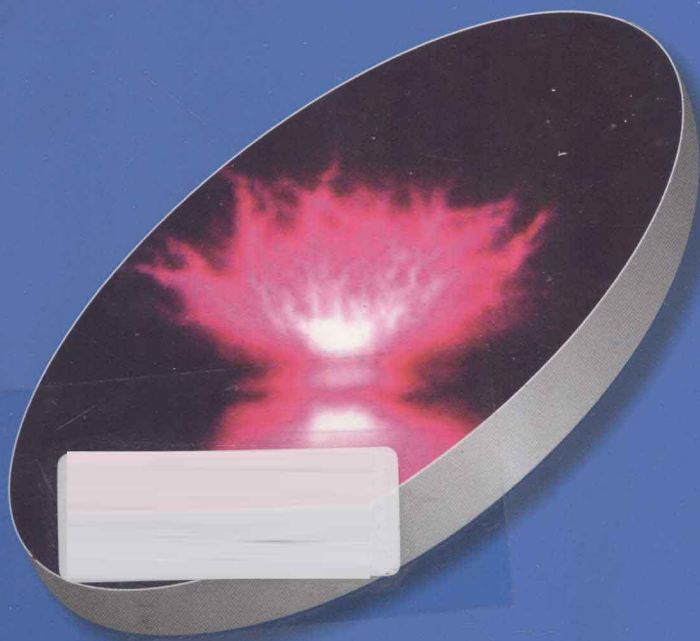


本书由中央高校基本
科研业务费资助出版

Discharge Plasma in Liquid
and Its Applications

液相放电等离子体 及其应用

孙 冰◎著



科学出版社

本书由中央高校基本科研业务费资助出版

液相放电等离子体及其应用

Discharge Plasma in Liquid and Its Applications

孙 冰 著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书全面系统地介绍液相放电等离子体技术发生原理及其应用,并注重反应最新研究成果。全书共分9章,内容涵盖液相放电等离子体的发展史及分类,液相等离子体发生机理的微观过程,各种放电等离子体的发生方法以及各种方法的基本性质,不同放电形式所产生的自由基的特性、紫外光特性和冲击波特性;阐述各种液相放电等离子体发生技术、装置特点、反应器结构及应用的最新发展;介绍液相放电等离子体自由基和活性物质诊断的原理及测量方法;在应用方面,主要介绍液相放电等离子体的环境应用、生物应用、材料表面改质处理应用,同时给出了液相射频及微波等离子体在物质合成、清砂和管线防阻等方面的最新研究成果和应用实例。

本书可用作高等院校等离子体物理、环境科学、材料科学、催化化学等专业研究生和高年级学生的教材,也可供从事等离子体技术应用、微细加工技术、材料合成、环境污染治理等学科领域的科研人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液相放电等离子体及其应用=Discharge Plasma in Liquid and Its Applications / 孙冰著. —北京:科学出版社,2013. 1

ISBN 978-7-03-036334-3

I. 液… II. 孙… III. 等离子体-研究 IV. O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 310510 号

责任编辑:顾英利 卜 新 / 责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:338 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 一

(原文版)

In 1985, Drs. Clements and Sato conducted groundbreaking new research by applying pulsed high voltage to underwater electrodes generating discharges which produce $\cdot\text{OH}$ radicals which break-up contaminants and kill microorganisms. Subsequently, Dr. Sun joined Drs. Sato and Clements and has continued working in the field ever since, generating numerous pioneering publications. For example, “*Optical Study of Active Species Produced by a Pulsed Streamer Corona Discharge in Water*”^① is an important work, because it introduced novel methods to measure the radical concentrations and lifetimes. These methods as well as more advanced recent techniques are discussed in detail in Dr. Sun’s book. The articles “*Use of a Pulsed High Voltage Discharge for Removal of Organic Compounds in Aqueous Solution*”^②, and “*Oxidative Processes During Degradation of Phenol in Aqueous Solution by Pulsed High Voltage Discharges*”^③, were very important pioneering works on utilizing pulsed discharges in water to remove pollutants.

This pioneering liquid discharge work inspired many other researchers around the world because of the numerous potential world-wide environmental benefits. The need for novel, inexpensive, and effective methods for removing pollutants and microorganisms from domestic water supplies is ubiquitous, and contaminated drinking water is responsible for thousands of deaths annually, especially in third world countries.

Prof. Bing Sun is one of the pioneers and world’s leading researchers in the field, and effectively conveys to the reader his insightful, deep understanding of

① Sun B, Sato M, and Clements J S. Optical Study of Active Species Produced by a Pulsed Streamer Corona Discharge in Water. *Journal of Electrostatics*, 1997, 39: 189-202.

② Sun B, Sato M, and Clements J S. Use of a Pulsed High Voltage Discharge for Removal of Organic Compounds in Aqueous Solution. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 32(15):1908-1915.

③ Sun B, Sato M, and Clements J S. Oxidative Processes During Degradation of Phenol in Aqueous Solution by Pulsed High Voltage discharges. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2000, 34(3): 509-513.

the important concepts as well as his vast experimental experience and “know how”.

Discharge Plasma in Liquid and Its Applications gives a clear and concise treatment of the various types of electrical discharges in liquids as well as their applications. The subject matter is very practical, and is organized in a logical and readable manner, enabling the non-specialist to quickly and easily get up to speed in the field. For example, it includes experimental apparatuses, techniques and references that graduate students, university researchers, and laboratory scientists will all find extremely useful.

The book provides fundamental knowledge of the physical and chemical phenomena associated with non-thermal plasma in liquids. Numerous types of electrical discharges in water are covered. Active species and radicals are identified and their properties and chemical dynamics are discussed. The properties of the active species generated in each type of discharge are specified. Almost all the topics and concepts related to electrical discharges in liquids, especially water, are covered in depth. Therefore it is also an excellent reference manual for those working in the field.

Physics Department
Florida State University, FL, USA
Prof. J. Sid Clements



序 一

(中文版)

1985年,克莱门茨博士和佐藤博士首创将高压脉冲应用于水下电极放电,以产生·OH自由基用来分解污染物并杀灭微生物。随后,孙博士加入到了佐藤博士和克莱门茨博士的工作中,并自此致力于该领域的研究,发表出众多前沿性的学术成果。如《水中脉冲流光电晕放电产生的活性物质的光学研究》^①就是该领域的一篇重要学术论文,文章中将新的测量手段引入到自由基浓度和寿命测量中。孙博士的另外两篇论文——《高压脉冲放电在脱除水溶液中有机化合物的应用》^②及《水溶液中高压脉冲放电在降解苯酚过程中的氧化作用》^③也均是水中脉冲放电脱除水污染物方面重量级的前瞻性作品。这本书中详细讨论了上述技术,并同时展现了该领域的最新技术。

这些液相放电的开拓性工作激发了世界上其他许多研究者为着各种各样潜在的环境效益而进行此方面研究。因为被污染的饮用水每年导致了全球几千人的死亡,特别是第三世界国家问题尤为严重,生活用水普遍需要提供新型、低成本、高效的污染物脱除与灭菌技术,这就赋予了液相放电技术极大的发展空间。

孙教授是世界上该研究领域中的先锋者和领军人之一,他力图通过《液相放电等离子体及其应用》一书向读者传达他对该领域重要概念的真知灼见,同时也毫无保留地贡献出他丰富的实验经验和专业技巧。

本书对于多种类型的液相放电及其应用形式进行了清晰而简洁地介绍。主题极具实用价值,组织结构有序合理、可读性强,即使是非专业人士也能够通过此书很快了解熟悉该领域的最新进展。举例来讲,文中所述及的实验仪器、实验技术和参考文献无论是对研究生、高校学者或是实验室研究人员而言都是极其有用的。

本书介绍了与液相非热放电相关的物理化学现象的基础知识,包括各种类型

① Sun B, Sato M, and Clements J S. Optical Study of Active Species Produced by a Pulsed Streamer Corona Discharge in Water. *Journal of Electrostatics*, 1997, 39: 189-202.

② Sun B, Sato M, and Clements J S. Use of a Pulsed High Voltage Discharge for Removal of Organic Compounds in Aqueous Solution. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 32(15):1908-1915.

③ Sun B, Sato M, and Clements J S. Oxidative Processes During Degradation of Phenol in Aqueous Solution by Pulsed High Voltage discharges. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2000, 34(3): 509-513.

的水中放电形式,产生的活性物质和自由基的特性、识别方法和化学动力学特性。对每一种类型的放电产生的活性物质的特性也进行了深入研究。对于液相放电尤其是水中放电相关的所有主题和概念在书中基本上都有深入介绍。因而本书也可视为该领域一部非常有价值的参考手册。

美国佛罗里达州立大学物理系教授

J. S. 克莱门茨

序 二

(原文版)

従来より、気相中におけるプラズマの生成と応用は、たいへん古くから行われている。理論的な解明も進んでおり、応用面でも広く提案がなされている。ところが、水中でのプラズマは、最近になって多くの研究者が参入してきているとはいえ、いまだに黎明期から脱しているとは言い難い。多くの研究者たちが手探り状態にあるときに、このような基礎から応用までを網羅した書籍が発刊されることは、たいへん喜ばしいことであり、これを機に水中プラズマに関する研究と応用がますます広がることが望まれる。

水中プラズマに関する研究はまだ歴史が浅く、1985年にClements、佐藤、Davisらによる、水中での放電前駆現象に関する最初の報告がなされてから、27年が経過するに過ぎない。その後、日本、米国、チェコで基礎的な研究が継続され多くの論文が出された。それらの中でSunは、水中パルス放電の機構とその応用の可能性に関して多くの提案をし、多くの論文を提出している。それらは世界的にも非常に多くの引用がなされていることから、その後の水中プラズマ研究に大きく影響を及ぼしていることが伺える。急速に研究報告が増加し始めたのは、2005年頃からではないかと思われる。2010年には世界で初めての水関連プラズマの国際会議が日本で開催されるに至った。

水中プラズマからは、衝撃波、紫外線、高エネルギー電子などが生成し、それらが隔壁なく直接水に到達するという特徴がある。また、プラズマは水中でラジカル等の活性種を生成し、それらが強力な酸化作用を有することが知られている。特に・OHラジカルの酸化作用は強力で、出会った有機物質を瞬間的に分解してしまうことから、近年大きな問題となっている水環境修復に有効な手段として、さらなる進展が期待されている。また、水中プラズマのもつ殺菌作用の医学方面への応用も、大きな可能性をもつものと考えられる。

今後ますます発展するであろう、水中プラズマに関する書籍の発刊を、心から祝福するとともに、この分野の研究のますますの発展を祈願するものである。

日本国 群馬大学名義教授

Masayuki Sato

佐藤正之

序 二

(中文版)

传统的气相中等离子的生成和应用,很早就已经进行。随着从理论上研究、阐释的逐步深入,应用方面也越来越深入广泛。然而,对于在水中发生等离子体,直到最近,还有很多研究者不断加入到这个行列中来,但至今水中等离子体很难说已经脱离黎明期。对于很多在这一研究领域处于摸索状态的研究者来说,像这样总结了从基础到应用的参考书籍的发行,是非常可喜的事,也期待水中等离子体相关的研究和应用以此为契机越来越发展。

水中等离子体相关的研究历史还比较短,1985年,从克莱门茨、佐藤、戴维斯等的水中放电先驱现象相关的最初报道开始,至今不过27年。自那之后,在日本、美国、捷克进行了很多基础性的研究,相继发表了很多论文。其中,孙冰研究了水中脉冲放电的机理,提出了很多关于应用的可行性建议,发表了多篇论文。由于这些论文在世界上被很多文章引用,对之后的水中等离子体的研究有非常大的影响。2005年前后研究报道开始迅速增多。及至2010年,在日本举办了世界上第一次液相等离子体国际会议。

水中等离子体能生成冲击波、紫外光、高能量电子等,它们有不经过任何其他过程直接到达水中的特点。另外,等离子体在水中生成自由基等活性物质,已知这些活性物质具有强有力的氧化作用。特别是·OH自由基的氧化作用是强大的,由于与其相遇的有机物质能瞬间被分解;因而,针对近年来日趋严峻的水环境修复问题,期待其作为有效的处理手段取得进一步的发展。另外,水中等离子体具有杀菌作用,这在医学方面的应用中也可拥有极大的潜力。

今后会越来越发展,在衷心祝福水中等离子体相关书籍发行的同时,也祝愿这个领域的研究越来越兴旺、发展。

日本群馬大学名誉教授

佐藤正之

前 言

等离子体是物理学科的重要分支,等离子体技术已被广泛应用于工业、农业、环境、国防、通信等领域。人们习惯上所说的等离子体都是在气体中产生的,液相放电等离子体是近年发展起来的一个新概念,其含义是在液相中放电产生的等离子体。由于液相多数发生于水溶液中,也有专家称为“水中放电等离子体”或“液电效应”等。气体和液体中产生等离子体的最大差别在于气体是电绝缘性的,而液体特别是水溶液是导体,含有大量的导电离子,所以在液相中发生等离子体比气体中更为困难。脉冲高压放电技术可以在液体中产生等离子体,这一过程能同时产生冲击波、紫外光、强氧化剂自由基和强电场四种作用效果。这四种效应是气相放电等离子体所不完全具备的,而且液相等离子体密度较高。这些特点决定了其有独特的应用领域。

水中放电形成等离子体是 20 世纪 50 年代发展起来的一门新学科,对其研究的动力来自于其重大的应用价值,因为这种放电形式可以应用到多个领域,例如金属成型、溶液杀菌、有机物分解和材料合成等。从 1987 年开始美国学者克莱门茨(J. S. Clements)和日本学者佐藤正之(M. Sato)将其应用于污染物脱除,近十几年的应用研究引起各国科学家的极大关注。从 90 年代初的两三个国家的几个研究小组发展到现在十几个国家的几十个研究小组均在进行其应用研究。2010 年在日本爱媛县松山市召开了首届液相等离子体国际研讨会。

由于液相放电等离子体是一门新学科,到目前为止,世界范围内还没有一本专著系统地介绍其基本原理、发生发展过程、诊断方法和应用状况,来供相关研究人员参考。刚开始从事液相等离子体相关研究的研究生和青年研究者往往为找不到一本系统的专门著作而苦恼。本书的出版目的是为本领域研究者提供一本系统的、有价值的、技术先进的参考书。

本书在总览近二三十年的研究成果的基础上,归纳和总结了世界各国的最新研究成果,包括中国、美国、加拿大、法国、俄罗斯、日本和捷克等国的研究成果,进行了系统的分类总结,从液相放电的发展历程、等离子体发生基本原理和机理探讨、产生的自由基的特性、液相放电等离子体物理及反应器类型到液相放电等离子体应用均做了详细介绍。书中第 1 章概述了等离子体的基本概念、分类和基本参数,总结了液相放电的发展历史,给出了液相放电与气相放电的不同特点和分类。第 2 章综述了液相等离子体的特性,总结了液相放电的基本原理、发生发展的微观过程以及各流派的不同观点,全面地反映了当今世界的研究前沿技术成果,特别是

对场致理论和气泡理论进行了详细论述。第3章总结了不同放电形式的特性区别,以及现有各种反应器形式;介绍了从直流到脉冲及射频、微波液相等离子体的发生方法和特性。第4章介绍了液相放电所用各种脉冲电源的类型和特点。第5章阐明了液相放电自由基产生原理和动力学特性,对液相放电的光谱特性及液相等离子体的诊断方法做了详细介绍,给出了液相放电产生的自由基和活性物质的测量分析方法和时间特性。第6章介绍了在电晕流光放电、火花放电和电弧放电的不同放电类型下所发生的紫外光的光谱特性。第7章总结了液相放电的冲击波研究现状,介绍了液相放电产生的冲击波传播特性和频谱特性。第8章介绍了气液混相放电的各种形式和特点,总结了气液混相放电生成的各种活性物质的特性。第9章介绍了液相放电等离子体的应用,内容包括在环境方面的有毒有害有机物脱除、脱色和杀菌;在材料上的表面改性、微粒子制造和物质合成;在机械上的清砂,管路防阻;在海洋勘探上的应用;在医学和生物体上的超声波体外碎石、液体放电手术刀等。

著者从1994年开始进行液相放电的研究。曾经利用光谱诊断法研究了水中流光放电产生的自由基的特性、给出了水中放电产生的 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{H}$ 、 $\cdot\text{HO}_2$ 、 $\cdot\text{O}$ 和 H_2O_2 的密度变化及特性分布,所发表的结果获日本学术奖增田奖一次。同时进行了污水中 Toxic 有害有机物的脱除等研究。现将我国研究者日益感兴趣研究领域的技术前沿归纳、总结,提供给读者进行交流,希望有更多的液相放电等离子体研究者在此领域有更大更好的发展和突破。鉴于著者水平有限,书中难免会有疏误等不足之处,敬请读者批评指正。

本书从酝酿到完稿经历了两年多的时间,内容包括一些近期我们研究小组尚未发表的研究成果。在中央高校基本科研业务费的支持下现在终于可以出版了。书中除3.1.1小节液相直流辉光放电由刘永军执笔,3.1.2小节直流微弧氧化放电由严志宇执笔外,其余均由著者执笔。

本书编写过程中得到了朱小梅、严志宇、刘慧和刘永军老师在审阅、修改方面的大力协助,提供了很多建设性意见,在此表示感谢。对在文献资料和图表整理、校对过程中给予帮助的王波、高志鹰、张丽、杨菁、封宗瑜、孙霄航、张靳、秦薇、朱晓雨表示感谢。同时感谢在我写作过程中给予大力支持和帮助的所有相关人员。

本书承蒙著名科学家、IEEE 会士(fellow)——美国的克莱门茨(J. S. Clements)教授和日本的佐藤正之教授对本书结构给予指导,并作序,特此表示衷心的感谢。

孙 冰

· 2012年10月18日于大连

目 录

序一(原文版)

序一(中文版)

序二(原文版)

序二(中文版)

前言

第 1 章 低温等离子体和液相等离子体	1
1.1 等离子体的基本概念	1
1.2 等离子体的分类	2
1.3 等离子体的基本参数	4
1.3.1 等离子体密度和电离度	4
1.3.2 等离子体温度	5
1.3.3 德拜屏蔽与德拜长度	5
1.3.4 等离子体频率	6
1.3.5 等离子体鞘层	6
1.3.6 等离子体的导电性和介电性	6
1.4 液相等离子体	7
1.4.1 液相等离子体的概念	7
1.4.2 液相等离子体的发展	7
参考文献.....	9
第 2 章 液相等离子体发生的基本原理和特性	10
2.1 液相等离子体的特性.....	10
2.1.1 液相放电类型及特性	10
2.1.2 水中放电电压极性的影响.....	12
2.1.3 水中流光放电通道长度和颜色特性	15
2.1.4 液相放电通道的发展速度.....	17
2.2 液相放电等离子体的发生机理.....	18
2.2.1 液相放电机理的基础理论.....	18
2.2.2 液相放电的影响因素	22
参考文献	25

第 3 章 液相放电等离子体物理及反应器类型	27
3.1 水中直流放电	28
3.1.1 液相直流辉光放电	28
3.1.2 直流微弧氧化放电	30
3.2 水中脉冲放电	32
3.2.1 水中脉冲流光放电	32
3.2.2 水中脉冲火花放电	34
3.2.3 水中脉冲电弧放电	38
3.2.4 水中介质阻挡放电	40
3.3 液相射频及微波放电	44
3.3.1 液相射频及微波放电	44
3.3.2 微波-超声波联用放电	45
3.3.3 微波槽孔天线式放电等离子体发生器	47
3.4 液相放电反应器的类型	48
3.4.1 针-板反应器	48
3.4.2 线-板反应器	49
3.4.3 板-孔-板反应器	50
3.4.4 棒-棒反应器	55
3.4.5 气液混相反应器	55
3.4.6 其他类型反应器	56
参考文献	57
第 4 章 高压脉冲电源	63
4.1 高压脉冲电源的分类	63
4.2 火花隙脉冲电源的特性	66
4.2.1 固定火花隙开关	66
4.2.2 旋转火花隙开关	66
4.2.3 火花隙开关的特性	68
4.3 单火花隙和双火花隙脉冲电源	69
4.4 磁压缩开关脉冲电源	71
4.5 脉冲电源的能量效率	74
参考文献	75
第 5 章 水中放电等离子体中活性物质的特性	76
5.1 水分子、氧分子和自由基的基本性质	76
5.1.1 水分子的结构与特点	76
5.1.2 氧的结构特点及相关活性物质	78

5.1.3	自由基的基本概念及特性	80
5.1.4	脉冲放电形成自由基的基本原理	81
5.2	水中自由基反应的化学动力学	84
5.3	水中脉冲流光放电等离子体中活性物质特性	85
5.3.1	自由基的光谱测量和特性	88
5.3.2	过氧化氢的特性	98
5.4	水中放电产生的自由基的时间特性	101
5.4.1	脉冲流光放电过程中自由基的时间特性	101
5.4.2	流光放电中自由基延迟效应	105
5.5	水中脉冲火花放电等离子体中的活性物质特性	106
5.6	水中脉冲弧光放电等离子体中的活性物质特性	108
	参考文献	111
第 6 章	液相放电的光谱特性	113
6.1	电晕流光放电的光谱特性	113
6.2	火花放电的光谱特性	115
6.3	电弧放电的光谱特性	117
6.3.1	紫外光的强度	117
6.3.2	紫外光的能量	118
	参考文献	119
第 7 章	液相放电的冲击波特性	120
7.1	液相放电产生的冲击波的研究现状	120
7.2	形成冲击波的放电回路特性	121
7.3	水中放电产生的冲击波特性	123
7.3.1	压力、密度和速度的关系	123
7.3.2	冲击波的水中传播特性	124
7.3.3	放电参数对冲击波压力的影响	126
7.3.4	冲击波的频谱特性	128
7.4	冲击波能量的计算	130
	参考文献	130
第 8 章	气液混相放电	132
8.1	气液混相放电反应器的结构及特点	132
8.1.1	连续液相与分散气相型混相反应器	132
8.1.2	分散液相与连续气相型混相反应器	138
8.1.3	气液两相均为连续相型混相反应器	140
8.2	气液混相放电生成的活性物质特性	148

8.2.1	多针-板混相反应器生成的活性物质特性	149
8.2.2	板-孔-板式混相反应器生成的活性物质特性	159
8.2.3	气液混相介质阻挡放电生成的活性物质特性	160
8.2.4	过氧化氢和臭氧产生机理	164
	参考文献	166
第9章	液相放电等离子体的应用	169
9.1	应用的基本原理	170
9.2	环境污染物脱除方面的应用	174
9.2.1	脉冲放电等离子体水处理技术的研究进展	174
9.2.2	有毒有害有机物脱除	178
9.2.3	染料脱色	202
9.2.4	能量效率	218
9.3	生物方面的应用	220
9.3.1	液相放电杀菌	220
9.3.2	海水中放电灭藻	225
9.3.3	液相放电处理海水中浮游动物	234
9.4	液相放电在成型、清砂和防阻方面的应用	239
9.4.1	液相放电成型	239
9.4.2	液相放电清砂	239
9.4.3	液相放电防阻	240
9.5	材料改性 with 物质合成方面的应用	242
9.5.1	液相放电新材料合成	242
9.5.2	液相放电材料改性、镀膜	246
9.6	其他方面的应用	247
9.6.1	海洋勘探上的应用	247
9.6.2	医疗和生物体上的应用	247
	参考文献	247

第 1 章 低温等离子体和液相等离子体

1.1 等离子体的基本概念

众所周知,任何物质由于温度不同可能处于固态、液态或气态。这些状态是指物质的“聚集态”,即大量的物体由于构成它的微观粒子之间结合或凝聚程度不同,而表现出不同的存在状态。在固态中,粒子之间的结合最紧密,在液态中次之,在气态中则最松散。要使一种物质由固态转变为液态,需要外界供给能量。当粒子的平均运动能量超过粒子在晶格中的结合能时,晶体的结构就被破坏,固态因而转变为液态。对于液体,也有类似的情形。为了使一种物质由液态转变为气态,粒子也必须具有一定的最小动能,以破坏粒子与粒子间的结合键。当物质达到气态以后,如果继续从外界得到能量,达到一定程度,就可以使一些原子或分子电离,在高于 100 000K 的条件下大部分物质处于电离状态,物质的这种原子、分子、离子和电子等混合电离状态称为第四态。假如有一种机理能使气体电离,而气体密度又足够低,以致复合较慢,那么等离子体状态也能在低于 100 000K 的温度下存在^[1]。1879 年英国的克鲁克斯(W. Crooks)采用“物质第四态”这个名词来描述气体放电管中的电离气体。美国的朗缪尔(L. Langmuir)在 1928 年首先引入等离子体(plasma)这个名词,等离子体物理学才正式问世。1929 年美国的汤克斯(L. Tonks)和朗缪尔提出了等离子体中电子密度的疏密波(即朗缪尔波)。

等离子体是由部分电子被剥夺后的原子及原子、分子被电离后产生的正负粒子组成的离子化气体状物质。等离子体由离子、电子以及未电离的中性粒子的集合组成,整体呈中性的物质状态。等离子体是一种很好的导体,由电离的导电气体组成,其中包括六种典型的粒子,即电子、正离子、负离子、激发态的原子或分子、基态的原子或分子、以及光子。等离子体的定义有多种版本,本书定义为“等离子体是包含足够多的、正负电荷数目近于相等的带电粒子的非凝聚系统”。

等离子体可分为两种:高温等离子体和低温等离子体。高温等离子体只有在温度足够高时发生,是宇宙中物质存在的主要形式。太阳及其他恒星、脉冲星、许多星际物质、地球电离层、极光、电离气体等都是等离子体。太阳和其他恒星不断地发出这种等离子体,占宇宙的 99%。高温等离子体除了核反应应用以外常规应用相对较少。低温等离子体虽然电子的温度很高但它是在常温下发生的等离子体。低温等离子体可以被用于很多生产领域,进行氧化、还原、改性等表面处理或

者在有机物和无机物上进行沉淀涂层处理等。

等离子体和普通气体性质不同,普通气体由分子构成,分子之间相互作用力是短程力,仅当分子碰撞时,分子之间的相互作用力才有明显效果,理论上用分子运动论描述。在等离子体中,带电粒子之间的库仑力是长程力,库仑力的作用效果远远超过带电粒子可能发生的局部短程碰撞效果。等离子体中的带电粒子运动时,能引起正电荷或负电荷局部集中,产生电场;电荷定向运动引起电流,产生磁场。电场和磁场会影响其他带电粒子的运动,并伴随着极强的热辐射和热传导;等离子体能被磁场约束作回旋运动等。等离子体的这些特性使它区别于普通气体,而被称为物质的第四态。因为电离过程中正离子和电子总是成对出现,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。

在等离子体物理学中,常常是不严格地用“平衡”一词来描述准稳态的条件,这种条件仅维持到体系中粒子之间发生相互碰撞为止。对等离子体的研究经常是通过探讨处在这样的“亚平衡态”附近的小扰动来进行的。热力学平衡是指电子和离子都可以用同一温度参数的麦克斯韦分布来描述。在这种情况下,介质与周围环境处于平衡态,而且以同样的速率辐射和吸收能量。放出的辐射谱是属于“黑体辐射”。等离子体物理学中,在人们感兴趣的很多理论和实验情况下,离子和电子既不在同一温度,又不和周围环境处于热力学平衡。亚平衡一词就是用来描述最终将为双体碰撞所改变的那种状态^[1]。

1.2 等离子体的分类

等离子体的分类,有许多方法,可按等离子体的产生来分类,也可以按温度来分类,还可以按气体的电离程度来分类等。

1. 按产生分类

1) 自然等离子体

自然等离子体广泛存在于宇宙中,在宇宙中几乎有 99.9% 以上的物质是以等离子体状态存在的。如恒星星系、星云,地球附近的闪电、极光、电离层等。

在地球上自然等离子体比较少,这是由于地球“寒冷”的缘故。我们知道热平衡时,气体的电离度可由萨哈方程来确定。在室温(300K)下,电离度很低,只有 10^{-122} 。

2) 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称为人工等离子体。人工等离子体在日常生活中经常遇到,如日光灯中的放电,霓虹灯中的放电,高速飞行器的尾迹,射频放电、微波放电产生的等离子体,气体激光器中的放电,受控核聚变