

DIWEN Dengliziti Daqi Wuran  
Kongzhi Jishu Ji Yingyong

# 低温等离子体大气污染 控制技术及应用

梁文俊 李晶欣 竹涛 等编著

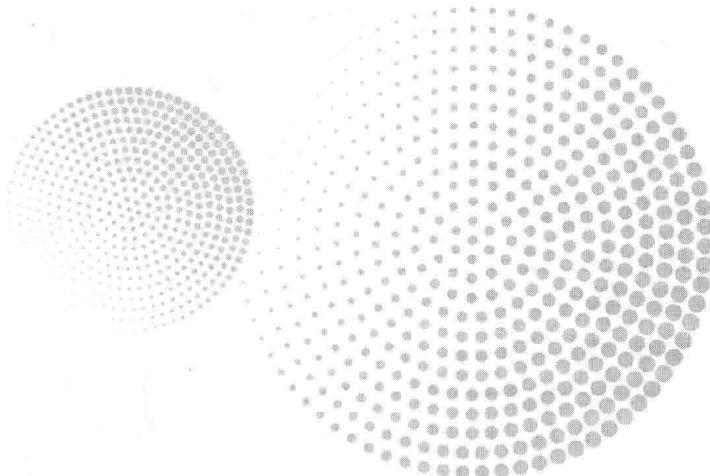


化学工业出版社

DIWEN DENGЛИZITI DAQI WURAN  
KONGZHI JISHU JI YINGYONG

# 低温等离子体大气污染 控制技术及应用

梁文俊 李晶欣 竹涛 等编著



化学工业出版社

·北京·

本书是一部论述低温等离子体技术及其在大气污染治理中应用的著作，介绍了低温等离子体的产生过程、机理，给出了脉冲电晕放电、直流电晕放电、交流电晕放电、介质阻挡放电等多种放电的基本原理、理论以及该技术结合吸附、催化等技术的协同效应。书中结合作者多年来的研究成果，展示了该项技术用于大气污染物的治理研究，主要论述了该技术对挥发性有机污染物、室内空气、油烟废气、恶臭废气以及 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 烟气的研究所果。

本书可供从事等离子体技术、污染控制技术等学科领域的科研人员、工程技术人员参考，也可供高等学校环境工程、能源工程及相关专业的研究生和高年级本科生参阅。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

低温等离子体大气污染控制技术及应用/梁文俊等  
编著. —北京：化学工业出版社，2016.8  
ISBN 978-7-122-27358-1

I. ①低… II. ①梁… III. ①等离子体应用-空  
气污染控制-研究 IV. ①X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 133794 号

---

责任编辑：刘兴春 左晨燕

文字编辑：向 东

责任校对：宋 玮

装帧设计：韩 飞



---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100007）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 1/4 字数 409 千字 2016 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：85.00 元

版权所有 违者必究

## ④ 前言

大气污染问题越来越引起公众的重视，环境污染治理的重要性不言而喻，一些传统环境污染治理技术和新技术均具有自身的特点和不足。污染物末端治理是解决环境污染问题的重要环节，而污染物控制技术是末端治理的解决途径。

低温等离子体工业废气处理技术作为一种新型的污染物的治理技术是集物理、化学和环境工程于一体的综合性交叉技术，与目前常用气体治理方法（吸附、吸收、燃烧法等）相比较，该技术具有如下优点：高效、低耗节能、适应性强、维护操作简便等。由于具有能很容易使污染物分子高效分解且处理能耗低等特点，是目前国内外大气污染治理中行之有效的一种技术方法之一，其使用和推广前景广阔，为工业领域气态污染物的治理开辟了一条新的思路。

本书系统介绍了低温等离子体的产生过程、机理，给出了脉冲电晕放电、直流电晕放电、交流电晕放电、介质阻挡放电等多种放电的基本原理、理论以及该技术结合吸附、催化等技术的协同效应。书中结合作者多年来的研究成果，展示了该项技术用于大气污染物的治理研究，主要论述了该技术对挥发性有机污染物、室内空气、油烟废气、恶臭废气以及 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 烟气的研究成果。本书可供从事等离子体技术、污染控制技术等学科领域的科研人员、工程技术人员参考，也可供高等学校环境、能源、化工及相关专业师生参阅。

参加本书编著的人员有：北京工业大学梁文俊、华北电力大学（保定）李晶欣、中国矿业大学（北京）竹涛。全书最后由北京工业大学李坚教授统稿、审阅。还要感谢在本书编著过程中付出辛勤劳动的边文景、马琳、王爱华、郭书清、武红梅、马名烽、李祥、赵文娟、白子鹤、夏瑜、陈静艳等同学。

本书获得北京市市委组织部优秀人才项目和北京市教委青年拔尖人才项目的出版资助，在编著过程中得到了化学工业出版社的支持和帮助，在此表示衷心的感谢！在本书的编著过程中，编著者参考并引用了大量文献资料，在此向所有被引用的参考文献的作者们致以诚挚的谢意！可能由于作者的疏漏，书中所列出的参考文献未必全面，在此特向书中未能列出的被引用的作者们致以深深的歉意。

限于编著者编著的时间和水平，书中难免出现疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者  
2016年5月于北京

## 第1章 等离子体技术简介

1

1.1 等离子体的定义 .....	1
1.2 等离子体的分类 .....	2
1.3 等离子体的基本参量及等离子体判据 .....	5
1.3.1 粒子密度和电离度 .....	5
1.3.2 电子温度和粒子温度 .....	6
1.3.3 德拜长度 .....	6
1.3.4 等离子体鞘层 .....	6
1.3.5 等离子体频率 .....	7
1.3.6 沙哈方程 .....	8
1.3.7 等离子体的时空特征限量 .....	9
1.3.8 等离子体判据 .....	9
1.4 辉光放电 .....	9
1.4.1 阴极区 .....	10
1.4.2 负辉区 .....	10
1.4.3 法拉第暗区 .....	11
1.4.4 正柱区 .....	11
1.4.5 阳极区 .....	12
1.5 电弧放电 .....	12
1.5.1 电弧放电的基本性质和特征 .....	13
1.5.2 电弧的分类 .....	13
1.5.3 电弧的启动 .....	13
1.6 火花放电 .....	14
1.6.1 火花放电的特征 .....	14
1.6.2 火花放电的形式 .....	15
1.6.3 流注 .....	15
1.7 电晕放电 .....	15
1.7.1 电晕放电的定义 .....	16
1.7.2 电晕放电的特征 .....	16
1.7.3 电晕放电的分类 .....	17
1.8 介质阻挡放电 .....	17
1.8.1 介质阻挡放电基本概念 .....	17
1.8.2 介质阻挡放电特征参量 .....	22
参考文献 .....	29

2.1 概述	31
2.2 等离子体产生原理	32
2.2.1 汤森放电	33
2.2.2 帕邢定律	34
2.2.3 气体原子的激发转移和消电离	34
2.3 低温等离子体化学反应过程	35
2.3.1 碰撞参数	35
2.3.2 等离子体中的基本粒子	36
2.3.3 等离子体产生的电离机制	37
2.3.4 化学反应链	40
2.3.5 电离过程分析——电子雪崩现象	40
2.4 电源和反应器系统及优化	41
2.4.1 电源和反应器	41
2.4.2 脉冲电参数测量	41
2.4.3 高压窄脉冲电源及优化	44
2.4.4 电源和反应器系统优化	44
参考文献	47

3.1 多针对板电晕放电伏安特性	51
3.1.1 伏安特性分析	51
3.1.2 正电晕放电形式	54
3.1.3 负电晕放电电极间距确定	58
3.2 多电极管线电晕放电伏安特性	61
3.2.1 实验装置的建立	62
3.2.2 实验结果与讨论	65
3.3 管线极电晕放电伏安特性	74
3.3.1 实验装置	75
3.3.2 实验结果	75
参考文献	76

4.1 挥发性有机物控制技术现状	78
4.1.1 吸收法	78
4.1.2 吸附法	79
4.1.3 燃烧法	80
4.1.4 冷凝法	80
4.1.5 生物法	82
4.1.6 膜分离法	82

4.1.7 光催化氧化法	83
4.2 低温等离子体技术去除 VOCs 研究现状	83
4.2.1 低温等离子体技术去除 VOCs 的原理	83
4.2.2 低温等离子体技术用于 VOCs 的处理研究进展	84
4.3 低温等离子体协同其他技术去除 VOCs 研究	84
4.3.1 低温等离子体协同催化技术降解 VOCs	84
4.3.2 低温等离子体协同吸附（吸收）技术	87
4.3.3 低温等离子体协同生物法降解 VOCs 的研究	88
4.4 低温等离子体催化协同技术用于 VOCs 去除的研究	88
4.4.1 低温等离子体联合 TiO <sub>2</sub> 降解甲苯的研究	88
4.4.2 过渡金属元素掺杂 TiO <sub>2</sub> 对甲苯降解的影响	92
4.4.3 过渡金属元素与稀土金属元素共掺杂 TiO <sub>2</sub> 对甲苯降解的影响	94
4.4.4 阴离子修饰 TiO <sub>2</sub> 对甲苯降解的影响	96
4.4.5 低温等离子体协同锰银催化剂降解甲苯的研究	99
4.4.6 低温等离子体协同钒钛催化剂降解甲苯的研究	101
4.4.7 低温等离子体协同铁电催化材料降解甲苯的研究	104
4.5 VOCs 产物研究及机理分析	107
4.5.1 产物分析	107
4.5.2 低温等离子体协同催化降解 VOCs 机理分析	112
4.5.3 化学反应动力学分析	116
参考文献	119

## 第5章 低温等离子体室内空气净化

121

5.1 引言	121
5.1.1 室内空气污染来源及危害	121
5.1.2 室内空气污染的特征	122
5.2 室内空气净化技术现状	122
5.2.1 机械方法	122
5.2.2 物理方法	125
5.2.3 生物方法	129
5.3 低温等离子体技术室内空气净化研究现状	129
5.3.1 去除气态污染物的作用机理	129
5.3.2 低温等离子体去除室内污染物国内主要成果	130
5.4 低温等离子体协同其他技术净化室内空气	131
5.4.1 低温等离子体-催化技术原理	132
5.4.2 低温等离子体协同催化技术研究现状	132
参考文献	134

## 第6章 低温等离子体用于恶臭治理

137

6.1 引言	137
6.1.1 恶臭气体的分类与来源	137

6.1.2 恶臭的危害及影响 .....	138
6.1.3 恶臭气体的排放及污染控制标准 .....	141
6.2 恶臭处理技术现状 .....	142
6.2.1 掩蔽法 .....	142
6.2.2 稀释扩散法 .....	142
6.2.3 吸附法 .....	143
6.2.4 吸收法 .....	146
6.2.5 化学氧化法 .....	149
6.2.6 燃烧法 .....	149
6.2.7 光催化氧化法 .....	154
6.2.8 生物法 .....	156
6.2.9 联合法 .....	159
6.3 低温等离子体去除恶臭 .....	161
6.3.1 电子束照射法 .....	162
6.3.2 介质阻挡放电技术 .....	163
6.3.3 表面放电技术 .....	164
6.3.4 填充式反应器治理技术 .....	164
6.3.5 脉冲电晕放电技术 .....	165
6.3.6 直流电晕放电技术 .....	166
6.3.7 等离子体组合技术 .....	168
参考文献 .....	170

## 第7章 低温等离子体烟气脱硫脱硝

172

7.1 烟气脱硫脱硝现状 .....	172
7.1.1 SO <sub>2</sub> 和 NO <sub>x</sub> 的来源及危害 .....	172
7.1.2 我国 SO <sub>2</sub> 和 NO <sub>x</sub> 排放现状及相关政策 .....	174
7.1.3 传统烟气脱硫脱硝技术 .....	178
7.2 低温等离子体烟气脱硫脱硝技术 .....	184
7.2.1 低温等离子体烟气脱硫脱硝技术的发展 .....	184
7.2.2 低温等离子体烟气脱硫脱硝反应机理 .....	185
7.2.3 电子束法脱硫脱硝 .....	189
7.2.4 高压脉冲电晕法 .....	191
7.2.5 高压直流电晕法 .....	192
7.2.6 介质阻挡放电脱硫脱硝的研究 .....	193
7.2.7 低温等离子体联合技术脱硫脱硝 .....	195
7.3 低温等离子体烟气脱硫脱硝工业应用 .....	197
7.3.1 低温等离子体法脱硫脱硝工艺流程及特点 .....	198
7.3.2 电子束烟气净化工艺 .....	199
参考文献 .....	204

8.1 概述 .....	208
8.1.1 餐饮油烟的形成及危害 .....	208
8.1.2 餐饮油烟控制的相关政策法规与标准 .....	210
8.1.3 常见餐饮油烟净化技术 .....	212
8.2 低温等离子体技术净化餐饮油烟 .....	216
8.2.1 低温等离子体技术作用原理 .....	216
8.2.2 雾化电晕法净化油烟 .....	216
8.2.3 高压静电法净化油烟 .....	219
8.2.4 低温等离子体油烟净化器结构优化 .....	221
8.2.5 低温等离子体复合技术净化油烟 .....	223
8.3 低温等离子体净化餐饮油烟工程应用 .....	225
8.3.1 低温等离子体净化设备的技术要求 .....	225
8.3.2 EP-OW 型高效油雾电过滤器 .....	228
8.3.3 JD-II 系列高压静电式油雾净化器 .....	230
8.3.4 PYJ 系列复合式等离子油烟净化机组 .....	232
参考文献 .....	232

9.1 柴油机尾气概述 .....	237
9.1.1 柴油机尾气排放特征 .....	237
9.1.2 柴油机尾气中主要污染物的形成及危害 .....	237
9.1.3 柴油机尾气净化技术的现状与不足 .....	240
9.1.4 传统柴油机尾气污染控制技术 .....	240
9.2 柴油机尾气排放控制政策及标准 .....	245
9.2.1 国外柴油机尾气控制政策及排放标准 .....	245
9.2.2 我国柴油机尾气排放控制政策及标准 .....	248
9.3 低温等离子体技术处理柴油机尾气 .....	250
9.3.1 低温等离子体技术处理柴油机尾气的研究现状 .....	251
9.3.2 低温等离子体处理柴油机尾气反应机理 .....	252
9.3.3 低温等离子体净化柴油机尾气技术 .....	257
9.3.4 PM 与 NO <sub>x</sub> 在净化过程中的相互影响 .....	266
9.3.5 低温等离子体再生 DPF 技术 .....	267
9.3.6 低温等离子体技术应用于汽车尾气净化的局限性 .....	268
9.4 低温等离子体技术处理柴油机尾气工程应用 .....	269
9.4.1 低温等离子体用于柴油机尾气处理的技术背景 .....	269
9.4.2 基于低温等离子体技术的柴油机四效催化技术系统 .....	271
9.4.3 低温等离子技术处理现代 D4BX 柴油机排放的碳烟颗粒 .....	271
参考文献 .....	273

# 三 第 1 章 三

## 等离子体技术简介

等离子体作为物质存在的一种基本形态，自从 18 世纪中期被发现以来，对它的认识和利用在不断深化。早期等离子体主要是作为发光现象、导电流体或高能量密度的热源来加以研究和应用的。利用其光能的如霓虹灯、荧光灯、水银灯等，利用其热能的如等离子体焊接和等离子体切割等，利用其机械能的如磁流体发电等。到 20 世纪 60 年代，等离子体化学能的研究和利用逐渐受到人们的重视，随着对等离子体中各种粒子化学活性和化学行为认识的不断深入，形成了一门新兴的交叉学科——等离子体化学。由于等离子体化学是使物质吸收电能进行反应的技术，必须将电能有效地转化为化学能，因此等离子体化学的发展与真空技术、等离子体诊断技术和放电技术的发展是息息相关的。近几十年来等离子体技术得到了突飞猛进的发展，其研究重心也从热等离子体及等离子体物理应用扩展到低温等离子体及其化学方面的应用。

### 1.1 等离子体的定义

在 19 世纪初，物理学家就已经开始探索和研究是否存在物质的第四态。1835 年，法拉第 (Faraday) 利用低压放电管观察到低压气体的辉光放电现象；1879 年，克鲁克斯 (Crookes) 研究了真空放电管中电离气体的性质，首次提出了物质第四态的存在；1927 年，朗缪尔 (Langmuir) 在研究水银蒸气的离子化状态时第一次引入“Plasma”这个术语，并首次把电离气体称作“等离子体”。

等离子体是由带电的正粒子、负粒子（其中包括正离子、负离子、电子、自由基和各种活性基团等）组成的集合体，其中正电荷和负电荷电量相等故称等离子体。它们在宏观上是呈电中性的电离态气体（也有液态、固态）。一般来说，等离子体 (Plasma) 是气体电离产生大量带电粒子（电子、离子）、中性粒子（原子、分子）所组成的体系，又被称为气、液、固三态之外的第四态物质，如图 1-1 所示。等离子体具有以下基本特点。

① 导电性 由于自由电子和带正、负电荷的离子的存在，因此等离子体具有很强的导电性。

② 电准中性 虽然等离子体内部具有很多带电粒子，但是在足够小的空间和时间尺度上，粒子所带的正电荷数总是等于负电荷数，所以称为电准中性。

③ 与磁场的可作用性 由于等离子体是由带电粒子组成的电导体，因此可以用磁场

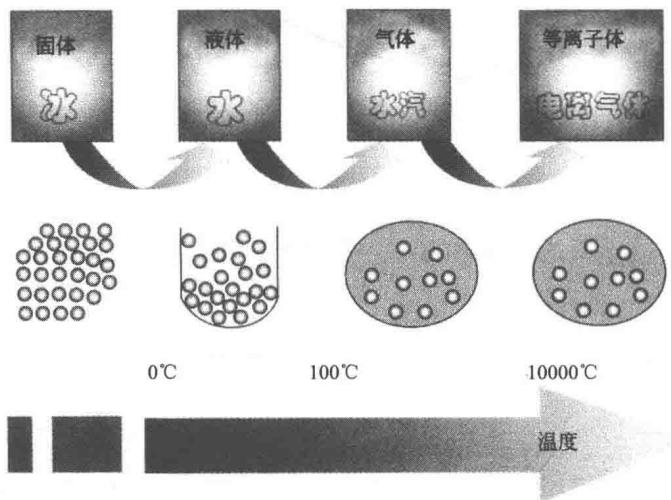


图 1-1 等离子体——物质的第四态

来控制它的位置、形状和运动轨迹，例如电弧的旋转、电弧的稳定以及电弧熄灭等现象，与此同时带电粒子的集体运动又可以产生电磁场。

④ 气氛可控 改变等离子体的工作气体可以形成氧化性、中性或还原性气氛以满足工业和技术上的不同需要。

## 1.2 等离子体的分类

等离子体包括等离子体物理、等离子体化学以及等离子体科学或等离子体工程等，是一门交叉学科，在其发展的不同阶段和从不同的研究角度，它的分类方法也不同，如表 1-1 所列。

表 1-1 等离子体的分类方法

分类方法	种类	原 理
按存在分类	天然等离子体	由自然界自发产生及宇宙中存在的等离子体。宇宙中 99% 的物质是以等离子体状态存在的，如太阳、恒星星系、星云等，自发产生的如闪电、极光等
	人工等离子体	由人工通过外加能量激发电离物质形成的等离子体。如日光灯、霓虹灯中的放电等离子体，电弧放电等离子体，气体激光器及各种气体放电中的电离气体等。常用的人工产生等离子体的方法主要有：气体放电法、光电离法和激光辐射电离射线法、辐照法、燃烧法、冲击波法
按粒子密度分类	致密等离子体（或高压等离子体）	当粒子密度 $n > 10^{14} \sim 10^{15}$ 个/ $\text{cm}^3$ 时，就可称为致密等离子体或高压等离子体。这时粒子间的碰撞起主要作用。例如， $p = 0.1 \text{ atm}$ 以上的电弧均可看作致密等离子体
	稀薄等离子体（或低压等离子体）	当粒子密度 $n < 10^{12} \sim 10^{14}$ 个/ $\text{cm}^3$ 时，粒子间碰撞基本不起作用，这时称稀薄等离子体或低压等离子体。例如，辉光放电就属于此类型

续表

分类方法	种 类	原 理
按温度分类	高温等离子体	粒子温度为 $10^6 \sim 10^8 \text{ K}$ , 如太阳、核聚变和激光聚变均属于高温等离子体
	低温等离子体	<p>粒子温度从室温到 <math>1 \times 10^5 \text{ K}</math> 左右。其中, 按重粒子温度水平还可分为:</p> <p>(1) 热等离子体(或热平衡等离子体), 重粒子温度 <math>1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{ K}</math>, 基本上达到热力学平衡, 所以具有统一的热力学温度, 例如热电弧等离子体、高频等离子体等。</p> <p>(2) 冷等离子体(非热等离子体, 或非平衡等离子体), 重粒子温度只有室温左右, 而电子温度可达上万度, 所以远离热力学平衡状态, 如辉光放电、介质阻挡放电、电晕放电和滑动电弧放电就属于冷等离子体</p>

注: 1atm = 101325Pa。

表 1-2 对上述低温等离子体发生方法的装置原理和结构进行了比较。

表 1-2 典型低温等离子体发生装置原理和结构

发生方式	工 艺 原 理	典型装置结构
电子束辐射(electron beam)	电子束发生装置由发生电子束的直流高压电源、电子加速器及靶窗冷却装置组成。电子在高真空的加速管里通过高电压加速, 加速后的电子通过保持高真空的扫描, 并透射过窗箔照射烟气	
辉光放电(glow discharge)	辉光放电通常是在两个平行电极间的一种气体放电, 接通电源后利用电子将中性原子和分子激发, 当粒子由激发态降回至基态时则以光的形式释放能量	
电晕放电(corona discharge)	电晕放电常发生在不均匀电场中电场强度很高的区域内(例如高压导线周围, 带电体的尖端附近)。其特点为: 出现与日晕相似的光层, 发出嗤嗤的声音, 产生臭氧、氧化氮等。电晕多发生在导体壳的曲率半径小的地方, 因为这些地方, 特别是尖端, 其电荷密度很大。而在紧邻带电表面处, 电场与电荷密度成正比, 故在导体的尖端处场强很强。所以在空气周围的导体电势升高时, 这些尖端之处能产生电晕放电	

续表

发生方式	工 艺 原 理	典型装置结构
介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge)	<p>介质阻挡放电是用绝缘介质插入放电空间的一种气体放电。介质可以覆盖在电极上或悬挂在放电空间里,也可以作为颗粒填充在电极之间。这样,当在放电电极上施加足够高的交流电压时,电极间的气体即使在很高气压下也会被击穿,从而形成介质阻挡放电</p>	
射频放电 (radio frequency discharge)	<p>射频低温等离子体是利用高频高压使电极周围的空气电离,继而产生的低温等离子体。由于射频低温等离子的放电能量高而且放电的范围大,现在已经被应用于材料的表面处理和有毒废物清除和裂解中。射频等离子除了可以产生线形放电,还可以产生喷射形放电</p>	
微波放电 (microwave discharge)	<p>频率在几百兆赫至几百吉赫的高频放电,属于微波气体放电</p>	

续表

发生方式	工艺原理	典型装置结构
热电弧放电 (thermal arc discharge)	热电弧放电的原理与闪电相似,不过产生的等离子体却是连续的。在圆锥形的阴极电极和圆筒形的阳极电极间打出电弧(电流约几十至几百安培),由阴极后方导入的气体(通常惰性气体氩气),立即被电弧的高温激发,变成等离子体,从圆筒形的阳极电极的远阴极的洞口喷出,形成等离子体火焰的射流	
非热电弧放电 (non thermal arc discharge)	典型的非热电弧放电方式是采用2个刀形电极,当电极间最窄处的空气电场强度达到3kV/mm时,电极夹缝中气流就会产生电弧。电源在两电极上施加高压,引起电极间流动的气体在电极最窄部分电击穿。一旦击穿,发生电源就以中等电压提供足以产生强力电弧的大电流。电弧在电极的刀形表面上膨胀,不断伸长直到不能维持为止。电弧熄灭后重新起弧,周而复始	

## 1.3 等离子体的基本参量及等离子体判据

等离子体的状态主要取决于它的组成粒子、粒子密度和粒子温度。因此可以说,粒子密度和温度是它的两个基本参量,其他一些参量大多与密度和温度有关。

### 1.3.1 粒子密度和电离度

组成等离子体的基本成分是电子、离子和中性粒子。通常,以 $n_e$ 表示电子密度;  $n_i$ 为离子密度;  $n_g$ 表示未电离的中性粒子密度。为方便起见,当 $n_e=n_i$ 时,可以用 $n$ 表示二者中任意一个带电粒子的密度,简称为等离子体密度。

如果都是一阶电离,则 $n_e=n_i$ ,氢等离子体就是这样。然而,一般等离子体中可能含有不同价态的离子,也可能含有不同种类的中性粒子,因此电子密度和离子密度并不一定总是相等的。不过在大多数情况下,所讨论的主要是一阶电离和含有同一类中性粒子的等离子体,故可认为 $n_e \approx n_i$ ,这时电离度 $\alpha$ 可定义为:

$$\alpha = n_e / (n_e + n_g) \quad (1-1)$$

热力学平衡条件下,电离度仅与粒子种类、粒子密度和温度有关。

### 1.3.2 电子温度和粒子温度

在热力学平衡态下，粒子能量服从麦克斯韦分布。单个粒子平均动能 KE 与热平衡温度的关系为：

$$KE = mv^2/2 = 3kT/2 \quad (1-2)$$

式中  $m$ ——粒子质量；

$v$ ——粒子的根均方速度；

$T$ ——粒子的温度；

$k$ ——玻尔兹曼常量。

等离子体中不只有一种粒子。虽然当带电粒子的库仑相互作用位能远小于热运动动能时，便可以认为各种粒子在热平衡态也服从麦克斯韦分布。但是，不一定有合适的形成条件和足够的持续时间来使各种粒子都达到统一的热平衡态。因此也就不可能用一个统一的温度来描述。在这种情况下，按弹性碰撞理论，离子-粒子、电子-电子等同类粒子间的碰撞频率远大于粒子-电子间的碰撞频率。同类粒子的质量相同，碰撞时的能量交换最有效。因而，将会是每一种粒子各自先行达到自身的热平衡态，且最先到达热平衡态的应是最轻的带电粒子，即电子。这样，就必须用不同的粒子温度来描述了。

依据等离子体的粒子温度，可以把等离子体分为两大类，即热平衡等离子体和非热平衡等离子体。

### 1.3.3 德拜长度

德拜 (Debye) 长度是等离子体的另一个重要参数。等离子体中存在带电粒子，如果在等离子体中施加电场，带电粒子将起到降低电场影响的作用。这种降低局域电场影响的响应，即等离子体对内部电场产生的空间屏蔽效应，称为德拜屏蔽。德拜屏蔽是等离子体保持准电中性的特性。假设在浸入等离子体的两个表面上施加电压，表面将吸引等量的异性带电粒子。两个表面附近积累的带电粒子将屏蔽带电表面，使等离子体保持电中性。这时外加电压将集中在电极表面附近的  $\lambda_D$  距离中， $\lambda_D$  称为德拜长度，定义如下：

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2} \quad (1-3)$$

式中  $\epsilon_0$ ——真空介电常数；

$k$ ——玻尔兹曼常量；

$T_e$ ——电子温度；

$n_e$ ——电子密度；

$e$ ——电子电量。

在低温等离子体中，德拜长度为  $74\mu\text{m}$ 。对于日光灯辉光放电等离子体，德拜长度在  $0.01\text{nm}$  左右，而宇宙空间等离子体的德拜长度大致为  $2\sim30\text{m}$ 。

### 1.3.4 等离子体鞘层

等离子体虽然是准电中性的，但当它们与器壁相接触时，它们与器壁之间会形成一个

薄的正电荷区，不满足电中性的条件，这个区域称为等离子体鞘层，如图 1-2 所示。

鞘层的形成过程如下：考虑一个宽度为  $l$ 、初始密度为  $n_i = n_e$  的等离子体，被 2 个 ( $\phi = 0$ ) 接地的极板包围，这两个极板都具有吸收带电粒子的功能，由于净电荷密度  $\rho = e(n_i - n_e)$  为零，在各处的电势  $\phi$  和电场  $E_x$  都为零，如图 1-3(a) 所示。

由于电子的热运动速度  $(eT_e/m_e)^{1/2}$  是离子热运动速度  $(eT_i/m_i)^{1/2}$  的 100 倍以上，等离子体中的电子可以迅速到达极板而消失。经过很短的时间后，器壁附近的电子损失掉，形成一个很薄的正离子鞘层，如图 1-3(b) 所示。在鞘层和等离子体之间存在一个准中性区域称为预鞘层。跨越等离子体鞘层的电位称为鞘电位  $V_s$ ，如图 1-4 所示。只有具有足够高热能的电子可以穿过鞘层而到达表面（器壁、被处理材料等），使表面相对于等离子体为负电位，从而排斥电子。鞘电位的值随之不断调节，最终使到达表面的离子通量与电子通量相等。

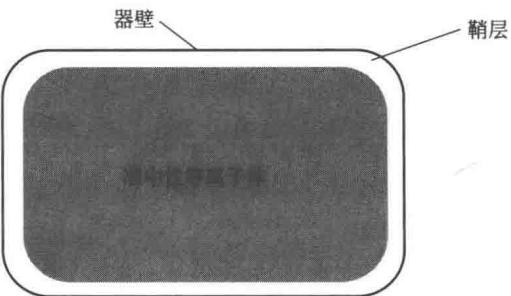


图 1-2 等离子体鞘层

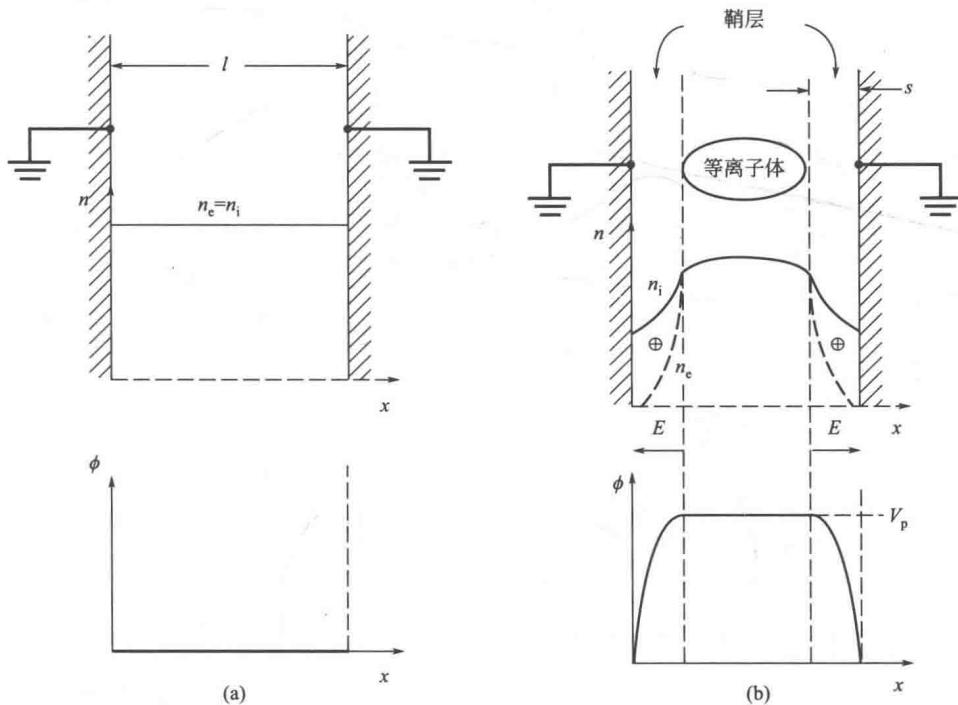


图 1-3 鞘层的形成

由于等离子体鞘层是一个正电荷区，几乎不存在电子，因此，可以将电子密度忽略且将鞘电位下降区域的厚度定义为等离子体鞘层厚度  $d_s$ 。等离子体鞘层厚度与德拜长度有关，也取决于等离子体中的碰撞平均自由程和器壁表面上施加的偏压。

### 1.3.5 等离子体频率

从宏观看虽然等离子体是准中性的，但是可能出现某种破坏电中性的局部扰动。由于

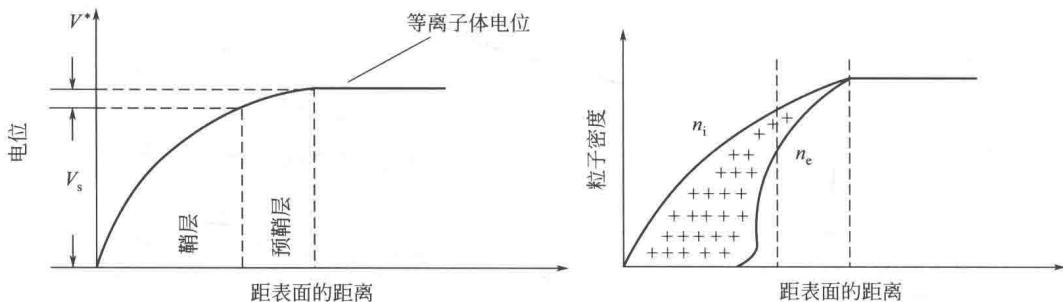


图 1-4 鞘电位与粒子密度

电子质量小，电子对这种扰动产生的电场力的响应比离子快，会立即响应，向着使空间电荷中和的方向移动。由于惯性作用，会越过平衡位置，进而再次向平衡方向返回。这是一种振荡过程，称为等离子体振荡，如图 1-5 所示。电子的振荡频率称为等离子体频率或朗谬尔频率  $\omega_p$ ，由下式给出：

$$\omega_p = \left( \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} = 18000 \pi n_e^{\frac{1}{2}} (\text{Hz}) \quad (1-4)$$

式中  $n_e$  —— 电子密度；

$e$  —— 电子电荷；

$m_e$  —— 电子质量；

$\epsilon_0$  —— 真空中的电介质常数。

等离子体频率反映了等离子体对其内部发生电场而产生屏蔽作用的时间响应尺度。对于典型的等离子体密度  $10^{10}$  个/ $\text{cm}^3$ ，等离子体频率为  $9 \times 10^8 \text{ Hz}$ ，远高于常用的产生并维持等离子体射频放电的电源频率  $13.56 \text{ Hz}$ 。

### 1.3.6 沙哈方程

等离子体中，在产生电离的同时还存在着电子和离子重新复合成中性离子的过程。实际应用中，通常等离子体中的带电离子与中性气体分子、固体分子，有时甚至与液体发生强烈的相互作用。当热能施加于气体，它会越来越高度电离。在许多低压气体中，离子、电子和中性气体处于各自不同的动力学温度上，其混合体距热平衡甚远，必要条件是所有粒子在共同温度上，在这样的等离子体中，必须从微观动力学来计算电离组分。

一些等离子体，包括工作在一个大气压的直流弧和射频等离子体，是处于或近于热平衡的，在此状态下，电子、离子和中性气体的温度是相同的。在这些条件下，由中性气体完全电离成等离子体状态的转变可由沙哈方程来描述，这是由印度天体物理学家 Meghnadsaha

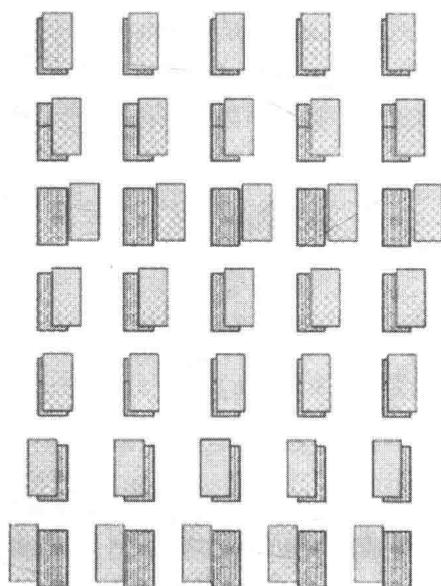


图 1-5 等离子体振荡