

第十一篇 高压电器、避雷器、绝缘子 及继电保护装置

主 编 李建基

副主编 方文楷

执 笔 李建基 易志斌 艾克郑 陈齐武 管日升
陈保伦 吴维忠 谢迎孙 许镐娥 苏郁馥
魏一钧 王素芬 赵伯楠 梁维宏 张雨时
邱志贤 方文楷

目 录

第52章 高压开关

- 52.1 单压式 SF₆ 断路器11-3
- 52.2 35kV 户外 SF₆ 断路器11-11
- 52.3 中压户内压气式 SF₆ 断路器11-12
- 52.4 SF₆ 自能灭弧断路器11-15
- 52.5 中压 SF₆ 接触器11-20
- 52.6 真空断路器11-23
- 52.7 柱上真空断路器11-27
- 52.8 中压真空接触器11-31
- 52.9 户内高压隔离开关11-32
- 52.10 户外高压隔离开关11-38
- 52.11 弹簧操动机构11-47
- 52.12 液压操动机构11-51

第53章 高压开关设备

- 53.1 SF₆ 封闭式组合电器 (GIS)11-62
- 53.2 52~145kV 箱型 SF₆ 封闭式组合电器 (C-GIS)11-84
- 53.3 金属封闭开关设备11-89
- 53.4 F-C 回路11-92
- 53.5 SF₆ 环网供电单元11-97
- 53.6 SF₆ 绝缘的金属封闭开关设备 (充气柜)11-109
- 53.7 箱式变电站11-114

第54章 避雷器

- 54.1 用途和分类11-121
- 54.2 交流碳化硅阀式避雷器的性能和结构11-122
- 54.3 交流无间隙金属氧化物避雷器的性能和结构11-125
- 54.4 交流有串联间隙金属氧化物避雷器的性能和结构11-134

第55章 绝缘子

- 55.1 概述11-135
- 55.2 高压绝缘子设计概论11-137
- 55.3 典型高压绝缘子的结构与特性11-146
- 55.4 污秽地区用绝缘子11-155
- 55.5 提高绝缘子运行可靠性的措施11-159

第56章 保护继电器

- 56.1 概述11-160
- 56.2 电流、电压继电器11-162
- 56.3 功率方向继电器11-164
- 56.4 差动继电器11-165
- 56.5 阻抗继电器11-167
- 56.6 微机继电保护装置11-170

参考文献

第十一篇 高压电器、避雷器、绝缘子 及继电保护装置

主 编 李建基

副主编 方文楷

执 笔 李建基 易志斌 艾克郑 陈齐武 管日升
陈保伦 吴维忠 谢迎孙 许镐娥 苏郁馥
魏一钧 王素芬 赵伯楠 梁维宏 张雨时
邱志贤 方文楷

目 录

第52章 高压开关

- 52.1 单压式 SF₆ 断路器11-3
- 52.2 35kV 户外 SF₆ 断路器11-11
- 52.3 中压户内压气式 SF₆ 断路器11-12
- 52.4 SF₆ 自能灭弧断路器11-15
- 52.5 中压 SF₆ 接触器11-20
- 52.6 真空断路器11-23
- 52.7 柱上真空断路器11-27
- 52.8 中压真空接触器11-31
- 52.9 户内高压隔离开关11-32
- 52.10 户外高压隔离开关11-38
- 52.11 弹簧操动机构11-47
- 52.12 液压操动机构11-51

第53章 高压开关设备

- 53.1 SF₆ 封闭式组合电器 (GIS)11-62
- 53.2 52~145kV 箱型 SF₆ 封闭式组合电器 (C-GIS)11-84
- 53.3 金属封闭开关设备11-89
- 53.4 F-C 回路11-92
- 53.5 SF₆ 环网供电单元11-97
- 53.6 SF₆ 绝缘的金属封闭开关设备 (充气柜)11-109
- 53.7 箱式变电站11-114

第54章 避雷器

- 54.1 用途和分类11-121
- 54.2 交流碳化硅阀式避雷器的性能和结构11-122
- 54.3 交流无间隙金属氧化物避雷器的性能和结构11-125
- 54.4 交流有串联间隙金属氧化物避雷器的性能和结构11-134

第55章 绝缘子

- 55.1 概述11-135
- 55.2 高压绝缘子设计概论11-137
- 55.3 典型高压绝缘子的结构与特性11-146
- 55.4 污秽地区用绝缘子11-155
- 55.5 提高绝缘子运行可靠性的措施11-159

第56章 保护继电器

- 56.1 概述11-160
- 56.2 电流、电压继电器11-162
- 56.3 功率方向继电器11-164
- 56.4 差动继电器11-165
- 56.5 阻抗继电器11-167
- 56.6 微机继电保护装置11-170

参考文献

第 52 章 高 压 开 关

52.1 单压式 SF₆ 断路器

52.1.1 压气室的压力特性

单压式 SF₆ 断路器只有一个压力系统, 开断过程所需的吹弧气流是靠压气缸与动触头机械联动的压气作用产生的。压气室是这种 SF₆ 断路器的重要组成部分, 其压力特性在很大程度上决定了断路器的开断性能。

压气室压力特性主要决定于灭弧室结构参数和操动系统的特性, 同时与电弧的形态和特性也密切相关。作为粗略的估算, 可将开断过程大致分为两个阶段考虑。

1. 预压缩阶段 从动触头起始至气吹开始的一段行程称为预压缩行程。在此阶段, 压气室内应建立起必要的气吹压力, 使喷口打开时, 能产生临界速度的气流。

一般在触头分离前的超行程范围内, 压气室内被压缩的气体外泄甚微, 压力增长可近似按绝热压缩过程计算。

$$p_1 = p_0 \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^K \quad (\text{Pa}) \quad (52-1)$$

式中 p_1 ——行程 L_1 时, 压气室内气压 (Pa);

p_0 ——断路器充气压力 (Pa);

V_0 ——开始压缩前, 压气室的容积 (m³);

V_1 ——行程 L_1 时, 压气室内容积 (m³);

$$V_1 = V_0 - S_p L_1 = S_p (L_0 + L_1)$$

K ——SF₆ 气体绝热常数, $K=1.08$;

S_p ——压气室活塞面积 (m²);

L_0 ——压气室深度 (m), 一般为触头行程的 1.1~1.15 倍。

因而, 如单纯靠超程来获得气吹压力, 且在触头分离时达到临界气流条件: $p_1/p_0 \geq 1.7$, 则超程必须大于全行程的 40%, 将导致分闸时间增长和需要较大的操作功。

现代高压 SF₆ 断路器设计最关键的是要使气吹压力与触头开距和燃弧区间配合好。适度利用电弧对喷口的堵塞效应, 允许压气室内压力在触头分离后一段时间达到临界压力比, 可使超程缩小到全行

程的 20%~30%。例如, 在双向同期吹弧装置中, 两个喷口在触头分离到可能熄弧的距离内同时开放, 因此, 压气室压力增长很快。加上电弧的热效应, 可使开始气吹时, 压气室内外压力比远远超过临界值。试验表明, 如果在可动侧装一抽吸活塞, 可以增加压气室内与喷口下游区的压力差, 实现一周波开断。

此外, 采用压气缸和压气活塞都运动的双向压气装置, 在同一时间内压气室的体积压缩率可提高一倍, 因而预压缩行程和分闸时间均可缩短一半。

2. 气吹灭弧阶段 喷口打开后, 压气室中气体即高速外喷。与此同时, 压气室继续被压缩。为了保持临界气吹, 压气室应有足够的体积压缩率, 及时补偿喷口因逸出气体而造成的压力降低。

在没有电弧的空载情况下, 可以根据质量或能量平衡原理得到断路器在此阶段的分闸速度。它应满足

$$v_c \geq 83 \frac{S_p}{S_0} \quad (\text{m/s}) \quad (52-2)$$

式中 v_c ——临界分闸速度;

S_p ——喷口喉部截面积 (m²); 对双向吹弧装置而言, S_0 为两个喷口喉部截面积之和。

断路器的分闸速度与单元灭弧室的额定工作电压有关。一般 110kV 级灭弧室在气吹灭弧阶段的平均分闸速度约为 5~6m/s, 220kV 级约为 6~7m/s。因此, 压气活塞面积主要取决于喷口最小截面积, 喷口截面积越大, 则所需压气缸截面积也越大。

在实际开断过程中, 由于电弧的存在和热堵塞效应, 喷口流量将减少, 压气室内气体温度升高, 压力可增高 30% 以上, 因此, 按上式确定临界分闸速度是有裕度的。

强烈的超临界高速气吹灭弧时必须持续约 2 个半波, 使有效吹弧时间大于最长燃弧时间, 以保证电弧可靠熄灭。

几种典型单压式 SF₆ 断路器的压气室压力特性见图 52-1。

52.1.2 吹弧装置

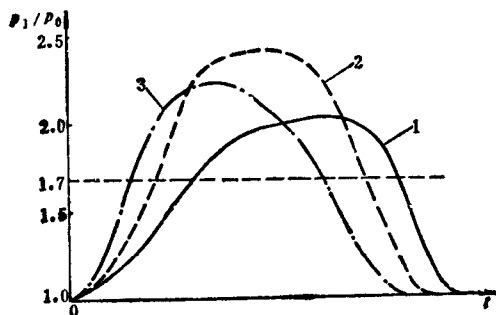


图 52-1 压气室压力特性

1——一般双吹 2——同期吹弧 3——双向压缩

喷口是吹弧装置中控制电弧、创造高速气吹条件的核心部件。气吹装置设计的关键就是合理选择喷口材料，正确确定喷口形状与尺寸，以及处理好与触头、压气室等的配合关系。

根据喷口的结构与配置方式，单压式 SF₆ 断路器的吹弧装置可分为动喷口吹弧装置和定喷口吹弧装置两种。前者又称变开距灭弧装置，后者亦称定开距灭弧装置，见图 52-2 和图 52-3。

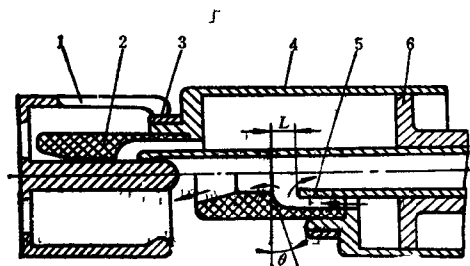


图 52-2 动喷口灭弧装置

1—静触头 2—主喷口 3—主动触头
4—压气缸 5—动弧触头（辅助喷口）
6—压气活塞

1. 动喷口吹弧装置 按吹弧方式分有单向纵吹和双向纵吹两种。现代高压大容量断路器采用不对称双向纵吹方式居多。

主喷口用绝缘材料制成。常采用聚四氟乙烯或以聚四氟乙烯为主加填料制成的复合材料。因为这类材料具有耐电弧、机械强度高、易加工、耐高温、直接受电弧短时作用不炭化、烧损均匀、烧蚀量少、不受 SF₆ 分解物侵蚀等特点。喷口喉部直径主要取决于电弧直径，此外，也与吹弧结构、气吹压力和瞬态恢复电压等因素有关。通常设计的准则是

取喷口最小截面直径与极限开断电流的电弧直径相等。统计现代单压式 SF₆ 断路器主喷口参数表明，喉部截面上允许的额定短路开断电流密度可以达到 4~6 kA/cm²。喷口上游部分的形状应与动弧触头结构和位置相配合，以保证气流对电弧具有最佳作用条件。一般喷口间隙 L 可按下式近似计算：

$$L = \frac{a\pi}{4\cos\theta} \left(d_1 + \frac{d_2^2}{d_1} \right) \quad (52-3)$$

式中 a——气流通道结构系数，结构紧凑、加工精细时可取 a=1.3~1.4；

d₁——主喷口喉部直径 (m)；

θ——主喷口上游收缩部分的倾角，一般为 0°~5°。

d₂——动触头内喷口直径 (m)，由于结构限制，通常 d₂ 略小于 d₁。

试验表明，在喷口喉部有一直线段（长度约为 2~4cm），有利于控制电弧，增加冷气流与高温等离子体的接触机会，延长使用寿命。有的还在此直线段上开槽，人为地产生湍流，增强冷却效果；同时也可增大沿面长度，防止喉部沿面闪络。

喷口下游区的扩张角与静触头的位置和结构有关。处理不当，会影响气流的加速和触头间隙的绝缘强度。研究表明，扩张半角以 9°~15° 为佳。随着开断电流的增大，电弧析出能量增加，喷口下游扩张角亦应相应地增大。

2. 定喷口吹弧装置 SF₆ 断路器的定喷口吹弧装置沿用了空气断路器的吹弧结构。通常采用对称双向吹弧方式。喷口需用耐电弧性能好的金属或石墨等导电材料制成。石墨能耐高温，在电弧作用下直接由固态变成气态，逸出功大，表面烧损轻。试验证实，在开断 80kA 20 次后，喷口内径仅增大 1mm，产生的少量气态化合物 CF₄，不影响 SF₆ 的绝缘和灭弧性能，因而得到了广泛应用。

定喷口的喉部直径设计原则与动喷口的相同，喷口端部的形状应根据电场和气流场确定。试验表明，定喷口开距是气体压力、喷口喉部截面积和导电杆直径等的函数，且有一个最佳值。例如，3AS 5 型 500kV 断路器充气压力为 0.65MPa，采用石墨喷口，喉部直径为 45mm，最佳开距是 34mm，约为按气流等截面原理计算值 (L=d/2) 的 1.5 倍。定喷口下游部分的扩张角不能太大，且要有一定长度，否则喷口内压力降低很快，对熄弧过程不利。

总之，动喷口吹弧装置和定喷口吹弧装置各有

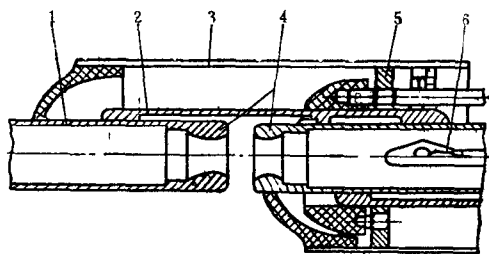


图 52-3 定喷口吹弧装置

1—静触头 2—动触头 3—压气缸
4—喷口 5—压气活塞 6—联动杆

其特点。一般认为,前者的开距大,气吹时间较充裕,便于提高灭弧室的工作电压。如 SFMT 系列断路器的单个灭弧室的工作电压可做到 420kV,额定开断电流 50kA。后者断口电场较均匀,灭弧开距小,电弧能量较少,同时,上游区无金属蒸气输入弧道,对熄弧过程有利,可以开断很大的短路电流。如 3AT 系列断路器单个灭弧室在 145kV 下的额定短路开断电流达到 100kA。

52.1.3 触头结构型式

除了传统的梅花式、插入式和对接式触头型式外,新型自力型触头或触片也在单压式 SF₆ 断路器上得到了应用。

1. 指形自力触头 它利用触头在合闸状态下触指的变形弹力来获得接触压力,结构很简单,可以很方便地配置在吹弧装置内外,作为弧触头和载流触头。指形自力触头材料应有良好的导电性、弹性和耐磨性。一般在额定电流大(2000A)时,需用可锻的铜铬合金材料制造;额定电流小时,可用黄铜。触指的接触压力可以根据材料力学公式计算:

$$F = \frac{3EMS}{l^3} \quad (N) \quad (52-4)$$

式中 E ——材料弹性系数,铜铬合金 $E=1.18 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, 黄铜 $E=1.03 \times 10^5 \text{N/mm}^2$

M ——触指断面惯性矩, $M=bh^3/12 (\text{mm}^4)$

S ——合闸状态下,触指径向位移量,一般为 1~3mm;

l ——触指弹性变形实际长度 (mm);

b ——触指宽度 (mm);

h ——触指厚度 (mm)。

额定电流小于 4000A 时,接触压力不必很大,一般 3~6N/mm²,接触面的表面粗糙度值也不必很低, R_a 取 3.2 即可。径向单位长度 (mm) 上的面接触压力与短时载流密度的关系,见图

52-4。

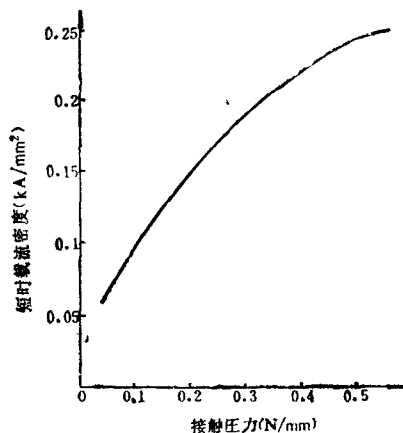


图 52-4 指形自力触头短时载流密度与接触压力关系

2. 多接触点带形触头 又称表带式触头。它是用弹性导电材料(如铍青铜)冲压成百叶窗状的多切口带状触片,经硬化和电镀处理而成,如图 52-5 所示。

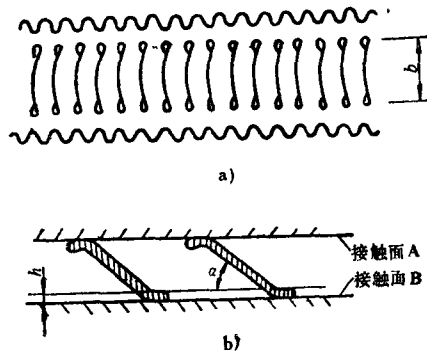


图 52-5 多接触点带形触头

a) 触头带外形 b) 过渡接触形态(放大)

带形触头体积很小,通常安装在两圆柱面间,安装在其中一个圆柱面上的翼尾槽中。当两圆柱的间隙与触头切片突起高度配合恰当时,每个突起的切片与圆柱面接触,并产生一定的变形扭力,紧贴在两个过渡表面上。每个切片构成一个独立的导电支路。接触电阻小 ($10^{-4} \sim 10^{-3} \Omega$),且十分稳定,是比较理想的中间触头结构型式。

试验表明,多接触点带形触头每片切片导电截面积越大,载流能力越大,而允许的电流密度则减小,见图 52-6。改变切片的截面积 ($A=bh$) 以及切片数 ($n=\pi d/a$),增加表带触头的并联根数可满足各种额定参数要求。

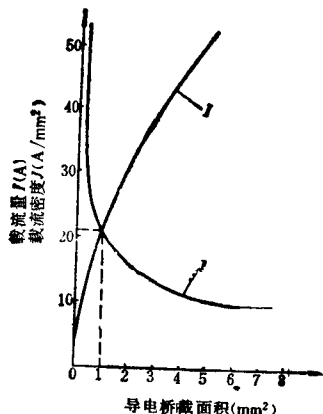


图 52-6 多接触点带形触头载流能力
与截面积的关系

带形触头的变形量，一般为 0.1~0.3mm，视材料规格与弹性而定。在操作次数不多（3000 次以下）时，镀银层的厚度可为 5~10μm，如果超过万次，则需增加镀层厚度。

带形触头装入前，应在滑动接触部分涂上导电润滑剂。

52.1.4 辅助灭弧装置

1. 合闸电阻器及其辅助投切装置 为了抑制断路器在合闸或重合空载输电线路时产生的过电压，

500kV 及以上的超高压和特高压 SF₆ 断路器上，一般都装有合闸电阻。其电气连接方式见图 52-7。合闸操作时，辅助断口先接通，使合闸电阻接入，以阻尼线路中的振荡过程。分闸时，辅助断口必须先断开，然后由主触头开断电路。表 52-1 示出两种实用的触头动作程序。

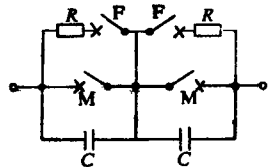


图 52-7 主灭弧装置与辅助灭弧装置的电气连接

M—主断口 F—辅助断口 R—合闸电阻

C—并联电容

辅助断口和主断口的合闸过电压最大倍数与合闸电阻值的关系见图 52-8。其最大过电压的包络线为 U 形曲线。一般在 $Z/2 < R < 2Z$ (Z 为线路波阻抗) 时，可以保证合闸过电压不超过系统绝缘水平的允许值。在工程上，合闸电阻值及其接入时间都是根据系统绝缘水平、线路长度、运行条件和断路器结构特性，并考虑到合闸电阻的热容量等因素，通过模拟计算确定的。大多取 400~1000Ω，有效接入时间不小于 8ms。

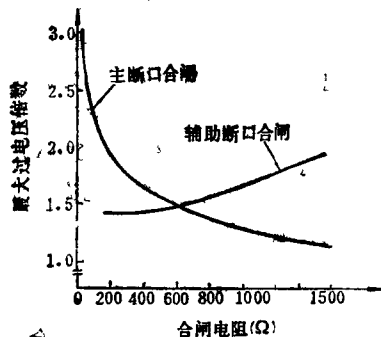


图 52-8 合闸过电压与合闸电阻值关系

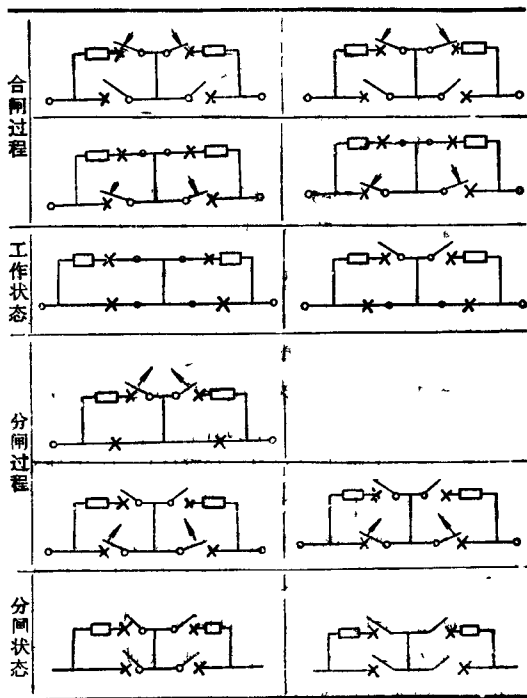
在设计合闸电阻结构时，首先需要计算注入能量 Q ，校验电阻的热容量，并不得超过允许值。

$$Q = \eta_m \int_0^t \frac{U_R^2}{R} dt \quad (52-5)$$

式中 U_R ——施加在电阻上的电压，它是时间的函数；

R ——合闸电阻值；采用陶瓷线性电阻时，电阻值是温度和施加电压的函数，电阻温度系数和电压系数均为负值；采用金属电阻时，则仅与温度有关，且

表 52-1 合闸电阻的投切方式



电阻温度系数为正值;
 t_R ——每次合闸时电阻接入时间;
 n ——连续合闸操作次数;
 η ——考虑在两次合闸间隔时间内电阻散热的修正系数,由于一般陶瓷电阻器的散热时间常数都大于1h,因此,在间隔时间较短时,应取 $\eta=1$ 。

此外,还要校验电阻片的承受电压,保证最大外加电压不超过极限耐受电压,并有足够的安全裕度。

组装电阻时,应特别注意保持干净,防止电阻片受潮。

国产陶瓷电阻片主要技术参数与规格见表52-2。

2. 并联电容器 并联电容器装在主触头两端,其作用有两个,一是均压,对多断口断路器而言,常并联上千皮法的电容器,使各个断口上的电压均匀分布;二是改善瞬态恢复电压特性,提高开断能力,特别是提高开断近区故障能力。例如,SFMT型330~500kV双断口SF₆断路器,每断口上并联500pF电容器,断口电压分布不均匀系数可降到1.06,额定开断能力可达50kA。如果每个断口上并联1000pF,则可满足63kA的断流容量和近区故障开断的要求。

通常,对于瓷柱式断路器,采用价格低廉、容量大的油纸电容器,见图52-9。而对于罐式断路器,只能采用体积小的固体电容器。固体电容器常用钛酸钡或钛酸锶等材料制成。两端有金属电极,侧面用环氧树脂或绝缘涂层包封。国产固体电容器每个(片)原件的规格与参数见表52-3。根据需要,可将多个电容器元件串联成组,然后多组并联配置在灭弧断口上,见图52-10。

52.1.5. 操作功与操动系统

单压式SF₆断路器在开断过程中,操动机构不仅

表 52-2 陶瓷电阻片主要技术参数

名 称	单 位	参 数 值		
外形尺寸	外直径	mm	110	127 152
	厚度	mm	25	
	内孔径	mm	34	
技 术 参 数	密度	g/cm ³	2.5~2.7	
	比热容	J/cm ³ ·°C	2~3	
	电阻温度系数(%)	1/°C	-(0.05~0.1)	
	电阻电压系数(%)	(kV/cm) ⁻¹	-(0.5~7.5)	
	热膨胀系数	1/°C	≤7.0×10 ⁻⁶	
	短时热容量	J/cm ³	600	500 400
	短时允许温度	°C	380	
数	电阻值(单片)	Ω	2~6(可调)	

要克服运动系统的惯性力,产生加速运动,而且还要克服压气反力,提供压气功。随着断路器极限开断电流的增加,需要提高分闸速度。单个灭弧室的工作电压越高,触头间需承受的恢复电压就越高,也需要提高分闸速度,所以,单压式SF₆断路器的操动机构需要大功率,分闸操作功必须达到10³N·m数量级。目前仅对于110kV及以下中小容量断路器配备弹簧操动机构,对于单断口工作电压很高(220kV及以上)、额定开断电流很大(50kA及以上)的断路器,则只能配用液压操动机构或气动操动机构。

设计操动系统时,应力求减少传动环节。在保

表 52-3 固体电容器规格与参数

类 型	外形尺寸 (mm)	电 容 量 (pF)	tgδ (%)	工频耐压 (kV)	冲击耐压 (kV)	电 阻 (Ω)	起始放电电压 (kV)
I	φ39×16	1650±165	<0.2	30	±60	≥10 ⁴	>10
II	φ39×33	910±91	<0.2	55	±110	≥10 ⁴	>10
III	φ36×45	390±39	≤2.5	45	±90	≥10 ⁴	>30

证结构刚度的前提下,应尽量减小运动杆件质量。此外,为了减小和吸收操作冲击与振动,还必须对分、合闸运动的缓冲与定位作周密的处置。

在确定操动系统结构和触头运动特性要求之后即可根据等功能和等力矩的原则,分别将操动系统(机械运动链)的运动质量和作用力(包括驱动力和阻力)归算到动触头上,视归化质量为一自由体,用牛顿公式逐段求解所需的驱动力,然后计算操作功

$$W = \sum_{i=1}^N F_i V_i dt \quad (52-6)$$

式中 F_i ——第*i*段行程内的平均驱动力;

v_i ——第*i*段行程内的平均分闸速度;

i ——行程分段代号;

N ——分段数目。

52.1.6. 总体结构与参数

高压SF₆断路器总体结构形式有瓷柱式和罐式两种。

1. 瓷柱式断路器 如图 52-9 所示,灭弧室置于高强度瓷套中,利用空心瓷柱支承和实现对地绝缘。穿过瓷柱的绝缘操作杆把灭弧室中的动触头和

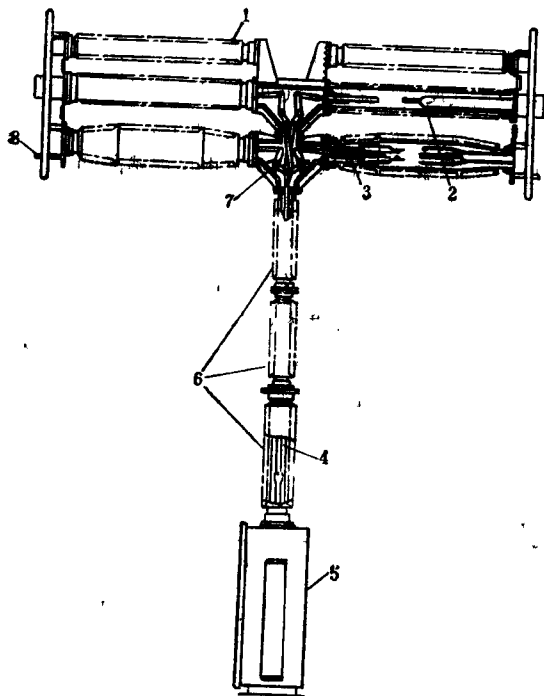


图 52-9 500kV 瓷柱式 SF₆ 断路器
1—均压电容器 2—合闸电阻 3—灭弧室
4—绝缘拉杆 5—操动机构 6—支柱瓷套
7—联杆箱 8—接线端子

操动机构的驱动杆连接起来。灭弧室和绝缘瓷柱内腔相通,充有相同压力的 SF₆ 气体。在控制柜中有密度继电器和压力表进行控制和监视。

瓷柱式 SF₆ 断路器结构简单,运动部件少,系列性好。然而,由于它的重心高,抗震能力较差,所以,使用场所受到一定限制。

我国生产的 LW1 型、FA 系列、SFM 系列、SL 系列和 OFPI 系列均属瓷柱式 SF₆ 断路器。

2. 罐式 SF₆ 断路器 如图 52-10 所示,灭弧室置于接地的金属罐中,高压带电部分由绝缘子支持,对箱体的绝缘主要靠 SF₆ 气体。绝缘操作杆穿过支承绝缘子,把动触头与机构驱动轴连接起来。在两根出线套管的下部都可安装电流互感器。

罐式断路器的特点是重心低,抗震性能好,灭弧断口间电场较好,断流容量大,可以加装电流互感器,还能与隔离开关、接地开关、避雷器等融为一体,组成复合式开关设备。缺点是罐体耗用材料多,用气量大,制造难度较大,系列化较差,因而价格较高。

我国生产的 LW 型、SFMT 系列、OFPT 系列断路器均为罐式 SF₆ 断路器。

表 52-4 和 52-5 中分别列出几种典型系列 SF₆ 断路器及其主要技术参数。

52.1.7. 使用与维护

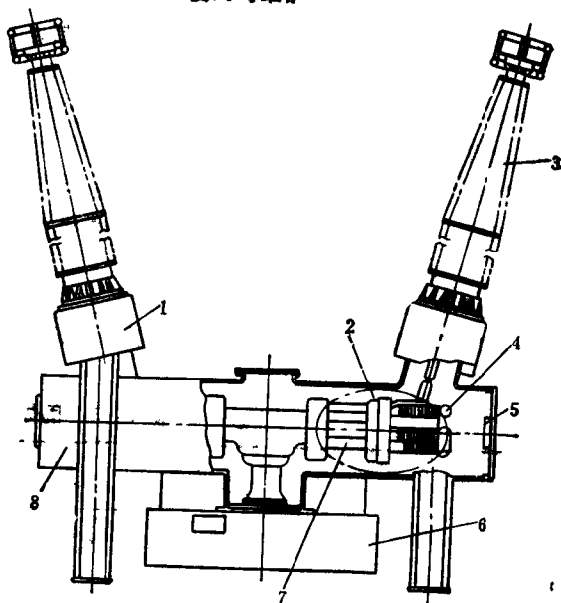


图 52-10 500kV 罐式 SF₆ 断路器
1—套管式电流互感器 2—灭弧室
3—套管 4—合闸电阻 5—吸附剂
6—操动机构箱 7—并联电容器 8—罐体

表 52-4 SF₆断路器系列组成

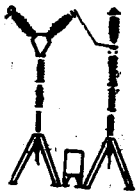
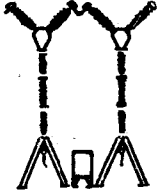
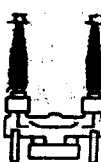
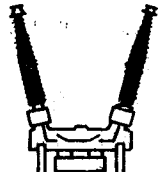
电压等级(kV)		110	220	330	500
瓷柱式	FA系列				
	SFM系列				
罐式	SFMP OPBT 系列				

表 52-5 高压SF₆断路器主要技术参数

系列型号		FA				SFMT			
额定电压 (kV)		110	220	330	500	110	220	330	500
最高工作电压 (kV)		126	252	363	550	126	252	363	550
额定频率 (Hz)		50				50/60			
额定电流 (A)		2500	3150			3150	4000		
额定开断电流 (kA)		40	40/50			40/50	40/50/63		
额定关合电流 (kA)		100	100/125			100/125	100/125/160		
雷电冲击耐压 (kV _m)	对地	550	1050	1175	1675	550	1050	1175	1675
	断口	550+103	1050+146	1175+295	1675+450	630	1200	1175+295	1675+450
操作冲击耐压 (kV _m)	对地			950	1250			950	1175
	断口			950+295	1080+450			950+295	1175+450
工频耐压 (kV)	对地	256	470	510		185	460	510	680
	断口	256	470+146	510+210	890	210	530	510+147	795
开断时间 (ms)		50				60	50	40	40
合闸时间 (ms)		90				100			
分/合闸不同期 (ms)		3/5				3/4			
额定SF ₆ 压力 (MPa)		0.6				0.5			
单级外形尺寸 (mm)	高	5000	3106	7657	8967	3600	5000	6100	7500
	宽	(900)	1100	800	1502	(3000)	1150	1120	1120
	长	(5400)	6784	5004	8220	(2200)	3600	4620	7500

1. 使用性能

(1) 载流能力 由于载流触头与燃弧触头分开, 且 SF_6 气体中不含氧气, 不会出现导体氧化的现象, 因而接触电阻稳定, 可以确保长期载流能力, 也允许相当高的短时温升。同时, 由于 SF_6 分子量较大, 比热容也大, 对流散热效果好, 因而在允许温度范围内可以通过较大的额定电流。应用指形自力触头和多接触点薄片触头后, 可以在不过分增大外形尺寸的情况下, 满足大额定电流要求。

(2) 开断与关合性能 SF_6 断路器优良的开断性能是由 SF_6 气体固有电负性和独特的热分解与导热特性决定的。从宏观上看, SF_6 电弧电压低(约为空气的 1/2), 电弧时间常数小(空气的 1/100), 断口上能承受很高的工频恢复电压和瞬态恢复电压上升率。通常, 在开断端子故障和失步时, 不需为控制瞬态恢复电压而装设分闸并联电阻。在开断空载线路时, 不会发生重燃。在开断小电感电流时, 也不会产生很高的截流过电压。在开断近区故障时, 只有在断口工作电压很高且短路电流很大的特殊情况下, 才需要装设并联电容器。

(3) 绝缘性能 SF_6 是具有强电负性的惰性气体, 且处于密闭容器中, 因此, 在正常运行状态下, 绝缘强度高, 不受环境条件的影响(除温度外), 十分稳定。开断电流后, 触头烧损轻微, 不会破坏断口电场, SF_6 分解气体和低氟化合物能迅速复合, 气体密度不会降低, 因而动态绝缘强度恢复特性上升很快, 且幅值不会下降。

(4) 电寿命 SF_6 电弧电压低, 电弧析出能量少, 在频繁操作和大电流电弧下, 触头和喷口消耗量小。一般 SF_6 断路器都能做到连续开断满容量 20 次或额定电流 2000 次、小电流 5000 次以上不检修。按累积开断电流值计算, 可以达到数千 kA 水平, 相当于 20 年, 甚至在终身服役期内, 不要检修和更换零部件。

(5) 其它实用性能 SF_6 断路器单个灭弧室工作电压很高, 每极需要的灭弧室数比少油和空气断路器的少得多, 因而占地面积大大缩小。

统计表明, SF_6 断路器运行可靠性很高, 事故率(特别是开断与关合操作事故)极低, 这是由于它的结构简单, 尤其是运动部件很少, 且灭弧与绝缘介质基本上不受外界因素影响的缘故。

此外, 操作 SF_6 断路器时, 不向大气排气, 操作噪声很低。

2. SF_6 气体状态参数特性 SF_6 气体是一种无色、无味、无毒、不燃烧的气体。其分子结构呈正八面体, 电子结构为共价键形式, 见图 52-11。 SF_6 分子量为空气的 5.1 倍, 偶极矩体积直径约为 47.7nm。 SF_6 气体状态参数之间的关系与理想气体的不同, 特别是在高压力和低温条件下差别较大, 可以用下列经验公式表示。

$$p = 0.57 \times 10^{-4} \gamma T (1 + B) + \gamma^2 A \quad (52-7)$$

$$A = 0.75 \times 10^{-4} (1 - 0.727 \times 10^{-3} \gamma) \quad (52-8)$$

$$B = 2.51 \times 10^{-3} \gamma (1 - 0.846 \times 10^{-3} \gamma) \quad (52-9)$$

式中 γ ——密度 (kg/m^3);

T ——温度 (K);

p ——压力 (MPa),

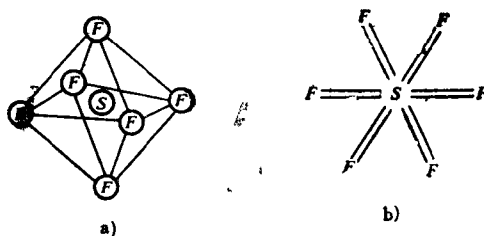


图 52-11 SF_6 分子与电子结构示意图

a) 分子结构 b) 电子结构

工程上, SF_6 气体状态参数常用图 52-12 所示的特性曲线表示。曲线表明: ① SF_6 气体密度越高, 液化温度越高。如果在环境温度低于气体液化温度时, 则需投入加热装置, 防止气体液化, 避免绝缘

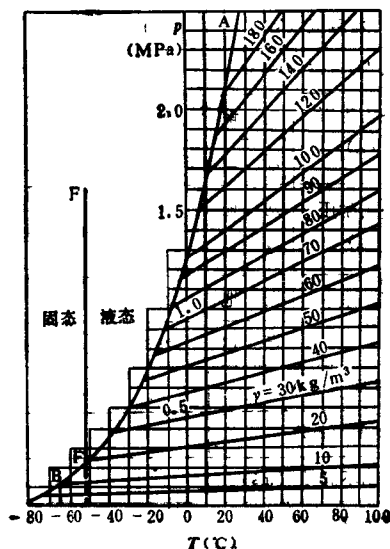


图 52-12 SF_6 气体状态参数特性

和灭弧性能的降低。②SF₆气体压力与环境温度成正比关系。如果环境温度偏离规定值（一般为20℃），则应根据特性曲线确认充气压力（或运行气体压力）。

3. SF₆电弧分解物毒性及其安全防护 纯净的SF₆气体是稳定、无毒的。国际电工委员会（IEC）和我国规定的SF₆气体纯度见表52-6。可是，在电弧高温作用下，SF₆气体会分解和电离，形成微量低氟化合物（如SOF₂、SF₄、SOF₄和SO₂F₂等），与

电极材料作用还会形成金属氟化物（如CuF₂、WF₆等）。其反应过程可用模型形式表示，见图52-13。这些物质对人体都是有害的，有些甚至是剧毒的。试验表明，电弧熄灭后，温度降低，大部分低氟化合物都将复合还原，剩余部分经吸附剂充分吸附后，对人体仍然是无毒的。但是由于某些意外的原因，例如新气体本身纯度超标、水分渗入、吸附剂失效等，这些剩余的有毒气体也可能危及人身安全。因此，在正常检修断路器或紧急处理事故时，

表 52-6 新SF₆气体纯度指标(重量比)

最大允许 标准、含量	杂质	空 气	CF ₄	水	游离酸	可水解氟化物	矿物油	SF ₆ 纯度
IEC				15ppm				—
GB		0.05%	0.05%	8ppm	0.3ppm	1ppm	10ppm	≥99.8%

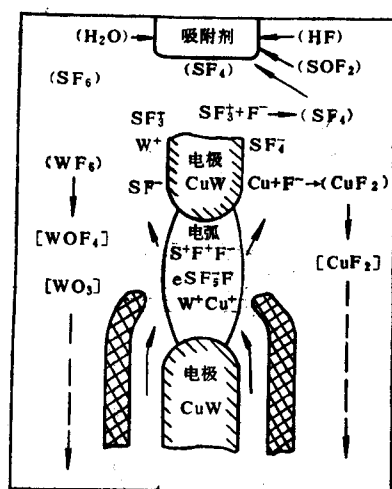


图 52-13 SF₆断路器中SF₆分解模型

必须严格按规程作好安全防护。

还应当指出，SF₆虽无毒，然而，当空气中SF₆气体浓度超过一定量时，可使人窒息，因此，现场工作人员进入地下室、电缆沟等低洼场所之前，必须充分通风换气。从人体健康的角度考虑，工作场所空气中SF₆的含量不应超过有关规定的极限值。

52.2 35kV户外SF₆断路器

52.2.1 概述

我国LW8-35型35kV户外高压SF₆断路器是1987年完成研制的，它配有CT14型弹簧操动机构。

52.2.2 设计要点

(1) 由于户外的使用环境温度下限低（-30℃或-40℃），因此断路器内所充SF₆气体的压力不能太高，要保证环境温度为下限时，SF₆气体不能液化，且要留有裕度，一般为0.3~0.5MPa。

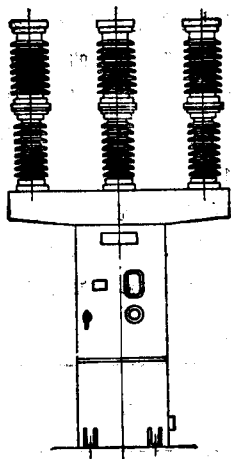
(2) 户外的环境条件比户内的严酷得多，必须考虑风、雨、灰沙、日照等作用，因此绝缘结构、机械强度、温升等方面设计及试验时裕度都较大。用材表面处理要顾及腐蚀、老化问题，特别是对于SF₆气体密封结构、操动机构箱的密封防护等要更严格。

(3) 断路器内部最好组装有供测量和保护用的电流互感器（CT），测量用的CT其精度等级要高（0.5级）。这不仅能简化结构，减小尺寸，降低成本，更主要的是减少了故障，提高了安全性。

对于LW8-35及CT14在选型、设计、制造、试验时都考虑到了这些因素。

52.2.3 典型结构

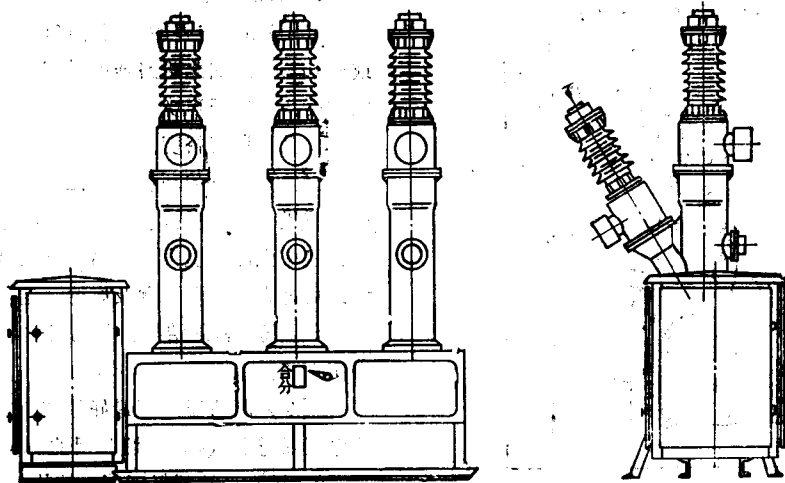
国外有许多制造公司开发户外34.5~36kV SF₆断路器。户外SF₆断路器基本上有两种结构型式：瓷柱式（见图52-14）和金属罐式（见图52-15）。我国的LW8-35属金属罐式。这种结构绝缘及灭弧介质都是SF₆气体，断口两侧装有电流互感器，外壳一般为铸铝件或由铝板焊接而成，外壳接地。金属罐式SF₆断路器的剖面图见图52-16。

图 52-14 瓷柱式户外SF₆断路器52.2.4 LW8-35型SF₆断路器技术参数

额定电压	35kV
额定电流	1600A
额定开断电流	25kA
满容量下连续开断次数	≥15次
开合电容器组容量	30000kvar
开合电抗器组容量	30000kVA
切合24km及53km空载长线	40次无重燃或复燃
机械寿命	≥3000次
SF ₆ 额定气压(20℃)	0.45MPa

52.2.5 选用参考

35kV户外SF₆断路器为80年代新开发的产品，参数高，性能好，且能满足各种特殊开断要求，维护工作量小，可10年以上不检修，但价格也比多油断路器的贵。在下列场所可优先选用。

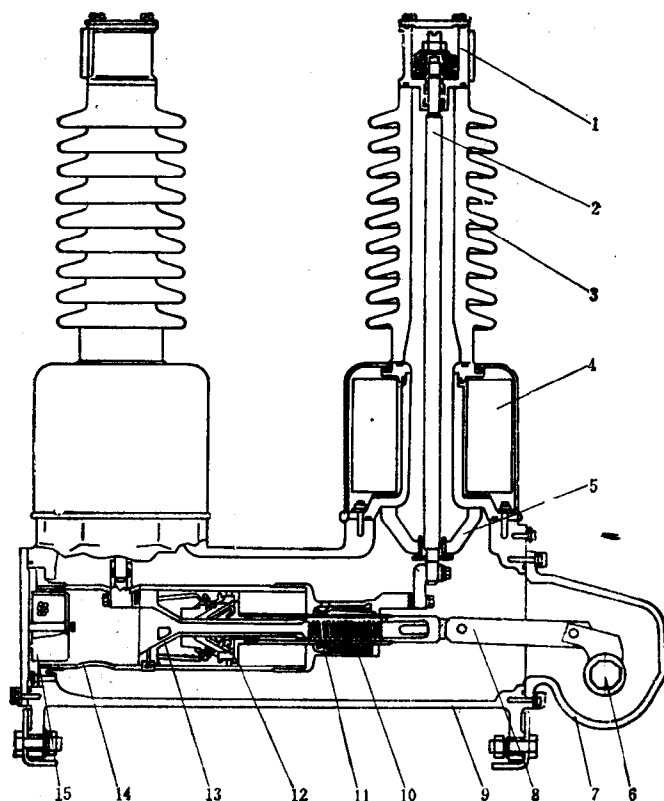
图 52-15 金属罐式SF₆断路器

- (1) 用作10万kVA主变压器断路器；
- (2) 开合大容量电容器组的断路器；
- (3) 开合大容量电抗器组的断路器；
- (4) 开合空载长线要求无重燃或复燃的断路器；
- (5) 海拔高度较高或环境条件较差的地方（只要更换出线瓷套即可）。

52.3 中压户内压气式SF₆断路器

52.3.1 概述

压气式原理在高压领域早已广泛应用，后来也用于中压领域，但是中压SF₆断路器因要求尺寸小、参数高、合闸功小，故开发有相当难度。自80年代以来，世界各主要生产中压SF₆断路器的公司对压气式SF₆

图 52-16 金属罐式SF₆断路器剖面图

- 1—出线端子 2—导电杆 3—瓷套 4—电流互感器 5—浇注绝缘子 6—操动主轴
7—传动箱 8—绝缘操作杆 9—金属外壳 10—中间触头 11—弹簧 12—活塞、动触头
13—静触头 14—绝缘支持及气缸 15—吸附剂

了断路器的导电、灭弧、触头、绝缘、密封和可靠性进行专门的研究,使中压压气式SF₆技术有了很大发展。成功地利用电弧本身能量,发展了“压气+堵塞”原理及结构上的合理改进,降低了合闸功,使压气式原理的中压SF₆断路器能够满足中压范围内的所有要求。现代中压户内压气式SF₆断路器具有如下特点:

(1) 多数采用环氧树脂浇注式绝缘外壳的全绝缘结构。

(2) 参数高。

(3) 开断性能好,开断次数多。

(4) SF₆气体为零表压时,还具备一定开断能力。

(5) 合闸功稍大,但由于压气缓冲作用,机械寿命仍相同或较长。

52.3.2 总体结构

中压户内SF₆断路器的总体

结构有金属外壳和绝缘外壳两大类。

1. 金属外壳三相分离式结构 外壳可靠接地。三相灭弧室分别装在各自的圆形金属筒内,主回路用环氧树脂套管引出。

2. 环氧玻璃布筒绝缘外壳三相分离式结构 三相灭弧室分别装在三个环氧玻璃布筒中,其结构类似中压户内少油断路器。

3. 环氧树脂浇注绝缘外壳三相分离式结构 三相灭弧室分别装在各自的环氧树脂浇注绝缘外壳中。这种环氧树脂浇注绝缘结构是当前世界上户内中压SF₆断路器的发展趋向。

BBC公司的HC型、HB型及我国的LN□-35/1600-31.5型,三相传动系统分开,便于调整,更符合我国国情。

中压户内SF₆断路器多数配弹簧操动机构。

52.3.3 压气式灭弧室的工作原理和结构

压气式灭弧室主、弧触头分开，开断过程的烧损不影响主导电回路，提高了它的可靠性。

压气式灭弧室包括动、静弧触头，气缸、活塞，回气阀及由耐弧绝缘材料制成的喷口等。压气式是靠活塞和气缸相对运动而产生压差，使气缸内受压缩的SF₆气体由喷口喷出，产生很强的吹弧作用，在电流过零时熄弧的。LN□-35/1600-31.5熄弧过程见图52-17。

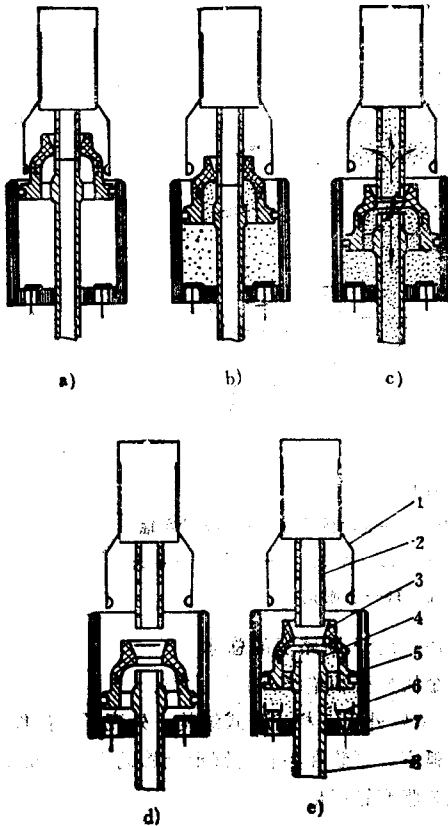


图 52-17 具有活塞动的灭弧室结构的LN□-35/1600-31.5断路器熄弧过程图

a) 合闸位置 b) 主触头分开，弧触头和喷口尚未打开，为预压气阶段 c) 弧触头分离，产生强烈气吹，在电流过零时熄弧 d) 分闸位置 e) 合闸操作
1—静主触头 2—静弧触头 3—喷口 4—动主触头 5—动弧触头 6—阀片 7—气缸 8—导电杆

压气式灭弧室从结构上又有气缸动(图52-18)和活塞动(图52-17)两类。我国的LN□-35/1600-

31.5型是活塞动。

中压户内压气式SF₆断路器的灭弧室多采用变开距结构，典型结构见图52-19。气吹方式有单吹和双吹两种。单吹，即被压缩的气体从高压力的上游区，经过动弧触头，喷口吹向低压下游区(即静

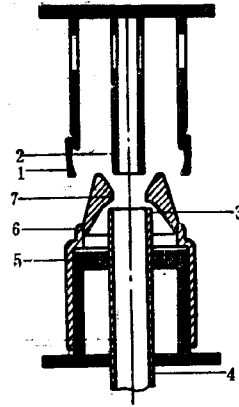


图 52-18 气缸动的压气式灭弧室
1—静主触头 2—静弧触头 3—动弧触头 4—导电杆 5—气缸 6—动主触头 7—喷口

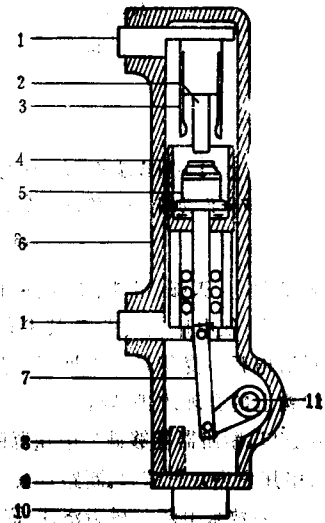


图 52-19 采用变开距结构的压气式灭弧室

1—出线端子 2—静弧触头 3—静主触头 4—气缸 5—动主触头和喷口 6—环氧树脂外壳 7—绝缘拉杆 8—吸附剂 9—底盖 10—充气阀 11—转轴

弧触头方向)，这种结构的动、静弧触头为实心，它适于在较小容量时采用。双吹，即在弧触头分开后，被压缩的SF₆气体从高压力的上游区通过动、

静弧触头的排气孔吹向低压下游区,将弧根拉入弧触头孔内,在喷口打开后,被压缩的SF₆气体也经过喷口吹向低压下游区。这种结构熄弧效果较好,适用于较大容量时采用。

52.3.4 设计要点

中压户内压气式SF₆断路器的设计关键是灭弧室的设计,即气缸、活塞、喷口的设计及行程、开距的选择:

1. 气缸和活塞 气缸(或活塞)直径是一个重要尺寸。在电压、开断电流及充气压力一定的情况下,它与行程有关,气缸直径小,行程可大些,气缸直径大,则行程可小些,即必须保证熄弧所需的气量,而所需气量的多少与电压及开断电流有关。

现代中压户内压气式SF₆断路器的气缸直径因容量和行程不同,一般为 $\phi 60 \sim \phi 110\text{mm}$,行程一般为75~125mm。

2. 喷口 材料要求具有良好的绝缘性能,并应耐电弧、耐腐蚀,一般采用聚四氟乙烯或含三氧化二铝或氮化硼的聚四氟乙烯复合材料制成。

喷口喉部尺寸主要与开断电流大小有关,其截面积一般为气缸截面积的1/10~1/20。喷口后腔扩张角一般取 $0^\circ \sim 15^\circ$ 。

3. 动、静触头 电弧产生于动、静弧触头之间,故应采用耐电弧材料,一般采用铜20%、钨80%的铜钨合金。弧触头是灭弧室的重要组成部分。它的形状、尺寸的设计要考虑由于电弧烧损使它形状、尺寸发生变化,在规定开断次数之内,应不影响断路器的开断性能。

对双吹结构,动、静弧触头均有排气孔,该孔大小与开断电流有关。一般导电杆上排气孔截面应大于动触头排气孔截面。

4. 行程、超行程、预压缩 行程 行程与燃弧时间及分闸速度有关,应保证在最长燃弧时间内熄弧时,行程不能走完。行程减超程为开距,所以它还应保证断口绝缘。对双吹结构,超程即是预压缩行程,它影响刚分速度和开始吹弧时的气吹压力。预压缩阶段的压力计算见清华大学编写的《高压电器原理和应用》一书。

对中压压气式SF₆断路器,一般预压缩行程为总行程的35%~45%。

52.3.5 技术参数和性能

世界各主要国家生产的中压户内压气式SF₆断路器的主要参数和性能见表52-7。

52.4 SF₆自能灭弧断路器

52.4.1 SF₆自能灭弧系统概述

SF₆自能灭弧原理就是利用电弧本身的能量实现灭弧的功能。其中又可分为下列几种:

1. 旋弧式 在电弧电流的回路中串联一线圈,电弧被置于线圈磁场中,并使电弧电流与磁力线相交,在洛伦兹力的作用下,电弧便旋转起来,与SF₆气体发生相对运动,从而熄弧。它又分径向电弧旋转和纵向电弧旋转两种,见图52-20和52-21。

2. 喷口气吹式 喷口上游的SF₆气体被电弧加热,压力升高,由于弧柱将喷口堵塞,形成上、下游压力差,当电流过零时,产生强烈气吹而灭弧,见图52-22。

3. 综合自能式 同时采用旋弧和喷口气吹的方式,见图52-23。

52.4.2 设计要点

SF₆自能灭弧技术正处于发展阶段,理论研究尚欠成熟,特别是其结构型式繁多,尚未总结出统一的设计方法。以下只能提出一些定性的原则。

1. 线圈设计

(1) 线圈匝数随额定开断电流的增大而减少,随额定电压的增高而增加。

(2) 在纯旋弧灭弧室中,匝数稍多些,在综合式中可稍少些。

(3) 线圈的每匝截面积。对于长期工作时不接入的线圈,其截面积只需按动热稳定核算,对于长期工作时接入的线圈,则还需校核温升。

(4) 匝间应予绝缘,但绝缘强度不需太高。

(5) 线圈与电弧相对位置视具体结构布置而定。对于径向电弧的旋弧式,应将电弧置于线圈中段;对于纵向电弧的旋弧式,应尽可能使电弧靠近线圈。目的都是为使电弧所在空间的磁场强度尽可能大些。为了同样的目的,还可在电弧不会到达的磁路上,设置磁导率较高的材料,如铁。

必须使电弧电流方向与磁力线方向相交,且夹角越接近 90° 越好。

2. 电弧转移问题 凡是长期工作时不接入线圈的结构,在开断时,都有如何使电弧迅速转移到弧环上,以使线圈尽早通电的问题。此时,可利用作用在电弧上的电动力,将电弧甩到弧环上,或增加动、静触头间弧柱的电压降,即作用于线圈两端的电压降,来使线圈电流尽快增长。