

DUANLUQI

JINENG KAOHE PEIXUN JIAOCAI

• 朱宝林 编

SF₆

断路器技能考核培训教材



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

SF₆ 断路器技能考核培训教材

朱宝林 编

 中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为 SF₆ 断路器技能考核培训教材。全书共分八章，主要内容有：SF₆ 断路器的发展概况，SF₆ 气体的性质，SF₆ 断路器的本体及操动机构的原理和结构，SF₆ 断路器的附件，SF₆ 断路器的控制回路，SF₆ 断路器的安装、检修、运行，SF₆ 断路器的试验等。在内容上，注重理论和实际相结合，较系统地介绍了国内外制造的高压 SF₆ 断路器的基本知识和实际操作技能。为便于学习，在每章之后附一定数量的复习题，答案附于书后。

本书可供供电系统及发电厂从事电气设备安装、检修、运行、试验的工人和工程技术人员阅读，也可供大专院校相关专业的师生及中专、技校的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

SF₆ 断路器技能考核培训教材/朱宝林编. - 北京: 中国电力出版社, 2003

ISBN 7-5083-1357-7

I. S… II. 朱… III. 六氟化硫断路器-技术培训-教材 IV. TM561.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 009353 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

2003 年 4 月第一版 2003 年 4 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 384 千字
印数 0001—4000 册 定价 27.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

随着电力工业的发展,规模巨大的现代化火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂等不断兴建,电力系统逐步发展成为以大容量、超高压、220kV 和 500kV 为骨干的电力网络,各电压等级的变电站星罗棋布,电力系统的额定电流和短路电流越来越大,自动控制技术越来越复杂。如何提高电力设备的性能,保证电力系统的可靠运行,是电力生产迫切需要解决的课题。 SF_6 断路器作为近代发展起来的新型高压电气开关设备,以其优越的性能、安全可靠、维护方便和使用寿命长等优势,在电力系统中得到了广泛的使用,对电力系统的安全、稳定、经济运行发挥了重要作用。但是,目前使用的国内外生产的 SF_6 断路器,其本体结构和操动机构多种多样,不同厂家、不同型号、不同电压等级的 SF_6 断路器,执行的技术标准也有所不同,给安装、检修、运行和试验人员实际工作带来一些困难,甚至会影响工作质量;在运行中,对一些本属于正常状态的现象产生误解。本书正是针对以上问题而编写的。本书理论联系实际,对实际工作具有一定的指导意义。

目前, SF_6 断路器基本上都是由制造厂家的人员进行安装和调试,或在其专业技术人员的指导下施工。电力行业的职工对 SF_6 断路器的学习,仅依靠厂家技术人员的指导和产品安装使用说明书,因此远远不能满足实际工作的需要。特别是目前全国电力行业正在推行职业技能岗位考核制度,许多电力生产单位已将少油断路器更换为 SF_6 断路器,并已开始经常性的岗位考试和技术等级考试,因此迫切需要比较系统地、详细地、全面地介绍 SF_6 断路器知识的书籍。作者为了满足电力行业职工电气设备安装、检修、运行、试验岗位人员技能考核的迫切需要,着重针对考核内容中的“必备知识、看图讲解、设备讲解、事故处理、实际操作”等项内容撰写本书,介绍部分国内外高压 SF_6 断路器的基本知识,供广大读者学习和参考。

本书是在参照国家标准、电力行业及机械行业有关标准、规程、细则, IEC 标准,中外研究成果及资料,中外 SF_6 断路器制造厂家有关资料的基础上,根据 SF_6 断路器的性能,结合电力生产的特点、生产第一线专业技术工人需要掌握的基本专业知识和基本操作技能而编写的。在内容上注重理论和实际相结合,在论述基本理论的基础上,着重介绍实际经验和技能,并收录了一些常用的有关技术资料和数据,在每章之后附一定数量的复习题,以供阅读本书时加深理解和解决实际工程问题时参考。

本书在编写过程中,得到了广东省广电集团公司、河南平高电气股份有限公司、西电集团、ABB (北京) 开关设备有限公司、西门子(杭州)高压开关有限公司、意大利施耐德高压电气公司、化工部黎明化工研究院 SF_6 气体生产厂等单位的大力支持。

参加本书审稿的有:中国电力科学研究院开关所所长袁大陆高级工程师,机械部西安

高压电器研究所李建基高级工程师，化工部黎明化工研究院邵长朴高级工程师，西安曙光电力研究所密度继电器研制专家张树亭高级工程师，科技部全国中文核心期刊《电工技术》编辑部副主任罗明义高级编辑，中国农业大学电力工程学院杜松怀教授、杨建华教授，广东省广电集团人力资源部董车龙工程师，韶关供电分公司修试所主任张尔明高级工程师，河南省开封电业局局长练笔战高级工程师、副局长李晓东高级工程师，河南省平顶山电业局变电工区主任栾立民高级工程师，河南平高电气股份有限公司老专家周健武高级工程师，广东省广电集团公司专家组等。他们在审稿过程中，分别对有关章节提出了宝贵的意见和建议，在此表示最诚挚的感谢和敬意！

由于作者水平有限，编写时间仓促，如有不妥之处，诚恳地欢迎广大读者提出宝贵意见，以便共同切磋或再版时修正，并深表感谢！

作 者

2002年7月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 SF ₆ 断路器的发展概况	1
第二节 SF ₆ 断路器的特点	3
第三节 SF ₆ 气体的发展及其应用	4
复习题	6
第二章 SF₆ 气体的性质	7
第一节 SF ₆ 气体的性质	7
第二节 SF ₆ 气体的电气绝缘特性	15
第三节 SF ₆ 气体的使用标准	25
第四节 SF ₆ 混合气体的特性和参数	27
第五节 气体的状态参数	32
复习题	36
第三章 SF₆ 断路器	38
第一节 电弧的产生过程	38
第二节 熄灭电弧的方式	46
第三节 SF ₆ 断路器的型号及技术参数	51
第四节 SF ₆ 断路器的使用条件和基本结构	63
第五节 灭弧室结构及灭弧过程	73
第六节 SF ₆ 气体压力—温度曲线的应用	83
第七节 GIS	86
第八节 PASS	101
复习题	106
第四章 SF₆ 断路器的操动机构	108
第一节 液压操动机构	109
第二节 压缩空气操动机构	119
第三节 弹簧操动机构	123
复习题	129

第五章	SF₆ 断路器的附件	131
第一节	压力表和压力继电器	131
第二节	密度表和密度继电器	138
第三节	并联电容和并联电阻	147
第四节	净化装置和压力释放装置	150
复习题		155
第六章	操动机构的控制回路	157
第一节	液压操动机构的控制回路	157
第二节	压缩空气操动机构的控制回路	162
第三节	弹簧操动机构的控制回路	168
复习题		174
第七章	SF₆ 断路器的安装、检修与运行	175
第一节	SF ₆ 断路器的运输与储存	178
第二节	SF ₆ 断路器的安装	180
第三节	SF ₆ 断路器的检修	189
第四节	SF ₆ 断路器的运行	195
第五节	SF ₆ 气体的管理、充注、废气处理	202
复习题		209
第八章	SF₆ 断路器的试验	210
第一节	SF ₆ 气体的试验	210
第二节	SF ₆ 断路器的试验	224
复习题		229
附录	露点——μL/L 换算表	230
复习题答案		233
参考文献		263
后记		264

第一章

绪 论

第一节 SF₆ 断路器的发展概况

高压断路器是电力系统中重要的电气设备之一，它使用数量多、范围广，应用在电力系统的各种电压等级中。高压断路器在电能生产、传输、分配过程中的主要作用是：在正常情况下，控制各种电气设备和电力线路的断开及投入；在电力系统发生故障时，与继电保护及自动控制装置相配合，快速切断故障电流，缩小事故范围，以保证电力系统的正常运行。因此，它是否具有优良的性能，直接影响到电力系统的稳定和安全运行，在经济效益和社会效益方面具有非常重要的意义。

高压断路器的发展始终与电力系统电压等级的提高密切相关。当交流 330kV 及以上电压等级的电力系统在 20 世纪 50 年代开始发展的时候，1952 年，瑞士率先投入运行了世界上第一条 400kV 电压等级的交流电力线路，使电力系统的最高电压等级突破了 300kV 的水平，向更高电压等级发展。以后欧、美、前苏联等相继建造了 330、400、500、750kV 等各种电压等级的交流超高压和特高压电力系统。随着电力系统向大容量、高电压的不断发展，相应地高压断路器的种类也日益增多。高压断路器主要可分为压缩空气断路器、油断路器、真空断路器、SF₆ 断路器及 SF₆ 混合气体断路器等类型。据有关资料介绍，现在国外主要的电力设备生产厂商已将 245kV 及以上高电压和超高电压电气产品全部转向了生产 SF₆ 气体绝缘电气设备或装置方面。

为了更好地了解高压 SF₆ 断路器，本书主要介绍 SF₆ 断路器和 GIS 的有关知识，同时简单介绍 PASS 的概况。首先介绍 SF₆ 断路器的发展过程。

根据 SF₆ 断路器灭弧室结构的变化，SF₆ 断路器的发展过程可划分为以下三个阶段：

1. 第一代 SF₆ 断路器

第一代 SF₆ 断路器是指早期的 SF₆ 断路器，它是沿用压缩空气断路器的原理，配置压缩机将 SF₆ 气体压缩到高压罐（1.2 ~ 1.5MPa）内。当触头开断时打开主气阀，高压力的 SF₆ 气体通过主气阀，在灭弧室喷口中形成高速气流经过弧隙喷向低压区（0.2 ~ 0.3MPa），使电流过零时熄灭。因为灭弧室结构有两种气体压力，所以称它为双压式灭弧室。这种 SF₆ 断路器需要压气泵和加压装置，结构复杂，环境适应能力差，已经被淘汰。

2. 第二代 SF₆ 断路器

随着各国对 SF₆ 断路器的不断研制和开发，设计出了单压式（又称压气式）灭弧室，产

生了单压式 SF₆ 断路器。它与第一代 SF₆ 断路器相比,具有结构简单、灭弧性能好、生产成本低的特点。这种 SF₆ 断路器只充入较低压力的 SF₆ 气体(一般为 0.5 ~ 0.7MPa, 20℃),分闸时靠动触头带动压气缸,产生瞬时压缩气体吹弧。但是,依靠机械运动产生灭弧高气压,所需操动机构操动功率大,机械寿命短,开断小电感电流和小电容电流时易产生截流过电压。一般配用较大输出功率的液压操动机构或压缩空气操动机构,固有分闸时间比较长。

3. 第三代 SF₆ 断路器

第三代 SF₆ 断路器是指具有“自能”灭弧功能的 SF₆ 断路器。它具有开断能力强,操动机构操动功率小的优点,有利于新型操动机构的小型化,应用前景广阔。这种 SF₆ 断路器在开断短路电流时,依靠短路电流电弧自身的能量加热 SF₆ 气体,产生灭弧所需要的高气压;在开断小电感电流和小电容电流时,电弧自身的能量不足于加热 SF₆ 气体,产生灭弧所需要的高气压,这时依靠机械辅助压气建立气压,不易产生截流过电压。所需操动机构操动功率小,可配用弹簧操动机构等,操作可靠,机械寿命长,固有分闸时间短,可以制造成断口少、单断口电压等级很高的 SF₆ 断路器。目前,国内外主要的电力设备生产厂商都已生产这种 SF₆ 断路器,并大量投入了运行。例如:日本的三菱公司、日立公司、法国的 MG 公司、瑞士的 ABB 公司、德国的西门子公司等等,都已生产这种 SF₆ 断路器。有的公司到我国办厂或合作生产,在我国电力系统 110 ~ 500kV 电压等级中已得到广泛的使用,大大提高了电力系统的可靠、稳定、经济运行水平。

随着电力系统电压等级的不断提高,人们迫切需要和寻求一种体积更小、性能更好、维护更简便的高压电气设备,后来又研制和生产出了一种气体绝缘金属封闭式组合电器。气体绝缘金属封闭式组合电器的英文全称为 Gas Insulated Switchgear,其缩写为 GIS。它是由断路器、隔离开关、快速或慢速接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、母线以及这些元器件的封闭外壳、伸缩节、出线套管等组成,内部充入一定压力的 SF₆ 气体作为 GIS 的绝缘和灭弧介质。所谓的 GIS,就是指充 SF₆ 气体的气体绝缘金属封闭式组合电器。随着现代电力电子技术的发展,一种外形设计更新颖、重量轻、体积小、占地面积少、可将变电站的大部分部件组合在一起的插接式开关系统——PASS 在瑞士已研制成功,在我国也已投入运行。插接式开关系统的英文全称为 Plug And Switch System,其缩写为 PASS。其主要特点是:将断路器、隔离开关、接地开关、电流/电压传感器组合在一个产品中,显著地减少了变电站的占地面积,可以进行快速安装,免维修,同时利用现代成熟的 GIS 技术与先进的电力电子技术相结合,使得开关系统的稳定性和可靠性得到增强。

GIS 是以利用 SF₆ 气体优良的绝缘和灭弧性能发展起来的。1966 年,世界上第一套以 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质的 GIS 在美国投入运行,使高压电器发生了质的变化,也给高压配电装置带来了一次革命。550kV 及以上电压等级的 GIS 在 20 世纪 70 年代末和 80 年代初相继投入运行。我国从 20 世纪 60 年代末开始研制 GIS,第一套是西安高压电器研究所研制的 110kV GIS (断路器为双断口,开断电流为 25kA),1971 年 6 月研制成功,并于 1972 年 10 月在湖北省丹江口水电厂投入运行。我国在 1990 年生产出第一套 500kV GIS,如 1990 年广西天生桥水电厂和 1994 年湖南省五强溪电站投入运行的 500kV GIS 就是西安

高压开关厂与日本三菱公司合作生产的，沈阳高压开关厂利用日本技术生产的 500kV GIS 于 1992 年在沈阳 500kV 变电站并网运行。目前，我国西安高压开关厂、沈阳高压开关厂等利用引进国外技术，都能够生产 550kV GIS，在许多省、市相继建成了 126 ~ 550kV GIS 变电站。在许多大、中型火电厂、水电厂、核电厂也相继使用了 GIS。

20 世纪 70 年代末我国从国外引进了一批先进的 SF₆ 气体绝缘电气设备制造技术。例如：1979 年 7 月，平顶山高压开关厂同法国 MG 公司签定了引进支柱式 72.5 ~ 765kV SF₆ 断路器及 72.5 ~ 550kV SF₆ 气体绝缘金属封闭式组合电器系列制造技术的合同；1980 年 5 月，西安高压开关厂与前南斯拉夫动力投资公司开关厂签定了共同研制 245kV 单断口和 525kV 双断口支柱式 SF₆ 断路器的专项合同。此后，西安高压开关厂、沈阳高压开关厂、上海华通开关厂与日本三菱公司（产品系列 SFM、SFMT 型）、日本日立公司（产品系列 OFPI、OFPT 型）、瑞士 BBC 公司（现在的 ABB 公司，产品系列 ELF 型）签定了 63 ~ 500kV SF₆ 断路器等开关设备技术转让或合作生产的协议。随着我国改革开放的进一步发展，也有一些外国知名电力设备生产厂商在我国投资办厂，如德国的西门子公司在我国杭州、上海等地办厂，生产 63 ~ 500kV（系列产品 3AP、3AQ、3AT2/3 型）SF₆ 断路器、GIS 及其他开关电气设备；瑞士的 ABB 公司在我国北京及其他城市合作办厂等。随着新技术、新材料、新工艺、新设备的不断研制和开发，技术含量更高、性能更加优良的 SF₆ 断路器将不断生产出来，投入到电力系统各电压等级中去，将为我国电力科技水平和装备水平的提高、供电质量和供电能力的提高、电力事业的快速发展发挥重要的作用。

这些 SF₆ 断路器根据不同的特性和要求，分别配置了多种不同型式和型号的操动机构。例如：气动机构，液压机构，弹簧机构等。

第二节 SF₆ 断路器的特点

由于 SF₆ 断路器和 GIS 使用了优异的 SF₆ 气体作为绝缘和灭弧介质，故 SF₆ 断路器具有下列优缺点。

1. SF₆ 断路器的优点

(1) SF₆ 气体绝缘强度高。电气设备的绝缘距离可以大幅度减小，可优化灭弧室结构，单元电压可以做得很高，同样的电压等级下串联断口减少，有利于高压断路器的小型化。

(2) 灭弧能力强，触头烧损轻微，检修周期长。目前 SF₆ 断路器一般都能够达到额定开断短路电流 10 ~ 25 次，大修周期达 15 ~ 20 年之久。

(3) 开断容量大，额定开断短路电流可达 40 ~ 63kA，最大的已达到了 80kA。断开大短路电流时灭弧快，不重燃，不会有火灾危险。

(4) 断开小电感电流和小电容电流时，灭弧特性好，恢复电压不高，过电压值很小，不易产生操作过电压。

(5) 操作所需操动能量小，操动机构体积小，分、合闸特性好。

(6) 模块化结构简单, 体积小, 重量轻, 安装、调试方便, 适用于各种不同的地理和环境要求。

(7) 封闭的 SF_6 气体保持了内部的干燥, 不受潮, 不受外部环境条件的影响。

(8) GIS 结构紧凑, 占地面积少, 占用空间小, 可靠性高, 操作无噪声。根据工程需要, 设计了多种主接线结构, 组装方便。对环境条件适应性强, 在大城市和工业密集区的中心变电站、地势险峻的山区水电厂、重污染区、高海拔地区、多地震地区、高层建筑内、地下室、超(特)高压输电和其他特殊场所使用, 具有很大的优越性。

(9) PASS 是利用现代成熟的 GIS 技术和先进的电力电子技术相结合, 将断路器、隔离开关、接地开关、电流/电压传感器等组件组合在一起, 结构紧凑, 占地面积和占用空间小, 使得电力系统的稳定性和可靠性更加提高, 与 GIS 相比价格便宜, 具有更大的优越性。

(10) 操作简单, 安全, 无火灾危险, 检查巡视方便, 运行维护工作量少。

(11) 技术含量高, 制造工艺精良, 机械、电气特性好, 使用寿命长。

2. SF_6 断路器的缺点

(1) 价格昂贵, 一次性投资大。

(2) 技术标准、工艺要求高, 一般要求安装、调试、大修由制造厂家进行或制造厂委派专业技术人员并在其指导下进行作业。

(3) 试验项目、试验条件、试验标准等要求严格, 试验设备复杂、精确度高, 要求操作人员技术水平较高。

(4) 因为价格昂贵, 检修技术标准、条件、工艺等要求高, 一些单位安装有 GIS 的终端变电站, 有一些主接线为单母线分段的, 以分段隔离开关代替分段断路器。进线断路器不装设继电保护装置, 其主要目的是只让这些断路器接通、断开负荷电流, 不使其断开短路电流, 发生故障时, 让线路对侧的断路器跳闸切断短路电流, 依此来延长 GIS 的检修周期。

(5) 安装、检修、试验时, 对 SF_6 气体的管理、回收、处理等要求严格。

(6) 安装、检修、试验时, 对水分含量的要求特别严格, 处理方法复杂。

(7) 由于技术含量高, 所需知识范围广, 致使现场人员对一些现象的正确分析、判断、处理比较困难。

第三节 SF_6 气体的发展及其应用

SF_6 是法国的 Moissan 和 Ledeau 于 1900 年首先分离和鉴定出来的。它是由硫在氟气中燃烧, 而后用碱溶液洗涤反应生成物, 去除低氟化合物而制得的。直到 1937 年, Charlton 和 Cooper 测得 SF_6 气体的介电强度比空气的介电强度高得多之后, 才逐步引起人们对它的注意。1941 年, 英国的 Thompson—Houston 公司报道了 SF_6 在变压器中的应用; 1942 年, 前苏联学者 Hoxhberg 报道了 SF_6 在高压电缆和电容器中的应用。为了满足应用的需要, 美国

的 Hooker 电化学公司于 1942 年生产了 1500 磅 SF_6 气体。1948 年美国的 Allied 化学公司开始了工业化生产 SF_6 气体。日本开始也是依靠进口 SF_6 气体商品来满足应用的，随着需要量的增长，经过长时间的研究，有了自己独特的生产 SF_6 气体的技术，并于 1971 年建立了日本氟素化学工业股份有限公司，制造出了年生产能力 240t SF_6 气体的生产装置。

法国首先将 SF_6 气体应用于高压电气设备中。1951 年美国的 Westing—House 公司获得了 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 年生产出了第一台 220kV SF_6 断路器。进入 20 世纪 60 年代， SF_6 气体绝缘电气设备的优越性已为世人所公认，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了多种类型和电压等级的 SF_6 气体绝缘 GIS 设备，仅 1971 ~ 1976 年间世界生产的 GIS 设备就增长了近 10 倍。

我国于 1960 年开始 SF_6 气体的研制工作，由化学工业部黎明化工研究院承担研制 SF_6 气体的攻关课题，于 70 年代初研制成功并批量生产，提供给西安、平顶山、北京等几大高压开关厂用于 SF_6 断路器的研究和试验。70 和 80 年代陆续将该技术直接转让给四川硫酸厂、浙江慈溪化肥厂及国内其他企业。目前，黎明化工研究院是我国 SF_6 化工行业国家标准的主要起草单位和归口管理单位，建有年生产能力达 500t SF_6 气体的自动化生产装置，在工艺生产中的电解制氟、反应合成、热解净化、精制灌装等技术属国内领先，达到了世界同类技术的先进水平。产品生产过程稳定可靠、质量上乘，产品质量指标已远远超过国标 GB 12022—1989 和国际电工委员会标准 IEC 376—1971 中的规定，达到了美国材料试验协会最新质量标准 ASTM D2472—1997。目前正在推行 ISO9000 标准的 2000 版和实施 ISO14000 环境标准的认证工作。生产的 SF_6 气体不但能够满足国内各个行业的需求，而且还大量出口到欧洲、美洲、东南亚、东北亚、中东等世界各地，并与国内各高压断路器制造厂家和各 SF_6 用户及世界著名的 ABB 公司、西门子公司、梅塞尔公司等许多高压电气设备生产公司建立了长期合作的关系。

由于 SF_6 具有良好的特性，不仅应用于电力行业的高压电气设备，而且还应用于电子、冶金、机械、宇航、军事、化工、激光、医疗、气象、制冷、消防、物理研究等各个领域，具有非常广阔的发展前景。

尽管 SF_6 气体具有各种良好的特性，并被广泛的应用，但从安全性考虑，在使用中要严格按照有关规定操作，并要注意以下事项：

(1) 瓶装 SF_6 是高压液化气体，应严格按照原国家劳动总局颁布的《气瓶安全监察规程》进行运输、储存和使用。

(2) 使用时钢瓶阀门应完全开启，用减压阀控制 SF_6 气体的压力和流量，使其成气态充注入使用设备中，用后应关紧阀门，戴好防护帽。

(3) 气瓶内的 SF_6 气体不能用尽，在常温下气瓶内的残余压力不应低于 0.2MPa。

(4) 因为 SF_6 气体的临界温度是 45.64℃，盛装 SF_6 气体的气瓶绝对不允许在高于 45℃ 的温度下运输、储存和使用，以防止气瓶爆炸。

(5) 吸入过量的 SF_6 气体可迅速导致窒息，因此，储存和使用场所应通风良好，且严格防止气瓶泄漏。

(6) 液态 SF_6 气体具有急剧冷冻作用，切勿使其接触人的眼睛、皮肤、衣物等，以防冻伤。



1. 高压断路器在电能生产、传输、分配过程中的主要作用是什么？
2. 第二代 SF_6 断路器有什么特点？
3. 第三代 SF_6 断路器有什么特点？
4. GIS 是一种什么电气设备？
5. PASS 是一种什么电气设备？
6. SF_6 断路器和 GIS 有什么优点？
7. SF_6 断路器和 GIS 有什么缺点？
8. SF_6 气体是由哪个国家什么时候首先分离和鉴定出来的？
9. 我国是什么时候开始由哪个单位承担研制 SF_6 的攻关课题的？什么时候研制成功并批量生产的？
10. 我国生产的 SF_6 气体的技术和质量怎么样？
11. 我国生产的 SF_6 气体是否能满足国内需求？
12. SF_6 气体有什么用途？
13. 使用 SF_6 钢瓶时的操作有什么要求？
14. 用过的 SF_6 气瓶能否将 SF_6 气体用尽？
15. 为什么运输、储存和使用 SF_6 气瓶时，不能在强阳光下曝晒？

第二章

SF₆ 气体的性质

SF₆ 气体在 1900 年被发现后,在前半个世纪,主要是解决 SF₆ 气体的提纯问题,并研究其物理、化学、电气等性能。20 世纪 50 年代初开始使用 SF₆ 气体作为断路器的绝缘和灭弧介质, SF₆ 气体广泛用于断路器还是 60 年代之后,特别在 70 年代才得到迅速发展。虽然 SF₆ 气体在高压电气设备和其他领域得到了广泛的应用,但对于它的一些性质和机理还需进一步的研究。因此,更深一步地了解 SF₆ 气体的有关性质,对于正确地使用 SF₆ 断路器具有一定的实际意义。

第一节 SF₆ 气体的性质

SF₆ 气体广泛使用于支柱式 SF₆ 断路器、落地罐式 SF₆ 断路器、变压器、电压互感器、电流互感器、避雷器、电容器、电缆等单一设备中,以及气体绝缘金属封闭式组合电器 (GIS)、插接式开系统 (PASS) 等组合电气设备中,这是由 SF₆ 气体的物理化学性质决定的, SF₆ 气体具有良好的电气绝缘性能和灭弧性能。

一、SF₆ 气体的物理性质

SF₆ 气体是无色、无味、无毒、不燃烧、也不助燃的非金属化合物,在常温、常压下呈气态。SF₆ 气体是已知的质量最重的气体之一,有关实验资料表明, SF₆ 气体在 21.1℃ 时,其密度为 6.139g/L,约为空气的 5 倍。分子量为 146.05,由 21.95% 的硫和 78.05% 的氟组成。SF₆ 气体冷冻后成为白色固体,其沸点和熔点很低,在 0.1MPa 下,其升华温度为 -63.8℃,在 0.22MPa 下,熔融温度为 -50.8℃。常温 (20℃) 下直至 2.1MPa 仍为气态。临界温度为 45.64℃,临界压力为 3.8MPa。

根据 DL/T 739—2000 《LW-10 型六氟化硫断路器检修工艺规程》,对 SF₆ 气体物理性质的描述如图 2-1 所示。

图 2-1 的用法:找出相应的压力与温度相交的坐标点,画出密度曲线,每一条密度曲线是一个确定的值,与纵坐标的读数无关。气体温度变化时,压力值沿密度曲线变化。AF 线右侧为气态区,密度曲线与此线的交点坐标即为出现液态时的 P 、 T 参数。当使用公式计算时,使用的压力 P 应为绝对压力,使用的温度 T 应是 SF₆ 气体本身的温度而不是环境温度 t ,温度应换算为绝对温度 $T = t + 273.15$ (K)。

根据有关研究资料, SF₆ 蒸气压力与温度之间存在着复杂的函数关系,在不同的温度

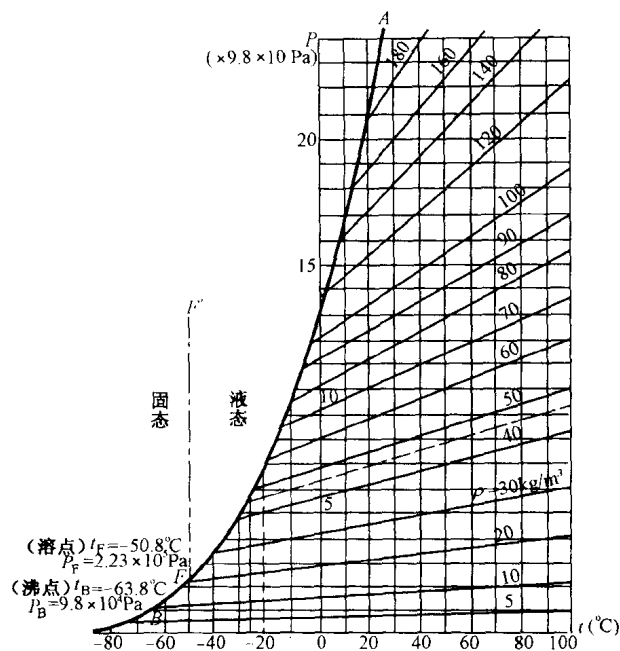


图 2-1 SF_6 气体压力—温度曲线

AFB — SF_6 饱和蒸气压力曲线，其右侧是气态区域； AFB' 线上方—液态区域； $F'FB$ 线上方—固态区域； F — SF_6 的熔点（凝点），是饱和蒸气压力为 $2.23 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时的温度； B — SF_6 的沸点，是饱和蒸气压力为 $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时的温度； ρ —密度 (kg/m^3)； t —温度 ($^\circ\text{C}$)； P —压力 ($\times 9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$)

范围内，其蒸气压力与温度之间的函数关系有所不同，以下列出 SF_6 蒸气压力与温度之间的函数关系：

- $190 \sim -80^\circ\text{C}$ 时， $\log P = 2.7875 - 624.29/T + 0.014731 T$ ；
- $-98 \sim -66^\circ\text{C}$ 时， $\log P = 8.711 - 1222/T$ ；
- $-72 \sim -46^\circ\text{C}$ 时， $\log P = 8.7648 - 123.3/T$ ；
- $-50.8 \sim +45.64^\circ\text{C}$ 时， $\log P = 4.3571 - 889.85/T$ 。

式中 P ——绝对压力，单位为 0.1 MPa ；

T ——绝对温度，单位为 K 。

用以上函数关系式计算的结果与通过实验得出的结论是一致的。 SF_6 蒸气在各温度下的压力如表 2-1 所示。

表 2-1 SF_6 蒸气在各温度下的压力

温 度 ($^\circ\text{C}$)	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
蒸气压力 (MPa)	0.2	0.4	0.5	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.7	3.3

SF_6 蒸气的密度与压力之间也存在着比较复杂的函数关系（关系式略），与通过实验得出的结论也是一致的。 SF_6 蒸气在 21.1°C 时，各压力下的密度如表 2-2 所示。

表 2-2

各压力下 SF₆ 蒸气的密度 (21.1℃)

蒸 气 压 力 (MPa)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
蒸 气 密 度 (g/L)	6.139	12.4	18.8	32.3	69.6

在常温下, SF₆ 的热导率 (导热系数) 比空气低 30%, 但由于其分子量 (146.05) 大, 热容量大, 如果包括对流效应, 总的热传导能力远比空气强。

在温度不太高 (与常温相比)、压力不太大 (与大气压力相比) 的条件下, SF₆ 气体压力与温度的关系近似遵循理想气体的定律。

二、SF₆ 气体的化学性质

SF₆ 是一种非常稳定且呈惰性的气体, 它是已知的最不活泼的气体之一。

SF₆ 的电子结构具有如图 2-2 (a) 所示的共价键结构, 其分子结构如图 2-2 (b) 所示, 组成以 1 个硫原子为中心, 6 个氟原子位于顶端的正八面体, 硫原子被 6 个氟原子紧紧地包围着。由于氟原子是一种负电性很强的元素, 具有极强的吸附电子的能力。而 1 个 SF₆ 分子中有 6 个氟原子, 由此可知, SF₆ 分子具有很强的电负性 (SF₆ 的电子亲和能为 $EA = 3.4\text{eV}$)。硫和氟的结合是基于硫原子中 sp^3d^2 轨道的复杂作用。S—F 键距均为 1.58 埃 (Å) ($1\text{Å} = 10^{-8}\text{cm}$), F—S—F 键角为 90° , 呈正八面体, 属于完全对称型结构。分子无偶极矩。体积相当大, 直径约为 4.77Å 。

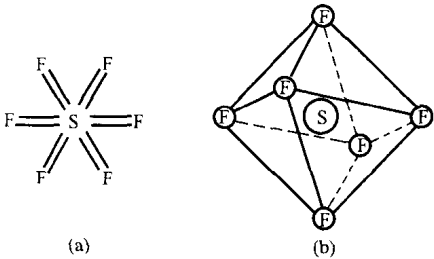


图 2-2 SF₆ 气体的电子与分子结构
(a) 电子结构; (b) 分子结构

对于多电子的原子, 电子按能级分为若干壳层, 如 K 、 L 、 M ……壳层等。在每一壳层上按电子绕核运动的轨道动量矩的大小不同, 又分为支壳层, 如 s 、 p 、 d 、 f 等。此外, 描述电子运动状态的还有在外磁场作用下轨道动量矩在外磁场方向上的分量, 以及电子围绕自己的轴旋转的自旋动量矩在外磁场方向上的分量。

在一个原子中不可能有两个或两个以上的电子具有完全相同的运动状态, 而且在原子系统中每个电子趋向于占有最低的能级。所以, 电子的分布将按次序排列, 即 K 壳层 ($1s$)、 L 壳层 ($2s, 2p$)、 M 壳层 ($3s, 3p, 3d$) 等等。一个 s 支壳层可容纳 2 个电子, p 支壳层可容纳 6 个电子, d 支壳层可容纳 10 个电子等等, 这些都有严格的证明。对某支壳层上的电子数, 常标在该壳层名称的右上角。众所周知, 原子的化学性质就取决于外壳层被电子填充的情况。例如: 硫原子外壳层的结构为 $3s^2, 3p^4$, 而 $3d$ 支壳层是空着的, 如图 2-3 (a) 所示; 氟原子外壳层的结构为 $2s^2, 2p^5$, 如图 2-3 (b) 所示, 最容易吸附外界电子, 呈强电负性。硫原子与氟原子化合时, $3s, 3p$ 支壳层均提供化合键, 而且这些支壳层的部分电子被拉入 $3d$ 支壳层, 形成 $3s^1, 3p^3, 3d^2$ 的壳层结构, 与氟原子以共价键结合而成六氟化硫, 如图 2-3 (c) 所示, 其中硫原子 $3d$ 支壳层上的电子被吸引

趋向于缩小 3d 支壳层。由于氟原子的电负性（移去一个电子所需的能量 - 17.418eV 以及与一个电子结合释放的能量 - 3.339eV 之和）极强，共价键的极性也极强，具有键能较大的离子键的作用。因此，六氟化硫是极为稳定的。

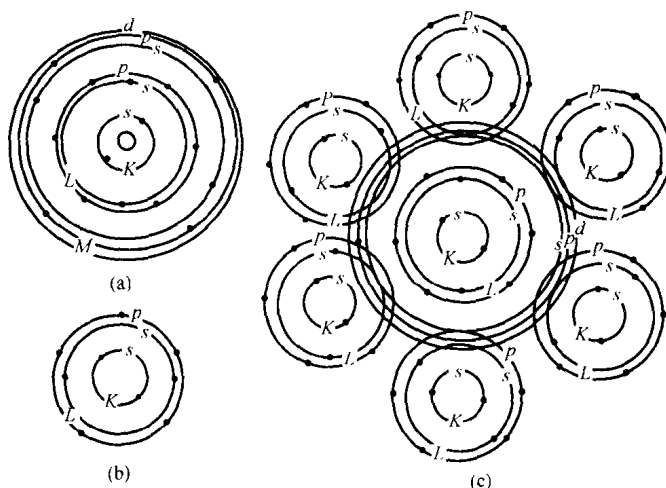


图 2-3 SF₆ 分子壳层结构示意图

(a) 硫原子壳层结构示意图；(b) 氟原子壳层结构示意图；(c) SF₆ 分子壳层结构示意图

当六氟化硫分子与外界电子相遇时，呈强电负性氟原子吸附外界电子后，外附电子所放出的亲和能储存在硫原子的 3d 支壳层上，所形成的六氟化硫负离子仍为低活动性的。

SF₆ 气体的化学性质是非常稳定的，在已知气态物质中是稳定性最好的物质之一，其惰性与氮气相似。在纯净状态下，甚至在玻璃熔融温度 500 ~ 600℃ 下也不分解。一般在 150℃ 以下，化学性质是稳定的，它与水、氧、钾、氨、盐酸、硫酸等活性物质均无反应，与石英在 500℃ 以下也不起反应。

在某些金属存在下，SF₆ 气体在 150℃ 以上即可缓慢分解。例如钢和硅钢在此温度下能促使 SF₆ 气体缓慢分解，而铜或铝则无此作用。到 500 ~ 600℃ 时，SF₆ 气体与银也不发生作用。所以，通常认为，硅钢、碳钢、不锈钢、铜、铝和银等对 SF₆ 的耐腐蚀性较好。如果彻底地排除 SF₆ 气体中所含的水分，则可大大改善 SF₆ 气体的化学稳定性。

三、SF₆ 气体的热力学性质

在 0.1MPa 下，SF₆ 气体的生成热是在 25℃ 基于硫在氟中燃烧时的热量测定出来的，即： $S(\text{固}) + 3F_2(\text{气}) \xrightarrow{\text{热量}} SF_6(\text{气})$ 。O'Hare 和 Settle 等用较纯的氟反复测定，测得 SF₆ 气体的生成热为 $-291.7 \pm 0.2 \text{ kcal/mol}$ 。由此得出 SF₆ 气体中的 S—F 键能为 76kcal/mol，此值相当大。所以，SF₆ 气体无论在化学方面还是在热方面均不活泼。对人体的生理也无毒害作用，是完全可以理解的。

SF₆ 气体在常温下不易水解，其水解活化能的计算值为 -48kcal/mol。其数值之所以这