产品安装使用说明书的学习, 来对电力行业职工进行这项新技术的培训, 已远远不能满足运行维护岗位工作的需要。由于缺少现场运行维护技术知识, 再加上 SF₆ 断路器本体结构和操动机构随着不同厂家、不同型号、不同电压等级而不同, 给安装、检修、运行维护和试验人员实际工作中带来一些困难。为满足电力职工岗位工作需要, 我们组织一些有实际工作经验又有一定理论水平的专家, 编写了《SF₆ 断路器实用技术》一书, 供大家参考。

本书是依据国家标准、电力行业及机械行业有关标准和规程、IEC 标准及 SF₆ 断路器制造厂家有关技术资料, 根据 SF₆ 断路器的结构性能, 结合电力生产一线职工需要掌握的基本技术知识和操作技能进行编写的。在内容上注重理论和实际相结合, 以实际应用为出发点和归宿的原则, 结合电力企业应知应会的要求, 进行选材组稿, 在阐述理论概念和原理性能的同时, 着力介绍 SF₆ 断路器的安装、运行维护、检修、故障诊断检测的知识、方法和技能等内容。

本书内容比较系统、全面, 在编写过程中, 厂家、电业部门的专家和同行给予了大力支持与协助, 并提供了大量资料, 在此一并表示感谢。

由于水平有限, 错误及不妥之处在所难免, 恳请读者、专家给予指正。

编 者

2004 年 3 月

目 录

前 言

第一章 SF ₆ 气体的性能及应用	1
第一节 SF ₆ 气体的特性	1
第二节 SF ₆ 气体的绝缘特性	6
第三节 电极表面状态对 SF ₆ 气体击穿的影响	9
第四节 SF ₆ 混合气体	13
第五节 SF ₆ 气体的灭弧特性	15
第六节 应用 SF ₆ 气体绝缘设备的发展	22
第二章 SF ₆ 断路器的类型及结构	32
第一节 SF ₆ 断路器的类型及基本结构	32
第二节 瓷柱式 SF ₆ 断路器	36
第三节 罐式 SF ₆ 断路器	38
第四节 66kV 及以下 SF ₆ 断路器	41
第五节 SF ₆ 全封闭组合电器 (GIS)	42
第六节 SF ₆ 断路器的操动机构	45
第七节 SF ₆ 断路器的附件	51
第三章 SF ₆ 断路器及 GIS 组合电器的安装调试	65
第一节 SF ₆ 断路器的型号及技术参数	65
第二节 SF ₆ 断路器的使用条件	71
第三节 SF ₆ 断路器的订货、运输及储存	74
第四节 SF ₆ 断路器安装前的准备工作	77
第五节 SF ₆ 断路器的安装工序及要求	79
第六节 LW25—126 型断路器的安装调试	84
第七节 LW8—35 型断路器的安装调试	93
第八节 LW3—10 型户外断路器的安装调试	103
第九节 断路器操动机构的安装及调试要求	106
第十节 断路器的交接试验	109
第十一节 GIS 设备类型及安装要求	111
第十二节 ZF—126/T2000—31.5 型气体绝缘金属封闭组合电器的安装调试	132
第四章 SF ₆ 断路器及 GIS 组合电器的运行维护及故障处理	143
第一节 SF ₆ 断路器及 GIS 组合电器的运行维护	143
第二节 SF ₆ 断路器的异常运行及故障处理	152
第三节 GIS 组合电器的常见故障及处理	161
第五章 SF ₆ 断路器的检修	166

第一节	SF ₆ 断路器的检修项目及要 求	166
第二节	大修准备工作及程序	168
第三节	LW—10 型断路器的检修	173
第四节	LW6 系列 SF ₆ 断路器的检修	181
第五节	液压操动机构的检修	190
第六节	GIS 电器的检修	197
第七节	SF ₆ 气体的充注与回收	200
第八节	SF ₆ 断路器的检测试验	207
第六章	SF₆ 电器的检漏	215
第一节	SF ₆ 电器的检漏方法	215
第二节	标准气样的配制与校准曲线	217
第三节	SF ₆ 断路器漏气量的检测	220
第七章	SF₆ 气体应用管理及检测	229
第一节	SF ₆ 气体应用管理	229
第二节	SF ₆ 断路器中应用的吸附剂	241
第三节	SF ₆ 电器气体含水量的检测	244
第四节	SF ₆ 气体中痕量杂质的分析检测	264
第五节	SF ₆ 气体毒性物及测试	270
第六节	SF ₆ 气体中空气、四氟化碳的气相色谱测定	276
第七节	SF ₆ 气体中矿物油含量检测 (红外光谱分析法)	277
第八节	SF ₆ 气体中可水解氟化物含量检测	280
第九节	SF ₆ 新气体密度检测	284
第十节	SF ₆ 新气体中酸度检测	285
附录 1	高压开关设备六氟化硫气体密封试验导则 (GB 11023—1989)	289
附录 2	六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则 (GB/T 8905—1996)	294
附录 3	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 639—1997)	302
附录 4	六氟化硫气体回收装置技术条件 (DL/T 662—1999)	307

第一章 SF₆ 气体的性能及应用

第一节 SF₆ 气体的特性

SF₆ 气体是目前电器工业普遍应用的优良灭弧和绝缘介质，它在通常状态下是一种无色、无味、无毒、不燃、化学性能稳定的气态物质。

一、SF₆ 气体的基本特性

SF₆ 是由卤素中最活泼的氟原子 (F) 和硫 (S) 原子化合而成。其分子结构为正八面体 (见图 1-1)。硫原子居中，氟原子则处于六个顶角的位置上。硫原子与氟原子之间以共价键联结，键距为 1.58Å (1Å=10⁻¹⁰m)。SF₆ 分子的等值直径为 4.58Å，比水蒸气的分子等值直径 3.2Å 要大些。

SF₆ 分子量较大，是氮 (N₂) 的 5.2 倍，所以它的密度约为空气的 5.1 倍。同样体积和压力的 SF₆ 就比空气重得多。

SF₆ 于 1900 年首次由法国人 Moisson 和 Lebeau 合成并分离鉴定出来，20 世纪 30 年代以后，作为优良的绝缘介质而得到日益广泛的应用，其生产也陆续走向工业化。

迄今为止，在工业上普遍采用的 SF₆ 制备方法是单质硫磺与过量气态氟直接化合，即 $S + 3F_2 \rightarrow SF_6 + Q$ (放热反应)。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、生产设备材质、工艺条件等因素而有很大差异，杂质总含量可达 5%。其组成有硫氟化合物如 S₂F₂、SF₂、SF₄、S₂F₁₀ 等；硫氟氧化物如 SOF₂、SO₂F₂、SOF₄、S₂F₁₀O 等以及原料中带入的杂质如 HF、OF₂、CF₄、N₂、O₂ 等。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)、吸附等一系列净化处理过程，才能得到纯度在 99.8% 以上的产品。该产品再用气体压缩机加压充入降温至 -80℃ 左右的钢瓶内。在钢瓶中 SF₆ 通常以液态存在，使用时将其减压放出，呈气态充入设备内部。

除上面列举的在合成过程中可能产生的若干杂质成分外，在气体输送和充装过程中还可能混入少量的空气、水分和矿物油等物质。

为了保证 SF₆ 产品的纯度和质量，国际电工委员会 (IEC) 和许多国家或生产厂家，都规定了 SF₆ 产品的质量标准，用户可据此进行复检和验收。表 1-1 列举了若干 SF₆ 产品的质量标准，供读者参考。

除了上述的单质直接合成的方法外，尚有氧化硫磺法、直接电解法、氟化钴法等多种合成 SF₆ 的方法。

SF₆ 的基本特性参数见表 1-2，为比较起见也列入了 N₂ 的有关参数。

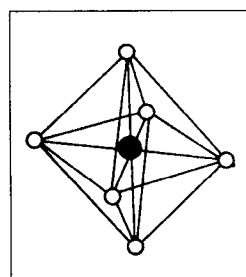


图 1-1 SF₆ 分子结构
○—F 原子；●—S 原子

表 1-1

各国的 SF₆ 气体质量标准

杂质名称	IEC 标准	日本旭硝子 公司标准	原西德标准	原苏联标准	意大利 标 准	美国标准	中国标准
空气 (氮氧)	<0.05% (重量) 0.25% (体积)	<0.05%	<0.02%	<0.05%	31ppm	<0.05%	≤0.05%
CF ₄	<0.05% (重量) <0.1% (体积)	<0.05%	<10ppm (重量)	<0.05%~ 0.1%	<0.02%~ 0.04%	≤0.05%	≤0.05%
水	<15ppm (重量)	<8ppm	<5ppm	<0.0015%	露点 -55℃ ^①	露点 -50℃ ^② (-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%

① 相当于 2.5ppm, ppm 为百万分比率。

② 相当于 4.8ppm。

表 1-2

SF₆ 与 N₂ 的基本特性参数

名 称	SF ₆	N ₂
分子量	146	28
临界温度 (°C)	45.6	-146.8
临界压力 (kg/cm ²)	38.5	33.5
熔点 (°C)	-50.8	-210
沸点 (°C)	-63.8	-196
介电常数 (1 大气压, 25°C 时)	1.002	1.0005
气体常数 [kg·m/(kg·K)]	5.81 (大气压, 0°C)	30.26
重度 气态 (1 大气压, 0°C, kg/m ³) 液态 (t/m ³) 固态 (kg/m ³)	6.45 1.57 (0°C) 1.85 (-50°C) 2.51 (-50°C)	1.215
音速 (20°C, m/s)	134	349
纯热指数 (1 大气压, 0~1000°C)	1.088~1.057	1.40~1.35
导热系数 [30°C 时, J/(m·s·K)]	0.0141	0.0214
定压比热 [1 大气压, 25°C, J/(克分子·K)]	97.1	28.7

SF_6 的临界压力，临界温度都很高（38.5 大气压，45.6℃）。临界温度表示气体可以被液化的最高温度，临界压力表示在这个温度下出现液化所需的气体压力。气体临界温度越低越好，表明它不容易被液化，例如氮气只有在低于-146.8℃以下才可能液化，在工程使用环境条件下就不必考虑它的液化问题，而 SF_6 则不然，只有在温度高于 45℃ 以上才能恒定地保持气态，所以在通常使用条件下它是有液化可能的。因此， SF_6 气体不能在过低温度和过高压力下使用。

SF_6 在水中的溶解度很低，只有 $5.5 \times 10^{-3} \text{ mL/mL}$ ，和氦气、氩气、氮气等惰性气体相当，但 SF_6 在某些有机溶剂中的溶解度还是比较高的，见表 1-3。

表 1-3 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 (摩尔分子数 $\times 10^4$)	0.05	100.55	153.5	33.95	65.54	278.6	9.25

SF_6 在常温甚至较高的温度下一般不会发生自分解反应，它的热分解温度在 500℃ 左右，热分解时形成的成分十分复杂，且因温度不同而异，这将在以后的电弧分解部分介绍。

SF_6 气体的热传导性能较差，导热系数只有空气的 2/3。但是对气体介质，它的传热效应往往不是单纯的传导作用，分子的扩散运动携带的热量可能产生更显著影响，影响的程度取决于气体允许流动的空间尺寸。例如气体与热固体表面接触，紧靠表面的局部气体温度升高而膨胀向外扩散（流动），把热量传递出去，这种传热过程称为自然对流传热。对流传热的能力与分子比热有关，即气体分子升高温度时吸收了热量，随着分子扩散运动而传递到别处。 SF_6 分子的定压比热是氮气的 3.4 倍，因此其对流散热能力比空气大得多。热物体在空气和 SF_6 中的表面散热效果以单位表面积在单位温差下的散热系数来表示，见表 1-4。可见，实际散热能力比空气为好， SF_6 断路器的发热与温升问题不会比空气断路器严重。

表 1-4 SF_6 与空气的表面散热系数			
	导热系数 $[\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})]$	定压比热 $[\text{J}/(\text{克分子} \cdot \text{K})]$	表面散热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
SF_6	0.0141	97.1	15
空气	0.0214	28.7	6
比值	0.66	3.4	2.5

SF_6 是负电性气体，负电性就是分子（原子）吸收自由电子形成负离子的特性。 SF_6 分子具有较强的负电性，捕捉自由电子形成负离子后再与正离子结合造成空间带电粒子的迅速减少。这个特性在阻碍放电的形成（提高击穿电压）和使电弧间隙介质迅速恢复的过程中具有重要的意义， SF_6 气体的这一特性是它成为优良的绝缘与灭弧介质的主要原因之一。 SF_6 的负电性主要是由氟（F）元素带来的，F 在周期表上是Ⅶ族元素，最外层为七个电子，很容易吸收一个电子形成稳定的八个电子数。这是所有Ⅶ族元素（卤族元素）的共性，F 居其首。其它元素如Ⅵ族的氧、硫也能吸收电子，但可能性不如Ⅶ族元素。负电性的大小以与电子结合时释放出来的能量（电子亲和能）大小为标志，结合时释放能量越多，表示结合的结果越稳定。

二、 SF_6 气体的状态参数

气体在不流动时，可以用三个参数来代表它所处的状态，即三个状态参数：压力（P）、密度（ γ ）及温度（T）。因气体的大量分子是处在无规则的热运动之中，气体的状态参数是大量

分子运行状态的平均参数。

(1) 气体的压力 P ，在工程上习惯用 kgf/cm^2 做单位，即工程大气压，国际单位制 (SI)，常以帕 (Pa) 即牛顿/米²，巴 (bar) 表示，英制国家还使用磅/英寸 (psi)，这些单位的换算关系列于表 1-5。

表 1-5 压力单位的换算

工程大气压 [kgf/cm^2]	巴 (bar)	帕 (Pa)
1	0.981	0.981×10^5
1.02	1	10^5
1.02×10^{-5}	10^{-5}	1
0.0703	0.0689	0.689×10^4

气体压力还有绝对压力与表压力两种表示方法，表压力 = 绝对压力 - 大气压力。表压力是在大气环境中用表计测量的读数压力，其零点就是大气压力。工程实用中多以表压计数，而在作气体参数计算时必须用绝对压力，其差值为 1 个大气压，约为 1kgf/cm^2 。

(2) 气体的密度 (γ) 指单位体积的气体质量，在国际单位中为 kgf/m^3 。

(3) 温度的单位与日常用摄氏 ($^{\circ}\text{C}$) 略为不同的是，在计算中应用绝对温度 (K)，其关系为：

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273 \quad (1-1)$$

理想气体的状态参数之间存在简单的关系，即理想气体状态方程式：

$$P = \gamma RT \quad (1-2)$$

R 称为气体常数。对理想气体它是一个恒定的常数。根据状态方程式可以推断气体状态变化时各参数之间的关系，例如气体作等温压缩 (或膨胀) 时，压力与密度成正比，即图 1-2 所示直线变化。

在工程应用范围内，空气完全可以当作理想气体看待，它在数百大气压以下，温度在摄氏零下一百多度以上，即通常工程使用所涉及的范围，与理想气体的特性差异很小，按理想气体分析计算不会有显著误差。

SF_6 气体则不然， SF_6 气体分子质量大，分子间相互作用显著，这种强的相互作用使它表现得与理想气体的特性相偏离。图 1-2 给出在温度不变 (20°C) 条件下 SF_6 气体压力随着体积压缩而变化的情况。当压力高于 ($3 \sim 5$) kgf/cm^2 时，由于 SF_6 分子之间的引力的压力特性之间的偏离也愈来愈大。基于理想气体定律推导出来的各种关系式用来计算 SF_6 参数会产生较大的误差。要较为准确地计算 SF_6 气体的状态参数常采用经验公式，下面的 Battie-Bridgman 公式是比较实用的：

$$P = 0.58 \times 10^{-3} \gamma T (1 + B) - \gamma^2 A \quad (1-3)$$

$$A = 0.764 \times 10^{-3} (1 - 0.727 \times 10^{-3} \gamma)$$

$$B = 2.51 \times 10^{-3} \gamma (1 - 0.846 \times 10^{-3} \gamma)$$

式中单位 P 为 kgf/cm^2 ， γ 为 kg/m^3 ， T 为 K。

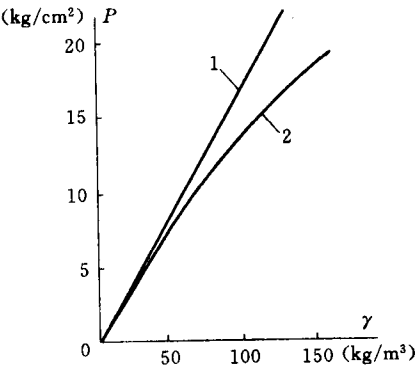


图 1-2 SF_6 压力变化 ($t = 20^{\circ}\text{C}$)
1—按理想气体变化；2—实际压力变化

在工程实用中用这个公式计算太麻烦,所以把它们的关系绘成一组状态参数曲线簇,如图 1-3 所示。图中还绘出了气态转变为液态(液化)和固态(凝固)的临界线,即曲线 AFB , 也称饱和蒸汽压力曲线,它代表在给定温度下气相与液相,气相与固相处于平衡状态时的压力(饱和压力)值,曲线之右侧是气态区域, AFF' 为液态区域, $F'FB$ 为固态区域。 F 点为 SF_6 的熔点,其参数为 $T_F = -50.8^\circ\text{C}$, $P_F = 2.36\text{kgf/cm}^2$, 在这一点是气、液、固三相共存的状态。 B 点为 SF_6 的沸点, $T_B = -63.8^\circ\text{C}$, 饱和蒸汽压力等于 1 个大气压。气态区域的斜直线簇就是式 (1-3) 所表示的 $P-\gamma-T$ 的关系。

应用这个图可以较方便地计算 SF_6 的状态参数以及求取液化或固化的温度。

例:某 SF_6 断路器充气体积为 0.5m^3 , 在 20°C 时工作压力为 3kgf/cm^2 (表压力), 求气体的重量和出现液化时的温度。

由给定的 20°C 时压力值可以确定工作点 S (见图 1-3, 纵坐标应为绝对压力, 故 $P = 4\text{kgf/cm}^2$), 这一点所代表的密度, 在图中两直线之间, 估计值为 25kg/m^3 , 因此断路器总的气体重量为: $0.5 \times 25 = 12.5\text{kg}$ 。

求液化温度。当环境(气体)温度改变时, 气体压力将沿 γ 不变的斜直线变化(因为断路器里的气体重量及体积都不改变)。经过 20°C 时的工作点 S , 作一条与相邻两直线等比例的直线 TSR 、与临界线 AFB 相交于 R 点, 这一点就代表温度下降而出现凝结的状态参数, 因交点 R 处于 F 点之上, 故凝结成液体, 是为液化点, 这一点对应的坐标是 -43°C , 3kgf/cm^2 , 即该断路器在 -43°C 时开始液化, 这时的压力是 3kgf/cm^2 , 即 2 个表压力。从 R 点开始, 若温度继续下降, 则数沿着 RFB 变化, 气体不断地凝成液体, 气体的密度不再保持常数而是不断减少, 而且气体的压力下降得更快。温度降到液化点(液化温度)并不表示全部气体立刻都被凝成液体, 只是凝结的开始, 但温度继续降低, 气体压力密度下降很快, 气体的灭弧绝缘性能都迅速下降, 所以断路器不允许工作温度低于液化点。

从这个例子可以看出, 液化温度与断路器的工作压力有关, 工作压力越高液化温度也越高。若按液化温度不高于 -20°C 考虑, 相应于 20°C 时的工作压力应不高于 8kgf/cm^2 (如表压), 一般单压式 SF_6 断路器的工作压力大致是这样选择的。

若考虑温度升高时工作压力升高, 同理沿 $\gamma = \text{常数}$ 的直线向右侧寻找相应的工作点, 上例中, 若环境温度升高到 40°C , 其工作点 T 对应的压力值是 4.3kgf/cm^2 。

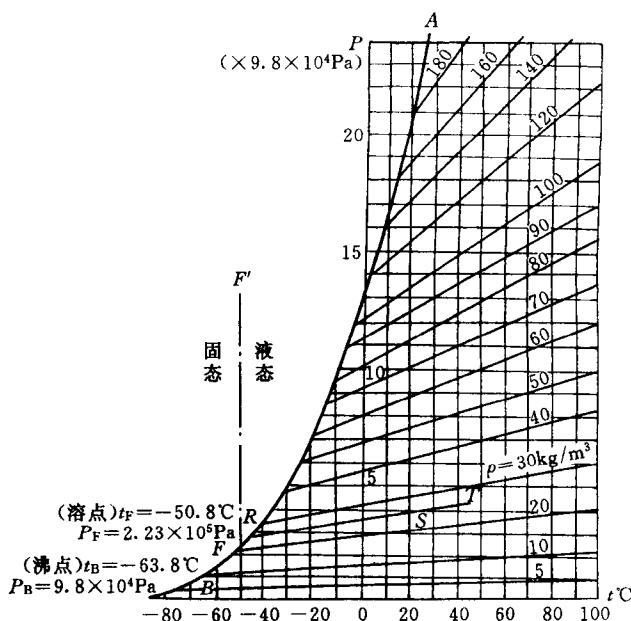


图 1-3 SF_6 的状态参数

AFB — SF_6 饱和蒸汽压力曲线, 其右侧是气态区域;

AFF' 线上方—液态区域; $F'FB$ 线上方—固态区域;

F — SF_6 的熔点(凝点), 是饱和蒸汽压力为 $2.23 \times 10^5 \text{Pa}$ 时的温度;

B — SF_6 的沸点, 是饱和蒸汽压力为 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 时的温度;

ρ —密度 (kg/m^3); t —温度 ($^\circ\text{C}$); P —压力 ($\times 9.8 \times 10^4 \text{Pa}$)

有时，断路器工作压力很低，温度下降时可能不出现液化而直接凝成固体，例如在 20°C 时工作压力小于 2.8kgf/cm^2 （表压力 1.8kgf/cm^2 ），其 $P-T$ 直线与临界线的交点在点 F 之下。

第二节 SF_6 气体的绝缘特性

一、气体的放电击穿特点

SF_6 气体中的击穿过程可用气体放电理论加以分析，所不同者 SF_6 是卤族元素氟的化合物。卤族元素具有较强的电负性，易于吸附电子形成负离子同时释放出能量，放出的能量叫

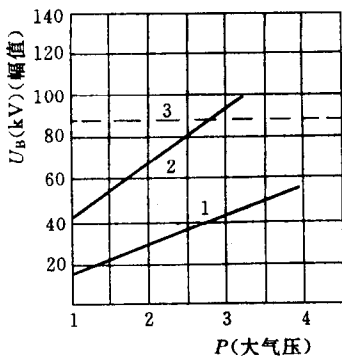


图 1-4 SF_6 气体和空气、变压器油在工频电压下击穿电压的比较
1—空气；2— SF_6 ；3—变压器油

电子亲合能，亲合能越大则电负性越强。氟原子的亲合能为 4.1eV ，是卤族元素中电负性最强的，又从 SF_6 的分子结构可知，它的周围全是氟原子，因此 SF_6 气体具有很强的电负性，容易和电子结合形成负离子。由于离子的平均自由行程远比电子为短，它在两次碰撞之间的自由行程中获得的动能小，另一方面它和分子发生弹性碰撞时又容易将积累起的动能损失掉。因此和电子相比，离子要积累起足够产生碰撞游离能量的可能性是很小的。因此离子的游离能力远不如电子，电子为分子吸附而形成负离子后，游离能力大减。因此，在气体放电中，负离子的形成起着阻碍放电的形成和发展作用。

其次， SF_6 分子直径比空气中氧、氮分子的要大，使得电子在 SF_6 气体中的平均自由行程缩短，而不易在电场中积累能量，从而减小了它碰撞游离的能力。

再者 SF_6 的分子量是空气的五倍，因此 SF_6 离子在电场中的运动速度比空气中氧、氮离子的更小，更容易发生复合使气体中带电质点减少。

因此 SF_6 是一种高电气强度的气体介质，在均匀电场下 SF_6 的电气强度约为同一气压下空气的 $2.5\sim 3$ 倍，3 个大气压下 SF_6 的电气强度约和变压器油相当，如图 1-4 所示。故在 SF_6 中电子在电场作用下不仅会由于碰撞游离产生新的电子和离子，而且还会由于 SF_6 有强烈的电负性，能吸附电子而使这些带电质点消失。

二、 SF_6 气体绝缘的冲击特性

电气设备在运行中除了受到正常的工频工作电压作用外，还会受到雷电造成的过电压的作用，这是一种幅值高、持续时间短的冲击电压。国家规定的

雷电冲击电压的标准波形如图 1-5 所示， $T_f=1.2\pm 30\%$ ； $T_r=50\pm 20\%$ 。此外还要指出其极性（不接地电极相对于地而言的极性）。标准雷电冲击波形通常可以用符号 $\pm 1.2/50\mu\text{s}$ 表示。在这样一个冲击电压作用下气体间隙的击穿就具有一些新的特性。为了模仿变电所避雷器动作时，作用到电气设备的是截断的冲击电压，故还规定了图 1-6 的截波，图中截断时间 $T_c=2\sim 5\mu\text{s}$ 。

（一）放电时延

气体间隙发生击穿不仅需要有足够的电压，而且需

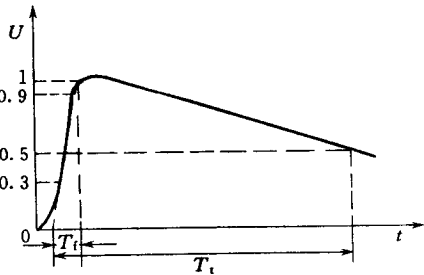


图 1-5 标准雷电冲击电压波形
 T_f —波头长度； T_r —波长

要一定的时间,这就是放电时延 t_r 。放电时延对于直流和工频这样的持续作用电压是无甚影响的,但对雷电冲击电压就有影响了,也即击穿电压值和电压作用时间有关。放电时延(见图1-7)由统计时延 t_s 和放电形成时延 t_f 所组成,即:

$$t_r = t_s + t_f \quad (1-4)$$

t_s 是指当间隙上电压升到持续作用电压下击穿电压 U (称为静态击穿电压)时刻起,到间隙中出现一个能引起游离过程并最终导致击穿的电子即所谓有效电子为止,即间隙中出现一个有效电子所需要的时间称为统计时延 t_s 。从出现有效电子,引起强烈的游离过程,到间隙完全击穿所需的时间称为放电形成时延 t_f 。

短间隙中特别是电场比较均匀时,相比之下放电形成时延甚小,这时统计时延实际就等于全部放电时延。统计时延随间隙外加电压增加而减少,这是因为间隙中出现的自由电子转变为有效电子的概率增加之故。用紫外线等高能射线照射间隙,也能减少统计时延。在极不均匀电场中,由于电场局部增加,出现有效电子的概率增加,所以统计时延较小,且和照射的关系也较小。

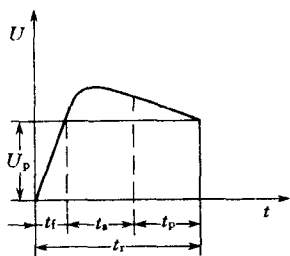


图1-7 放电时间的各组成部分

较长的间隙中,放电时延主要决定于放电形成时延。在比较均匀的电场中,由于间隙中电场到处都很强,放电发展速度快,所以放电形成时延较短。在极不均匀电场中放电是由强电场区向弱电场区伸展,故放电时延长。显然,间隙上外施电压增加,放电形成时延也会减少。

显然统计时延和放电形成时延的值都具有统计性。

如前所述,充 SF_6 气体绝缘结构都是稍不均匀电场,一般认为放电时延中主要是统计时延,加以 SF_6 中由于对电子有强烈的吸附作用而减少了有效电子出现的概率,从而增加了统计时延和放电的分散性。故在进行 SF_6 冲击放电试验时,用能产生紫外线的石英汞灯照射对减小放电的分散性有较大效果。

某些研究者则认为: SF_6 中统计时延长的原因不在于气体的电负性,而在于 SF_6 的密封容器遮蔽了外来的照射所造成,且随电极面积的增大或气压的升高而减小。对实际工程上所用的大面积的电极结构,则由于表面存在缺陷的概率增多(即所谓“面积效应”),而冲击击穿电压对缺陷的敏感性不如工频电压而使其放电形成时间加长,且这一现象随气压升高而更加显著。

目前对放电时延的分析虽无完全一致的看法,有关的工作也尚需深入进行,但由此得到的结论是一致的,即 SF_6 气体绝缘总的放电时延一般地至少比同一电场结构的空气要大。

(二) 伏秒特性

工程上用间隙上出现的电压最大值和放电时间的关系来表征间隙在冲击电压下的击穿特性,称为伏秒特性。求取伏秒特性的方法是保持标准波形不变,逐级升高电压 $U_{\max}$ 。电压较低时击穿发生在波尾,电压较高时放电时间减至很小,击穿可发生在波头,放电时间作为横坐标,击穿时电压作为纵坐标。这样,如每级电压只有一个放电时间,是可绘得伏秒特性如图1-8所示。

由于放电时延有很大的统计性,因此每级电压下可得一系列放电时间,所以伏秒特性不

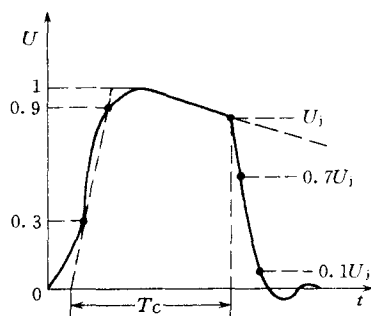


图1-6 截波标准波
 T_c —截断时间; U_j —截断时刻电压

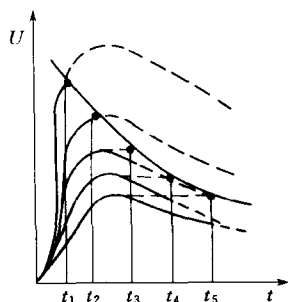


图 1-8 伏秒特性曲线
(虚线表示没有被试
间隙时的波形)

是一条光滑的曲线而是具有上、下包线的一条带子。伏秒特性的曲线形状与电极间电场分布有关，均匀电场、稍不均匀电场下的平均击穿场强较高，放电时延相对较短，故伏秒特性比较平坦，如图 1-9 中 S_1 ，也即其击穿电压与放电时间的关系不那么明显，而极不均匀电场下平均击穿场强低，放电时延较长，当放电时间还相当大时，伏秒特性已随它的减少而明显地向上翘。如图 1-9 中 S_2 ，即其击穿电压与放电时间的关系十分显著。

关于充 SF_6 气体设备的伏秒特性，不同研究者的结论也是不一致的，从上述电场分布来分析，充 SF_6 气体的绝缘结构都是稍不均匀电场，则其伏秒特性应比较平坦。而常规的空气绝缘结构则是极不均匀电场，它的伏秒特性比较弯曲。故有人在 SF_6 断路器的绝缘试验中，得出的雷电冲击截波击穿电压与全波击穿电压的比值较常规空气绝缘比值为低，更有的研究者指出，在 SF_6 中的截波冲击绝缘水平和基准雷电冲击绝缘水平之比基本上是 1，而对常规的空气绝缘来说，这个比值为 1.15~1.3。

若从放电时延来分析，由于 SF_6 的放电时延比同一电场结构的空气要大，故其伏秒特性应该比较弯曲。近年来某些研究者在一些充 SF_6 的全封闭式变电所的实际部件上进行试验的结果表明，其伏秒特性在 3.5 大气压下是弯曲的。有的研究者对均匀电场下 SF_6 的伏秒特性进行研究，发现在一个气压下伏秒特性是很平的，而在 4 个左右的工作气压下则是弯曲的。

故 SF_6 的伏秒特性和电场结构、气压、电极面积以及有无照射等都有关系，需区别具体情况来加以分析，这和分析放电时延是一致的。不过若和常规变电所的用液体、固体材料为绝缘的电力设备例如变压器相比，则后者的放电时延更长，伏秒特性更为弯曲。

(三) 冲击系数

用伏秒特性来说明某间隙的冲击击穿特性虽较完整，但不方便。一般工程上用 50% 冲击击穿电压即 U_{50} 来说明耐受冲击电压的能力，即在此幅值的标准冲击波作用下该间隙发生击穿的可能性为 50%，即可能击穿也可能不击穿，易知 U_{50} 相当于该间隙的伏秒特性曲线上已经平坦的那部分所对应的电压。

50% 雷电冲击击穿电压和持续作用电压下击穿电压之比称为冲击系数。空气绝缘在均匀、稍不均匀电场下，由于放电时延短， U_{50} 下击穿通常发生波头幅值附近，故冲击系数等于 1。而极不均匀电场下放电时延长，分散性也大， U_{50} 下击穿通常发生波尾，冲击系数大于 1，约为 1.02~1.1 之间。 SF_6 的放电时延比同一结构的空气大，故其冲击系数一般比空气大。在均匀电场中 SF_6 的冲击系数为 1，而在稍均匀电场中则大于 1，具体数值视电极具体结构和气压高低而不同，大体在 1.1~1.3 之间， SF_6 全封闭电器的试验，得到的冲击系数则为 1.43，但比之油、纸绝缘的电力设备的冲击系数（例如电力变压器为 1.7）要低。

(四) 操作冲击特性

电气设备在运行中还会因操作或发生事故而受到操作过电压的作用，为了模拟操作过电压，国标规定了操作冲击的标准波形，波头和波长的定义和雷电冲击相同，规定波头长为 $T_1 = 250 \pm 20\% \mu\text{s}$ ，波长 $T_2 = 2500 \pm 60\% \mu\text{s}$ ，幅值的允许偏差和雷电冲击相同为 $\pm 3\%$ 。

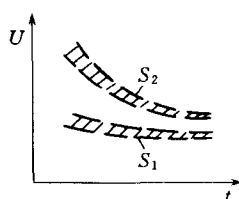


图 1-9 均匀、稍不均匀电场间隙 S_1 和极不均匀电场间隙 S_2 的伏秒特性

在操作冲击电压的作用下气体绝缘的击穿电压也具有分散性，也采用 50% 击穿电压 U_{50} 来说明间隙耐受操作冲击电压的能力。考虑绝缘配合时，也应采用伏秒特性。操作冲击电压的作用时间介于工频和雷电冲击之间，所以均匀电场及稍不均匀电场中，空气间隙的操作冲击的 U_{50} 和雷电冲击 U_{50} 以及工频击穿电压（幅值）实际上相同，击穿电压分散性也较小，击穿同样发生在幅值。至于在极不均匀电场中，随着操作冲击波波头的增加， U_{50} 出现极小值，对应于极小值的波头长度随间隙距离增大而增加，对 7m 以下的间隙，大致在 50~200ms 之间， U_{50} 的极小值可能比同一间隙的工频击穿电压还要低得多。这种现象认为是由于放电时延和空间电荷这两种不同因素的影响所造成的。如前所述由于放电发展需要一定时延，故击穿电压随波头缩短（相当于放电时间缩短）而上升。随着波头的增长，放电时延这个因素的作用逐渐减少了，但击穿前棒有附近电晕放电产生的空间电荷的影响突出起来了。当电压作用时间较长（相当于波头时间较长），空间电荷向棒电极附近迁移的范围大，故电晕的自屏蔽效应较显著，相应地提高了击穿电压。而电压作用时间较短时，自屏蔽效应差，故导致击穿电压降低。由于上述两种因素的作用，使 U_{50} 随波头的增加出现极小值。当间隙距离增加，与极小值相应的放电时间显然也应增大。

SF₆ 的放电时延长，但电晕的自屏蔽效应弱，加以 SF₆ 中采用稍不均匀电场结构，因此它的操作冲击的 U_{50} 比较接近于工频击穿电压，或者略高于工频击穿电压，其比值根据最近一些研究成果表明约为 1.1 倍。故一般认为充 SF₆ 的绝缘结构的冲击击穿电压随冲击波波头时间的增加而减小。

归纳以上的分析，若和常规变电所的空气绝缘相比，充 SF₆ 的电气设备（全封闭组合电器或变电所）的冲击击穿特性是放电时延，冲击系数大，击穿电压随冲击波波头时间的增加而减小，负极性击穿电压比正极性低。

若和常规变电所的电气设备如变压器的内部绝缘结构相比，则其伏秒特性比它平稳，冲击系数又低于它们较多，因而一般认为充 SF₆ 的电气设备的绝缘水平主要决定于雷电冲击水平，且是负极性下的雷电冲击。要降低绝缘水平，首先要降低雷电过电压和操作时产生的高频过电压水平。

第三节 电极表面状态对 SF₆ 气体击穿的影响

常规的高压变电所的绝缘结构上所用的空气间隙多为极不均匀电场，为了提高其击穿电压，一般可以通过适当增加间隙距离的方法来达到。而 SF₆ 气体的击穿电压则与电极间的最大电场强度密切相关。故在设计 SF₆ 绝缘结构时，为提高间隙的绝缘强度，不能采取如同空气绝缘那样单纯加大绝缘距离的方式，而是在加大尺寸的同时，应尽可能使电极间的电场均匀。因此在设计 SF₆ 全封闭式变电所等设备的绝缘结构时，带电体和壳体之间常采用同轴圆柱体这样一种稍不均匀电场结构。

极性对 SF₆ 气体击穿电压的影响和空气相似，也和电场均匀程度有关。在均匀电场中由于电极间电场强度处处相等，故无极性效应。在极不均匀电场中则由于棒电极电晕放电产生的空间电荷的影响，使正极性击穿电压比负极性的低。而稍不均匀电场则相反，负极性击穿电压比正极性的低。

由于充 SF₆ 气体的绝缘结构都是稍不均匀电场，因此它的负极性击穿电压比正极性的低，所以 SF₆ 气体绝缘的电气设备的绝缘水平常决定于负极性。

为提高 SF₆ 气体的电气强度，除改善电场分布外，提高 SF₆ 的气压也是一个有效途径，但

要注意压力不能过高以防止液化。提高气体的气压可以减小电子的平均自由行程,使电子在二次碰撞之间所积累的动能减小,以致不足以引起碰撞游离,从而提高了气体的击穿电压。 SF_6 和空气一样,当压力增加到一定程度后,击穿电压增加的陡度逐渐减小而出现饱和现象。由此可见,只有保证电场相当均匀的条件下提高气压才最为有效。

在均匀或稍不均匀电场中,大气压下空气的击穿电压和电极的表面状态及材料关系不大。而在高气压下,实验表明,击穿电压和电极(主要是阴极)的表面状态有很大关系。电极表面比较粗糙,实验时因充放气带进脏物,或静止时间不够气体还有扰动等,击穿电压都将出现下降现象,分散性也增大。对于刚加工过的电极,在最初若干次击穿中,击穿电压值都较低,且分散性很大。经过多次击穿后,击穿电压可显著提高,分散性也可大为减小。这一过程称为电极的击穿处理或净化效应。气压越高,击穿处理所需要的次数也越多。高气压下,电极的材料也有影响,如不锈钢电极的击穿电压较铝制电极要高。

这些现象一般认为可能和阴极上发生强场放射这一因素有关。若在阴极附近加以很强的外电场,则它也能给阴极中的自由电子以一定的能量,使之逸出阴极表面,这种因电场的作用从金属表面释放出电子的现象称为强场放射。高气压下,击穿场强很高,所以从电极上电场局部增强的地方(例如电极的粗糙不平、毛刺或脏物)可以发生强烈的强场放射,进而发展碰撞游离,从而导致击穿。多次击穿可烧去电极上毛刺及尘埃杂物,所以可显著提高击穿电压,并减小其数值的分散性。

SF_6 气体绝缘的击穿强度也很高,因此同样具有高气压下空气绝缘的特性,现介绍如下。

一、表面粗糙度的影响

电极表面越粗糙,则击穿电压越低,一是由于粗糙电极表面的微小突出处发生强场放射所造成。二是由于电极表面突出处微观区域的场强大大高于间隙中宏观的平均电场强度,使得该处的碰撞游离系数大大增加,从而自持放电条件容易达到,造成宏观击穿强度降低。

电极表面的粗糙程度常以表面最大的凹凸之差来表示称为最大粗糙度 $R_{\max}$ 。粗糙度引起击穿电压的降低常以表面粗糙度系数 ξ 来表示,它是粗糙电极的击穿电压对同一结构下光滑电极的击穿电压之比。显然,当 SF_6 气压越高时击穿场强也越高,此时粗糙度的影响也越大,即表面粗糙度系数也越小。试验结果表明,在内电极表面粗糙度小于 $50\mu\text{m}$ 时击穿电压无甚降低,而增至 $150\mu\text{m}$ 时,会使击穿电压下降最大达 20%,分散性也更大。而当在内电极上附加高度为 $1800\mu\text{m}$ 的尖端时则降低更多。并且电压波形不同时表面粗糙度系数也不同。在表面粗糙度增加或气压增加的情况下正极性击穿电压的降低比负极性要多。 SF_6 全封闭电器在雷电操作冲击、交流、直流电压下进行试验,压力为 3.5 大气压,试验结果表明当高压电极表面粗糙度 $R_{\max}$ 为 $100\mu\text{m}$ 时对各种波形的击穿电压无明显影响。

综上所述,电极表面粗糙度对击穿电压的影响和气压、电压波形、极性等因素有关,具体数值由于试验条件等的不同,各个研究者的结果也不尽相同。

二、面积效应

电极面积越大,电极表面上和间隙中引起击穿电压降低的一些偶然因素(例如比较粗糙的部位)出现的概率

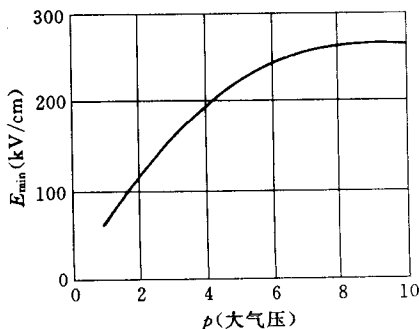


图 1-10 在电极表面积较大时工频最小击穿场强 $E_{\min}$ 和气压的关系