



上海科技专著出版资金资助项目

# 气体绝缘与GIS

肖登明 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

上海科技专著出版资金资助项目

# 气体绝缘与 GIS

肖登明 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书主要阐述气体放电与气体绝缘的基础知识,重点描述近十年来新型环保型绝缘气体的研究进展。本书从气体的基本物理化学性能出发,介绍 SF<sub>6</sub> 气体放电的机理,分析 SF<sub>6</sub> 气体的绝缘特性。首先描述 SF<sub>6</sub> 气体的绝缘特性和应用状况,然后分析 SF<sub>6</sub> 与缓冲气体构成的混合气体的绝缘性能及其实际应用,最后分析新型环保型绝缘气体的绝缘特性和研究发展成果,并对 SF<sub>6</sub> 替代气体实际应用于主要的电力设备如金属封闭式组合电器(GIS)等提出前瞻性的建议。

本书主要用作高电压与绝缘技术专业研究生教材,也可作为等离子体、激光应用和应用物理专业的参考书,还可供电力运行系统、电工制造有关部门的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

气体绝缘与 GIS/肖登明编著. —上海:上海交通大学出版社,2016

ISBN 978-7-313-15012-7

I. ①气… II. ①肖… III. ①气体绝缘材料—金属封闭开关 IV. ①TM564

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 113057 号

## 气体绝缘与 GIS

编 著:肖登明

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:郑益慧

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

字 数:312千字

版 次:2016年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-15012-7/TM

定 价:98.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:17.75

印 次:2016年12月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-68180638

近年来,我国电力行业和电器制造企业的联席会议多次就中、高压开关领域普遍使用 SF<sub>6</sub> 气体为介质,间接导致大气污染等问题展开讨论,认为今后应当抓紧研发 SF<sub>6</sub> 气体的替代品,从而减轻向大气排放污染的问题,研究更适合环境友好的新型环保型绝缘气体。随着人们环境保护意识的增强,少用和不用 SF<sub>6</sub> 气体的电气设备是未来高压电器制造行业的研究开发方向。

目前,国内虽然已经认识到 SF<sub>6</sub> 气体对环境的危害性,但研究得比较多的是 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 或 SF<sub>6</sub>/CO<sub>2</sub> 混合气体,其目的主要是尽量减少 SF<sub>6</sub> 气体的使用量;或者是采用更先进的 SF<sub>6</sub> 气体泄漏测试设备,定期检测 SF<sub>6</sub> 绝缘电力设备中 SF<sub>6</sub> 气体的泄漏量,并且采用先进材料进行泄漏部位的封堵,以尽量减少 SF<sub>6</sub> 的排放量。这方面,电力运行部门联合高校和科研院所,已经做了大量的工作,取得了一定的成果。但是从长远的角度来看,不管是用混合气体替代纯 SF<sub>6</sub> 气体,还是采用保守的方法(如泄漏的检测与封堵),只要还在使用 SF<sub>6</sub> 气体作为绝缘气体,就无法从根本上解决 SF<sub>6</sub> 气体对环境的危害。

肖登明教授的研究组 20 年来紧跟国际上的研究步伐,开展了 SF<sub>6</sub>、SF<sub>6</sub> 混合气体和 SF<sub>6</sub> 替代气体绝缘性能研究的计算分析与实验工作,已获得国家自然科学基金的多项资助,取得了很好的成果,与国际在该领域的研究水平基本同步。他把相关成果编成一本专著《气体绝缘与 GIS》,对于气体放电与气体绝缘的研究具有一定的理论意义,对于研究新型的环保型气体绝缘电力设备具有重要的参考价值。

中国工程院院士



2015 年 8 月

# 前 言

气体放电和气体绝缘的应用研究对工业生产和科学技术的发展起了很大的推进作用。无论现在或未来,绝缘气体必须是环境所能接受的。因此,对于气体可能影响全球变暖问题的最佳解决方法是阻止有害气体向大气释放。这种对环境友好的解决方法指出有必要寻找环保型绝缘气体,有必要研究 SF<sub>6</sub> 替代绝缘气体的高压绝缘技术。

在温室效应环境问题的严峻形势下,研究一种新型的能够取代 SF<sub>6</sub> 的低温室效应绝缘气体显得尤为迫切。开展 SF<sub>6</sub> 替代气体研究,寻找适合国际上环境条件的绝缘气体,具有十分重要的意义。因此,迫切需要一本有关 SF<sub>6</sub>、SF<sub>6</sub> 混合气体和环保型绝缘气体的专业指导书,以促使和推动环保型的、新型的绝缘气体的研究和应用。

著者所在的项目组 20 年来紧跟国际研究步伐,开展了 SF<sub>6</sub>、SF<sub>6</sub> 混合气体和环保型绝缘气体的计算分析与实验研究工作,取得了一定的成果。著者把 20 多年的科研成果编著成《气体绝缘与 GIS》一书,以期为国内外研究环保型的绝缘气体和开发新型 SF<sub>6</sub> 替代绝缘气体的电力设备的研究提供一定的参考。

全书共分为 7 章。第 1 章为绪论,简单介绍了气体绝缘的研究和应用发展状况;第 2 章阐述气体放电的基础,描述了汤逊放电和流注放电的基础理论;第 3 章描述了气体放电过程的蒙特卡罗模拟和玻耳兹曼方程算法;第 4 章描述了 SF<sub>6</sub> 气体的放电特性和绝缘性能;第 5 章描述了 SF<sub>6</sub> 混合气体的绝缘特性及应用;第 6 章描述了当前国际上研究的几种潜在的 SF<sub>6</sub> 替代气体的放电特性和绝缘性能,及环保型气体绝缘的研究状况及发展前景;第 7 章阐述了常用的气体绝缘电力设备,如金属封闭式组合电器(GIS)等的应用现状,提出了应用环保型绝

缘气体的前瞻性建议。

在编写过程中,著者参考了近年来出版的国内外文献,主要总结了自己 20 多年来从事  $\text{SF}_6$ 、 $\text{SF}_6$  混合气体和  $\text{SF}_6$  替代气体绝缘性能研究取得的成果,既重视加强基础理论,又密切联系实际应用。本书由中国工程院院士雷清泉先生审阅了全稿,但由于著者水平有限,书中有不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

本书在编著出版中,获得了国家自然科学基金(No: 51337006)的资助,得到了上海交通大学出版社的支持,著者表示深深的谢意。

本书在编写过程中,我的研究生李冰、赵小令、邓云坤、焦峻韬、谭东现、赵谔参与了资料收集、校对整理的工作,在此一并表示感谢。

**肖登明**

2015 年 8 月于上海交通大学

<b>1</b>	<b>绪论</b>	<b>001</b>
1.1	气体绝缘的定义	001
1.2	绝缘气体的固有特性	002
1.3	SF <sub>6</sub> 的发展历史和应用	005
1.4	SF <sub>6</sub> 是一种潜在的温室气体	008
1.5	环境中 SF <sub>6</sub> 气体的浓度	008
1.6	SF <sub>6</sub> 替代绝缘气体	009
1.7	环保型绝缘气体的现状与发展	010
<b>2</b>	<b>汤逊放电与流注放电</b>	<b>014</b>
2.1	汤逊放电	014
2.1.1	电子崩的形成	015
2.1.2	$\alpha$ 过程	016
2.1.3	$\gamma$ 过程	019
2.1.4	自持放电的判据	020
2.2	流注放电	022
2.2.1	流注理论的提出	022
2.2.2	产生流注的判据	023
2.2.3	流注发展的理论	025
2.2.4	流注理论对不同现象的解释	028
2.3	汤逊放电实验	029
2.3.1	稳态汤逊法(SST)	030

2.3.2	脉冲汤逊法(PT)	035
-------	-----------	-----

### **3 气体放电发展的理论研究方法** **045**

3.1	气体放电中的蒙特卡罗模拟	045
3.1.1	蒙特卡罗法简介	045
3.1.2	气体电子崩发展的蒙特卡罗模拟模型	046
3.1.3	常见气体放电参数的蒙特卡罗模拟	060
3.2	气体放电参数的玻耳兹曼方程求解	063
3.2.1	玻耳兹曼方程简介	064
3.2.2	常见气体放电参数的玻耳兹曼方程求解	072

### **4 SF<sub>6</sub>气体的绝缘特性** **076**

4.1	SF <sub>6</sub> 的基本物理性质	076
4.1.1	SF <sub>6</sub> 的分子结构	077
4.1.2	SF <sub>6</sub> 的气体状态参数	077
4.1.3	SF <sub>6</sub> 的电负性和热性能	080
4.1.4	SF <sub>6</sub> 的分解及分解产物	082
4.2	SF <sub>6</sub> 的气隙击穿特性	084
4.2.1	均匀电场中的放电特性	085
4.2.2	稍不均匀电场中的放电特性	086
4.2.3	极不均匀电场中的放电特性	086
4.3	SF <sub>6</sub> 气体中固体绝缘子的沿面放电特性	089
4.3.1	电场分布及其对固体绝缘子沿面放电特性的影响	089
4.3.2	影响 SF <sub>6</sub> 气体中气-固绝缘特性的因素	091
4.4	各种因素对 SF <sub>6</sub> 绝缘性能的影响	096
4.4.1	气体压力对 SF <sub>6</sub> 击穿电压的影响	096
4.4.2	电场均匀度对 SF <sub>6</sub> 击穿电压的影响	097
4.4.3	极性对 SF <sub>6</sub> 击穿电压的影响	098
4.4.4	电极表面粗糙度对 SF <sub>6</sub> 击穿电压的影响	101



**5 SF<sub>6</sub>混合气体的绝缘特性** **104**

5.1	混合气体对 SF <sub>6</sub> 缺陷的改善	104
5.1.1	液化温度	104
5.1.2	绝缘性能	106
5.1.3	气体成本	109
5.1.4	环境保护	109
5.2	SF <sub>6</sub> 混合气体的混合特性	109
5.2.1	混合比	109
5.2.2	混合比随高度的变化	110
5.2.3	混合过程	112
5.2.4	混合气体的回收	112
5.3	常见 SF <sub>6</sub> 二元混合气体的绝缘特性	113
5.3.1	SF <sub>6</sub> /N <sub>2</sub> 混合气体的绝缘特性及其应用	114
5.3.2	SF <sub>6</sub> /CO <sub>2</sub> 混合气体的绝缘特性及其应用	120
5.3.3	SF <sub>6</sub> /N <sub>2</sub> 和 SF <sub>6</sub> /CO <sub>2</sub> 的对比	125
5.4	其他 SF <sub>6</sub> 多元混合气体	126
5.4.1	SF <sub>6</sub> /He 和 SF <sub>6</sub> /Ne 混合气体	126
5.4.2	SF <sub>6</sub> /Ar、SF <sub>6</sub> /Kr 和 SF <sub>6</sub> /Xe 混合气体	129
5.4.3	SF <sub>6</sub> 与含卤族元素气体组成的混合气体	132

**6 环保型气体绝缘发展前景** **138**

6.1	SF <sub>6</sub> 替代气体的研究进展	138
6.1.1	气体绝缘发展的三个阶段	138
6.1.2	SF <sub>6</sub> 替代气体的研究现状	141
6.2	SF <sub>6</sub> 气体的应用现状和环保型气体的探索	143
6.2.1	SF <sub>6</sub> 混合气体的应用与发展	144
6.2.2	环保型绝缘气体的研究发展	145
6.3	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 及其混合气体的研究与发展	153
6.3.1	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 的物化特性	153
6.3.2	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> /CO <sub>2</sub> 的放电特性及分析	154
6.3.3	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> /CF <sub>4</sub> 的放电特性及分析	159

6.3.4	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> /N <sub>2</sub> 的放电特性及分析	161
6.3.5	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> /N <sub>2</sub> O 的放电特性及分析	167
6.3.6	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 混合气体的绝缘特性分析	169
6.3.7	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 及其混合气体的应用发展	177
6.4	CF <sub>3</sub> I 及其混合气体的研究与发展	178
6.4.1	CF <sub>3</sub> I 气体的物理性质	178
6.4.2	CF <sub>3</sub> I 气体放电特性和绝缘性能的研究	179
6.4.3	CF <sub>3</sub> I 及其混合气体的研究方向及应用	188
6.5	其他潜在的 SF <sub>6</sub> 替代气体的绝缘性能研究	188
6.5.1	全氟丙烷(C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> )	188
6.5.2	一氧化二氮(N <sub>2</sub> O)	194
6.5.3	三氟甲烷(CHF <sub>3</sub> )	196
6.5.4	全氟化碳(CF <sub>4</sub> )	197

## 7 常用的气体绝缘电力设备

200

7.1	气体绝缘全金属封闭式组合电器(GIS)	200
7.1.1	SF <sub>6</sub> 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)	200
7.1.2	GIS 的主要元件	204
7.1.3	SF <sub>6</sub> 混合气体与环保型气体在 GIS 中的应用研究	213
7.2	柜式气体绝缘金属封闭开关设备(C-GIS)	217
7.2.1	C-GIS 发展概况及技术特点	217
7.2.2	C-GIS 的发展面临的挑战	219
7.2.3	国内外 C-GIS 中替代 SF <sub>6</sub> 气体的研究	219
7.3	气体绝缘高压输电线路(GIL)	230
7.3.1	GIL 的特点	230
7.3.2	GIL 的国内外应用现状	233
7.3.3	GIL 的结构	236
7.3.4	GIL 的发展	245
7.4	SF <sub>6</sub> 气体绝缘变压器(GIT)	252
7.4.1	GIT 的发展概况	252
7.4.2	国内外研究现状	255
7.4.3	GIT 结构与绝缘技术	257

---

7.4.4 GIT 冷却方式 .....	261
7.4.5 新型环保型绝缘气体的 GIT 的研究 .....	266
<b>参考文献 .....</b>	<b>268</b>
<b>索引 .....</b>	<b>269</b>

# 绪 论

为了保证电气设备乃至整个电力系统的安全、可靠运行,必须恰当地选择各种电气设备的绝缘介质,使之具有一定的电气强度。而绝大多数电气设备都在不同程度上、以不同的形式利用气体介质作为绝缘材料。在一定条件下,气体会发生放电现象,甚至完全丧失其作为电介质而具有的绝缘特性。利用气体作为绝缘材料来隔绝不同电位的导体,保证气体电介质的绝缘强度,避免因气体放电对电气设备的安全运行造成威胁,称为气体绝缘。气体绝缘与气体放电相辅相成,密不可分。

## 1.1 气体绝缘的定义

气体绝缘的任务主要是如何选择绝缘距离以及如何提高气体间隙的击穿电压。在高压电气设备中经常遇到气体绝缘间隙,为了减少设备尺寸,一般希望间隙的绝缘距离尽可能缩短。由于在气体压力一定的情况下,气体间隙越短,其击穿电压就越低,即气体绝缘性能越差。为此需要采取措施,以提高气体间隙的击穿电压。气体击穿电压与电场分布、电压种类以及气体状态等多种因素有关。由于气体放电理论现在还不完善,击穿电压实际上还无法准确地进行理论计算。在实际工程中,人们常借助于种种实验规律来进行分析解决,或者直接依赖实验决定。

提高气体间隙击穿电压的措施主要有两个:一方面是改善电场分布,使之尽量均匀;另一方面是利用其他方法来削弱气体中的电离过程,如提高气体压力、采用高真空、使用高电气强度绝缘气体等。而改善电场分布也有两种主要途径:一种是改进电极形状;另一种是利用气体放电本身的空间电荷畸变电场的作用。

气体的特性有很多且各不相同,这取决于具体应用的气体和设备。用于电

气设备中的绝缘气体一般具有高电离场强和高击穿场强等特点,气体不易被击穿,击穿后能迅速恢复绝缘性能,化学性质较稳定,无毒、不燃、不爆、不老化、无腐蚀性,不易被放电所分解,分解产物无毒、无腐蚀性,不出现堆积物,并且比热容较大,导热性、流动性较好。由于气体的介电系数稳定,介质损耗极小,所以目前高压电气设备中广泛使用气体介质作为绝缘材料。

大自然为我们免费提供了一种相当理想的气体介质——空气,因而空气也是用得最广泛的气体绝缘材料。架空输电线路各相导线之间、导线与地线之间、导线与杆塔之间的绝缘都利用了空气;高压电气设备的外绝缘也利用了空气。早期高压电气设备中一般采用高压的氮气( $N_2$ )或二氧化碳( $CO_2$ )进行绝缘,但是受到低绝缘强度和高压力的限制,已经被六氟化硫( $SF_6$ )气体所取代。在高压断路器当中, $SF_6$ 兼作灭弧和绝缘介质,性能优良,已逐步取代少油断路器和压缩空气断路器。充  $SF_6$  气体的金属封闭式组合电器(gas insulated substation, GIS)、金属封闭输电线路(gas insulated transmission line, GIL)、气体绝缘管道电缆(gas insulated cables, GIC)和变压器(gas insulated transformer, GIT)的发展使一些高压变电所走向全面气体绝缘化。

除空气、 $N_2$ 、 $CO_2$  和  $SF_6$  以外,还有其他用作绝缘的气体。氟利昂-12( $CCl_2F_2$ )曾作为绝缘气体用于变压器中,其击穿强度与  $SF_6$  相当,但因其液化温度较高,且电火花会使  $CCl_2F_2$  析出碳粒,目前已被  $SF_6$  取代。在氢冷发电机中,氢气除作为冷却介质外也用于绝缘。

由于现今社会对全球温室效应的广泛关注,人们也开始逐渐限制  $SF_6$ 、 $CCl_2F_2$  等温室气体的使用。近几十年来,国际上也在开展新型环保绝缘气体的研究,其中八氟环丁烷( $c-C_4F_8$ )、三氟碘甲烷( $CF_3I$ )等气体已经具备了替代  $SF_6$  的潜质。

## 1.2 绝缘气体的固有特性

对于使用气体绝缘的高压电气设备,气体所具备的固有特性必不可缺。气体的固有特性是指从气体原子或分子物理结构而言,气体所呈现的内性质。这些性质独立于气体所处的环境,不受气体应用范围的影响。

### 1) 基本的物理特性

气体电介质的理想特性之一就是高绝缘强度。高绝缘强度气体是因为在气体中呈现静电应力,从而减少气体中电子的数量。为有效降低电子数密度,要求气体具备如下特性:

(1) 气体具有电负性(在尽可能宽的能级范围内,通过附着去除电子)。因为电子有宽广的能级,在许多应用中,气体温度高于周围环境温度,所以,随着电子能级和气体温度的升高,气体更容易增加电子附着数量。

(2) 具有良好减缓电子速度的特性(降低电子速度,以便在较低的能级捕获电子,通过电子碰撞电离来阻止产生更多的电子)。

(3) 具有较小的电离横截面和较高的电离起始值(通过电子碰撞来防止电离)。

这些参数中,电子附着系数尤为重要。表 1-1 提供了不同气体介质决定的绝缘强度中具有代表性的数据。很明显,表 1-1 中,有些气体的绝缘强度超过 SF<sub>6</sub> 气体。尽管这些气体呈现电负性,由于其他特性不理想,故在实际设计的系统中很少用作绝缘气体。

表 1-1 一些绝缘气体在直流均匀电场下的相对击穿强度

气体	相对击穿强度	评注
SF <sub>6</sub>	1	除空气外,最常用的气体绝缘介质
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	0.9	尤其是在较低电子能级时,这些气体是很强的电负性附着气体
n-C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	1.31	
c-C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	1.35	
1,3-C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>	1.50	
c-C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>	1.70	
2-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	1.75	
2-C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>	2.3	
c-C <sub>6</sub> F <sub>12</sub>	2.4	
CHF <sub>3</sub>	0.27	弱电子附着特性;有些气体(CO、CO <sub>2</sub> )能有效减缓电子运动速度
CO <sub>2</sub>	0.3	
CF <sub>4</sub>	0.39	
CO	0.40	
N <sub>2</sub> O	0.44	
空气	0.30	
Ne	0.006	非电负性附着气体,不能有效减缓电子的运动速度
Ar	0.07	

一些与气体绝缘强度相关的物理特性,如电子碰撞、电子附着、电离和扩散,对于表征气体的绝缘性能非常重要。高绝缘强度气体介质最关键的特性是在宽广的电子能级范围内有较大的电子附着横截面。第二个最重要的特性是在较低

的电子能级下,气体具有较大的扩散横截面来减缓电子运动速度,以有效捕获电子,所以在电子和气体介质分子碰撞过程中,能够阻止产生更多的电子。

此外,气体绝缘特性可能在负离子分离的电子运动中受到阻碍,因为触发气体击穿电子源来自电子分离。形成的负离子要尽可能稳定(负离子是通过电子附着形成的)。从负离子分离的电子是经过一系列过程后产生的,电子最初发生的过程是自动分离、碰撞分离和光电分离,特别是产生电子较前的过程是关于气体温度的函数。

对气体介质绝缘固有特性进行量化的物理量包括:电子附着横截面,电子扩散横截面,电子碰撞电离横截面,电子分解横截面(光电分解、碰撞分解、分子电解反应及相关的聚类过程),电子附着系数,电离系数,有效电离系数及迁移系数。

实际上,除了上述特性外,其他基本物理量对于完全表征气体介质特性也必不可少。这些物理量包括:二次电离过程(如通过电离和光子碰撞,电子从表面发射),光电离辐射吸收(在非均匀电场中,这是气体放电发展的控制系数),在电子碰撞作用下的气体分子分解,分子电离反应。

## 2) 基本的化学特性

绝缘气体必须具备以下化学性能:较高的蒸气压;高热传导率,以利于气体冷却;温度超过 400 K 时,气体能够长期保持热稳定性。

对于导电和绝缘材料而言,气体化学性质稳定且不活泼,不易燃烧,无毒并且不易爆炸。当使用混合绝缘气体时,必须具有合适的热力学特性(包括混合气体的成分、均匀性)。

## 3) 绝缘气体外部特性

绝缘气体外部特性是指如何表征气体与周围环境的作用,或者气体对于外部影响的反应。例如,气体绝缘电击穿和气体放电,不会产生较多的分解物,不产生聚合物,气体具有非腐蚀性,且不会同金属、固体绝缘材料和垫圈发生化学反应,尤其是对灭弧而言,气体具有较高的复合率。最后,气体必须是对环境友好,如气体不会影响全球变暖、不会破坏大气臭氧层、在大气中存在的生命周期短。

## 4) 气体放电和击穿特性

具体的气体放电和击穿特性包括:在均匀电场和非均匀电场中,气体具有较高的击穿电压,气体特性不受电极表面粗糙度或缺陷影响,导电颗粒能够自由移动。

在实际工作条件下,气体应具有良好的绝缘和灭弧性能,良好的绝缘闪络特

性,良好的传热性能,良好的自恢复性能,且气体不会同杂质和潮湿空气发生不利化学反应,同时气体放电的分解产物无毒性等内容也是必须关注的。

### 1.3 SF<sub>6</sub>的发展历史和应用

从 SF<sub>6</sub>诞生到现在只有百余年历史,人们从不断的研究中逐渐发现这种气体的优异性,并把它广泛用于高压电气设备中,用来取代液体和固体等其他绝缘介质。

1900年,法国的两位化学家 H. Moissan 和 P. Lebeau 在实验室中第一次用氟和硫反应得到 SF<sub>6</sub>气体。1920年,人们发现 SF<sub>6</sub>气体具有优异的绝缘性能。1937年,法国首次应用 SF<sub>6</sub>作为高压电气设备的绝缘介质。1940年,人们又发现 SF<sub>6</sub>具有优异的灭弧性能。在此期间,美国军方将其运用于核军事领域“曼哈顿计划”中,直至1947年,美国开始大规模生产 SF<sub>6</sub>气体,同时提供商用。

在标准状态下,SF<sub>6</sub>化学性质不活泼,无毒、不易燃烧和爆炸,具有热稳定性(在温度低于500℃时,SF<sub>6</sub>气体不会分解)。SF<sub>6</sub>呈现的许多优良性能特别适合应用到电力传输和配电设备中。室温高于周围环境温度时,SF<sub>6</sub>是一种电负性气体,这就决定其绝缘强度高和灭弧性能好。在大气压下,SF<sub>6</sub>气体的击穿电压几乎是空气的3倍。况且,SF<sub>6</sub>具有良好的热传导性;在高气压条件下发生电气设备放电或者电弧后,分解的气体产物能够重新生成 SF<sub>6</sub>气体(例如,SF<sub>6</sub>气体能够快速恢复绝缘性能并且有自恢复性能)。SF<sub>6</sub>分解稳定的产物可以通过滤出而去掉,这些产物对其绝缘强度影响很小。在发生电弧时,SF<sub>6</sub>不会产生聚合物、碳和其他导电的沉积物。化学特性方面,温度达到200℃时,SF<sub>6</sub>不会与固体绝缘、导电材料发生化学反应。

在室温下储存 SF<sub>6</sub>需要较高的气压。在21℃液化 SF<sub>6</sub>,要求气压达到2100 kPa。SF<sub>6</sub>的沸点是-63.8℃,沸点低且合理,允许气压在400~600 kPa(4~6个标准大气压)下,SF<sub>6</sub>绝缘设备照常工作。在气体圆筒中允许存储密化,因此在室温气压下,SF<sub>6</sub>很容易液化。目前,SF<sub>6</sub>气体容易获取,易于处理,价格便宜。

从20世纪50年代开始,SF<sub>6</sub>开始广泛运用于高压电气设备中。1953年,美国率先开始生产双压式(1.5 MPa)SF<sub>6</sub>断路器。50年代末,美国又首先制成 SF<sub>6</sub>气体绝缘的电力变压器(GIT),并采用氟利昂冷却技术,但工业上并没有大量应用。1964年,德国西门子公司推出220 kV/15 kA的4断口 SF<sub>6</sub>断路器,从此大容量 SF<sub>6</sub>断路器进入大规模生产和应用阶段。1965年,ABB公司推出了第一套用 SF<sub>6</sub>绝缘的金属封闭式组合电器(GIS)。1971年,第一条 SF<sub>6</sub>气体绝缘电缆



(GIC)工业线路在美国投入运行。1975年,德国西门子公司的首个利用 SF<sub>6</sub> 绝缘的高压输电线路(GIL)在德国 Wehr 抽水蓄能电站正式投运。20世纪80年代初,日本开发出 84 kV 利用 SF<sub>6</sub> 绝缘的气体绝缘开关柜(C-GIS)。

然而, SF<sub>6</sub> 也存在一些不理想的特性: SF<sub>6</sub> 发生放电时,分解物中含有剧毒和腐蚀性的化合物(如 S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>、SOF<sub>2</sub>);非极性污染物(如空气、CF<sub>4</sub>)很难从 SF<sub>6</sub> 气体中去除。SF<sub>6</sub> 的击穿电压对于水蒸气、导电颗粒及导体表面的粗糙度较为敏感;恰好环境温度很低时, SF<sub>6</sub> 呈现非理想的气体特性。例如,在寒冷的气候条件下(大约在一50℃),在正常工作气压下(400~500 kPa), SF<sub>6</sub> 气体会发生部分液化。SF<sub>6</sub> 还是有效的红外线吸收剂,由于其化学性能不活泼,大气中的 SF<sub>6</sub> 气体很难去除。这些不理想的特性使得 SF<sub>6</sub> 成为潜在的温室气体。

自20世纪50年代起,为解决严寒地区 SF<sub>6</sub> 气体的液化问题,降低电场的均匀度对气体绝缘强度的影响,同时减少 SF<sub>6</sub> 气体绝缘设备的成本,削弱 SF<sub>6</sub> 气体的温室效应,人们开始研究用 SF<sub>6</sub> 混合气体代替纯 SF<sub>6</sub> 气体作为气体绝缘介质。70年代中期,国际上又开展了关于 SF<sub>6</sub> 混合气体用作灭弧介质的研究。20世纪80年代初,德国西门子公司开始生产充 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 的单压式断路器。2001年,世界第一条采用 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体绝缘的高压输电线路在日内瓦机场建成。

通常,有4种类型的电气设备使用 SF<sub>6</sub> 气体以绝缘或者灭弧为目的:①气体绝缘断路器和开断电流设备;②气体绝缘传输线;③气体绝缘变压器;④气体绝缘变电站。据估算,全世界生产的 SF<sub>6</sub> 中,有80%应用到电力工业中,而应用到断路器中的 SF<sub>6</sub> 占电力工业的绝大部分。

#### 1) SF<sub>6</sub> 断路器(generator circuit breaker, GCB)

SF<sub>6</sub> 断路器是利用 SF<sub>6</sub> 气体为绝缘介质和灭弧介质的无油化开关设备,其绝缘性能和灭弧特性都大大优于油断路器。但由于其价格较高,且对 SF<sub>6</sub> 气体的应用、管理、运行都有较高要求,故在中压(35 kV、10 kV)中的应用还不够广,主要应用于高压、超高压与特高压等级的电力设备。

#### 2) SF<sub>6</sub> 金属封闭式组合电器(GIS)

GIS是把断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器、母线、避雷器、电缆终端盒、接地开关等各种电气元件密封在充满 SF<sub>6</sub> 气体的若干间隔内,并按一定的方式组合起来而构成的一种可靠的输变电设备。GIS与传统敞开式高压配电装置相比,其结构紧凑,占地面积小;不受外界环境的影响,运行可靠性高、维护工作量少、检修周期长、施工周期短;对无线电通信和电视广播无干扰。自20世纪60年代问世以来,GIS迅速发展,在输变电系统中占据着非常重要的地位,并在