

Non-Thermal Arc Plasma
Technology and Application

非热电弧等离子体 技术与应用

杜长明 著

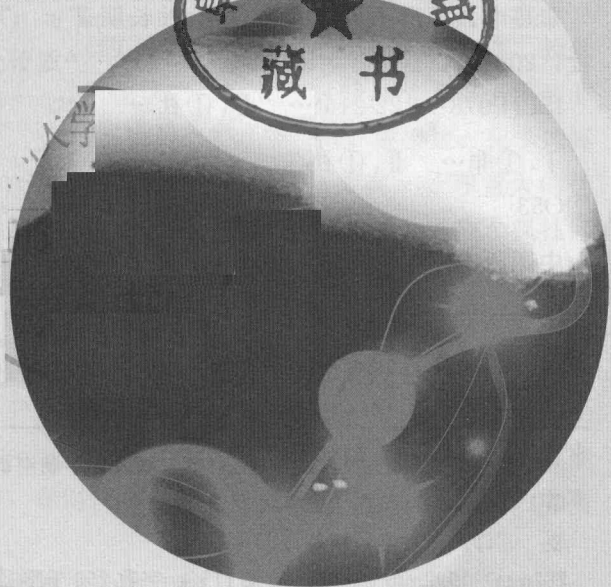


化学工业出版社

Non-Thermal Arc Plasma
Technology and Application

非热电弧等离子体 技术与应用

杜长明 著



化学工业出版社

·北京·

本书共 11 章,第 1 章~第 4 章介绍非热电弧等离子体基本原理、发生器、物理化学特征,第 5 章、第 6 章介绍等离子体材料改性与合成,第 7 章~第 9 章介绍等离子体在环境与消毒方面的应用,第 10 章、第 11 章介绍等离子体燃料转化与生物质热解制合成气。全书从非热电弧放电的发生基本原理和机理、发生器类型、物理化学特征到非热电弧等离子体在环境、能源、材料、生物医学领域的应用均做了详细介绍,具有较强的技术应用性和参考价值。

本书可作为从事低温等离子体、环境、能源、材料、化学、生物医学的科研工程技术人员和管理人员的参考书,也可作为高等学校师生及相关专业研究生的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

非热电弧等离子体技术与应用/杜长明著. —北京:化学工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-122-21665-6

I. ①非… II. ①杜… III. ①电弧-等离子体-研究 IV. ①O461
②O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 198432 号

责任编辑:刘兴春 孙 浩

装帧设计:张 辉

责任校对:徐贞珍

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 100011)

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 11 $\frac{3}{4}$ 字数 253 千字 2015 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

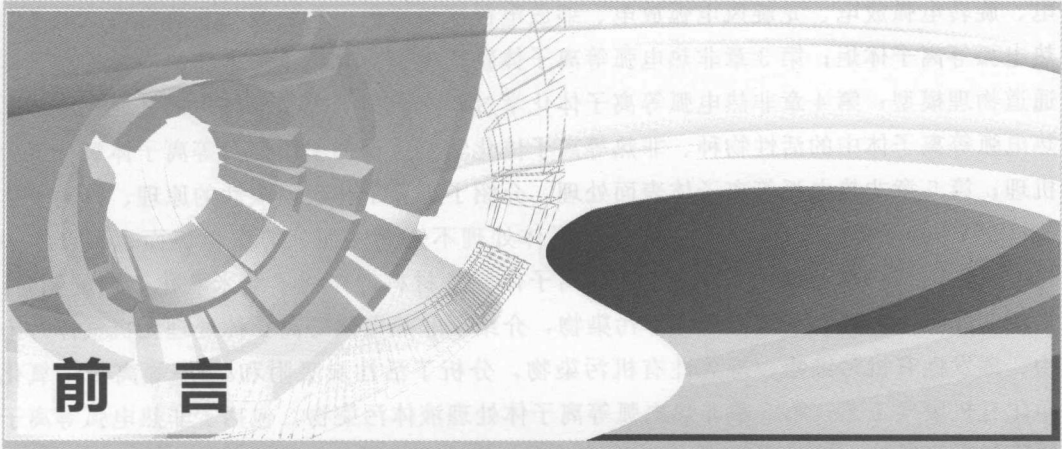
购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

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:80.00 元

版权所有 违者必究



前言

等离子弧焊、等离子体切割机和等离子体喷涂等这些设备中的核心部件通常称为热电弧等离子体炬，其等离子体中心温度达数千摄氏度，是典型的热等离子体。近 20 年来，在另外一些需要高化学选择性的工业应用中，研究者将等离子体炬技术低温化和小型化，将“热电弧”变为“非热电弧”，研制出非热电弧等离子体源，产生的等离子体温度仅数十摄氏度，甚至更低，可用于材料合成、杀菌灭菌、表面清洗与表面接枝、金属与塑料焊接。同时，非热电弧等离子体已经开始向能源、环保、航天等行业推广应用。

非热电弧等离子体具有较高的电子温度（约 1.5eV ）、较高的等离子体密度、较低的传质气体温度（约 $300\sim 6000\text{K}$ ）及较高的化学选择性，并同时兼具热等离子体和非热等离子体的特点。与热电弧等离子体相比，非热电弧具有能耗低、效率高、化学选择性高、电极寿命长的特点；与非热等离子体相比，又具有能量密度高、处理量大的优点。在电极间最小距离处传质气体高电压击穿初期，非热电弧的热损较小，整个弧柱区域处于局部热力学平衡状态，此时电弧更多地表现为热电弧的特点。随着电弧的持续拉长，热损失越来越大，弧柱区的局部热力学平衡状态遭到破坏，当电弧长超过一定阈值时，弧柱区进入了非平衡状态，此时等离子体就称为非热等离子体。随着电弧被气流或磁场继续拉大后，电弧不能继续维持存在，就逐渐熄灭；与此同时，电弧又从电极间距离最小处击穿起弧，重复上述过程，形成非热电弧等离子体。整个电弧运动过程是由准热力学平衡向非热力学平衡转变的过程，在时间和空间上的变化非常复杂，转变的电离机理还存在很多科学问题尚未解决。

本书以著者的研究成果为主，同时凝聚了包括中国、美国、法国、俄罗斯、日本、韩国、德国、波兰、捷克和泰国等国二十多年的非热电弧等离子体研究成果，从非热电弧放电的发生基本原理和机理、发生器类型、物理化学特征到非热电弧等离子体在材料、环境、能源、生物医学领域的应用均做了详细介绍。本书共分 11 章，第 1 章电弧等离子体的产生，概述了电弧放电等离子体的发展史、物理特征、电源种类及基本结构；第 2 章非热电弧等离子体物理特征及反应器，包括了尖端电弧放电、滑动电弧放

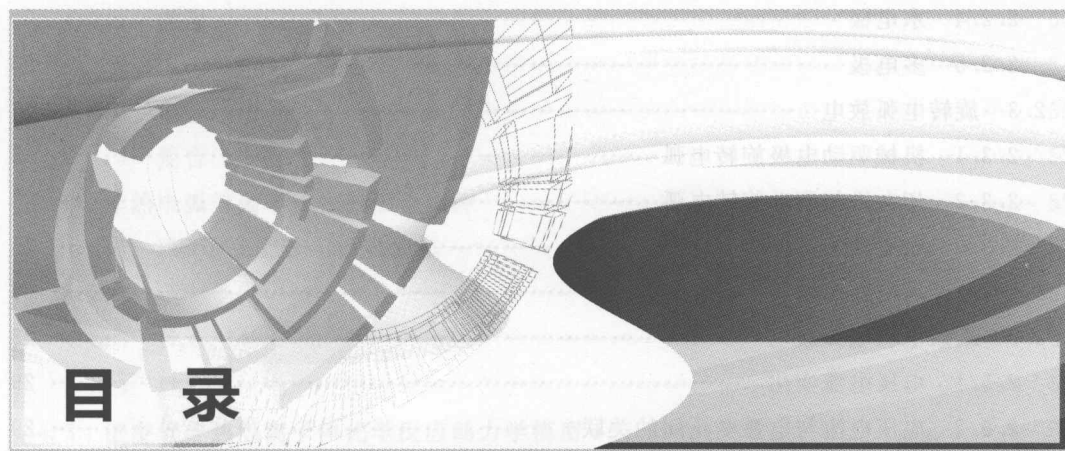
电、旋转电弧放电、龙旋风电弧放电、缩放电极电弧放电、气液混相非热电弧放电及非热电弧等离子体炬；第3章非热电弧等离子体物理模型，介绍了二维非热电弧等离子体通道物理模型；第4章非热电弧等离子体化学过程，包括了等离子体中的基元反应、非热电弧等离子体中的活性物种、非热等离子体化学反应动力学模型及等离子体氧化反应机理；第5章非热电弧等离子体表面处理，介绍了等离子体表面改性的原理、等离子体改性材料的测试和表征、非热电弧等离子体处理不锈钢表面、纺织物表面、聚合物表面、改性碳基材料；第6章非热电弧等离子体制备材料，介绍了纳米氧化亚铜的制备；第7章非热电弧等离子体处理气体污染物，介绍了非热电弧等离子体处理无机气体污染物、挥发性有机污染物、持久性有机污染物，分析了活性炭吸附和脱附-等离子体氧化净化有机废气工艺；第8章非热电弧等离子体处理液体污染物，包括了非热电弧等离子体降解有机废液、处理有机废水和无机废水，提出了非热电弧等离子体氧化-生物净化组合工艺；第9章非热电弧等离子体杀菌，总结了低温等离子体杀菌机理，介绍了非热电弧等离子体表面杀菌、水体杀菌、制备消毒剂技术；第10章非热电弧等离子体转化燃料和制氢，总结了等离子体转化燃料的主要反应和等离子体重整燃料的评价方法，介绍了非热电弧等离子体重整甲烷及液体燃料的影响因素；第11章非热电弧等离子体热解生物质，包括了非热等离子体热解生物质系统及影响热解的参量，并分析了热解固体产物表面结构。

著者从2003年开始非热电弧等离子体的研究，积累了大量公开发表和未发表的非热电弧等离子体科技文献资料和实物照片，一直致力于把自行研制的非热电弧等离子体源尝试性应用到能源、环保、材料、生物医学等领域，积累了丰富的探索性实践经验。现将非热电弧等离子体研究的技术前沿分析、汇总，以资与读者进行交流，希望有更多的研究者关注非热电弧等离子体的发展。本书可供从事等离子体化学、能源、环境、材料、生物医学等领域的科研人员及高等院校的师生参考。

最后，感谢国家自然科学基金、教育部博士点基金、广东省自然科学基金和广州市珠江科技新星专项的研究资助，及中山大学科技处的中山大学后备重点课题和中央高校基本科研业务费中山大学青年教师培育项目。同时感谢给予我帮助和鼓励的老师、同事和同行。另外，还要感谢课题组研究生所付出的辛勤劳动。

限于著者水平和时间，疏漏和不足之处在所难免，恳请读者及同行谅解和帮助指正。

杜长明
2014年8月



第 1 章 电弧等离子体的产生	1
1.1 电弧放电等离子体的发展	1
1.1.1 等离子体的定义	1
1.1.2 等离子体的分类	2
1.1.3 电弧放电的发展及应用	5
1.2 电弧放电的特征	5
1.2.1 电弧放电的分类	5
1.2.2 电弧放电的伏安特性	8
1.3 电弧放电的基础理论	11
1.3.1 阴极电子发射机制	11
1.3.2 电弧放电中的阴极和阳极层	12
1.4 电弧放电的电源	12
1.5 电弧放电的基本结构	13
1.5.1 自由线性电弧	13
1.5.2 转移电弧	13
1.5.3 非转移电弧和等离子体炬	14
1.5.4 非热电弧放电	15
参考文献	17
第 2 章 非热电弧等离子体物理特征及反应器	18
2.1 尖端电弧放电	18
2.2 滑动电弧放电	19
2.2.1 刀形电极	19
2.2.2 棒式电极	21
2.2.3 水膜电极	22

2.2.4	水电极	22
2.2.5	多电极	23
2.3	旋转电弧放电	24
2.3.1	机械驱动电极旋转电弧	25
2.3.2	切向进气驱动旋转电弧	25
2.3.3	磁驱动旋转电弧	25
2.4	龙旋风电弧放电	27
2.5	缩放电极电弧放电	28
2.5.1	电压电流变化	29
2.5.2	电压电流与电弧变化间的关联	29
2.6	气液混相非热电弧放电	31
2.6.1	电压电流特征	32
2.6.2	电弧特征	33
2.7	非热电弧等离子体炬	34
2.7.1	用于点火和火焰控制的非热电弧等离子体炬	35
2.7.2	用于重整制氢和制备纳米炭黑的非热电弧等离子体炬	35
2.7.3	记忆合金电极非热电弧等离子体发生器	36
2.7.4	逆涡流非热电弧等离子体炬	36
2.7.5	金属喷嘴电极滑弧等离子体炬	37
2.7.6	非热电弧等离子体射流炬	39
2.7.7	旋转电弧放电发生器	39
2.7.8	射频非热电弧等离子体炬	40
2.7.9	旋风非热电弧等离子体发生器	40
2.7.10	三级反应区非热电弧放电等离子体反应器	41
2.7.11	交流非热电弧放电等离子体炬	41
2.7.12	三相交流滑动弧等离子体发生器	41
2.7.13	磁驱动非热电弧等离子体发生器	42
2.7.14	微型非热电弧等离子体炬	43
	参考文献	43
第3章	非热电弧等离子体物理模型	46
3.1	电弧放电的弧柱通道模型	46
3.1.1	电弧放电中的 Elenbaas-Heller 方程	46
3.1.2	电弧放电弧柱的 Engel-Steenbeck 通道模型	47
3.2	二维非热电弧等离子体通道物理模型	48
	参考文献	52
第4章	非热电弧等离子体化学过程	54
4.1	等离子体中的基元反应	54

4.1.1	激发	54
4.1.2	电离	54
4.1.3	离解	55
4.1.4	复合	55
4.2	非热电弧等离子体中的活性物种	55
4.2.1	HO 自由基和 NO 自由基	55
4.2.2	O ₃	58
4.2.3	H ₂ O ₂	59
4.2.4	H ₃ O ⁺	59
4.3	湿空气非热等离子体化学反应动力学模型	59
4.3.1	湿空气成分的特性	59
4.3.2	湿空气低温等离子体化学反应动力学模型	63
4.4	气液混相非热电弧放电等离子体反应动力学模型	67
4.5	等离子体氧化反应机理	68
4.5.1	HO· 和 O 的反应特性	68
4.5.2	臭氧氧化	70
4.5.3	单线态氧 O ₂ (¹ Δ _g)	71
	参考文献	72
第 5 章	非热电弧等离子体表面处理	74
5.1	等离子体表面改性的原理	74
5.2	等离子体改性材料的测试和表征	76
5.2.1	接触角测试	76
5.2.2	扫描电子显微镜测试	76
5.2.3	X 射线光电子能谱分析	76
5.2.4	红外光谱分析	76
5.2.5	电子自旋共振光谱分析	77
5.2.6	X 射线衍射分析	77
5.2.7	原子力显微镜测试	77
5.3	非热电弧等离子体处理不锈钢表面	77
5.3.1	304L 和 316L 不锈钢处理	77
5.3.2	船体不锈钢处理	77
5.4	非热电弧等离子体处理纺织物表面	78
5.4.1	棉纱和坯布的改性	78
5.4.2	羊毛的改性	78
5.5	非热电弧等离子体处理聚合物表面	79
5.5.1	玻纤增强聚酯的处理	79
5.5.2	有机基板的处理	79

5.6 非热电弧等离子体改性碳基材料	80
5.6.1 颗粒活性炭的改性与应用	80
5.6.2 活性炭纤维的改性与应用	83
参考文献	86
第6章 非热电弧等离子体制备材料	87
6.1 等离子体制备材料装置	87
6.2 电解介质对纳米氧化亚铜形貌的影响	88
6.3 磁力搅拌对纳米氧化亚铜形貌的影响	90
6.4 电流密度对纳米氧化亚铜形貌的影响	91
6.5 反应温度对纳米氧化亚铜形貌的影响	92
6.6 微等离子体制备纳米氧化亚铜机理分析	92
参考文献	94
第7章 非热电弧等离子体处理气体污染物	95
7.1 非热电弧等离子体处理无机气体污染物	95
7.1.1 N_2O 转化	95
7.1.2 H_2S 的净化	95
7.1.3 SO_2 的脱除	95
7.2 非热电弧等离子体处理挥发性有机污染物	96
7.2.1 施加电压对等离子体净化效果的影响	96
7.2.2 浓度对等离子体净化效果的影响	97
7.2.3 水汽含量对离子体净化效果的影响	98
7.2.4 等离子体降解机理	99
7.3 非热电弧等离子体降解持久性有机污染物	101
7.3.1 脱除烟气中多环芳烃和炭黑颗粒系统	101
7.3.2 PE 焚烧烟气等离子体净化效果	102
7.3.3 PVC 焚烧烟气等离子体净化效果	103
7.3.4 多环芳烃和炭黑降解机理	104
7.4 活性炭吸附和脱附-等离子体氧化净化有机废气	106
7.4.1 工艺流程及净化原理	107
7.4.2 喷漆有机废气净化工程应用	108
参考文献	111
第8章 非热电弧等离子体处理液体污染物	113
8.1 非热电弧等离子体降解有机废液	113
8.1.1 磷酸三丁酯的降解	113
8.1.2 废甘油的转化	113
8.2 非热电弧等离子体处理有机废水	113

8.2.1	等离子体—芬顿反应降解酸性橙 II	114
8.2.2	等离子体—光催化降解酸性橙 II	118
8.3	非热电弧等离子体处理无机废水	122
8.3.1	初始 pH 值对 Cr(VI) 还原的影响	122
8.3.2	Cr(VI) 初始浓度对 Cr(VI) 还原的影响	125
8.3.3	输入功率对 Cr(VI) 还原的影响	125
8.3.4	沉淀产物分析	125
8.4	非热电弧等离子体氧化—生物净化组合工艺	127
	参考文献	128
第 9 章	非热电弧等离子体杀菌	129
9.1	低温等离子体杀菌机理	129
9.1.1	电场	129
9.1.2	热效应	129
9.1.3	紫外辐射	129
9.1.4	机械力	130
9.1.5	带电粒子	130
9.1.6	羟基自由基	130
9.1.7	过氧化氢 (H_2O_2)	130
9.1.8	过氧基 ($ROO\cdot$) 和烷基自由基 ($RO\cdot$)	131
9.2	非热电弧等离子体表面杀菌	132
9.2.1	等离子体杀菌效果的确定	132
9.2.2	等离子体杀菌装置	132
9.2.3	不同气体流量对等离子体表面杀菌的影响	134
9.2.4	接触距离对滑动弧表面杀菌的影响	135
9.2.5	细菌数量对表面杀菌的影响	136
9.3	非热电弧等离子体水体杀菌	137
9.3.1	液体循环流量对滑动弧液体杀菌的影响	137
9.3.2	不同气体类型对滑动弧液体杀菌的影响	139
9.3.3	等离子体处理过程中细菌细胞形态的变化	140
9.3.4	杀菌机理的探讨	140
9.4	非热电弧等离子体制备消毒剂	142
	参考文献	143
第 10 章	非热电弧等离子体转化燃料和制氢	144
10.1	等离子体转化燃料的主要反应	144
10.2	等离子体重整燃料的评价方法	144
10.2.1	O/C 比	145
10.2.2	S/C 比	145

10.2.3	燃料转化率	145
10.2.4	氢气产率	145
10.2.5	氢气选择性	145
10.2.6	单位能耗需求 (SER)	145
10.2.7	单位能量消耗 (SEI)	146
10.2.8	能量效率	146
10.3	非热电弧等离子体重整甲烷	146
10.3.1	重整甲烷	146
10.3.2	甲烷与二氧化碳混合物的转化	147
10.4	非热电弧等离子体重整液体燃料	147
10.4.1	等离子体重整乙醇制合成气系统	147
10.4.2	O/C 比对转化率的影响	148
10.4.3	O/C 比对产物氢气和 CO 的影响	150
10.4.4	O/C 比对单位能耗和能量效率的影响	151
10.4.5	S/C 比对转化率的影响	152
10.4.6	S/C 比对产物 H ₂ 和 CO 的影响	154
10.4.7	S/C 比对单位能耗的影响	156
10.4.8	乙醇流量比对转化率的影响	157
10.4.9	乙醇流量比对单位能耗、能量效率及氢气产率的影响	158
10.4.10	乙醇流量比对产物 H ₂ 和 CO 的影响	159
10.4.11	等离子体重整乙醇的机理	160
10.4.12	等离子体—乙醇能量循环	161
	参考文献	163
第 11 章	非热电弧等离子体热解生物质	164
11.1	非热电弧等离子体热解生物质系统	164
11.1.1	非热电弧等离子体反应器	164
11.1.2	非热等离子体热解生物质的工艺流程	165
11.2	等离子体热解生物质的评估指标	166
11.2.1	生物质转化率	166
11.2.2	各组分的体积分数	166
11.2.3	H ₂ /CO 比	166
11.3	载气种类对等离子体热解生物质的影响	167
11.3.1	气体产物随时间的变化情况	167
11.3.2	载气种类对生物质转化的影响	168
11.3.3	载气种类对气体组分的影响	169
11.3.4	载气种类对合成气生产的影响	169
11.4	放电功率对等离子体热解生物质的影响	170

11.4.1 气体产物随时间的变化情况 170

11.4.2 放电功率对物质转化率的影响 171

11.4.3 放电功率对气体组分的影响 173

11.4.4 放电功率对合成气生产的影响 173

11.5 热解固体产物表面结构分析 174

参考文献 175

第1章 电弧等离子体的产生

1.1 电弧放电等离子体的发展

1.1.1 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）利用高压放电管观察到低气压下的辉光放电现象；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“物质第四态”的存在；1927年，朗缪尔（Langmuir）在研究“被电离气体的离子化状态时，发明“Plasma”这个词，并首次把电离气体称作“等离子体（Plasma）”。

从某种意义上讲，等离子体（Plasma）是气体电离产生大量带电粒子（电子、离子、中性原子、分子、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征：



图1-1 等离子体——物质的第四态

第1章 电弧等离子体的产生

1.1 电弧放电等离子体的发展

1.1.1 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”^[1~3]。

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^[1~3]。

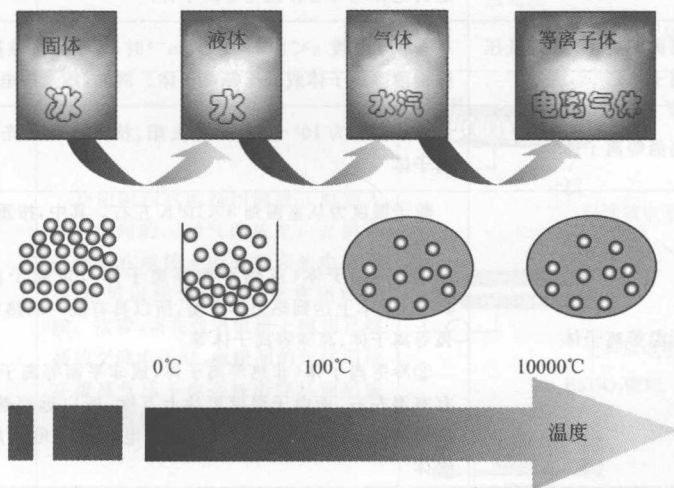


图 1-1 等离子体——物质的第四态

- 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，所以称之为电准中性。
- 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。

1.1.2 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^[1~4]。

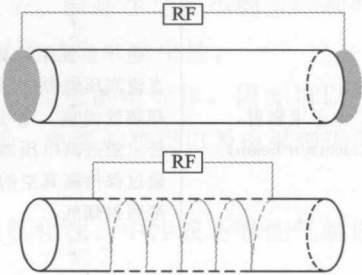
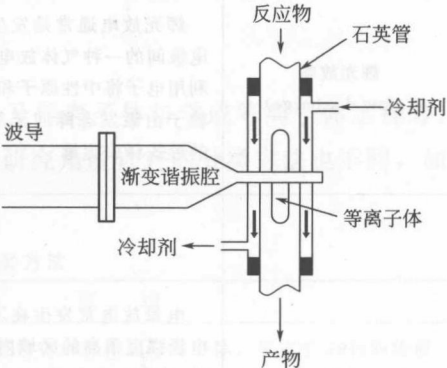
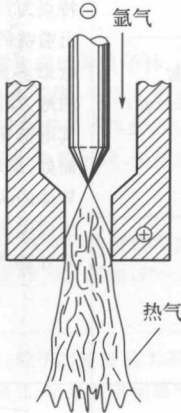
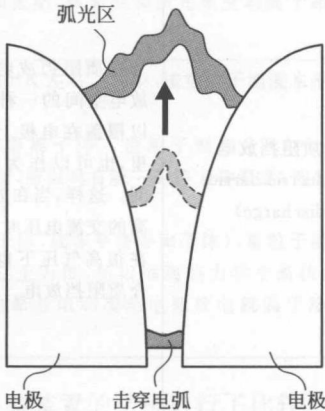
表 1-1 等离子体的分类方法

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以下几种：气体放电法、光电离法和激光辐射电离射线、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 $n > 10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 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， $P = 0.1$ 大气压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 $n < 10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 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，辉光放电就属于次类型
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	粒子温度为从室温到 $3 \times 10^4 \text{ K}$ 左右。其中，按重粒子温度水平还可分为： ①热等离子体(或热平衡等离子体)，重粒子温度 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{ K}$ ，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 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，而电子温度可达上百度，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

表 1-2 对上述低温等离子体发生方法的装置原理和典型装置的结构进行了比较^[1~4]。

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)	辉光放电通常是发生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(例如高压导线的周围,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	直流电晕矩 线筒式 线板式 脉冲电晕放电反应器
介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge)	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	沿面放电型 无声放电型 BaTiO₃颗粒 催化剂 填充放电型

发生方式	工艺原理	典型装置结构
射频放电 (radio frequency discharge)	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 and 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	
微波放电 (microwave discharge)	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	
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(通常是惰性气体氩气),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	

1.1.3 电弧放电的发展及应用

在有关电弧最早的实验中，电弧水平地运行，其灼热气体的浮力引它们向上弯曲，因而名之为“弧”，如图 1-2 所示。1921 年 Beck 首创了大电流碳弧（Beck 弧），从而开创了电弧技术应用的可能性。到了 20 世纪 30 年代，Elenbaas 发展了高压水银灯，与此同时，Elenbaas 和 Heller 发表了电弧弧柱理论，它为弧柱物理和电弧技术的发展奠定了理论基础^[5,6]。20 世纪 50 年代，电弧等离子体开始广泛应用于机械热加工，如等离子体切割、等离子体焊接和等离子体喷涂。60 年代，大功率、长寿命的等离子体发生器得到长足发展，使用电弧等离子体工艺直接制备各种难熔金属、金属陶瓷的粉末和超细粉末取得了很大成功，从而对材料科学的发展作出了贡献。70 年代，世界性能源危机极大地推动了等离子体技术在能源科学中的应用，主要有工程加热、冶炼、煤粉锅炉等离子体点火、煤的气化、同位素分离、高压断路器中的熄弧、电弧灯及磁流体发电等。80 年代起越来越侧重在材料制备和环境保护上，主要有等离子体蒸气沉积、纳米材料合成、有毒有害废物的热解/熔融、材料表面改性处理等，电弧等离子体技术已经走进众多的运用和新开发的阶段^[7,8]。

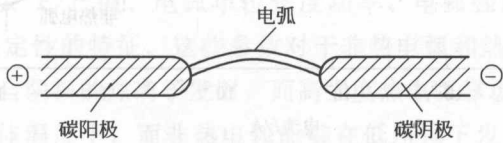


图 1-2 水平自由弧形状示意

1.2 电弧放电的特征

电弧是一种自持放电，它们具有相对低的阴极位降（约 10eV），电弧阴极通过可提供高阴极电流的强烈热电子发射和场致发射机制来发射电子，不需要高阴极位降来增加阴极层中电子量去提供必要的放电电流。电弧阴极通常从放电电流中接受大量的焦耳热，因此能达到非常高的温度，高温导致金属电极的蒸发和腐蚀。在电极之间主要的电弧放电区域称为弧柱，可以是准平衡的和非平衡的，这取决于气体的压力。因此，一个非平衡等离子体不仅可以在辉光放电中生成，还可以在低压电弧中生成；而准平衡等离子体仅仅可以在电弧中生成^[5,8]。

1.2.1 电弧放电的分类

图 1-3 所示的直流低气压放电管的电压—电流特性曲线图说明了电弧区的三个主要区段，包括在点 H 与点 I 之间的由阴极电子发射所引起的辉光—电弧转变区段。在曲线上 H 点附近，此发射由阴极上的异常辉光放电高电流密度区中发生的高热负荷引起。当放电稳定到特性曲线的点 I 时（通常由直流电源及相关电路的内阻抗所确定），电弧通常在电弧区域的非热电弧区段。该区段的特征是总电流在 1~50A 之间，在惰性气体