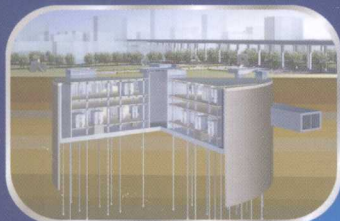


高电压应用技术

郑殿春 主编

朱建良 主审



科学出版社

高电压应用技术

郑殿春 主编

朱建良 主审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以高电压气体放电理论及低温等离子体技术为主线,分别阐述汽车尾气处理、VOC 净化、静电喷涂、小卫星推进、粉尘荷电除尘、微波武器、电磁弹射、臭氧的产生及应用、静电(磁)场生物效应的应用、肿瘤的电化学疗法等基本原理和应用成果,为高电压技术专业的研究生拓宽视野提供基本的入门知识。

本书可作为高等院校高电压与绝缘技术专业硕士研究生、博士研究生教材,也可供从事高电压电介质放电现象研究的科技工作者与高压电气绝缘配合及结构设计的工程师参考。

图书在版编目(CIP)数据

高电压应用技术 / 郑殿春主编. —北京:科学出版社, 2016.12
ISBN 978-7-03-051013-6

I. ①高… II. ①郑… 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(2016)第 302080 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:237 000

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

高电压大容量电能传输技术的日臻完善,促进并拓宽了高电压应用技术领域,如高电压技术在粒子加速器、大功率脉冲发生器、受控热核反应研究、航空航天领域的雷电和静电控制与防护、磁流体发电、激光技术、等离子体切割、电水锤进行海底探油、冲击加工成形、人体内结石的破碎,以及静电除尘、静电除菌、静电喷涂、静电复印等方面的应用。

“高电压应用技术”作为一门课程为相关专业开设,始于1995年哈尔滨理工大学本科教学计划修订,将其设定为高电压与绝缘技术专业选修课程。从2005年开始,“高电压应用技术”还作为高电压与绝缘技术专业硕士、博士研究生的专业选修课程。本书在郑殿春的本科生和研究生教学讲稿的基础上,经过重新组织、编撰而成。

本书主编长期参与本课程建设的全部教学活动。本书可作为高电压技术高年级本科生、研究生的补充教材,也可供从事高压应用技术研究的工程人员参考。

全书共13章,第1章由郑殿春撰写,第2章、第3章和第8章分别由李伟、任志刚和石磊(国网北京市电力公司电力科学研究院)撰写;第4章由郑秋平(机械工业仪器仪表综合技术经济研究所)撰写;第5~7章、第9~13章由赵大伟撰写。

全书由郑殿春统稿、定稿,朱建良对全部书稿进行了审定,在此表示谢意。

“高电压应用技术”涉及众多学科领域,作者只能依据高电压技术为主线阐述其机理和应用技术,由于作者的学识所限,书中难免会有不足之处,请同仁不吝赐教。

作 者

2016年5月于哈尔滨

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 高电压应用技术领域	1
1.2 气体放电	2
1.3 等离子体	3
1.3.1 等离子体特征	4
1.3.2 等离子体基本性质	4
1.4 介质阻挡放电产生等离子体	5
1.4.1 介质阻挡放电的物理过程	6
1.4.2 介质阻挡放电的化学过程	8
第 2 章 挥发性有机化合物及汽车尾气净化	10
2.1 VOC 净化的迫切性	10
2.2 VOC 净化基本过程	11
2.2.1 自由基产生	12
2.2.2 自由基扩散	13
2.3 低温等离子体治理汽车尾气技术	13
2.3.1 汽车排放污染物的危害	13
2.3.2 等离子体净化尾气机理	15
2.3.3 实验研究	16
2.3.4 实验结果	17
第 3 章 静电喷涂技术	23
3.1 静电喷涂的基本原理	23
3.2 典型的静电喷涂方式	24
3.2.1 粉末静电喷涂	24
3.2.2 液体静电喷涂	25
3.3 旋杯式高速静电喷涂	26
3.3.1 液滴静电雾化	26
3.3.2 高压静电场建立	26
3.3.3 电晕放电	26
3.4 静电雾化及静电涂敷	28
第 4 章 等离子体推进器	31
4.1 等离子体推进技术	31

4.2	脉冲等离子体推进器原理	31
4.3	研究现状	32
4.4	PPT 的优势与面临的挑战	34
4.5	发展趋势	35
第 5 章	粉尘荷电除尘	36
5.1	气体放电原理	36
5.1.1	场致发射	36
5.1.2	碰撞电离	37
5.1.3	碰撞效率	41
5.1.4	水对电极放电的影响	42
5.2	粉尘荷电原理	43
5.2.1	粉尘的电晕荷电方式	43
5.2.2	电子束照射使粉尘荷电	46
5.3	荷电水雾形成原理	46
5.3.1	常规荷电水雾及特点	46
5.3.2	电晕放电使水雾化原理	47
5.4	粉尘及雾粒间的相互作用	49
5.4.1	粉尘与水雾之间的静电作用	49
5.4.2	粒子间的相互作用	51
5.5	荷电粒子运动学特性	54
5.5.1	电场力作用下的荷电粒子运动	54
5.5.2	重力作用下的荷电粒子运动	56
5.5.3	电风造成的荷电粒子运动	57
5.5.4	感应力作用下的荷电粒子运动	58
5.5.5	紊流对除尘微粒运动的影响	60
第 6 章	污水电学处理技术	61
6.1	污水分类	61
6.1.1	生活污水	61
6.1.2	生产污水	61
6.1.3	被污染的雨水	62
6.2	污水处理方法比较	62
6.2.1	生物处理法	63
6.2.2	物理化学法	63
6.2.3	电凝聚法	63
6.3	电凝聚法处理污水的机理	63
6.3.1	电解凝聚	65
6.3.2	电解气浮效应	65
6.3.3	电解氧化和电解还原	66

6.3.4	电凝聚法的优缺点	66
6.4	等离子体水处理技术	66
6.4.1	等离子体通道的状态特性	67
6.4.2	表征水中等离子体通道的控制方程	68
6.4.3	理论分析	69
6.4.4	水中等离子体特性	71
第 7 章	等离子体表面处理技术	77
7.1	低温等离子体的概念与分类	77
7.2	低温等离子体在表面处理中的应用	78
7.3	基本原理及方法	80
7.3.1	原理	80
7.3.2	实验方法	82
7.4	国内外等离子体表面技术发展趋势	84
第 8 章	等离子体隐身技术	86
8.1	等离子体隐身概念	86
8.2	等离子体隐身机理	86
8.3	等离子体隐身技术的数学模型	88
8.4	等离子体隐身技术的模拟分析	91
第 9 章	高功率微波武器	93
9.1	高功率微波武器组成及特点	93
9.1.1	高功率微波武器组成	93
9.1.2	高功率微波武器结构特点	94
9.1.3	高功率微波的大气传输特性	94
9.2	产生电磁脉冲的方法	95
9.3	微波炸弹产生高功率微波的技术原理	96
9.4	微波炸弹的功能	98
第 10 章	电磁弹射技术	101
10.1	电磁弹射技术概述	101
10.1.1	导轨型	101
10.1.2	线圈型	102
10.1.3	重接型	102
10.2	发射器系统	103
10.3	感应型线圈发射器加速机理与设计准则	105
10.3.1	弹丸设计	106
10.3.2	线圈设计	107
10.3.3	电源设计	109
10.3.4	外部结构	111
10.4	发展关键技术	112

10.4.1	电源技术	112
10.4.2	电磁发射器设计技术	112
10.4.3	材料技术	113
10.4.4	系统总体技术	113
第 11 章	臭氧的产生及应用	114
11.1	臭氧的物化性质	114
11.2	臭氧产生方法	115
11.2.1	DBD 产生高浓度臭氧	115
11.2.2	介质阻挡强电离放电形成方法	117
11.2.3	高能电子与其分布	118
11.3	臭氧应用领域	119
第 12 章	植物种子的静电(磁)场处理	121
12.1	静电(磁)场与生物效应的关系	121
12.2	现状与发展趋势	122
12.3	静电(磁)场生物效应的应用	122
12.4	高压静电(磁)场种子生物效应	123
12.4.1	基本原理	123
12.4.2	高压静电(磁)场促长机理	124
12.5	电场作用机理的物理解释	125
12.5.1	介质极化微观理论	125
12.5.2	势垒贯穿	126
12.5.3	静电场处理对种子产生的内部影响	127
12.5.4	静电场处理对种子产生的外部影响	128
12.5.5	高压静电场生物效应的特点	130
第 13 章	强电场以及肿瘤电化疗法	132
13.1	强电场在医学领域的应用	132
13.2	强电场对人体的影响	133
13.2.1	热作用	133
13.2.2	非热作用	134
13.3	强电场对人体影响的描述	134
13.3.1	人体电场分布模型	135
13.3.2	人体内感生电流计算	136
13.4	肿瘤电化疗法	138
13.4.1	普通疗法及其缺陷	138
13.4.2	肿瘤电化疗法现状	138
参考文献		144

第 1 章 绪 论

高电压技术是电工学科的一部分，是对电磁场极端条件下物质现象的研究与技术应用，包括介质放电、静电理论、过电压与绝缘理论、高电压测试技术和高电压器件设备等。

1.1 高电压应用技术领域

借助近代数学、物理、化学和高技术领域的成果，研究电磁场极端条件下的各种物质现象，包括高电压、强电场、大电流、强磁场以及快脉冲等条件，探索其微观、宏观控制和可能的技术发现与工程应用，掌握各种极端条件的利用与防护技术，已经成为高电压应用技术领域的主流，可概括为以下几方面。

(1) 脉冲功率技术与应用：快脉冲与超快脉冲技术、脉冲功率源技术的应用遍及军事、医疗、激光、微波、机械加工、矿产探查、地震研究和核弹爆炸模拟与反应激励等领域。

(2) 高电压特种电源或部件理论及其应用：包括各种高稳定度的高压直流电源、脉冲电源和高频高压电源等，应用面最广，可用于 X 射线机、X 射线或核磁共振计算机断层扫描成像、脉冲静电集尘和航天器中电源等，还有各种加速器电源和离子枪电源。

(3) 静电新技术：各种静电现象的研究，包括固体、气体、液体中静电产生机理、分布规律及应用防护等，如静电控制、静电成像与处理、静电集尘和静电纯化分离等，研究重点在于电荷交换、电介质静电电泳现象、静电传感器和静电超细颗粒分离等新理论、新技术。

(4) 快脉冲气体放电与激光产生新机制：气体激光气体电子学及激光动力学研究，包括放电激励、预电离及电子束激励等方法，混合气体放电等离子体化学反应的研究，放电准分子激光泵、X 射线激光的研究，目的是获得高效率、高质量、高稳定性和长寿命的新型高功率气体激光器，研究重点是气体放电的发光机制、电激励方法、激光等离子体现象以及激光效应的研究。

(5) 电磁物理量极端参数值的数字化测量：包括高电压、大电流强电磁场和快脉冲的测量，是许多基础研究和技術开发的必要手段。研究方向是引进微电子与计算机数字处理方法，利用各种新的光学、光电子、光缆和磁光效应、超导磁效应等方法。

(6) 等离子体技术：包括新的等离子体产生、控制与应用研究，如高分子合金的合成、固体材料表面处理、复合材料合成、高精度薄层加工技术等，传统的开关电弧理论和电光源研究及磁流体发电等。

(7) 电磁场极端条件的环境与生物效应及应用：这是一个与环境生物物理、医学及生物工程相结合的交叉边缘领域，研究意义重大。通过极端条件的生物效应研究，可以阐明许多与生命现象有关的生物物理现象，开拓新的医疗与生物工程技术，如生物电介质静电物理、高电压脉冲诱导细胞融合与基因导入、生物系统超微静电操作、致癌机理、农业微生物医药工业以及各种生物技术等。以往的研究较注重有害的生物环境效应，如工频电磁场、直流高压场和放电的条件。今后的重点是脉冲场、微观强电磁场、强磁场的效应以及有利效应的利用与技术开发。

(8) 雷电现象及其利用与防护：雷电的危害十分广泛，尤其对生态平衡、人身安全、航天技术和信息通信等领域。这方面研究一直很弱，目前重点是雷电产生机理、雷电定位、球状放电现象及雷电能量利用等方面的研究。

(9) 超导及低温绝缘技术：高临界温度超导体的研究与应用近年来发展迅猛，前景诱人，因此研究低压下大电流强磁场以及局部强电场的绝缘技术是大有可为的。研究重点是超导储能系统、低温绝缘和大电流测试技术。

自 20 世纪 80 年代，科学发展和技术进步拓宽了高电压技术的应用领域。高电压放电现象正在被人们广泛应用，并取得重大成果，如高能粒子加速器、磁流体发电、受控热核反应、薄膜沉积、微电子刻蚀、环境治理、新型光源、新型推进器、飞行器隐身及高功率脉冲技术等。

通常，在科学研究实验和工业上使用较为普遍的是用电的方法产生等离子体，即用气体放电法产生等离子体。按气体放电形式来分，有辉光放电、弧光放电、火花放电和电晕放电等；按电源频率来分，有直流放电、工频放电、高频放电、微波放电和脉冲放电。利用气体放电产生等离子体是方便而有效的方法，通常用得较多的是辉光放电、弧光放电、直流放电和高频放电。

1.2 气 体 放 电

气体本来是不导电的绝缘介质，现在将其密封在圆柱形玻璃容器中，如图 1-1 所示，闭合开关 S，在阴极和阳极间加直流电压。逐渐增加电压至某一个电压值时，回路中就会突然有电流出现，容器被明亮发光的等离子体充满。

气体发生放电后是如何趋向稳定的等离子体状态，例如，图 1-1 中的辉光放电模式是如何转化的呢？若以刚击穿的时刻为 $t=0$ ，此时的带电粒子还很少，可以近似认为是真空介质，电极间的电位分布如图 1-2 中的点画线所示为一条直线。这就是说，这时的电位分布与阳极板带正电荷、阴极板带负电荷的真空电容器大致相同。如果开始放电，随着时间的推移，阳极附近就会出现碰撞电离，产生倍增的离子和电子。当这些电荷的数量与电极上的面电荷数量大体相当时，等离子体中的电子就会屏蔽阳极上的电荷，同时离子也会屏蔽阴极面电荷。结果如图 1-2 所示， $t=t_1$ 时电位分布中的平坦部分(等离子体状态)出现在靠近阳极一端。随着平坦部分向阴极一侧的延伸，阴极面上的电场不断增强，电离倍增更加剧烈，等离子体密度会不断增加。最后，如图 1-2 中 $t=\infty$ 的曲线所示，电压几乎都加到阴极前面 $0 < x < d$ 的薄鞘层内，放电成为

稳定的辉光放电。

在辉光放电状态中 $x>d$ 的区域，正离子密度和电子密度大致相同(电中性)，是等电位的等离子体状态。等离子体受到外加电场的作用时，电荷会移动到等离子体表面而形成静电屏蔽，等离子体内部的电场因此几乎为零。这就是说，由于等离子体能像金属一样消除内部的电位差，所以外加电场几乎都加到了电阻较大的阴极鞘层上。

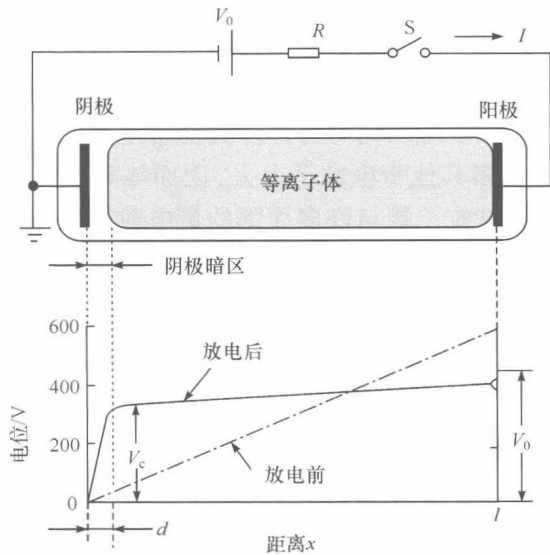


图 1-1 低气压直流辉光放电

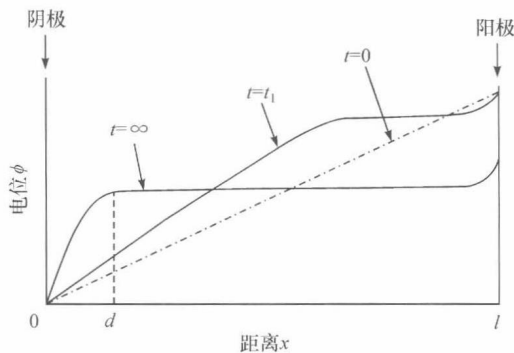


图 1-2 从施加电压到形成稳定的等离子体状态的电位分布

1.3 等 离 子 体

等离子体一词最早在 20 世纪 20 年代由朗缪尔提出。在观察气体放电正柱中的带电粒子的振荡现象时，把具有自由的且密度相等的正负带电粒子的正柱称为等离子体。实际上，它是部分被电离了的气体。等离子体广泛存在于自然界中，特别是在宇宙空间中，由高温或强辐射的作用，物质多一半呈等离子态存在着，如高温的星球以及它们表面的

大气层等。在地球的实验室或工业生产中均可人工产生等离子体。

1.3.1 等离子体特征

等离子体不但是电离气体，而且其主要是由大量的带电粒子构成的，这是等离子体的第一特征。普通气体是由大量中性粒子组成的，粒子之间的相互作用是力学碰撞，是短程相互作用。普通气体运动时它们信息的传递要通过其微观粒子的依次短程碰撞。因而一般气体的运动是大量微观粒子单次碰撞运动过程的统计集合。与此不同的是等离子体是由带电粒子组成的。带电粒子之间的相互作用力是长程库仑力，它们是远程相互作用。一个带电粒子可以同时与许多其他带电粒子相互作用，一个带电粒子的信息可以同时传递到许多其他带电粒子上去，因而等离子体的第二个特征就是集体相互作用，就是每一个带电粒子能与许多周围的带电粒子发生集体库仑相互作用。有的等离子体电离度并不高，但由于种种原因库仑作用力范围比较远，一个带电粒子能与许多粒子相互作用，这就具有了等离子体的特征。相反，如果有一定的电离度，但库仑作用范围不能涉及许多带电粒子，这样的气体运动并无集体相互作用的性质，因而并不具有等离子体的特征。

1.3.2 等离子体基本性质

气体分子电离过程，正离子和电子总是成对出现的，所以等离子体中正离子和电子的总数大致相等，总体来看为准电中性。

等离子体有着许多独特的物理、化学性质：第一，温度高，粒子动能大；第二，作为带电粒子的集合体，具有类似金属的导电性能；第三，化学性质活泼，容易发生化学反应；第四，发光特性，可以作为光源。例如，夜晚街头绚丽多彩的霓虹灯和利用钠、水银等放电发光的照明灯，都是人们经常见到的等离子体发光现象。

那么，究竟为什么等离子体会有上述许多特性呢？答案可以归结为等离子体内部电子和气体分子间的碰撞。

以图 1-3 所示的电子碰撞双原子分子 XY 为例。

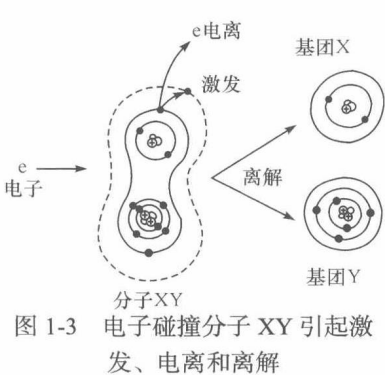


图 1-3 电子碰撞分子 XY 引起激发、电离和离解

若碰撞能量小，会发生弹性碰撞，电子的动能几乎不会改变。如果碰撞能量很高，分子中绕核运动的低能电子，就会在碰撞中获得足够高的能量，被激发至离核较远的高能级轨道上运动。这种处于高能级状态的分子称为激发态分子，用 XY^* 表示。激发态分子中的电子从高能级跳回低能级，便以发光的形式来释放多余的能量。若碰撞电子的能量足够高，电子吸收的能量就可以使其脱离核的束缚而成为自由电子，也就是分子发生了电离。电子对分子 XY 的碰撞也可以使之分解成 X 原子和 Y 原子(离解)。这样一来，带有未成对电子的 X、Y 就容易发生化学反应，故称为化学活性基团。

1.4 介质阻挡放电产生等离子体

大气压低温等离子体在工业生产中得到越来越广泛的应用,它独特的性质可能使现代技术在许多快速发展的领域出现重大突破。介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)通常是在电极上覆盖一层薄的电介质产生放电,如图 1-4(a)、(b)所示,目前也有在放电空间中间插入一块介质板的放电结构(图 1-4(c))和圆柱形状放电结构(图 1-4(d))。介质阻挡放电是一种非平衡态气体放电,是在大气压条件下获得非平衡态等离子体的主要手段。由于它可以在大气压条件下产生,不需要真空设备就可以在较低的温度下获得化学反应所需的活性粒子,具有特殊的光、热、声、电等物理过程和化学过程,因此在材料表面处理、纳米技术、薄膜沉积、刻蚀、医疗器具消毒、臭氧生成、化学合成、环境治理、纤维改性、新型光源、飞行器减阻和隐形等领域有着广阔的应用前景。

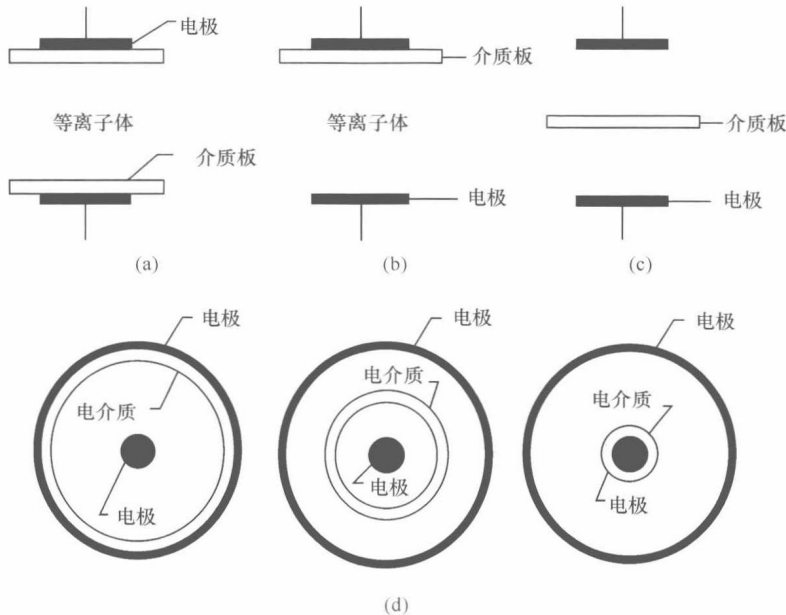


图 1-4 介质阻挡放电典型方式

由于阻挡介质的存在,放电电流受到限制,介质阻挡放电不能发展到火花或者弧光放电,因而等离子体(电子温度)仍然是“冷”的。由于气体组分、电介质表面特性和运行条件的不同,介质阻挡放电会出现从丝状放电到完全均匀弥散(辉光)放电的各种形态。但在大气压力下,当电极间的空气隙较大时,人们看到的放电通常是由大量的时空分布无规则的放电细丝组成的,即流注放电(streamer discharge)。

大气压下辉光放电的一个关键技术是抑制其向弧光放电的过渡,而这种过渡主要是从辉光放电的阴极区开始并发展的,因此可以采用特殊的阴极电极抑制它。对于交流放电,采用绝缘介质插入放电空间而形成的介质阻挡放电也可以有效地抑制向弧光放电的

过渡。在较低频率电源作用时,介质阻挡放电呈现为多通道不均匀的微放电;而采用较高频率(数千赫以上)电源时,介质阻挡放电可呈现为均匀的大气压下辉光放电。

相比于低气压下的辉光放电,大气压下辉光放电省略了低气压的产生和密封系统,简化了工艺流程,易于得到工业应用。大气压下的辉光放电可产生低温等离子体(非平衡等离子体),放电时既有物理反应又有化学反应,因此需结合多种方法,如数学模拟计算、物理光学电学实验及化学分析,才可充分认识放电机理,合理控制放电时产生的量离子浓度、能量和反应过程,从而为实际应用提供依据。

1.4.1 介质阻挡放电的物理过程

介质阻挡放电等离子体的反应体系总体上可以分为两个方面:放电的物理过程和发生在等离子体中的化学反应。为了认识和掌握介质阻挡放电过程,独立处理这两个既不同又相互关联的方面是非常有必要的,其中的微放电正是其关键所在。下面的论述将重点介绍介质阻挡放电的微放电过程。

介质阻挡放电的物理过程通常可以分为三个阶段。

(1) 放电的形成——放电击穿。

如前面所述,介质阻挡放电是一种高压下的非平衡放电过程。这种放电的击穿和其他种类放电的相似之处是在外电场作用下,电子从电场中获取能量,通过与周围原子、分子的碰撞,电子将自身的能量传递给它们,使它们激发电离,产生电子雪崩。当气体间隙上的外电场电压超过气体的击穿电压时,气体就会被击穿。但是在介质阻挡放电中,由于电极间存在介质,限制了放电电流的自由增长,因此也阻止了极间火花和弧光的形成。在气压为 10^5Pa 或更高的情况下,气体的击穿会造成大量的电流细丝通道,而每一个通道相当于一个单个击穿或流光击穿,这就形成了微放电。

单个微放电是在放电气体间隙里某一个位置上发生的,同时在其他位置上也会产生另外的微放电。另外由于绝缘介质的绝缘性质,这些单个的微放电能相互独立地发生在很多位置上。当微放电两端的气体电压稍低于气体击穿电压时,电流就会截止。在同一位置上,只有电压重新升高到原来的击穿电压值时才会发生再击穿和在原来的位置产生第二个微放电。这样放电的一个半周期里就会出现大量时间短促的电流脉冲群,在整个放电时间和空间内大量微放电是无规则分布的,平均看来,介质阻挡放电类似均匀的辉光放电。

介质阻挡放电的击穿机理与一般的汤生、辉光放电有所不同,这是由于在介质阻挡放电中,气体浓度 N 与气体间隙宽度 d 的乘积值很高,第一个电子雪崩在通过放电间隙的过程中出现了相当数量的空间电荷。它们聚集在雪崩头产生的自感应电场,叠加在外电场上,同时对电子产生影响,这样在向阳极方向即沿微放电传播的方向引起了新的击穿机理,即由于很高的局部本征电场的作用,雪崩中一部分高能电子在阳极前方得到进一步加速,它们的逃逸引起击穿通道向阳极方向传播。一旦这部分电子到达阳极,则在阳极前面形成巨大数量的正空间电荷场,从而加强了阳极前面的电场,使得阳极前方的电子得到进一步的加速。由此可见,在空间电子的雪崩过程中,空间任何位置的电子都受到叠加场的加强而使得电离进一步强化,这样一个导电通道能非

常快地通过放电间隙而造成气体的击穿。在电子通过通道的过程中，一些激发态原子和分子会自发地发射紫外辐射，而这些紫外光子一方面能加强阴极的电子发射(电极被介质覆盖时这种效应可以忽略)，另一方面，这些光子还能进一步电离雪崩头和介质之间的原子和分子，造成新的雪崩，有助于导电通道的建立和加速气体的击穿。介质阻挡放电的击穿和微放电的形成是紧密联系着的，根据放电的击穿机理可以认为从阴极释放的电子在外电场加速下电离了气体分子和启动了电子雪崩，从而造成气体的击穿。

(2) 放电击穿后，气体间隙电流脉冲或电荷的输送。

当气体被击穿、导电通道建立以后，空间电荷在放电间隙中输送，并积累在介质上，这时介质表面电荷将建立起电场，其方向与外电场方向相反，从而削弱了有效作用电场，直至将其削弱为零，以至于中断了放电电流。因此，微放电电流呈脉冲状。实验测量和理论计算都表明，微放电持续的时间是非常短的，一般为 10ns 左右。

表 1-1 和表 1-2 综合了微放电的主要特性和一些参量的关系。微放电的基本特征(如电子能量、电子浓度、总的输送电荷等)与放电的很多参量有关。这些参量为气体组分、间隙宽度、气体压强、温度、介质性质等。

表 1-1 微放电的主要特征

气体压强 P	10^5 Pa
电场强度 E	$0.1 \sim 100 \text{ kV/cm}$
折合电场强度 E/n^*	$100 \sim 200 \text{ Td}^{**}$
微放电寿命 τ	$1 \sim 10 \text{ ns}$
微放电电流通道半径 r	$0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$
每个微放电中传输的电荷量 q	$10^{-10} \sim 10^{-9} \text{ C}$
电流密度 i	$100 \sim 1000 \text{ A/cm}^2$
电子密度 n_e	$10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
电子平均能量 T_e	$1 \sim 10 \text{ eV}$
电离度 x	10^{-4}
周围气体温度 T_g	300 K

* n 为气体密度；**Td 为折合电场强度单位(汤生)， $1 \text{ Td} = 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$

(3) 在微放电通道中原子、分子的激发和反应动力学的启动。

由准分子形成的自由基是一种在通常条件下不能稳定存在的分子，它们的化学性质非常活泼，很容易与其他分子或原子发生反应而形成稳定的分子或原子。准分子是一种很脆弱地结合起来的激发态分子。一般情况下，有二元准分子和三元准分子，在正常状态下，它们不具有稳定的分子基态。当它们从激发态跃迁到基态时，就分解为原子。自由基和准分子可以通过高能电子束、 α 粒子束、脉冲放电、微波放电、电晕放电来产生，而近十年来，介质阻挡放电已经能非常有效地提供各种自由基和准分子。

表 1-2 微放电的主要特性和一些参量的关系

参量	总的输送电荷 Q	微放电寿命 τ
气体压强 P	无关	$\propto 1/\sqrt{P}$
放电间隙 d	$\propto d$	$\propto \sqrt{d}$
介质电容率 ϵ_r	$\propto \sqrt{\epsilon_r}$	无关
电极极性	无关	(+)较短, (-)较长

1.4.2 介质阻挡放电的化学过程

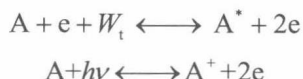
等离子体化学中伴随着非弹性碰撞,会发生激发、离解、电离过程,并随之生成各种化学活性物种。与此同时,等离子体空间物种的多样性决定了粒子间的相互作用也是多种多样的。除了激发、离解、电离之外,非弹性碰撞还能引起复合、电荷转移、电子附着和解离等过程,这些过程对等离子体化学反应具有不同程度的影响。从等离子体的微观反应机制来看,非弹性碰撞引起的基元反应大致如下。

(1) 激发过程,包括碰撞激发和光致激发。



式中, A^* 表示激发态原子; W^* 表示激发能。

(2) 电离过程,包括碰撞电离和光致电离。

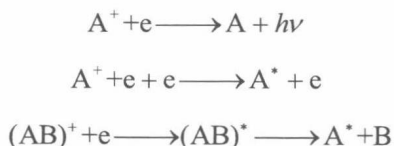


式中, W_i 表示电离能; $h\nu$ 表示光子能量。

(3) 离解过程,多原子分子在高速电子的作用下可能会发生离解。



(4) 复合过程,复合是电离的逆过程,包括辐射复合、三体碰撞复合和解离复合。



式中, $h\nu$ 表示光子能量。

(5) 电子附着和解离过程,电子与某些原子或分子相碰时,随着气体种类和电子能量的不同,电子有可能被气体分子或原子捕获生成负离子,这个过程称为电子附着,反应表达式如下:



式中, W_k 为电子动能。

电子的亲合力越大,原子或分子就越容易形成负离子。相反,负离子释放出电子的过程则称为解离。

(6) 转荷过程。



转荷过程也就是离子-分子的反应过程。众所周知，离子-分子反应的速率常数比同种中性气体分子的反应速率常数大出几个数量级，这是由于带电离子的接近，使分子极化而出现偶极子。由于该反应过程繁复，人们对此至今尚未有定论。

以上简要阐述了低温等离子体空间的一些最主要的基元反应过程。这些基元反应构成了各类等离子体化学反应及其应用的基础。各种基元反应截面决定于具体的反应体系和等离子体发生条件，许多基元反应会同时进行。这既提供了丰富的选择性，也无疑带来了实验和理论研究的复杂性。

等离子体系统中所发生的过程可以用四个“非”来描述，即非平衡(non-equilibrium)、非稳态(non-stability)、非连续(non-continuity)、非线性(non-linearity)。等离子体中特定的非平衡态是由外加电场所供给系统的能量来维持的，这部分能量首先用于加热电子，正是非平衡放电中产生的高能电子引发等离子体中的化学反应，通过与系统中重粒子的非弹性碰撞，高能电子将其自身的能量传递给这些重粒子，而其自身损失的能量则由外电场补充。于是，被激发的分子就因其自身所具有的高能量而分解或引发化学反应。在等离子体化学中，有一点非常重要，即电子与参加反应的粒子间能量传递的高效性，它们之间的能量传递可以在一个短暂的电子脉冲内非常容易地完成。同时，也由于这些高能电子的参与，等离子体反应中形成了多种激发态粒子、离子、自由基等，动力学规律比较复杂。