

中华人民共和国国家标准

GB/T 28534—2012

高压开关设备和控制设备中六氟化硫(SF₆) 气体的释放对环境与健康的影响

The health and environmental impact on release of sulphur hexafluoride(SF₆)
used in high-voltage switchgear and controlgear

[IEC 62271-303:2008, High-voltage switchgear and controlgear—
Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride(SF₆), MOD]

2012-06-29 发布

2012-11-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 V

引言 VI

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 SF₆ 的储存和运输 4

 4.1 概述 4

 4.2 充有 SF₆ 容器的储存 4

 4.3 装有 SF₆ 的容器的运输 5

 4.4 充有 SF₆ 的电力设备的储存和运输 6

 4.5 责任 6

5 安全性和紧急救助 6

 5.1 一般安全规则 6

 5.2 在因外部火灾和内部电弧故障而导致 SF₆ 异常释放情况下附加的安全措施 9

 5.3 紧急救助设备和处理 10

6 培训和证书 11

 6.1 概述 11

 6.2 培训模块 11

 6.3 证书 13

7 SF₆ 处理设备的种类 13

 7.1 概述 13

 7.2 回收装置 14

 7.3 软管连接 16

 7.4 气体测量的便携装置 16

 7.5 气体样品的气瓶 18

附录 A (资料性附录) 六氟化硫 19

 A.1 简介 19

 A.2 化学特性 19

 A.3 物理特性 19

 A.4 电气特性 20

 A.5 处理、危害和健康特性 21

附录 B (资料性附录) SF₆ 的环境影响 22

 B.1 引言 22

 B.2 生态毒物学 22

 B.3 臭氧减少 22

B.4 全球变暖和气候变化(温室效应)	22
B.5 副产物	23
B.6 SF ₆ 的环境兼容政策	23
附录 C (资料性附录) SF ₆ 副产物	24
C.1 SF ₆ 的分解	24
C.2 SF ₆ 及其副产物的腐蚀性能	25
C.3 清除 SF ₆ 副产物的措施	26
C.4 SF ₆ 副产物的生理特性	26
附录 D (资料性附录) SF ₆ 副产物对健康的潜在影响	27
D.1 引言	27
D.2 综述	27
D.3 SF ₆ 副产物的生成和对健康的影响	27
D.4 副产物浓度的计算	29
D.5 结果的评价	38
D.6 结论	38
D.7 用于计算的数据	38
D.8 作用极限值	41
参考文献	43
图 1 通用回收装置	14
图 A.1 SF ₆ 的压力/温度/密度特性	20
表 1 SF ₆ 的储存方法	4
表 2 SF ₆ 运输和储存容器的类型和标签	5
表 3 SF ₆ 运输的国际法规摘要	6
表 4 从事 SF ₆ 电力设备作业时的措施	7
表 5 打开和/或接近充气隔室时的安全措施	8
表 6 中和方案	8
表 7 附加的安全措施	10
表 8 SF ₆ 回收期间使用的典型的过滤器类型	15
表 9 气体测量装置	17
表 A.1 SF ₆ 的主要化学特性	19
表 A.2 SF ₆ 的主要物理特性	20
表 A.3 SF ₆ 的主要电气特性	21
表 D.1 SOF ₂ 、SO ₂ 、HF 和 S ₂ F ₁₀ 的 TLV	30
表 D.2 泄漏情况实例的计算结果	32
表 D.3 考虑到 SOF ₂ 水解时对于泄漏情况的结果	32
表 D.4 局部放电时 S ₂ F ₁₀ 浓度的实例计算	34
表 D.5 电晕放电时 S ₂ F ₁₀ 浓度的实例计算	34
表 D.6 隔离开关出现火花时 S ₂ F ₁₀ 浓度的实例计算	35
表 D.7 内部故障情况时 SOF ₂ 浓度的实例计算	36
表 D.8 开关设备的容积和充气压力	39

表 D.9 开断时的电弧能量 39

表 D.10 内部故障时的电弧能量 39

表 D.11 SOF₂ 产生率 40

表 D.12 生成 SOF₂ 的数量 40

表 D.13 SF₆ 的泄漏率 41

表 D.14 SOF₂ 的泄漏率 41

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用重新起草法修改采用 IEC 62271-303:2008《高压开关设备和控制设备 第 303 部分:六氟化硫(SF₆)的使用和处理》。

本标准与 IEC 62271-303:2008 的技术性差异及其原因如下:

——删除了与本标准无关 IEC 62271-303 中第 7 章:安装和交接期间 SF₆ 的处理、第 8 章:正常使用寿命期间 SF₆ 的处理、第 9 章:维护期间 SF₆ 的恢复和回收、第 10 章:寿命终了时 SF₆ 电力设备的拆卸。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国高压开关设备标准化技术委员会(SAC/TC 65)归口。

本标准起草单位:西安高压电器研究院有限责任公司、西安西电高压开关有限责任公司、新东北电气(沈阳)高压开关有限公司、上海天灵开关厂有限公司、ABB(中国)有限公司、北京北开电气股份有限公司、江苏省如高高压电器有限公司、上海电气输配电试验中心有限公司、厦门 ABB 高压开关有限公司、广东番禺开电气设备制造有限公司、汕头正超电气集团有限公司、深圳电气科学研究所、宁波天安集团、益和电气集团股份有限公司、浙江开关厂有限公司、河南平高电气股份有限公司、西安西电开关电气有限公司、施耐德电气(中国)投资有限公司、泰兴科立德制冷设备有限公司。

本标准主要起草人:邢娜、吴鸿雁、南智勇、黄超、陈志彬、李新春、张承波、孙会刚、谢建波、李金玲、李宝宝、陆以安、申亮、林复明、杨坤、李世岗、宁茂亮、阎关星、沈春明、雷小强、冯小红、肖敏英、莫康、邓永辉。

引 言

SF₆ 气体应用于电气开关设备和控制设备已有 30 余年。它主要是用在额定电压超过 1 kV 直到所有已制造出的最高额定电压的开关设备和控制设备中。据估计,目前已有几百万台不同类型的充有 SF₆ 的单元在运行。

根据 GB/T 11022,共有 3 种气体系统在技术上是可用的:

——可控压力系统;

注 1: 因为不可接受的泄漏率(见 GB 7674),对于新设备不再使用可控压力系统。

——封闭压力系统:对于现代电力设备泄漏率的标准值为每年 0.5%和每个充气隔室 1%;

——密封压力系统:对于现代中压电力设备(商业上称为“终身密封产品”或“气密密封系统”),密封压力系统的密封性由其预期使用寿命来规定。相对于泄漏性能的预期使用寿命由制造厂来规定。优选值为 20 年、30 年和 40 年。

注 2: 为了满足预期使用寿命的要求,认为密封压力系统的年泄漏率小于 0.1%。

电气开关设备和控制设备中使用 SF₆ 的长期经验证明,只要建立和遵守某些基本的预防措施和程序,就有益于运行、工作和环境的安全性,例如:

——设备的安全运行;

——资源和工具的优化;

——设备停运时间的最小化;

——SF₆ 处理人员的标准培训;

——处理操作期间气体的排放量降低到功能物理限值以下;

——避免任何蓄意的排放,例如排放到大气中;

——在交接、使用、运行和寿命终了处理期间将 SF₆ 的消耗和排放降到最低。

最近,关于 SF₆ 技术应用于开关设备和控制设备方面的最新实践推荐已经由 CIGRE B3 研究委员会的 B3.02 工作组出版^[1]。这些信息用来制定本标准。

高压开关设备和控制设备中六氟化硫(SF₆) 气体的释放对环境和健康的影响

1 范围

本标准适用于在高压开关设备和控制设备正常和异常操作时 SF₆ 处理以及人员的安全和环境兼容的程序,也包括了 SF₆ 的储存和运输以及人员培训。

应该认为这些程序是保证从事 SF₆ 工作的人员安全和将 SF₆ 排放到环境中的数量减到最小的最低要求。

本标准通常也适用于包含 SF₆ 的混合气体。

注 1: 为了便于本标准的使用,通常意义上的高压开关设备的电压范围是泛指额定电压 3.6 kV 及以上。实际应用中,通常中压开关设备的额定电压范围是 3.6 kV~63 kV;高压开关设备的额定电压范围是 72.5 kV~252 kV;超高压开关设备的额定电压范围是 363 kV~800 kV;特高压开关设备的额定电压范围是 1 100 kV 及以上。

注 2: 整个标准中,术语“电力设备”代表“高压和中压开关设备和/或控制设备”。

在本标准中,不可能包含现行的所有关于 SF₆ 的细则(规程),它主要考虑安全方面,并给出在正常和异常运行条件期间以开关设备和控制设备中采用的 SF₆ 为工作对象的基本知识和导则。

这些建议应作为保证以 SF₆ 为工作对象的工作人员安全的最低要求。

本标准适用于充有工业纯 SF₆ 气体的开关设备和控制设备。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 1984 高压交流断路器(GB/T 1984—2003,IEC 62271-100,MOD)

GB/T 2900.20—1994 电工术语 高压开关设备(IEC 60050,NEQ)

GB 7144 气瓶颜色标志

GB/T 8905 六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则(GB/T 8905—1996,IEC 60480,NEQ)

GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求(IEC 62271-1:2007,MOD)

GB/T 12022 工业六氟化硫(GB/T 12022—2006,IEC 376,IEC 376A,IEC 376B,MOD)

GB/T 28537—2012 高压开关设备和控制设备中六氟化硫(SF₆)的使用和处理(IEC 62271-303:2008,MOD)

3 术语和定义

GB/T 2900.20—1994 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

注:许多不同类型的开关设备和控制设备都采用 SF₆ 气体作为绝缘和/或熄弧介质。

3.1

六氟化硫(SF₆)的异常释放 abnormal release of sulphur hexafluoride(SF₆)

压力系统故障引起的 SF₆ 从运行设备中的释放。

注:异常的 SF₆ 释放通常是不希望的和连续的气体排放。只要探测到异常的 SF₆ 泄漏,应立即采取适当的措施定位和减少泄漏。

3.2

六氟化硫(SF₆)的处理 handling of sulphur hexafluoride(SF₆)

可能涉及 SF₆ 转移的任何过程。

3.3

抽真空 evacuation

把不同于 SF₆ 的气体(例如空气或氮气)从充气隔室转移到大气中。该操作通过真空泵实现。

3.4

六氟化硫(SF₆)的收回 recovery of sulphur hexafluoride(SF₆)

把 SF₆ 从充气隔室转移到回收装置或储存器中。该操作通常采用回收压缩机实现。

3.5

续充六氟化硫(SF₆) topping-up with sulphur hexafluoride(SF₆)

将预先充气的隔室充入六氟化硫气体至其额定充入压力。

注：预先充气隔室为发运前在工厂充气的封闭压力系统。充入 0.02 MPa~0.05 MPa 之间的典型压力(相对压力)以便现场交接的简洁和快速。

3.6

六氟化硫(SF₆)的回收 reclaim of sulphur hexafluoride(SF₆)

一系列 SF₆ 的处理,包括收回、SF₆ 的最低提纯过程(如灰尘、副产物、湿度、油等的过滤)。

注 1：标准的回收装置在第 7 章中描述。

注 2：有时,“reclaiming(强调动作)”和“reclamation(名词)”可以具有“reclaim(动词)”相同的意义。

3.7

金属封闭开关设备和控制设备 metal-enclosed switchgear

除外部连接外,全部装配完成并封闭在接地金属外壳内的开关设备和控制设备。

[GB/T 2900.20—1994 的 3.5]

3.8

绝缘封闭开关设备和控制设备 insulation-enclosed switchgear

除外部连接外,全部装配完成并具有绝缘外壳的成套开关设备和控制设备。

注：外部绝缘可以装有(半)导体层提供。

[GB/T 2900.20—1994 的 3.10,修改过]

3.9

气体绝缘金属封闭开关设备 gas insulated metal-enclosed switchgear

绝缘的获得至少部分通过绝缘气体而不是处于大气压力下空气的金属封闭开关设备。

注 1：本术语通常适用于高压开关设备和控制设备。

[GB/T 2900.20—1994 的 3.12]

注 2：三极封闭气体绝缘开关设备适用于三极封闭在一个公共外壳内的开关设备。

注 3：单极封闭气体绝缘开关设备适用于每极封闭在一个独立外壳内的开关设备。

3.10

充气隔室 gas-filled compartment

开关设备和控制设备的隔室中的气体压力由下述系统之一保持：

- 可控压力系统；
- 封闭压力系统；
- 密封压力系统。

注 1：几个充气隔室可以永久地连接形成一个公共压力系统(气密装配)。

注 2：本定义与 GB/T 11022—2011 的 3.6.6.1 的相同。

3.11

气体的可控压力系统 **controlled pressure system for gas**

可以从外部压缩气源或内部气源自动补气的容器。

注1：可控压力系统的例子有压缩空气断路器或气动操动机构。

注2：容器可以由几个永久连接的充气隔室组成。

注3：本定义与 GB/T 11022—2011 的 3.6.6.2 的相同。

3.12

气体的封闭压力系统 **closed pressure system for gas**

只能定期地以人工方式连接到外部气源补气的容器。

注1：封闭压力系统的例子是单压式 SF₆ 断路器。

注2：本定义与 GB/T 11022—2011 的 3.6.6.3 的相同。

3.13

气体的密封压力系统 **sealed pressure system**

在预定的使用寿命期内不需要对气体或真空作进一步处理的容器。

注1：密封压力系统的例子有真空断路器的灭弧室或某些 SF₆ 断路器。

注2：密封压力系统的组装和试验全部在工厂进行。

注3：本定义与 GB/T 11022—2011 的 3.6.6.4 的相同。

3.14

工业级六氟化硫(SF₆) **technical grade sulphur hexafluoride(SF₆)**

具有符合 GB/T 12022 的非常低的不纯净度的 SF₆ 气体。

3.15

使用过的六氟化硫(SF₆) **used sulphur hexafluoride(SF₆)**

初始充有符合 GB/T 12022 或 GB/T 8905 的 SF₆ 气体,从电气设备中取出的气体。充入后,在设备运行期间不论何种原因(例如维修、运行、维护)取出的气体,应予以转移且被认为是使用过的气体。

注：附录 C 给出了以气态和固态副产物形式出现的 SF₆ 分解物的资料。

3.16

适合于现场再利用的使用过的六氟化硫(SF₆) **used sulphur hexafluoride(SF₆) suitable for reuse on site**

使用过的但不纯净度不超过 GB/T 8905 规定的 SF₆。

注：为了满足规定的技术要求,如果必要可以采用带有适当的过滤器和吸附材料的运行单元。

3.17

适合于气体制造厂再利用的使用过的六氟化硫(SF₆) **used sulphur hexafluoride(SF₆) suitable for reuse at the gas manufacturer**

超过了 GB/T 8905 规定的最大可接受的不纯净度,但符合气体制造厂给出的气体再利用技术规范的使用过的 SF₆。

注：为了满足规定的技术要求,如果必要可以采用带有适当的过滤器和吸附材料的运行单元。

3.18

不适合于再利用的使用过的六氟化硫(SF₆) **used sulphur hexafluoride(SF₆) not suitable for reuse**

符合 3.15 但不符合 3.16 和/或 3.17 的气体。

注：不适合于再利用的使用过的六氟化硫应按照关于废物管理方面的地方或国际法规进行处置。

3.19

未经受电弧的六氟化硫(SF₆) **non-arc'd sulphur hexafluoride(SF₆)**

气体副产物的体积比小于 0.1%(近似值)的使用过的 SF₆。

注：典型的未经受电弧的六氟化硫出现在充入后、带电和/或绝缘试验前,和/或从来不经电弧的绝缘隔室中。

3.20

经受正常电弧的六氟化硫(SF₆) normally arced sulphur hexafluoride(SF₆)

气体副产物的体积比介于 0.1%(近似值)和 5%(近似值)之间的使用过的 SF₆。

注 1: 典型的经受过电弧的六氟化硫通常出现在正常(负载和故障)操作后的断路器和负荷开关中。

注 2: 少量的固体副产物,主要有金属氟化物以及可能出现的钨氧氟化物。

3.21

经受严重电弧的六氟化硫(SF₆) heavily arced sulphur hexafluoride(SF₆)

气体副产物的体积比超过 5%(近似值)的使用过的 SF₆。

注 1: 典型的经受严重电弧的六氟化硫通常出现在内部电弧故障后的所有气体隔室中;断路器/负荷开关开断失败后;断路器成功开断几次接近额定短路电流值的短路电流后。

注 2: 大量的固体副产物,主要有金属氟化物以及出现的钨氧氟化物。

4 SF₆ 的储存和运输

4.1 概述

无论是在容器中还是在电力设备中储存和运输 SF₆ 都应符合地方和国际法规。

注: 空的 SF₆ 容器可能仍然包含一定量剩余的 SF₆。它应该和充气的容器一样储存和运输。

4.2 充有 SF₆ 容器的储存

通常, SF₆ 可以采用两种方式储存,即 2 MPa 压力以下的气体,或者 5 MPa 以下的液体。气态储存的优点是减少了收回和充入时间,但是要求大的储存容积,因此,通常局限于小容积的设备或者用于固定地点的气体处理设备。液态储存能够降低储存容积且经济地运输大量的 SF₆。

容器应小心处理并储存在凉爽、干燥、通风良好并远离易燃易爆物的区域。应该防止太阳的直接照射,安放在与湿地面一定距离处并保证防止倾倒。应采取特殊的阀保护以避免阀自身的潜在损坏。

容器应是可再充入的(不可再充入的容器是禁止的)并在容器上清楚地标记以辨认它们所装的气体。装有工业级 SF₆ 的容器、适合于现场再利用的使用过的 SF₆ 的容器、装有适合于气体制造厂再利用的 SF₆ 或不适合于再利用的使用过的 SF₆ 的容器从盛装气体的种类区分开来。

表 1 给出了所有可能的储存方法以及基于这些方法的储存容器的综述。

表 1 SF₆ 的储存方法

储存方法	要 求	特 点
气态	典型压力低于 2 MPa, SF ₆ 仍保持气态	需要相对小的收回压力差(典型值为 100 : 1)但需要较大的储存容积。运输时容器中的 SF ₆ 不能液化。因此,限于少量的(典型值为 200 kg)和静止用途
冷却辅助液化	典型压力等于 3 MPa, 压缩后采用辅助的冷却系统冷却 SF ₆ , 允许 SF ₆ 液态储存	需要相对小的收回压力差(典型值为 700 : 1)但需要冷却集成。冷却集成的性能会影响流程速度。附加的维护要求。要求有限的储存容积但通常不适合于运输
仅压力液化	典型压力等于 5 MPa, SF ₆ 压缩至 5 MPa 并仅靠压力液化	需要收回压力差典型值为 1 000 : 1, 不需要额外的集成冷却。可以用于额定压力 5 MPa 或以上的任何容器
注: 不推荐采用“冷却辅助液化”的储存方法。		

如果使用过的 SF₆ 储存在现场,储存容器应符合地方或国际关于压力容器方面的法规。容器标识

也应遵守地方和国际法规。

注：国际法规由危险物品运输(DTG)以及联合国欧洲经济共同体的分类和标识的全球协调系统(GHS)专家委员会发布和定期修订。

表 2 给出了容器类型和要求的标签的综述。出于实际考虑,尽可能采用推荐优选的运输储存容器。

表 2 SF₆ 运输和储存容器的类型和标签

气体	特性	容器类型	容器标签
工业级气体	液态惰性气体	适合于压力达 7 MPa 的液化气体。 ^a 建议:按照 GB 7144 应有深绿色色环且容器涂成银灰色	模版印制于容器:UN 1080 六氟化硫 ^[34] 危险标签:2. 2
适合于现场再利用的使用过的气体	液态惰性气体	适合于压力达 7 MPa 的液化气体。 ^b 建议:建议将容器涂成特定的颜色以避免和工业级的 SF ₆ 混淆(建议容器的上面三分之一段用橙色)	模版印制于容器:UN 3163 六氟化硫、四氟化碳、空气和氮气 ^[34] (见注 2) 危险标签:2. 2
适合于气体制造厂再利用和/或不可再利用的使用过的气体	液态惰性气体	容器类型和标签与适合于现场再利用的使用过的 SF ₆ 一致	
	包含毒性副产物的液态气体(见注 3)	与适合于现场再利用的使用过的 SF ₆ 一致	模版印制于容器:UN 3162 六氟化硫、氟化氢、氟化亚硫酸 ^[34] (见注 2) 危险标签:2. 3
	包含毒性和腐蚀性副产物的液态气体(见注 4)	具有腐蚀防护阀和连接器的储存和运输腐蚀性气体(例如氢氟酸)的专门容器	模版印制于容器:UN 3308 六氟化硫、氟化氢、氟化亚硫酸 ^[34] (见注 2) 危险标签:2. 3+8
注 1: 充入系数是容器中包含的 SF₆ 的重量除以容器的容积,通常用 kg/L 表示。 注 2: 仅规定两种最常见的杂质。 注 3: 任何包含毒性气体副产物的使用过的 SF₆ 可以在现场通过分离出毒性气体副产物来回收以便于运输。 注 4: 任何包含毒性和腐蚀性气体副产物的使用过的 SF₆ 可以在现场通过分离出毒性和腐蚀性气体副产物来回收以便于运输。			
^a 工业级 SF₆ 的充入系数达到 1.04 kg/L。 ^b 由于存在其他气体(例如氮气和氧气),充入系数小于 0.8 kg/L(见注 1)。			

4.3 装有 SF₆ 的容器的运输

含有 SF₆ 电力设备和/或 SF₆ 容器的国际运输规则使用公路运输(ADR)^[35]、铁路运输(RID)^[36]、船运(IMDG)^[37]和空运(IATA-DGR)^[38]的规则。这些规则类似于 UN 编码、分类、危险品标记、最终的分类以及运输文件。但是官方语言不同,具体如下:

- ADR: 德文、法文、英文;
- RID: 英文;
- IMDG: 英文;
- IATA-DGR: 英文。

表 3 中给出了 SF₆ 运输的国际法规的摘要。

表 3 SF₆ 运输的国际法规摘要

气体	特性	分类	最终的类别	运输文件
工业级 SF ₆ (见注 1)	液化的惰性气体	2A	UN 1080 液化的气体, n. o. s 2. 2 ^[34] (见注 4)	UN 1080 液化的气体(六氟化硫), n. o. s 2. 2 ^[34]
适合于现场再利用的 SF ₆	液化的惰性气体	运输等级和危险标签与工业级 SF ₆ 一样	UN 3163 液化的气体, n. o. s 2. 2 ^[34]	UN 3163 液化的气体(六氟化硫、空气、氮气和四氟化碳), n. o. s 2. 2 ^[34]
适合于气体制造厂再利用的 SF ₆ 和/或不适用于再利用的 SF ₆	液化的惰性气体	UN 编码、运输等级、危险标签、最终的类别以及运输文件和适合于现场再利用的使用过的 SF ₆ 一样		
	液化的毒性气体(气体包含毒性气体副产物)(见注 2)	2T	UN 3162 液化的毒性气体, n. o. s 2. 3 ^[34]	UN 3162 液化的毒性气体(六氟化硫、氢氟酸以及氟化亚硫酸), n. o. s 2. 3 ^[34]
	液化的毒性和腐蚀性气体(气体包含毒性和腐蚀性气体副产物)(见注 3)	2TC	UN 3308 液化的毒性和腐蚀性气体, n. o. s 2. 3+8 ^[34]	UN 3308 液化的毒性和腐蚀性气体(六氟化硫、氢氟酸以及氟化亚硫酸), n. o. s 2. 3+8 ^[34]
注 1: 用于工业级 SF₆ 的容器应避免任何杂质。 注 2: 任何包含毒性气体副产物的使用过的 SF₆ 可以在现场通过分离出毒性气体副产物来回收以便于运输。 注 3: 任何包含毒性和腐蚀性气体副产物的使用过的 SF₆ 可以在现场通过分离出毒性和腐蚀性气体副产物来回收以便于运输。 注 4: n. o. s 表示未另作详细说明的。				

4.4 充有 SF₆ 的电力设备的储存和运输

充有 SF₆ 的电力设备应按照地方和国际法规储存和运输。

4.5 责任

使用 SF₆ 的电力设备的业主负责设备和气体的正确使用、运输以及处置。他还负责 SF₆ 在设备和/或储存在容器中累积的记录以及年度排放率。按照 GB/T 12022, 由设备的原始制造厂和气体供应方手册提供的基本信息予以支持。

5 安全性和紧急救助

5.1 一般安全规则

5.1.1 概述

对电力设备进行任何维护、服务工作之前, 应详细检查和报告设备的详细状态、条件。作为对所需满足的地方安全法规的补充, 至少应遵守下述一般的安全规则:

- 开关分闸并隔离;
- 防止重合闸;

- 验证设备不带电；
- 设备短路并接地；
- 对临近带电部件进行屏蔽或设置围栏。

允许对电力设备进行工作的书面文件应在设备的业主、运行者和服务的提供者之间达成一致并签字。

表 4 列出了从事 SF₆ 电力设备作业需考虑的主要问题。

无论 SF₆ 在何处处理,应有明确的标识禁止明火、吸烟、热动力的使用、加热超过 200 ℃ 以及没有特殊防护措施的焊接活动,并给出紧急救助的规程。

表 4 从事 SF₆ 电力设备作业时的措施

项目	临近设备工作(设备的操作、外观检查、房屋清洁)	充气隔室的充入、收回、抽真空	充气隔室的打开、敞开隔室的作业
材料安全性数据页、使用手册	不要求	适用	适用
培训	适用(见注)	适用	适用
SF ₆ 处理设备	不要求	适用	适用
清洗、中和设备	不要求	不要求	适用
人员防护设备	不要求	不要求	适用
注:按照地方安全法规,一般的信息应根据作业和设备的类型确定。			

在运行过的电力设备充气隔室打开时,为了避免同可能存在的细小的固体副产物接触,人员应穿戴适当的防护服。特别注意保护眼睛和呼吸系统。对于工作在包含正常经受电弧的和/或严重经受电弧的 SF₆ 的充气隔室中或者靠近打开的充气隔室的人员:

- 采用适当的工具和设备;
- 遵照高标准的人员保健;
- 离开作业区域前清洁人员自身和使用任何材料的设备;
- 离开作业区域后尽可能快速的脱掉防护服并彻底清洗自身;
- 确保与副产物接触过的衣服、工具和元件安全地装在密封的袋内或者其他密封的容器内以及随后对残留物进行中和处理。

5.1.2 人员防护

SF₆ 仅应由有资质的人员处理。根据从事电力设备作业的种类可以采用不同的培训模块(见第 6 章)。

对于打开和/或进入充气隔室的人员,应涵盖充气隔室中取出的使用过的 SF₆ 收回的专门培训。应严格遵守原始设备制造厂(OEM)提供的设备操作使用手册。

表 5 给出了打开和/或进入气体设备时的潜在危险、安全性措施以及要求的安全设备和工具的一览表。操作人员打开和/或进入充气隔室时,对于户内和户外条件没有给出明显的差异。

认为在敞开空气中体积比大于 19% 的 SF₆ 浓度存在窒息的潜在危险。这是因为它将氧气浓度降到了 16%(体积比),通常这是窒息的门槛值。因此,建议在接近充气隔室之前测量氧气含量。此外,如果在封闭的空间内作业,可以检查周围的氧气含量。

接近或打开充气隔室时不允许吃、喝和吸烟。为了防止潜在的刺激性或灼伤危险,推荐在工作结束后尽可能快的更换衣服和清洗皮肤。

表 5 打开和/或接近充气隔室时的安全措施

项目	包含经受正常和严重电弧的 SF ₆ 的隔室	包含未经受电弧的 SF ₆ 的隔室
潜在危险	清洁物质的蒸气 缺氧 使用过的 SF ₆ 的残留物 剩余的活性气体副产物 固体副产物和吸附剂材料	清洁物质的蒸气 缺氧 制造过程中使用过的 SF ₆ 或者其他气体的残留物
安全措施	移开固体副产物和吸附剂材料 通风 进入前测量氧气浓度 佩戴人员防护设备 防止固体副产物水解	通风 进入前测量氧气浓度
安全设备和工具	抽风机或真空吸尘器 氧气浓度测试仪 单人使用的保护套装,保护鞋袜、帽子 防酸的安全手套 全面部面罩(优选的)或者至少呼吸防护罩 护目镜 防止雨和/或风(仅户外)的环境防护	抽风机或真空吸尘器 氧气浓度测试仪

5.1.3 污染的安全设备和工具的处理

认为与固体副产物和/或吸附剂接触过的设备和工具是受污染的。它们应被收集起来并存放在塑料袋中。该塑料袋应用胶带封装并做好标签,按地方法规予以处置。

可再利用的设备和工具应予以清洗并用重量比为 10% 的苏打水进行中和,然后用干净的水漂洗。表 6 中给出了中和方案的例子。

苏打水和洗涤用水的处置应符合地方法规。

表 6 中和方案

活性剂	分子式	浓度/(kg/100 L)	T1(见注 1)/h	T2(见注 2)/h	参考文献
石灰	Ca(OH) ₂	饱和的	不适用	24	[2]
碳酸钠 (洗涤用碱)	Na ₂ CO ₃	1, 1	不适用	24	[3]
		3	清洗	不适用	[2]
		10(见注 3)	不适用	0.25	[4]
		10~14(见注 3)	1	48	[5]
		3	不适用	不适用	[6]
碳酸氢钠	NaHCO ₃	1(见注 4)	不适用	不适用	[4]
注 1: 可再用的安全设备、工具、充气隔室以及经受正常电弧的 SF₆ 的隔室中的内部零部件,如果可行,应该经过时间 T1 的中和方案来处理,然后用干净的水漂洗。 注 2: 可再用的安全设备、工具、充气隔室以及经受严重电弧的 SF₆ 的隔室中的内部零部件,如果可行,应该经过时间 T2 的中和方案来处理,然后用干净的水漂洗。 注 3: 当采用这种高浓度的碱性溶液时,应当注意避免接触皮肤、眼睛等。 注 4: 推荐用于洗涤皮肤。					

5.1.4 承压设备、工具和测量装置

和其他压缩气体一样,体积的突然膨胀会导致局部温度降低并可能冻结。在充气操作期间从事高压管路、阀门或连接器作业时应佩戴适当的手套和护目镜。

在 SF₆ 处理期间所使用的设备和工具可能包含处于高压下的液体或气体 SF₆,这些设备和工具应谨慎使用。

5.1.5 人员安全和保护设备

人员安全和保护设备的使用与 SF₆ 电力设备本身的存在无关。按照地方法规,靠近开关设备时可能要求穿戴标准的安全鞋、头盔和护目镜。

由于外部火焰或者内部电弧故障引起的 SF₆ 的异常释放,按照 5.2,进入开关设备小室时附加的安全规则适用。

根据现场工作的类型和表 5 的规定,应对从事 SF₆ 处理的工作人员提供下列人员安全和保护设备:

- 保护手套:由氯丁橡胶、PVC、橡胶制成的抗酸手套。作为对保护手套的补充,建议使用保护霜剂。
- 护目镜:符合地方法规(例如欧洲标准 EN 166^[43])的化学型工业眼镜。
- 呼吸防护面罩:可以和护目镜一起使用,呼吸防护面罩帮助防止嘴和鼻子吸入灰尘且仅用于暴露于轻度灰尘的区域。
- 全面罩防毒面具:对于在可以提供通风但副产物浓度可能超过相应的最大水平之处的短期检查和工作,推荐采用符合地方法规(例如欧洲标准 EN 140^[40]、EN 141^[41]和 EN 143^[42]分别规定了罩子、气体过滤器和微粒过滤器。按这些标准制造的 A2/B2/E2/K2/P3 型组合过滤器是适用的,并且能提供对包含颗粒直径大于 1 μm 的固态副产物的保护)的带可更换的活性炭过滤器的面罩。
- 单人使用的防护套装:可以套在正常的衣服、鞋和帽子外面的防尘套装。无口袋、带兜帽、不渗透(例如粘接的聚丙烯)易处理的工业级套装,它具有弹性的踝部和腕部套箍,以便套在鞋袜和手套上。
- 呼吸防护器:当进入发生重大泄漏的户内时,氧气浓度或者副产物的总量处于不安全的水平,根据地方法规(例如欧洲标准 EN 136^[39])应使用呼吸防护器。
- 用于长期监测环境中氧气浓度的氧气浓度测量装置。
- 户外的环境保护:打开充气隔室时,防止雨水浸入和风吹散固体副产物(如果有的话)的临时掩体。
- 真空吸尘器:高效专用真空吸尘器,它装有能捕获微米范围颗粒的过滤器和非金属开端喷嘴,符合地方法规(例如英国标准 BS 5415 及第 1 号补充:1986^[39]中的 H 型机^[44,45])。
- 抽风机:用于对封闭空间和其他不易接近地区(例如电缆沟、SF₆ 容器等等)强迫通风的设备。根据安装尺寸的不同,这些设备可以是移动的或永久性安装的。

5.1.6 设施和服务

如果充气隔室包含使用过的 SF₆ 需要抽真空或者打开,最好能为工作人员提供足够的洗涤设施和可能需要准备用于清洁的水源。

5.2 在因外部火灾和内部电弧故障而导致 SF₆ 异常释放情况下附加的安全措施

一般的安全建议采用 5.1 中给出的现场 SF₆ 作业时所采取的措施。本条款讨论在因外部火灾和内部电弧故障而导致 SF₆ 异常释放情况下附加的安全措施。

在这种条件下,允许按模块 C1 或 C2(分别见 6.2.5 和 6.2.6)经过培训的人员进入和清洁开关设备小室或者接近电力设备。表 7 给出了潜在的危险和要求作为安全措施以及设备和工具的概要。

注:消防队员可以按照地方法规进入开关设备小室。

同样的规则适用于发生排放水平较低、通风较差或者没通风的区域(例如电缆沟、检查井、排水系统)。对于户外条件,户外设备需要采用标准的措施(例如防雨、防风)。自然通风通常足以防止缺氧的潜在危险。当进入氧气浓度较低的区域时,应有专人监护、保持通话和可视联系。

表 7 附加的安全措施

项 目	经受严重电弧的 SF ₆ 的异常释放	未经受电弧或经受正常电弧的 SF ₆ 的异常释放
潜在危险	清洁物质的蒸气 缺氧 SF ₆ 的异常释放 剩余的活性气体副产物 固体副产物和吸附剂材料	清洁物质的蒸气 缺氧 SF ₆ 的异常释放
安全措施	移开固体副产物 通风 进入前测量氧气浓度 佩戴人员防护设备	通风 进入前测量氧气浓度
安全设备和工具	抽风机或真空吸尘器 氧气浓度测试仪 单人使用的保护工作服,保护鞋、帽 防酸的安全手套 全面部面罩(优选的)或者至少呼吸防护罩 和护目镜	抽风机或真空吸尘器 氧气浓度测试仪

5.3 紧急救助设备和处理

5.3.1 概述

紧急救助设备有:

- a) 包括盛有含盐溶液的洗眼设备的常用工业急救设备;
- b) 联系紧急救助的手段;
- c) 医生的指导。

一般安全规则的应用应使得事故的发生率尽可能减少,一旦发生事故,应按照 5.3.2~5.3.4 给出的方法进行救助。

5.3.2 皮肤疼痛

如果出现皮肤疼痛的征兆,人应离开现场。应脱去受污染的工作服,并且在冷的流水中洗涤受影响的部分。应遵照专业医生的建议。

5.3.3 眼睛疼痛

如果出现眼睛疼痛的征兆,人应离开现场。应立即并不停地对一只或两只眼睛进行冲洗,直到医务人员建议患者停止为止。

5.3.4 呼吸困难

受影响的人员应立即转移到新鲜的空气处。受污染的工作服应脱去,并且患者应当用毯子盖上以及保持静止和受到监护。应立即召唤紧急医疗救护,如果呼吸停止,应由经过培训的或有资质的人员进行人工呼吸。

6 培训和证书

6.1 概述

根据采用 SF₆ 的电力设备所使用的技术特征,运行的安全性和环境方面在本质上是紧密结合在一起的,因此,应该同时考虑。

下述条款针对需要进行的培训,以确保使用 SF₆ 的电力设备满足运行安全要求和环境方面的要求。

电力设备的作业涉及到的气体处理(例如开发、制造、试验、安装、交接、维护、服务和寿命终了时的拆卸)是由有资质的人员或者在有资质人员的监督下进行的。对于所涉及的人员,培训是强制性的。培训可以在不同地点(例如用户的专业的培训中心、工厂或现场设备的安装、安装设备的交接和维护)进行。

根据电力工业和设备的特征,安全性和服务的连续性非常重要。除了一般的培训模块(见 6.2.1 的模块 A),培训范围还与具体的设计(例如高压瓷柱式断路器、中压开关设备、高压绝缘开关设备)相关,不同的设计要求进行不同的资质培训。

注:完成培训后应该通过“室内”考试并由有实力的培训机构记录或者“室内”培训机构签发其他与培训模块相关的书面确认件。

无论如何,培训应基于当地法规、设备的运行使用手册、仪器仪表数据清单、国际标准、现有的技术报告和 CIGRE 手册。

6.2 培训模块

6.2.1 概述

根据 3.12 和 3.13 中给出的不同的压力系统的定义,各个培训程序和其模块的构成应根据密封压力系统进行选择,在其整个使用寿命期间维护时不要求气体处理。

从事 SF₆ 的人员应熟悉安全、法规和环境要求、气体的特性、气体的处理工具和设备以及程序来保证服务的连续性和 SF₆ 的最低排放。

模块内包含的培训目的是为了满足对电力设备上进行的工作的需要。它们是:

- 模块 A:了解;
- 模块 B1:不包含气体收回的维护;
- 模块 B2:安装和交接;
- 模块 C1:包含气体收回的维护(例如使用寿命期间的扩展);
- 模块 C2:电力设备寿命终了时的拆卸。

下述条款中更详细地描述了这些模块。

6.2.2 模块 A:了解

本模块提供了要求培训的基本水平且适用于所有涉及到的功能,尤其在:

- 管理层授信的公司职员对工艺和相关的自己的产品或第三方的人员操作气体充入设备负有责

任,而不论其是否进行 SF₆ 处理。

——所有从事 SF₆ 充入设备作业的人员,不论是否需要进行 SF₆ 处理。

不要求参加培训作为先决条件。

注:所有工作在 SF₆ 充入设备附近的人员都应知晓 5.1 中给出的一般安全规则。

培训包括下述几个方面:

——相关环境协议方面的基本知识(例如气候变化、京都协议、全球变暖,见附录 B);

——SF₆ 排放和减少的方法的环境相关性^[12];

——SF₆ 的物理、化学和环境特性(见附录 A);

——电力设备中 SF₆ 的使用;

——已有的地方法规和国际标准;

——人员安全和紧急救助(例如地方法规,在窒息、内部电弧故障情况下的急救计划和说明)(见第 5 章);

——电力设备的设计(特性、应用/功能)。

6.2.3 模块 B1:不包含气体收回的维护

该模块为需要从事下列作业的人员提供了第一个中级培训:

——现场检查 SF₆ 的质量;

——进行 SF₆ 的再充入操作。

如果要求参加此培训,需取得模块 A 的资质。作为替代,可以安排包含模块 A 和模块 B1 的组合培训课程。

培训包含下述方面:

——与任务相关的已有地方法规和国际标准;

——符合 GB/T 12022(工业级 SF₆)和 GB/T 8905(再利用的 SF₆)的 SF₆ 质量;

——与任务相关的、原始设备制造厂(OEM)提供的使用手册;

——人员安全和紧急救助(例如人员防护所需的安全设备)(见第 5 章);

——SF₆ 充气隔室的类型(见 3.10、3.11、3.12 和 3.13);

——检查 SF₆ 质量的仪器和程序(见 7.4 和 GB/T 28537—2012 的 5.2);

——封闭压力系统的再充入程序(见 GB/T 28537—2012 的 5.1);

——泄漏探测方法和维修技术;

——SF₆ 回收和再利用的类别(见 3.14、3.15、3.16、3.17、3.18、3.19、3.20 和 3.21);

——SF₆ 的储存和运输(见第 4 章);

——SF₆ 气体的监测和与当地环境规约相关的数据的记录。

6.2.4 模块 B2:安装和交接

该模块为需要从事电力设备现场安装和交接作业的人员提供了第二个中级培训。

涉及到模块 B1 证书的人员要求参加该培训。作为替代,可以安排包含模块 A、模块 B1 和模块 B2 的组合培训课程。

培训包括下述方面:

——与任务相关的已有地方法规和国际标准;

——与任务相关的、原始设备制造厂(OEM)提供的使用手册;

——人员安全和紧急救助(例如从事与任务相关的打开的充气隔室作业)(见第 5 章);

——抽真空和 SF₆ 充入程序(见 GB/T 28537—2012 的 4.2);

——续充 SF₆ 的程序(见 GB/T 28537—2012 的 4.3);

- 未经受电弧的 SF₆ 的收回和回收程序(见 GB/T 28537—2012 的 6.2)；
- 与任务相关的 SF₆ 处理设备(见第 7 章)。

6.2.5 模块 C1:包含气体收回的维护

该模块为需要从事下列作业的人员提供了第一个高级培训：

- 从事使用 SF₆ 的电力设备的维护,包括气体收回、回收和副产物的适当处理；
- 提供在电力设备运行周期内的进一步扩展。

涉及到模块 B1 证书的人员要求参加该培训。作为替代,可以安排包含模块 A、模块 B1 和模块 C1 的组合培训课程。模块 B2 可以增加为可选项。

培训包括下述方面：

- 与任务相关的已有地方法规和国际标准；
- 与任务相关的、原始设备制造厂(OEM)提供的使用手册；
- 人员安全和紧急救助(例如人员防护的安全设备、从事与任务相关的打开的充气隔室作业、副产物的中和和处理)；
- 在因火灾或者内部电弧故障引起的 SF₆ 异常释放的情况下进入开关设备小室的程序；
- 经受正常的或者严重的电弧的 SF₆ 的收回和回收程序(见 GB/T 28537—2012 的 6.2 和 6.3)；
- 与任务相关的 SF₆ 处理设备(见第 7 章)；
- 副产物和中和物的清洁程序(见 5.1.3)；
- 接触过固体副产物的安全设备和工具的处理(见 5.1.3)。

6.2.6 模块 C2:电力设备寿命终了时的拆卸

该模块为需要从事电力设备在寿命终了时拆卸作业的人员提供了第二个高级培训。

涉及到模块 C1 证书的人员要求参加该培训。作为替代,可以安排包含模块 A、模块 B1、模块 C1 和模块 C2 的组合培训课程。模块 B2 可以增加为可选项。

培训包括下述方面：

- 与任务相关的已有地方法规和国际标准；
- 与任务相关的、原始设备制造厂(OEM)提供的使用手册；
- 如果适用,将电力设备运输到拆卸现场(见 4.4)；
- 设备的解体和零部件分类(见 GB/T 28537—2012 的第 7 章)；
- 如果适用,从电力设备中收回 SF₆。采用紧密配钻系统时原始设备制造厂应给出说明。

6.3 证书

成功完成培训可获取室内证书,此处“室内”证书是指资格证书或者由于满意地完成与相关工作有关的培训课程,雇主对自己的雇员或者外部人员签发的书面确认件。理论上和/或实际上进行的考试是为了证明所获得的技能和能力。

记录应当限于：

- 确认培训内容；
- 确认人员有资质从事哪种任务和设备设计(例如 SF₆ 收回)；
- 人员资质适用的(例如模块 C1 和 C2)限定的任务(例如某种设计的 SF₆ 收回)；
- 保持较高的专业水平。

7 SF₆ 处理设备的种类

7.1 概述

本章对 SF₆ 处理设备和专用元件的技术规范、最低功能和性能判据给出了导则。

7.2 回收装置

应根据需要处理的 SF_6 的数量来选择合适的回收装置的类型和规格。图 1 给出了通用回收装置的基本功能表。标准回收装置的典型功能如下：

- 充气隔室的抽真空；
- 充气隔室中 SF_6 的充入；
- 充气隔室中 SF_6 的收回；
- SF_6 的储存和过滤；
- 利用周围空气冲洗充气隔室。

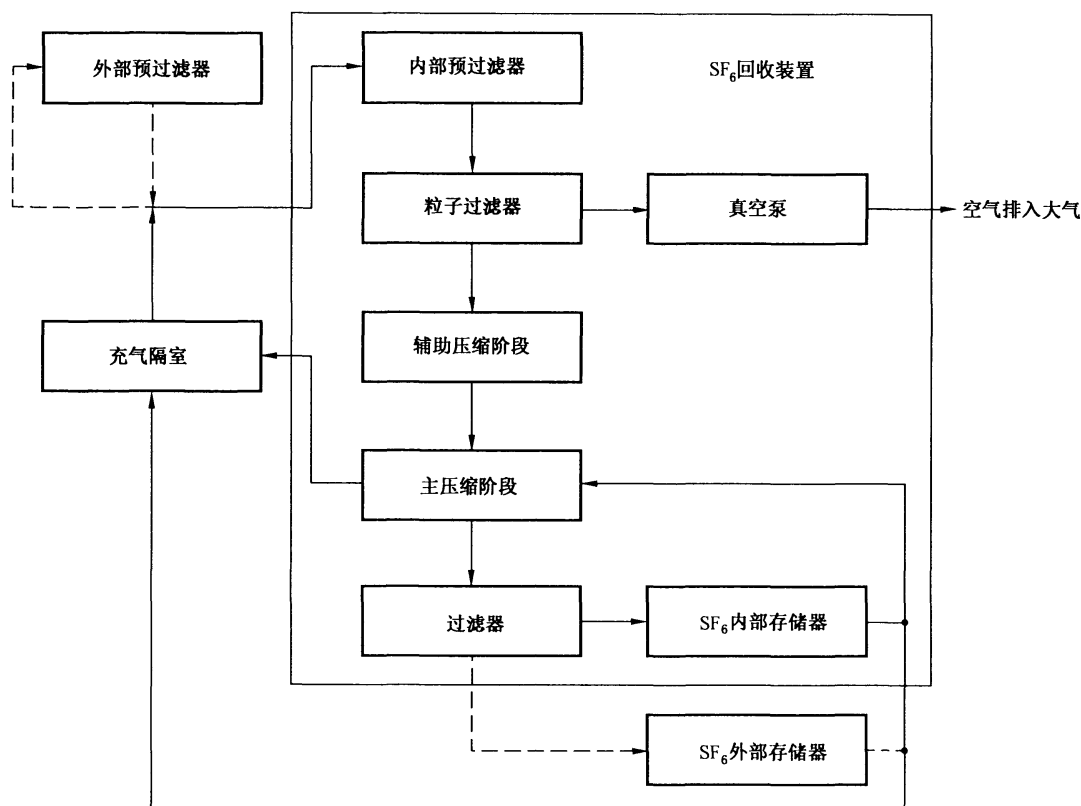


图 1 通用回收装置

7.2.1 外部和内部预过滤器

无论是外部还是内部过滤,要求使用预过滤器来收回使用过的 SF_6 。活性的气体副产物是能够损伤回收装置和储气容器的酸性化合物。预过滤单元的要求基本上和安装在通用回收装置中的过滤单元的要求一样,但是,认为预过滤单元的能力可能更高。

推荐的主要特性如下：

- 细孔直径小于 $10\ \mu\text{m}$ (低通阻)；
- 剩余水分小于 $200\ \text{ppmv}$ ；
- 剩余活性的气体副产物小于 $200\ \text{ppmv}$ ；

7.2.2 过滤器

7.2.2.1 概述

要求过滤器在气体储存之前去除活性的气体副产物,以便允许 SF_6 再利用。这些过滤器安装在回

收装置中。

表 8 给出了 SF₆ 回收期间使用的典型的过滤器类型。

表 8 SF₆ 回收期间使用的典型的过滤器类型

过滤器类型	任 务	主 要 特 性
粒子过滤器	在回收装置入口处去除固体副产物和其他粒子	细孔直径小于 1 μm
干式过滤器	去除活性气体副产物和水分	剩余水分小于 100 ppmv 剩余 SO ₂ + SOF ₂ 小于 12 ppmv 粒子保持能力
油过滤器	要求时去除油	采用活性炭的特殊过滤器

7.2.2.2 粒子过滤器

开合过程期间产生的某些副产物由细小的固体粒子组成(例如,金属粒子,固体副产物)。粒子过滤器的内侧由能够阻止大于 1 μm 粒子的纸或适当粘合而成的纤维构成。通常,粒子过滤器安装在回收装置的入口处或者出口的上游以保护回收装置以及储气容器的部件。

7.2.2.3 干式过滤器

适当的过滤器可以吸附水分和活性气体副产物。它们主要和粒子过滤器一起使用。使用了细孔直径小于 0.5 nm 的分子筛。在使用较大细孔尺寸的情况下,某些条件时可能出现导致严重的过滤器过热的热力学发热反应。

苏打(Na₂CO₃)不能用作 SF₆ 的过滤器材料,因为它和某些活性气体副产物接触后生成很难从 SF₆ 中分离出来的 CO₂。

7.2.2.4 油过滤器

如果使用了油润滑的机器或者使用 SF₆ 的电力设备包含了油绝缘的电器元件,应该在 SF₆ 罐中插入油俘获器。为了避免油的扩散,分几步实现油的去除。

7.2.3 真空泵

用于对充有不同于 SF₆ 的气体(典型为空气或氮气)的隔室、容器、样品管抽真空的真空泵以避免 SF₆ 和其他气体混合。

真空泵入口处的剩余压力应小于 100 Pa。为了加速气体隔室的抽真空,建议使用入口处剩余压力小于 10 Pa 的真空泵。

真空泵应配有压力表。真空压力表的分辨率至少应小于 1 kPa(建议值为小于 10 Pa)。通常建议不同类型的气体使用不同的真空压力表。热敏真空传感器取决于气体类型且不予以推荐,因为它们同 SF₆-蒸气以不同的方式反应而给出错误的读数。

建议采用阀门来关闭气体隔室和真空泵之间的连接。真空泵停止后阀门至少应能手动(推荐自动)关闭以避免油弥漫到充气隔室。

真空泵的容量应该与充气隔室的容积和抽真空时间相适应。连接的直径也非常重要。对于容积为 1 000 L 的充气隔室,推荐使用直径为 20 mm(或 3/4 英寸)的连接(管)。如果使用了较小直径的连接,抽真空过程就会相当长且采用更高容量的真空泵也没有效果。

7.2.4 主压缩机和辅助压缩机

如果充气隔室中的 SF₆ 压力高于储气容器中的压力,允许直接的气体扩散较为快速。在所有其他

情况下,要求压缩机回收气体。当充气隔室中的压力变化范围很大,应采用双压缩机系统:

——主压缩机,通常采用活塞型压缩机,在气体入口压力 100 kPa(典型高于 50 kPa)和储气容器压力之间工作。

——辅助压缩机,需要时串联连接,在充气隔室压力和主压缩机入口压力之间工作。

注 1: 可以使用几乎所有类型的活塞型压缩机,但是,干型的和气密密封型的优先使用以降低可能的 SF₆ 泄漏和油污染。正在研发的压缩机可以在入口处达到 100 Pa 压力。

注 2: 额定出口压力为 2.5 MPa 的压缩机足以满足以气态储存 SF₆(推荐压力 5 MPa)。可以采用附加的冷却装置加速 SF₆ 收回。

7.2.5 外部和内部气体储存器

对于使用过的 SF₆,商用压力容器或特殊储存器可以作为气体储存器。它们可以是移动的、静止的或安装在回收装置中。仅允许使用经过特殊批准的容器对使用过的 SF₆ 进行储存和/或运输。储存器的最大压力应该适合于压缩机的最终压力。应该遵守压力容器操作的地方法规。对于液态 SF₆ 储存的储存器,采用 5 MPa 的标称压力。

7.2.6 干燥器和气体储存容器加热器

如果 SF₆ 以液态储存而气态使用,当大量气体在短时间内处理时,气体储存容器就会出现结冰和霜冻。干燥器从气体储存容器接受液态 SF₆ 且设计应使得没有液体进入充气隔室。

气体储存容器加热器的设计应避免偶然过热且不超过 60 °C。

7.2.7 气体配管和管道连接

气体配管和管道连接的设计应避免泄漏和腐蚀。为此,可以采用铜、黄铜和不锈钢。配管和连接的设计应考虑到振动,从而不要求周期性的操作如连接件的再次密封。

7.2.8 控制仪表

应提供控制仪表来显示充气隔室中的气体压力、真空度、气体温度等。它们应布置在通用回收装置启动操作时能够观察到的位置。仪表的准确度和分辨率应足以保持安全操作条件。

7.2.9 安全阀

SF₆ 循环中使用的安全阀用于压力释放。应遵守地方安全法规。应使用不直接将 SF₆ 排放到大气中的安全阀。

7.3 软管连接

回收装置、气体储存容器和充气隔室之间通过软管连接。为了降低气体污染的可能性,应特别小心避免软管内存在空气和其他化合物。正因为如此,管道连接要求自密封和真空密封连接器。要求能够耐受真空和渗透的适当的管道,典型由 PTFE(聚四氟乙烯和乙烯-四氟乙烯共聚物)或弹性不锈钢制成。

7.4 气体测量的便携装置

7.4.1 概述

表 9 给出了气体测量装置(包括推荐的测量范围和最低准确度)的摘要。

比较时应考虑气体温度,参考温度为 20 °C。

气体质量测量可以在实验室和现场进行。下述条款描述了现场使用的最常用的便携式仪器用于

测量：

- 气体中的水分含量；
- SF₆ 百分比/惰性气体数量；
- 剩余活性气体副产物的数量/剩余酸含量。

但是，基于新技术的一些其他仪器在市场上可以得到且允许联合确定多个气体特性。

表 9 气体测量装置

装置	测量量	范围	最低准确度
露点仪	水分	露点：-50 ℃~0 ℃	±2 ℃
SF ₆ 百分比测量	SF ₆ 百分比；SF ₆ /N ₂ 或 SF ₆ /空气	0%~100% 体积比	±1% 体积比
活性气体副产物分析仪	副产物如 SO ₂ 油雾	1 ppmv~25 ppmv 0.16 ppmv~1.6 ppmv	全量程的 ±15%
SF ₆ 压力表	压力	0 MPa~1 MPa	±10 kPa
温度计	温度	-25 ℃~70 ℃	±1 ℃

7.4.2 露点仪

水分含量可以采用不同的测量原理和测量仪器进行测量。但是，露点仪是测量水分最常用的便携式仪器。仪器测量气体的露点，单位为℃，也可以将其转化成相对质量浓度，用 mg/kg 表示。

理想的特性为：

- 传感器能够抗油迹和腐蚀性气体；
- 采用自封阀连接的管道连接抗渗透；
- 经过校准的或能够现场校准；
- 没有 SF₆ 排放到环境中(例如小压缩机充气或使用气瓶)；
- 每次测量使用的气体小于 6 g；
- 获取读数的平均时间小于 5 min。

7.4.3 SF₆ 百分比测量装置

通过比较 SF₆ 混合气体和纯 SF₆ 的声速以及热导率来确定 SF₆ 百分比的装置。基于声速的装置较快(响应时间小于 1 min)，准确到 ±1% 体积比，不需要重新校准且气体用量最少。它们的读数为用体积百分比表示的 SF₆ 浓度。大多数对于 SF₆ 以及氮气和/或空气的混合物进行了校准。

理想的特性为：

- 没有 SF₆ 气体排放到环境中(例如小压缩机充气或使用气瓶)；
- 每次测量的气体用量小于 3 g。

通过测量非活性气体(如氧气传感器)浓度来计算 SF₆ 体积百分比的装置不宜使用，因为可能存在不同的非活性气体(如氮气和 CF₄)。

7.4.4 对 SO₂ 敏感的反应管

如果包含 SO₂ 的 SF₆ 经过反应管，反应管会改变它们的初始颜色。SO₂ 反应管也对 SOF₂ 敏感。需要从设备中取出少量 SF₆ (约 6 g)。气体样品流经反应管进行测量。用 μL/L 表示。推荐的测量范围为 0 ppmv~25 ppmv。

理想的特性为：

- 对于 SO_2 和 SOF_2 校准；
- 连接管能够耐受活性的气体副产物且使用自封阀连接；
- 没有 SF_6 气体排放到环境中(例如小压缩机充气或使用气瓶)；
- 每次测量的气体用量小于约 6 g。

不宜使用对高频敏感的反应管,因为该气体与所有金属快速反应形成金属氟化物。

7.4.5 便携式 SF_6 探测器

便携式 SF_6 探测器大概分成两类:

- a) 采用 β -粒子源电离泵出的样品的电子捕获探测器。测量电极间的电离电流。通常采用惰性气体载体。这种类型的价格较高且认为相对于类型 b) 缺乏便携性。可以达到空气中 SF_6 含量 0.1 ppmv 的灵敏度。
- b) 采用高电压(1 kV~2 kV)施加到点对板电极结构的电晕放电管。测量放电电流。这类探测器使用范围广并具有很高的便携性,电池供电单元的成本相对低。可以达到低于 10 ppmv 的灵敏度,但并不适用于所有的单元^[7]。

第一种类型的探测器通常用于泄漏示踪和定量。

第二种类型的探测器,如果足够灵敏,可以用来评估该区域是否包含 SF_6 。且对泄漏探测非常有用。

7.4.6 SF_6 探测器的报警系统

报警系统要求探测器具有非常高的长期稳定性。 SF_6 的红外吸收特性作为这种类型的大多数探测器的基础^[8]。用红外源加热差分压力测量装置(采用灵敏的电容传感器)中的样气,测量压力升高。

可以达到 10 ppmv 的灵敏度。可以加入自校准装置。在某些装置中,空气样品从各个点传到中心探测器。活跃的探测点可以自动或人工选择。

包含探测器的 SF_6 报警系统通常仅用于户内设备中包含非常大体积 SF_6 的场合,例如在高压 GIS 设施中。

7.5 气体样品的气瓶

推荐容积小于 1 L 的不锈钢气瓶。气体数量不应小于 6 g。应采用适当的连接器从容器(例如充气隔室,回收装置的储气容器)中直接获取气体。如果气体容器中的压力超过气瓶的最大允许压力,就应该使用压力调节装置和压力表。

附 录 A
(资料性附录)
六氟化硫

A.1 简介

六氟化硫(SF₆)是由 6 个氟原子聚集在处于中心位置的硫原子周围形成的合成气体。硫和氟之间的化学键是已知的最稳定的原子链之一。6 个氟原子使得分子具有非常高的化学和热稳定性。

SF₆ 具有强的电负性(即倾向于吸引自由电子)。它具有独特的物理特性组合:高的介电强度(大约是空气的 3 倍)、高的热阻断能力(大约是空气的 10 倍)以及高的热传导性能(大约是空气的两倍)。

正因为如此,自从 20 世纪 60 年代初期,SF₆ 就成功应用于高压输配电领域的电力设备工业(例如高压和中压开关设备、气体绝缘变电站、环网供电单元、断路器、变压器和电缆)。

其他非电工领域的应用包括:铝制造、铸镁、半导体制造、平板屏幕的制造、核燃料循环、隔噪窗户、轮胎、高性能雷达、气象测量和电厂管道的示踪气体以及军事应用。

A.2 化学特性

纯 SF₆ 无色、无气味、无毒、不可燃、非常稳定且惰性。它在水中的溶解率低于空气的 4 倍。在温度 180 ℃ 以下,它与电气结构中所用的材料的兼容性类似于氮气。

表 A.1 列出了 SF₆ 的主要化学特性。

表 A.1 SF₆ 的主要化学特性^[9]

分子式	SF ₆
CAS 序号	2551-62-4
摩尔质量	146.05 g/mol
硫含量	21.95%
氟含量	78.05%
分子结构	在 6 个棱角上带有氟原子的八面体
键	共价的
碰撞距离	0.477 nm
石英容器中的分解温度	500 ℃

A.3 物理特性

SF₆ 是所知的最重的气体之一:在通常条件下,它大约是空气重的 5 倍。

通过对流和扩散,SF₆ 与空气混合是缓慢的,但一经混合,它就不再分离。

虽然 SF₆ 的热导率比空气低,但由于其黏度较低和密度较高,总的热传输特性要好于空气 2~5 倍。在电力设备中,SF₆ 的通常压力范围是在 0.1 MPa 和 0.9 MPa 绝对压力之间。此气体的压力/温

度/密度特性如图 A. 1 所示。

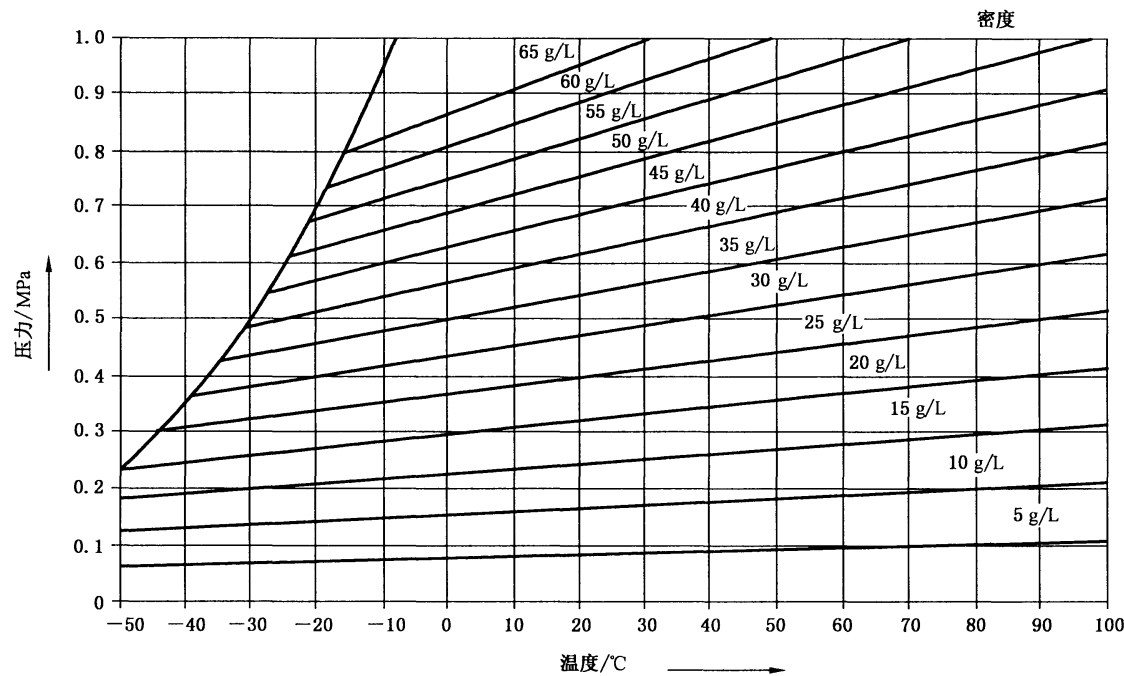


图 A. 1 SF₆ 的压力/温度/密度特性^[9]

表 A. 2 列出了 SF₆ 的主要物理特性。

表 A. 2 SF₆ 的主要物理特性^[9]

在 20 ℃、100 kPa 下的密度	6.07 kg/m ³
在 25 ℃、100 kPa 下的热导率	0.013 W/(m · K)
临界温度	45.58 ℃
临界压力	3.759 MPa
临界密度	740 kg/m ³
20 ℃时水中的溶解率	6.31 cm ³ SF ₆ /kg H ₂ O
在 0 ℃、100 kPa 下声速	129.06 m/s
折射率	1.000 783
生成热	(-1 221.58±1.0) kJ/mol
反应熵	-349.01 J/(mol · K)
在 20 ℃、100 kPa 下定压比热	96.6 J/(mol · K)
状态方程	见图 A. 1

A. 4 电气特性^[11]

SF₆ 的优良的绝缘特性是缘于其分子强的电负性。它具有粘附自由电子构成移动性较低的强离子的明显趋向,这就使电子崩的发展非常困难。

SF₆ 的电气强度约是相同条件下空气电气强度的 3 倍。

因为 SF₆ 的离解温度低而离解能量大,所以 SF₆ 是一种优良的灭弧介质。

当电弧在 SF₆ 中冷却时,到相对较低的温度它仍是导电的,因而在电流过零之前使截断电流最小并由此避免了高的过电压。

表 A.3 列出了 SF₆ 的主要电气特性。

表 A.3 SF₆ 的主要电气特性^[9]

相对于压力的临界击穿场强	89 V/(m · Pa)
在 25 ℃ 和 0.1 MPa 绝对压力下的相对介电常数	1.002 04
在 25 ℃ 和 0.1 MPa 绝对压力下的损耗因数(tanδ)	<2.0×10 ⁻⁷
有效电离系数	$\frac{\alpha}{p} = A \frac{E}{p} - B$ $\alpha: \text{m}^{-1}$ $E: \text{V/m}$ $p: \text{Pa}$ $A: 2.8 \times 10^{-2} / \text{V}$ $B: 89 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{Pa})$

A.5 处理、危害和健康特性

SF₆ 不支持燃烧。因为该气体比空气重很多,在与空气不充分混合的条件下具有往低处聚集的倾向。低于地平面的区域、通风差或没有通风的区域(例如电缆槽、电缆沟、检查沟、排水系统)可能充满 SF₆。人员应知晓此类区域中的呼吸危险。包含 SF₆ 的设备不宜进入没有充分通风且人员没有防护器具的区域。

纯 SF₆ 是无毒的和在生物学上是不活泼的。按照美国政府工业健康联合会(ACGIH),用时间权重平均值(TWA)表示的门槛限值(TLV)为 1 000 ppmv(6 100 mg/m³)。该值适用于人员每天工作 8 h 每周工作 5 天的场合^[10]。该 TLV 适用于大气中不存在的所有无害气体。

SF₆ 不会危及生命和生态,但是,却是潜在的和持久的温室气体,如附录 B 所描述的。

因此,处理 SF₆ 时有必要采用保持气体处于封闭循环内的程序,以避免向大气中任何有意的释放。

按照 GB/T 12022,工业级 SF₆ 可作商用。

按照 GB/T 8905,使用过的 SF₆ 可以在现场再利用。

按照气体制造厂给出的技术规范,使用过的 SF₆ 可以在气体制造厂再利用。在气体不符合技术规范的情况下,应按照关于废品管理的地方和国际法规处置。

附 录 B
(资料性附录)
SF₆ 的环境影响

B.1 引言

每个人的活动对环境都有影响,特定活动的影响取决于它的规模和涉及的材料。生产或使用气体的活动都可能引起向大气的排放。考虑了3个主要方面:

- 生态毒物学:毒性材料和影响环境的气体以及生活的所有形式;
- 臭氧减少:同温臭氧层中的孔洞增大;
- 全球变暖、气候变化:增加温室效应。

B.2 生态毒物学

SF₆是无毒的且没有报告表明其具有剧烈的或长期的生态毒性。由于其在水中的溶解率非常低,因此,对地表水和地下水以及土壤没有危害,不会出现营养循环中的生物聚集。因此,SF₆不会伤害生态系统。SF₆:

- 不是致癌物:不会引起癌症;
- 不是致变物:不会伤害基因组织;
- 不会硝化:不会富化食物链;
- 低溶于水。

B.3 臭氧减少

电力设备中应用的 SF₆ 及其副产物不会损坏同温臭氧层,因为它们不包含氯和溴。

B.4 全球变暖和气候变化(温室效应)

地球的平均全球温度,是在太阳辐射的加热作用和地球辐射的红外线相关的冷却之间平衡的结果。某些红外线辐射反射到地球表面且发生温室效应是自然现象,因此造就了地球上的生命。

这是由于自然的温室气体(主要包括水分、碳氧化物和沼气)对于来自太阳的射线是透明的,而又能够吸收了地球反射的红外线。

没有温室气体,来自太阳的热量将反射回太空且地球的温度会更低。

温室气体会捕捉一些大气中的太阳能量。和不存在温室气体相比导致星球的平均温度较高。科学评估计算出最多可提高 33 °C (从 -18 °C 到实际的 15 °C)^[11]。

今天,自然现象占绝对主导作用且人类的活动对总的温室效应的贡献很小。但是,随着人类活动的增长,这就成为今天的主要问题。根据几项研究,如果不可逆,实际的趋势将导致地球平均温度的大幅提高,将改变全球气候。

人造的和自然的温室气体都是温室效应形成的因素。京都议定书^[13]是控制人为温室气体排放的国际协议。

按照京都议定书,温室气体由碳氧化物(CO₂)、沼气(CH₄)、氮氧化物(NO₂)、氢氟化碳(HFC)过氟

化碳(PFC)以及六氟化硫(SF₆)组成。后三种物质是氟化的温室气体(或F-气体)。

相对于环境,不同气体的浓度以及它们在京都议定书中的规定由几个科学团体定期监测。特别是气候变化的国际政府委员会(IPCC)定期起草评估报告,更新已有的排放信息并根据排放趋势的不同评估它们对环境未来潜在的影响。最新出版的是2007年的第四次评估报告(AR4)^[11]。

IPCC由世界气象组织(WMO)和联合国环境程序(UNEP)于1988年成立。已知F-气体和CO₂相比由于其更高的全球变暖影响能力,是全球变暖影响的主要因素,对总体温室气体效应的促成作用占到1.5%。根据第三次评估报告,SF₆强烈的红外吸收能力和环境中的长寿命是其具有很高的全球变暖潜力(GWP)的原因,高于CO₂的22 200倍。GWP是在100年周期内,1 kg气体相对于1 kg二氧化碳的变暖潜力。对于所有应用其对温室气体效应的总体促成作用总和达到大约0.2%。

但是,单独SF₆的GWP不足以测量基于SF₆技术的电力设备对环境的影响。应使用ISO规定的寿命周期评估法——LCA法^[14],来估算和/或比较任一特定应用对环境的影响。

电力工业使用的SF₆在一个封闭的循环内,如气体绝缘变电站(GIS)、中压和高压气体断路器(GCB)、高压气体绝缘线路(GIL)、气体绝缘电压互感器(GVT)。在亚洲,大量的SF₆用于气体绝缘电力变压器(GIT)。

尽管电力工业被报为世界范围内最重要的SF₆使用者,但电力工业是全球SF₆排放的较小促成因素,远低于其他行业或气体“开放使用”的用户。但是,其作为排放源的重要性地区差别和国家差别很大,取决于采用的SF₆处理程序、电力设备的密封性以及电力设备中的气体总量。

目前,地区平均排放率在远低于1%到大于10%之间变化。总体来说,从1995年起,排放率大幅降低。在欧洲^[15]、亚洲^[16]以及北美洲^[17,18],行业行为的目标是降低排放50%~90%。这些行为包括:

- 设计SF₆用量更少的设备和更高等级的密封性;
- 根据现有的标准改进全寿命周期阶段的处理工艺和处理设备。

B.5 副产物

40年的经验记录表明引起气体排放的重大失误极少。在这种极端情况下的排放量受到产品的标准设计为隔离化并将故障限制到其发生点的极大制约。涉及的气体量是整个变电站的非常小的一部分。

附录C说明副产物可以毫无困难地转化成自然界中的中性物质。它们的处理和处置程序保证了它们对环境的影响可以忽略。

B.6 SF₆的环境兼容政策

SF₆应在一个封闭循环内处理,以避免任何无意的向环境的排放。在所有的倡导中,气体收回和再利用具有最高的优先权。

涉及制造厂和用户在某些国家已经签署的自愿者协议^[19]的目标是控制和降低电力设备中SF₆的排放。总的来说,在该协议中,环境兼容政策提及使用SF₆的电力设备的开发、制造、安装、运行、维护和寿命终了的处理,采用先进的技术和程序使SF₆的排放最少。

附 录 C

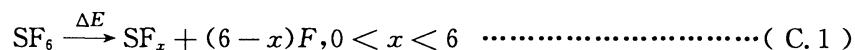
(资料性附录)

SF₆ 副产物

C.1 SF₆ 的分解

C.1.1 概述

当 SF₆ 中由于正常开合操作、开断故障或者在不大可能的内部燃弧故障情况下出现燃弧时,将同时产生不同数量的各种 SF₆ 分解物^[5,9]。当 SF₆ 分子受温度作用时,会出现氟原子辐射或放出电荷和分离,随着激发类型和能量输入的不同,按照式(C.1)产生了大量的原子团、离子或中性分子:



当能量 ΔE 的输入终止时,大多数原子重新复合形成 SF₆,而其他同装置中的不同物质化合构成各种稳定的最终产物。这些物质包括,特别是氧和水,还有在设备结构中使用的材料。

认为这些副产物与供给 SF₆ 的能量有关。

C.1.2 电弧中 SF₆ 的性能

大电流燃弧通常出现在断路器的开合和故障开断的操作期间以及异常的内部电弧故障期间。

从 500 °C 起,SF₆ 气体开始分解成其构成部分,其分解程度正比于转换能量的大小。在式(C.1)规定的离解过程中,SF₆ 分子约在 3 000 °C 下分裂成硫和氟原子。

在此过程期间所吸收的大量的热是依靠对流和扩散从弧区散发出来的。温度低于约 1 000 °C 时,这些原子重新复合或同其他物质(例如汽化的电极金属、罐壁、塑料或杂质)起化学反应。包括金属氟化物和硫化氟在内的气态和固态副产物皆可能产生,其中最重要的是 CuF₂、AlF₃、WF₆、CF₄ 和 SF₄。

这些通常称为原始副产物的产物是在小于 1 s 范围内的放电期间或之后很短时间内生成的。正常操作期间可能出现在绝缘子表面像灰尘样的沉积物对其绝缘性能没有不利的影响。

某些副产物化学上是稳定的;而另一些非常不稳定,特别是当存在水时。

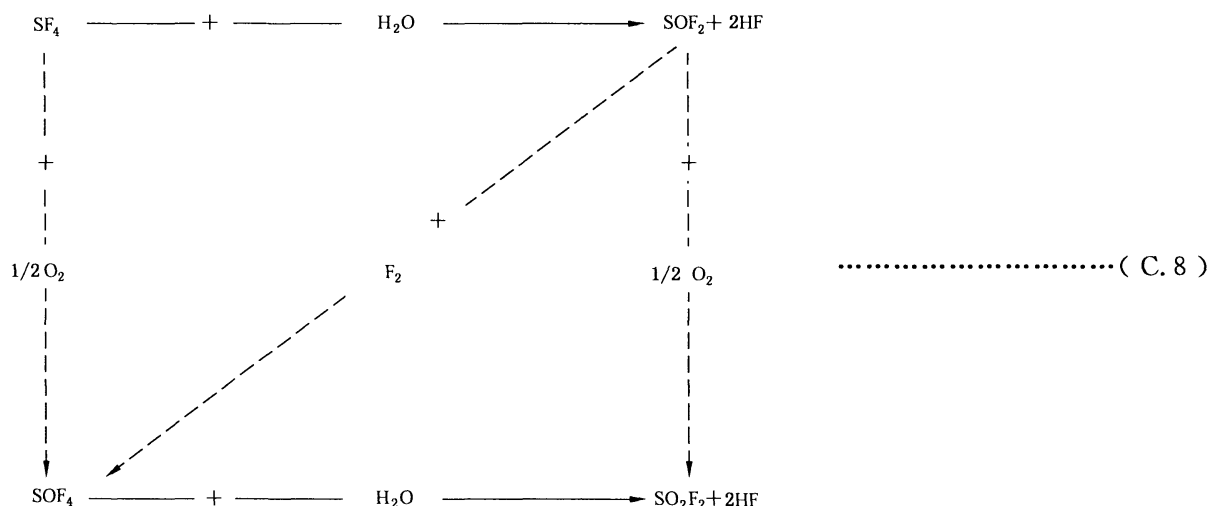
存在氧时,可生成下述副产物:



反应式(C.2)、式(C.3)、式(C.4)和式(C.5)中包含的氧通过抽真空程序可能有遗留,或者,燃弧期间可能从电极材料中释放出来。SOF₂ 是主要副产物。

当存在水蒸气时,发生下列反应:





式(C. 8)中的虚线表示,在电弧中 SF_6 分解期间这些反应仅是有限度地发生。虽然式(C. 8)中反应意味着生成大量的 HF,但是,在电力设备中燃弧之后,没有报告说明这一产物的数量很大,这可能是因为副产物的生成主要是按照式(C. 2)、式(C. 3)和式(C. 4),也可能是,由式(C. 8)的反应生成的 HF 进一步同金属蒸气发生反应而产生了金属氟化物。

大量产生的 SF_4 , 在潮气中迅速地发生水解, 见式(C. 8)。

在继续存在水的情况下,会发生进一步水解,导致:



在文献中还报导了其他反应,可能生成附加的燃弧副产物例如 S_2F_{10} 。但是,在燃弧条件下生成的 S_2F_{10} 的数量是极少的,因为在高温下产生的 SF_5 原子团,只有当非常迅速地冷却时才生成 S_2F_{10} ,在电弧中这一条件不可能适用^[20]。

C.1.3 小电流放电时 SF₆ 的分解物

当运行的电压施加到含有 SF_6 的设备上时,就不可能排除小电流放电(例如电晕、火花和局部放电)的可能性。然而,由这一放电产生的副产物的浓度可能非常低。当 SF_6 在火花放电中分解时,式(8)中以虚线表示的反应将占优势^[20]。

C. 1.4 SF₆ 的催化分解(高温性能)

SF_6 能在石英容器中加热到 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 而不分解。温度小于 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时,所有常用的材料,例如金属、玻璃、陶瓷、橡胶和聚酯树脂,都是抗 SF_6 的。仅仅是在高于 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下,某些金属才开始对 SF_6 有分解作用,但是在常用的金属和合金的情况下,温度范围达到 $400\text{ }^\circ\text{C}\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 的之前的任何温度,都观察不到这一作用^[9]。

因为在不发生燃弧的情况下,电力设备内的最高运行温度远远低于这些值,所以,认为在运行期间此类 SF_6 分解是不可能出现的。

C.2 SF₆ 及其副产物的腐蚀性能

SF_6 是一种完全不发生反应的气体。所以,不存在由 SF_6 本身直接引起腐蚀的可能性。但是, SF_6 的初始和二次副产物,依据同潮气接触的情况,可能生成腐蚀性的电解质而对用在设备内部的某些材料可能引起损害。

常用的金属,例如铝、钢、铜和黄铜几乎不受侵蚀,然而,根据有关的腐蚀物质浓度的不同,某些材料,例如玻璃、瓷、绝缘纸和类似的材料是比较易受损的。其他绝缘材料,例如环氧树脂、聚酯、聚乙烯、氧化聚乙烯、聚四氟乙烯、聚氯乙烯等等,所受的影响不大。

重要的是,考虑到副产物的腐蚀特性,设计时一定要采取措施。可以通过彻底地排除潮气和采用合适的材料以防止腐蚀。

C.3 清除 SF_6 副产物的措施

运行中设备内的潮气和 SF_6 副产物可以用吸附剂降低到可接受的水平。为此目的,可采用氧化铝、分子筛或它们的混合物。它们吸收气态活性副产物非常有效且实际上不可逆,同时保证此气体保持在低的露点^[9]。

处理从设备中取出的副产物是容易做到的。酸性成分(硫酸和氟化氢)可利用碱性化合物来降低。

大多数固态的活性产物是不溶于水的,或者难于溶解,但是某些金属氟化物能同水起反应生成氢氟酸。所以,必须用氢氧化钙(石灰)去处理固态的活性产物,例如中和酸性成分。然后,最后的残渣可以按照地方法规处理。

C.4 SF_6 副产物的生理特性

SF_6 副产物能对皮肤、眼睛和黏膜(例如呼吸系统中的)产生刺激,并且暴露在高浓度下经过足够的时间后,可能发生肺水肿。

含有副产物的 SF_6 有一种使人讨厌的刺鼻气味,此气味本身带有刺激性的作用。嗅觉的界限值(特别是对 SOF_2 、 SO_2 和 HF)和 TLV 是同一数量级。由于这些特性,即使少量的气态副产物也可以在可能发生任何中毒危险之前,在以秒计的时间内发出明显无误的警告指示^[6]。

附录 D

(资料性附录)

SF₆ 副产物对健康的潜在影响

D.1 引言

本附录讨论由泄漏和在内部故障情况下而使 SF₆ 偶然释放到当地大气中所引起的对健康的危害。

正常运行期间, SF₆ 气体保持在电力设备之内, 并且生成的副产物除了被自然复合过程中和以外, 还被分子筛中和。由于泄漏, 或者如果气体外壳丧失包含气体的能力(例如在很难发生的内部故障情况下), 则 SF₆ 可能出现在大气中。在评价对健康的危害时, 必须明确地区分泄漏条件和导致 SF₆ 突然释放的内部故障情况。

在泄漏的情况下, 必须考虑受 SF₆ 气态副产物长期作用的影响。在空气中这些产物的浓度应保持很低, 满足在正常工作期间(例如 8 h)对未加保护的工作人员不构成威胁。

在由于内部故障引起的 SF₆ 突然释放的情况下, 强制性的排气和通风程序意味着作用是暂时的。如果作用时间大大减少的话, 分解物的浓度可能允许比例如 8 h 期间允许的水平更高。显然, 在此情况下, 应当考虑所有可能的毒性释放源, 并且这要求全部生成物的详细知识。在这方面, 完整的处理应考虑到金属蒸气、烧过的塑料、电缆的绝缘、油漆等等的作用, 它们与 SF₆ 所起的作用相同。

注: 例如, 以长期作用的极限值比较, 由电极汽化产生的铜烟雾的毒性, 大约是电弧分解的 SF₆ (SOF₂) 毒性的 4 倍, 而铝烟雾略低于 4 倍。在产生电弧的任何场合, 不管采用什么绝缘介质, 两者都可能大量地产生, 而且可能构成对健康的主要危害(见 D.4.8.3)。塑料燃烧产生的烟雾的作用(见 D.4.8.4)也是非常重要的。

本附录的首要目的是拟定基本指导方针, 用来估计释放有 SF₆ 的环境中毒性副产物在空气中的浓度。也考虑了在故障条件下释放的其他有潜在毒性的物质的影响。

下面各条款给出了计算与泄漏和内部故障导致大气中存在副产物相关的风险以及进行计算所采用的原理。

D.2 综述

为了计算由于泄漏和内部故障而在大气中存在副产物所引起的危害, 提出了许多方法。下面条款中提出了进行计算所采用的原理。

D.3 SF₆ 副产物的生成和对健康的影响D.3.1 SF₆ 副产物的生成

在 SF₆ 中大功率燃弧期间, 弧柱达到的温度为 10 000 K 数量级。在该温度下, 气体的分子完全分裂成其原来的原子——硫和氟(见 C.1.2)。存在的任何杂质, 例如空气或水蒸气, 也以类似的方式分解。这样的结果是一个仅含有 S、F、H、N、O 的单原子和各种离子的局部区域。弧根对电极的加热增加了进入该局部区域的铜、钨、石墨和/或铝的蒸气。

在电弧熄灭以后或者在开始冷却的区域, 这些原子开始重新结合在一起且主要形成 SF₆。但是, 随着杂质特别是水和氧的存在, 发生了化学反应, 增加了所谓的电弧副产物(见附录 B)。生成的数量同放电的能量直接有关。

大多数经常遇到的副产物是: SOF₂、SO₂、HF 以及还有 CF₄、SF₄ 和 SO₂F₂^[21]。只有这些副产物进

入当地的大气,它们的存在才有重要意义。它们在电力设备中的浓度没有直接意义,特别是由于吸附剂(例如分子筛)的存在将有助于气体的净化。

有一段时间曾经担心,高毒性的气态副产物 S_2F_{10} 可能构成其中曾发生燃弧的 SF_6 的毒性主要来源。但是,之后的经验表明,这一看法没有得到证实^[22]。事实上,现在看来,在燃弧期间生成的 S_2F_{10} 数量很少,以致于对 SF_6 总毒性的影响可以忽略。

现在也认识到 S_2F_{10} 是 SF_6 在低能量条件下放电生成的,并且在这些情况下, S_2F_{10} 的产生率比燃弧期间更高^[23]。这一化合物的浓度直到目前还难以检测,而其剧毒性已促使投入相当多的资金用于进行有关其存在的潜在危险的研究^[20]。但是,潮气存在时,在温度超过 200 °C 的情况下和在环境温度下随着催化壁面的分解, S_2F_{10} 将逐渐减少^[23]。最后一个机理非常有效,它可使在设备中产生的 S_2F_{10} 减少到可忽略不计的数值^[24]。

D.3.2 SF_6 副产物对健康的影响

D.3.2.1 概述

如果已受到燃弧或低能量放电作用的 SF_6 排放到工作场所,那么,潜在的健康危害取决于空气中每一副产物的浓度,并因而取决于电力设备所在房间的容积。估计毒性时,应当考虑在相应的作用时间内、各项允许浓度内存在的每一成分的浓度。

D.3.2.2 电弧分解的 SF_6 对健康的影响

对于多成分混合物,毒理学规定了 3 种一般情况:

- 每一成分以不同方式、或对不同目标的器官起作用;因而效果是不累加的,并且每一成分分别处理;
- 许多成分以类似的方式对同一目标器官起作用;因而它们的效果是累加的,并且计算时应对此加以考虑;
- 一种成分的作用大大地超过其他成分的作用;整体的毒性影响可以通过单独研究这一成分的浓度进行估计。

通过对过去几十年来在 SF_6 的大功率电弧分解方面所进行的大多数工作的调查^[21,25],可以得出下列结论:电弧分解的 SF_6 的毒性起初是一种特殊化合物——氟化亚硫酸酐 SOF_2 气体占优势。

此结论证明了下面的做法是正确的:由电弧分解的 SF_6 引起的对工作人员的全部健康危害,应当利用所产生的 SOF_2 浓度进行估计。

本标准中,副产物 SOF_2 被用作电弧分解的 SF_6 全部毒性效应的指示物。这可使在各种情况下的健康危害连同安全程序的意义一起进行估计。

存在高浓度的水蒸气时,可能发生 SOF_2 的水解,生成 SO_2 和 HF (见 C.1.2)。如果忽略这样的事实,即由于 HF 的反应作用很强,它不大可能长期保持在大气中,则如 D.4.6.2 中所详述的,受这种混合物作用的危害将稍微高于 SOF_2 的危害。当估计由于泄漏引起的危害时,这一点应考虑到,即无论是设备之内,还是在大气中,都可有足够的时间去发生水解反应。对于内部故障的情况,在故障和随后的通风和修理工作之间的时间较短,可以忽略 SOF_2 的水解。

D.3.2.3 低能量放电分解的 SF_6 对健康的影响

在低能量放电期间,可能会生成少量的副产物 S_2F_{10} 。 S_2F_{10} 是已知的、最具毒性的 SF_6 副产物;由于这一原因,在估计由于从高压设备中泄漏引起的危害时,它也应被考虑。在已被低能量放电分解的 SF_6 中,其他副产物,例如 SOF_2 、 SO_2 和 HF ,所产生的毒性是可以忽略的,所以,对这些产物不予考虑。

D.3.2.4 作用的持续时间和在空气中的稀释

对于有毒物质引起的对健康的危害的任何估计来说都是必不可少的两个关键概念是：

- a) 向周围容积的稀释；
- b) 作用的持续时间。

所以要求第一个概念是为了有可能使得从电力设备内生成的副产物浓度变换成工作场所大气中的浓度水平(见注)。

注：例如，在 1 L 试验容器中生成的刚好可发出警报的副产物浓度 1 000 ppmv，当释放到 3 m×3 m×2.5 m 房间中时，浓度将会降到一个很低的值 0.04 ppmv。

第二个概念适用于确定正常条件(基本泄漏)或异常条件(内部故障)下估计潜在的健康危害的方法。

在正常条件下，应当采用 TLV(界限值)浓度(见 D.8.2)。这就保证了在充 SF₆ 的电力设备附近整天作业的人员的安全。

在异常条件下，例如内部电弧故障下，人员在几分钟之内离开了电力设备所在的房间，因而作用是短时的。对于这类作用，可以允许远高于 TLV 的限值(见 D.4.3)。

D.4 副产物浓度的计算

D.4.1 概述

下列内容提供了对各种类型的设施，在设备所在的房间内大气中气态 SF₆ 副产物浓度的计算方法和结果。同时估计了在内部故障期间出现的其他危害源(例如烟尘、烟雾和蒸气)的作用。

对于泄漏的情况，考虑了在 24 h 期间泄漏的 SOF₂ 和 S₂F₁₀ 的数量。假定没有气体从设备所处的房间中排出，考虑了 SOF₂ 的水解效应。

对于内部故障情况，认为生成的全部 SOF₂ 迅速地散发到周围大气中，并且认为在所关心的时间内是稳定的。

对于电力设备(特别是可控的和/或封闭的压力系统)维修的情况，在 GB/T 28537—2012 中给出了导则。在这一情况下，打开电力设备之前，工作程序要求收回全部的 SF₆。

D.4.2 计算准则

无论是泄漏，还是内部故障，在整个处理期间都采用了下列准则：

- a) 假定设备室是完全封闭的，并且假定在所关心的期间内未进行通风；
- b) 假定在所关心的期间，装在电力设备内的电弧副产物的吸附剂是不起作用的；
- c) 假定在相对于工作日或作用持续时间来说较短的时间内，电力设备内放出的气体同室内空气均匀地混合。

D.4.3 危害估计

D.4.3.1 泄漏情况

实例计算的结果给出了在电力设备室内空气中 SOF₂(见 D.4.6)和 S₂F₁₀(见 D.4.7)的浓度 C。每个 C 值应当同全天工作的允许浓度(TLV)(见 D.8.2)相比较。每一计算的最终结果用比率 C/TLV 表示；为了没有显著的危害和允许全天工作，此值必须小于 1。

对于 SOF₂ 水解的情况(见 D.4.6.2)，应计算 SO₂ 和 HF 的浓度。认为 HF 和 SO₂ 对人体组织有累积影响，并且对于这样的多成分混合物，单个浓度对 TLV 的比率之和 R_{tot} 应不超过 1。

$$R_{\text{tot}} = \text{SO}_2 \text{ 浓度} / \text{TLV}(\text{SO}_2) + \text{HF 浓度} / \text{TLV}(\text{HF}) \leq 1$$

注：这是一个谨慎的假定，它使得每一成分的最大允许浓度低于其 TLV。采用此值是为了保持接近最坏的情况。表 D.1 中给出了所关心的四种化合物 SOF_2 、 SO_2 、HF 和 S_2F_{10} 的 TLV^[10]。

表 D.1 SOF_2 、 SO_2 、HF 和 S_2F_{10} 的 TLV

	SOF_2	SO_2	HF	S_2F_{10}
TLV/ppmv	1.6	2	3	0.01

D.4.3.2 内部故障情况

对于这些异常情况，所有的 SF_6 是在短时间内释放的，所以 SOF_2 的浓度远高于泄漏情况。标准程序规定对设备室应进行排气和通风。所以，受电弧分解后的 SF_6 的作用是短时的。由于这一原因，将计算的 SOF_2 浓度同 TLV 进行比较不再是合适的（见 D.8.2）。

一般说来，IDLH（对生命或健康出现立即危险）值提供了短时作用的导则（见 D.8.3）。然而，至今还没有发布针对 SOF_2 的 IDLH 值。所以，为了获得关于非重复短时作用的参考值（ C_m ），有必要借助于毒物学数据的结果。

$$C_m = 500 \text{ ppmv}$$

注：已有试验动物受含有 SOF_2 的大气作用的毒物学数据^[26,27]，这些数据包括 3 种不同的哺乳动物受浓度直到几千 ppmv 的 SOF_2 作用 1 h 的影响。结果表明，承受浓度直到 100 ppmv（大、小鼠）以及 500 ppmv（家兔）的作用，在作用期以后 24 h，所有的动物都表现出正常的一般状态。

将算得的 SOF_2 浓度和 C_m 比较，可以估计在内部故障期间或以后副产物对健康的危害。为了估计危害和评价安全程序，还应考虑可能更重要的其他因素（见 D.4.8.3 和 D.4.8.4）。

对于人的作用，由于较大的生物体通常对毒剂不敏感，可能忍受高于 500 ppmv 的浓度 1 h。因此，可以推想，为了和计算的浓度比较，采用短时作用的极限值 C_m 为 500 ppmv 作为参考值是可以接受的。

D.4.4 内部故障情况的计算限值

D.4.4.1 非常小的房间容积

在这些情况下，例如中压/低压变电站的内部故障，主要的健康危害不是由电弧副产物引起的。电弧本身、热气浪、烟尘、由燃烧的油漆、塑料或金属蒸气产生的烟雾以及最后的冲击波，可能构成主要的危害（见 D.4.8.3 和 D.4.8.4）。

因此，外推到房间容积远小于 50 m^3 ，可能不是一个作为估计健康危害的有效方法。虽然如此，还是包含了一个采用房间容积小于 50 m^3 的实例计算以估计 SOF_2 对总毒性的影响。

D.4.4.2 非常长的燃弧时间

对于所有的内部故障计算，假定电弧的环境是不变的，它导致在 100 ms 的燃弧时间期间 SOF_2 的产生率不变（见 D.7.3.2）。正如下面所解释的，对于燃弧时间大于 100 ms，不变的产生率肯定是无效的。

D.4.4.2.1 中压和高压断路器以及环网供电单元(RMU)中的内部故障

在这些情况下，释放阀将迅速打开隔开大气的充气隔室。电弧产生的压力升高力图在几分之一秒内将大部分 SF_6 排出，但电弧仍然主要在由电极汽化而生成的金属蒸气中燃烧。显然，仅仅是总电弧能量的一部分用于 SF_6 副产物的生成。所以，为了能够外推到 100 ms 以上，还需进行试验。

D.4.4.2.2 气体绝缘开关设备(高压 GIS)中的内部故障

在这些情况下,生成了大量的金属蒸气,并且在 SF_6 和铝电极之间发生放热反应。燃弧环境将极大地改变,因此,没有理由采用不变的副产物产生率。

D.4.5 研究的情况

已研究过的有代表性的情况如下:

- 3 次连续开断 31.5 kA 三相故障电流后中压断路器的泄漏(见 GB 1984,试验方式 T100)。
- 3 次连续开断 31.5 kA 三相故障电流后高压断路器的泄漏(见 GB 1984,试验方式 T100)。
- 经过 30 年出现过局部放电的高电压充气隔室的泄漏。
- 经过 30 年出现过电晕放电的高电压充气隔室的泄漏。
- 在 30 年期间,每年出现 200 次火花的高压负荷隔离开关的泄漏。
- 40 kA、245 kV GIS 母线中导致压力释放或烧穿的内部故障(单相故障)。
- 在 31.5 kA、145 kV GIS 母线中导致压力释放或烧穿的内部故障(包括两个相间电弧的故障)。
- 在 25 kA、中压 GIS 开关柜中导致压力释放或烧穿的内部故障(单相故障)。
- 在 25 kA、中压断路器中导致压力释放的内部故障(单相故障)。
- 在 16 kA 中压环网供电单元中导致压力释放的内部故障(包括两个相间电弧的故障)。

D.4.6 断路器泄漏出的 SOF_2 浓度的确定

D.4.6.1 概述

这里仅考虑断路器的泄漏,这是因为断路器中 SF_6 的分解程度高于其他类型的设备。

电力设备室内参考气态分解物 SOF_2 浓度的计算是针对刚刚连续 3 次开断三相故障电流(如 GB 1984 试验方式 T100 所要求的)且随后泄漏含有副产物的 SF_6 的断路器。计算了 24 h 内泄漏的 SOF_2 的数量,并同房间容积相比以求得浓度。

计算副产物浓度的程序如下。D.7 中给出了每一步骤的数据和中间计算结果。

- 计算总电弧能量,以千焦耳(kJ)表示($E=I \times U \times t \times n \times m$),式中 n 是相数, m 是开断次数(数据见 D.7.3.1)。
- 计算生成的 SOF_2 的数量,以升(L)表示(根据产生率 r ,以 L/kJ 表示,见 D.7.4 和 D.7.5)。

注 1: 燃弧发生在铜-钨触头之间。

- 计算断路器内的 SOF_2/SF_6 体积比(考虑到充气压力,见 D.7.7)。
- 确定泄漏率 L ,以升每天(L/d)表示(根据制造厂的数据,见 D.7.6)。
- 计算泄漏进设备室中的 SOF_2 数量(见 D.7.7)。
- 计算在 24 h 内累积的 SOF_2 数量(以 L 表示,见 D.7.7)。
- 计算累积的 SOF_2 对设备室中的空气体积之比(以 ppmv 表示,数据见 D.7.1)。
- 将此浓度和 TLV 比较(见 D.8.2),并将结果表示成比率 $R=C/\text{TLV}$ 。如果 R 的值小于 1,就没有健康危害。

因此,24 h 内,计算设备室内 SOF_2 浓度 C (以 ppmv 表示)见式(D.1):

$$C = r \times E \times L \times 10^6 / (V \times v \times P_i) \quad \text{..... (D.1)}$$

式中:

- r ——产生率,单位为升每千焦(L/kJ);
 E ——电弧能量,单位为千焦(kJ);
 L ——泄漏率,单位为升每天(L/d);

V —— 房间容积,单位为升(L);
 v —— 电力设备隔室的容积,单位为升(L);
 P_i —— SF_6 充气压力(MPa 绝对气压)对大气压力之比。
泄漏情况实例的计算结果(数据见 D. 7)见表 D. 2。

表 D. 2 泄漏情况实例的计算结果

断路器	V_1 (泄漏的 SOF_2)/ L	V (房间容积)/ L	C (SOF_2 浓度)/ ppmv	SOF_2 的 TLV (见注)/ ppmv	R
中压	1.3×10^{-6}	120×10^3	11×10^{-6}	1.6	6.8×10^{-6}
高压	108×10^{-6}	700×10^3	154×10^{-6}	1.6	96×10^{-6}
注: TLV 为界限值;暴露等级基于 8 h 重复暴露数据,见 D. 8. 2,参考文献[28]。					

V_1 是 24 h 内泄漏进大气的数量(见 D. 7. 5、D. 7. 6 和 D. 7. 7)。如比率 R 的值所示,浓度 C 远远小于 TLV。
注: 外推到更长的累积时间需要有关由于通风而引起的空气更换速率的详细数据。

D. 4. 6. 2 考虑到 SOF_2 水解影响的附加计算

在 C. 1. 2 中,式(C. 9)给出了 SOF_2 的水解生成的 SO_2 和 HF 。在长期存在潮气的情况下, SOF_2 无论是保持在电力设备的充气隔室内,或者是设备房间内的大气中,这都可能发生。但是,吸附剂应使充气隔室内部维持一个低的湿度,以限制在泄漏之前,水解发生的程度。正常的通风应能防止 SOF_2 在大气中的积聚。
假定,由于通风不够而使 SOF_2 得以积聚,则在估计任何对健康的危害时,必须考虑最终的产物。
水解反应中每个 SOF_2 分子产生一个 SO_2 分子和两个 HF 分子。因此,每个摩尔的 SOF_2 产生一个摩尔的 SO_2 和两个摩尔的 HF ,每个摩尔占有摩尔体积。所以,一个给定体积的 SOF_2 产生一个相等体积的 SO_2 和两倍该体积的 HF ,并且在一给定房间容积中的浓度也成类似关系。但是, HF 是很易发生反应的,因而不大可能在大气中保持足够长的时间以达到高的浓度。
认为 HF 和 SO_2 对人的机体有类似的影响,因而,对于这样的多成分混合物,单个浓度与 TLV 之比的总和 R_{tot} 应不超过 1。

$$R_{\text{tot}} = \text{SO}_2 \text{ 浓度} / \text{TLV}(\text{SO}_2) + \text{HF 浓度} / \text{TLV}(\text{HF}) \leq 1$$

注: 这是一个谨慎的假设,它使得每一成分的最大允许浓度低于其 TLV。此处采用它是为了保证接近最恶劣的情况。
假定,全部 SOF_2 都经过水解,并且全部生成物 SO_2 和 HF 都保留在大气中,则 D. 4. 6 的结果给出下列的 R_{tot} 值。 R_{tot} 的值(以及单个浓度对 TLV 之比的值)非常之低说明危害可以忽略。

表 D. 3 考虑到 SOF_2 水解时对于泄漏情况的结果

断路器	SOF_2	SO_2		HF		R_{tot}
	浓度/ ppmv	TLV(见注)/ ppmv	浓度/ ppmv	TLV(见注)/ ppmv	浓度/ ppmv	
中压	11×10^{-6}	2.0	11×10^{-6}	3.0	22×10^{-6}	12.6×10^{-6}
高压	154×10^{-6}	2.0	154×10^{-6}	3.0	308×10^{-6}	180×10^{-6}
注: 参考文献[27]和[28]中给出 SO_2 和 HF 的 TLV。						

D.4.7 泄漏的 S_2F_{10} 浓度的确定

D.4.7.1 概述

对于正常使用情况,在存在低能量放电情况下,通常认为 SF_6 的分解率是极低的,因而意味着可忽略对健康的危害。对于局部放电(PD)和电晕作用,这主要是由于涉及的能量极低;只有在很长一段时间(几周或几个月)放电活跃时,才发生显著的分解。但是:

- 固体绝缘子内的局部放电活动不会影响气体;
- 充 SF_6 的电力设备通常是无电晕的,并且检测到的显著电晕放电通常起源于设备外部,例如在套管上等;
- 如同进行无线电干扰测量一样,标准 PD 试验程序使这一类型放电的设备受到屏蔽。

高压隔离开关电弧的影响之所以有限,首先是因为每次操作的总能量较低,其次是因为在典型使用条件下,在每次操作之间的时间很长,第三是因为峰值电弧电流比较高。

尽管实际情况的 S_2F_{10} 迅速衰减^[23],但是,由于 S_2F_{10} 的毒性相对较高^[22],因此,不管上述情况如何,对电力设备中可能存在的 S_2F_{10} 一直表示担心。

为了举例说明在实际情况下,由 S_2F_{10} 引起的健康危害极低,下面对上列 3 种情况给出了估计。对每一情况采取了几种方案。

所采用的放电能量准确值可以增大几个数量级而不显著地改变结论。这提供了可观的安全裕量以便用于异常的高放电水平。

对每一情况,计算方法都是相似的:

- 假定放电活动无条件地生成稳定的 S_2F_{10} ,它在电力设备内积聚了 30 年;
- 然后,该气体以每年 1%(每天 27×10^{-6})的标准速率泄漏进电力设备所处的房间(700 m^3);
- 然后,估计在 24 h 内积累的数量,并将求得的浓度 C 同 TLV(0.01 ppmv)^[28]相比得出比率 R ;
- 比率 R 远小于 1 显然意味着对健康的危害可以忽略。

注:参考文献中报导的衰减率导致 S_2F_{10} 的浓度比这里估计的浓度约小 100 倍。

在所研究的 3 种情况下,算得的最大累积浓度是处在小于十万分之一 TLV 的范围之内。这一结果意味着,在这种低能量放电的情况下,电力设备中产生的 S_2F_{10} 对健康的危害实际上不存在。在实际情况下, SO_2F_2 的积聚数量应当大大减少,从而进一步加强这一结论。此外,计算还忽略了由于潮气存在而引起在 S_2F_{10} 产生率方面的任何减少。

D.4.7.2 局部放电情况

采取下列假定:

- 气体中的 PD 水平为 5 pC;

注 1: 这是在 GIS 验收试验期间惯用的典型最大值。

- 每一周期的放电次数很高;

注 2: 所有的放电皆有相同的幅值并且假定是在电压波上均匀分布。

- 额定电压是 245 kV, 50 Hz;

- S_2F_{10} 的产生率为 $0.2 \times 10^{-9} \text{ mol/J}$;

注 3: 文献中没有查到在交流激励下局部放电时的 S_2F_{10} 产生率。因此,这一计算是基于火花放电测量结果的外推。

- 放电连续进行了 30 年,并且生成的 S_2F_{10} 不减少。

结果用表 D.4 表示。在 24 h 期间泄漏的 S_2F_{10} 将是极少的($88.3 \times 10^{-9} \text{ L}$)。累积的浓度将是 $C = 126 \times 10^{-9} \text{ ppmv}$ 以及比率 $R = C/\text{TLV}$ 将是 12.6×10^{-6} 。

表 D.4 局部放电时 S_2F_{10} 浓度的实例计算

每次放电转移的电荷	Q	$5 \times 10^{-12} \text{ C}$
每一周期的放电次数	N	20
每一周期转移的电荷	$Q = q \times n$	$0.1 \times 10^{-9} \text{ C}$
额定电压	U_r	245 kV
每一周期消耗的能量	$E = Q \times U_r / \sqrt{3}$	$14.1 \times 10^{-6} \text{ J}$
每秒消耗的能量	$E_s = 50 \times E$	$0.707 \times 10^{-3} \text{ J}$
每年消耗的能量	$E_y = 31.5 \times 10^6 \times E$	$22.3 \times 10^3 \text{ J}$
S_2F_{10} 的产生率	r	$0.2 \times 10^{-9} \text{ mol/J}$
每年产生的 S_2F_{10}	$P = r \times E_y$	$4.46 \times 10^{-6} \text{ mol}$
以升表示的 S_2F_{10} 体积(每年)	$V = 24.45 \times P$	$109 \times 10^{-6} \text{ L}$
30 年中积聚的 S_2F_{10}	$U = 30 \times V$	$3.27 \times 10^{-3} \text{ L}$
24 h 内泄漏的 S_2F_{10}	$v = 27 \times 10^{-6} \times U$	$88.3 \times 10^{-9} \text{ L}$
浓度(700 m^3 的房间)	$C = v / (700 \times 10^3)$	$126 \times 10^{-9} \text{ ppmv}$
S_2F_{10} 的 TLV	TLV	0.01 ppmv
比率 R	$R = C / \text{TLV}$	12.6×10^{-6}

D.4.7.3 电晕情况

对于电力设备内部的放电活动,采取下列假定:

- 在 300 Ω 两端测得的总电晕电压(RIV)是 3 μV ;
- 额定电压是 245 kV;
- S_2F_{10} 的产生率是 $0.05 \times 10^{-9} \text{ mol/J}$ 。 S_2F_{10} 不减少。

正如表 D.5 所示,在 24 h 期间泄漏的 S_2F_{10} 约为 $45 \times 10^{-9} \text{ L}$,浓度 C 为 $64 \times 10^{-9} \text{ ppmv}$ 和比率 $R = C / \text{TLV}$ 为 6.4×10^{-6} 。

表 D.5 电晕放电时 S_2F_{10} 浓度的实例计算

电晕电压	V_c	$3 \times 10^{-6} \text{ V}$
测量阻抗	Z	300 Ω
电晕电流	$I = V_c / Z$	$0.1 \times 10^{-9} \text{ A}$
GIS 额定电压	U_r	$245 \times 10^3 \text{ V}$
每秒消耗的能量	$E_s = I \times U_r / \sqrt{3}$	$14.1 \times 10^{-3} \text{ J}$
每年消耗的能量	$E_y = 31.5 \times 10^6 \times E_s$	$44.5 \times 10^3 \text{ J}$
S_2F_{10} 产生率	r	$0.05 \times 10^{-9} \text{ mol/J}$
每年产生的 S_2F_{10}	$P_y = r \times E_y$	$2.2 \times 10^{-6} \text{ mol}$
每年产生的 S_2F_{10} 的体积	$V = 24.45 \times P_y$	$54.4 \times 10^{-6} \text{ L}$
30 年中积聚的 S_2F_{10}	$U = 30 \times V$	$1.63 \times 10^{-3} \text{ L}$
24 h 内泄漏的 S_2F_{10}	$v = 27 \times 10^{-6} \times U$	$44.7 \times 10^{-9} \text{ L}$
浓度(700 m^3 房间)	$C = v / (700 \times 10^3)$	$63.8 \times 10^{-9} \text{ ppmv}$
S_2F_{10} 的 TLV	TLV	0.01 ppmv
比率 R	$R = C / \text{TLV}$	6.4×10^{-6}

D.4.7.4 隔离开关火花

采取下列假定：

——隔离开关每年操作 200 次。每次操作的能量是 0.25 kJ。

注 1：采用的平均值是：电弧电压 1 kV 和电容电流 0.25 A，电弧的持续时间为 1 s。

——产生率(见注 2)为 0.05×10^{-9} mol/J，并且生成的 S_2F_{10} 不减少。

注 2：在隔离开关出现火花期间，单个电弧的峰值电流最大为 3 kA，但仅持续几十微秒。在缺乏公布数据的情况下，选用的产生率所反映的情况是处于火花放电范围的较低端，但比高功率电弧的大 2 000 倍。

正如表 D.6 所示，24 h 期间泄漏的 S_2F_{10} 为 50×10^{-9} L，累积的浓度为 $C = 72 \times 10^{-9}$ ppmv 和比率 $R = C/TLV$ 为 7.2×10^{-6} 。这些理论上的估计已被在高速操作条件下对实际隔离开关的测量证明是符合实际的^[23]。

表 D.6 隔离开关出现火花时 S_2F_{10} 浓度的实例计算

每次操作的能量	$E_o = I \times u \times t$	0.25 kJ
每年消耗的能量	$E_y = 200 \times E_o$	50 kJ
S_2F_{10} 的产生率	r	0.05×10^{-9} mol/J
每年产生的 S_2F_{10}	$P_y = r \times E_y$	2.5×10^{-6} mol
每年产生的 S_2F_{10} 体积	$V = 24.45 \times P_y$	61×10^{-6} L
30 年中积聚的 S_2F_{10}	$U = 30 \times V$	1.8×10^{-3} L
24 h 内泄漏的 S_2F_{10}	$v = 27.4 \times 10^{-6} \times U$	50×10^{-9} L
浓度(700m ³ 房间)	$C = v / (700 \times 10^3)$	72×10^{-9} ppmv
S_2F_{10} 的 TLV	TLV	0.01 ppmv
比率 R	$R = C/TLV$	7.2×10^{-6}

D.4.8 内部故障情况下的浓度的确定

D.4.8.1 概述

内部故障不一定引起 SF_6 释放。出现释放仅有的几种情况是：

——造成过压释放动作或充气隔室打开的故障；

——造成电弧烧穿充气隔室的内部故障情况。

除了 D.4.2 中给出的假定以外，对这些情况还采取了下述假定：

- a) 生成的全部气态副产物迅速地排进周围空气中；
- b) 非常强的对流和气吹力使得放出的气体同设备室内的空气迅速混合；
- c) 假定产生的 SO_2F_2 在所关心的时间内是稳定的。

对每一情况，在设备室内空气中 SO_2F_2 浓度的计算如下。D.7 中给出了每一步骤的数据和中间结果：

- 1) 计算电弧电能 E ，以千焦表示(见 D.7.3.2)。
- 2) 计算生成的 SO_2F_2 数量 V_i ，以升表示[根据产生率 r ，以升每千焦(L/kJ)表示，见 D.7.4 和 D.7.5]。
- 3) 计算设备室的容积 V ，以升表示(见 D.7.1)。
- 4) 计算 SO_2F_2 体积/设备室容积的比值 C ，以 ppmv 计。
- 5) 将这一 SO_2F_2 浓度同 SO_2F_2 的短时作用极限值 C_m 比较。以 ppmv 表示的关于 SO_2F_2 室内浓度

C 的基本公式为：

$$C = r \times E \times 10^6 / V \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

表 D.7 中给出了内部故障情况实例计算的结果(数据见 D.7)。

表 D.7 内部故障情况时 SOF₂ 浓度的实例计算

内部故障	V _f	V	C	SOF ₂ 的 C _m
	生成的 SOF ₂ / L	房间容积 / L	SOF ₂ 浓度 / ppmv	(见注 1) / ppmv
245 kV GIS	60	2 000×10 ³	30	500
145 kV GIS	95	700×10 ³	135	500
中压 GIS	11.3	120×10 ³	94	500
中压断路器	1.9	120×10 ³	15	500
中压环网供电单元(见注 2)	3.0	30×10 ³	100	500
注 1: C _m 见 D.4.3.2。 注 2: 在此情况下, 房间体积较小, 见 D.4.4.1。				

D.4.8.2 SF₆ 副产物相对作用的估计

电弧分解的 SF₆ 是个多成分的产物。每个成分对健康危害的相对作用应该用该成分的浓度除以相应的允许水平(TLV、IDLH 等)来评价。求得的比率越小, 则使总毒性的增加愈小。将对不同成分求得的比率进行比较可表明它们的相对重要性。这可用对熟知的 SF₆ 副产物 SOF₂、SO₂F₂ 和 S₂F₁₀ (已有它们的可靠数据)的结果加以说明^[22,26,28]。

注 1: 所用的产生率: SOF₂ 为 3.7 mL/kJ、SO₂F₂ 为 0.06 mL/kJ、S₂F₁₀ 为 2.4×10⁻⁶ mL/kJ; TLV: SOF₂ 为 1.6 ppmv、SO₂F₂ 为 5 ppmv、S₂F₁₀ 为 0.01 ppmv; 对于短期暴露: SOF₂ 的 C_m 为 500 ppmv、SO₂F₂ 的 IDLH 为 1 000 ppmv、S₂F₁₀ 的 IDLH 为 1.0 ppmv^[26]。

注 2: 获取产生率数据所采用的实验条件在不同的研究者之间存在差异。为了这些评估的目的, 幅值的数量级仍然应该是可比的。

采用 D.4.7 的方法, 把中压断路器作为例子求出 C/TLV 比率:

$$\text{SOF}_2 = 9.3; \text{SO}_2\text{F}_2 = 0.05; \text{S}_2\text{F}_{10} = 0.001$$

对于短期作用, 下面示出的比值对 SOF₂ 用 C/C_m 计算; 而对其他副产物用 C/IDLH 计算:

$$\text{SOF}_2 = 3.0 \times 10^{-2}; \text{SO}_2\text{F}_2 = 2.5 \times 10^{-4}; \text{S}_2\text{F}_{10} = 4.0 \times 10^{-5}$$

两种情况显然表明 S₂F₁₀ 的作用可以忽略, 最重要的是 SOF₂ 占优势。

即使 S₂F₁₀ 的产生率变化两个数量级也对此结论没有影响。虽然 S₂F₁₀ 可能存在于电弧分解的 SF₆ 中, 但它的高毒性被极少的生成量大大抵销。因此, 就总的毒性而言, 它的存在可以忽略不计。

D.4.8.3 金属蒸气的作用

在任何介质中大功率故障燃弧期间, 电弧弧根在电极上消耗的能量熔化和蒸发了大量的金属。在导致 SF₆ 充气隔室打开的内部故障情况下, 大部分生成的蒸气将排进设备室中, 并且会成为总毒性的一部分。

作为一级近似, 该作用的上限值可以这样估计, 即假定所有从弧根注入的能量皆用于加热、熔化、然后蒸发金属, 最后金属蒸气排到房间中。于是, 获得的结果可同试验的电弧腐蚀数据比较以检验幅值的数量级。

但是,对由于在铝蒸气和 SF_6 之间发生强烈放热反应并进一步增加蒸气的产生而引起的高压烧穿情况,这一处理方法是不正确的。忽视这一事实将导致对给定电弧能量产生的金属蒸气总量严重地估计过低。

下列评论适用于这些计算的结果:

- 对于内部故障,电弧分解的 SF_6 的作用不应不加思索地设想为支配着大气的总毒性。不管这一计算的近似性质如何,它都表明,对于 D. 4.5 的两种中压情况,铜蒸气可能支配着总的毒性。
- 即使在弧根处消耗的能量 10% 用于生成蒸气,或者生成的蒸气的 90% 在电力设备内凝结或转变,这一结论仍然是正确的。
- 因此,不管绝缘介质是什么,所有电力设备都应采取类似的安全预防措施。纯粹根据金属蒸气的产生而不是根据 SF_6 的分解量来制定这些安全预防措施,很可能是明智的。

这一处理方法忽略了在金属蒸气和绝缘气体之间存在的化学反应。

缺乏更可靠的方法时,包括任何类型开关设备和控制设备在内的内部电弧情况下,下述近似处理方法都有突出总毒性潜在主要供给者的优点。

下述用作估计铜蒸气对毒性的绝对最大作用的程序如下;此程序假定,所有被弧根消耗的能量全部用于金属蒸气的生成:

- 总的阳极加阴极的电压降取约 30 V,对于 D. 4.5 情况 i) 和 j) 中的中压断路器和环网供电单元(RMU),分别给出了注入电极的能量为 75 kJ 和 96 kJ。
- 将起始在室温下的 1 mol 铜转变成蒸气所需要的能量已算得为 390 kJ。
- 将上述数值进行比较,便得出在每一情况下生成的金属蒸气量的上限值,对中压断路器为 0.19 mol,对环网供电单元 0.25 mol。
- 根据铜的摩尔质量为 64 g/mol,这些值分别相应于 12 g 和 15.8 g 气化的金属。
- 这意味着,包括给定的电弧能量合理的金属腐蚀量约为 1.4 cm^3 和 1.8 cm^3 。
- 这些值比从多次燃弧,4 kA 试验所得的试验数据外推出的值约高 40%,后者得出铜电极腐蚀率在 2.5 mg/A/s 和 4.5 mg/A/s 之间。
- 采用 D. 7.1 中给出的设备室的容积分别为 120 m^3 和 30 m^3 ,则获得的最终浓度约为 100 mg/m^3 和 520 mg/m^3 。
- 将这 0.2 mg/m^3 的铜的 TLV 进行比较^[28]。

注:采用近似数据和方法得到的这些结果是理论上推导出的,还未得到实践证明。

D. 4.8.4 塑料燃烧的作用

由于超出本标准的一般范围,所以这一问题没有像上述那样处理。但是,这些元件的潜在毒性极大,因此考虑它们很有必要。内部故障发生后,塑料材料(例如导线的绝缘)的燃烧,将产生各种与电力设备技术无关的有毒蒸气。

作为一例,考虑了聚氯乙烯(PVC)的情况。聚氯乙烯的 TLV 是 $1 \text{ ppmv} = 2.6 \text{ mg/m}^3$ ^[28]。这意味着,仅仅 8 g 完全蒸发就将使一个 30 m^3 房间内的大气浓度达到 TLV 的 100 倍。对于一个 120 m^3 的房间,32 g 的 PVC 将产生同样的结果。这相当于长 1.2 m,直径 1 mm 标准导线的绝缘。

通常的中压设备室可能包含几千米这样尺寸的导线,每千米包含 PVC 约为 7 kg。

对每一种在故障期间易于燃烧的塑料材料都可以进行这些估计。以前的观察结果表明,不应忽视塑料燃烧引起的蒸气的作用,并且受此蒸气的作用应低到合理可行。

结论是,电力设备中 SF_6 的存在,内部故障引起的对大气产生的毒性增加很少。这的确是在 1987 年进行的研究所得出的结论^[6]。

因此,程序和规程不应简单地借口电力设备采用 SF_6 而要求单独处理。

注: PVC 蒸气同大气中的其他产物发生反应将产生毒性较小的副产物。因此,上述情况是最坏的情况。

D.5 结果的评价

D.5.1 泄漏情况

由于燃弧和低能量放电生成的 SF_6 副产物从充 SF_6 气体设备中泄漏而释放,在工作场所的大气中达到的浓度可以忽略不计。在最坏情况的条件下,对中压和高压情况求得的浓度低于 TLV 的 4 个数量级。

对低注区段,没有理由担心和不需要不同于正常通风惯例的预防措施。考虑到 D.4.2 中采取的起始简化假定时,更强化了这一结论。

甚至在异常泄漏的情况下(例如,泄漏率比通常泄漏率高 3 个数量级),这些结论也不变。

D.5.2 内部故障

为了说明这些情况,选择了有关中压和高压领域的 5 种稀少而又似乎可能的情况。在这些情况中最严重的一种情况下,设备室中 SO_2 的浓度仍然是低于短时作用的极限值 C_m (见 D.4.3)。

在此类故障的任何情况下,基本的安全程序包括排气的规定,该规定保证工作人员受排出的材料作用不多于几分钟。此外,强制通风和/或排气保证浓度水平在几分钟内降低到很低的数值。采用上述措施之一或两者所带来的附加的安全裕量是相当大的。

因此,简单的安全程序可保证实际作用是短时的,并且不会危及工作人员的健康。

D.5.3 户外设施

对泄漏和故障两种情况,都按与上述相同的方式进行计算,但是,在户外情况下,电弧分解的 SF_6 释放进入的空气体积是很大的(如果不是无穷大的话)。一般流动的风和高的排出速度也会加速稀释。显然,对于泄漏的情况,获得的浓度将是无穷小。对于内部故障情况,在几秒钟之内,浓度会降到远低于 TLV 值。

结论是,认为不可能出现从户外电力设备中放出的 SF_6 副产物毒性引起的健康危害。

D.6 结论

基于最新技术的实例计算的结果表明,对于泄漏的情况,不存在由于副产物的作用引起的对健康的危害。

这些结果也表明,在不大可能发生的导致 SF_6 释放的内部故障情况下,在设备室中可能出现浓度颇大的副产物。但是,计算的浓度并未超过短期作用下已证明了的极限值。

因此,可得出结论,只要遵从正常的安全程序,特别是与电力设备中采用 SF_6 相关的危害是极小的。

这一点已强调过,即在任何内部故障情况下,不管 SF_6 是否存在,都会产生腐蚀性的和/或有毒的蒸气。在这些蒸气进入开关室大气的情况下,已经证明与 SF_6 无关的电弧产物可能是总毒性的主要成分。这进一步加强了在电力设备中使用 SF_6 并不会显著地增大与内部故障相关的危险的观点。

D.7 用于计算的数据

D.7.1 设备室的典型容积

245 kV GIS 大楼(7 间隔): $25 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 6.5 \text{ m} = 2\,000 \text{ m}^3$

145 kV GIS 大楼(7 间隔): $12.5\text{ m}\times 8\text{ m}\times 7\text{ m}=700\text{ m}^3$
中压配电大楼(用作断路器和中压 GIS 情况)(15 个断路器柜): $10\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}=120\text{ m}^3$
中压环网供电单元室(1 个环网供电单元)(亦见 D. 4. 4. 1): $4\text{ m}\times 3\text{ m}\times 2.5\text{ m}=30\text{ m}^3$

D. 7. 2 开关设备和控制设备的容积和充气压力

开关设备和控制设备的容积和充气压力见表 D. 8。

表 D. 8 开关设备的容积和充气压力

	容积/L	压力(绝对气压)/MPa
中压断路器	45	0.3
中压环网供电单元	200	0.1
中压 GIS	1 000	0.1
高压断路器	500	0.5
GIS 母线	2 000	0.3

D. 7. 3 燃弧特性

D. 7. 3. 1 故障电流开断/泄漏情况

电弧能量数值是三相故障电流三次开断的总数,即 9 次单相开断的数值。开断时的电弧能量见表 D. 9。

表 D. 9 开断时的电弧能量

	$I/$ kA	$U_{\text{arc}}/$ V	$T_{\text{arc}}/$ ms	$9\times E_{\text{arc}}/$ kJ
中压断路器	31.5	200	15	851
高压断路器	31.5	500	15	2 126

D. 7. 3. 2 内部故障/排气情况

电弧能量数值为 N 个同时存在的电弧的能量。所选的电弧数量代表了最大可能的内部故障情况。内部故障时的电弧能量见表 D. 10。

表 D. 10 内部故障时的电弧能量

	$I/$ kA	$U_{\text{arc}}/$ V	$T_{\text{arc}}/$ ms	N	$E_{\text{arc}}/$ kJ
254 kV GIS	40	1 000	100	1	4 000
145 kV GIS	31.5	1 000	100	2	6 300
中压 GIS	25	300	100	1	750
中压断路器	25	200	100	1	500
中压环网供电单元	16	250	100	2	800

燃弧时间的数值代表了实际燃弧时间、安全膜动作、烧穿、燃弧环境不变和得到的产生率数据有效范围之间的折衷值。因此,将这些数值线性外推两倍以上会极大地高估所得的结果(见 D.4.4.2)。

D.7.4 SOF₂ 产生率

在放电期间生成的气体数量通常以每焦耳消耗的能量所产生的气体数量(产生率, r)表示。

试验确定的 SOF₂ 产生率取决于使用的电极材料和所考虑的放电类型。铝电极情况下发生的放热反应似乎提高了产生率。

试验结果通常以 mol/J 表示,但是,在大多数实际情况,可以很方便地是将它转换成 L/kJ。采用下列事实可实现这一变换,即 1 mol 的任何气体,在 25 °C 和大气压力下占有 24.45 L。

这里使用的数值是在目前参考文献[21]和[25]中所能得到的数据范围内的平均值。SOF₂ 产生率见表 D.11。

表 D.11 SOF₂ 产生率

电极材料	SOF ₂ 产生率(r)	
	mol/J	L/kJ
铜、铁、铜钨	150×10^{-9}	3.7×10^{-3}
铝	600×10^{-9}	15×10^{-3}
注:假定铝电极仅用于 GIS 母线的情况。		

D.7.5 生成 SOF₂ 的数量

可根据电弧能量和产生率求得。生成 SOF₂ 的数量见表 D.12。

表 D.12 生成 SOF₂ 的数量

	中 压		高 压	
	mol	L (0.1 MPa 下)	mol	L (0.1 MPa 下)
泄漏	0.13	3.15	0.319	7.87
内部故障				
245 kV GIS			2.4	60
145 kV GIS			3.8	95
中压 GIS	0.45	11.25		
中压断路器	0.075	1.9		
中压环网供电单元	0.12	3.0		

D.7.6 泄漏率

终生密封的电力设备的泄漏率以每秒每巴充气压力表压所损失的 SF₆ 体积给出。

对于可补气的电力设备,泄漏率以每年总气体损失的百分数给出。

表 D.13 给出了三极断路器的典型值,且已转换成每天(24 h)泄漏的总的 SF₆,而对于中压情况,则转换成每巴充气压力的 MPa 值。

表 D. 13 SF₆ 的泄漏率

	中压断路器	高压断路器
基本泄漏率	$3 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 / (\text{s} \cdot \text{MPa 表压})$	0.5%总 SF ₆ 体积, L/a
每天泄漏率	$27 \times 10^{-5} \text{ L} / (\text{d} \cdot \text{MPa 表压})$	$13.7 \times 10^{-6} \times (\text{SF}_6 \text{ 体积}), \text{L/d}$

D. 7. 7 SOF₂ 的泄漏率(采用 D. 7. 5 和 D. 7. 6 的数据)

SOF₂ 的泄漏率(采用 D. 7. 5 和 D. 7. 6 的数据)见表 D. 14。

表 D. 14 SOF₂ 的泄漏率

	中压断路器	高压断路器
生成的 SOF ₂ 体积(在 0.1 MPa 绝对气压下)/L	3.15	7.87
SF ₆ 的总体积(在 0.1 MPa 绝对气压下)/L	135	2 500
断路器内 SOF ₂ /SF ₆ 的比率	2.33%(体积比)	0.31%(体积比)
充气压力(绝对气压)/MPa	0.3	0.5
泄漏的 SOF ₂ (见注)/(L/d)	1.26×10^{-6}	107.8×10^{-6}
注: 这是在无通风房间中 24 h 泄漏后积聚的 SOF ₂ 总量。		

D. 8 作用极限值

D. 8. 1 概述

用作确定允许的作用极限值的术语可以分成两组:

- 用于规定在不带保护器具的情况下人能长期工作的条件,例如,界限值(TLV);
- 用于规定人必须离开房间的短时作用的异常或例外情况,例如,对生命或健康立即出现危险(IDLH)。

D. 8. 2 TLV(界限值)

D. 8. 2. 1 概述

界限值(TLV)是美国工业卫生学家联合会(ACGIH)主张采用的术语。它指的是在规定的作用时间内,从生理学和物理学上考虑可接受的元素或物质的最大浓度。

界限值-时间加权平均值(TLV-TWA)是指人一天能工作 8 h、一周 40 h 而无不良健康影响的时间加权平均浓度。进行平均可以允许瞬时浓度水平为 TLV-TWA 的几倍。根据此标准,TLV-TWA 简称为 TLV,并且所有的 TLV 都应是 TLV-TWA。

D. 8. 2. 2 SOF₂ 的 TLV

全部工作时间都受作用时,法定允许的工作场所的 SOF₂ 浓度(TLV)以氟含量表示^[27,28],取在 25 ℃和大气压力下每平方米空气中氟的 TLV=2.5 mg。

这相应于在 25 ℃和大气压力下的空气中含有 5.66 mg/m³ 的 SOF₂。

以体积比表示的 SOF₂ 的大气浓度取 TLV=1.6 ppmv。

注 1: 在某些出版物中,引用的 SOF_2 的 TLV 为 0.65 ppmv。显然,此值是利用 SOF_2 的相对分子质量(86.1)而不是它的氟含量(2×19)的值导出的。

注 2: 可通过计算相当于 TLV(表示为每立方米空气中氟为 2.5 mg)的每立方米空气中 SOF_2 的质量进行变换。 SOF_2 的摩尔质量对其氟含量的比值是 $86.1/(2 \times 19) = 2.266$;因此,在 TLV 下每立方米空气中存在的 SOF_2 质量是 $2.5 \times 2.266 = 5.66 \text{ mg}$ 。

注 3: 通过乘以摩尔体积(在 25 °C 下为 24.45 L)并除以摩尔质量(86.1 g/mol),就从 mg/m^3 变换成 ppmv^[28]。

D.8.3 IDLH(生命或健康立即出现危险)

这是一个只要作用不超过 30 min,从中出来的人就可避免不可恢复的健康影响的浓度值^[28]。

参 考 文 献

- [1] CIGRE WG B3.02 TF SF₆. Guide for the preparation of customised "Practical SF₆ handling instructions". CIGRE brochure N. 276, 2005
- [2] KEMA. SF₆ Safety Regulations. internal document for use in laboratories, 1982
- [3] The Electricity association. Engineering recommendation G 69. UK, 1988
- [4] Standards Association of Australia. Recommendations for the handling of contaminated SF₆ gas and associated arc by-products in or from electrical equipment. AS-2791, 1989
- [5] G. Mauthe, K. Pettersson, et al. Handling of SF₆ and its by-products in gas insulated switch-gear (GIS). Electra, 1991, 136(6): 69-89, 137(8): 81-108
- [6] KEMA. Het gebruik van middenspanning installaties met SF₆ als isolatie en/of blusmedium. report No. 00067-DZO 87-1002, 17 February 1987 (in English)
- [7] J. A. J. Pettinga. Gaslekzoekapparatuur toegepast voor het meten van SF₆ concentraties in lucht. Electrotechniek, 1990, 68
- [8] J. A. J. Pettinga. Studie naar de mogelijkheid van ruimtebewaking in onderstations waarin SF₆ schakel-materiaal is opgesteld, n. v. KEMA report, 1986
- [9] Sulphur Hexafluoride brochure (Solvay Fluor, 2006)
- [10] R. J. Lewis Sr. Sax's Dangerous Properties of Industrial Materials. 11th edition. Hoboken NJ: John Wiley and Sons Inc., 2004
- [11] R. T. Watson, the Core Writing Team. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Third Assessment Report: Climate Change 2001 <http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>, 2001
- [12] Eggleston H. S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>, 2006
- [13] J. T. Houghton, et al. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- [14] ISO 14040 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework
- [15] S. Wartmann and J. Harnisch. Reductions of SF₆ emissions from high and medium voltage electrical equipment in Europe. Nurnberg: Ecofys GmbH, 2005
- [16] K. Yokotsu, Y. Ichikawa, et al. Recent practice for huge reduction of SF₆ gas emission from GIS & GCB in Japan. CIGRE SC A3 & B3 Joint Colloquium and Tutorial in Japan, 26th-28th Sep 2005, Tokyo, Japan, 2005
- [17] United States Environmental Protection Agency (EPA). Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions. Washington DC, United States, 2006: 1990-2020
- [18] United States Environmental Protection Agency (EPA). Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases. Washington DC, United States, 2006
- [19] CIGRE WG B3-02. Template for Voluntary agreement on the use of SF₆ and on measures for SF₆ emission reduction in the national, regional electric industry, 2003
- [20] CRADA. Cooperative Research and Development Agreement. Investigation of S₂F₁₀ production and mitigation in compressed SF₆ insulated power system. Technical Note No. 1, 22, December

1992

- [21] F. Y. Chu. SF₆ Decomposition in gas insulated equipment. IEEE Trans, on Elec. Insul. ,EL-21, No. 5, October 1986
- [22] R. J. Van Brunt, J. K. Olthoff, et al. Production of S₂F₁₀ by electrical discharge in SF₆. I. H. S. 1992, Swansea, U. K. , Vol. 1, p. 418, 1992
- [23] H. D. Morrison, V. P. Cronin, et al. Production and decay of S₂F₁₀ in a disconnect switch, 7th Int. Sym. Gaseous Dielectrics, Knoxville, TE, USA, 1994
- [24] L. Niemeyer. S₂F₁₀ in SF₆ insulated equipment, 7th Intern. Sympos. On Gaseous Dielectrics, Knoxville, TE, USA, 1994
- [25] B. Belmadani, et al. SF₆ decomposition under power arcs. physical aspects. IEEE Trans. On Elec. Ins. , 1991, 26(6)
- [26] E. Truhault, C. Boudene, et al. Toxixite de quelques derives gazeux fluor et oxyfluors du soufre. Archives des maladies professionnelles de Medecine du Travail et de la Securite Sociale(Paris) , T34, No. 10-11, October-November(pp 581-591) , Translation available, 1973
- [27] Documentation of the threshold limit values and biological exposure indices, 5th ed. Cincinnati, OH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc. , 1986, 5: 272, 1986
- [28] U. S. Department of Health and Human Services Publications Dissemination, DSDTT National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH pocket guide to chemical hazards. 4676 Colombia parkway, Cincinnati, Ohio 45226, USA
- [29] IEC 60050-601 International Electrotechnical Vocabulary(IEV)—Part 601: Generation, transmission and distribution of electricity—General
- [30] IEC 60695-7-1 Fire hazard testing—part 7: Guidance on the minimization of toxic hazard due to fires involving electrotechnical products—Section 1: General
- [31] IEC 62271-200 High-voltage switchgear and controlgear—Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV
- [32] IEC 62271-201 High-voltage switchgear and controlgear—Part 201: AC insulation-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV
- [33] IEC 62271-203 High-voltage switchgear and controlgear—Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltage above 52 kV
- [34] UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods—Model Regulations Fourteenth revised edition—Part 3.
- [35] ADR: European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road
- [36] RID: Regulations Concerning the International Carriage of Dangerous Godds by Rail
- [37] IMDG: International Maritime Dangerous Goods
- [38] IATA-DGR: International Air Transport Association-Dangerous Goods Regulations
- [39] EN 136 Respiratory protective devices—Full face masks—Requirements, testing, marking
- [40] EN 140 Respiratory protective devices—Half masks and quarter masks—Requirements, testing, marking
- [41] EN 141 Respiratory protective devices—Gas filters and combined filters—Requirements, testing, marking
- [42] EN 143 Respiratory protective devices—Particle filters—Requirements, testing, marking
- [43] EN 166 Personal eye-protection—Specification

[44] BS 5415-1 Safety of electrical motor-operated industrial and commercial cleaning appliances. Specification for general requirements

[45] BS 5415-2 Supplement No. 1, Safety of electrical motor-operated industrial and commercial cleaning appliances. Particular requirements. Specification for type H industrial vacuum cleaners for dusts hazardous to health

国家标准体系简介

国家标准分为**强制性国家标准**和**推荐性国家标准**。对保障人身健康和生命财产安全、国家安全、生态环境安全以及满足经济社会管理基本需要的技术要求，应当制定强制性国家标准。强制性国家标准由国务院批准发布或授权发布。对于满足基础通用、与强制性国家标准配套、对各有关行业起引领作用等需要的技术要求，可以制定推荐性国家标准。

国家标准代号分为 GB 和 GB/T。国家标准的编号由国家标准的代号、国家标准发布的顺序号和国家标准发布的年号（发布年份）构成。

中国标准分为**国家标准**、**行业标准**、**地方标准(DB)**、**企业标准(Q/)**四级。中国标准按内容划分有**基础标准**（一般包括名词术语、符号、代号、机械制图、公差与配合等）、**产品标准**、**辅助产品标准**（工具、模具、量具、夹具等）、**原材料标准**、**方法标准**（包括工艺要求、过程、要素、工艺说明等）；按成熟程度划分有**法定标准**、**推荐标准**、**试行标准**、**标准草案**。按行业分类则包括：GB 及 GB/T 国家标准，GBJ 工程建设国家标准，GBZ 国家职业卫生技术标准，GBn 国家内部标准，GHZB 国家环境质量标准，GWKB 国家污染物控制标准，GWPB 国家污染物排放标准，JJF 国家计量技术规范，JJG 国家计量检定规程。