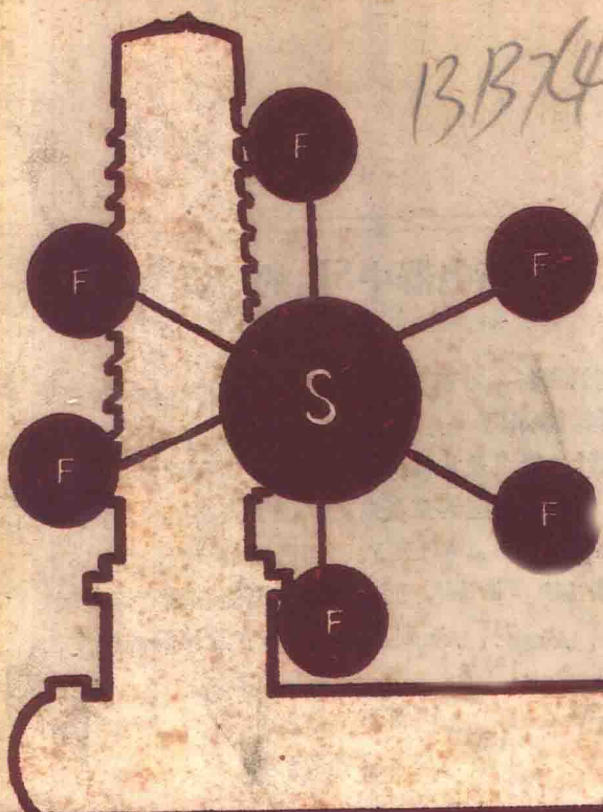


13B748/17



15.105  
29

# 美国关于高压电器中SF<sub>6</sub>的研究

中國科學技術情報研究所

美国关于高压电器中SF<sub>6</sub>的研究

中国科学技术情报研究所編譯出版  
北京朝内大街117号  
中国科学技术情报研究所印刷厂印刷  
全国各地新华書店发行

\*

850×1168  $1/32$   $1^{12}/32$ 印張 48280字  
1960年1月北京第1版 1960年1月北京第1次印刷  
印数：00001—03100册  
科研版：2—00393  
定 价： 0.20元

## 美國关于高压电器中SF<sub>6</sub>的研究

根据我們所找到的資料，对新型絕緣和滅弧介質——SF<sub>6</sub>的性能和充SF<sub>6</sub>高压电器結構，作了一个比較全面的介紹，綜述中还談到了充SF<sub>6</sub>高压电器設計的特点及其維護与运行，并对美國所制造的充SF<sub>6</sub>高压变压器和法國所制造的充气電纜，作了簡略的介紹。

1958年美國西屋公司所制造的充SF<sub>6</sub>高压断路器，电压已达230千伏，断流容量已达15000兆伏安，而且这种断路器結構有可能發展成为35—460千伏电压的断路器系列。因此，这台断路器的制成，使SF<sub>6</sub>在高压电器中的应用，已進入了一个新的階段。

本綜述可供高压电器設計、制造和科研部門的工程技術人員参考。由于水平的限制，希望讀者提出指導性的意見。

# 目 錄

第一章	前言	(1)
第二章	SF <sub>6</sub> 的性能	(2)
§ 1	SF <sub>6</sub> 的化学和物理性能	(2)
§ 2	SF <sub>6</sub> 的絕緣性能	(3)
§ 3	SF <sub>6</sub> 的滅弧性能	(4)
§ 4	SF <sub>6</sub> 的滅弧原理	(6)
§ 5	电弧对SF <sub>6</sub> 的分解	(7)
§ 6	SF <sub>6</sub> 的介質恢复速率	(8)
第三章	充SF <sub>6</sub> 高压开关設計的特点	(9)
§ 1	充SF <sub>6</sub> 高压开关的結構設計	(9)
§ 2	充SF <sub>6</sub> 高压开关的滅弧裝置設計	(10)
第四章	充SF <sub>6</sub> 高压开关結構	(13)
§ 1	115仟伏充SF <sub>6</sub> 高压負荷开关	(13)
§ 2	115仟伏充SF <sub>6</sub> 高压断路器	(15)
§ 3	充SF <sub>6</sub> 高压接地开关	(20)
§ 4	帶有充SF <sub>6</sub> 、电流互感器的 138 仟伏空气断路器	(21)
§ 5	46仟伏充SF <sub>6</sub> 高压断路器	(23)
§ 6	230仟伏充SF <sub>6</sub> 高压断路器	(27)
第五章	充SF <sub>6</sub> 高压开关的充气与运行	(33)
第六章	充SF <sub>6</sub> 高压变压器及高压电纜	(35)
§ 1	10000仟伏安充SF <sub>6</sub> 高压变压器	(35)
§ 2	7500仟伏安蒸發冷却变压器	(35)
§ 3	90仟伏充气电纜	(37)

参考文献

## 第一章 前言

目前，一般开关設備所普遍采用的滅弧介質还只有空气和絕緣油兩種。随着电网的發展，对于高压开关开断能力的要求也就愈高，因此，選擇更好的滅弧介質，以提高高压开关的开断能力，就已成为当前高压电器研究、制造和运行部門所需要解决的問題。

早在20年前，化学家們就已知道了六氟化硫（ $\text{SF}_6$ ）气体的性能，然而直至最近几年才被高压电器設計師們所利用。开始时 $\text{SF}_6$ 气体是被应用來作为絕緣介質的，由于它具有極优良的滅弧性能，因此，今天它已發展成为第三种主要的滅弧介質了。

目前，关于 $\text{SF}_6$ 气体的滅弧理論，虽然还是处在探索階段，然而它的实际应用已逐漸地广泛起來。自1953年开始，美國西屋公司就应用 $\text{SF}_6$ 气体作为滅弧介質，先后制造了115仟伏的高压負荷开关；高压接地开关和46—230仟伏的高压断路器。

$\text{SF}_6$ 气体除了应用在高压开关中，作为滅弧介質外，并已开始应用在高压变压器和高压电纜中，作为冷却和絕緣介質。美國西屋公司所制造的充 $\text{SF}_6$ 高压变压器，容量已达10000仟伏安；美國通用电气公司制造了容量为7500仟伏安的蒸發冷却变压器；法國制造了90仟伏充气电纜。

虽然 $\text{SF}_6$ 气体剛应用于高压設備中，由于它具有优越的絕緣和滅弧性能，絲毫不含碳質，以及便于携帶和更換等特点，給高压电器制造技術提出了一个新的方向，特別为制造超高压大容量断路器創造了有利条件。以1958年美國西屋公司制造的230仟伏，15000兆伏安充 $\text{SF}_6$ 高压断路器來說，只要改变滅弧室滅弧元件的个数，放大断路器鋼筒的直徑和長度，提高絕緣等級的配合，就可以解决330、460仟伏或更高一級电压断路器的設計和制造問題。

总之，对 $\text{SF}_6$ 气体性能成功的研究，給高压电器制造事業开辟

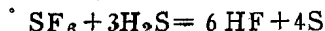
了新的道路。

## 第二章 SF<sub>6</sub>的性能

### § 1. SF<sub>6</sub>的化学和物理性能

SF<sub>6</sub>是一种惰性，无毒，无色，无味和非燃性的卤素化合物气体，具有很高的介質强度和很好的滅弧性能。因此，它是一种很有应用价值的物質。

SF<sub>6</sub>由元素生成，并放出大量的热（262 仟卡/克分子）。由于它具有突出的化学惰性，因此，SF<sub>6</sub>就顯著地不同于大多数的其他卤化硫。SF<sub>6</sub>在水中極少溶解，微溶于醇。SF<sub>6</sub>不僅不和水作用；不和氢和氧互相作用；而且不和NaOH（氢氧化鈉）及HCl（氯化氢）溶液作用。只有在高温时，它才被金屬鈉分解。当加热到400°C时，SF<sub>6</sub>和H<sub>2</sub>S（硫化氢）按下式產生化学反应：



SF<sub>6</sub>的密度約等于空气的5倍，比重为1.91，分子量为146.07，沸点为-64°C，加压时熔点为-51°C。在大气压力下，气温降到-62°C时，SF<sub>6</sub>仍能保持为气体状态。在中等压力下，SF<sub>6</sub>气体

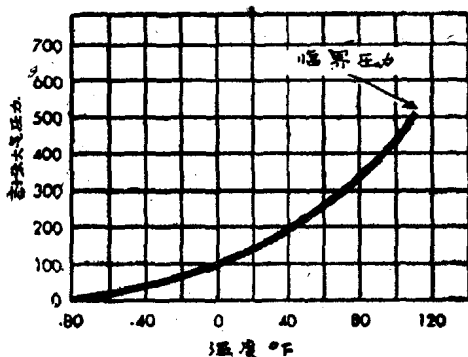


圖 1. SF<sub>6</sub> 气体的压力与温度的关系曲线。

可以液化，同时，可以象貯藏二氧化碳一样，在蒸汽压力下作为液体貯藏起来。图1为SF<sub>6</sub>气体的压力与温度的关系特性。

## § 2. SF<sub>6</sub>的絕緣性能

SF<sub>6</sub>的介質强度很高，并且随着压力的增长而增长。在正常大气压力下，SF<sub>6</sub>的介質强度約等于空气的2—3倍，而在3个大气压时，就与变压器油的介質强度相近。

某些研究报告指出，在非均匀电场中，SF<sub>6</sub>的正向击穿电压与压力的关系特性有一个極好的最大值，而純氮并没有这样的最大值，这种独特的特性如图2所示。从图中可以看出，虽然正向击穿电压有一个最大值，然而正向冲击电压，在相应的压力下还是比较低的，僅为正向击穿电压的一半。同时，SF<sub>6</sub>的正向击穿电压比氮

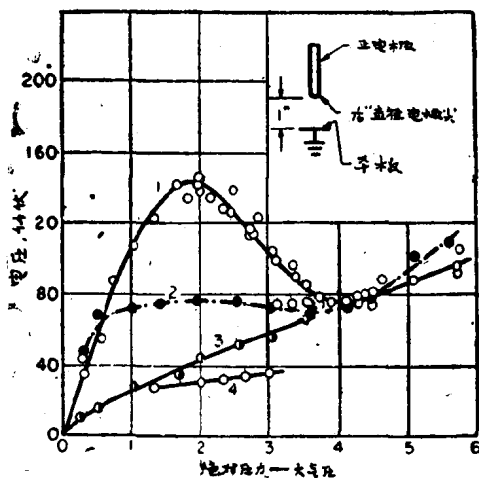


图2. 在30.47厘米的鋼箱中，温度为25°C时的击穿电压和电量发生电压与气体压力的关系特性。

- 曲线1为SF<sub>6</sub>正向击穿电压；
- 曲线2为SF<sub>6</sub>正向冲击击穿电压；
- 曲线3为SF<sub>6</sub>正向电量发生电压；
- 曲线4为氮正向击穿电压。

要高 6 倍。在最大值区域内，电晕发生电压比击穿电压要低。

在 2 个大气压力下所获得的结果如图 3 所示。对于  $SF_6$  来说，总的击穿电压在电晕发生电压（43 千伏）以下时，保持为一常数。超过这个数值，总击穿电压就随着正向偏压的增加而增加。这样，在电晕发生电压以上的区域中，空间电荷效应就随着正向偏压的增加而增加。

对于空气来说，在 2 个大气压时，情况就完全不同（见图 3），总击穿电压是在电晕发生电压的上下两边，并且随着偏压的增加而减少。冲击击穿电压约为正向击穿电压的 2 倍。一个大于 1 的击穿比对于许多气体来说是正常的。

这就说明在击穿前，当电晕产生的时候，电晕的存在就提高了击穿值，并使得正向击穿电压产生了最大值，这一点可以从图 2 中看出来。

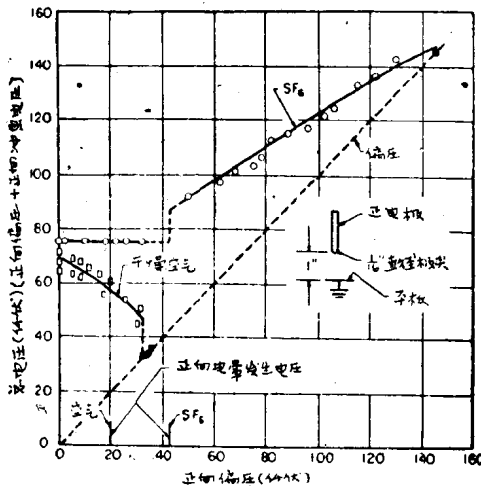


图 3. 在温度为 25°C 和 2 个绝对大气压力下，总击穿电压与正向偏压的关系特性。

### § 3. $SF_6$ 的灭弧性能

灭弧性能是  $SF_6$  最突出的特点，在一个简单开断的灭弧室中，



SF<sub>6</sub> 的滅弧能力較空气大100倍 (如图4所示)。当用SF<sub>6</sub>吹弧时，甚至在低的速度下，它的效应比簡單开断要大数百倍以上。

研究資料表明，在高电压和高压力下，SF<sub>6</sub> 所能开断的电流数值很少受电压的限制 (如图5所示)，其开断容量隨着电压的增加而增加。这样就提供了 SF<sub>6</sub> 在高压力下开断高电压負荷的可能性。

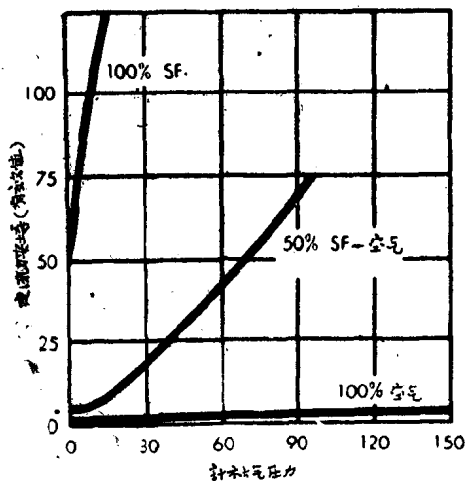


圖4. 电压为2300伏时，SF<sub>6</sub>在7.62厘米簡單开断間隙中的开断特性。

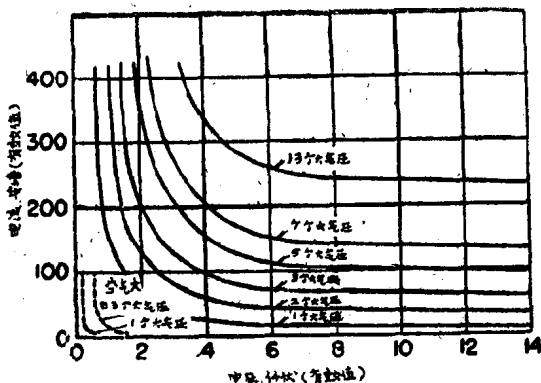


圖5. 在給定压力下，SF<sub>6</sub>在7.62厘米簡單开断間隙中的开断特性。

#### § 4. SF<sub>6</sub>的灭弧原理

由于SF<sub>6</sub>气体是一种新型的絕緣和滅弧介質，目前还刚开始在电器中使用，因此，关于它的优越滅弧作用的理論分析，还处在探索階段。

科学家們認為，SF<sub>6</sub>之所以有这样优越的滅弧作用，是由于它在放电时，獲得电子而形成負离子效应。SF<sub>6</sub>是一种最好的負电性气体，这种气体的某些分子能够很快的吸引自由电子而結成帶負电的离子，这时就產生了大量的SF<sub>6</sub>和SF<sub>5</sub>离子，而这些离子对于導电的作用是十分迟緩的，亦即当自由电子被SF<sub>6</sub>气体分子捕捉之后，电弧的电導会迅速地降低，因而就促進了滅弧的可能。电弧電導的降低，一般是用滅弧介質的时间常数來表示的，图6給出了

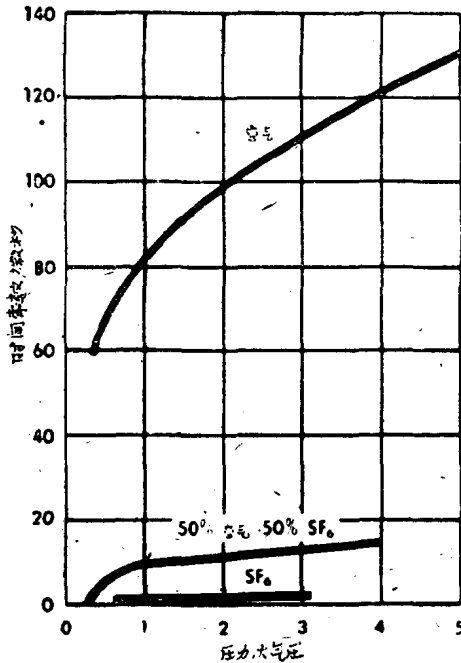


图6. SF<sub>6</sub>在簡單开斷情况下的时间常数曲线。

$\text{SF}_6$  气体的时间常数和压力的关系特性，从图中可以看出， $\text{SF}_6$  的时间常数比空气的低得多。

$\text{SF}_6$  的这一特性，对于熄滅交流电弧是非常有利的。一般說來，交流电弧的熄滅过程可以分为两个阶段：一为交流电流經過零点以前的能量平衡阶段；一为經過零点以后的介質强度恢复阶段。在前一阶段里，电弧必須具有一个較低的阻抗使电流通过，这时，滅弧介質应使电弧能量減低的速度与电流强度減低的速度相适应，并保証电弧在电流經過零点时損失全部能量。而在零点以后，滅弧介質又应使电弧通道極迅速地由导体变为絕緣体，以防止間隙再击穿。实际上，滅弧过程的第二阶段是第一阶段的繼續，在去离子化的电弧空間里，仍然遺留着若干第一阶段的殘余电導。这些电導可能使再击电压引起一个微小的弧柱泄漏电流。要使电弧熄滅，必須使电弧柱繼續电离的电弧能量輸入的速度远低于电弧能量散出的速度。 $\text{SF}_6$  在电弧通道中用以改变电導的低时间常数特性，对于有效地熄滅大容量电弧是極有利的。在泄漏电流消失后，間隙介質强度必須極快地建立，以抵抗暫态恢复电压。

### § 5. 电弧对 $\text{SF}_6$ 的分解

在  $\text{SF}_6$  气体作为滅弧介質使用的初期，人們害怕在  $\text{SF}_6$  气体滅弧过程中，电弧分解產物会产生嚴重的腐蝕作用。后来通过許多研究和試驗工作指明，这种顧慮是多余的。在开断大容量电弧时， $\text{SF}_6$  的分解損失并不大。虽然分解的速度随着电弧能量的增加而增加，但是由于分解的气体大部份又很快地再度結合成  $\text{SF}_6$ ，因此損失是很小的。在分解后也产生低級的  $\text{SF}_2$  及  $\text{SF}_4$  气体，这些气体虽然也是无毒的，但并不穩定，而且与空气中水份接触时，易于生成二氧化硫或氫氧化氟酸。如采用純淨的  $\text{SF}_6$  气体，并加入少許（約 1—2 公斤）活性矽土，則既可提高气体的干燥程度，又可吸收分解的气体產物。在滅弧过程中，至今未發現过有毒的  $\text{S}_2\text{F}_{10}$ 。但分解出的气体与开关触头作用，会产生一些金屬氟化物，散布在滅弧室上，

形成極細的粉末。这种氟化物粉末的电阻很高，所以對於电气絕緣的影响不大，不过开关触头必須制成帶有自动清潔裝置的結構，以防止在接觸面上散布这种金屬氟化物的粉末。

另外， $SF_6$  气体不含有任何碳質，在滅弧过程中不会產生任何碳化物，因此，开关結構的設計可以不考慮導電碳化物停留在絕緣体上的麻煩。

### § 6. $SF_6$ 的介質恢复速率

對於交流滅弧介質的基本要求，主要的不是高介質强度，而是介質强度的高恢复速率。在  $SF_6$  簡單开断滅弧室中，开断电流达几百安的試驗研究資料，給出了在电弧消失之后，弧隙介質强度恢复的情况。在这种間隙中，介質强度的迅速恢复，說明采用  $SF_6$  气体作滅弧介質，甚至是在簡單开断滅弧室中，也能很好地开断电容性

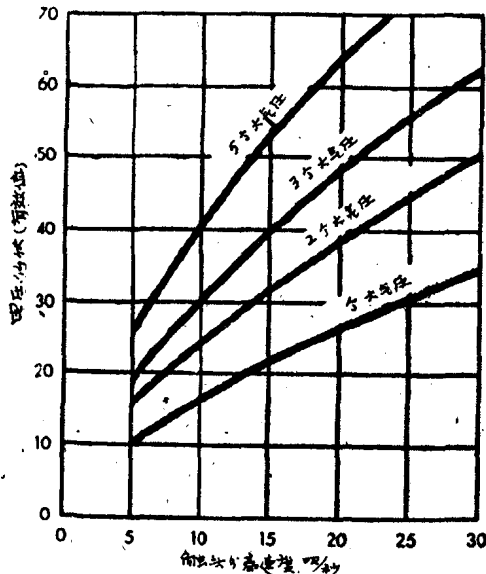


圖7. 在  $SF_6$  簡單开断滅弧室中，开断电容性充电电流达150—350安时，極限电压（計算值）与触头分离速度的关系特性。

充电电流。开断电流达几百安的电弧，其全部去游离的时间少于1微秒，因此，可以认为介质恢复速率是冷弧间隙中气体密度的函数。

在介质强度恢复试验的基础上，导出了计算 $SF_6$ 简单开断灭弧室介质强度恢复速率的经验公式。其公式如下（公式推导见文献19）：

$$E = 6.55 P^{0.56} S^{0.67} \text{ 仟伏 (有效值)}$$

式中E——临界电压；

P——气体绝对大气压力；

S——触头分离速度，厘米/微秒。

由上式直接表示出，在开断电容性充电电流为350安以下时，气体压力和触头分离速度对极限电压的影响（其特性曲线见图7）。它表明弧隙介质强度恢复速率是气体压力、弧隙长度和电弧熄灭后持续时间函数的函数。

## 第三章·充 $SF_6$ 高压开关设计的特点

### §1. 充 $SF_6$ 高压开关的结构设计

充 $SF_6$ 新型高压断路器的设计，是在高压油断路器及空气断路器设计的基礎上進行的，它吸取了这些断路器的优点，如很好地采用了油断路器的桶形结构或空气断路器的圆柱形瓷瓶结构（包括套管式电流互感器，以及所有触头与断路器操作机构的机械联接等）。

新型断路器的设计，克服了油断路器或空气断路器的某些缺点。充 $SF_6$ 断路器的优点是：动作迅速；消除了燃烧与爆炸的可能性；要求的基础轻；辅助设备少等。这些特点就使得断路器造价低廉，维护简单，修理方便。

由于 $SF_6$ 气体的价格比压缩空气要高，因此，充 $SF_6$ 高压开关就不象空气断路器那样，将气体排除到大气中，而是采用完全的自

身密封結構。这样虽然導致了若干密封問題，然而总的好处，就大大地补偿了附加困难和添加密封結構的价值。例如最明顯的好处是：完全沒有燃燒和爆炸的危險，并大大地減少了断路器开断时的声响。而且，密封結構，也避免了潮气的侵入，这个潮气將產生有害的腐蚀作用，同时也將增加絕緣表面的电漏洩。

在已經制成的充 $SF_6$ 高压开关中，第一台断路器是采用瓷瓶密封裝置，而在最近制造的230仟伏15000兆伏安断路器中，設計师們采用了全鋼的油断路器桶形結構。

虽然充 $SF_6$ 高压开关的压力緊固密封，在制造初期是一个問題，而現在已滿意地解决了。在1953年制造的高压負荷开关中，滅弧室內的气体是很少的，因此即使有很小的漏洩，也会使压力很快地降低。在設計这种开关时，最困难的問題之一，是气体經過垫圈和鑄件的气孔向外擴散。在采用了鑄件灌注热硬樹脂和塑膠橡皮密封之后，这些困难就可以消除了。应用这种結構的开关，可以滿意地工作若干年。但是可能發生的若干压力損失，仍然是有可能被观察到的，这样，就設計了一种新型低温度的聚氯丁合成橡膠垫圈，这种垫圈的气体渗透性比塑膠橡皮垫圈要小百分之一。

## § 2. 充 $SF_6$ 高压开关的滅弧裝置設計

前面已經談到， $SF_6$ 完全不含碳質，这就非常有利于滅弧裝置的設計。例如，油断路器滅弧室就必須小心地設計，以避免水平方向的絕緣物表面有碳混合物的沉積。而在 $SF_6$ 气体中，由于完全沒有由电弧所形成的導电性混合物，这就允許充 $SF_6$ 高压开关的設計有很大的自由性。

充 $SF_6$ 高压开关滅弧裝置的結構部件，可以由有足够电气强度和机械强度的任何材料制成。然而，有机絕緣如反白（fiber）或云母，不應該安置在滅弧室的电弧通道中，以免 $SF_6$ 气体为絕緣物所分解的不純雜質所冲淡。滅弧室的滅弧噴嘴，一般是由 Teflon 材料制成的，它能很好地抵抗电弧，同时產生的气体污物也很少。

設計SF<sub>6</sub>滅弧裝置時所需要考慮的範圍，是由簡單開斷觸頭到氣體吹弧設計。由於SF<sub>6</sub>氣體具有優越的滅弧能力，所以在滅弧時，滅弧噴嘴所需要的气体流是相當小的。一般在SF<sub>6</sub>中，由氣體流所產生的壓力僅為空氣滅弧時所需數值的1/2到1/3。

對於低容量的滅弧裝置來說，簡單開斷滅弧室是有效的。1956年所製造的快速接地開關就是採用簡單開斷滅弧室，如圖8所示。

為了執行大容量的開斷任務，就需要採用氣流吹弧型滅弧裝置。滅弧時所需要的气体流，可以由下列方法產生：

一、由輔助電弧所產生的氣體熱膨脹：運行經驗證明，這種方法能有效地開斷大約為5000安的電流，並已用於115千伏及46千伏的斷路器中，如圖9所示；

二、採用一個機械活塞或噴嘴：這種方法適合於20000至25000安電流的開斷任務。其方法就是在動觸頭上安裝一個活塞。它已滿意地應用於V L B型負荷開關中，如圖10所示；

三、採用一個閉合的氣體系統，使氣體流在壓力作用下，經過滅弧通道來吹弧；這種方法適用於大容量的開斷任務，包括50000安或50000安以上的電流。計劃用於115千伏10000兆伏安到460千伏40000兆伏安的斷路器中，如圖11所示。

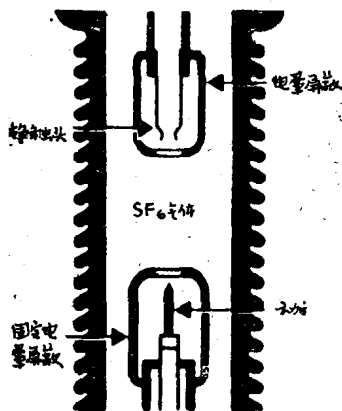


圖8. 快速接地開關用的簡單開斷滅弧室。

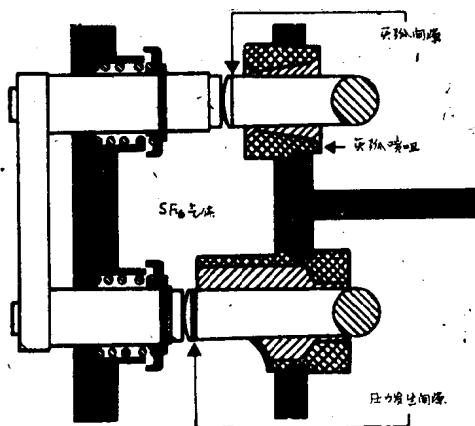


圖9. 有二个間隙串联的滅弧室。

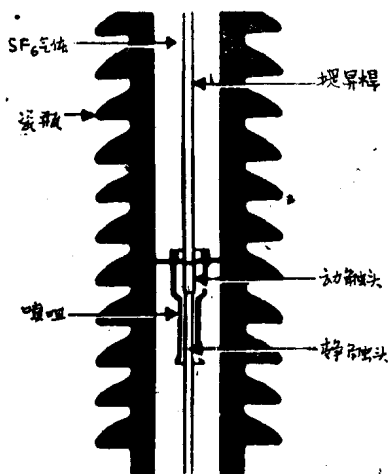


圖10. 动触头上安置有一个活塞和一个由Teflon材料制成的喷嘴，用以当触头开断时形成气体流。



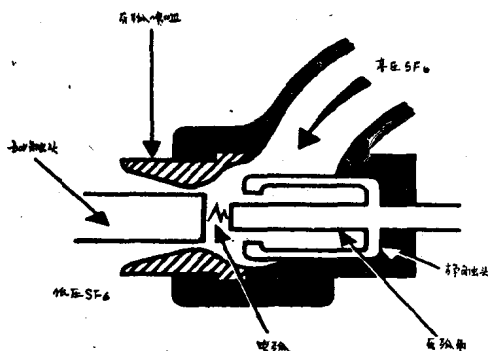


圖11. 大容量滅弧室, 当触头动作时, 高压 $\text{SF}_6$ 经过滅弧喷嘴形成气体流。

## 第四章 充 $\text{SF}_6$ 高压开关結構

### § 1. 115 仟伏充 $\text{SF}_6$ 高压負荷开关

1953年美國西屋公司应用 $\text{SF}_6$ 作为滅弧介質, 制造了一种戶外用負荷开关, 它是第一台充 $\text{SF}_6$ 气体的高压开关, 其額定电压为115仟伏, 額定电流为600安。

这种負荷开关是由一个戶外用隔离开关和一个滅弧裝置組成的(見图12)。隔离开关有两个固定支柱式絕緣柱。主靜触头和滅弧裝置是安置在其中的一个絕緣支柱上; 而在另外一个絕緣支柱上則安置有主閘刀和輔助閘刀, 主閘刀和輔助閘刀都可以在垂直平面內旋轉。閘刀的运动是由隔离开关的第三个可旋轉的絕緣支柱來操縱的。

滅弧裝置安置在一个密封的圓柱形瓷瓶中, 其中充以 $\text{SF}_6$ 气体, 它与輔助閘刀串联而形成負荷开关的滅弧迴路。滅弧裝置是由滅弧动、靜触头, 活塞和噴嘴等部件組成。活塞和噴嘴安裝在动触头桿上; 噴嘴包圍着动触头。