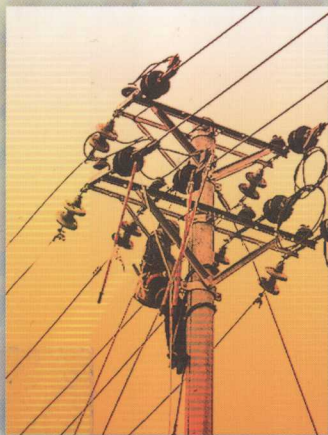




高等学校“十一五”精品规划教材

高电压技术

李景禄 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TM8/22

2008



高等学校“十一五”精品规划教材

高电压技术

李景禄 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书包括高电压绝缘、高电压试验、电力系统过电压与绝缘配合三篇。主要内容有：气体电介质的绝缘特性；固体、液体电介质的绝缘特性；电力系统污闪及防污闪技术；电气设备的绝缘试验；绝缘油的气相色谱试验与分析；常用电气设备的试验、检测与诊断；电气设备在线监测；线路和绕组的波过程；雷电及防雷保护装置；电力系统防雷；电力弱电系统防雷保护；电力系统内部过电压；电力系统绝缘配合。

本书可供电力工程类专业的本科教材和高电压与绝缘技术专业师生使用；亦可供电力工程专业技术人员查阅、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高电压技术/李景禄主编. —北京：中国水利水电出版社，2008

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978-7-5084-5183-1

I. 高… II. 李… III. 高电压—技术—高等学校—教材
IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 204351 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 高电压技术
作 者	李景禄 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 18.75 印张 447 千字
版 次	2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	36.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

主 编 李景禄

参编人员	林 冶	于建龙	周冠东	李卫国	唐 忠
	赵国喜	张海峰	郑端臣	张 辉	马心良
	毋付安	袁卫国	李志强	刘洋海	徐根养
	江龙才	孙春艳	何艳娇	陶 蓉	李 超
	李志娟	杨 鑫	黄 欣	李德超	李 宇
	颜喜平	崔 林	马 福	敬亮兵	宋 萍

前言

高电压技术是电力系统及其自动化专业的一门主干专业课，在电力系统中占有举足轻重的地位。因为高电压技术所讲授的专业知识是电力系统的基本知识，是处理电力系统的日常生产、技术监督、设备管理、运行管理不可或缺的专业知识。特别是近年来随着我国电力系统的发展，新的电压等级——1000kV 特高压电网的建设，全国联网，西电东送，新产品、新设备，新技术的大量应用，高电压专业技术专业知识显得尤为重要。另外，近年来我国电力事业正处于飞速发展的时代，一些老式设备、技术不断地淘汰，新产品、新技术不断的出现。随着电力系统的发展，新问题，新矛盾不断地发生，因而我们的专业主干课——高电压技术的相关内容也应随之不断地发展和更新，内容要紧紧密结合电力系统的生产实际和发展的需要以及实际需求进行调整。该书的编写就是为了能尽可能的结合电力系统的生产实际和技术进步，理论联系实际，服务于电力生产、科研，达到学以致用，最大可能的反映电力系统的实际需求。

本书除了全面反映高电压技术所包含的高电压绝缘、高电压试验和电力系统过电压这三个方面的基础知识外，为了更好的反映电力系统的生产实际和发展在以下几个方面做了较大的调整。

第一篇高电压绝缘中，除了保留原有的气体绝缘、固体绝缘、液体绝缘特性外，增加了 SF_6 气体特性。因为 SF_6 气体在电力系统中得到了越来越广泛的应用，对于 SF_6 气体的绝缘特性、化学特性、物理特性以及在运行中的一些动态性能，都应该很好的了解和掌握。还增加了一章电力系统防污闪技术的内容。电气设备的污闪及其防护在我国电力系统中已占有非常重要的地位，从输变电设计、产品设计，运行管理，安全管理，设备检修，维护，状态检修，以及反事故技术措施等，无不与电气设备的污闪与防污闪技术相关，因而，电力系统防污闪技术已成为高电压绝缘的重要部分。

第二篇高电压试验中，强化了常用电气设备的试验分析和判别，因为学生毕业后是要服务于电力系统，在电力系统中，就要掌握电气设备的基本试验方法，并能根据试验结果对电气设备的状态进行分析判断。特别增加了一章绝缘油的气相色谱试验与分析，因为绝缘油的气相色谱试验与分析在电力系统中对于分析判断电气设备的运行状态，发现电气设备的一些潜伏性故障非常重要，因而掌握绝缘油的气相色谱试验与分析并结合电气设备的其他一些试验项目的结果，综合分析判断电气设备的运行状态，对电力系统的技术监督、技术管理是非常重要的。

第三篇电力系统过电压中,淘汰了管型避雷器,阀式避雷器的相关内容,强化了氧化锌避雷器的内容,因为管型避雷器,阀式避雷器在电力系统中已基本淘汰,所以在教材上也应及时淘汰,推陈出新。增加了一节配电网防雷的内容,因为在全国范围内配电网的雷害事故特别多,对配电网的防雷问题应给予充分的重视。在防雷电过电压方面特别增加了一章弱电系统防雷的内容,因为随着电力系统自动化的实现,各类保护和控制系统目前均为计算机控制,微电子元件在电力系统中得到大量应用,这与过去传统的保护和控制装置相比,是一次技术上的革命。但是也随之带来一个问题,就是抗干扰的问题。特别是雷电对微机保护、综合自动化系统的干扰问题,近年来,随着防雷技术的发展,一次设备的雷害事故逐步减少,二次系统的雷害事故却较多,主要反映为雷击时毁坏微机保护和综合自动化系统的电源模块、插件等,甚至还造成微机保护死机、拒动、误动、主设备烧毁等恶性事故,因而对弱电系统的防雷问题必须充分重视。

该书参考了目前多个版本的《高电压技术》、《高电压工程》和国内外大量的论文、专著和研究文献,并在编者多年的实际工作经验的基础上,整合了编者近年来的科研成果。全书由长沙理工大学李景禄教授主编,并指导研究生孙春艳、何艳娇、陶蓉、李超、李志娟、杨鑫、黄欣、李德超、李亨、颜喜平、崔林、马福、敬亮兵、宋萍进行了资料收集、编写和校对工作。特别是陶蓉、李超对本书稿的整理、校对进行了大量的工作。福建省电力公司基建部林冶副主任,福建省电力公司生计部于建龙主任工程师,湖南省电力公司生产技术部高级工程师周冠东,华北电力大学的李卫国教授,上海电力学院的唐忠博士,河南信阳电力公司的赵国喜总经理、张海峰总工程师,河南焦作电业局的郑瑞臣局长,漯河电力公司的张辉主任、马心良高级工程师,周口电力公司的毋付安副总经理、袁卫国总工,广东韶关供电局的李志强主任,刘洋海高工,安徽池州电力公司的徐根养总工、江龙才主任参与了本书部分章节的编写,在编写过程中还得到了河南、湖南、湖北、广东、重庆、福建、江西、安徽电力部门许多相关专业技术人员的帮助和支持,在此一并给予诚挚的感谢。

由于编者水平有限,加上成书时间仓促,书中错误和不足之处难免,欢迎读者批评指正。

作 者

2008年1月

前言

第一篇 高 电 压 绝 缘

第一章 气体电介质的绝缘特性	1
第一节 气体中带电质点的产生与消失	1
第二节 汤逊理论和流柱理论	4
第三节 不均匀电场的放电过程	11
第四节 空气间隙在各种电压下的击穿特性	17
第五节 大气条件对气隙击穿特性的影响	26
第六节 提高气体间隙击穿电压的措施	27
第七节 SF ₆ 气体的特性及应用	30
习题	41
第二章 固体、液体电介质的绝缘特性	42
第一节 电介质的极化、电导和损耗	42
第二节 固体电介质的击穿	50
第三节 液体电介质的击穿	53
第四节 组合绝缘的电气特性	56
习题	60
第三章 电力系统污闪及防污闪技术	61
第一节 绝缘子的沿面放电	61
第二节 污闪及其过程	64
第三节 防污闪措施	69
第四节 污秽测量及等级划分	72
习题	77

第二篇 高 电 压 试 验

第四章 电气设备的绝缘试验	78
第一节 绝缘电阻及吸收比试验	78
第二节 泄漏电流和直流耐压试验	83

第三节	介质损失角正切值试验	91
第四节	局部放电试验	98
第五节	交流耐压试验	100
第六节	冲击电压试验	104
第七节	试验记录、试验报告和试验结果分析	109
	习题	111
第五章	绝缘油的气相色谱试验与分析	112
第一节	充油电气设备内部主要绝缘材料的性能	112
第二节	变压器油中气体的产生机理	116
第三节	电气设备内部故障与油中特征气体的关系	118
第四节	三比值法的基本原理及方法	120
第五节	无编码比值法的原理及方法	123
第六节	油中气体分析的多种判据对故障进行综合诊断	125
	习题	128
第六章	电气设备在线监测	129
第一节	绝缘电阻及泄漏电流的在线监测	129
第二节	介质损耗角正切值的在线监测	130
第三节	局部放电的在线监测	131
第四节	绝缘油溶解气体的在线色谱分析	134
第五节	避雷器在线监测	136
第六节	电气设备在线监测与离线测试的综合判别	141
	习题	142

第三篇 电力系统过电压

第七章	线路和绕组的波过程	144
第一节	无损耗单导线线路中的波过程	144
第二节	行波的折射与反射	149
第三节	波通过串联电感和并联电容	156
第四节	波在传播过程中的衰减与畸变	159
第五节	贝杰龙 (Bergeron) 法计算过电压	160
第六节	变压器绕组中的波过程	166
第七节	旋转电机绕组中的波过程	175
	习题	177
第八章	雷电及防雷保护装置	179
第一节	雷电放电过程及其参数	179
第二节	避雷针和避雷线的保护范围	180

第三节	避雷器	183
第四节	防雷接地装置	188
习题		191
第九章	电力系统防雷	192
第一节	输电线路的防雷保护	192
第二节	配电网络的防雷保护	203
第三节	发电厂、变电站的防雷保护	211
第四节	建筑物防雷	224
习题		228
第十章	电力弱电系统防雷保护	229
第一节	低压供电系统的防雷保护	229
第二节	弱电系统防雷保护器件	230
第三节	电子设备的防雷技术	236
第四节	微机保护与综合自动化系统的接地	238
第五节	微波通信站的防雷措施	240
习题		244
第十一章	电力系统内部过电压	245
第一节	工频过电压	245
第二节	谐振过电压	250
第三节	弧光接地过电压	260
第四节	切、合空载线路过电压	264
第五节	消弧线圈的作用	270
第六节	中性点接地方式对内过电压的影响	274
习题		276
第十二章	电力系统绝缘配合	277
第一节	绝缘配合的定义和方法	277
第二节	输电线路绝缘和变电所绝缘的绝缘配合	281
第三节	中性点接地方式对绝缘水平的影响	286
第四节	电气设备试验电压的确定	288
习题		288
参考文献		289

第一篇 高电压绝缘

第一章 气体电介质的绝缘特性

第一节 气体中带电质点的产生与消失

一、气体电介质中带电粒子的产生

气体中的原子通常处于正常状态，原子在外界因素（强电场，高温等）的作用下，吸收外界能量使其内部能量增加，其电子可由低能级跃迁到能级较高的轨道运行，这个过程称为原子激励。此时原子的状态称为激发态。此时的电子还未摆脱原子核的束缚。激励过程所需能量称为激励能。

如果中性原子在外界因素作用下，获得足够大的能量，可使原子中的一个或几个电子完全摆脱原子核的束缚，形成自由电子和正离子，这个过程称为原子的电离。电离是激发的极限状态，电离后形成的正离子就是原子失去一个或几个电子后形成的带正电的质点。电离过程所需要的能量称为电离能 W_i ，一般为 $10\sim 15\text{eV}$ 。显然，发生电离的条件就是原子从外界获取的能量大于原子的电离能。

气体原子的电离可由下列因素引起：①电子或正离子与气体分子的碰撞；②各种光辐射；③高温下气体中的热能。强电场根据不同的电离因素，电离有以下几种形式。

1. 碰撞电离

处在电场中的带电粒子，除了经常地作不规则的热运动、不断地与其他粒子发生碰撞外，还受电场力的作用，沿电场方向不断得到加速并积累动能。当具有足够能量的带电粒子与中性气体分子碰撞时，就可能使气体分子产生电离。这种由碰撞而引起的电离称为碰撞电离。

电子在强电场中产生的碰撞电离，是气体中带电粒子的极重要来源，在气体放电中起着重要的作用。气体中的电子、离子及其他质点与中性原子的碰撞都可能产生电离，但因为电子的尺寸及质量比离子的小得多，其平均自由行程（粒子在两次碰撞之间的行程叫自由行程）远大于离子的自由行程，因此容易被电场所加速，并积累起电离所需的能量。而离子或其他质点因其本身的体积和质量较大，难以在碰撞前积累足够的能量，且碰撞时能量交换效率较低，因而产生碰撞电离的可能性很小。

电子从电场中获得的能量为

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = Eq\bar{\lambda} \quad (1-1)$$

式中： m 为电子的质量； v 为电子的速度； E 为电场强度； q 为电子的电量； $\bar{\lambda}$ 为电子的平均自由行程。

当电子的动能大于或等于气体分子的电离能时，就有可能因碰撞引起电离，因此产生电离的条件为

$$Eq\bar{\lambda} \geq W_i \quad (1-2)$$

式中： W_i 为气体分子的电离能。

2. 光电离

由光辐射引起的气体原子的电离称为光电离。光辐射的能量与波长有关，波长越短，能量越大。光辐射的能量为

$$W = h\nu \quad (1-3)$$

式中： h 为普朗克常数， $h=6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ； ν 为光子频率。

当气体分子受到光辐射作用时，如果光的能量大于气体原子的电离能 W_i ，就有可能引起光电离。产生光电离的条件为

$$h\nu \geq W_i \quad (1-4)$$

由光电离产生的自由电子称为光电子。光电离在气体中起着很重要的作用。对所有气体，在可见光作用下，一般不能直接发生光电离。导致气体分子光电离的高频高能光子可由外界提供。各种短波长的高能辐射线例如宇宙射线 X 射线、 γ 射线以及短波长紫外线等都有较强的电离能力。在放电过程中处于较高能级的激发态原子回到正常状态，以及异号离子复合成中性原子时都以光的形式放出多余的能量，成为导致电离的因素。

3. 热电离

因气体热状态引起的电离过程，称为热电离。在常温下，气体质点的热运动所具有的平均动能远低于气体的电离能，因此不产生热电离。但是在高温下气体质点具有的动能足以导致气体原子的碰撞，产生碰撞电离。此外高温气体的热辐射也能导致光电离，因此热电离的本质仍是高速运动的气体分子的碰撞电离与光电离。

气体温度是气体分子热运动剧烈程度的标志，气体分子的平均动能 W 和气体温度有如下关系

$$W = \frac{3}{2}KT \quad (1-5)$$

式中： K 为波尔茨曼常数， $K=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； T 为绝对温度， K 。

随着温度升高，气体分子动能增加，当气体分子的动能大于气体分子电离能时，就可能引起热电离。因此产生热电离的条件为

$$\frac{3}{2}KT \geq W_i \quad (1-6)$$

在一定热状态下的物质都能发出热辐射，气体也不例外。气体温度升高时，其热辐射光子的能量大、数量多，这种光子与气体分子相遇时就可能产生光电离。

由一切热电离过程产生的电子也处于热运动中。因此高温下电子也能由于热运动靠碰撞作用而造成分子电离。

由此可见，热电离实质上是热状态产生的碰撞电离和光电离的综合。

4. 表面电离

在外界电离因素的作用下，电子可能从电极的表面释放，称为表面电离或表面发射。电极发射电子所需要的能量叫逸出功。逸出功的大小与电极的材料和气体表面的状态有关，一般在 $1\sim 5\text{eV}$ 之间，它小于气体在空间的电离能，而和金属的温度基本无关。这说明从阴极发射电子比在空间使气体分子电离更容易。

表面电离与其他电离形式的区别在于，发生其他形式的电离时，电子和正离子同时出现，而表面电离只产生电子，没有正离子出现。

表面电离有多种方式，即用各种不同的方式供给电子能量使其逸出金属。表面电离的主要形式有：①正离子碰撞阴极：正离子在电场中向阴极运动，碰撞阴极时将动能传递给电子使其逸出金属；②光电效应：金属表面受到光的照射时，放射出电子；③强场发射：在阴极附近加以很强的外电场使阴极放射出电子，由于强场发射所需外电场极强，在 10^3kV/cm 数量级，所以在一般气体间隙的击穿过程中不会发生；④热电子放射：将阴极加热到很高温度，使其中的电子获得巨大动能，逸出金属。

二、气体介质中带电粒子的消失

气体中发生放电时，除了有不形成带电粒子的电离过程外，还存在着相反的过程，即带电粒子的消失过程，它们将导致带电粒子从电离区域消失，或者削弱其产生电离的作用，这些过程通常叫做去电离过程。带电粒子的运动、扩散、复合以及电子的附着作用都属于这样的作用。当导致气体电离的因素消失后，这些去电离过程将使气体迅速恢复到绝缘状态。

1. 带电粒子受电场力的作用流入电极

带电粒子在与气体分子碰撞后虽会发生散射，但从宏观看是向电极方向作定向运动。在一定电场强度 E 下，带电质点运动的平均速度将达到某个稳定值。这个平均速度称为带电质点的驱引速度 $v_d = bE$ ，式中 b 为带电质点在电场中的迁移率，即单位场强下的运动速度。

电子的迁移率比离子的迁移率约大两个数量级，同一种气体的正、负离子的迁移率相差不多。在标准参考大气条件下，干燥空气中正、负离子的迁移率分别为

$$1.36 \frac{\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}} \text{ 及 } 1.87 \frac{\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}}$$

2. 带电粒子的扩散

气体中的带电粒子，经常处于不规则的热运动之中。如果不同区域中的带电粒子存在浓度差，则它们总的趋势是不断从高浓度区域移向低浓度区域，趋向于使各种带电粒子浓度变得均匀。这种现象称为带电粒子的扩散。当空气间隙发生放电，并去掉电源后，放电通道中高浓度的带电粒子就迅速地向周围扩散，使间隙恢复原来的绝缘状态。

带电质点的扩散同气体分子的扩散一样，都是由热运动造成的，因为即使在很大的浓度下，离子之间的距离仍较大，静电相互作用力很小。带电质点的扩散规律也同气体的扩散规律相似。

3. 带电粒子的复合

正离子与负离子或电子相遇，发生电荷的传递而互相中和，还原为中性分子的过程称为复合过程。复合可在气体空间进行，也可以在容器壁上发生。若放电空间离容器壁较远，则显然前者是主要的。

在带电粒子复合过程中发生光辐射。如前面所述，这种光辐射在一定条件下又可能成为导致电离的因素。

4. 附着效应

某些气体中的中性分子（或原子）具有较大的电子亲和力，当电子与其碰撞时，便被其吸附而成为负离子，同时放出能量，这个过程称为气体的附着效应。容易附着电子形成负离子的气体称为电负性气体，如氧气、氯气、氟气、水蒸气、六氟化硫等都属于电负性气体。

如前所述，离子的电离能力远不及电子。电子被分子俘获而形成质量大、速度小的负离子后，电离能力大为降低。因此，在气体放电中，附着效应起着阻碍放电的作用，电负性气体具有较高的绝缘强度。

第二节 汤逊理论和流柱理论

一、汤逊理论

20 世纪初，英国物理学家汤逊（Townsend）在均匀电场、低气压、短间隙的条件下进行了放电实验，提出了比较系统的理论和计算公式，解释了整个间隙的放电过程和击穿条件。虽然汤逊理论有很多不足，其适用范围也有很大的局限，但它描述的放电过程是很基本的，具有普遍意义。

1. 非自持放电和自持放电

气体放电可分为非自持放电和自持放电两种。必须借助外加电离因素才能维持的放电则称之为非自持放电。不需其他任何外加电离因素而仅由电场的作用就能维持的放电称为自持放电。

图 1-1 所示的是汤逊的实验装置。在空气中放置两块平行板电极，用外部光源对阴极极板进行照射，并在两极间加上直流电压，则在两极之间形成均匀电场。当极间电压从零起逐渐升高时，得到电流和电压的关系如图 1-2 所示。

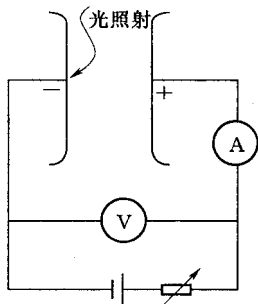


图 1-1 平行板电极试验装置

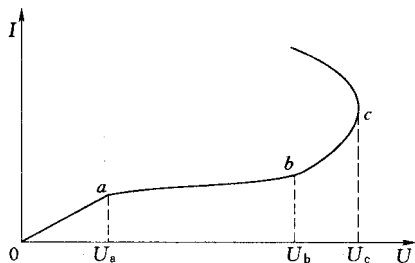


图 1-2 放电电流和电压的关系

大气中通常存在着少量的正负离子，这是由于空间的宇宙线等高能射线作用下不断产生电离与同时进行的复合过程相互平衡的结果。此外，当阴极受到照射时也能发射电子。在极间加上电压后，这些带电粒子分别向两极移动，形成电流。起初，随着电压的升高，带电粒子的运动速度加大，电流也随之增大，如图 1-2 中 $0 \sim a$ 段曲线所示。到达 a 点后，电流不再随电压而增大，因为这时在单位时间内由外界电离因素在极间产生的带电粒子已全部参加导电，所以电流趋于饱和。这个饱和电流密度是极小的。一般只有 10^{-19} A/cm^2 的数量级。因此，这时气体间隙仍处于良好的绝缘状态。到达 b 点后，电流又随着电压增大而增大，这时，间隙出现了新的电离因素——碰撞电离。此后，电流越来越大。最后到达 c 点，此时电流急剧增大，间隙转入良好的导电状态。外加电压到达 c 点以前，间隙中的电流很小，且要依靠外界的电离因素来维持，此时的放电属于非自持放电；外加电压到达 c 点之后，气体间隙中发生了强烈的电离，带电粒子的数量急增，此时间隙中的放电依靠电场的作用就可以维持， c 点以后的放电属于自持放电。

2. 汤逊放电理论

在外界电离因素的作用下，阴极产生光电子发射，使间隙中产生自由电子，这些电子就是放电的起始电子。这些起始电子在电场的作用下，由阴极奔向阳极，在这个过程中，电子不断被加速，动能不断积累，同时与中性粒子发生碰撞，当 $U > U_0$ 后，电场很强，电子的动能达到足够大，有可能产生碰撞电离。如图 1-2 所示，当气体间隙上所加电压超过 U_0 后，电流迅速增大。电离新产生的电子和原有电子一起又从电场中获得动能，继续被加速，从而发生新的碰撞电离。这样就出现了一个连锁反应的场面：一个起始电子从电场获得一定的动能后，碰撞电离出一个第二代电子；这两个电子作为新的起始电子从电场获得动能，又电离出两个新的第二代电子，这时间隙中已存在四个自由电子；这四个自由电子又作为新的起始电子继续发生碰撞电离……，这样一代一代不断地发展下去。间隙中的电子数目由 1 变为 2，2 变为 4……，电子的数目迅速增加。这种电子数目迅速增加的过程，犹如高山的雪崩过程，因此被形象地称为电子崩，如图 1-3 所示。电子崩过程的出现使间隙中的电流急剧增大。图 1-2 中 b 点后电流随电压迅速增长就是电子碰撞电离引起电子崩的缘故。

电子崩中因碰撞电离产生电子的同时，也产生正离子。电子向阳极运动，正离子向阴极运动。正离子向阴极运动的过程中，一方面可能与中性粒子发生碰撞产生碰撞电离；另一方面正离子可能撞击阴极表面使其产生表面电离，逸出电子。从阴极表面逸出的电子作为新的起始电子又重复上述的电子崩过程。这样一直发展下去，使间隙中维持放电状态。

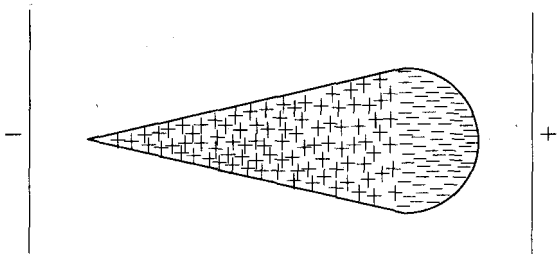


图 1-3 电子崩的电荷分布

为了定量分析气隙中气体放电过程，引入三个系数：

α 系数。它代表一个电子沿着电场方向行经 1cm 长度后平均发生的碰撞电离次数。设

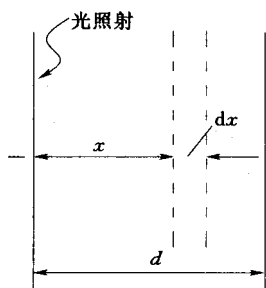
每次碰撞电离产生一个电子和一个正离子，所以 α 也就是一个电子在单位长度行程内新电离出的电子数和正离子数。

β 系数。一个正离子沿着电场方向行经 1cm 长度后平均发生的碰撞电离次数。

γ 系数。表示折合到每个碰撞阴极表面的正离子，使阴极金属表面平均释放出的自由电子数。

由上可知： α 系数对应于起始电子形成电子崩的过程，亦称 α 过程；与电子崩过程类似，在引起电子剧增同时， β 系数对应于离子崩的过程，亦称 β 过程； γ 系数描述了离子崩到达阴极后，引起阴极发射电子的过程，亦称 γ 过程。由于离子的尺寸和质量较大，离子在电场中运动获取动能产生碰撞电离的可能性比电子小得多，因此 β 过程可以忽略。

如图 1-4 所示，假设气体间隙的距离为 d ，由于某种外界电离因素，从阴极发出一个电子。这个电子在向阳极运动过程中不断引起碰撞电离，电子数目越来越多，经过距离



x 后数目达到 n ，再经过距离 dx ，增加的电子数目为 dn ，则有

$$\begin{aligned} dn &= n\alpha dx \\ \text{或} \quad \frac{dn}{n} &= \alpha dx \end{aligned} \quad (1-7)$$

从 $0 \sim d$ 积分得到达到阳极时的电子数为

$$n = e^{\int_0^d \alpha dx} \quad (1-8)$$

若 α 为一常数，则有

$$n = e^{\alpha d} \quad (1-9)$$

图 1-4 气体间隙的示意图

这就是电子崩的发展规律。如果 $\alpha x = 10$ ，则 $n = e^{\alpha d} = 2.2 \times 10^4$ ，远远大于 1。

n 是 α 过程中包括起始电子在内的电子数。一个电子从阴极出发向阳极运动时，由于碰撞电离形成电子崩，到达阳极并进入阳极 $e^{\alpha d}$ 个电子。除去起始电子外，新产生了 $e^{\alpha d} - 1$ 个电子和正离子。这 $e^{\alpha d} - 1$ 个正离子在电场作用下向阴极运动，撞击阴极表面，产生表面电离，一个正离子可电离出 γ 个电子，则 $e^{\alpha d} - 1$ 正离子就可电离出 $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 个电子。即 $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 表示了这些正离子消失在阴极之前，由 γ 过程又在阴极上释放出二次电子数。如果 $e^{\alpha d} - 1$ 个正离子在撞击阴极表面时至少能从阴极释放出一个有效电子来弥补原来那个产生电子崩并已进入阳极的电子，那么这个有效电子将在电场的作用下向阳极运动，产生碰撞电离，发展新的电子崩。这样，即使没有外界电离因素存在，放电也能继续下去，使放电达到自持。所以，自持放电的条件为

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad \text{或} \quad \gamma e^{\alpha d} \geq 1 \quad (1-10)$$

设电子在均匀电场 E 中前进距离 x 后，与中性粒子发生碰撞，产生碰撞电离，若忽略其初始动能，则须满足

$$Eqx \geq W_i \quad \text{或} \quad Ex \geq U_i \quad (1-11)$$

式中： q 为电子所带电荷； W_i 、 U_i 为气体分子的电离能和电离电位。

式 (1-11) 的物理意义是，使电子在与气体分子碰撞时产生电离的必要条件为电子在运动中所积聚的动能至少应等于气体分子的电离能。电子在场强为 E 的电场中运动时

只有那些自由行程超过 $x_i = \frac{U_i}{E}$ 距离的电子, 才能与分子发生碰撞电离。如果电子在与气体分子发生两次碰撞之间的平均自由行程为 λ , 则由气体运动理论可知, 相邻两次碰撞之间电子运动距离大于 x_i 的概率为 $e^{-\frac{x_i}{\lambda}}$, 电子沿电场方向运动 1cm 距离与气体分子发生碰撞的平均次数为 $\frac{1}{\lambda}$, 其中只有 $\frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_i}{\lambda}}$ 次是电子的自由行程超过 x_i 的碰撞。根据电离系数 α 的定义有如下关系式

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_i}{\lambda}} = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{w_i}{qE}} = AP e^{-\frac{w_i}{qE \frac{1}{AP}}} \quad (1-12)$$

式中: A 为常数; P 为气压; λ 为电子的平均自由行程。

因此

$$\frac{\alpha}{P} = A e^{-\frac{w_i}{qE \frac{1}{AP}}} = A e^{-\frac{w_i AP}{qE}} = A e^{-\frac{BP}{E}}$$

其中

$$B = \frac{AW_i}{q}$$

或

$$\frac{\alpha}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right) \quad (1-13)$$

由式 (1-10), 有

$$\alpha d = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (1-14)$$

另外

$$E = \frac{U_0}{d}$$

根据上面公式, 可以得到自持放电条件下空气间隙击穿电压 U_0 的表达式为

$$U_0 = \frac{BPd}{\ln \frac{APd}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (1-15)$$

式 (1-15) 中, A 、 B 为两个与气体种类有关的常数。式 (1-15) 表明了击穿电压与气体状态等因素的关系。其中, U_0 为在气温不变的条件下, 均匀电场中气体的自持放电的起始电压, 它等于气隙的击穿电压 U_0 。从式中可以看出, U_0 取决于 P 与 d 的乘积。

3. 巴申 (Paschen) 定律

式 (1-15) 表明的规律在汤逊 (Townsend) 之前 (1889 年) 已由巴申 (Paschen) 从实验中总结出来了, 称为巴申定律。其内容是: 当气体成分和电极材料一定时, 气体间隙击穿电压 (U_0) 是气压 (P) 和间隙距离 (d) 乘积的函数, 即

$$U_0 = f(Pd) \quad (1-16)$$

巴申定律给汤逊理论以实验支持, 而汤逊理论给巴申定律以理论上的解释, 两者相互印证。巴申曲线如图 1-5 所示。

图 1-6 为几种气体的击穿电压 U_0 与 Pd 值关系的实验曲线。由曲线可见, 随 Pd 的变化, 击穿电压 U_0 有最小值。这一现象可用汤逊理论加以解释: 因为形成自持放电需要

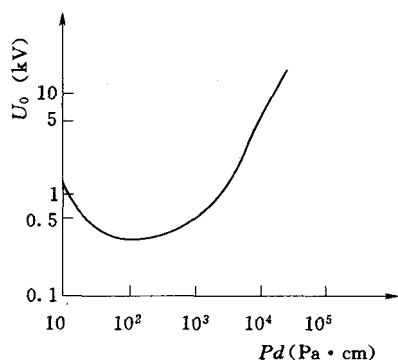


图 1-5 某种气体的巴申曲线

达到一定的电离数 ad ，而这又决定于碰撞次数与电离概率的乘积，如果 d 固定，则当 P 增大时，气体相对密度增大，电子很容易与气体的粒子相碰撞，碰撞次数增加，电子的平均自由行程缩短，不易积累动能，引起电离的可能性减小，击穿电压升高；当 P 减小时，气体相对密度减小，虽然电子的平均自由行程增大，电子在两次碰撞间可积累很大的动能，碰撞的几率减小，引起电离的次数减少，击穿电压升高。因此，在某个 P 值下 ad 有最大值，从而 U_0 最小。另一方面，如果 P 固定，当 d 增大时，碰撞次数将增加，由于 $E=U/d$ ，电场强度降低，电子的动能减小，击穿电压升高；当 d 减小时，电子从阴极到阳极的运动距离缩短，发生碰撞的次数减少，电离概率减小，击穿电压升高。因此在某个 d 值下 ad 有最大值，从而 U_0 最小。

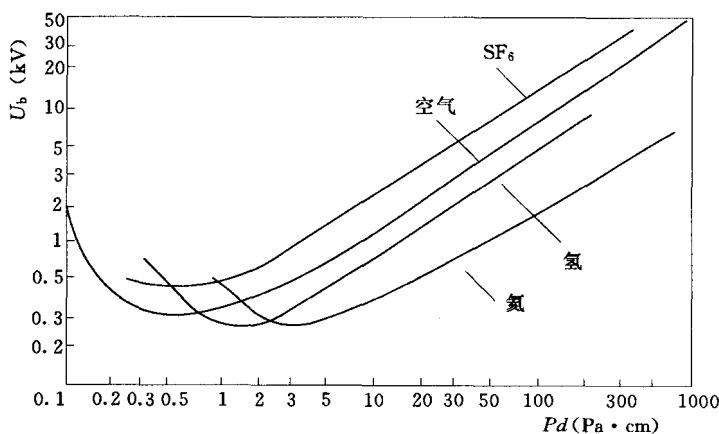


图 1-6 几种气体的击穿电压 U_0 与 Pd 值关系的试验曲线

以上分析是在假定气体温度不变的情况下得到的。为了考虑温度变化的影响，巴申定律更普遍的形式是以气体的密度 (δ) 代替压力，对空气来说可表示为

$$U_0 = f(P\delta) \quad (1-17)$$

其中 δ 为空气的相对密度，即

$$\delta = \frac{PT_0}{P_0 T} = \frac{P}{P_0} \frac{273+t_0}{273+t} = \frac{2.89P}{273+t} \quad (1-18)$$

$$P_0 = 101.3 \text{ kPa}, t_0 = 20^\circ\text{C}$$

式中： P 为气压，kPa； t 为温度， $^\circ\text{C}$ 。

空气间隙的 U_0 最小值为 327V，相应的 $\delta d = 0.75 \times 10^{-3} \text{ cm}$ 。可见在大气压力或更高的压力下，气隙的 δd 值要远大于上述数值。因此，其击穿电压都处在巴申曲线的右半部，即 U_0 随 δd 的增大而升高。

巴申曲线右半部分所示 U_0 (与 E_0) 与 δd 的关系，可用下面的经验公式表示