

林福昌 主编

# 高电压

# 工程



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 高电压工程

---

林福昌 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

高电压工程是电气类的重要专业基础课,本书着重分析基本原理和重要概念。全书共分为电介质的电气特性、电力设备的绝缘实验、电力系统过电压与绝缘配合3部分,电介质的电气特性部分主要分析了放电机理和常用电气设备的绝缘等;电力设备的绝缘实验部分则讲述了绝缘试验的方法、适用场合及对绝缘优劣判断的基本方法等;电力系统过电压与绝缘配合部分阐述了过电压产生和防护措施等。全书内容全面,深入浅出,突出重点。

本书适用于高等学校电气工程类专业,也可作为从事高电压工作的工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高电压工程/林福昌主编. —北京:中国电力出版社,  
2006

ISBN 7-5083-3730-1

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第139850号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2006年2月第一版 2006年2月北京第一次印刷  
787毫米×1092毫米 16开本 17.5印张 429千字  
印数 0001—3000册 定价 28.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 前 言

高电压技术是电气工程及其自动化专业的一门技术基础课。从事强电工作的工程技术人员，需要具备高电压技术的基本素养，并需要经常运用高电压知识解决工程实际问题。本书的主要读者对象是电气工程类本科生和从事高电压工作的工程技术人员。

全书共分三篇十三章，内容力求全面，基本涵盖了高电压工程中的所有问题。在着重于基本概念和基本原理的同时，也注意和生产实际相结合，内容深入浅出，以便于自学和教学。本书在编写过程中，基本沿袭了传统的体系，同时参考了国内外不少的教材和资料，并引用了当前的相关国际标准和国家标准，力求做到概念清楚、数据正确，反映高电压技术的发展。同时，本书又介绍了高电压工程在非电力领域的一些应用，借以开拓视野，因此，书名定为《高电压工程》。

本书编写分工如下：刘浔编写第一、二、三章，陈俊武编写第四、七章，尹小根编写第五、六章，其余部分由林福昌编写。刘春参与了第一章的编写工作，王清玲、严飞等人参加了绘图工作。全书由林福昌统稿。

西安交通大学李彦明教授、武汉大学鲁铁成教授、华中科技大学王晓瑜教授、姚宗干教授、张国胜副教授等审阅了本书的初稿，提出了许多宝贵意见，在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免存在不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2005年3月

# 目 录

前言

## 第一篇 电介质的电气特性

1 气体电介质的绝缘特性 .....	2
1.1 气体中带电粒子的产生和消失 .....	2
1.2 均匀电场中气体的击穿 .....	4
1.3 不均匀电场中气体的击穿 .....	11
1.4 雷电冲击电压作用下气体的击穿 .....	18
1.5 操作冲击电压作用下气体的击穿 .....	21
1.6 电场形式、电压波形与击穿电压的关系 .....	23
1.7 大气条件对空气间隙击穿特性的影响 .....	27
1.8 提高气体间隙击穿电压的措施 .....	28
1.9 沿面放电 .....	32
习 题 .....	37
2 液体、固体电介质的绝缘特性 .....	38
2.1 电介质的极化、电导与损耗 .....	38
2.2 液体电介质的击穿 .....	46
2.3 固体电介质的击穿 .....	49
2.4 组合绝缘的电气强度 .....	51
2.5 电介质的老化 .....	53
习 题 .....	55
3 常用电气设备的绝缘 .....	56
3.1 绝缘子的绝缘 .....	56
3.2 高压套管的绝缘 .....	61
3.3 电容器及电缆绝缘 .....	67
3.4 变压器的绝缘 .....	70
3.5 高压电机的绝缘 .....	77
习 题 .....	79

## 第二篇 电力设备绝缘试验

4 绝缘的非破坏性试验 .....	81
4.1 绝缘电阻试验 .....	82
4.2 介质损耗角正切的测量 .....	84
4.3 局部放电测量 .....	87
4.4 电压分布的测量 .....	89

习题 .....	90
<b>5 绝缘的耐压试验</b> .....	91
5.1 工频耐压试验 .....	91
5.2 直流高压试验 .....	95
5.3 冲击高压试验 .....	99
习题 .....	104
<b>6 高电压和大电流的测量</b> .....	105
6.1 对高压测量的要求和必要条件 .....	105
6.2 交流高压的测量 .....	105
6.3 直流高压的测量 .....	109
6.4 冲击高压的测量 .....	111
6.5 冲击电流的产生和测量 .....	114
习题 .....	120
<b>7 电气设备绝缘的在线监测</b> .....	121
7.1 概述 .....	121
7.2 绝缘各部分温度的测量 .....	123
7.3 绝缘油的电气试验和气相色谱分析 .....	125
7.4 绝缘介质的介质损耗角正切与泄漏电流的测量 .....	127
7.5 绝缘内部局部放电的监测 .....	128
习题 .....	130

### 第三篇 电力系统过电压与绝缘配合

<b>8 线路与绕组中的波过程</b> .....	131
8.1 波沿均匀无损单导线的传播 .....	132
8.2 波的折射和反射 .....	135
8.3 波通过串联电感和并联电容 .....	142
8.4 波的多次折、反射, 网格法 .....	144
8.5 贝杰龙 (Bergeron) 法计算过电压 .....	147
8.6 平行多导线系统中的波过程 .....	152
8.7 波的衰减与变形, 冲击电晕的影响 .....	156
8.8 变压器绕组中的波过程 .....	159
8.9 旋转电机绕组中的波过程 .....	167
习题 .....	169
<b>9 雷电及防雷保护装置</b> .....	171
9.1 雷云放电及雷电过电压 .....	171
9.2 雷电参数及雷电活动特性 .....	173
9.3 避雷针和避雷线 .....	174
9.4 避雷器 .....	177

9.5 接地技术与接地装置 .....	188
习 题 .....	193
<b>10 电力系统防雷保护 .....</b>	<b>194</b>
10.1 输电线路的防雷保护 .....	194
10.2 发电厂和变电站的防雷保护 .....	206
10.3 旋转电机的防雷保护 .....	219
习 题 .....	221
<b>11 电力系统内部过电压 .....</b>	<b>223</b>
11.1 工频过电压 .....	223
11.2 谐振过电压 .....	228
11.3 间歇电弧接地过电压 .....	237
11.4 切除空载线路过电压 .....	241
11.5 空载线路合闸过电压 .....	244
11.6 切除空载变压器过电压 .....	246
习 题 .....	249
<b>12 电力系统绝缘配合 .....</b>	<b>250</b>
12.1 概述 .....	250
12.2 中性点接地方式对绝缘水平的影响 .....	251
12.3 绝缘配合的惯用法和电气设备绝缘水平的确定 .....	252
12.4 绝缘配合的统计法 .....	254
12.5 架空线路绝缘水平的确定 .....	256
习 题 .....	260
<b>13 高电压大电流在不同领域中的应用 .....</b>	<b>261</b>
13.1 带电粒子束的产生及其作用 .....	261
13.2 静电应用 .....	264
13.3 放电等离子体的应用 .....	265
13.4 高电压技术的其他应用 .....	269
附录 1 一球接地时, 标准球隙放电电压表 .....	270
附录 2 国家标准规定的有关设备参数 .....	272
主要参考文献 .....	274

## 电介质的电气特性

绝缘的作用是将电位不相同的带电导体隔离，使它们不存在电气上的连接，从而保持不同的电位。具有绝缘作用的材料称为电介质。电介质的种类有气体电介质、液体电介质和固体电介质。电力系统和高压电气设备中的绝缘都是由这些电介质构成的，所以电介质是电气设备中的重要组成部分。

用作绝缘的电介质在通常情况下是不导电的，是良好的绝缘体。但它的绝缘性能不是绝对的，当作用于绝缘上的电压超过某一临界值时，绝缘就将受到破坏而丧失绝缘性能，变成导体。绝缘通常是电气设备中的薄弱环节，一旦设备的绝缘受到破坏，电力系统就将出现事故，造成损失。所以必须研究电介质在高电压作用下的电气特性。随着电力系统的不断发展，工作电压越来越高，电气设备中绝缘材料越来越多，它在电力系统的安全稳定中的作用也越来越重要。需要不断出现新的研究成果和新的绝缘材料，才能满足电力系统发展的需求，否则就要阻碍电力系统向更高的层次迈进。

为了设计出性能最佳的绝缘结构，必须掌握各种电介质在电场作用下的电气物理性能，特别是在强电场作用下的击穿特性及其规律。绝缘的破坏取决于作用在其上的电场强度，如果使绝缘上的电场分布尽可能均匀，以减小局部的电场强度，就能使绝缘的整体性能提高，因此，应设法改善绝缘结构，改进制造工艺，还应不断采用新型绝缘材料。

本篇的主要内容有：气体电介质的电气物理特性，在强电场下的击穿过程及基本特性；液体、固体电介质的基本特性和放电发展规律；主要高压电气设备的典型绝缘结构的设计原则和设计计算方法。



气体特别是空气，是电力系统中应用最广的绝缘介质。架空输电线以及电气设备的外部绝缘就是利用空气作为绝缘的。

## 1.1 气体中带电粒子的产生和消失

### 1.1.1 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，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。根据不同的电离因素，强电场作用下的电离有以下几种形式：

#### （一）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

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

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； $\lambda$  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

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

式中  $W_i$  为气体分子的电离能。

### (二) 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， $h = 6.62 \times 10^{-27}$  尔格·秒； $\nu$  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，就有可能引起光电离。因此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。

各种短波长的高能辐射线如宇宙射线 X 射线、 $\gamma$  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。

### (三) 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，因此热电离是碰撞电离与光电离的综合。

气体分子的平均动能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， $K = 1.38 \times 10^{-23}$  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

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

### (四) 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 1~5eV 之间，它小于气体在空间的电离能。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  $10^3$  kV/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。

### 1.1.2 气体介质中带电粒子的运动与消失

气体中发生放电时，除了有不断形成带电粒子的电离过程外，还存在着另外一些过程，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。带电离子的运动、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。

#### 一、带电粒子的运动

在没有外加电场时，带电粒子做热运动，各向具有均同性，对外不呈现电极性；在有外加电场时，带电粒子在电场的作用下做定向运动，消失于电极，形成电流。

#### 二、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。

#### 三、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。

#### 四、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。

## 1.2 均匀电场中气体的击穿

20世纪初，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。

### 1.2.1 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称为非自持放电。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。

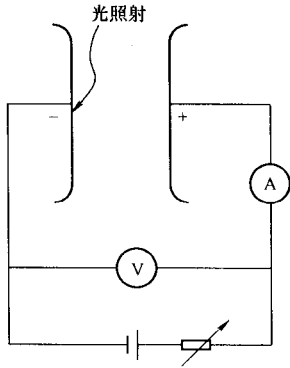


图 1-1 平行板电极试验装置

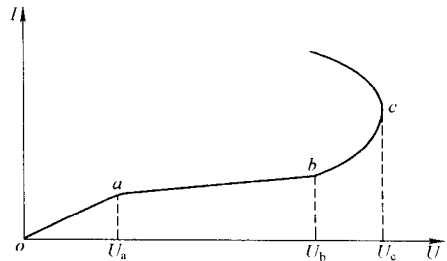


图 1-2 放电电流和电压的关系

大气中通常存在着少量的正负离子，这是大气在空间的宇宙射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，如图 1-2 所示。起初，随着电压的升高，带电离子的运动速度加大，电流也随之增大（如图 1-2 中  $o \sim a$  段曲线）。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（ $a \sim b$  段曲线）。这个饱和电流密度是极小的。一般只有  $10^{-19} \text{ A/cm}^2$  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（ $b \sim c$  段曲线），这时间隙出现了新的电离因素——碰撞电离，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。

### 1.2.2 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，由阴极向阳极运动，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  $U > U_b$  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  $U_b$  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，因此被形象的称为电子崩，见图 1-3。电子崩过程的出现使间隙中的电流急剧增大。图 1-2 中  $b$  点后的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。

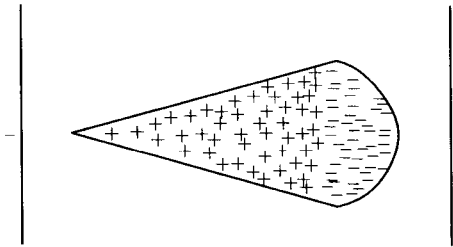


图 1-3 电子崩的电荷分布

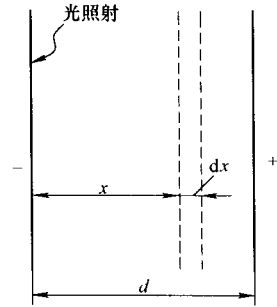


图 1-4 气体间隙的示意图

为了定量分析气隙中气体放电过程，引入三个系数：

$\alpha$  系数：它代表一个电子沿着电场方向行进单位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  $\alpha$  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。

$\beta$  系数：一个正离子沿着电场方向行进单位长度后平均发生的碰撞电离次数。

$\gamma$  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： $\alpha$  系数对应于起始电子形成电子崩的过程。亦称  $\alpha$  过程，与电子崩过程类似，在引起电子剧增同时， $\beta$  系数对应于离子崩的过程，亦称  $\beta$  过程。 $\gamma$  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  $\gamma$  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  $\beta$  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

$$dn = n\alpha dx$$

或

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (1-7)$$

从 0 到  $d$  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  $\alpha$  为一常数，则有

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

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

$n$  是  $\alpha$  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  $e^{ad}$  个电子。除去起始电子外，新产生了  $(e^{ad} - 1)$  个电子和正离子。这  $(e^{ad} - 1)$  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  $\gamma$  个电子，则  $(e^{ad} - 1)$  正离子就可电离出  $\gamma(e^{ad} - 1)$  个电子。即  $\gamma(e^{ad} - 1)$  表示了这些正离子消失在阴极之前，由  $\gamma$  过程又在阴极上释放出二次电子数。如果  $(e^{ad} - 1)$  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

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

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

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

式中： $q$  为电子所带电荷， $W_i$ 、 $U_i$  分别为气体分子的电离能和电离电位， $E = \frac{U_0}{d}$ 。

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  $\lambda$ ，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单位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。当气体温度不变时，平均自由行程  $\lambda$  和气压  $P$  成反比。根据电离系数  $\alpha$  的定义，有如下关系式

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_i}{\lambda}} \\ &= \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{W_i}{qE\lambda}} = AP e^{-\frac{W_i}{qE\lambda P}} \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中： $A$  为常数， $P$  为气压， $\lambda$  是电子的平均自由行程。

因此

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

式中： $B = \frac{AW_i}{q}$

或

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

由式 (1-10)，有

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

另外，电场强度与电压有如下关系

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

根据上面公式及式 (1-13)、式 (1-14)，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

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

$U_0$  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，它等于间隙的击穿电压  $U_0$ 。从式中可以看出， $U_0$  取决于  $P$  与  $d$  的乘积。式 (1-15) 表明了击穿电压与气体状态等因素的关系。

### 1.2.3 巴申定律

式 (1-15) 表明的规律在汤逊之前 (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

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

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。

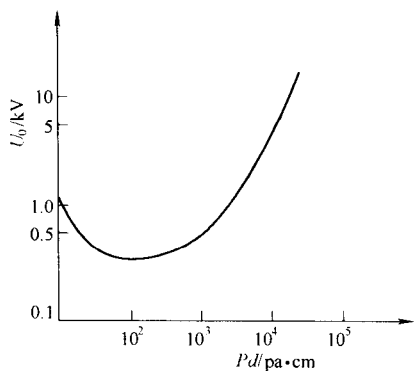


图 1-5 某种气体的巴申曲线

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

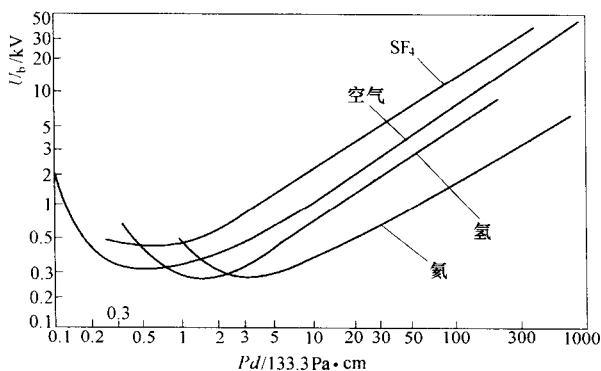


图 1-6 几种气体的击穿电压  $U_0$  与  $Pd$  值关系的试验曲线

子在两次碰撞间可积累很大的动能，但碰撞的几率减小，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，则当  $d$  增大时，碰撞次数将增加，但由于  $E = U/d$ ，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。

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 ( $\delta$ ) 代替压力，对空气来说可表示为

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

式中： $\delta$  为空气的相对密度；

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

式中： $P_0 = 101.3\text{kPa}$ ， $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ； $P$  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  $\delta d = 0.75 \times 10^{-3}\text{cm}$ 。在大气压力或更高的压力下，气隙的  $\delta d$  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  $\delta d$  的增大而升高。

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

$$\begin{aligned} U_0 &= 24.5\delta d + 6.4\sqrt{\delta d} \\ E_0 &= 24.5\delta + 6.4\sqrt{\frac{\delta}{d}} \end{aligned} \quad (1-19)$$

式中：击穿电压  $U_0$  的单位为 kV (峰值)，极间距离  $d$  的单位为 cm。

## 1.2.4 汤逊放电理论的适用范围

汤逊理论的核心是：

- (1) 电离的主要因素是电子的空间碰撞电离和正离子碰撞阴极产生表面电离；
- (2) 自持放电是气体间隙击穿的必要条件。

汤逊理论是在低气压  $Pd$  值较小的条件下进行放电实验的基础上建立起来的，这一放电理论能较好地解释低气压短间隙中的放电现象。因此，汤逊理论的适用范围是低气压短间隙 ( $Pd < 26.66\text{kPa} \cdot \text{cm}$ )。在高气压、长间隙中的放电现象无法用汤逊理论加以解释，两者间的主要差异表现在以下几方面：

(1) 放电外形。根据汤逊理论，气体放电应在整个间隙中均匀连续地发展。低气压下气体放电发光区确实占据了整个间隙空间，如辉光放电。但在大气压下气体击穿时出现的却是带有分支的明亮细通道。

(2) 放电时间。根据汤逊理论，间隙完成击穿，需要好几次循环：形成电子崩，正离子到达阴极产生二次电子，又形成更多的电子崩。完成击穿需要一定的时间。但实测到的在大气压下气体的放电时间要短得多。

(3) 击穿电压。当  $Pd$  值较小时，根据汤逊自持放电条件计算的击穿电压与实测值比较一致；但当  $Pd$  值很大时，击穿电压计算值与实测值有很大出入。

(4) 阴极材料的影响。根据汤逊理论，阴极材料的性质在击穿过程中应起一定作用。实



验表明，低气压下阴极材料对击穿电压有一定影响，但大气压下空气中实测到的击穿电压却与阴极材料无关。

由此可见汤逊理论只适用于一定的  $Pd$  范围，当  $Pd > 26.66\text{kPa} \cdot \text{cm}$  后，击穿过程发生改变，不能用汤逊理论来解释。

### 1.2.5 流注理论

在汤逊以后，由洛依布 (Loeb) 和米克 (Meek) 等在实验的基础上建立了一种新理论——流注理论 (Streamer Theory)，弥补了汤逊理论的不足，较好地解释了高气压长间隙的气体放电现象。

流注理论认为，在外部电离因素 (如光源) 的作用下，会在阴极附近产生起始有效电子。当外加电场足够强时，这些有效电子在电场作用下，在向阳极运动的途中不断与中性原子发生碰撞电离，而形成初始电子崩。由于电子的运动速度远大于正离子的速度，因此电子集中在朝着阳极的崩头部，当初始电子崩发展到阳极时，崩头中电子迅速运动到阳极进行中和，暂留的正离子 (在电子崩头部其密度最大) 作为正空间电荷与阴极间形成的电场与原有电场方向一致，加强了原电场，同时向周围放射出大量光子 [如图 1-7 (a) 所示]。这些光子使附近的气体因光电离而产生二次电子，它们在由正空间电荷所引起的畸变和加强了了的局部电场作用下，又形成新的电子崩，即二次电子崩 [如图 1-7 (b) 所示]。二次电子崩头部的电子向初始电子崩的正空间电荷区域运动，与之汇合成为充满正负带电粒子的混合通道，这个电离通道称为流注。流注通道导电性能良好，其端部 (这里流注的发展方向是从阳极到阴极，与初崩的方向相反) 又有二次电子崩留下的正电荷，因此大大加强了流注发展方向的电场，促使更多的新电子崩相继产生并与之汇合，从而使流注向前发展 [如图 1-7 (c) 所示]。到流注通道把两极接通时 [如图 1-7 (d) 所示]，就将导致间隙完全被击穿。

综上所述，流注理论认为：形成流注的必要条件是电子崩发展到足够的程度后，电子崩中的空间电荷足以使原电场 (外施电压在间隙中产生的电场) 明显畸变，大大加强了电子崩崩头和崩尾处的电场。另一方面，电子崩中电荷密度很大，复合过程频繁，放射出的光子在这部分强电场区很容易成为引发新的空间光电离的辐射源。因此，流注理论认为：二次电子的主要来源是空间的光电离。

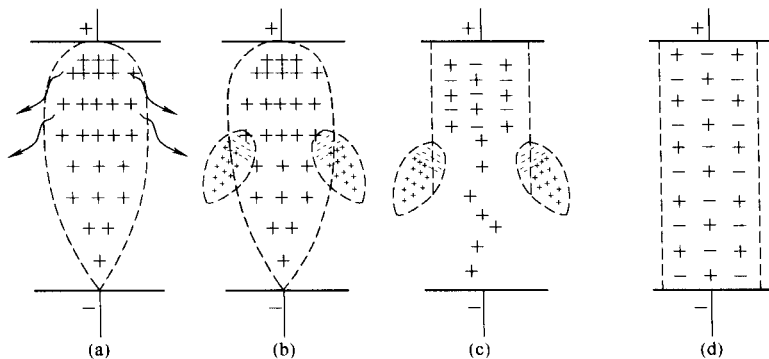


图 1-7 流注的形成和发展

(a) 初始电子崩；(b) 二次电子崩；(c) 流注的发展；(d) 间隙的击穿