

真空开关

ZHENKONG KAIGUAN

王季梅 吴维忠 魏一钧 刘文进 编著

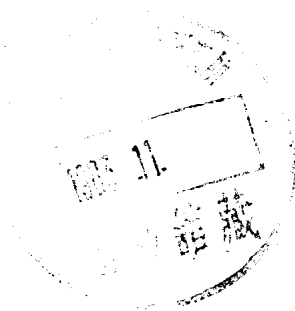
机械工业出版社

71.734

125

真 空 开 关

王季梅 吴维忠 魏一钧 刘文进 编著



机 械 工 业 出 版 社

1110368

真空开关是一种新型的开关设备,本书比较全面地介绍了真空开关的作用原理、实际结构、制造工艺、过电压、试验方法和真空开关的应用。在附录中介绍了典型真空开关的主要技术参数以及真空开关配用的熔断器。

本书可供从事真空开关设计、制造、运行和维护人员参考,也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

真 空 开 关

王季梅 吴维忠 编著
魏一钧 刘文进

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $13 \frac{1}{4}$ · 字数 292 千字

1983年9月北京第一版·1983年9月北京第一次印刷

印数 0,001—7,300 · 定价 1.65 元

*

统一书号: 15033 · 5499

前 言

真空开关是一种新型的开关设备，它在我国已有十余年生产和使用历史。为了适应真空开关发展的需要，我们根据国内外有关资料及十多年来从事真空开关研制的一些经验编写了本书。力求通过本书比较系统地介绍真空开关的作用原理、实际结构、制造工艺、过电压及其保护、试验方法以及真空开关的应用。

本书在编写过程中得到西安高压电器研究所和西安交通大学的大力支持和帮助，清华大学电机系高压教研室、4401厂、煤炭科学研究院开采所等单位为本书提供了宝贵资料。本书初稿曾寄给有关专家征求意见。楼家法、张节容、王其平、陆首群、毛震环、陈熙、张兆链、马锦柱、喻立贵、尹锦泉、郑声豪、郭丰友、王德元、陈金生等同志详细审阅了初稿并提出了宝贵意见，吉嘉琴、王遵周和李建基等同志对书稿进行了全面审查，在此一并表示感谢！

由于我们水平有限，不妥和错误之处在所难免，希望读者指正。

目 录

绪论	1
第一章 真空中的绝缘特性	4
第一节 真空间隙的电击穿	4
第二节 影响真空击穿的各种因素	11
第三节 真空击穿的概率特性	23
第四节 固体绝缘介质在真空中的表面闪络	26
第二章 真空电弧	31
第一节 真空电弧的产生	31
第二节 真空电弧的形态	33
第三节 真空电弧的特性	37
第四节 交流真空电弧	65
第五节 交流真空电弧的熄灭	73
第三章 真空灭弧室的结构	89
第一节 真空灭弧室的分类	89
第二节 外壳	89
第三节 屏蔽罩	94
第四节 触头	103
第五节 触头材料	119
第六节 触头材料的含气量问题	130
第七节 波纹管	138
第八节 其它零件	143
第九节 真空灭弧室举例	149
第四章 真空灭弧室的制造工艺	155
第一节 真空灭弧室的工艺流程	155
第二节 零部件的清洁处理和真空卫生	158

第三节	金属零件的焊接	162
第四节	玻璃、陶瓷与金属的封接	166
第五节	排气	169
第六节	真空灭弧室的真空度测量及质量检查	175
第五章	真空开关的操动系统	180
第一节	概述	180
第二节	真空开关的传动机构	183
第三节	真空开关的操动机构	192
第四节	真空开关操作时的机械振动及其抑制	209
第六章	真空开关的总体结构及其主要零部件的设计	223
第一节	真空开关总体结构概述	224
第二节	真空开关的总体布置	227
第三节	真空开关主要零部件的设计	232
第四节	真空开关有关参数的确定	252
第五节	真空开关总体结构典型示例	258
第六节	组合真空开关和真空开关成套配电装置结构示例	267
第七章	操作过电压及其抑制	275
第一节	截流过电压	276
第二节	多次重燃造成的电压级升	283
第三节	开断容性电流时的过电压	295
第四节	操作过电压的抑制	301
第八章	真空开关的试验	308
第一节	概述	308
第二节	机械性能试验	313
第三节	载流性能试验	327
第四节	绝缘性能试验	330
第五节	环境适应性试验	334

第六节 开断与关合能力试验	334
第九章 真空开关的特性综述及应用	348
第一节 真空开关的电特性	348
第二节 真空开关的寿命和机械特性	354
第三节 真空开关的应用	359
第四节 真空开关的经济性	375
第五节 真空开关的检修与维护	378
附录	386
附录一 国产真空开关主要技术参数	386
附录二 一些国外真空开关的参数及结构	390
附录三 真空接触器配套用电力熔断器的简介	398
参考文献	404

绪 论

真空开关是在真空中进行电流开断的开关设备，它的主触头位于图 0-1 所示的真空灭弧室中，真空灭弧室内部保持 $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{ Torr}$ 的高真空。它的外壳 5 是用玻璃、陶瓷或微晶玻璃等绝缘材料制造的，两端焊着金属盖板 2 和 6。静导电杆 9 穿过静端盖板 6 的中心。静触头 10 即焊在静导电杆的端头。动导电杆 12 的端头焊着动触头 11。动导电杆和拉杆 1 焊成一体，通过波纹管 13 和动端盖板的中心孔伸出真空灭弧室外。波纹管的一个端口与动导电杆焊在一起，另一个端口与动端盖板焊在一起。波纹管是可伸缩的元件，因此动导电杆借助波纹管的伸缩性可沿真空灭弧室的轴运动，而外部的的气体却不会进入真空灭弧室内部，这样就可完全密封的条件下从外部操纵触头的合、分，达到合、分电路的目的。触头周围装有屏蔽罩 4，它的主要作用是吸收分、合电流时真空电弧生成的金属蒸汽等，防止它们污染绝缘外壳。

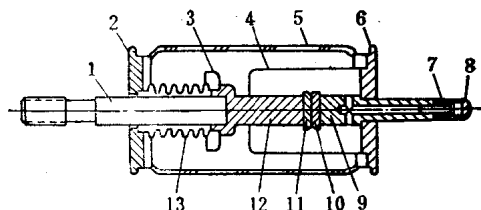


图0-1 真空灭弧室的结构

- 1—拉杆 2—动端盖板 3—波纹管屏蔽罩 4—屏蔽罩 5—绝缘外壳
6—静端盖板 7—排气管 8—保护帽 9—静导电杆 10—静触头
11—动触头 12—动导电杆 13—波纹管

真空开关的其余部分，如操动机构，导电回路等与传统开关设备基本相同。

从结构上看真空开关并不复杂，但对材料和工艺要求高，所以从1913年前后 Sorensen^[1]开始研究真空中开断电流的可能性以后，差不多经过了半个多世纪，经历了漫长而曲折的发展过程^{[2][3]}，于六十年代真空开关才投入工业应用。

真空开关利用真空作为主触头间的绝缘介质和灭弧介质。真空的极为优异的绝缘强度和熄弧能力给真空开关带来了一系列优点：

1) 燃弧时间短。真空具有很强的熄弧能力，故真空开关多半在触头分离后电流第一次过零时切断电流。

2) 体积小、重量轻。真空断路器和一些传统断路器的重量和体积列于表0-1中，由表可看出，真空断路器的体积和重量比任何断路器都要小，这是由于真空具有极高的绝缘强度，因而真空开关的触头开距很小，它的体积和重量也随之减小。

3) 寿命长，维修周期长，维修工作量小，适合于频繁操作。

4) 操作功小，操作时振动和噪声小。

5) 不仅能开断工频电流，还有开断高频电流的能力。

6) 真空开关中没有油，故没有爆炸的危险。真空开关的电弧在密封的小室中燃烧，也不会引起周围易燃、易爆物质的燃烧和爆炸。

真空开关的主要缺点是，在某些场合操作过电压较高和价格较高。

表0-1 10kV断路器技术参数比较

类别	真空断路器		磁吹断路器	多油断路器	少油断路器	
型号及 主要技 术指标	ZN3-10	ZN5-10	CN2-10	DN1-10	SN10-10	SN1-10
	10kV	10kV	10kV	10kV	10kV	10kV
	600A	1000A	600A	200A	600A	600A
	150MVA	350MVA	150MVA	100MVA	300MVA	200MVA
体积 (m ³)	0.15	0.25	0.35	0.29	0.29	0.74
重量kg	70	90	300	205	145	190
额定负荷 电流允许 开断次数	5000	10000			几十	几十
机械寿命 (次)	10000	10000	10000			

第一章 真空中的绝缘特性

任何开关设备，当其触头处于分闸位置时，要求触头间隙及支持触头的绝缘体能承受开关的工作电压和操作过电压；在开断电流时，触头及其周围的介质应能可靠地熄灭电弧。因而，工作介质的绝缘特性和工作介质中的电弧特性与开关设备的工作有密切关系。真空开关的触头是在真空度高于 10^{-4} Torr 的高真空中工作的，真空中两电极之间的绝缘特性、真空中的固体介质表面的沿面放电特性以及真空电弧与真空开关的关系也同样是十分密切的。真空中的击穿过程和弧后介质恢复过程与在其它介质中的有很大差异，本章将介绍真空中的绝缘特性。

第一节 真空间隙的电击穿

一、真空击穿过程

若将一对离开一定距离的金属电极置于空气中，并在电极之间施加自零开始逐渐升高的电压，起初，两电极之间没有电流流过或只有极小的电流流过，当电压升到一定值时，两电极间便会突然产生火花，伴随着火花的出现，电极之间就流过相当大的电流，这种现象叫做电极之间的电击穿。

放置在真空中的一对电极（这样的电极一般叫作真空间隙），若施加自零开始逐渐升高的电压的话，在达到一定电压时也将产生电击穿，这种情况下的电击穿通常叫做真空击穿。

真空击穿的性质和其它介质的电击穿有很大不同。

在象空气和油这样的介质中，分子密度极大，介质中的自由电子在电场作用下向阳极运动时必然要十分频繁地与介质（气体、液体）分子碰撞。通常用粒子的平均自由程来表示粒子之间的碰撞频繁程度，所谓平均自由程是指粒子在气体（或液体）中无碰撞地通过的平均距离，例如常温下一大气压的空气中气体分子的密度为 $2.68 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ，电子平均每通过 $3.7 \times 10^{-5}\text{cm}$ 就要与气体分子碰撞一次，即电子的平均自由程为 $3.7 \times 10^{-5}\text{cm}$ 。

由于与介质分子的碰撞极为频繁，电子只要有足够大的能量就能通过碰撞使介质分子电离，产生较多的电子和离子。新生的电子又能通过碰撞产生更多的电子和离子，这种过程将雪崩式地发展，最后在介质中形成放电通道，这就是气体和液体中的电击穿过程。

在真空中情况完全不同。上面已指出，真空灭弧室内的真空度高于 10^{-4}Torr ，在这样高的真空中，气体分子极少，在室温下， 10^{-4}Torr 真空中气体分子密度为 $3.4 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 。在这样稀薄的气体中，电子的平均自由程远大于一般真空容器（如真空灭弧室）的几何尺寸（例如，在 10^{-4}Torr 真空中，电子的平均自由程为

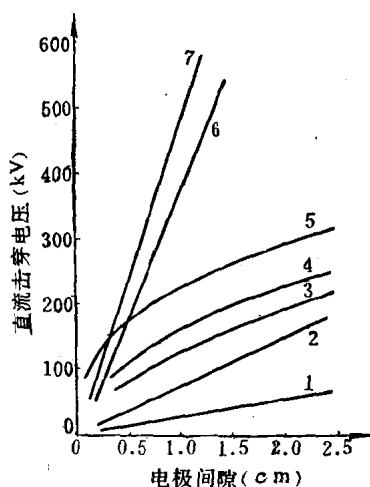


图1-1 真空和其它介质的耐压强度比较

1—1大气压空气 2—1大气压的 SF_6 。
3—瓷 4—变压器油 5—真空 6—100
大气压 SF_6 7—400大气压空气

282cm)。所以,即使真空间隙存在自由电子,它们从一个电极飞向另一电极时,很少有机会与气体分子碰撞,因而不可能有电子和气体分子碰撞而造成真空击穿现象。正是由于气体分子十分稀少,真空间隙的击穿电压非常高,理论上,电场强度高达 10^7 V/cm 时才会造成真空击穿^[6]。当然,实际上真空间隙的耐压强度要比理论值低 1~2 个数量级,但即使如此,真空间隙的耐压强度仍比空气、油和六氟化硫中的击穿电压高得多,图 1-1 比较了真空和油、空气、压缩空气及六氟化硫的绝缘水平。由图 1-1 可清楚地看出,真空的绝缘强度是十分高的。

二、真空击穿的机理

上面已指出,真空击穿并不是由电子和气体分子相互碰撞造成的,大量研究证明,真空击穿完全是由电极过程引起的。现将可能引起真空间隙击穿的各种电极过程作一简单介绍^[7]。

首先,场致发射可能如图 1-2 a 那样引起真空击穿。众所周知,在强电场作用下,金属表面位垒将降低和变窄,金属内部的自由电子可以通过隧道效应透过表面位垒,逸出金属表面,导致电子发射,这就是场致发射。场致发射电子流密度可用下式计算:

$$j = 6 \times 10^{-6} \frac{(\mu/\varphi)^{1/2}}{\mu + \varphi} E^2 \exp \left(-6.8 \times 10^7 \frac{\varphi}{E} \right)^{3/2} \quad (1-1)$$

式中 j ——电流密度 (A/cm^2);

φ ——逸出功 (eV);

E ——金属表面电场强度 (V/cm);

μ ——费米能级 (eV)。

根据上式可算得,当 $\varphi = 4 \text{ eV}$, $\mu = 10 \text{ eV}$ 时, $E = 10^7$

V/cm 时就发生显著的场致发射。

电极表面不是绝对光滑的，总是存在着大量的微小突起和尖端。在这些突起和尖端的顶部，电场强度要比间隙中的平均电场强度高得多。而式 (1-1) 清楚地表明，随着电场强度的提高，场致发射电流密度将非常迅速地增大，所以在电极表面上，所有的场致发射电流实际上几乎全是由表面的尖端和突起发射的。

场致发射电子可通过两个途径使真空间隙击穿：1) 发射电子的微小突起和尖端有一定的电阻，场致发射电流流过这些尖端时使它们发热、熔化和蒸发，产生大量金属蒸汽。电子穿过金属蒸气云时使金属原子电离，引起击穿；2) 场致发射所形成的电子束为电场所加速，高速电子轰击阳极，使阳极表面释放气体、熔化和蒸发。电子电离释放出的气体和金属蒸气会引起击穿。

第二种真空击穿机理是，电极表面可能存在各种大小的金属微粒和介质微粒（团粒）。这些团粒可能是机械加工留下的金属屑、电弧生成的微小金属颗粒、外来的绝缘材料微粒，也可能是强电场从金属内部拉出的金属须状物。这些团粒通常与电极本体结合得不太牢固，在强电场作用下，团粒可通过不同方式引起真空间隙的击穿，例如，位于

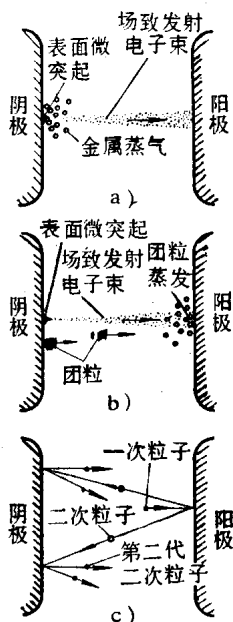


图1-2 三种击穿机理的示意图

- a) 场致发射引起击穿
b) 团粒引起击穿
c) 粒子交换引起击穿

光滑电极表面半径为 r 的球状微粒所带有的电荷为〔8〕

$$q = \varepsilon_0 \frac{\pi^2}{6} E r^2 \quad (1-2)$$

式中 E ——电极表面的电场强度；

ε_0 ——真空的介电常数。

在电场中，团粒在静电力作用下可能离开电极表面并加速穿过真空间隙，如果电场足够强，团粒直径又适当，则当它落到相对的另一电极上时，已有了足够大的动能，团粒和电极碰撞时，动能转变为热能，使团粒本身熔化和蒸发，蒸发出来的金属蒸气为场致发射的电子电离，引起击穿（见图 1-2 b）。

团粒还能通过如下方式使真空间隙击穿：团粒在强电场作用下离开电极，在团粒穿过真空间隙的过程中不断受到电子流的轰击，温度不断升高，所带的电荷量也可能增大。团粒在飞近相对电极时，团粒和该电极之间就出现很强的电场，而且距离越近，场强越大，在此电场作用下团粒或电极表面发射大量电子，同时团粒温度很高，蒸发大量蒸气，场致发射电子使团粒周围的蒸气电离，导致真空间隙击穿。

还有人认为，通过电极之间的粒子交换也会造成真空击穿（见图 1-2 c），真空间隙中偶而存在的电子、正离子或负离子与电极碰撞时由二次发射产生二次粒子，这些二次粒子在电场加速下又与相对的电极碰撞产生第二代二次粒子。如果每一个一次粒子产生的第二代二次粒子数大于 1，则间隙中的带电粒子数将越来越多，简而言之，如果阴极发射的一个电子在阳极上引起二次发射，生成 A 个正离子和 B 个光子，每一个正离子和光子在轰击阴极时分别产生 C 和 D 个电子，则当

$$AC + BD > 1 \quad (1-3)$$

时，电流将迅速增大，造成真空击穿。但测量表明，在实际的电压范围内， $AC + BD$ 远小于 1，所以现在普遍认为粒子交换不太可能引起真空击穿。

上面介绍了三种造成真空击穿的机理，这三种机理往往并不是孤立的，例如团粒会助长阴极的场致发射，而场致发射本身也可能产生团粒，现在许多人认为，在小真空间隙（即电极间距离很短，小于 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 的真空间隙）中，真空击穿主要是由场致发射引起的，真空间隙较大时，团粒就成了造成真空击穿的主要原因了。

三、真空击穿现象

现在假定，在真空中放置一对金属电极，电极之间的电压不断升高，在真空击穿前，电极间就出现微小的电流——预放电电流。如果所加的是直流电压，则流过间隙的是比较稳定的预放电电流，其值为 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ A}$ 。在稳定的电流上有时也会出现一些小的电流脉冲^[8]。

当真空间隙施加工频电压时，在真空击穿前也同样会出现预放电电流，并且至少存在着两种形式的预放电电流^[9]。第一种形式的预放电电流是在较低电压下产生的，它是一种如图 1-3 a 所示的脉冲电流。脉冲电流多半在电压峰值时出现，但两个电流脉冲之间的时间间隔是不稳定的。每一次脉冲的持续时间为 $200 \mu\text{s}$ 左右，电流幅值在数百微安到数毫安内变化。图 1-3 a 中的电流波形是多次电流脉冲重叠在一起而成的。

第二种形式的预放电电流是亚稳态的，它们周期地出现在正弦电压的峰值附近（见图 1-3 b），电流幅值也在数十微安到数毫安范围内变化。

真空间隙中出现预放电电流时，常常伴随着电极的放气

和电极表面的发光,但是,电极之间的电压却并不降低或只有很小的降低。

通过计算表明,在相同电压下,根据场致发射理论计算的电流波形与预放电电流波形基本相同,这表明,预放电电流非常可能是场致发射电流。

在真空击穿前,真空间隙之间除了流过预放电电流外,还发生电极材料的迁移,即一个电极的材料迁移到另一个电极上去,在大多数情况下是阴极材料向阳极迁移。

如果真空间隙上的电压进一步提高,间隙之间就会突然发生火花放电,也就是真空间隙的完全击穿。火花放电过程中,阳极表面的局部区域往往首先发光,发光区域以每秒数千米的速度向阴极扩展,当发光区扩展到阴极表面时,阴极表面也开始发光,有时发光区不是在阳极首先发生,而是首先在阴极表面上发光,发光区域由阴极向阳极扩展^[10]。

在这一过程中,真空间隙中的电流迅速增大,在数十到一百多毫微秒内,电流从微安或毫安数量级激增到数百乃至数千安,真空间隙上的电压则由击穿电压降落到数十伏。图1-4为火花放电期间放电电流波形的一个典型例子。

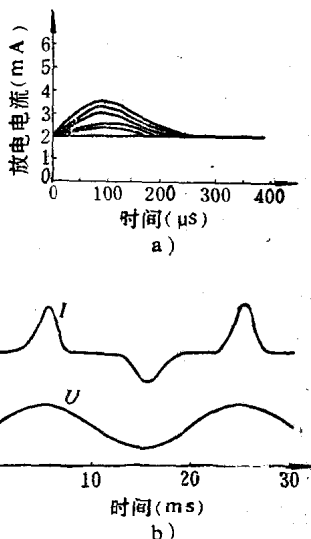


图1-3 工频预放电电流

a) 瞬态预放电电流(1 cm间隙, 70 kV, 有效值) b) 亚稳态预放电电流(0.5 cm/间隙, 60 kV, 有效值)