

高电压绝缘

朱德恒 严璋 主编

清华大学出版社

内 容 提 要

本书研究高电压下的电气绝缘问题。主要叙述：气体击穿过程的基本理论；气体间隙绝缘和气体中的沿面绝缘（高压绝缘子）；液体及固体电介质的电气性能和主要高压电力设备（如电容器、电缆、套管、互感器、变压器、高压电机等）的绝缘结构；高压电力设备的绝缘试验。

本书系高等学校《高电压技术及设备》专业的教材，并可供电力系统、电气设备制造业及技术物理等部门的高电压工作者参考，也可作为高等学校其它专业学习《高电压工程》课时的参考书。

(京) 新登字 158 号

高 电 压 绝 缘

朱德恒 严 璋 主编

☆

清华大学出版社出版

(北京 清华园)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：18.75 字数：445千字

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

印数：0001—6000

ISBN 7-302-00913-9/TN·30

定价：5.25元

前 言

本书是根据 1988 年 5 月在武汉召开的能源部高等学校电力工程专业教学委员会第一次全体会议通过的教学大纲编写的。

本书由清华大学和西安交通大学有关教师合作编写，是在总结两校高电压技术教研室多年讲授《高电压绝缘》等课程的教学经验的基础上编写的。1980 年，两校教师根据 1978 年 5 月在杭州召开的全国《高电压技术及设备》专业教学计划及教材编审规划会议通过的教学大纲编写过同名教材（电力工业出版社，1980 年 12 月）。该书出版至今已有 10 年，在这期间，积累了新的教学经验，科学技术也有了新的发展，因此有必要重新编写。重编过程中，本着加强理论基础，突出重点，适当更新内容的原则，调整了部分章节并相应压缩了篇幅。删去了原书中“高电压绝缘技术中的静电场”一章，而将其部分内容穿插到有关各章；对“六氟化硫气体绝缘”则增补了许多新内容，重新改写；原由蒋国雄教授编写的“绝缘预防性试验”则由冯允平作了修改增补，改写为“绝缘试验”，并由严璋增写了在线监测的内容；对其它各章也都根据教学要求及科技的发展作了删减及增补；还增加了练习题。

全书现分九章。第一章至第四章叙述气体击穿过程的基本理论，气体间隙绝缘和气体中的沿面绝缘（高压绝缘子）；第五章至第八章叙述液体及固体电介质的电气性能和主要高压电力设备（如电容器、电缆、套管、互感器、变压器、高压电机等）的绝缘结构；第九章叙述高压电力设备的绝缘试验。

本书编写分工如下：清华大学朱德恒、谈克雄编写绪论；朱德恒编写第一章和第三章；薛家麒、谈克雄编写第二章；谈克雄、王昌长编写第四章。西安交通大学冯允平编写第五章和第九章（除第七节外）；严璋编写第六章至第八章和第九章第七节。本书由朱德恒和严璋主编。清华大学张仁豫教授审阅了本书，并提出不少宝贵意见，作者谨致以深切的谢意。

限于我们的水平，书中不妥之处可能不少，恳切希望读者批评指正。

编者

1990 年 11 月

目 录

绪论	(1)
第一章 气体击穿的理论分析和试验数据	(7)
第一节 气体放电主要形式简介	(7)
第二节 带电质点的产生——气体分子的电离和金属的表面电离	(9)
第三节 带电质点的消失	(16)
第四节 均匀电场中气体击穿的发展过程	(19)
第五节 不均匀电场中气体击穿的发展过程	(34)
第六节 持续作用电压下空气的击穿电压	(51)
第七节 雷电冲击电压下空气的击穿电压及伏秒特性	(60)
第八节 操作冲击电压下空气的击穿电压	(67)
第九节 提高气体间隙击穿电压的措施	(71)
第二章 气体中的沿面放电和高压绝缘子	(83)
第一节 绝缘子的性能要求和材料	(83)
第二节 气体中沿固体介质表面的放电	(86)
第三节 支柱绝缘子	(93)
第四节 棒形绝缘子的计算	(96)
第五节 瓷套管	(100)
第六节 线路绝缘子	(102)
第七节 介质表面脏污时的沿面放电和污秽地区绝缘	(107)
第三章 高压输变电设备的外绝缘	(116)
第一节 大气状态对外绝缘放电电压的影响	(116)
第二节 海拔高度对外绝缘放电电压的影响	(119)
第三节 工频电压下高压输变电设备外绝缘的放电电压	(120)
第四节 操作冲击电压下高压输变电设备外绝缘的放电电压	(125)
第五节 雷电冲击电压下高压输变电设备外绝缘的放电电压	(132)
第四章 六氟化硫气体绝缘	(136)
第一节 引言	(136)
第二节 均匀及稍不均匀电场中六氟化硫的击穿	(139)
第三节 极不均匀电场中六氟化硫的击穿	(149)
第四节 六氟化硫气体的冲击击穿特性	(153)
第五节 六氟化硫气体中沿固体介质表面的放电	(155)
第六节 含六氟化硫的混合气体	(159)

第五章 液体、固体电介质的电气性能.....	(164)
第一节 液体、固体电介质的极化、电导与损耗.....	(164)
第二节 液体电介质的击穿.....	(179)
第三节 固体电介质的击穿.....	(186)
第四节 电介质的其它性能.....	(196)
第六章 电力电容器和电力电缆绝缘.....	(200)
第一节 电力电容器.....	(200)
第二节 电力电缆.....	(207)
第七章 高压套管和高压电流互感器绝缘.....	(218)
第一节 高压套管.....	(218)
第二节 高压电流互感器绝缘.....	(228)
第八章 变压器和高压电机绝缘.....	(232)
第一节 电力变压器绝缘.....	(232)
第二节 高压电机绝缘.....	(248)
第九章 绝缘试验.....	(256)
第一节 绝缘电阻测量.....	(257)
第二节 介质损失角正切值 ($\text{tg } \delta$) 的测量.....	(262)
第三节 电压分布的测量.....	(273)
第四节 局部放电测量.....	(274)
第五节 绝缘油的电气试验和气相色谱分析.....	(275)
第六节 耐压试验.....	(277)
第七节 绝缘在线监测.....	(283)
习题.....	(288)
参考书.....	(294)

绪 论

一、高电压绝缘的研究对象

《高电压绝缘》课程是研究高电压下的电气绝缘问题。绝缘的作用是将电位不等的导体分隔开,使导体没有电气连接^①,从而能保持不同的电位,所以绝缘是电气设备结构中的重要组成部分。具有绝缘作用的材料称为绝缘材料(电介质),电气设备的绝缘就是由各种绝缘材料构成的。

随着国民经济的发展,用电量不断上升,输电距离不断增加,因而电力系统工作电压不断提高。由于电力系统工作电压的提高,有关电气设备绝缘的问题就越来越突出。因为作用于绝缘上的电压超过某临界值时,绝缘将破坏而失去绝缘作用。随着工作电压提高,电气设备中绝缘材料越用越多,绝缘的费用在设备成本中所占比例越来越高,设备的体积和重量也越来越大。如果不采用新的措施,设备的绝缘甚至无法构成。绝缘通常还是电气设备中的薄弱环节,电力系统事故中很大一部分就是由于设备绝缘破坏所造成的。因此,如何采用先进技术,既经济合理而又安全可靠地解决电力系统中的绝缘问题就变得十分重要了(在其它一些科学部门中,也采用着极高电压的设备,同样也存在着绝缘问题)。

电力系统正常运行时,电气设备绝缘是长期处在工作电压作用之下的。但是,由于各种原因,电力系统中的电压有时会出现短时升高的现象,即产生过电压。过电压可分为两大类:一类是由于设备遭受雷击造成的或在设备附近发生雷击而感应产生的过电压,称为雷电过电压;另一类是由于电力系统中的操作及发生事故或发生谐振而引起的过电压,称为内过电压。过电压的作用时间虽然很短,但过电压的数值却大大超过正常工作电压,因而易造成绝缘的破坏。所以,设备绝缘除应能耐受工作电压的持续作用外,还必须能耐受过电压的作用。为了电气设备安全可靠地运行,除应搞清楚过电压的数值、波形等参数并设法降低或限制作用于设备上的过电压的数值外,还要保证及提高绝缘本身的耐受电压,这两个方面就构成了高电压技术的主要内容。关于降低及限制过电压的问题将在《电力系统过电压》课程中讲授,如何保证及提高设备绝缘的耐受电压,设计出先进的绝缘结构则是本课程所讨论的内容。

为了设计出技术先进、经济合理而又安全可靠的绝缘结构,首先必须掌握各类绝缘材料在电场作用下的电气物理性能,绝缘材料在强电场中的击穿特性及其规律尤为重要。只有知道了绝缘材料本身耐受电压的规律之后,才能进行绝缘的设计(考虑绝缘结构、选择绝缘距离或绝缘厚度等)。其次,绝缘的破坏决定于作用在其上的电场强度,在满足电

^① 绝对不导电的绝缘材料是没有的。但绝缘材料的电阻率十分高($10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$),在一般电场作用下,通过其中的泄漏电流极小,通常可以忽略不计,从而能起到绝缘作用。

气设备基本要求的前提下，应设法改善绝缘结构，使其电场分布尽可能地均匀，以减小电场强度。此外，还可采用新型绝缘材料，改进制造工艺以提高绝缘的电气强度。采用新型绝缘材料常会导致绝缘结构的重大变革，带来巨大的经济、技术效益。电气设备绝缘就是随着工作电压提高，通过不断改善绝缘结构，采用更好的绝缘材料和更先进的制造工艺而得到发展的。

为了保证设备绝缘能安全可靠运行，还应该定期地对绝缘进行预防性检查，防患于未然。

因此，本课程的研究对象是：

- (1) 电介质的电气物理特性，特别是电介质的击穿过程及其基本规律；
- (2) 一些主要的高压电力设备的典型绝缘结构，它们的构成原则及设计计算方法；
- (3) 监视及判断绝缘质量的主要试验方法。

二、对高压电气设备绝缘的基本要求

如上所述，电气设备的造价和运行的可靠性在很大程度上取决于电气设备的绝缘，当设备电压等级增高时，则更是如此。高压设备能否安全运行是由矛盾的两个方面——作用在设备绝缘上的电压和绝缘本身耐受电压的能力——决定的。作用在绝缘上的电压的破坏作用小于绝缘耐受电压的能力时，设备能安全运行；反之，设备绝缘就会受到破坏。但是在研究设备绝缘时，除了考虑电压的作用外，还应分析机械力、温度和大气环境长期侵蚀等因素对绝缘耐受电压的能力的影响。如果忽视这些因素，那么在一定条件下，它们会转化为破坏绝缘的主要因素。因此，在考虑设备的绝缘时，必须了解设备在运行中的全面情况，这样才能对绝缘提出合理的要求。要求过高会使设备造价增加，要求过低则使设备运行不可靠。下面将从机械力、温度和化学稳定性等方面简述高压设备绝缘的工作条件和对绝缘的基本要求，对电气性能的要求则在“高压设备的绝缘水平和试验电压”一节中讨论。

1. 机械性能的要求 高压设备的绝缘在承受电场作用的同时还可能受到外界的机械负荷和电动力或机械振动等的作用。例如，悬式线路绝缘子需经常承受导线拉力的作用；隔离开关的支柱绝缘子在分合闸时，需承受扭转力矩的作用；变压器线圈在电力系统发生短路时，需承受很大的电动力的作用等。机械力的作用可能造成绝缘局部损坏（如产生裂纹），使绝缘的电气强度大大降低，最终导致绝缘击穿。有些绝缘体在设备中同时起着机械支持作用（如线路绝缘子、支柱绝缘子等），如果绝缘体破碎，电气设备也就解体而损坏，这可能在电力系统中造成巨大事故。因此，在选择绝缘时必须考虑机械负荷的作用。

2. 温度和热稳定性的要求 绝缘材料都有确定的耐热能力，温度过高会引起热击穿，导致绝缘能力丧失。例如，电力电容器运行通风不好，而绝缘的介质损耗较大时，就有可能发生热击穿。

通常有机绝缘材料（如变压器油、油纸绝缘等）在高温下很容易氧化和分解，绝缘性能劣化。因此，给绝缘规定了一定的工作温度，在工作温度下绝缘材料中的老化过程不应发展太快，以便保证有足够的寿命。

绝缘结构中的绝缘材料常常是和金属材料紧密结合在一起的，由于两者的热膨胀系数往往相差很大，当温度变化时，绝缘材料内部就会产生很大的应力。例如，因气候的变化，运行中绝缘子的温度可能发生剧变，从而产生很大的内应力使瓷件开裂，而引起绝缘子击穿。为此，要求绝缘应能承受温度的变化。

3. 化学稳定性 在户外工作的绝缘应能长期耐受日照、风砂、雨雾冰雪等大气因素的侵蚀。在高原工作的设备，必须考虑气压、温度、湿度的改变对绝缘产生的影响。在特殊条件下工作的设备，例如在含有化学腐蚀气体的环境或在湿热环境工作的设备，则应根据具体情况，保证绝缘对各种有害因素有足够的耐受能力。总之，对绝缘应要求有足够的化学稳定性。

三、高压设备的绝缘水平和试验电压

高压设备绝缘能否安全可靠地运行，起主要作用的是其耐受电压的能力。各种额定电压等级的设备的绝缘都需要具有相应的耐受电压的能力。设备绝缘耐受电压能力的大小称为绝缘水平。电气设备的绝缘水平应保证绝缘在最大工作电压的持续作用下和过电压的短时作用下都能安全运行。

在工作电压的持续作用下，绝缘会产生老化（性能逐渐劣化）过程，最终导致绝缘破坏。所以工作电压常常是决定绝缘使用寿命的主要条件。长期作用在高压设备上的电压不得高于其最大工作电压。如上所述，电力系统中还可能产生各种过电压。为了检验绝缘在雷电过电压作用下能否安全运行，采用雷电冲击电压模拟雷电过电压进行试验，以判断绝缘的雷电冲击绝缘水平。电力系统中都装有限制过电压的保护设备如阀型避雷器等，因此电气设备绝缘的雷电冲击绝缘水平以及其相应的雷电冲击耐受电压是和阀型避雷器的保护特性紧密联系的，改进避雷器的性能可以降低所需冲击绝缘水平。为了检验绝缘在内过电压作用下运行的可靠性，通常用短时工频电压等效地来进行试验，判断其绝缘水平的高低。各种设备的一分钟工频耐受电压就是根据电力系统中内过电压的大小制定的。影响绝缘的电气强度的因素很复杂，绝缘在内过电压作用下的电气强度和工频电气强度之间难以得到准确的折合关系。对于超高压和特高压电压等级，这个矛盾尤其突出。所以对于 330kV 及以上的设备，在工频运行电压、暂时过电压（持续时间较长、频率较低的内过电压如谐振过电压、工频电压升高）下的绝缘性能以及在操作过电压（由于操作过程引起的内过电压）下的性能需用不同类型的试验予以检验。在工频运行电压及暂时过电压下设备绝缘对老化或对污秽的适应性宜用长时间工频试验检验。在操作过电压下设备的绝缘性能用操作冲击试验检验。

国家标准 GB311.1-83《高压输变电设备的绝缘配合》规定了各种设备的额定电压、最高工作电压以及各种类型的试验电压，见表 1~3。表中所列外部绝缘适用于标准大气条件（气压为 0.1013MPa，温度为 20℃，绝对湿度为 11g/m³），海拔高度不超过 1000m。如果试验时大气条件和标准大气条件不符，或设备使用地点的海拔超过 1000m，应对试验电压进行校准。

高压设备的试验电压是设计其绝缘的主要依据。

表 1 3~500kV 输变电设备的雷电冲击耐受电压

单位: kV

额定电压 (有效值)	最高工作 电压 (有效值)	标准雷电冲击全波(内、外绝缘) (峰值)						标准雷电 冲击截波 (峰值)
		变压器	并联 电抗器	耦合电容 器、电压 互感器	高压电 力电缆	高压电器	母线支柱 绝缘子、 穿墙套管	变压器类 设备的 内绝缘
3	3.5	40	40	40	—	40	40	45
6	6.9	60	60	60	—	60	60	65
10	11.5	75	75	75	—	75	75	85
15	17.5	105	105	105	105	105	105	115
20	23.0	125	125	125	125	125	125	140
35	40.5	185/200*	185/200*	185/200*	200	185	185	220
63	69.0	325	325	325	325	325	325	360
110	126.0	450/480*	450/480*	450/480*	450 550	450	450	530
220	252.0	850		850	850	850	850	935
		950	950	950	1050	950	950	1050
330	363.0	1050		1175	1050	1050	1050	1175
		1175	1175	1300	1175	1175	1175	1300
500	550.0	1425	1550	1550	1425	1425	1425	1550
			1610		1550	1550	1550	
		1550	1675	1675	1675	1675	1675	1675

注:① 带“*”的数值仅用于变压器类设备的内绝缘。

② 对高压电力电缆,是指在热状态下的耐受电压值。其雷电冲击耐受电压值应不超过相应电压等级中所列最高值。如需要更高的绝缘水平,可用更高电压等级的电缆。

③ 对应于 220kV 变压器耐受电压为 950kV 的高压电器的冲击耐压值,对老型号产品可取为 850kV,但对本标准颁发后改型的产品,必须取 950kV。

④ 目前 220kV 电磁式电压互感器主要采用 950kV 的水平。

表 2 3~500kV 输变电设备的一分钟工频耐受电压(有效值)

单位:kV

额定电压	最高工作电压	内、外绝缘(干试与湿试)				母线支柱绝缘子	
		变压器	并联电抗器	耦合电容器、高压电抗器、电压互感器和穿墙套管	高压电力电缆	湿试	干试
3	3.5	18	18	18	—	18	25
6	6.9	23/25	23/25	23	—	23	32
10	11.5	30/35	30/35	30	—	30	42
15	17.5	40/45	40/45	40	40/45	40	57
20	23.0	50/55	50/55	50	50/55	50	68
35	40.5	80/85	80/85	80	80/85	80	100
63	69.0	140	140	140	140	140	165
110	126.0	185/200	185/200	185/200*	185/200	200	265
220	252.0	360	395	360	360	360	450
		395		395	460	395	
330	363.0	460	510	460	460	—	—
		510		510	570		
500	550.0	630	680	630	630	—	—
		680		680	740		

注:① 斜线上的数值适用于该类设备的外绝缘。斜线下的数值适用于该类设备的内绝缘。

② 带“*”的数值仅用于电磁式电压互感器的内绝缘。

表 3 330~500kV 输变电设备的操作冲击耐受电压

单位:kV

额定电压	最高工作电压	内、外绝缘(干试与湿试)(峰值)	
		母线支柱绝缘子	本标准中除母线支柱绝缘子外,其他所有设备
(有效值)		850	850
		950	950
330	363	1175	1050
		1240	1175

注: 电缆的操作冲击试验在热状态下进行。500kV 并联电抗器要采用保护水平能够配合的避雷器。

四、高压设备绝缘的设计步骤

1. 选择绝缘结构类型和材料 绝缘是整个电气设备的一部分。选择绝缘结构时,应了解设备的整体要求和设备的工作条件,全面分析电、磁、机械、热以及其它有关方面的要求。分析生产实践的经验是很重要的一个环节。经过调查研究,比较各种结构的优缺点,才能合理地安排绝缘结构。

选择绝缘结构时,还应该考虑材料来源、加工工艺和设备的造价。应该尽量采用来源丰富的材料和先进的工艺,以提高生产率、降低造价。

选择绝缘结构时,还应该考虑工人的劳动条件。

2. 确定各部分绝缘承受电压的波形及幅值 按照试验电压标准及设备结构,通过计算或根据同类型结构的实测结果来确定各个有损坏可能的绝缘部位,以及它们可能受到的电压。在此基础上才能合理安排结构尺寸,保证设备不致因绝缘击穿而损坏。

3. 决定结构尺寸 确定了各个有损坏可能的绝缘部位以及它们可能受到的电压以后,根据相应条件(电压种类、电场分布和材料工艺等)下的电气强度数据,考虑一定的裕度,就可决定绝缘结构的尺寸。

电气强度的数据,可从已有的各种试验结果和手册选取。这时必须注意到材料规格和质量的不同,加工工艺的不同,电场情况的不同都将引起电气强度的变化,有些情况下这种变化将是很大的。由于产品品种的不同,工厂制造工艺的变化,从设计手册上有时可能找不到现成的数据,则可以根据生产实践,安排适当的试验,总结规律,取得所需要的设计数据。

4. 机械性能和热性能的校核 设备的绝缘在满足电性能要求的同时,还必须校核其机械性能及热性能。如果这些方面的要求不能满足,就必须改变尺寸或结构。

上面所述步骤不是一成不变的,可因具体情况而异。

5. 试制、试验、修改、定型 产品的初步设计是否正确,必须通过实践来检验。通常是先试制出少量样件,对样件进行各种试验,根据试验结果修改设计。这种过程,有时可能需要反复多次,才能使产品性能全面满足要求,然后就可定型生产了。

第一章 气体击穿的理论分析和试验数据

电力系统和电气设备中常用气体作为绝缘介质。例如带电导体裸露于空气中就是利用了空气的绝缘性能。但是，当电场强度达到一定数值后，气体会失去绝缘能力，从而造成事故。为了能正确构成气体绝缘，就需要了解气体中的放电过程。本章将着重介绍气体击穿的一些理论分析，如带电质点的产生、运动和消失的规律以及气体击穿过程的发展等。对气体放电过程的研究也有助于阐明固体及液体电介质中的放电过程。

气体绝缘的任务主要是如何选择绝缘距离以及如何提高气体间隙的击穿电压。气体击穿电压和电场分布、电压种类以及气体状态等很多因素有关。由于气体放电理论现在还很不完善，实际上还无法对击穿电压准确地进行理论计算。工程设计问题常借助于种种实验规律来分析解决，或直接靠试验决定。因此本章还将介绍各种典型电极击穿电压的试验数据以及击穿电压和各种影响因素间的实验规律。

第一节 气体放电主要形式简介

气体中流通电流的各种形式统称为气体放电。

处于正常状态并隔绝各种外电离因素作用的气体是完全不导电的。由于来自空中的紫外线、宇宙射线及来自地球内部辐射线的作用，通常，气体中总存在少量带电质点。例如大气中每立方厘米就总是存在约 1000 对正、负离子（气体分子带电后称为离子，根据带正电或带负电而相应称为正离子或负离子）。在电场作用下，这些带电质点沿电场方向运动造成电导电流，所以气体通常并不是理想绝缘介质。但当电场较弱时，由于带电质点极少，气体的电导也极小，仍为优良的绝缘体。

当提高气体间隙上的电压而达一定数值后，电流突然剧增，从而气体失去绝缘性能。气体这种由绝缘状态突变为良导电状态的过程，称为击穿。当击穿过程发生在气体与液体或气体与固体的交界面上时，称为沿面闪络（击穿和闪络有时笼统地称为放电）。气体中发生击穿及闪络时除电导突增外，通常还伴随有发光及发声等现象。发生击穿或闪络的最低临界电压称为击穿电压 U_i 或闪络电压 U_f （击穿电压或闪络电压有时也笼统地称为放电电压）。均匀电场中击穿电压与间隙距离之比称为击穿场强 E_b ，它反映了气体耐受电场作用的能力，故也就是气体的电气强度。不均匀电场中击穿电压与间隙距离之比称为平均击穿场强，这是和电场分布有关而决定于具体结构的量，可用来衡量该电极结构利用气体绝缘能力的程度。

根据气体压力、电源功率、电极形状等因素的不同，击穿后气体放电可具有多种不同形式。利用图 1-1 所示放电管可以观察放电现象的变化。

当气体压力不大，电源功率很小（放电回路中串入很大阻抗）时，外施电压增到一定值后，回路中电流突增至明显数值，管内阴极和阳极间整个空间忽然出现发光现象。这

种放电形式称为辉光放电。它的特点是放电电流密度较小，放电区域通常占据了整个电极间的空间。霓虹管中的放电就是辉光放电的例子。管中所充气体不同，发光颜色也不同。减小外回路中的阻抗，则电流增大。电流增大到一定值后，放电通道收细，且越来越明亮，管端电压则更加降低，说明通道的电导越来越大。这种放电形式称为电弧放电。

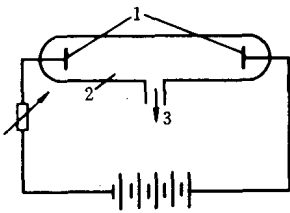


图 1-1 气体放电管示意图
1—电极； 2—放电管；
3—接真空泵

我们更关心的是大气条件下的放电。如图 1-1 所示，当增加放电管中的气压时，放电通道逐渐收细，放电不再占满整个电极间的空间。在较高气压（例如大气压力）下，击穿后总是形成收细的发光放电通道，而不再扩散于间隙中的整个空间。当外回路中阻抗很大，限制了放电电流时，电极间

出现贯通两极的断续的明亮细火花，称为火花放电^①。火花间断的原因是：间隙击穿后形成火花，电流突增，结果外回路中阻抗上压降增加，导致放电间隙上电压降低，以致火花不能维持而熄灭；火花熄灭后，回路中电流减小，回路阻抗上压降又降低，放电间隙上电压重又增加，使间隙重又击穿而再形成火花；如此周而复始，形成断续的火花放电。如外回路阻抗很小，即电源功率足够大，则间隙击穿后可立即转入电弧放电，形成明亮而电导极大的放电通道。电弧通道和电极的温度都很高，电流密度极大，电路具有短路的特征。

如果电极曲率半径和电极间距离的比值较大，即电场比较均匀，则当电压升高到一定值后，整个间隙突然击穿。反之，如果电极曲率半径很小或电极间距离很远，即电场极不均匀，则当电压升高到一定值后，首先紧贴电极在电场最强处出现发光层，回路中出现用一般仪表即可察觉的电流。随着电压升高，发光层扩大，放电电流也逐渐增大。这种放电称为电晕放电。发生电晕放电时，气体间隙的大部分尚未丧失绝缘性能，放电电流很小，间隙仍能耐受电压的作用。如电压继续升高，从电晕电极伸展出许多较明亮的细放电通道，称为刷状放电；电压再升高，最后整个间隙才被击穿，根据电源功率而转入火花放电或电弧放电（如电场比较均匀，则可能不出现刷状放电，而由电晕放电直接转入击穿）。

电气设备中经常遇到采用大气（即设备周围的空气，压力为一个大气压）作为绝缘的情况。综上所述，这时可能发生的是电晕放电、刷状放电、火花放电及电弧放电。

气体击穿后就丧失其绝缘能力，所以，我们主要讨论气体的击穿，而气体的各种放电形式（除电晕放电以外）就不去研究了。

^① 火花放电的特征是具有收细的通道形式，并且放电过程不稳定，大气中冲击电压下的放电也属于火花放电。

第二节 带电质点的产生—— 气体分子的电离和金属的表面电离

如上所述，在电场作用下气体间隙中能发生放电现象，说明其中存在大量带电质点。这些带电质点的产生及消失决定了气体中的放电现象。因此在分析气体击穿的特有规律前，先讨论在气体空间和从金属电极产生带电质点的一般规律。

一、原子的激励和电离

(一) 原子的能级

原子结构可用行星系模型描述。原子中有一带正电的核，周围有若干电子沿一定轨道绕核旋转。

原子中绕核旋转的电子具有确定的能量（位能和动能）。电子的能量不同，其轨道也各异。通常轨道半径越小，能量越小。原子中电子的能量只能取一系列不连续的确定值。原子的位能（内能）取决于其中电子的能量，即取决于原子核及电子的相互配置。当各电子具有最小的能量，即位于离原子核最近的各轨道上时，原子的位能最小。正常状态下的原子就具有最小的位能。当电子从其轨道跃迁到标志着能量更高的离原子核较远的轨道上时，原子的位能也相应增加，反之亦然（发生跃迁的通常是最外层的价电子）。因此，根据其中电子的能量状态，原子具有一系列可取的确定的能量状态，称为能级。原子的能级可用能级图表示。图 1-2 为氢原子的能级图。原子的正常状态相当于最低的能级，可人为地选它作为零值。离底线（零值）不同距离的直线对应于原子的不同能级。微观系统中的能量常采用电子伏作单位。1eV 的能量相当于电子行经 1V 电位差的电场所获得的能量。电子的电荷为 $1.6 \times 10^{-19}C$ ，所以

$$1\text{eV} = 1V \times 1.6 \times 10^{-19}C = 1.6 \times 10^{-19}J \quad (1-1)$$

(二) 原子的激励

原子通常处于正常状态。但原子在外界因素作用下，其电子可跃迁到能量较高的状态，这个过程称为激励，该原子称为激励状态的原子。高于正常状态（但低于电离能）的能级均称为激励能级。

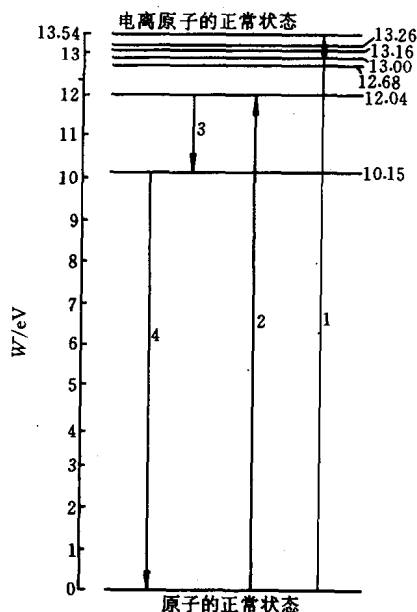


图 1-2 氢原子的能级

1—吸收能量 13.54eV 而电离；2—吸收能量 12.04eV 而激励；3—由高能级转到低能级，放出能量 1.9eV（波长 6.563nm）；4—激励原子恢复正常态，放出能量 10.15 eV（波长 1.216nm）

激励过程所需能量称为激励能 W_e 。有时为简便起见，以激励电位 U_e 来反映激励能，其数值等于以电子伏表示的激励能，即

$$U_e = \frac{W_e}{e} \quad \text{V} \quad (1-2)$$

式中 W_e —— 激励能，J；
 e —— 电子电荷，C。

最低的激励电位称为第一激励电位。表 1-1 列出了一些气体及金属蒸气的激励电位。

表 1-1 几种气体和金属蒸气的激励电位和电离电位

气体或金属蒸气	第一激励电位, U_{e1} /V	第二激励电位, U_{e2} /V	第一电离电位, U_{i1} /V	第二电离电位, U_{i2} /V
H	10.2	—	13.6	—
H ₂	11.2	—	15.4	—
N	6.3	—	14.5	29.6
N ₂	6.1	—	15.5	—
O	9.1	—	13.6	35.2
O ₂	—	—	12.2	—
He	19.8	40.6	24.6	54.1
Cs	1.38	—	3.88	23.4
CO ₂	10	—	13.7	—
H ₂ O	7.6	—	12.7	—

原子处在激励状态的平均“寿命”通常大致只有 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s 数量级，然后就自发地迅速恢复到正常状态。原子由激励状态恢复到正常状态时，将释放出数值等于激励能的能量；原子由较高激励能级 W_{e2} 跃迁至较低激励能级 W_{e1} 时也将释放出其能量差。通常都采取辐射出相应能量的光子的形式。光子（光辐射）的频率 ν 可由下式决定，即

$$W_e = h\nu \quad (1-3,a)$$

或
$$W_{e2} - W_{e1} = h\nu \quad (1-3,b)$$

式中 h —— 普朗克常数， $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 。

原子处于激励状态的平均寿命极短。然而原子也可能具有所谓亚稳激励状态，原子处于亚稳激励状态时极不容易直接恢复到正常状态（直接跃迁的概率极小），一般必须先由外界获得能量跃迁到更高能级后，才能恢复到正常状态。显然原子处于亚稳状态的平均寿命将较长，可达 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ s。

(三) 原子的电离

原子在外界因素作用下,使其一个或几个电子脱离原子核的束缚(电子离原子核很远,以致实际上和原子核已没有相互作用)而形成自由电子和正离子的过程称为原子的电离。所谓正离子就是原子失去一个或几个电子而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 (eV),也可用电离电位 U_i (V) 反映。

一般情况下,原子最外层的电子首先电离,因为它受原子核的束缚最弱。正常状态下的中性原子失去一个最外层电子从而产生一个自由电子和一个正常状态下(不是激励状态)的正离子时称为一次电离。相应的电离电位称为第一电离电位。使原子继续失去电子,显然就需要更大的能量,相应地称为二次电离及第二电离电位等等。一般情况下,气体放电中主要只涉及一次电离的过程,在表 1-1 中列出了某些气体及金属蒸气的电离电位。

原子先经过激励阶段,然后再接着发生电离的情况称为分级电离。显然这时所需外来能量小于使原子直接电离所需的能量。

二、气体中质点的自由行程

(一) 平均自由行程

气体中的分子和带电质点都处于热运动之中。气体中质点在其运动中不断发生碰撞,其轨迹为一不规则的折线,每碰撞一次就会出现一次转折,如图 1-3 所示。一个质点在

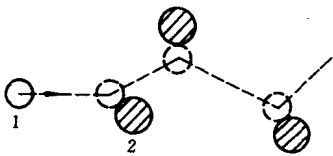


图 1-3 质点的自由行程
1—碰撞质点; 2—被碰撞质点

每两次碰撞之间自由地通过的距离称为自由行程。气体中质点运动的特点是参与的质点数目极多,每个质点的运动快慢和方向很不一样,具有统计性的特征。因而每两次碰撞间的自由行程也长短不一,具有统计性。我们引入平均自由行程 λ 的概念,将 λ 定义为质点自由行程的平均值。

在气体放电中碰撞过程是产生带电质点极重要的来源。电子在其自由行程内从外电场获得动能,如外电场足够强,则电子动能可达甚大数值,以至在和分子碰撞时能使后者分裂出自由电子。这样能不断引起电子增殖,从而导致气体间隙击穿。显然,电子从电场中获得的能量除决定于电场强度外,还和其自由行程有关。

在通常的气体放电情况下,气体中带电质点的密度较分子密度要小得多,带电质点自身相互间的碰撞可以忽略不计。所以气体中电子和离子的自由行程是它们和气体分子发生碰撞时的行程。

电子的尺寸及质量比分子的小得多。离子是分子失去电子或获得电子而形成的带电质点,所以其尺寸及质量都和分子的差不多。因为电子的尺寸小,运动中不易发生碰撞,所以电子的平均自由行程要比分子和离子的大得多。

气体分子密度 n (单位体积中分子的数目) 越大,其中质点就越容易发生碰撞,因而它们的平均自由行程也就越小。对于同一种气体,其分子密度和该气体的密度成正比,于

是可得

$$\lambda \propto \frac{T}{p} \quad (1-4)$$

即质点的平均自由行程 λ 和气体的压力 p 成反比, 和气体的绝对温度 T 成正比, 这是一个很重要的关系。

在大气压力和常温下, 空气中电子的平均自由行程在 10^{-5}cm 数量级。

(二) 自由行程的分布

如上所述, 每个质点的自由行程都长短不一, 具有统计性的规律。设质点自由行程大于 x 的概率为 $f(x)$ 。当此质点行过 x 长度后, 在其后 dx 距离内遭受碰撞的概率应为 dx/λ 。显然质点在 dx 距离内仍未发生碰撞的概率应为 $1-dx/\lambda$ 。因此质点的自由行程大于 $x+dx$ 的概率 $f(x+dx)$, 即质点在 x 的距离内及其后 dx 的距离内都不发生碰撞的概率应为 $f(x)(1-dx/\lambda)$, 或写成

$$f(x+dx) = f(x) + \frac{\partial f(x)}{\partial x} dx = f(x)(1-dx/\lambda)$$

由此可得

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = -\frac{f(x)}{\lambda}$$

其解为

$$f(x) = e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1-5)$$

积分常数由 $f(0) = 1$ 决定。

(1-5) 式表明了质点的自由行程大于 x 的概率, 也就是质点行过 x 距离后尚未发生碰撞的概率。自由行程越长的质点出现的机会越小, 并按指数规律衰减。

如果起始有 n_0 个质点 (或一个质点的相继 n_0 次碰撞), 则其中行过距离 x 后, 尚未被碰撞的质点数 (或次数) $n(x)$ 应为

$$n(x) = n_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1-6)$$

从上式可知, 自由行程大于平均自由行程 λ 的质点占全部质点的 37%; 大于 2λ 的 14%; 而大于 10λ 的在平均每 22000 个质点中就只有 1 个了。

三、气体中带电质点的产生

气体分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 (碰撞电离); (2) 各种光辐射 (光电离); (3) 高温下气体中的热能 (热电离)。

(一) 碰撞电离

在电场作用下, 电子及离子被加速而获得动能。它们的动能积累到一定数值后, 在和气体分子发生碰撞时, 可以使后者激励或电离。这是气体放电中带电质点极重要的来源。

气体放电中, 碰撞电离主要是电子和气体分子碰撞而引起的。这是因为电子的自由