

真空开关电器 及其成套装置

熊泰昌 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

真空开关电器 及其成套装置

熊泰昌 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要内容包括真空介质放电机理和灭弧特性的基础理论, 现行真空断路器、负荷开关和接触器及其成套装置——空气绝缘开关柜、气体绝缘开关柜、固体绝缘开关柜的结构详述与国内外最新技术发展状况和研究动态, 真空断路器及其成套装置的在线监测技术, 故障原因分析与检修试验操作, 以及与真空开关相关的各种操作过电压产生原因分析与防护措施等。

本书注重突出开关类产品和技术的时效性与实用性, 以为读者提供最新以及包含较重要的技术内容、新产品发展状态和实用价值较高的参考资料。

本书可供电力工程设计、中压开关及其成套装置选型、运行维护与检修人员阅读, 还可供中压开关电器设计、制造、试验专业和供用电、电器制造和高电压技术专业人员学习参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

真空开关电器及其成套装置 / 熊泰昌编著. -- 北京:
中国水利水电出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-5170-3403-2

I. ①真… II. ①熊… III. ①真空开关—基本知识
IV. ①TM561. 2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第163722号

书 名	真空开关电器及其成套装置
作 者	熊泰昌 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 368千字
版 次	2015年7月第1版 2015年7月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	78.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

鉴于真空开关电器优良的特性和美好的发展前景,自20世纪末、21世纪初以来,无论在国内还是在海外,相关的制造技术都迅速得到推广,产品的技术内涵更加丰富并且许多机、电参数有了进一步提高,产品的种类和数量不断增多,使用范围日益扩大。近年来,伴随经济的持续发展,开关制造业又面临电网智能化建设、降低工业制造成本和能耗、强化环保措施等一系列新的课题与挑战,但同时,也被赋予了新的技术研究方向和企业发展机遇。

在我国,随着改革开放的深化进行,真空开关制造业在此期间也有了空前蓬勃的发展并取得了丰硕成果。这些成果主要可以概括为几下几点:

(1) 真空断路器从引进技术、仿制生产已进入到自主研发的新阶段,能够生产出适合中国国情和环境条件以及系统运行特点所需的多种开关电器与空气绝缘开关柜、气体绝缘开关柜,近年来更是加大研发力度,已有多家单位相继研制成功最新的开关装置——固体绝缘柜,同时,还开发了 SF_6 气体用量大为减少的新型气体绝缘柜以及非 SF_6 气体绝缘柜,这些都是为保护地球环境、减少温室气体 SF_6 排放所做的贡献。

(2) 新技术、新工艺的推广和各类自动化数控加工设备的普及应用,极大地提高了生产效率并有益于产品质量的改进,因而真空开关及其成套装置的可靠性也有了显著提高。

(3) 在获取中压真空断路器成熟的技术和生产经验之后,现已成功地将之拓展到低压、高压领域和大容量需求方面。例如,近几年研制成功用于易燃易爆环境的380~1140V智能型低压真空断路器,126kV高压真空断路器,15kV、63kA发电机真空断路器等,这些产品已基本达到或接近国际上最先进的技术指标,显示我国真空开关电器的科研能力和技术水平已发展到一个新阶段。

本书编写的目的正是试图在简要阐述真空介质放电和灭弧原理的基础上,系统介绍在真空开关电器这一蓬勃发展大好时期中,特别是近几年各类开关和空气绝缘柜(AIS)、气体绝缘柜(GIS)、固体绝缘柜(SIS)等典型产品的结构特征和最新发展状况、在线监测和智能化技术的研究与进展、在提升产品性能、实施节能环保等方面的技术措施与研究动态;并且还有关于真空开

关电器及其成套装置运行时的过电压及防护、故障和事故原因分析以及处理、预防和维修、维护操作经验，此外，也详述了每一类开关设备合理选型的原则与建议，以期有助于读者了解国内外产品设计制造的先进经验、计算和试验研究方法，提高本地产品的能级，使之缩小与技术先进型产品的差距，促进其向更高水平发展。

上述内容主要来源于一些经典论述和作者长期向国内外专家、同行和同事学习的心得与体会，其中还包括作者在工作实践和参与的课题中所获得的经验与结论，仅供参考和交流。

本书在编写过程中，得到了许多专家和工程师们提供的热诚指导，吸取了他们提供的宝贵经验和大量资料，感谢谭燕、王德杉、Werner Jakszt 博士、陈威、Joerg Schuessler、Thorsten Hollmann、韩勤更、方杰、古龙江、傅群、王伟、任旭会、张豪、阙文华、郭丽萍、吴海洪等热心的支持与帮助；同时，无锡江南奕帆电力传动科技股份有限公司、成都旭光电子股份有限公司、宁波舜利高压开关科技有限公司、西门子公司、上海天灵开关厂有限公司、淄博金龙电力设备有限公司和伊顿公司根据他们在真空电子器件、传动和操动机构、产品研发等多年的成果与积累的丰富经验撰写了技术专题，这对真空介质理论、断路器和开关装置设计、国内外真空开关技术的最新发展和工程实践运用等提供了极为详尽和具体的诠释，作者在此一并致以诚挚的谢意。

由于本书涉及的真空开关技术领域的知识面很广，作者虽经努力尽量搜集资料，但仍可能未更全面深入地反映不断发展中的真空开关产品的全貌和技术精髓，书中还可能存在多处不妥之处，敬请读者不吝指正，作者将非常感谢。

作者

2015年7月于上海

目 录

前言

第一章 真空开关电器的发展、基本原理和性能	1
第一节 真空开关电器的研制与发展概况	1
第二节 真空介质的击穿特性和有关理论概述	4
第三节 真空电弧压降的特点与分析	8
第四节 熄弧原理与真空灭弧室的构造	11
第二章 常见真空开关的典型结构与选型应用	22
第一节 真空开关的分类、优异的特性和选型应用	22
第二节 中压真空断路器	26
第三节 永磁操动机构的真空断路器	38
第四节 真空负荷开关与真空接触器	45
第五节 低压真空断路器	52
第三章 户内真空开关装置的典型产品与选择应用	55
第一节 户内中压真空开关装置的分类与主要用途	55
第二节 空气绝缘中压开关柜与典型产品	57
第三节 气体绝缘中压开关柜与典型产品	74
第四节 固体绝缘中压开关柜与典型产品	91
第五节 开关柜内部故障电弧的特性及其研究	101
第六节 以真空断路器为进线开关的小型配电装置	112
第四章 真空断路器的操动机构	116
第一节 真空断路器操动机构的种类和基本技术要求	116
第二节 真空断路器操动机构的基本结构要素	121
第三节 常见的真空断路器操动机构	126
第五章 真空开关电器及成套装置的运行与在线监测	143
第一节 与真空开关有关的操作过电压及防护	143
第二节 关于真空开关成套装置的电磁兼容(EMC)问题	153
第三节 真空开关装置的智能化与在线监测	162
第四节 运行中真空开关装置的巡视检查	171
第六章 真空开关电器及成套装置的故障诊断、维护、检修与试验	174
第一节 真空开关电器成套装置常见故障及原因分析	174

第二节	开关柜内部故障电弧的发生与防范	178
第三节	真空开关电器及成套装置的维护与检修	183
第四节	真空开关电器及成套装置检修后的试验	197
第七章	真空开关电器新技术与产品的发展	200
第一节	真空断路器的新材料研究与工艺探索	200
第二节	真空发电机断路器	201
第三节	高压真空断路器	206
第四节	真空熔断器	208
附录	真空开关电器及其成套装置新技术与新产品	211
参考文献		238

第一章 真空开关电器的发展、基本原理和性能

第一节 真空开关电器的研制与发展概况

真空开关是一类以真空为绝缘和灭弧介质的断路器、负荷开关、接触器和隔离开关等开关电器的总称，因其结构简单并具有无火险、无毒、可频繁操作等优良特性，经多年发展，在中压系统逐渐替代了传统的油断路器，而且在数量上与六氟化硫断路器相比占有绝对的优势，已成为控制电器的主流。同时，以各类真空开关为主的许多新型成套装置也不断涌现，极大地改善和提高了供电的安全性与可靠性，也对实现新兴的智能电网运行具有极重要的意义。随着中压断路器制造技术的不断提高，基于其技术基础研制的低压真空断路器也早已成功投入使用。此外，为充分发挥真空开关的优异特性，高压真空断路器的研制也已成为一项重要课题，经 10 余年来的努力，各国都不同程度地取得了一定的成果，现在，已有最高 252kV 的断路器试制成功并投入试运行。

真空介质特性的研究和工程应用可追溯到 19 世纪末。人们在研究气体放电时发现，随着容器内空气分子的不断减少，继续抽出空气使容器内气压达到极小的数值，即容器处于真空状态时，电极之间的绝缘强度得到极大的提高。同时，推想由于这时空气分子电离后产生的导电粒子也极其稀少，对电弧的熄灭非常有利，于是人们开始对真空灭弧室的研究。

1895 年，英国 Rittenhouse 使用扩散泵首先制造出一个灭弧室模型，用它进行了开断电弧的试验。接着在以后的 30 几年里，不断有人继续改进灭弧室的结构并试制成功早期的真空开关。1926 年，美国公布了 Sorensen 的研究成果——一台试验性的真空开关成功地开断了 4.1kV、926A 交流电弧。随后，GE 和 Westinghouse 等公司又深入开展了横向吹弧磁场对电弧运动和触头烧损的影响研究工作。但是，由于真空灭弧室的制造与真空技术、冶炼合金等工艺的不断进步和提高有着极强的依赖关系，将真空开关能够发展成为实用的商用电器产品的研究工作一直持续了数十年才有了渐进的成果。在 20 世纪 50—60 年代成功地解决了与真空灭弧室相关的一系列关键工艺问题，如超高真空度的制取技术、高强度玻壳和陶瓷外壳材料的制造以及它们与金属部件密封焊接技术的改进、高质量金属波纹管的试制成功、新型触头合金的开发及其冶炼技术的改进等，确保了灭弧室高绝缘强度、长寿命的特性，且灭弧室的开断能力大幅度提高，由此促进了断路器向高水平发展。1955 年，美国 Jennings 公司制造了 15kV、2kA、200A 的真空开关，用于无线电设备的电源控制和短路保护。接着在这一基础上又成功进行了切断单相输电线路的现场试验，以探讨真空开关用于电力系统的可能性。为提高灭弧室的开断能力，在 20 世纪 60 年代，英国、美国的许多公司都集中精力深入研究触头的结构设计与合金材料制造工艺。GE 公司

首创的开螺旋槽触头使开断能力极大地得到提高,于是制成第一台商用三相真空断路器,其额定电压 15kV、额定短路开断电流 12kA、额定电流 600A。英国研制的真空开关特点在于镶嵌式触头,基于这种触头开发了 400~3000A 的各种真空接触器,用于输电系统和煤矿供电,其应用于煤矿供电的重要意义还在于消除了火灾和爆炸的危险。

日本和德国研制真空开关工作的起步均从引进国外技术开始,随后加大研究、改进的力度,而取得了更大的成就。例如,日立公司在 1965 年制造出该公司的第一台 7.2kV、50kA、400A 真空断路器。东芝、明电舍公司也在差不多在同期试制成功它们的产品。1968 年,东芝公司又在从 GE 公司引进真空开关制造技术的基础上,加上自己的研究成果,迅速推动了各类真空开关电器的生产与发展。德国 Siemens 公司和 Calor Emag 公司(后来成为 ABB 公司重要的成员之一)都在各自的基础上多年来持续地开展着系列研究,在合金材料冶炼、磁控触头设计、灭弧室真空焊接封装和弹簧操动机构等一系列核心技术方面取得了杰出的成就,因而这两个公司研发的不同风格系列真空断路器产品对国际上真空开关的进步和推广产生了深远的影响。在同期美国,大力发展真空开关的还有 Eaton(伊顿)、Cooper(库柏)、Carter-Hammer 等公司,它们或承继 Westinghouse 公司的技术、或自行研发,都发展了各自的中压断路器系列产品。

20 世纪 70 年代是真空开关全面发展和开始广泛应用的阶段。高速摄影机的应用对研究电弧运动和磁场作用提供了有力的帮助,基于等离子物理理论和真空电弧理论,深刻地分析、创立真空导电、放电机理的理论和分析不同形态电弧的成因是这一阶段的重要研究课题。研究的成果之一是人们设计了形形色色不同结构的磁控触头,如改进的杯状触头、开斜槽纵向磁场触头、各种串联线圈自吹触头等,利用磁场力驱动大电流电弧运动使之变为分散状而不是积聚状,从而极大地减弱了高电流密度弧柱对触头表面的烧损,提高了灭弧室的开断能力。在此期间,还研制成功了适合各种不同用途的触头合金,因而促使真空断路器的性能有了重大突破。进入 80 年代以后,研究内容又增添了开关小型化、提高开断容量、低截流触头合金的研制、设计各类真空开关成套装置等新的课题。这时,真空开关已由较小开断电流发展到最大至 63kA 的断路器和适合用于不同场所的真空负荷开关、真空分段器、变压器有载分接开关,以及以真空开关为主开关的空气绝缘开关柜和气体绝缘的小型开关柜,充分地满足了电力工业不断发展的需求。在中压领域内,真空开关因其优异的特性被迅速推广,原来占主要地位的油断路器、空气断路器已经逐渐被真空断路器和在同期发展的六氟化硫断路器所取代。

在与真空断路器发展差不多时期内,利用 SF_6 气体的优良特性研制成功的各类中压六氟化硫断路器和负荷开关也是一类技术先进型开关电器,它们同样具有优异的灭弧能力、断口恢复强度高以及无火灾等优点。但随着技术不断进步,中压真空断路器的开断能力已能与六氟化硫断路器相媲美,截流现象引起的操作过电压也显著降低,减少了运行人员的疑虑,终因其更加突出的优点而超过了六氟化硫断路器,以至于在 20 世纪 90 年代中、后期,我国和国外许多主要的开关制造公司逐渐转为全部生产真空断路器。

真空断路器的主要有以下优点:

(1) 真空介质绝缘强度高,开断短路电流后恢复速度快,断路器动触头行程比油断路器和 SF_6 断路器的短得多,因而操动机构的操作功小,材料磨损轻,机械寿命一般能达

到1万次甚至2万~3万次。

(2) 优化设计的磁控触头不但减轻了大电流电弧对触头合金的烧损,而且弧压降低,真空断路器因此具备了电寿命长的优点。例如,油断路器仅能开断额定短路电流3~4次,而真空断路器可达到几十次。

(3) 在开断电弧后,真空介质中不会出现对人体有害的物质;而六氟化硫断路器开断后, SF_6 气体在高温电弧作用下分解出 SF_4 、 SO_2F_2 、 SOF_2 等剧毒低氟化合物,在检修断路器时无法处理这些物质,它们的存在构成了对环境的永久污染。同时, SF_6 气体也是严重造成地球温室效应的气体之一,位于被削减之列,这也成为六氟化硫断路器被真空断路器替代的一个重要因素。

(4) 结构简捷,比同样规格六氟化硫断路器极柱的零件少得多。通常 SF_6 灭弧室除有主触头之外,还设置辅助触头、磁吹线圈等必需的部件。同时,气密结构也很复杂,包括数个O形圈和与之配合、加工精度必须非常高的密封槽;为防止开断后的气体外逸,其顶部还装有吸附装置,因而零件数量繁多、断路器体积大。零件越多意味着容易造成故障隐患的概率越大;与之相比,真空断路器采用真空技术制造的灭弧室,零件数量极少,可动部件只有动触头和波纹管两件,相应的故障隐患的概率小,可靠程度高,有利于运行管理和维护。

(5) 结构简捷带来的另一优点是断路器能够频繁、快速地进行合分动作,可实现控制频繁投、切电动机、冶炼电炉等供电电源的操作。

为进一步使上述优点体现在更高电压等级的断路器上,以逐渐减少高压六氟化硫断路器的气体用量,国外有些公司开始尝试研制高压真空断路器。但由于真空介质的固有特性导致电极在高压电场中表现了一种放电的特殊行为,必须经济、合理地解决高压灭弧室面临的许多技术难题,所以将中压真空断路器的生产技术拓展到高电压等级遂成为一项新的重要课题。

跨入21世纪前后,真空断路器研究课题的重点主要有研发新型永磁操动机构、应用于发电机控制的断路器设计、提高单个灭弧室的额定电压和开断能力,研制更高电压等级的断路器。其中,研制高电压等级真空断路器仍是一项需要持续、深入进行的工作,这是因为多断口的技术复杂,制造成本高。与高压、超高压六氟化硫断路器相比,后者经过灭弧方式和操动机构设计的不断改进与发展,目前单断口额定电压可达550kV、双断口额定电压可达800kV,额定短路开断电流50kA、63kA。近期,我国还通过合作和自主研发的方式,成功研制出1100kV的GIS。同时,操动机构的不断优化和多年积累的成熟运行、管理经验使得高压、超高压六氟化硫断路器在现阶段仍占绝对的优势,因而目前尚无其他的断路器能够替代。但由于在生产和检修过程中不可避免地排放以及运行中的微量泄漏,而全球高压、超高压六氟化硫断路器的数量众多, SF_6 气体对地球的温室效应影响巨大。因此,从环保的角度来看,发展高压、超高压等级的真空断路器具有极为重要的意义。

真空断路器除了向高电压、开断大电流方向发展外,还因其具有真空灭弧室在开断操作时不对外界喷弧、无火灾危险、能频繁操作、适合极恶劣气候条件和有粉尘易爆场所的优点,660V和1500V低电压等级的真空断路器和接触器也得到充分的发展,如在煤矿供

电系统和起重、泵站和牵引系统中都已获得了广泛的应用。德国和日本的低压真空断路器的短路开断能力都已达到 65kA (额定电压 1000V 时)。

我国真空断路器的研制工作始于 20 世纪 80 年代,最早有几家防爆电器厂研制 7.2kV 手动操作的小容量真空断路器,灭弧室是玻壳结构,由当时生产大功率发射管的专业厂试制。80 年代后期有西安高压电器研究所自主研发的 ZN28 系列真空断路器问世,产品逐渐推广用于电力工业。为改进提高真空断路器的制造水平,在 1990 年前后,华光厂和宝光厂分别从 Westinghouse 和 Siemens 公司引进陶瓷壳真空灭弧室制造技术,北京开关厂从 Siemens 公司引进 3AF 型 12kV 真空断路器制造技术。1992—1993 年,ABB 公司(集团成员 Calor Emag 公司)和 Siemens 公司相继在中国成立合资公司,开始用德国技术生产 12~40.5kV 真空断路器和开关成套装置的系列产品,以后 Siemens 公司又在无锡合资厂生产各类真空灭弧室。在 21 世纪初,日本的东芝公司等也在我国以合资公司的形式用其技术开始了真空开关的生产。通过与上述国际著名大公司合作或技术引进的方式生产,我国的真空开关制造业引入了国际最先进的计算机设计软件和严格的生产管理方法与质量管理体系、自动化数控钣金加工设备等硬件和各类试验测量技术,迅速和极大地提升了真空断路器的制造水平。在此基础上,通过国产化研究和进一步再开发工作,又提高了自主研发能力,从而促进各类真空开关电器向高质量、多功能和多品种的发展,不但迅速地实现了开关无油化,有力地配合了数次城网改造和农网改造,增强了供电可靠性,促进了电气化铁路和地铁的高速发展。现在,国内的中压真空开关电器已发展到包括断路器、负荷开关、接触器、柱上开关及其成套装置如环网柜、空气绝缘开关柜(AIS)和气体绝缘开关柜(GIS)、固体绝缘开关柜(SIS)等;此外,高压真空断路器的研制工作也取得了丰硕成果,目前,国外产品的额定电压最高可达 252kV,据日本资料介绍,已有 3350 台 72~252kV 真空断路器在系统运行。我国对高压、超高压真空断路器的理论研究和研制也极为重视,近年来在东北电网已有数十台 72kV 的真空断路器投入运行,系统中尚有 126kV 自行设计的真空断路器在试运行。

第二节 真空介质的击穿特性和有关理论概述

一、真空介质中放电现象的试验研究与分析

根据高压工程关于气体放电现象的电子碰撞理论,在一定的场强作用下,影响电极间气体放电的形成主要有气体分子的密度 ρ 和自由电子运动的平均行程 λ 两个因素。即当气体的密度大时,自由电子在电场中向阳极运动的加速过程中与其他分子的碰撞次数增多, λ 很短,能量不易积聚,使产生导致击穿的电子崩的概率小。如使电极间气体击穿,必须升高外施电压,以便电子在电场中获得更多的动能产生电子崩。相反,气体密度小,自由电子在运动中碰撞次数少, λ 长,能量容易积聚,增大了出现电子崩的概率,因而在外施电压较低时气体即可击穿。试验发现,如固定电极的间距、改变气体的压力,在 $(1 \sim 2000) \times 1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$ 范围内,气体放电电压随气压的升高而增大、随气压的降低而减小,然而进一步抽取密封容器内的空气,降低气压,在达到 $1.33 \times (10^{-3} \sim 10^{-6}) \text{ Pa}$ 的真空状态后,电极间的放电电压反而逐渐升高,这是因为此时空气密度极低,能够产生电子崩的

自由电子所需的平均行程必须非常大,才可集聚足够的动能碰撞其他气体分子产生电子崩引起击穿。以上现象完全可以用电子碰撞理论来解释。

如果继续抽气,容器内压力更低,即达到某一更高的真空度后,电极间的击穿电压不再增高而呈现一种类似饱和的状态。定性描述这一过程的曲线如图 1-1 所示。图中, A—B 和 C 点以下曲线部分的气体放电规律可用巴申(Paschen)定律定量地加以描述和计算。对应以气体压力 p 和电极间距 d 的乘积 pd 为变量,放电电压 U 的数学表达式如下

$$U = \frac{B_0 pd \left(\frac{T_0}{T} \right)}{\ln \left[\frac{A_0 pd \left(\frac{T_0}{T} \right)}{\ln \left(\frac{1}{\gamma} \right)} \right]} = f \left(\frac{pd}{T} \right) \quad (1-1)$$

式中: A_0 、 B_0 为标准温度 (20°C) 时与气体种类和温度有关的常数; γ 为与电极材料和表面状态有关的系数; p 为气体压力; d 为电极间距; T_0 、 T 为标准状态的温度与试验时的温度。

在温度一定时,式 (1-1) 可写成 $U=f(pd)$ 的形式。

按式 (1-1) 绘制的计算曲线如图 1-2 所示,它是一个有着极小值的 V 形曲线。计算时空气的常数取值 $A_0=0.11/(\text{cm} \cdot \text{Pa})$, $B_0=2.74\text{V}/(\text{cm} \cdot \text{Pa})$, $\gamma=0.025$ (铜电极)。极小值的右侧对应于图 1-1 中曲线的 A—B 区段,显示了放电电压随气压的升高而增大;在极小值的左侧,对应图 1-1 中曲线的 B—C 的区段,表明放电电压随气压降低而增大的特性。图 1-2 中还同时绘出了在均匀电场中电极间放电电压 U 与 pd 关系试验实测的曲线。除 pd 值很低的一段曲线外,其余基本与巴申定律的计算值一致。

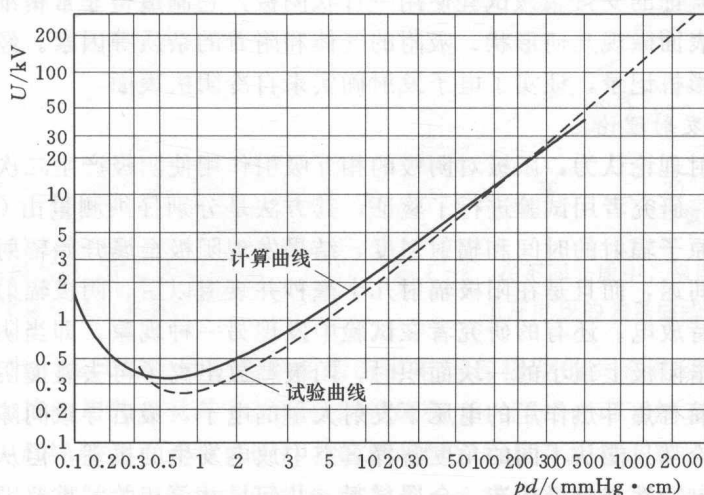


图 1-2 均匀电场中电极间放电电压 $U=f(pd)$ 的试验曲线和计算曲线

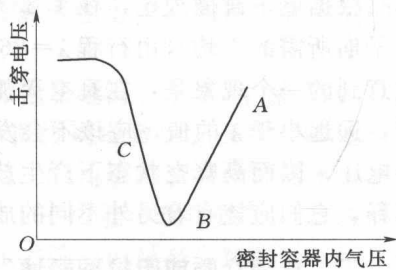


图 1-1 密闭容器内气体击穿电压与气压的关系曲线

根据电子碰撞理论,在 $1.33 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 的真空中,自由电子能够产生使电极间击穿电子崩所需的平均自由行程 $\lambda = 26 \text{ m}$;在 $1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 的真空中, λ 必须增大到 26 km 。应注意到的一个现象是:在真空灭弧室中,电极的间距(断口)通常仅有几毫米到二十几毫米,远远小于 λ 的值,应该不会发生击穿,但事实表明在外施电压作用下却具有一定的击穿电压,因而高真空状态下产生放电的原因以及击穿电压饱和现象都无法用电子碰撞理论解释,它们应该有着另外不同的放电机理,然而至今人们仍未发现其真正的原因。

二、真空介质放电机理概述

真空介质中的放电现象有着十分复杂的成因和许多未知因素,自 1920 年以来,已有不少研究者从事试验研究工作,试图合理地解释从预放电开始到间隙的击穿过程。但由于真空中剩余气体的种类、电极材料和表面状况,以及附着杂质的不同,这些因素敏感地影响了放电电压的变化,所以至今仍未寻求到一套能完整地阐述真空中放电现象的理论。在此期间推出了一些理论并经试验验证,也只能分析局部的或特定条件下的放电现象。尽管这些理论的解释方法不尽相同,但它们对灭弧室的设计和制造都有着重要的参考意义和实用价值。以下仅介绍其中比较有重要意义的两种理论。

1. 电子发射理论

电子发射理论包括增强热电子发射理论和冷电子发射理论。

Schottky 增强热电子发射理论是最早解释自由电子的出现及其发射过程与温度、电场相关的理论。即在阴极中,电子能量大部分很低,在阴极被加热以后电子增加了动能,如果再处于外施电场 10^7 V/mm 或更高的场强中,该电场降低了阴极金属材料的势垒高度,使电子脱离金属表面所需的逸出功变小,即高压电场增强了热电子的发射效应。但是,以后的试验证明,在温度 1000 K 以下的场致发射与温度大小无关。

Fowler 和 Nordheim 经研究后认为,阴极金属材料中电子能量分布在具有最大值的一条费米能带上,高压电场的作用使金属中的电子势垒在费米能带处的宽度减小、高度降低。如果电场强度达到 10^9 V/mm ,则电子具备了足够的发射能量。这一理论得到用场致发射显微镜试验验证的支持。该试验使用一针状阴极,它制造得非常精细和理想,排除了影响放电的电极表面微观几何形状、吸附的气体和附着的杂质等因素。经测量发射电流的密度和用高速摄影机记录,证实了电子发射确实来自冷阴极表面。

2. 二次电子发射理论

二次电子发射理论认为,阳极对阴极的相互吸引作用使阴极产生二次电子发射,从而引起间隙的击穿。研究者用试验进行了验证,其方法是分别仔细测量由 Cr、Cu 制成的两个电极开始出现原子辐射的时间和辐射强度,结果发现阴极金属开始辐射的时间总是比阳极开始辐射的时间迟,而且是在阳极辐射几十毫秒并衰退以后,阴极辐射才开始增强并由它发射的蒸气维持放电。还有的研究者在试验中发现另一种现象,即当阴极发射的电子束以很大的能量轰击阳极上很小的一块面积时,阳极释放出离子再去碰撞阴极,然后引起阴极在低于阴极表面有焦耳热作用的电压下发射大量的电子,最后导致间隙击穿。

虽然上述理论都只能从不同的角度解释真空中放电发生的机理,但从它们研究的过程中得到了影响放电特性与电极构造、金属材料、几何尺寸等相关的重要因素,这对真空灭弧室的设计和特性研究都有非常重要的指导意义。这些因素主要概括如下:

(1) 电极材料与表面状态。在真空中进行的大量试验研究得到的结论是:击穿电压与

电极材料的逸出功大小无关，而材料的硬度、微观光洁度以及附着杂质的种类和它们的形状却对击穿电压有着极大的影响。

金属电极的间隙等于定值时，材料的硬度越大，击穿电压越高。表 1-1 是 Trump 测量的几种电极材料在间隙均为 1mm 时按工频击穿电压高低排列的数字。其中只有铝是例外，其硬度比铜低，但击穿电压却比铜高，原因尚不清楚。其他研究者测得的具体数字与表 1-1 虽然不同，但规律是一致的，这与硬度大，在加工中可能出现的微观凸起较少有关。另外，金属本身特性、表面氧化程度、熔点和蒸气压力确定的最高去气温度、杂质种类及含量等都对间隙的击穿电压有一定影响。

表 1-1 不同电极材料在间隙为 1mm 时的工频击穿电压

电极材料	钢	不锈钢	铁	蒙乃尔合金（一种镍合金）	铝	铜
工频击穿电压/kV	122	120	96	60	40	37

(2) 间隙距离。在距离小于几毫米时，击穿电压随极距的增大而升高，与极距呈近似的线性关系；极距增大，这一关系呈非线性。随着极距再增大，击穿电压的增量越来越少，近似地呈饱和状态。例如，在图 1-3 中，铜电极间隙为 12mm 固定值，工频击穿电压与空气压力变化之间的实测关系曲线呈现了在高真空状态下，气体压强达到 10^{-2} Pa (10^{-7} bar) 时，放电电压不再随真空度的提高而增加。这一现象显然与空气中放电的规律不同，因而也证实真空中击穿放电发生的机理有着它的特殊性。

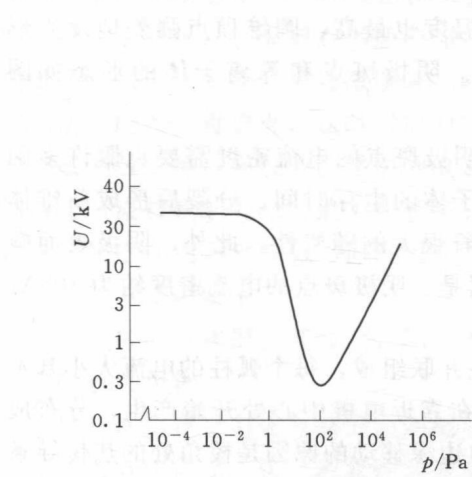


图 1-3 铜电极间隙（固定为 12mm）耐受电压与真空度的关系曲线

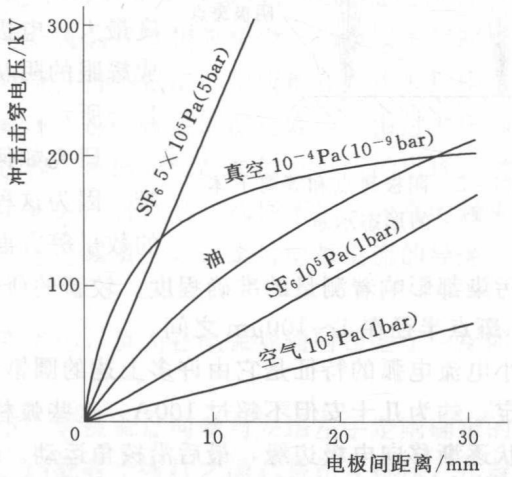


图 1-4 在不同介质中，极距和冲击击穿电压的关系曲线

图 1-4 还绘出了在其他几种介质中冲击击穿电压与极距的关系曲线。作为对比，可观察到真空介质比其他几种介质具有更优异的绝缘强度，同时也可了解真空灭弧室不能像其他介质的灭弧室那样以简单地增长断口（电极间隙）的尺寸来提高额定电压的原因。

(3) 电场的不均匀程度。电极之间的电场状况，尤其是边缘和棱角处的几何形状影响着电场的不均匀程度，也显著地影响着间隙的击穿电压。这些部位的曲率半径越小，局部电场越不均匀，间隙的击穿电压越低。

第三节 真空电弧压降的特点与分析

真空中的间隙击穿后或在真空灭弧室中触头分离时，都将产生电弧。触头的瞬间分离还出现了极高的电场强度，导致强烈的场致发射；同时，由于数千牛的触头压力突然变小，接触电阻急剧增大，回路电流在接触面上的热效应使电极表面温度骤然升高，由此又导致了热阴极效应。

在空气电弧中，电弧的燃烧是依靠弧柱里气体电离后生成的大量离子与电子实现的。而真空中残存的气体分子数量极其微小，电弧燃烧完全依靠金属蒸气维持，与空气中电弧的燃烧有着本质的区别，因而真空电弧的产生和发展都有其独特的过程。研究发现，真空电弧的发展机理、形态和特点随电弧电流的大小而异，因而可将之分类为大电流电弧和小电流电弧两大类。深入了解它们的特性，对提高真空开关的开断能力、延长电寿命以及降低某些操作过电压都有着重要的参考作用。

一、小电流电弧

小电流电弧是指通常不超过几百安的电弧。研究发现，小电流电弧的放电自阴极开始，接着出现的电子和金属蒸气发散地轰击起着收集器

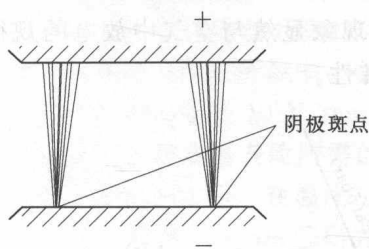


图 1-5 阴极斑点和等离子体的形态示意

作用的阳极表面，因而弧柱的形态成圆锥形等离子体。位于阴极的圆锥顶点直径仅几微米，所以该处的电流密度最大，电极表面温度也最高，圆锥顶点强烈地发光形成耀眼的阴极斑点。阴极斑点和等离子体的形态如图 1-5 所示。

研究如何测量阴极斑点的电流密度需要克服许多困难，因为这种等离子体的生存时间、分裂后形成新锥体的数量等方面都有着很大的随机性。此外，阴极表面微小的污染都影响着测量的准确程度。较新的研究数据是：阴极斑点的电流密度约为 10^8 A/cm^2 ，斑点半径在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间。

小电流电弧的特征是它由许多上述的圆锥形弧柱并联组成，每个弧柱的电流大小基本上一定，约为几十安但不超过 100 A 。这些弧柱一般在靠近电极中心处开始产生，分布成圆环状逐渐移向电极边缘，最后沿棱角运动。电弧向边缘移动的原因是棱角处的热传导条件比平面差，所以该处温度高，有利于热电子发射和维持电弧燃烧。在电弧发展过程中，弧柱之间始终相互排斥，以每秒几厘米到几米的速度移动。随着电流的增大，先形成的弧柱不断分裂，生成一些新的弧柱，与此同时，也有的弧柱自行熄灭。从形态上看，这种电弧呈扩散状，所以称扩散状电弧。

小电流电弧具有以下的一些特点：

(1) 在燃烧过程中，由于电子的迁移率远远大于金属蒸气中金属离子的迁移率，即正离子进入阴极的速度比电子进入阳极的速度慢得多，因此在阴极附近形成正空间电荷区。在正电荷电场作用下，弧腔中电场强度的分布变得不均匀，阴极表面附近的电位梯度骤增，形成了阴极压降区；而在从正空间电荷区到阳极的电弧部分，则因电场的反向叠加减

小了该区的电场强度。图 1-6 (a) 所示为电场分布的示意图。图中曲线的 OA 部分表示阴极压降区，它占据了电弧电压的大部分。弧柱部分 AB 的压降很低，呈现很高的电导。当电流增大时，阴极斑点随之增多，出现更多的弧柱，扩大了导电截面，因而弧压降随电流增加的变化很小。又因为阴极压降区中离子密度与金属蒸气的发射有关，所以小电流电弧的压降主要取决于阴极材料的特性。例如，铜电极的弧压降约为 20~40V，在电流电弧几百安范围内，这一数值基本与电流大小无关，因而在交流半波的电弧电压（弧压降）曲线呈平坦状，其波形如图 1-6 (b) 所示，它与图 1-7 中常见的空气、油等介质中交流电弧压降的马鞍形曲线有显著区别。

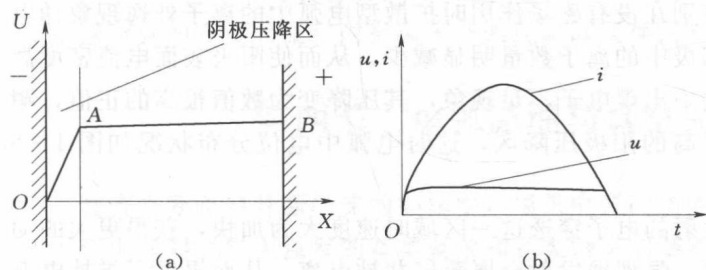


图 1-6 小电流电弧的弧压降特性
(a) 弧压降分布曲线；(b) 弧压降波形

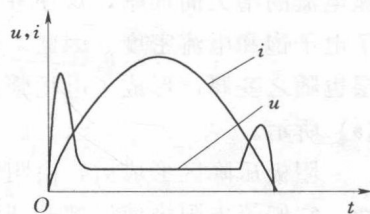


图 1-7 空气和油中交流电弧的
电流与压降波形

(2) 小电流电弧的燃烧仅由阴极发射的电子和金属蒸气维持。在交流电流自然过零前，瞬时值变小，阴极斑点迅速冷却，发射的金属蒸气也相应减少。当金属蒸气减少到不能维持电弧导通所需的最低浓度时，电弧的燃烧变得不稳定，相应地在电流波形中出现高频振荡，电弧突然熄灭，这时对应的电流被截断，这一现象即截流效应。由过电压理论得知，截流效应将引起设备回路中的电磁过渡过程，可能导致高幅值过电压的出现，过电压幅值与电流被截断的瞬时值大小有关。为避免它的危害，必须选择蒸汽压较高的触头合金材料，使之在较小电流瞬时值时仍能发出较多的金属蒸气，以维持电弧电流的导通，相应地减小过电压的幅值。

(3) 电弧仅烧损阴极表面，阳极不但未受损伤，反而在电弧导通时覆盖了一层阴极材料的喷射沉积物。

(4) 在垂直于电弧电流方向的磁场作用下，阴极斑点向着与安培左手定则确定的电力相反的方向运动，这一现象称为逆动现象。因此各个弧柱之间总是相互排斥，作着无规则的运动，而不像平行导线中通过相同方向的电流时那样相互吸引。这一特点对保持阴极表面处于不高的温度是有利的。关于小电流电弧的逆动现象目前也仍无合适的理论解释。

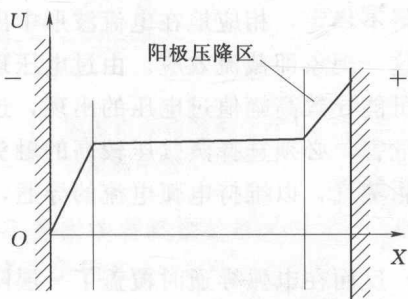
二、大电流电弧

大电流电弧与小电流电弧的发展过程有很大区别。在触头分离的瞬间，触头表面接触电阻骤然增大，因此出现高温而局部融熔，熔化的金属暂时连接着动、静触头，形成了所谓的“液态金属桥”。随着触头的继续分离，液态金属桥被拉断，触头表面形成了一些直径约为 $0.7\mu\text{m}$ 的灼坑，在灼坑附近首先出现一种暂时停顿的电弧。国内外的研究者都发现在简单开断的电弧中，这种电弧在很短暂的时间内甚至有外磁场的作用下也不会移动，

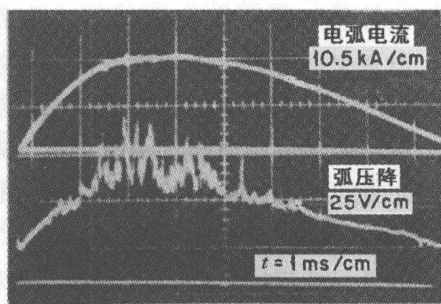
因此称为限制型电弧。如果在触头分离瞬间电弧电流不大，限制型电弧随机可转变为扩散型电弧；但如果电弧电流非常大，限制型电弧的形态可直接转变成收缩状。

通过测量弧柱电位分布发现，在阳极附近存在一个由空间负电荷积聚形成的表面电荷鞘层，称阳极鞘层，其电压降的高低与阳极表面电流密度和电子饱和电流密度有关。电子饱和电流密度是指单位面积上电子以热运动方式碰撞阳极使之吸收电子形成的最大电流值。当电弧电流较小时，阳极中和的电子也较少，这时阳极表面电流密度低于电子饱和密度，鞘层中积聚了较多的负电荷，因此压降为负值，阳极鞘层排斥等离子体中过量的电子向阳极运动。随着电流继续增大，扩散型电弧中阴极斑点不断增多，它们发射的金属蒸气随之增加。但由于电弧的扩散，特别在没有磁场作用时扩散型电弧中的离子外逸现象随电弧电流的增大而加剧，这使进入阳极中的离子数量明显减少，从而使阳极表面电流密度高于电子饱和电流密度。因此，鞘层中出现电子不足现象，其压降变为数值很高的正值，鞘层也随之变厚，形成了电场强度很高的阳极压降区，这时电弧中电位分布状况如图 1-8 (a) 所示。

阳极压降区形成后，由阴极发射的电子穿透这一区域时速度大为加快，获得更大的动能，它们轰击阳极使局部升到高温，强烈地发射金属蒸气并被电离，从而提供了维持电弧燃烧所需的大量离子和电子。由此可见，大电流电弧是由阴极和阳极的发射作用共同维持的，这时电弧电压高而且呈不稳定状态，图 1-8 (b) 所示为一个 21kA 电弧电流及弧压降的实测波形。研究发现，随着电弧电流的增大，这种不稳定状态加剧，如果触头合金局部出现熔化，电弧电压不稳定的振荡将减弱，弧压降也有所降低^[1]。



(a)



(b)

图 1-8 大电流电弧的弧压降特性

(a) 弧压降分布曲线；(b) 21kA 电弧的弧压降波形

如果电流再增大，以铜电极为例，当电流接近 10kA 时，阳极压降区的作用更加剧了阳极表面的电子轰击，由此导致局部熔化，熔化点成为发光的“阳极斑点”。一旦阳极斑点增多，它们对应的许多阴极斑点迅速收敛，这时阳极斑点和阴极斑点不再做无规则运动，电弧由许多圆锥体合并成集聚状、高电流密度的弧柱，因此被称为集聚型电弧。集聚型电弧的弧柱倾向于停留在阳极斑点上，因为该处金属蒸气密度大，易于维持电弧的燃烧。这种形式的电弧可以最终导致电极（触头合金表面）局部的严重熔化。用高速摄像机拍摄的阳极斑点如图 1-9 所示。