

21 世纪 高等学校本科系列教材

总主编 顾乐观

高 电 压 技 术

(20)

杨保初 刘晓波 戴玉松 编著

重庆大学出版社



高电压技术

杨保初 刘晓波 戴玉松 编著

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书为普通高等学校电力工程类各专业的通用教材。本书内容为高电压绝缘与试验和电力系统过电压及其防护两篇,包括气体、液体和固体介质的绝缘强度,电气设备绝缘试验,线路及绕组中的波过程,雷电及防雷设备,输电线路的防雷保护,发电厂和变电所的防雷保护,电力系统稳态过电压及操作过电压,电力系统绝缘配合共10章。

本书可作为高等学校电力工程类各专业学生学习高电压技术课程时的教材,也可供电力、电工方面的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/杨保初,刘晓波,戴玉松编著. —重庆:重庆大学出版社,
2001.12

电气工程及其自动化专业本科系列教材

ISBN 7-5624-2441-1

I. 高... II. 杨... 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(2001)第 086931 号

高 电 压 技 术

杨保初 刘晓波 戴玉松 编著

责任编辑 谭 敏

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

四川省自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:381千

2002年1月第1版 2002年1月第1次印刷

印数:1—6000

ISBN 7-5624-2441-1/TM·74 定价:20.00元

前言

本书是根据全国高等学校电力工程专业教学指导委员会制定的《高电压技术课程教学基本要求》编写的,可作为电力类各专业学生学习本课程时的教科书。

全书在编写过程中强调基本内容、基本概念和基本训练,同时又注意新内容的引入,适应高电压技术发展的需要。另外注意深入浅出,说理清楚,便于教学,便于自学,并参考了国内外不少有关教材和资料,其中主要的部分已列入参考文献中。

本书由杨保初教授担任主编,刘晓波副教授编写第1章、第2章、第3章,戴玉松教授编写第4章,第9章9.1、9.2,其余部分由杨保初教授编写。

本书由四川工业大学颜怀梁教授担任主审,他为提高书稿质量付出了艰辛的劳动,提出了许多宝贵意见,在此向他表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限,难免有不妥和错误之处,恳请读者给予指正。

编 者

2001年9月

(HAC)06

目 录

绪 论	1
-----------	---

第 1 篇 高电压绝缘与试验

第 1 章 气体的绝缘强度	4
1.1 气体放电的基本物理过程	4
1.2 影响气体放电电压的因素	19
1.3 沿面放电	27
复习思考题	38
第 2 章 液体和固体介质的绝缘强度	39
2.1 介质的极化、电导和损耗	39
2.2 液体介质的击穿	49
2.3 固体介质的击穿	53
2.4 绝缘介质的其他特性	55
复习思考题	56
第 3 章 电气设备绝缘试验	57
3.1 绝缘电阻及吸收比的测量	58
3.2 泄漏电流的测量	60
3.3 介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的测量	61
3.4 局部放电的测量	67
3.5 绝缘油的色谱分析	69
3.6 工频交流耐压试验	71
3.7 直流耐压试验	80

3.8 冲击高压试验	84
3.9 电气设备的在线检测技术	90
复习思考题	94

第2篇 电力系统过电压及其防护

第4章 线路及绕组中的波过程	97
4.1 无损耗单导线中的波过程	97
4.2 行波的折射和反射	100
4.3 行波通过串联电感和并联电容	105
4.4 行波的多次折、反射	108
4.5 无损耗平行多导线系统中的波过程	110
4.6 冲击电晕对线路波过程的影响	113
4.7 变压器绕组中的波过程	114
4.8 旋转电机绕组的波过程	120
复习思考题	122

第5章 雷电及防雷设备	124
5.1 雷电的电气参数	124
5.2 避雷针、避雷线的保护范围	127
5.3 管型避雷器与阀型避雷器	130
5.4 金属氧化物避雷器	137
5.5 防雷接地装置	141
复习思考题	146

第6章 输电线路的防雷保护	148
6.1 输电线路的感应雷过电压	148
6.2 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平	150
6.3 输电线路的雷击跳闸率	155
6.4 输电线路的防雷措施	157
复习思考题	160

第7章 发电厂和变电所的防雷保护	162
7.1 发电厂、变电所的直击雷保护	162
7.2 变电所内阀型避雷器的保护作用	164

7.3 变电所进线段保护	169
7.4 变压器的防雷保护	172
7.5 旋转电机的防雷保护	174
复习思考题	179
第8章 电力系统稳态过电压	180
8.1 空载长线的电容效应	181
8.2 不对称短路引起的工频电压升高	184
8.3 谐振过电压	186
8.4 传递过电压	189
8.5 断线引起的铁磁谐振过电压	190
复习思考题	193
第9章 电力系统操作过电压	194
9.1 切除空载线路过电压	194
9.2 合空载线路过电压	198
9.3 切除空载变压器过电压	201
9.4 电弧接地过电压	204
复习思考题	210
第10章 电力系统绝缘配合	211
10.1 系统中性点接地方式及其对绝缘水平的影响	211
10.2 绝缘配合的原则和方法	212
10.3 变电所电气设备绝缘水平的确定	216
10.4 架空输电线路绝缘水平的确定	219
复习思考题	224
附录	225
附录1 标准球隙放电电压表	225
附录2 阀式避雷器电气特性	230
参考文献	233

绪 论

高电压技术是一门新兴学科,它随着电力系统输电电压的提高和近代物理的发展而得到发展。现代电力系统的输电电压已由高压(HV)提高到超过 220kV 的超高压(EHV),目前世界上最高的交、直流输电电压等级已分别达到 1 150kV 和 ± 600 kV。我国作为装机容量和年发电量均居世界第二位的电力大国,也已建成了相当规模的 500kV 交流输电系统, ± 500 kV 直流输电线路已投入运行。由于我国国土辽阔,能源布局不合理,动力资源和负荷中心相距遥远,“西电东送”和“北电南送”必然成为我国 21 世纪的送电格局,因此我国必将成为世界上少数几个有可能要发展 1 000kV 及以上特高压(UHV)输电技术的国家之一。

随着输电电压的提高,需要生产相应的高压电气设备,这就需要对各类绝缘介质的特性及其放电机理进行研究,而气体放电的机理是各类材料放电机理的基础。设备额定电压的提高使绝缘材料和绝缘结构的研究成为很重要的问题。当前,各种高抗电强度气体如 SF_6 和各类有机高分子合成材料等新型绝缘材料的出现,为制造高压电气设备提供了广阔的前景。

除设备问题外,电力系统中的过电压和绝缘是一对主要矛盾。电力系统的设计、建设和运行都要求工程技术人员在各种电介质和绝缘结构的电气特性、电力系统中的过电压及其防护措施、绝缘的高电压试验等方面具有必要的知识,同时过电压和绝缘这对矛盾需要用技术经济的综合观点来处理,这些问题彼此密切相关,一起构成了高电压技术的主体内容。

另一方面,从 20 世纪 60 年代开始,高电压技术加强了与其他学科的相互渗透和联系,在整个过程中,高电压技术一方面不断吸取其他科技领域的新成果,促进了自身的更新和发展;另一方面,也使高电压技术方面的新进展、新方法更广泛地应用到诸如大功率脉冲技术、激光等离子体、受控热核反应、原子物理、生态与环境保护、生物医学、高压静电工业应用等科技领域,显示出强大的生命力。

最后,高电压技术这门学科是从生产实践中发展起来的,因此在研究和学习理论的同时,更应该强调实践的重要性,当前,在高电压技术学科的各个领域内,大部分理论的研究还不很成熟,需要依靠实践结果的积累、总结和提高,以推进高电压技术学科的发展。

第 **I** 篇

高电压绝缘与试验

绝缘是电气设备结构中的重要组成部分,其作用是把电位不等的导体分开,使其保持各自的电位,没有电气连接。将具有绝缘作用的材料称为绝缘材料,即电介质,电介质在电场作用下,有极化、电导、损耗和击穿等现象。

随着电力系统电压等级的不断提高,绝缘成为电气设备中的薄弱环节。当由于某一部分设备绝缘遭到损坏而引起事故时,电力系统就不能安全可靠地运行,给国民经济造成巨大损失。电气设备只有具有经济可靠的绝缘结构,才能够可靠地工作。首先必须掌握各类绝缘材料在电场作用下的电气性能,尤其是在强电场中的击穿特性及其规律,而对气体放电机理的研究是研究其他绝缘材料放电机理的基础。另外,电气设备耐受电压的能力将决定其是否能安全可靠地运行。高电压试验是研究击穿机理、影响因素、电气强度以及检验电气设备耐受水平的最好方法。因此,应对电气设备绝缘进行试验,消除隐患防患于未然。为此,就必须掌握电力系统绝缘试验中常规试验的原理和方法以及产生交、直流、冲击高电压的基本方法和设备及测量手段。

第 1 章

气体的绝缘强度

1.1 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

气体常作为电力系统和电气设备中的绝缘介质,工程上使用得最多的是空气和 SF_6 气体。例如,架空线路中相与相之间、相与地之间、变压器外绝缘等就是利用空气的绝缘性能而作为绝缘介质的,在 SF_6 断路器和 SF_6 全封闭组合电器中则以 SF_6 气体作为绝缘介质的。正常情况下,气体是绝缘体,但其中仍有少量的带电质点,这是在空中高能射线(如紫外线、宇宙射线及地球内部辐射线)作用下产生的。在电场作用下,这些带电质点作定向运动而形成电导电流。因此,气体不是理想的绝缘体,不过,当电场较弱时,带电质点数极少,电流极小,气体仍是良好的绝缘体。

当气体中的电场强度达到一定数值后,气体中电流剧增,在气体间隙中形成一条导电性很高的通道,气体失去了绝缘能力,气体这种由绝缘状态突变为良导电状态的过程,称为击穿。气体中流过电流的各种形式统称为气体放电。气体击穿后,可因电源功率、电极形式、气体压力、气体状态等的不同而具有不同的放电形式:在气压低、电源功率较小时,为充满间隙的辉光放电;在大气压下,表现为火花放电或电弧放电;在极不均匀电场中,会在局部电场最强处产生电晕放电。在电场作用下,气体间隙中发生放电现象,说明其中存在大量带电质点,这些带电质点的产生与消失决定了气体中的放电现象的强弱与发展。

气体中带电质点的产生有两个途径:一是气体本身发生游离;二是在气体中的金属电极发生表面游离。

我们知道,任何电介质都是由原子组成,原子则由一带正电的原子核和围绕着原子核旋转的外层电子组成。由于原子所带正、负电荷相等,故正常情况呈中性。电子的能量不同,其所处的轨道也不同。通常电子能量越小,其轨道半径越小,离原子核越近。稳定的原子的外层电子都在各自的能级轨道上运转,此时原子的位能最小。当外界给予原子一定的能量使内层电子获得能量不能脱离原子核的束缚,只能跃迁到标志着能量更高的、离原子核较远的轨道上去

时,该原子就处于激励状态,原子的位能也增加,这一过程叫激励。根据原子中电子的能量状态,原子有一系列可取的确定的能量状态,称为能级。原子的正常状态相当于最低的能级,用电子伏特作微观系统中的能量单位。 1eV 的能量相当于一个电子行经 1V 电位差的电场所获得的动能,电子的电荷为 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$,因此, $1\text{eV} = 1\text{V} \times 1.6 \times 10^{-19}\text{C} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

原子激励所需能量等于较远轨道与正常轨道的能级之差,称为激励能。处于激励状态的原子的寿命极短,仅能存在 $10^{-7} \sim 10^{-8}\text{s}$,之后会自动地返回到原始状态,以光子的形式释放出所吸收的能量,这一过程称为反激励。若吸收的外界能量足够大,使得原子中一个或几个电子脱离原子核的束缚而形成自由电子,中性原子失去电子成为正离子,该原子就被游离了。这一过程称为原子的游离过程,所需能量称为游离能。显然,原子游离后,增加了气体中的带电质点数目。原子从中性质点成为游离状态,须吸收能量;处于激励状态的原子,也可再获得能量发生游离,称为分级游离。这种分级游离所需能量小于原子直接游离所需的能量。如果用电子的电荷去除以用焦耳表示的激励能或游离能,则相应地得到用伏表示的激励电位或游离电位。

常见气体及金属蒸气的激励电位和游离电位如表 1.1 所示。

表 1.1 常见气体及金属蒸气的激励电位和游离电位 单位:V

气体或金属蒸气	激励电位	游离电位
H_2	11.2	15.4
N_2	6.1	15.6
O_2	7.9	12.5
He	19.8	24.6
Cs	1.38	3.88
CO_2	10.0	13.7
H_2O	7.6	12.7
空气	...	16.3
铯蒸汽(Cs)	1.38	3.88
钠蒸汽(Na)	2.09	5.12
水银蒸汽(Hg)	4.89	10.39

(1) 气体中带电质点的产生

带电质点可由下面形式的游离形成:

1) 碰撞游离

在电场作用下,电子被加速获得动能($\frac{1}{2}m_e v^2$)。如果其动能大于气体质点的游离能,在和气体质点发生碰撞时,就可能使气体质点产生游离分裂成正离子和电子。这种游离称为碰撞游离。这是气体中带电质点数目增加的重要原因。因为电子的质量轻、体积很小,在与别的质点产生相邻两次碰撞之间的自由行程比离子的大得多,故在电场作用下,易积累足够能量,再与其他质点碰撞,易发生碰撞游离。

2) 光游离

电磁射线(光子)的能量 $h\nu$ 等于或大于气体质点的游离能时所引起的游离过程叫光游离,在气体放电中起着重要作用。

光具有波动、粒子二重性,光子是携带能量的质点,光游离相当于光子与气体质点发生碰撞。如果光子能量足够大就可以使气体质点在碰撞时发生游离,产生正离子和自由电子,此时产生的电子称为光电子。

在各种气体和金属蒸气中,可见光的光子所带能量不足以使气体质点游离,因此可见光不可能发生光游离,但不排除由于分级游离而造成游离的可能性。导致气体光游离的光子可以是伦琴射线、 γ 射线等高能射线,也可以是气体中反激励过程或异号带电质点复合成中性质点过程中释放出的光子,这些光子又可引起光游离。

3) 热游离

因气体分子热运动状态引起的游离称为热游离。其实质仍是碰撞游离和光游离,只是直接的能量来源不同而已。

在常温下,气体质点热运动所具有的平均动能远低于气体的游离能,不足以引起碰撞游离,而在高温下,如电弧放电时,气体温度可达数千摄氏度,此时气体质点动能就足以引起碰撞游离了;此外,高温气体的热辐射也能导致气体质点产生光游离。

4) 表面游离

放在气体中的金属电极表面游离出自由电子的现象称为表面游离。

使金属释放出电子也需要能量,以使电子克服金属表面的束缚作用,这个能量通常称为逸出功。各种金属的逸出功比气体的游离能小得多。常见金属的逸出功见表 1.2 所示。

表 1.2 常见金属和金属氧化物的逸出功

单位: eV

金属或金属氧化物	逸出功
铝	1.8
银	3.1
铂	3.6
铜	3.9
铁	3.9
氧化钡	1.0
氧化铜	5.34

金属表面游离所需能量可以从下述途径获得:

①正离子碰撞阴极 正离子在电场中向阴极运动,碰撞阴极时将其能量传递给电子而使金属表面逸出两个电子,其中一个与正离子结合而合成中性质点,另一个才可能成为自由电子。

②光电效应 金属表面受到光的照射,也能产生表面游离。

③强场发射 在阴极附近加上很强的外电场,其电场强度达 10^6 V/cm ,将电子从阴极表面拉出来,称为强场发射或冷发射。

④热电子发射 将金属电极加热到很高的温度,可使其中电子获得巨大能量,逸出金属。在电子、离子器件中常利用热电子发射作为电子来源,在强电领域,对某些电弧放电的过程有重要作用。

对于工程上常见的气体间隙的击穿来说,起主要作用的是正离子碰撞阴极的表面游离和光电效应。

需要说明的是:①不管是什么形式的游离方式,要在气体中产生自由电子,都应使气体外层电子或金属表面电子获得足够能量,以克服原子核的吸引力,且每次满足条件的碰撞不一定都能产生游离过程。②在气体质点相互碰撞中,还会产生带负电的负离子,这是由于自由电子和气体分子碰撞时,被气体分子吸附而形成负离子。负离子的形成虽然未减少带电质点的数目,但其游离能力比自由电子小得多。因此,负离子的形成对气体放电的发展是不利的,有助于气体抗电强度的提高。

(2) 气体中带电质点的消失

在气体中产生带电质点的同时,也存在着带电质点的消失过程。带电质点的消失主要有以下3种方式:

1) 带电质点在电场作用下作定向运动,流入电极,中和电荷。

2) 带电质点从高浓度区域向低浓度区域扩散。这是由于质点的热运动造成的,电子由于体积、质量远小于离子,因而电子扩散比离子扩散快得多。

3) 带电质点的复合。带正、负电荷的质点相遇,发生电荷的传递、中和而还原成中性质点的过程,称为复合。正、负离子的复合远比正离子与自由电子的复合容易得多,参加复合的电子大多数是先形成负离子后再与正离子复合的。在复合过程中,质点原先在游离时所吸取的能量以光子的形式释放出来。异号质点的浓度愈大,复合愈强烈。因此,强烈的游离区通常也是强烈的复合区,同时伴随着强烈的光辐射,这个区的光亮度也就愈大。

气体中存在游离过程,也就存在复合过程。在电场作用下,气体间隙是发展成击穿还是保持其绝缘能力,取决于气体中带电质点的产生与消失。如果带电质点的产生占主要地位,气体间隙中的带电质点数目就增加,放电就能发展下去成为击穿;如果带电质点的消失占主要地位,气体间隙中带电质点数目就减少,放电就会逐渐停止,气隙尚能起绝缘作用。游离放电进一步发展和转变成气隙的击穿将随电场情况不同而异。

1.1.2 汤逊理论和巴申定律

对均匀电场气隙的击穿,可用汤逊理论来描述,这是在20世纪初英国物理学家汤逊(J. S. TOWNSEND)在大量实验的基础上总结出来的。

如图1.1(a)所示,表示一个低气压下电介质为空气的平板电极。紫外线光源通过石英窗口照射到阴极板上,使之发射出光电子,一定强度的光照射所产生的光电子是一个常数。当在极板间加上可变直流电压后,极板间空气间隙的伏安特性如图1.1(b)所示。在 Oa 段,电流随电压升高而增大,这是因为一定强度的光照射所产生的光电子是一个常数,随着电压升高,间隙中带电质点运动速度加大,单位时间内通过所观察面的电子数增多,电流随电压的增加呈线性关系。当电压升到一定值 U_0 后,电流趋于饱和,这是因为光照射产生的光电子是一个常数的关系,故电流仍取决于外界游离因素(紫外线光照射),而和电压无关,这时气隙仍能良好绝缘。当电压继续升高到 U_0 时,又出现了电流随电压升高而迅速增大,这时气隙中必然出现了

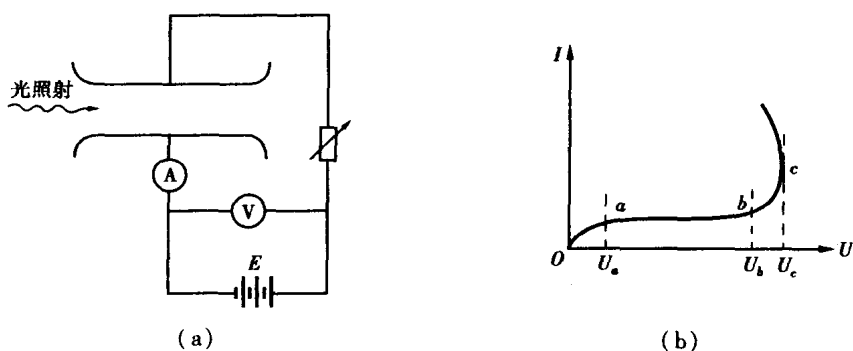


图 1.1 气体间隙放电实验原理图及其伏安特性

(a) 实验原理图; (b) 气隙中的伏安特性

新的游离因素。此因素是电子在电场作用下,已积累起足以引起游离的能量,当它与气体分子碰撞时,产生游离,即电子碰撞游离。

设在外部游离因素光照射下产生的一个电子,在电场作用下,这个电子在向阳极作定向运动时不断引起碰撞游离,气体质点游离后新产生的电子和原有电子一起,又从电场获得能量继续沿电场方向运动,引起游离。这样下去,电子数就像雪崩似地增加,形成电子崩,如图 1.2 所示。电子崩的出现,使气隙中带电极点数大增,故电流也大大增加了。

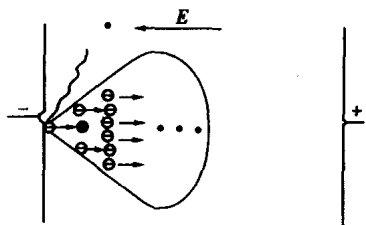


图 1.2 电子崩形成示意图

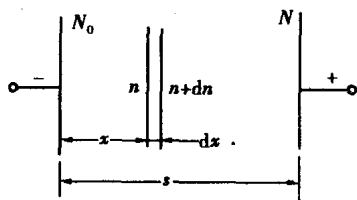


图 1.3 电子崩内电子数的计算图

为寻求电子崩的发展规律,以 α 表示电子的空间碰撞游离系数,它表示一个电子在电场作用下由阴极向阳极移动单位距离所发生的碰撞游离数。 α 的数值与气体的性质、气体的相对密度和电场强度有关。当温度一定时,根据实验和理论推导可知

$$\alpha = Ape^{-BP/E} \quad (1.3)$$

式中 A, B ——与气体性质有关的常数;

P ——大气压力;

E ——电场强度。

如图 1.3 所示,设一个电子沿电场方向行径 1cm 时与气体质点发生碰撞游离而产生出的平均电子数为 α 。在外界游离因素光照射下,从阴极出发的 N_0 个电子,在电场的作用下,获得能量,引起碰撞游离。当到达距阴极 x 处的横截面上,单位时间内单位面积内有 n 个电子飞过。这 n 个电子行过 dx 之后,又会增加 dn 个新电子,其数目为:

$$dn = \alpha n dx$$

移项得

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (1.1)$$

两边同时积分

$$\int_{N_0}^{N_x} \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha dx$$

当 $x=0$ 时, $n=N_0$ 。则

$$N_x = N_0 \exp \int_0^x \alpha dx$$

在均匀电场中, α 是一个常数, 则

$$N_x = N_0 \exp \int_0^x \alpha dx = N_0 e^{\alpha x}$$

当 $x=s$ 时, 为到达阳极板的电子数:

$$N = N_0 e^{\alpha s} \quad (1.2)$$

此式表明: ① 当一个电子从阴极出发即 $N_0=1$, 行经整个间隙距离 s 后, 由于产生碰撞游离, 最终到达阳极的电子总数扣除它本身, 新产生出的电子数是 $(e^{\alpha s} - 1)$ 个, 并同时产生了同 $(e^{\alpha s} - 1)$ 一样多的正离子。由于电子的运动速度比正离子的快得多, 因此当全部电子进入阳极后, 在气隙中遗留下了 $(e^{\alpha s} - 1)$ 个正离子。这样可解释在图 1.1(b) 中电压过 U_0 后随着电压的升高, 电流增加的原因。② 当外界游离因素消失, $N_0=0$ 时, $N=0$, 即只有碰撞游离因素 (α 过程), 不能维持放电发展。这种需要依靠外界游离因素支持的放电称为非自持放电。

当电压继续升高到达 U_0 后, 电流急剧突增, 气隙转入良好的导电状态, 并伴随着有明显的亮、声、热等现象。这说明此时间隙的放电又有了新的特点。当间隙上所加电压增到 U_0 时, 由于强烈的游离将同时产生很多正离子。依上所述, 一个电子行经 s 距离所产生的正离子数为 $(e^{\alpha s} - 1)$ 个, 这些正离子到达阴极时, 使阴极表面游离出新的电子。这些新电子将会在电场作用下向阳极运动, 又产生电子崩, 重复上面的过程。设一个正离子撞击阴极产生出的自由电子数为 γ ($\gamma \ll 1$), γ 称为正离子的表面游离系数, 则 $(e^{\alpha s} - 1)$ 个正离子撞击阴极产生的电子数为: $\gamma(e^{\alpha s} - 1)$ 。只要 $\gamma(e^{\alpha s} - 1) \geq 1$, 即阴极表面至少逸出一个电子, 则即使外界游离因素不复存在, 气隙中游离过程也能继续下去。这种只依靠电场就能维持下去的放电称为自持放电。放电进入自持阶段, 并最终导致击穿。由此, 均匀电场中由非自持放电转为自持放电的条件为:

$$\gamma(e^{\alpha s} - 1) \geq 1 \quad (1.4)$$

因为 $e^{\alpha s} \gg 1$, 则上式可简化为: $\gamma e^{\alpha s} \geq 1$ 。

此式具有清楚的物理意义。由于偶然因素而产生的一个电子从阴极出发在间隙中引起强烈游离, 游离出的全部正离子 $(e^{\alpha s} - 1)$ 达到阴极能由 γ 过程在阴极表面上至少逸出一个电子, 放电转入自持放电。

由非自持放电转入自持放电的电压称为起始放电电压 U_0 。对均匀电场, 则气隙被击穿, 此后可形成辉光放电或火花放电或电弧放电, 起始放电电压 U_0 就是气隙的击穿电压 U_b 。对不均匀电场, 则在大曲率电极周围电场集中的区域发生电晕放电, 而击穿电压 U_b 比起始放电电压 U_0 可能高很多。

以上描述均匀电场气隙的击穿放电的理论称为汤逊理论。由式(1.4)可以推得自持放电时的放电电压

$$U_b = \frac{Bps}{\ln \left[\frac{Aps}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]} = f(ps) \quad (1.5)$$

即当气体和电极材料一定时, 气隙的击穿电压是气压 p 与间隙距离 s 乘积的函数。这个关系

在汤逊理论提出之前就已为巴申(Paschen)从实验中总结出来,故称为巴申定律。巴申定律为汤逊理论奠定了实验基础,而汤逊理论为巴申定律提供了理论依据。图 1.4 为几种气体击穿电压与 ps 的实验结果。

式(1.5)还可写成下面形式

$$U_b = f(\delta \cdot s) \quad (1.6)$$

式中 δ ——气体相对密度,指气体密度与标准大气条件($P_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 293 \text{ K}$)下的密度之比。

这是巴申定律更普遍的形式。由此,可知气体的击穿电压除和气体种类有关外还与气体的状态有关。图 1.4 表明,随着 ps 的变化,击穿电压将出现最小值。曲线中的最小击穿电压与式(1.5)中的最小值相对应。

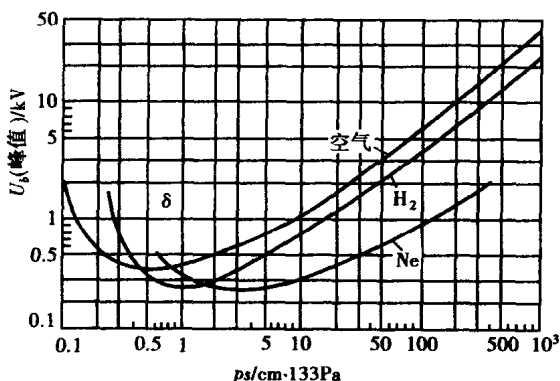


图 1.4 均匀电场中几种气体击穿电压 U_b 与 ps 的关系

击穿电压 U_b 存在最小值是因为,当 s 一定时,改变气体气压 p , p 增大, δ 随之而增大,电子在运动过程中易与气体分子相碰撞,两次碰撞之间走过的路径(自由行程)很小。虽然碰撞次数增多,但电子积累的能量不足以引起气体分子发生游离,因而击穿电压升高;反之, p 减小, δ 随之而减小,电子在运动中碰撞次数减少,击穿电压也升高。当 p 一定时,改变 s , 也将改变击穿电压。增大 s , 必然要升高电压才能维持足够的电场强度,使间隙击穿;反之,减小 s , 而 s 太短时,则电子由阴极运动到阳极时,碰撞次数太少,击穿电压也会升高。

1.1.3 流注理论

汤逊理论是在低气压 ps 值较小条件下进行的放电实验基础上总结出来的,对低气压下小间隙的放电现象能作出很好的解释,但对于大气压的放电现象就不再适用。表现在以下 3 个方面:首先,在放电时间上,根据汤逊理论,间隙完成击穿的时间包括形成电子崩及正离子到达阴极生成二次电子的时间,在大气压下气体的放电实际时间为以上数值的 $1/10 \sim 1/100$;其次,在放电外形上,按汤逊理论放电是均匀连续地发展,充满整个间隙,但在大气压下,放电存在着明显分枝的明亮槽道式通道;第三,在击穿电压上,按汤逊理论, U_b 与阴极材料有明显关系,在低气压下,选择适当的 γ 值, U_b 的计算值与实测值基本一致,而在大气压下 U_b 与阴极材料无关,如选用同一 γ 值,其计算值与实测值相差甚远。可见,汤逊理论只适用于一定的 ps 范围。通常认为,空气中 $ps > 200 (\text{cm} \cdot 133 \text{ Pa})$ 后,击穿过程将发生变化,不能再用汤逊理论来说明。

工程上感兴趣的是在大气压下的气隙的击穿,用汤逊理论不能很好地解释。在汤逊以后,由 Leob 和 Week 等在实验的基础上建立起来的流注理论,能够弥补汤逊理论的不足,较好地解释了这些现象。

流注理论认为电子的碰撞游离和空间光游离是形成自持放电的主要因素,并且强调了空