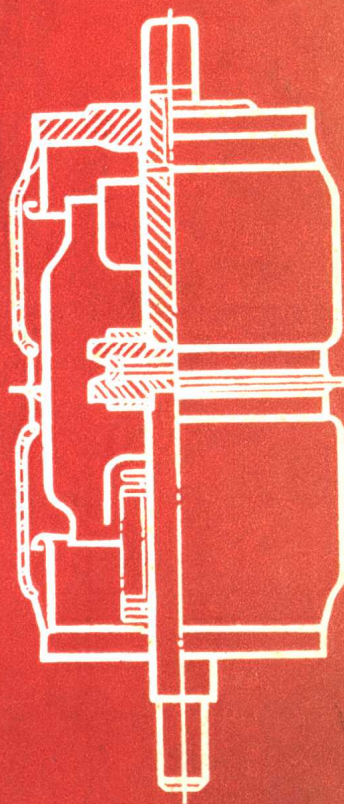


高等学校教材

# 真空开关 理论 及其应用

王季梅 主编

西安交通大学出版社



# 真空开关理论及其应用

王季梅 主编

西安交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书是按全国高等学校电工类电器专业教材编审委员会一九八三年通过的教学大纲编写的。全书共分九章，主要内容包括：真空中的电击穿理论；真空电弧的基本理论；真空电弧熄灭后的绝缘恢复特性和熄弧原理；真空开关的截流和操作过电压；真空灭弧室和真空开关操动机构的设计计算；基本试验设备和测试技术；真空开关的应用等，并附有教学实验指导书。

本书除作为高等学校电器专业的选修课教材外，也可作为职工大学和电大有关专业的教学参考书，并可供从事真空开关的设计、制造和使用的工程技术人员学习参考。

### 真 空 开 关 理 论 及 其 应 用

王季梅(主编) 马志瀛 郭文元

责任编辑 罗 兰

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行·各地新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 10 字数 237 千字

1986年11月第一版 1986年11月第一次印刷

印数：1—3000

统一书号：15340·070 定价：1.70 元

## 前 言

本书是根据1983年5月在杭州浙江大学召开的全国高等院校电器专业教材编审会议上通过的《真空开关理论及其应用》教学大纲编写的。

此书是电器专业选修课程的教材，主要内容包括理论基础、设计计算、测试技术和应用四个部分。学习这门课程的目的是为了使学生在完成专业课程后的基础上能更深入广泛地了解电器学科领域的范围及发展方向，以扩大专业知识面。

本书按教学大纲的规定教学总时数为46学时，各章节分配如下：绪论（1—1.5学时）；第一章：真空中的电击穿理论（3.5学时）；第二章：真空电弧的基本理论（7学时）；第三章：真空电弧熄灭后的绝缘恢复特性和熄弧原理（4学时）；第四章：截流现象和操作过电压（6学时）；第五章：真空灭弧室的设计与计算（5学时）；第六章：真空开关操动机构的设计和计算（4学时）；第七章：研究真空电弧特性试验的基本设备和装置（3学时）；第八章：测试技术和测量装置（4学时）；第九章：真空开关应用（2学时）；教学实验（3—6学时）。绪论部分可根据讲课教师当时掌握的资料有所增补延长到1.5学时，第一章至第九章的内容可根据各校安排的选课时数多少来调整，教学实验共编写了三个，根据各校实验室的设备和条件任选1—2个，在条件不具备的情况下，亦可暂时不开或另选实验内容。

本书由西安交通大学王季梅教授主编，西安交通大学王其平教授和华中工学院程礼椿教授主审。绪论，第一、第二、第三、第五、第九章和教学实验由王季梅教授执笔；第四、第七和第八章由西安交通大学马志瀛副教授执笔，第六章由西安交通大学郭文元副教授执笔。

本书除作为高等院校电器专业的选修课教材外，也可作为从事真空开关电器工程技术人员的参考书或业余大学的教学参考书。

最后，编者对主审人、华中工学院程礼椿教授和西安交通大学王其平教授对本书初稿和定稿的全面审阅表示衷心的感谢。

## 绪 论

开关在电力工业上的应用以及其本身的发展已有很长的一段历史。从原理结构上由大气中自然拉长电弧，分断电流的开关开始，发展到各种型式的油开关，产气开关和压缩空气开关，直到现在的真空开关和六氟化硫开关。此外，还正在通过不同途径研究无电弧分断电流的固体开关等，例如晶闸管(可控硅)开关。当前开关的核心问题是要求分断能力高(即分断的电流要大)和分断时间尽可能短。当然还有其它的一些要求，例如过电压要低，使用寿命要长和动作可靠性要高等等。真空开关是近十几年发展起来的一种电力开关，由于它具有很多独特的优点，因此目前已广泛用于配电设备(例如，中压配电站，城市高楼大厦中的变电所和城市附近的地下配电装置等中所需的断路器)、工业动力设备(例如，电炉、高压电动机和电力电容器组等用的控制或调压开关)以及国防、交通、科研等特殊用途的场合(例如，核聚变托克马克(Tokmak)装置上用的直流高压开关，电力机车上用的换相开关，工业高频设备上用的高频开关，变压器中带负荷调压的调压开关、真空放电间隙和超导磁场储能用的转换开关等)。真空开关根据不同的用途和要求可分为真空断路器、真空负荷开关和真空接触器。

图 0-1 所示为三相电力真空开关的典型结构图。它主要由真空灭弧室 1、操动机构 2 和框架 3 三个部分组成。真空灭弧室固定在框架的上端，操动机构位于框架下边的基座部分，操动机构与真空灭弧室之间是通过操动机构的连杆 4、绝缘子 5 和真空灭弧室的动导电杆 6 连结在一起，当操动机构的连杆带动导电杆作上下运动时，位于真空灭弧室内部与动导电杆相连的动触头就与静触头接触或分离，完成开关闭合或分断电路的功能，因此从整个开关的基本结构来看，与其它开关对比没有本质上的差别，仅仅不同的是真空灭弧室部分。

真空灭弧室的结构原理图如图 0-2 所示。外壳 4 由玻璃、陶瓷或微晶玻璃等无机绝缘材料做成，呈圆筒形状，两端用金属盖板封接组成一个密封容器。外壳内部有一对触头，其中静触头固定在静导电杆 1 的端头，动触头固定在动导电杆 7 的端头。动导电杆通过波纹管 6 和金属盖板的中心孔伸出真空灭弧室外。动导电杆在中部与波纹管的一个端口焊在一起。波纹管的另一个端口与金属盖板焊接。波纹管是

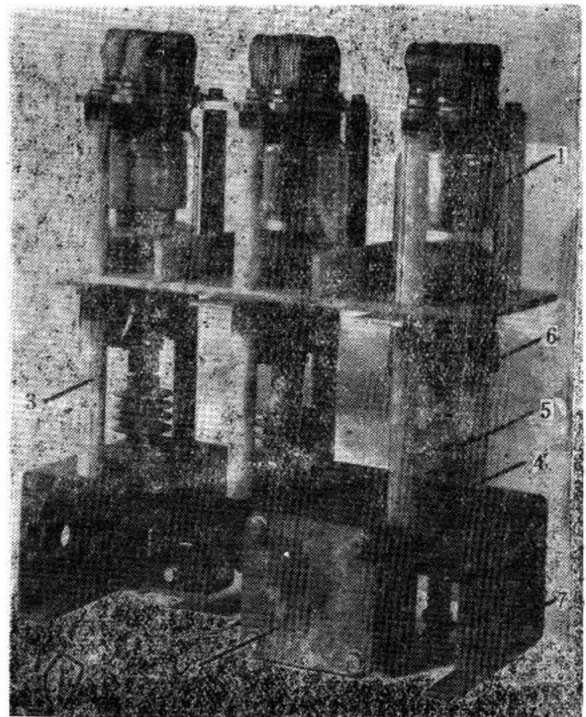


图 0-1 三相电力真空开关典型结构图  
1—真空灭弧室；2—操动机构；3—框架；4—连杆；  
5—绝缘子；6—动导电杆；7—底座

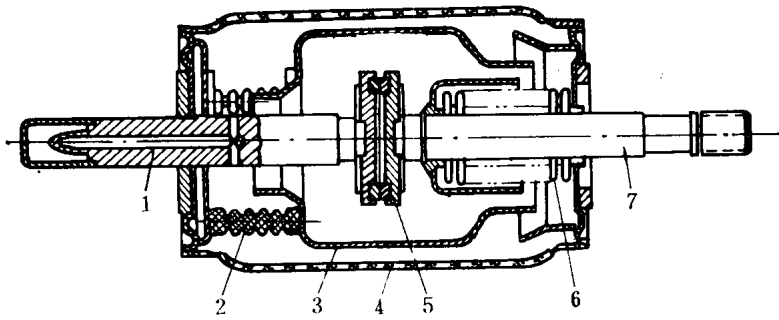


图 0-2 真空灭弧室结构原理图  
1—静导电杆；2—支持屏蔽罩的瓷柱；3—主屏蔽罩；4—外壳；  
5—触头；6—波纹管；7—动导电杆

一种弹性元件，其侧壁呈波纹状，它可以纵向伸缩。由于在动导电杆和金属盖板之间引入了一个波纹管，真空灭弧室的外壳就被完全密封，动导电杆可以左右移动，但不会破坏外壳的密封性。真空灭弧室内部的气压低于  $1.33 \times 10^{-3} \text{Pa}$ ，一般为  $1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$  左右，因而动触头和静触头始终是处在高真空状态下。在触头和波纹管周围都设有屏蔽罩，触头周围的屏蔽罩称做主屏蔽罩由瓷柱 2 支撑，波纹管周围的屏蔽罩称做辅助屏蔽罩或波纹管屏蔽罩。

如果真空开关接入如图 0-3 的电路，并且当操动机构使动导电杆向上运动时，动触头和静触头就会闭合，电源与负载接通，电流就流过负载。如果这时动导电杆作相反方向向下运动时，动触头和静触头就会分离，在刚分离的瞬间，触头之间将立刻产生真空电弧，真空电弧是依靠触头上蒸发出来的金属蒸汽来维持的，直到工频电流接近零时，真空电弧的等离子体很快向四周扩散，电弧就被熄灭，触头间隙由导电体变为绝缘体，于是电流被分断。

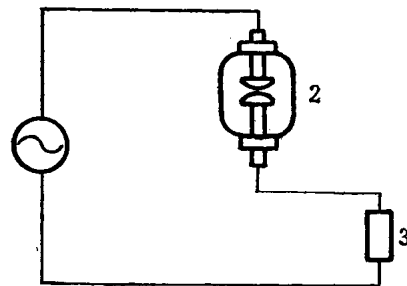


图 0-3 真空开关接入负载的电路  
1—电源；2—真空开关；3—负载

真空开关具有下列优点：

i) 熄弧过程在密封的真空容器中完成，电弧和炽热气体不会向外界喷溅，因此不会污染环境。

ii) 真空的绝缘强度高，熄弧能力强，所以触头行程很小，一般均在几毫米以内，因此操动机构的操作功率小，使整个开关的体积减小和重量减轻。

iii) 熄弧时间短，电弧电压低，电弧能量小和触头磨损少，因而分断次数多，使用寿命长，适合频繁操作。

iv) 开关操作时，几乎没有噪音，振动轻微，适用于城市区域和要求安静的场所。

v) 灭弧介质为真空，因而与海拔高度无关，同时没有火灾和爆炸的危险。

vi) 在真空灭弧室的使用期限内，触头部分不需要维修、检查，即使维修检查，也十分简便，所花费的时间也很短。

虽然真空开关的结构相当简单,优点也很多,但还存在着价格偏高等问题。

十八世纪初,人们就开始设想利用真空中的一些特点来分断电流<sup>[1]-[2]-[3]</sup>,到1893年美国里顿豪斯(Rittenhouse)设计的第一个结构简单的真空灭弧室以专利发表后,就引起了人们的重视。1920年瑞典佛加(Birka)公司又第一次制成了真空开关,尽管其分断能力极小尚无实用价值,但却吸引了人们的兴趣。1923年前后,索伦森(Sorenson)和曼登霍尔(Mandenhall)在美国加利福尼亚工学院开始进行了真空中分断电流的研究工作,并成功地在41kV下分断了926A的工频电流,于1926年公布了研究成果。此后,美国和德国的一些电气公司便致力于真空开关的研究,但由于当时科学技术对真空开关的要求也不迫切,所以研究成果不甚显著。直至第二次世界大战后,五十年代初期,随着科学技术的进步,才使真空开关的研究工作有了较快的进展。1955年罗斯(H. C. Ross)对美国詹尼斯(Jennings)无线电制造公司,在多年来生产几安的高频真空转换开关的基础上,制成了15kV 200A的真空开关,但在整个五十年代,对真空开关触头尚未找到适当的材料,使其分断能力一直停留在4-5千安的水平。直到六十年代初,由于半导体技术的迅速发展,提供了冶炼含气量极低的金属材料的方法后,同时在真空开关结构研究上也取得了突破才有了一个跃变。1961年美国通用电气公司在此成果的基础上,在李天和(T. H. Lee)博士、考帮(J. D. Cobine)、利斯(M. P. Reece)、利许(J. A. Rich)法来尔(G. A. Farral)等多人的努力下,开始生产额定电压15kV,分断能力12.5kA的真空断路器。1966年进一步试制成功15kV,25kA和31.5kA的真空断路器,从此真空开关正式进入了电力开关的行列为电力工业服务。到目前为止,额定电流已达到3000A,如合理地采用风冷措施可提高到4000A。现在单个真空灭弧室的工作电压已达到84kV。美国通用电气公司制造的45kV真空灭弧室已达到50-60kA的分断能力,日本对纵向磁场结构真空灭弧室的研究已突破了在12千伏下分断200kA的能力。

现在美国、日本、英国、苏联、东德和西德等国家都已大量生产不同规格的真空开关。应用范围也越来越广泛,据不完全统计,许多国家在35kV及以下电压等级的变电所,所用的断路器中已有20-30%采用了真空断路器。

我国是在1958年前后开始研制真空开关的,1960年研制成功了工作电压为6.7kV,开断能力为500-600A的真空开关,1965年研制成功10kV,1500A的三相真空开关。1969年制成了10kV,2000A单相快速真空开关。此后国内许多开关厂相继开始正式生产真空开关。现在我国已有了一批生产真空开关和真空灭弧室的专业工厂以及研究真空电弧和改进真空灭弧室性能的研究单位和大专院校,他们对我国今后发展真空开关的品种和提高质量会起着积极的推动作用。

真空开关当前还处于成长阶段,它的成长将与许多现代科学技术密切相关且为现代科学技术服务的。可以预料,随着科学技术的向前发展,真空开关必将日趋完善,并在各个领域发挥其更大的作用。

本课程是电器专业选修课程之一,其主要任务是使学生能深入广泛地了解电器学科领域的范围,扩大专业知识面,掌握真空开关的基本理论、设计和计算方法及有关真空电弧的测试技术,以开阔思路、提高解决实际问题和独立工作的能力。

# 目 录

## 绪论

### 第一章 真空中的电击穿理论

- § 1-1 真空间隙的绝缘强度和电击穿·····( 1 )
- § 1-2 影响真空击穿的各种因素·····( 6 )
- § 1-3 真空中固体绝缘介质的绝缘性能·····( 10 )

### 第二章 真空电弧的基本理论

- § 2-1 真空电弧的阴极斑点·····( 14 )
- § 2-2 真空电弧的电压特性·····( 17 )
- § 2-3 真空电弧的反向运动·····( 22 )
- § 2-4 真空电弧的阳极斑点·····( 28 )

### 第三章 真空电弧熄灭后的绝缘恢复特性和熄弧原理

- § 3-1 弧后绝缘介质恢复过程的分析·····( 34 )
- § 3-2 绝缘介质恢复过程的时间估算·····( 36 )
- § 3-3 真空电弧的弧后电流和过零现象·····( 39 )
- § 3-4 电流强迫开断后的绝缘恢复特性·····( 40 )
- § 3-5 横向磁场熄弧·····( 41 )
- § 3-6 纵向磁场熄弧·····( 43 )

### 第四章 截流现象和操作过电压

- § 4-1 截流现象·····( 49 )
- § 4-2 操作过电压的类型及其分析·····( 54 )
- § 4-3 操作过电压的抑制方法·····( 62 )
- § 4-4 实际负载的过电压及其保护方式·····( 66 )

### 第五章 真空灭弧室的设计与计算

- § 5-1 结构和分类·····( 72 )
- § 5-2 外壳·····( 72 )
- § 5-3 屏蔽罩·····( 73 )
- § 5-4 触头结构·····( 76 )
- § 5-5 触头材料·····( 83 )
- § 5-6 波纹管及自闭力的计算·····( 85 )
- § 5-7 其它零部件·····( 88 )



§ 5-8 可拆式真空灭弧室·····	( 90 )
<b>第六章 真空开关操动机构的设计和计算</b>	
§ 6-1 真空开关操动机构分类·····	( 92 )
§ 6-2 真空开关的负载特性和操动机构比较·····	( 94 )
§ 6-3 直线电机操动机构计算·····	( 95 )
<b>第七章 研究真空电弧特性试验用基本设备和装置</b>	
§ 7-1 具有引弧支路的合成电路·····	( 105 )
§ 7-2 熄弧后介质恢复强度测量及其装置·····	( 109 )
<b>第八章 测试技术和测量装置</b>	
§ 8-1 真空灭弧室真空度检测及其装置·····	( 114 )
§ 8-2 观察电弧形态的高速摄影装置·····	( 120 )
§ 8-3 真空电弧有关参数测量的技术和研究·····	( 124 )
<b>第九章 真空开关的应用</b>	
§ 9-1 概述·····	( 127 )
§ 9-2 真空开关在电力系统中的应用·····	( 129 )
§ 9-3 真空开关在工业和交通运输中的应用·····	( 129 )
§ 9-4 真空开关在其它方面的应用·····	( 130 )
<b>教学实验</b>	
实验一 纵向磁场对真空电弧的影响·····	( 135 )
实验二 真空断路器分断能力试验的分析·····	( 138 )
实验三 真空电弧熄灭后的介质恢复·····	( 140 )
<b>参考文献</b> ·····	( 145 )

# 第一章 真空中的电击穿理论

对真空装置中的电击穿物理现象已经研究了许多年，但对真空中电击穿的机理至今还没有完全搞清楚。本章将从实际出发着重论述真空本身的绝缘强度，与真空开关有关的电击穿过程和物理现象，以及影响真空绝缘的一些因素，并涉及到我们以后需要讨论的真空灭弧室在分断电流后的绝缘强度恢复的问题。

## § 1—1 真空间隙的绝缘强度和电击穿

### 一、真空间隙的击穿现象和绝缘强度

如果在空气中放置一对离开一定距离的金属电极，把这对电极接到高电压电源上，并慢慢提高加在金属电极上的电压。开始时，两个电极之间没有电流流过或只有极小的电流流过，但当电压升到一定程度时，两个电极间便突然产生火花，伴随着火花的出现，电极之间随即就有相当大的电弧电流流过，这种现象叫作电极之间的电击穿。

放置在真空中的一对电极，若加上高电压时，在一定电压下也会产生电击穿。这种情况下的电击穿通常叫作真空间隙的电击穿。

真空间隙的电击穿性质和其它介质中的电击穿有很大不同。象空气这样的介质电击穿是由于气体中的电子在电场作用下高速运动，与气体分子碰撞产生较多的电子和离子，新生的电子又和中性原子碰撞，产生更多的电子和离子。这种过程雪崩式地发展，终于在气体中造成放电通道，它是属于气体分子碰撞游离性质的电击穿。但是在真空中情况完全不同，因为真空灭弧室内的真空度高于  $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ，在这样高的真空中，气体分子极少。在常温下一个大气压的空气，每立方厘米含有  $2.683 \times 10^{19}$  个气体分子，而在  $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$  的真空中每立方厘米只含有  $3.4 \times 10^{12}$  个气体分子。在这样稀薄的气体中，即使真空间隙内存在电子，它们从一个电极飞向另一个电极时，也很少有机会与气体分子碰撞。因而不可能由电子和气体分子碰撞造成真空间隙的电击穿。正是由于气体分子十分稀少，因此真空间隙电击穿需要在非常高的电压下形成场致发射等其它因素才有可能击穿。这个问题我们将在后面讨论。从理论上推测，电场强度需要达到  $10^7 \text{V/cm}$  以上时才会造成电击穿<sup>[4]</sup>。实际上，真空间隙的绝缘（耐压）强度由于受到其它不利因素的影响，将低于上述情况的几个数量级而造成电击穿，即使如此，真空间隙的绝缘强度仍比常温常压下的空气和六氟化硫中的击穿电压高得多，这一点可从图 1-1 中清楚地看出。

真空中的绝缘强度还与真空度有密切的关系，图 1-2 所示为钢作电极，在间隙开距为 1 mm 情况下所作实验的结果<sup>[1]</sup>。从图中可以看到，当真空度大于  $1.33 \times 10^{-1} \text{Pa}$  时，绝缘击穿强度有显著的变化，而低于  $1.33 \times 10^{-1} \text{Pa}$  时，绝缘击穿强度差不多保持不变。因此，一般对真空灭弧室的真空度只要低于  $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$  就认为已满足要求，没有必要要求很高的真空度。

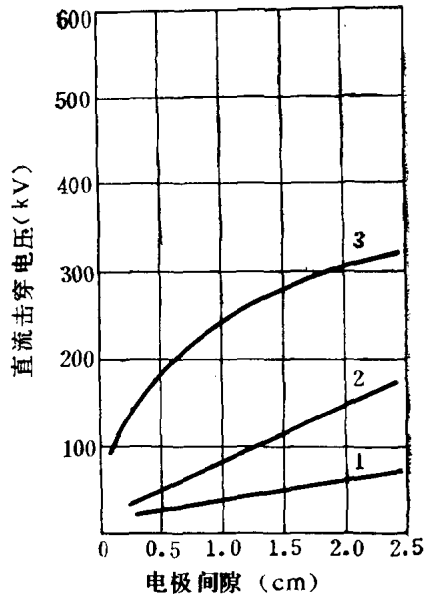


图 1-1 真空、空气和六氟化硫气体的绝缘强度比较  
1—空气；2—SF<sub>6</sub>；3—真空

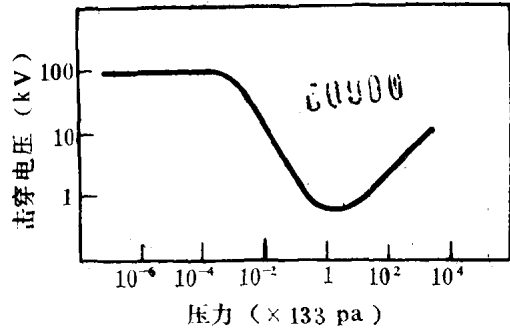


图 1-2 真空度与绝缘击穿电压的关系  
材料—钢；间隙开距—1 mm

## 二、真空中电击穿学说

真空中的电击穿的原因，从目前研究的初步结论来看是由于电极过程引起的。电极过程有下列三种学说：场致发射学说；微粒撞击学说；粒子交换学说。

### 1. 场致发射学说

场致发射学说概括为阴极加热和阳极加热两个方面。

#### (1) 阴极加热

经过磨光和清洁的电极表面，从微观来看，表面还是凹凸不平的，并且有许多微小尖峰存在。用显微镜等仪器可以证实这些尖峰的存在，显微照片如图 1-3 所示：(a) 图为不锈钢、(b) 图为铅的表面状态<sup>[5]</sup>。因此，当电极间加上高电压时，电场将集中于某些尖峰的端部，并在端部形成极高的电场，引起电子发射，这种电子发射过程叫做场致发射。尽管电子流极小，由于尖峰的截面积积极小，约为  $10^{-8} \text{mm}^2$ ，所以电流密度可达  $10^5 - 10^6 \text{A/mm}^2$ 。当场致发射电流流过这些尖峰时，会使它们发热、熔化和蒸发出大量金属蒸汽。当电子穿过金属蒸汽云时，使金属原子电离而引起击穿，图 1-4 所示为阴极加热击穿过程的示意图。

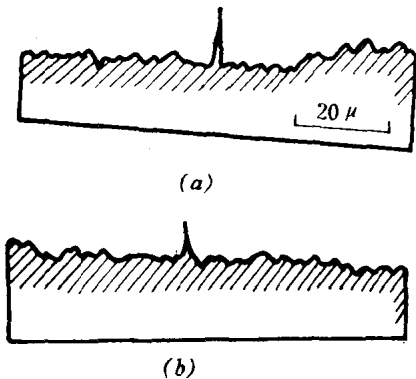


图 1-3 表面经过磨光后的电极（显微照片）

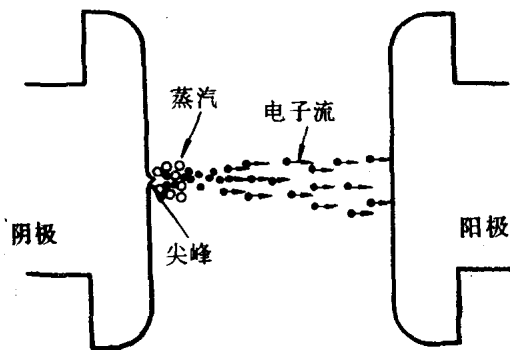


图 1-4 阴极加热击穿过程示意图

富雷-诺特海姆(Fowler-Nordheim)曾给出了一个计算电极尖峰部分场致发射电流密度与电场强度之间的关系方程式<sup>[6]</sup>：

$$J = \frac{1.541 \times 10^{-2} E^2}{\varphi t^2(y)} \exp\left[\frac{-6.831 \times 10^9 \varphi^{3/2} V(y)}{E}\right] \quad (\text{A/m}^2) \quad (1-1)$$

$$y = \frac{3.795 \times 10^{-3} \sqrt{E}}{\varphi}$$

式中  $J$ ——电流密度

$E$ ——电场强度

$\varphi$ ——逸出功

$t(y)$ 、 $V(y)$ ——从表 1-1 中查得。

表 1-1 Fowler-Nordheim 场致发射函数  $v(y)$  和  $t(y)$  值

$y$	$v(y)$	$t(y)$	$y$	$v(y)$	$t(y)$
0.00	1.000000	1.000000	0.26	0.900133	1.016729
0.01	0.999730	1.000065	0.27	0.893313	1.017724
0.02	0.999026	1.000225	0.28	0.886310	1.018735
0.03	0.997946	1.000460	0.29	0.879126	1.019761
0.04	0.996521	1.000760	0.30	0.871763	1.020801
0.05	0.994772	1.001118	0.31	0.864223	1.021855
0.06	0.992718	1.001529	0.32	0.856509	1.022922
0.07	0.990371	1.001988	0.33	0.848622	1.024001
0.08	0.987743	1.002491	0.34	0.840566	1.025093
0.09	0.984844	1.003035	0.35	0.832341	1.026197
0.10	0.981682	1.003618	0.36	0.823950	1.027312
0.11	0.978265	1.004236	0.37	0.815395	1.028438
0.12	0.974601	1.004889	0.38	0.806677	1.029574
0.13	0.970696	1.005573	0.39	0.797798	1.030721
0.14	0.966554	1.006287	0.40	0.788760	1.031877
0.15	0.962183	1.007030	0.41	0.779565	1.033043
0.16	0.957587	1.007800	0.42	0.770214	1.034217
0.17	0.952770	1.008596	0.43	0.760708	1.035400
0.18	0.947736	1.009416	0.44	0.751050	1.036592
0.19	0.942491	1.010259	0.45	0.741240	1.037792
0.20	0.937037	1.011124	0.46	0.731280	1.039000
0.21	0.931379	1.012011	0.47	0.721172	1.040215
0.22	0.925520	1.012918	0.48	0.710916	1.041437
0.23	0.919462	1.013844	0.49	0.700515	1.042667
0.24	0.913210	1.014788	0.50	0.689968	1.043903
0.25	0.906766	1.015750	0.51	0.679279	1.045145

(续表 1-1)

$y$	$v(y)$	$t(y)$	$y$	$v(y)$	$t(y)$
0.52	0.668447	1.046394	0.77	0.354537	1.079134
0.53	0.657475	1.047649	0.78	0.340363	1.080488
0.54	0.646362	1.048910	0.79	0.326071	1.081433
0.55	0.635111	1.050177	0.80	0.311663	1.083201
0.56	0.623723	1.051449	0.81	0.297139	1.084562
0.57	0.612198	1.052726	0.82	0.282499	1.085924
0.58	0.600537	1.054008	0.83	0.267745	1.087288
0.59	0.588743	1.055296	0.84	0.252878	1.088655
0.60	0.576815	1.056588	0.85	0.237896	1.090232
0.61	0.564754	1.057884	0.86	0.222803	1.091933
0.62	0.552563	1.059185	0.87	0.207597	1.092764
0.63	0.540241	1.060490	0.88	0.192280	1.094138
0.64	0.527789	1.061800	0.89	0.176852	1.095513
0.65	0.515209	1.063113	0.90	0.162314	1.098899
0.66	0.502502	1.064430	0.91	0.145666	1.098267
0.67	0.489667	1.065751	0.92	0.129910	1.099646
0.68	0.476707	1.067075	0.93	0.114045	1.101026
0.69	0.463622	1.068403	0.94	0.098072	1.102408
0.70	0.450413	1.069734	0.95	0.081992	1.103791
0.71	0.437080	1.071068	0.96	0.065805	1.105175
0.72	0.423625	1.072405	0.97	0.049512	1.106560
0.73	0.410048	1.073746	0.98	0.033113	1.107946
0.74	0.396350	1.075089	0.99	0.016609	1.109333
0.75	0.382531	1.076435	1.00	0.000000	1.110721
0.76	0.368594	1.077783			

根据实验指出, 当电流密度达到  $10^6 \text{A/mm}^2$  时将发生电击穿, 这个数值我们称为临界值。达到临界值发生击穿的原因有两种说法: 一种是认为由于发射尖峰部分的焦耳加热和汽化造成的; 另一种则认为, 当阴极表面发射区的电场强度超过某一临界值时, 同样会发生击穿(如对钨的测量结果大约为  $6 \times 10^6 \text{V/m}$ ), 所以可以从电场强度的大小来判断电击穿。实际上, 这两种说法 Fowler-Nordheim 在方程式中早已有确定的结论。

许多学者用这种方法得到的几种金属电极的临界击穿电场强度值, 如表 1-2 所示。表中还列出了对这些金属研究所得到的逸出功值。

表 1-2 各种金属的临界电场值和逸出功

金 属	$E_c(\text{V/m})$	$\phi(\text{eV})$
铬[8]	$5.32 \pm 0.1$	4.6
钼[7]	$5.4 \pm 1.0$	4.37
不锈钢[7]	$5.9 \pm 1.4$	4.4
金[9]	$6.36 \pm 0.63$	4.8
钨[9]	$6.5 \pm 1.0$	4.5
铜[7]	$6.9 \pm 1.0$	4.5
镍[7]	$10.4 \pm 1.3$	4.6

(2) 阳极加热

从阴极上由场致发射所形成的电子束为电场所加速，尤其在间隙较长时，这些高速运动的电子将迅速达到阳极，并不断地轰击阳极，使阳极表面发热和熔化而释放出大量的气体和离子。从阳极释放出来的离子又反过来打在阴极上，加强了阴极的场致发射。这样的反复过程最后使真空间隙导致击穿，并在击穿前观察到在阳极上有发光现象。

麦脱兰特(Maitland)的理论计算表明<sup>[10]</sup>，轰击阳极的电子束能量密度超过一定值时会引起间隙击穿，击穿电压 $V$ 与间隙距离 $d$ 的关系为

$$V \propto d^{0.3} \tag{1-2}$$

2. 微粒撞击学说

从微观观察可见，经过磨光和清洁处理的电极表面还会吸附着一些金属微粒，此外，电极也可能因燃弧后留下微小的金属颗粒或在强电场作用下从电极表面尖端拉出金属须。这些残余物我们统称为“微粒”。这些微粒在强电场作用下，受静电力的影响，很容易脱离阴极，并通过真空间隙加速到达阳极，与阳极撞击后，由动能转变为热能，使微粒本身熔化和蒸发，释放出大量的蒸汽为场致发射电流电离，最后导致真空间隙的击穿。图 1-5 所示为微粒撞击学说击穿过程的示意图。

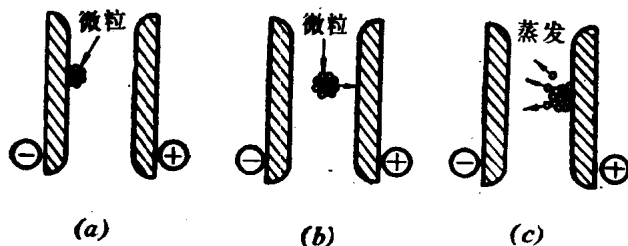


图 1-5 微粒撞击学说击穿过程示意图  
(a) 电离前 (b) 加速中 (c) 撞击后

从能量的观点来看，在阴极放出的微粒撞击阳极时，在阳极单位面积上产生碰撞能量 $W$ ，这个能量与外加电压 $V$ 及微粒的电荷密度(电量/质量= $q/m$ )乘积成正比，即 $W \propto V \times (q/m)$ ，而电荷密度与阳极电场 $E$ 成正比，即 $(q/m) \propto E$ 。若设产生击穿的极限能量为定值 $W = \text{const.}$ 。则 $VE \geq C$ 时才会发生击穿。经过下列整理 $V \times (V/d) \geq C$ ， $V \geq \sqrt{Cd} = Kd^{1/2}$ ，式中 $d$ 为

间隙距离,  $K$ 为常数, 它与电极材料、形状、表面状况和间隙距离等因素有关。这就是克拉勃格(Craberg)对微粒撞击学说的理论<sup>[11]</sup>。斯里夫科夫(Slivkov)推导和实验的结果所得到的表达式为  $V = K d^{0.625}$ <sup>[12]</sup>。

### 3. 粒子交换学说

当电极表面不干净时(吸附了许多气体或有机物), 从阴极放出的一次电子在电极间加速, 并打击阳极。阳极受到一次电子打击后以较高的速率使阳极表面的气体电离, 产生正离子和光子, 它们再受电场的作用, 加速后又打在阴极上, 使阴极发射二次电子, 这一过程反复地进行下去, 使二次电子不断增加, 最后导致真空间隙击穿。图 1-6 所示为粒子交换的击穿过程<sup>[13]</sup>。粒子交换学说的整个过程实质上与第一种场致发射学说基本上相似, 如果电极表面很干净的话, 由这一原因所引起的绝缘击穿基本上不会发生。

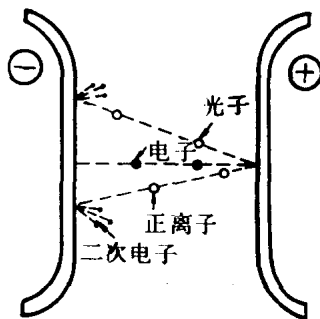


图 1-6 粒子交换击穿过程示意图

## § 1—2 影响真空击穿的各种因素

真空击穿是一种相当复杂的物理现象, 它与许多因素有关, 主要有: 电极的几何形状和大小、电极间隙的大小、电极材料、老炼作用、操作条件和真空度的影响等。

### 一、电极的几何形状和大小

电极的几何形状对电场的分布有很大的影响, 往往由于几何形状确定不够恰当, 引起电场在电极局部地方过于集中而遭致击穿, 尤其对高电压的真空装置更为突出。

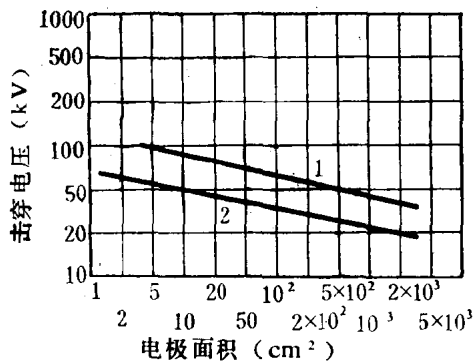


图 1-7 电极面积与击穿电压的关系

1——钛合金; 2——钢

电极边缘的曲率半径大小是重要因素之一。一般来说, 曲率半径大的电极承受击穿电压的能力要比曲率半径小的大。但必须指出: 在小于 1 mm 的小间隙时, 情况是反常的, 曲率半径小反而会增加击穿强度。

此外, 从电极的面积大小来对比, 击穿电压是随着面积的增大而有所降低。图 1-7 所示为邓荷尔姆(Denholm)在间隙等于 1 mm 和压力为  $1.33 \times 10^{-4}$  Pa 时的实验结果<sup>[14]</sup>。电极面积增大引起耐压降低的原因主要是放电概率增加。

### 二、电极间隙的大小

尽管不同研究者所得到的击穿电压值各不相同, 但却一致发现真空间隙的击穿电压与间

隙距离有比较明确的关系。图 1-8 所示实线为击穿电压与间隙距离的关系，虚线为击穿电场强度平均值与间隙距离的关系<sup>[1]</sup>。

实验表明<sup>[15]</sup>，当间隙距离较小(小于 0.5cm)时，随着间隙距离的增大，击穿电压  $V$  呈线性增长，即

$$V = Kd \quad (\text{kV}) \quad (1-3)$$

式中  $d$  ——真空间隙距离(cm)；

$K$  ——比例常数。

但是在间隙距离较大时，间隙距离与击穿电压的关系将按下式变化，即

$$V = Kd^\alpha \quad (1-4)$$

式中  $\alpha$  ——系数，约为 0.4—0.7。

这一点可清楚地用击穿电场强度来说明(见图 1-8 的虚线)，在小间隙时击穿电场强度较大，当间隙增大到一定程度后，击穿电场强度就逐渐减小。许多研究者认为，长间隙的击穿电场强度之所以与短间隙有差别主要是由于短间隙多半是场致发射引起击穿，而长间隙主要是由于微粒撞击造成击穿的。

图 1-9 所示为不同电极材料的间隙长度与击穿电压的关系<sup>[5][10]</sup>。从图中可以看出，当间隙长度超过 10mm 后，系数  $\alpha$  值将趋向于愈来愈小。为此单靠加长间隙距离来提高耐压水平已变得十分困难。看来对于高电压的真空灭弧室采取多断口将比单断口更为有利。

### 三、电极材料

击穿电压随着电极材料的不同而不同，表 1-3 列出了一些常用的金属材料与绝缘强度的关系，试验条件为间隙等于 1 mm<sup>[16]</sup>。

表 1-3 电极材料与绝缘强度(间隙为 1 mm)的关系

电极材料	绝缘强度(kV)	电极材料	绝缘强度(kV)
铅	21	铝	57
银	27	蒙乃尔合金	60
锡	30	镍	90
黄铜	32	不锈钢	120
锌	35	钢	122
铜	42	铁镍合金	197

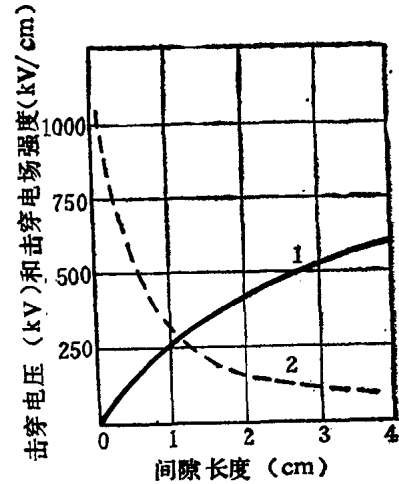


图 1-8 击穿电压、击穿电场强度与间隙距离的关系  
1——击穿电压；2——击穿电场强度

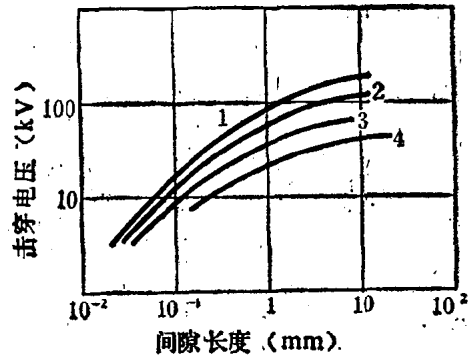


图 1-9 不同电极材料的间隙距离与绝缘强度的关系  
1——钢；2——铝；3——铜；4——铅



研究中发现：材料的硬度和机械强度与击穿电压有一定的关系。一般硬度和机械强度较高的材料，往往有较高的绝缘强度。最明显的例子是钢电极淬火后硬度提高，其击穿电压约为淬火前的1.8倍。

还发现击穿电压和阴极材料的物理常数有关，得出有下列的关系<sup>[17]</sup>：

$$V = A \cdot T_m^{0.11} \cdot C_p^{0.53} \cdot D_m^{0.29} \quad (1-5)$$

式中  $T_m$ ——材料的熔点；  
 $C_p$ ——材料的比热容；  
 $D_m$ ——材料的密度；  
 $A$ ——比例常数。

#### 四、老炼作用

在电极上加上一一定的电压，使电极间隙发生火花击穿放电，经过若干次的这种火花放电后，电极间隙的击穿电压有显著的提高，这种方法通常称做“老炼”。早在1918年密立坎和苏亚(Millikan and Sawyer)已开始使用<sup>[18]</sup>。当时他们曾对1 mm的真空间隙进行连续火花放电老炼，结果使原先承受30kV电压的电极击穿电压提高到120kV，但经过24小时后，电极的击穿电压又下降到起始的数值。分析其原因主要是由于当时的真空工艺不够完善，过量放气所造成。

近几年的实验表明，老炼对提高击穿电压是有效的，尤其在高压电源端，串联高值阻抗限制击穿电流的老炼方法比起串联低值阻抗限制击穿电流的老炼方法，其效果要好得多，但达到老炼平衡的次数要比低值阻抗多得多。这主要是由于老炼能消除电极表面上的尖棱、毛刺、脏污和杂物等。这些东西一般称作“活跃点”。在阻抗小时，击穿电流大，活跃点的消除比较容易，但同时也产生破坏电极表面的作用，即会再生出新的尖棱和毛刺。

此外，老炼的范围与电极的几何形状有很大的关系。对平坦形电极，通过一定次数的老炼处理后，电极表面差不多全被老炼；而对弯曲形电极，可能只有局部表面被老炼，并且老炼的程度分布也极不均匀，结果击穿电压一般比前者要低。

老炼虽然对开断大电流的真空灭弧室耐压水平没有多大作用，但对分合电容器组用的真空灭弧室，经过老炼处理后已证实可防止重燃的可能。

#### 五、操作条件

经过老炼处理的真空灭弧室在空载操作后，击穿电压往往有明显的降低，这是由于触头闭合形成冷焊，而分开时又拉出断丝的原因，但对用硬金属材料的触头，如钨，没有明显影响。对于大电流合分操作，击穿电压是不稳定的，有较大的几率性，有时可能降低得少一些，有时可能降低得多一些，但总的击穿电压均趋向下降。对于中等电流的合分操作，击穿电压是有所提高的。我国学者刘绍峻教授等曾在这方面作了大量研究工作<sup>[41]、[42]</sup>。图1-10所示为用钨作电极材料<sup>[5]</sup>，分断电流为250 A所作试验的结果。在新电极的情况下，电流为250 A作25次分断试验，每次操作后测量其击穿电压，见图中黑点，平均击穿电压为53kV。然后，用同样电流继续进行200次分断操作，不作记录。以后，又作25次分断250 A的操作，每次操作后测量其击穿电压，见图中小圆点，平均击穿电压有明显提高，为90kV。这说明在小电流下的分断操作，能起到良好的老炼效果。