



普通高等教育“十二五”规划教材

高电压技术

GAODIANYA JISHU

主编 陈尔奎 吉兴全 于永进

G A O D I A N Y A J I S H U



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十二五”规划教材

高电压技术

主 编 陈尔奎 吉兴全 于永进

副主编 李 丽

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是一门重要的专业技术基础课的教程,主要内容包括高压电气绝缘、高压电气试验、电力系统过电压及其保护,本书在编写时充分考虑电气类专业人才培养的需要,从基本物理概念及物理过程入手,介绍电力系统中实用高电压技术的内容。

本书可以作为普通高等学校电气工程及其自动化专业和其他电类专业的教材,也可以作为职业技术学院电气类各专业教材,还可供电力、电工以及其他领域高电压与绝缘技术工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/陈尔奎,吉兴全,于永进主编. —北京:国防工业出版社,2012.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-118-08267-8

I. ①高... II. ①陈... ②吉... ③于... III. ①高电压—技术—高等学校—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 179600 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

鑫马印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15% 字数 358 千字

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

高电压技术是电气专业重要的专业课,是电工学科的一个重要分支,其主要任务在于研究高电压(强电场)下的各种电气物理问题。20 世纪 60 年代以来,高电压技术一直吸收其他学科尤其是新科技领域的成果,促进自身发展,也促进了电力传输等科技领域的发展,显示出强大的活力。

本书在编写过程中力求做到通俗易懂、精选够用、适当拓宽,注意理论联系实际,尽量多地列举实例,便于学生阅读和自学。在内容编排上,较市面上很多同类书籍做了较大更新和改进。为扩大适用面,按照教学总学时为 40~50 学时编写。

本书集作者多年教学经验,精选内容,删繁就简,既体现加强基础,又使其具有适应性,并兼顾不同水平读者的要求。

本书由陈尔奎、吉兴全、于永进主编,李丽为副主编,参与编写工作的还有研究生孟蕾、朱爱珍和姜文建。本书由公茂法教授精心审阅,提供了不少宝贵的意见,特致以衷心感谢。本书在编写过程中得到了参编单位的领导和老师的大力支持,在此表示感谢!

本书作者在写作过程中参考了大量的相关手册与资料,文后参考文献中所列教材及资料对本书的编写起了重要的参考作用,在此谨向它们的编著者表示衷心感谢。由于时间仓促对于书中疏漏或不当之处,恳请广大读者批评指正。

2012 年 6 月

目 录

第 1 章 气体放电的基本物理过程	1
1.1 气体中带电质点的产生和消失	1
1.1.1 带电质点在气体中的运动	1
1.1.2 气体中带电质点的产生	2
1.1.3 负离子的形成	5
1.1.4 气体中带电质点的消失	6
1.2 气体放电机理	6
1.2.1 Townsend 气体放电理论	6
1.2.2 巴申定律	10
1.2.3 汤逊放电理论的适用范围	11
1.2.4 气体放电的流注理论	11
1.3 不均匀电场的放电过程	14
1.3.1 稍不均匀电场和极不均匀电场的放电特征	14
1.3.2 极不均匀电场中的电晕放电	14
1.3.3 极不均匀电场气隙的击穿和极性效应	17
1.3.4 长气隙的击穿	18
第 2 章 气体介质的电气强度	20
2.1 气隙的击穿时间和伏秒特性	20
2.1.1 气隙的击穿时间	20
2.1.2 气隙的伏秒特性	21
2.2 均匀和不均匀电场气隙的击穿特性	25
2.2.1 较均匀电场气隙的击穿电压	25
2.2.2 不均匀电场气隙的击穿电压	26
2.3 大气条件对气隙击穿电压的影响	32
2.3.1 对空气密度的校正	32
2.3.2 对空气湿度的校正	33
2.3.3 对海拔高度的校正	34
2.4 提高气隙击穿电压的方法	35
2.4.1 改善电场分布	35
2.4.2 采用高度真空	36
2.4.3 增高气压	37
2.4.4 采用高耐电强度气体	37

2.5	气隙的沿面放电	41
2.5.1	均匀和稍不均匀电场中的沿面放电	42
2.5.2	极不均匀电场且具有强垂直分量时的沿面放电	42
2.5.3	极不均匀电场中垂直分量很弱时的沿面放电	43
2.5.4	固体介质表面有水膜时的沿面放电	43
2.5.5	绝缘子染污状态下的沿面放电	44
2.5.6	提高气隙沿面放电电压的方法	46
第3章	液体和固体介质的电气强度	48
3.1	液体和固体介质的极化、电导和损耗	48
3.1.1	相对介电常数	48
3.1.2	电介质的极化	49
3.1.3	讨论电介质极化在工程中的意义	52
3.1.4	电介质的电导	53
3.1.5	电介质的损耗	54
3.2	液体介质的击穿	59
3.2.1	纯净液体介质的击穿理论	59
3.2.2	工程用液体介质的击穿	60
3.2.3	影响液体介质击穿电压的因素及其提高方法	60
3.3	液体电介质的老化	63
3.3.1	变压器油的老化过程	63
3.3.2	影响变压器油老化的因素	64
3.3.3	延缓变压器油老化的方法	65
3.3.4	变压器油的再生	65
3.4	固体介质的击穿	66
3.4.1	固体介质的击穿机理	66
3.4.2	影响固体介质击穿电压的主要因素	68
3.4.3	提高固体介质击穿电压的方法	69
3.5	固体介质的老化	69
3.5.1	固体介质的环境老化	69
3.5.2	固体介质的电老化	70
3.5.3	固体介质的热老化	71
3.6	组合绝缘的电气强度	73
3.6.1	组合绝缘中的电场强度配合	73
3.6.2	“油—屏障”式绝缘	73
第4章	电气设备绝缘试验	75
4.1	绝缘电阻及吸收比的测量	75
4.2	泄漏电流的测量	78
4.3	介质损失角的测量	80
4.3.1	测试电路	80

4.3.2	测试功效	83
4.3.3	测试时应注意的事项	84
4.4	局部放电的测量	85
4.4.1	局部放电基本概念	85
4.4.2	局部放电检测方法综述	88
4.4.3	脉冲电流法的测量原理	90
4.5	绝缘油中溶解气体的色谱分析	91
4.6	工频交流耐压试验	94
4.6.1	工频高电压的产生	94
4.6.2	工频高电压的测量	97
4.6.3	绝缘的工频耐压试验	102
4.7	直流耐压试验	103
4.7.1	直流高电压的产生	103
4.7.2	直流高电压的测量	106
4.7.3	绝缘的直流耐压试验	108
4.8	冲击高压试验	109
4.8.1	冲击电压发生器的原理	109
4.8.2	冲击电压的测量	114
4.8.3	雷电冲击电压试验	116
第5章	线路和绕组中的波过程	119
5.1	无损耗单导线中的波过程	119
5.1.1	波传播的物理概念	119
5.1.2	波动方程及其解	119
5.1.3	波速及波阻抗	122
5.2	行波的折射与反射	123
5.2.1	行波的折、反射规律	123
5.2.2	彼得逊法则	127
5.3	行波通过串联电感和并联电容	128
5.3.1	无限长直角波通过串联电感	128
5.3.2	无限长直角波通过并联电容	129
5.4	行波的多次折、反射	131
5.5	无损耗平行多导线中的波过程	134
5.6	冲击电晕对线路波过程的影响	138
5.7	变压器绕组中的波过程	140
5.8	旋转电机中波过程	145
第6章	雷电及防雷装置	147
6.1	雷电放电和雷电过电压	147
6.1.1	雷云的形成	147
6.1.2	雷电放电过程	148

6.1.3	雷电参数	149
6.1.4	雷电过电压的形成	153
6.2	避雷针和避雷线的保护范围	156
6.2.1	概述	156
6.2.2	避雷针	157
6.2.3	避雷线	160
6.3	避雷器	161
6.3.1	保护间隙	162
6.3.2	管式避雷器	163
6.3.3	普通阀式避雷器	164
6.3.4	磁吹避雷器	168
6.3.5	金属氧化物避雷器	171
6.4	防雷接地装置	174
6.4.1	接地装置一般概念	175
6.4.2	防雷接地及有关计算	177
第7章	电力系统防雷保护	180
7.1	输电线路的感应雷过电压	180
7.2	架空输电线路的直击雷过电压和耐雷水平	181
7.2.1	雷击塔顶时的过电压和耐雷水平	182
7.2.2	雷击避雷线档距中央时的过电压	184
7.2.3	绕击时的过电压和耐雷水平	186
7.3	架空输电线路的雷击跳闸率及防雷措施	187
7.4	发电厂和变电所的直击雷保护	189
7.5	变电所内阀型避雷器的保护作用	191
7.5.1	避雷器与被保护电气设备之间电气距离为零	192
7.5.2	避雷器与被保护电气设备之间电气距离不为零	193
7.5.3	避雷器与被保护电气设备之间的最大允许电气距离	197
7.6	变电所进线段保护	198
7.7	变压器的防雷保护	201
7.8	旋转电机的防雷保护	204
第8章	电力系统过电压	208
8.1	工频过电压	209
8.1.1	空载长线路的电容效应	209
8.1.2	不对称短路引起的工频电压升高	211
8.1.3	甩负荷引起的工频电压升高	212
8.2	谐振过电压	213
8.2.1	线性谐振过电压	213
8.2.2	铁磁谐振过电压	215
8.2.3	参数过电压	217

8.3	切除空载线路过电压	217
8.3.1	物理过程	217
8.3.2	影响因素和降压措施	219
8.4	合空载线路过电压	220
8.4.1	发展过程	220
8.4.2	影响因素和限制措施	223
8.5	切除空载变压器过电压	224
8.5.1	发展过程	224
8.5.2	影响因素与限制措施	226
8.6	断续电弧接地过电压	226
8.6.1	发展过程	226
8.6.2	防护措施	230
第9章	电力系统绝缘配合	232
9.1	绝缘配合的概念和原则	232
9.2	中性点接地方式对绝缘水平的影响	233
9.3	绝缘配合惯用法	234
9.4	架空输电线路的绝缘配合	238
9.4.1	绝缘子串的选择	238
9.4.2	空气间距的选择	240
参考文献		243

第 1 章 气体放电的基本物理过程

绝大多数电气设备利用气体作为绝缘介质,其中利用最多的气体是空气和 SF₆ 气体。空气是大自然为我们免费提供的一种相当理想的气体介质。架空输电线路各相导线之间、相与地之间、变压器输出端之间的绝缘等都利用了空气。在 SF₆ 断路器和气体绝缘组合电器 (GIS) 中,则以 SF₆ 气体作为绝缘介质。

纯净的气体(这里指空气)是不导电的,但实际上,由于外界电离因子(宇宙射线和地下放射性物质的高能辐射线等)的作用,地面大气层的空气中不可避免地存在一些带电质点(电子、离子等),每立方厘米体积内约有 500 对 ~ 1000 对正、负带电质点,这些带电质点做定向运动形成电导电流。不过由于电流极小,空气仍是良好的绝缘介质。

当气体中的电场强度逐渐增大,气体中带电质点逐渐增多,发展成各种形式的气体放电现象。解释气体放电的理论主要有汤逊理论、流注理论、电晕理论、沿面放电理论、雷电放电理论等。

1.1 气体中带电质点的产生和消失

1.1.1 带电质点在气体中的运动

1. 自由行程长度

各种质点在气体中运动时都会不断地互相碰撞,任一质点在 1cm 的行程中所遭遇的碰撞次数与气体分子的半径和密度有关。单位行程中的碰撞次数 Z 的倒数 λ 即为该质点的平均自由行程长度。电子的平均自由行程长度为

$$\lambda_e = \frac{1}{\pi r^2 N} \quad (1-1)$$

式中 r ——气体分子的半径;
 N ——气体分子的密度。

由于 $N = \frac{p}{kT}$,代入式(1-1)即得

$$\lambda_e = \frac{kT}{\pi r^2 p} \quad (1-2)$$

式中 p ——气压(Pa);
 T ——气温(K);
 k ——波尔茨曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

在大气压和常温下,电子在空气中的平均自由行程长度的数量级为 10^{-5} cm,比离子或气体分子的平均自由行程长度大得多,原因是电子的半径或体积要比离子或气体分子

小很多。

实际的自由行程长度是一个随机量,并具有很大的分散性。质点的自由行程长度等于或大于某一距离 x 的概率为

$$P(x) = e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1-3)$$

可见质点的实际自由行程长度等于或大于平均自由行程长度 λ 的概率为 $P(x \geq \lambda) = e^{-\frac{\lambda}{\lambda}} = e^{-1} = 36.8\%$ 。

2. 带电质点的迁移率

带电质点虽然不可避免地要与气体分子不断地发生碰撞,但在电场力的驱动下,仍将沿着电场方向漂移,其速度 u 与场强 E 成正比,其比例系数 $k_e = u/E$ 称为迁移率,它表示该带电质点在单位场强 (1V/m) 下沿电场方向的漂移速度。

3. 扩散

气体中带电质点和中性质点的运动还与质点的浓度有关。在热运动的过程中,质点会从浓度较大的区域运动到浓度较小的区域,从而使每种质点的浓度分布均匀化,这种物理过程称为扩散。气压越低或温度越高,则扩散进行得越快。电子的热运动速度大、自由行程长度大,所以其扩散速度也要比离子快得多。

1.1.2 气体中带电质点的产生

气体中带电质点的来源有两种:一是气体分子本身发生电离;二是气体中的固体或液体金属发生表面电离。

在阐述各种形式的电离过程以前,有必要先对产生电离的条件做些扼要的说明。

玻尔理论认为,在原子中,电子不能沿着任意轨道绕原子核旋转,只能沿着符合量子论条件的轨道绕转。也就是说,这些轨道的半径是按一定的规律呈阶跃性变化的,而不是连续性变化的。每一条轨道对应于一定的能量水平(包括势能和动能),代表一个能级。离原子核越近的轨道,其能级越低,离原子核越远的轨道,其能级越高。

当电子沿着固定轨道绕转时,它的能量是一定的。但当电子由离核较远的轨道(其能级为 W_d) 跃迁到离核较近的轨道(其能级为 W_s) 时,原子就放射出单色光(即具有一定能量的光子),其频率 ν 由下式决定

$$\nu = \frac{W_d - W_s}{h} \quad (1-4)$$

式中 W_d, W_s ——能级(J);

h ——普朗克常数,其值等于 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

在正常情况下,电子在各轨道上的分布具有使原子的总能量为最小的趋势。这就是说,电子总是尽量先填满离核较近的轨道,而让外层轨道空着。

如果要使电子跃迁到离核较远的轨道上去,必须从外界给原子一定的能量。一个原子的外层电子跃迁到较远的轨道上去的现象称为激励,所需的能量称为激励能 W_e ,其值即等于两轨道能级的差值。

当外界加入的能量很大,使电子具有的能量超过最远轨道的能量时,电子就跳出原子轨道之外,成为自由电子。这样,就使原来的一个中性原子变成一个自由电子和一个带正

电荷的离子,这种现象称为电离。达到电离所需的最小能量称为电离能 W_i 。

处于激励状态的原子是不稳定的,在极短时间内(约为 10^{-8}s),就会自发地跳回到较内层的轨道上去,这时就会将原来所吸收的激励能以一定频率的单色光(光子)的形式放射出去。

某些气体还具有这样一种特殊的激励能级,处在这些激励能级上的电子,不能自发地辐射出光子而回到正常能级或任何一个较低的能级上去,只有再吸收能量而跃迁到更高能级上去以后,再由此更高能级放出辐射能而直接回到正常能级,这种特殊的能级被称为亚稳能级,相应的激励状态被称为亚稳态。在核物理领域,采用电子伏(eV)作为能量的单位更为方便。电子的电荷量为 $1.602 \times 10^{-19}\text{C}$, 故

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{C} \cdot \text{V} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$$

由此还可以用电离电位 U_i 和激励电位 U_e 表示电离能和激励能。电离电位和激励电位在数值上就等于用电子伏表示的电离能和激励能。表 1-1 给出了某些气体原子和分子的电离电位和激励电位。

表 1-1 某些气体原子和分子的电离电位和激励电位

气体名称	第一电离电位	第二电离电位	第一激励电位	气体名称	第一电离电位	第二电离电位	第一激励电位
N ₂	15.8		6.1	He	24.6		19.8
N	14.5		6.3	Ne	21.6	54.2	16.6
O ₂	12.5	29.8	7.9	Cs	3.88	40.7	1.38
O	13.6		9.1	Hg	10.4	23.4	4.86
H ₂	15.9	35.1	10.8	H ₂ O	12.7	18.6	7.6
H	13.6		10.15	CO ₂	14.4		10.0

根据不同的电离因素,强电场作用下的电离有如下几种形式。

1. 碰撞电离

处在电场中的带电粒子,除了由于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。当带电粒子积累的能量足够大时,与中性气体分子碰撞,就可能使气体分子发生电离。这种由碰撞引起的电离称为碰撞电离。

电子在电场中获得加速,移过距离 x 后,其动能为

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = qEx \tag{1-5}$$

式中 m ——电子的质量;
 q ——电子的电荷量。

如果 W 等于或大于气体分子的电离能 W_i ,该电子和气体分子碰撞时,可以把自己的动能转给后者而引起碰撞电离,使气体分子分裂成正离子和电子。由此可以得出电子引起碰撞电离的必要条件应为

$$qEx \geq W_i \tag{1-6}$$

电子为造成碰撞电离而必须飞越的最小距离为

$$x_i = \frac{W_i}{qE} = \frac{U_i}{E} \quad (1-7)$$

x_i 的大小取决于场强 E , 增大气体中的场强将使 x_i 值减小, 可见提高外加电压将使碰撞电离的概率和强度增大。

式(1-7)不是碰撞电离的充分条件, 也就是说, 满足式(1-7) 条件的碰撞并不一定都能造成电离。碰撞电离乃是两个质点在接近时通过复杂的电磁力相互作用, 达到两者之间发生能量转换的结果, 这就需要一定的相互作用时间和条件。一般来说, 电子的动能越大, 造成电离的概率也越大。但超过一定速度的电子, 其速度再进一步增大时, 其碰撞电离概率反而逐渐减小, 这是因为当相对速度很大时, 相碰撞的两个质点相互作用的延续时间很短, 可能来不及完成能量转换的缘故。

碰撞电离是气体中产生带电质点的最重要的方式。主要的碰撞电离均由电子完成, 离子碰撞中性分子并使之电离的概率要比电子小得多。这是因为正、负离子的体积比电子大得多, 在向电场方向加速的途中, 在它们尚未积聚到足够动能的时候就与别的质点碰撞的概率比电子大得多, 这样的碰撞只能使它们失去已积累的某些动能, 并不能造成电离; 而电子由于直径小, 所以与别的质点相邻两次碰撞之间的平均自由行程比离子大得多, 在电场的作用下, 积聚足够的动能后再与其他质点碰撞的概率比离子大得多。所以, 在电场中, 造成碰撞电离的主要因素是电子。在分析气体放电发展过程时, 往往只考虑电子所引起的碰撞电离。

2. 光电离

产生光电离的必要条件是光子的能量应不小于气体的电离能。光子的能量为 $h \cdot \nu$, 这里 ν 是光子的频率, h 是普朗克常数, 公式为

$$h \cdot \nu \geq W_i = eU_i \quad (1-8)$$

式中 W_i 、 U_i ——分别为气体的电离能(J)和电离电位(V);

e ——电子的电荷量(C)。

式(1-8)也可改写为

$$\lambda = \frac{hc}{eU_i} \quad (1-9)$$

式中 λ ——波长;

c ——光速。

由式(1-9)可求得能使气体发生直接光电离的临界波长为

$$\lambda = \frac{hc}{eU_i} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-19} U_i} = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{U_i} (\text{m}) \quad (1-10)$$

伦琴射线、 γ 射线、宇宙射线等高能射线中的能量比气体的电离能大得多, 都能产生光电离。另外, 这些电离出来的电子还具有很大的初速度, 还可再造成碰撞电离。

由光电离产生的电子称为光电子。

3. 热电离

由气体分子的热运动状态造成的电离称为热电离。热电离实质上并不是一种独立的电离形式, 而是包含着碰撞电离与光电离, 只是其能量来源于气体分子本身的热能。

在常温下,气体质点热运动所具有的动能远低于气体的电离能,不足以引起电离。如室温(20℃)时,气体分子的平均动能仅约0.038eV,这比任何气体的电离能都要小得多。在高温下,气体分子的平均动能增到很大,在互相碰撞时,就可能产生碰撞电离。高温气体热辐射的光子能量大、数量多,与气体分子相遇时就可能产生光电离。一般气体开始有较明显热电离的起始温度为 10^3K 数量级。

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。从金属电极表面逸出电子需要一定的能量,通常称为逸出功。各种金属有各自不同的逸出功,且其表面状况对于逸出功的数值影响很大。表1-2列出了部分金属的逸出功。

表 1-2 某些金属的逸出功 (eV)

金属名称	铯	锌	铝	铬	铁	镍	铜	银	钨	金	铂
逸出功	1.88	3.3	4.08	4.37	4.48	5.24	4.70	4.73	4.54	4.82	6.3

比较表1-1和表1-2可见,金属的逸出功一般要比气体的电离能小得多,这表明金属表面电离比气体空间电离更易发生。金属电极表面电离所需的能量可以通过如下途径获得。

1) 热电子发射

加热金属电极,使金属中的电子的动能超过逸出功时,电子能克服金属表面的势能壁垒而逸出,称为热电子发射。热电子发射对某些电弧放电的过程有重要意义。

2) 强场发射

在电极附近加上很强的外电场,从金属电极中直接拉出电子,称为强场发射或冷发射。这种发射所需的外电场极强,在 10^6V/cm 数量级。一般常态气隙的击穿场强远低于此值,所以在常态气隙的击穿过程中不会出现强场发射。强场发射在高气压下,特别是在压缩的高电气强度气体的击穿过程中起一定作用;在高真空下的气隙击穿更是起决定作用。

3) 正离子撞击金属阴极表面

用某些具有足够能量的正离子撞击金属电极表面,也可能产生表面电离,称为二次发射。正离子的总能量由动能和势能两部分组成,其势能就是其电离能 W_i 。在一般情况下,正离子的动能是比较小的,如忽略不计,则只有当正离子的势能不小于电极材料逸出功的两倍时,才能产生表面电离。因为正离子的势能只有在与电子结合时才能释放出来,欲从金属表面电离出一个自由电子,正离子必须从金属表面逸出两个电子,其中的一个与自身结合成中性质点,另一个才可能成为自由电子。

4) 光电子发射

用高能射线照射金属表面也能产生表面电离,称为光电子发射。当然,此时光子的能量必须大于金属的逸出功。

1.1.3 负离子的形成

当电子与气体分子碰撞时,不但有可能引起碰撞电离而产生出正离子和电子,而且也可能发生电子与中性分子相结合而形成负离子的情况,这种过程称为附着。一个中性分子或原子与一个电子结合形成一价负离子时所放出的能量,称为分子或原子对电子的

亲合能。亲合能值越大,就越容易与电子结合形成负离子。卤族元素的亲合能值比其他元素大得多,所以,它们是很容易俘获一个电子而形成负离子的;其他如 O_2 、 H_2O 、 SF_6 等气体分子也易于形成负离子;而惰性气体和氮气则不会形成负离子。这些易于产生负离子的气体称为电负性气体。

负离子的形成并没有使气体中的带电质点数改变,但却能使自由电子数减少,因而对气体放电的发展起抑制作用。后面将要介绍的某些特殊的电负性气体(如 SF_6)对电子具有很强的亲合性,其电气强度远大于一般气体,因而被称为高电气强度气体。

1.1.4 气体中带电质点的消失

气体中带电质点的消失可有下列几种情况。

- (1) 带电质点在电场的驱动下做定向运动,流入电极,中和电荷。
- (2) 带电质点因扩散现象而逸出气体放电空间。
- (3) 带电质点的复合。

当气体中带异号电荷的质点相遇时,有可能发生电荷的传递与中和,这种现象称为复合,它是与电离相反的一种物理过程。复合可能发生在电子和正离子之间,称为电子复合,其结果是产生了一个中性分子;复合也可能发生在正离子和负离子之间,称为离子复合,其结果是产生了两个中性分子。上述两种复合都会以光子的形式放出多余的能量,这种光辐射在一定条件下能导致其他气体分子的电离,使气体放电出现跳跃式的发展。带电质点的复合强度与正、负带电质点的浓度有关,浓度越大,则复合也进行得越激烈。

1.2 气体放电机理

1.2.1 Townsend 气体放电理论

20 世纪初,英国物理学家汤逊(J. S. Townsend)根据大量的实验结果,阐述了气体放电的过程,并在一系列假设的条件下,提出了气隙放电电流和击穿电压的计算公式,虽然实验表明,汤逊理论只是对较均匀电场和 $\delta \cdot d$ 较小的情况下比较适用(此处 δ 为气体的相对密度,指气体密度与标准大气条件下($P_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 293 \text{ K}$)的密度之比; d 为气隙距离),但它所考虑和讨论的气体放电物理过程还是很基本的,具有普遍意义。下面就扼要地叙述这个理论。

1. 汤逊放电实验

各种高能辐射线(外界电离因子)会引起阴极的表面光电离和气体中的空间光电离,从而使空气中存在一定浓度的带电质点。因而在气隙的两端电极上施加电压时,即可检测到微小的电流。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,在两极之间加上直流电压,则在两极之间形成均匀电场。用外部光源对阴极极板进行照射,并使极间电压从零开始逐渐升高,得到电流和电压的关系如图 1-2 所示。在曲线的 $0a$ 段, I 随 U 的提高而增大,这是由于电极空间的带电质点向电极运动的速度加快而导致复合数的减少所致。当电压接近 U_a 时,电流趋于饱和值 I_0 ,因为这时由外界电离因子所产生的带电质点几乎能全部抵达电极,所以电流值仅取决于电离因子的强弱而与所加电压

的大小无关。饱和电流 I_0 之值很小, 电流密度的数量级仅为 10^{-19} A/cm^2 , 即使采用紫外线光照射阴极, 其数量级也不会超过 10^{-12} A/cm^2 , 可见这时气体仍处于良好的绝缘状态。但当电压提高到 U_0 时, 电流又开始随电压的升高而增大, 这是由于气隙中出现了新的电离因素——碰撞电离, 碰撞电离形成了电子崩, 电流越来越大, 最后到达 c 点, 电压达到 U_0 , 此时电流急剧增大, 气体间隙转入良好的导电状态。外加电压达到 U_0 以前, 气体间隙中的电流很小, 且要依靠外界的电离因素来维持, 这种性质的放电属于非自持放电; 外加电压达到 U_0 以后, 气体间隙中发生了强烈的电离, 带电粒子的数量急增, 此时气体间隙中的放电依靠电场的作用就可维持, 这种性质的放电称为自持放电, U_0 称为放电的起始电压。气体放电一旦进入自持放电, 即意味着气隙已被击穿。

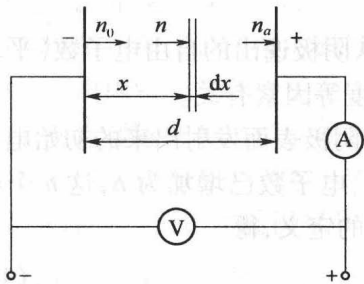


图 1-1 汤逊的实验装置原理图

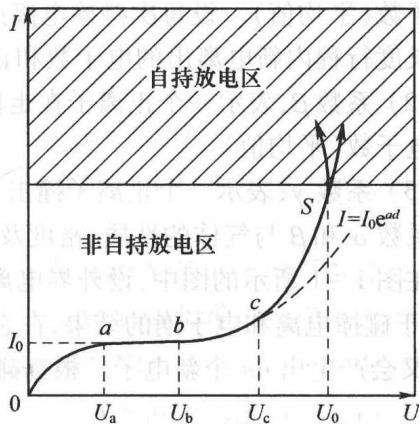


图 1-2 气隙放电的伏安特性曲线

2. 电子崩

在解释气体放电的物理过程中, 汤逊引入了“电子崩”的概念。所谓电子崩是指电子在电场的作用下从阴极奔向阳极的过程中, 当空间的电场强度足够大时, 与中性分子碰撞发生电离, 电离的结果产生出新的电子, 初始电子和新生电子继续向阳极运动, 又会引起新的碰撞电离, 产生出更多的电子。依此类推, 电子数将按几何级数不断增多, 像雪崩似地发展, 称为电子崩。电子崩的形成和带电质点在电子崩中的分布如图 1-3 所示。

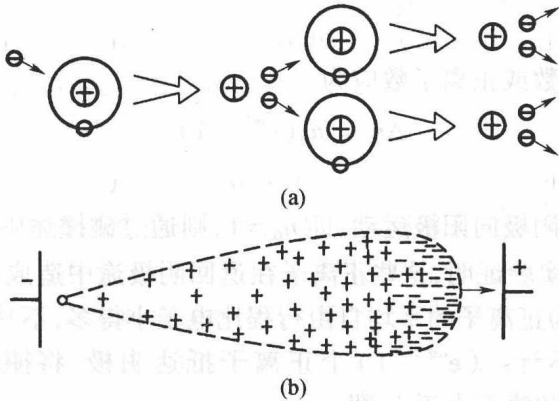


图 1-3 电子崩示意图

(a) 电子崩的形成; (b) 带电粒子在电子崩中的分布。

电子崩的出现过程使气体间隙中的电流迅速增大,图 1-2 中 b 点后电流随电压迅速增长就是由于出现电子崩的缘故。但在电压小于某临界值 U_0 时,这种电子崩还必须依赖于外界电离因素所造成的原始电离才能持续和发展。如外界电离因素消失,则这种电子崩也随之逐渐衰减以至消亡,这种放电为非自持放电。当电压高于某临界值 U_0 时,这种电子崩可仅由电场的作用而自行维持和发展,不必再有依赖于外界电离因素了,此时的放电为自持放电。

3. 汤逊放电理论解释

汤逊放电理论主要考虑了 3 种因素,引用 3 个系数来定量地反映这 3 种因素的作用。

(1) 系数 α , 表示一个电子在走向阳极的 1cm 路程中与气体质点相碰撞所产生的自由电子数(平均值)。设每次碰撞电离产生一个电子和正离子,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。

(2) 系数 β , 表示一个正离子在走向阴极的 1cm 路程中与气体质点相碰撞所产生的自由电子数(平均值)。

(3) 系数 γ , 表示一个正离子撞击到阴极表面时从阴极逸出的自由电子数(平均值)。

系数 α 和 β 与气体的性质、密度及该处的电场强度等因素有关。

在图 1-1 所示的图中,设外界电离因素每秒钟使阴极表面发射出来的初始电子数为 n_0 , 由于碰撞电离和电子崩的结果,在它们到达 x 处时,电子数已增加为 n , 这 n 个电子在 dx 中又会产生出 dn 个新电子。根据碰撞电离系数 α 的定义,得

$$dn = \alpha n dx \quad (1-11)$$

分离变量并积分之,得

$$n = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx} \quad (1-12)$$

对于均匀电场来说,气隙中各点的电场强度相同, α 值不随 x 而变化,所以上式可写成

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (1-13)$$

抵达阳极的电子数应为

$$n_a = n_0 e^{\alpha d} \quad (1-14)$$

式中 d ——极间距离。

途中新增加的电子数或正离子数应为

$$\Delta n = n_0 (e^{\alpha d} - 1) \quad (1-15)$$

1) 自持放电条件

假设有一个电子自阴极向阳极运动,即 $n_0 = 1$, 则通过碰撞途中新增加的电子数或正离子数应为 $(e^{\alpha d} - 1)$ 。实验证明,这些正离子在返回阴极途中造成碰撞电离(即 β 过程)的作用极小,主要是因为正离子的平均自由行程比电子小得多,不易积累足够造成电离的动能。因而可以忽略不计。 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子抵达阴极,将撞击阴极表面,电离出 $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 个电子,如果此值不小于 1,即

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \text{ 或 } \alpha d \geq \ln(1 + 1/\gamma) \quad (1-16)$$

则表示一个起始电子经上述一次过程后,能从阴极产生的新电子数不少于原有的那一个