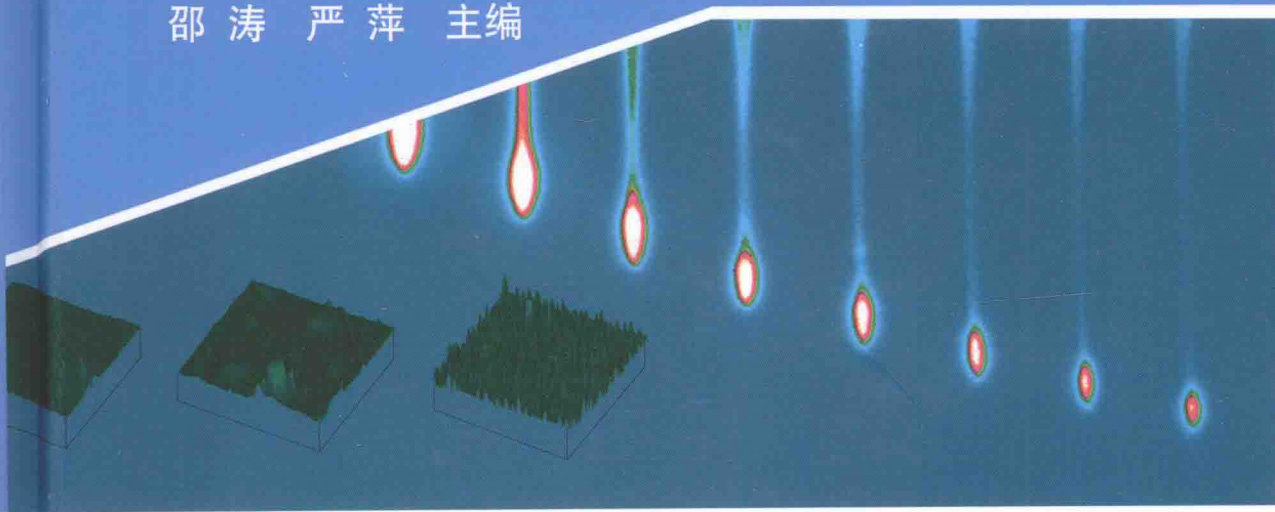


气体放电与等离子体及其应用著作丛书

# 大气压气体放电及其 等离子体应用

邵涛 严萍 主编



科学出版社

气体放电与等离子体及其应用著作丛书

# 大气压气体放电及其 等离子体应用

邵 涛 严 萍 主编

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要阐述大气压放电等离子体的基础理论、数值模拟、诊断方法、放电特性及等离子体应用等。全书分三部分,共 18 章。第一部分基础篇,共 5 章,介绍等离子体基础和气体放电基本理论、流体数值模拟、粒子模拟、放电非线性和等离子体光谱诊断。第二部分特性篇,共 6 章,介绍介质阻挡均匀放电、纳秒脉冲弥散放电、表面介质阻挡放电、等离子体射流、合成射流和射频等离子体。第三部分应用篇,共 7 章,介绍大气压放电等离子体技术在材料表面处理、废水处理、医学应用、流动控制、生物育种、氧化处理、果汁保鲜七个典型领域的应用。

本书适合放电等离子体及其应用领域的科研人员和工程技术人员,以及高等院校相关专业的教师及研究生阅读,也可作为准备从事大气压放电等离子体研究的科技人员和学生了解专业基础的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大气压气体放电及其等离子体应用 / 邵涛, 严萍主编. — 北京: 科学出版社, 2015. 9

(气体放电与等离子体及其应用著作丛书)

ISBN 978-7-03-043744-8

I. ①大… II. ①邵… ②严… III. ①大气压气体放电 IV. ①0461 ②053

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 225247 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

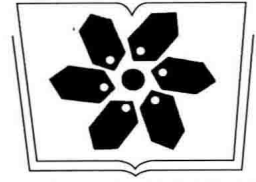
2015 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张:39 3/4

字数:770 000

定价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

## 《气体放电与等离子体及其应用著作丛书》编委会

顾 问 邱爱慈 李应红 王晓钢 孔刚玉

主 编 严 萍 丁立健

副主编 王新新 邵 涛

编 委 (按姓氏笔画排序)

于达仁 万京林 王文春 方 志

卢新培 刘大伟 刘克富 刘定新

任春生 李永东 李兴文 李庆民

吴 云 张远涛 张冠军 欧阳吉庭

罗振兵 罗海云 姚陈果 章 程

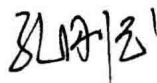
程 诚 曾 嵘 戴 栋

## 序 一

等离子体是物质的第四态,占宇宙空间可见物质总量的 99%,但在大气压、低温的自然界中却较少存在。近年来,人们利用气体放电产生了多种形式的大气压低温等离子体,并成功应用于环境保护、生物医学、材料改性、气流控制等领域。相比于现代工业中广泛应用的低气压低温等离子体,大气压低温等离子体无需真空腔,成本低,操作方便,应用对象更多样化(如可用于临床治疗)。大气压气体放电及其等离子体应用是新兴的重要学科方向,展现了丰富的科学探索价值与广阔的市场应用前景。

这一新兴科学方向在过去 20 年里取得了重要突破,特别是对大气压低温等离子体在稳定性、均匀性、化学活性及其与物质相互作用等方面建立了定量/半定量的理论体系与控制策略,推动了理论与应用向多学科交叉领域发展。虽然如此,大气压低温等离子体往往包含多物理场与复杂化学过程的强烈耦合,一些关键科学与技术问题有待进一步研究,如等离子体的混沌过程、纳秒脉冲放电的发展机制、等离子体中活性粒子的定量诊断、等离子体的生物医学效应等。总结当前大气压气体放电及其等离子体应用的研究成果,指明最前沿的学术问题与发展方向,有助于低温等离子体的科学研究与人才培养事业。

鉴于此,进入 21 世纪以来国际上出版了 10 余部英文专著,而中文专著已成为国内学者共同的期待。《大气压气体放电及其等离子体应用》一书正是在这一期待下应运而生的。在中国科学院电工研究所同仁的组织下,该书汇集了国内十余家科研院所近 10 年的研究成果,从大气压气体放电基础理论、大气压等离子体的关键特性、大气压等离子体应用技术三个层面报道了最新进展,具有系统性、准确性、完整性、先进性的特点。相信该书的出版,可为科技工作者提供一个深入了解大气压气体放电及其等离子体应用的窗口,为青年学生提供教学参考,从而推动我国在该领域研究和应用的发展。



教授/IEEE Fellow

2015 年 5 月于西安交通大学

## 序 二

自 1903 年英国科学家汤生建立了著名的汤生放电理论开始,气体放电作为一个专门的学科得到了不断的发展。气体放电研究的发展与气体放电应用领域的拓展密不可分。早期的大气压气体放电研究主要局限于电力系统,主要研究对象是电晕、流注及电弧。近年来大气压气体放电及其等离子体应用领域不断拓展,尤其在材料表面改性、生物医学、流动控制、环境保护等方面都呈现出诱人的应用前景。因此,相关研究人员非常需要这么一本关于大气压气体放电及其等离子体的理论、研究方法和应用的学术专著。

与其他气体放电专著相比,《大气压气体放电及其等离子体应用》一书的重要特点是它的新颖性和实用性,因为该书各章节分别由国内多年来一直从事相关研究的专家学者撰写,这些作者对国内外相关研究的最新动态和研究成果最为了解,并结合了各自的研究成果和心得。因此,该书对从事相关研究的科技人员、研究生以及本科高年级学生会有很好的参考价值。

相信该书的出版发行对我国大气压气体放电及其等离子体应用领域的教学和科研发展将有很大的促进作用。衷心希望读者能喜欢这本书。



2015 年 5 月

于清华大学气体放电与等离子体实验室

## 前 言

等离子体是固体、液体和气体三态以外的物质第四态,主要由电子、离子、原子、分子、活性自由基等组成。从 19 世纪中叶起,人类开始利用电场和磁场来产生和控制等离子体,当前大气压冷等离子体被广泛应用于臭氧合成、废气处理、辅助燃烧、表面改性、医用灭菌、生物育种等多个领域,已成为研究的热点方向,是集基础研究与应用研究于一体的多学科强交叉的全新研究领域,涵盖物理学、材料学、流体力学、高电压技术、电力电子技术等诸多方向,具有重要的应用预期和广阔的发展前景,其研究成果不仅对民用等离子体技术领域的应用具有重要意义,而且在国防和科学研究中起着重要的作用。

目前国内出版的有关气体放电及等离子体方面的书籍相对较少,主要的参考书目是清华大学杨津基于 1983 年在科学出版社编著出版的国内第一本《气体放电》,复旦大学徐学基和诸定昌于 1996 年在复旦大学出版社编著出版的《气体放电物理》,以及武占成、张希军和胡有志于 2012 年在国防工业出版社编著出版的《气体放电》,非常缺乏展现我国大气压放电和等离子体应用方面的最新科技研究成果和发展动态的学术著作。2010~2012 年,中国科学院电工研究所连续组织研讨了大气压放电等离子体及应用的学术研讨会。其中,2012 年 11 月 5~6 日,由中国科学技术协会主办,中国电工技术学会承办的以“大气压放电等离子体关键技术与应用前景”为主题的中国科协第 66 期新观点新学说学术沙龙在中国科学院电工研究所成功举行。2013 年,在多位领域专家的建议和支持下,中国科学院电工研究所组织国内同行编写了《大气压气体放电及其等离子体应用》一书。本书汇集国内 14 家科研院所在大气压放电等离子体研究领域的应用进展,给相关科技工作者提供一个深入了解国内大气压低温等离子体及其放电应用的窗口,在材料组织和全书编写过程中努力体现以下特色:①内容尽可能全面和系统,力图囊括本领域的基础知识和基本概念;②尽可能汇集近年来国内相关研究单位在大气压放电等离子体领域取得的重大进展和重要成果,并附有参考文献以利于读者追踪;③各章节的编写尽量做到内容前后连贯、结构紧凑,避免概念重复。全书力求通俗易懂并具有资料可查阅性和实用性,以适合放电等离子体及其应用领域的科研人员和工程技术人员阅读,也可作为相关专业学生的教学参考。作者期待以本书作为起点,后续能形成放电等离子体基础研究及在各个应用领域的系列专著性科技丛书。

本书借鉴国外等离子体方面书籍的分章著作出版模式,由中国科学院电工研究所邵涛和严萍担任主编,邀请国内有关同行撰写章节。本书在组织材料上,力求



做到系统性、准确性、完整性、先进性,各个章节均为作者所著。全书分为基础篇、特性篇、应用篇三部分,共 18 章。各章节负责编写的人员分别是:第 1 章,欧阳吉庭(北京理工大学);第 2 章,张远涛(山东大学);第 3 章,李永东和刘纯亮(西安交通大学);第 4 章,戴栋(华南理工大学);第 5 章,杨德正和王文春(大连理工大学);第 6 章,罗海云和王新新(清华大学);第 7 章,章程等(中国科学院电工研究所);第 8 章,车学科等(装备学院)和邵涛(中国科学院电工研究所);第 9 章,江南和曹则贤(中国科学院物理研究所);第 10 章,罗振兵等(国防科技大学);第 11 章,刘大伟(华中科技大学);第 12 章,方志(南京工业大学)和邵涛(中国科学院电工研究所);第 13 章,李杰等(大连理工大学);第 14 章,刘定新(西安交通大学);第 15 章,吴云等(空军工程大学);第 16 章,李和平等(清华大学);第 17 章,张芝涛等(大连海事大学);第 18 章,张若兵等(清华大学深圳研究生院)。全书的修改和统稿工作由邵涛完成。

本书各章节的编写人员均为国内长期从事该领域研究的专家学者,并获得了来自多个国家自然科学基金重点项目/面上项目、国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家科技支撑计划和省市科技计划及国际合作项目等多方面的资助;各章节撰写人员主要是目前工作在科研一线的青年研究学者,其中三位全国优秀博士学位论文获得者,一位中国科学院优秀博士学位论文获得者。

作者对为本书作出过贡献的所有同志和被参阅过的文献作者表示衷心的感谢!本书的出版得到了国家自然科学基金优秀青年科学基金(51222701)和 973 计划(2014CB239505)资助。

本书由国内多家单位的多位专家学者共同参与完成,各部分写作风格亦不尽相同,不足与疏漏之处在所难免,恳请读者和同行予以批评指正。

邵 涛 严 萍

2015 年 5 月于北京中科院电工所

# 目 录

序一  
序二  
前言

## 第一篇 放电及等离子体基础

<b>第 1 章 等离子体基础和气体放电理论(欧阳吉庭)</b> .....	3
1.1 引言 .....	3
1.2 等离子体的一般性质 .....	4
1.2.1 离子密度和电离度 .....	4
1.2.2 电子温度和离子温度 .....	5
1.2.3 等离子体的准电中性 .....	5
1.2.4 等离子体鞘 .....	8
1.2.5 放电等离子体中的基本过程 .....	9
1.2.6 带电粒子的迁移和扩散 .....	11
1.3 气体放电理论 .....	14
1.3.1 汤生放电理论 .....	15
1.3.2 流注放电理论 .....	19
1.3.3 汤生放电与流注击穿之间的过渡 .....	26
1.4 大气压放电等离子体 .....	27
1.5 小结 .....	29
参考文献 .....	30
<b>第 2 章 大气压射频气体放电数值模拟(张远涛)</b> .....	31
2.1 引言 .....	31
2.2 常用理论与算法 .....	34
2.2.1 描述大气压容性射频放电的基本方程 .....	34
2.2.2 以电流为输入参数的流体模型 .....	38
2.2.3 以电压为输入参数的流体模型 .....	40
2.2.4 以功率为输入参数的流体模型 .....	42
2.2.5 粒子种类与反应集合的选择 .....	43
2.3 放电物理特性的数值模拟 .....	45

2.3.1	放电模式及其转化	45
2.3.2	频率效应与尺度效应	49
2.3.3	射频微等离子体的结构	51
2.3.4	脉冲调制射频放电等离子体	52
2.4	放电化学活性的数值模拟	56
2.4.1	主要活性粒子的演化特性	56
2.4.2	活性粒子产生的频率与尺度效应	60
2.4.3	脉冲调制对活性粒子的影响	62
2.5	小结	63
	参考文献	64
<b>第3章</b>	<b>纳秒脉冲放电粒子模拟(李永东 刘纯亮)</b>	<b>68</b>
3.1	引言	68
3.2	粒子模拟技术	70
3.2.1	粒子模拟的基本原理	70
3.2.2	纳秒脉冲放电物理过程的建模方法	77
3.3	模拟计算与分析	80
3.3.1	流注放电产生逃逸电子的粒子模拟	80
3.3.2	纳秒脉冲电晕放电粒子模拟	89
3.4	小结	95
	参考文献	96
<b>第4章</b>	<b>大气压介质阻挡放电中的分岔与混沌现象(戴栋)</b>	<b>99</b>
4.1	引言	99
4.2	不对称周期一放电	102
4.2.1	实验装置与步骤	104
4.2.2	实验结果与分析	105
4.3	倍周期分岔及通往混沌路径	112
4.4	准周期态放电	116
4.5	李雅普诺夫指数计算及混沌现象的判定	119
4.5.1	李雅普诺夫指数	120
4.5.2	时间序列最大李雅普诺夫指数的计算方法	121
4.5.3	小波分解	122
4.5.4	计算与分析	123
4.6	结论	127
	参考文献	127
<b>第5章</b>	<b>脉冲放电等离子体发射光谱诊断(杨德正 王文春)</b>	<b>130</b>

5.1 引言 .....	130
5.2 国内外研究现状 .....	132
5.3 针板电极结构纳秒脉冲放电等离子体发射光谱诊断 .....	134
5.3.1 光谱诊断实验装置 .....	134
5.3.2 放电图像及发射光谱 .....	137
5.3.3 电压极性和脉冲峰值对等离子体发射光谱的影响 .....	140
5.3.4 电晕放电发射光谱强度空间分布 .....	141
5.4 板-板电极结构大气压 DBD 等离子体发射光谱诊断 .....	143
5.4.1 正弦交流驱动下 He 均匀放电发射光谱 .....	143
5.4.2 大气压空气纳秒脉冲放电等离子体发射光谱 .....	146
5.4.3 添加 Ar、He 及 O <sub>2</sub> 对氮气放电发射光谱的影响 .....	147
5.5 等离子体温度测量与诊断 .....	151
5.5.1 振动温度与转动温度诊断原理 .....	151
5.5.2 电极间隙、脉冲峰值电压和脉冲宽度对振动温度和转动温度的影响 .....	154
5.6 小结 .....	157
参考文献 .....	158

## 第二篇 放电及等离子体特性

<b>第 6 章 大气压介质阻挡均匀放电(罗海云 王新新)</b> .....	163
6.1 DBD 研究概况 .....	163
6.1.1 引言 .....	163
6.1.2 DBD 的研究历史与现状 .....	165
6.1.3 均匀放电的界定与必要条件 .....	169
6.2 大气压惰性气体介质阻挡均匀放电特性 .....	172
6.2.1 放电特性与放电属性 .....	172
6.2.2 放电演化过程 .....	175
6.2.3 放电光谱及彭宁电离 .....	181
6.3 大气压氮气介质阻挡均匀放电 .....	184
6.3.1 均匀放电的获得 .....	184
6.3.2 放电属性 .....	186
6.3.3 工作区间与击穿电压 .....	187
6.4 大气压空气介质阻挡均匀放电 .....	188
6.4.1 驻极体薄膜+丝网电极结构 .....	188
6.4.2 使用陶瓷片作为介质材料 .....	192
6.5 小结 .....	195

参考文献	196
<b>第7章 大气压下纳秒脉冲弥散放电(章程 邵涛 严萍)</b>	<b>200</b>
7.1 引言	200
7.2 国内外研究进展	201
7.3 纳秒脉冲弥散放电特性研究	204
7.3.1 纳秒脉冲气体放电特性	204
7.3.2 弥散放电影响因素分析	207
7.3.3 弥散放电的维持电压范围	212
7.4 纳秒脉冲弥散放电的电特性分析	215
7.4.1 传导电流的计算	215
7.4.2 传导电流影响因素分析	219
7.5 纳秒脉冲弥散放电的机理探索	221
7.5.1 弥散放电与逃逸电子	221
7.5.2 弥散放电与粒子密度	224
7.5.3 弥散放电形成机理	226
7.6 小结	229
参考文献	230
<b>第8章 表面介质阻挡放电流动控制(车学科 聂万胜 邵涛)</b>	<b>234</b>
8.1 引言	234
8.1.1 技术原理	234
8.1.2 实验研究方法	237
8.1.3 数值模拟方法	238
8.2 表面介质阻挡放电流动控制机理	242
8.2.1 等离子体流动作用机理	242
8.2.2 等离子体体积力产生机理	243
8.3 临近空间纳秒脉冲放电等离子体	248
8.3.1 纳秒脉冲放电过程	248
8.3.2 高度对放电的影响	251
8.4 地面纳秒脉冲放电等离子体	256
8.4.1 施加电压、脉冲频率及电极参数对放电特性的影响	256
8.4.2 放电传输电荷及脉冲能量特性	259
8.5 地面亚微秒脉冲放电等离子体	262
8.5.1 诱导漩涡的产生过程	262
8.5.2 脉冲重复频率和数量对诱导漩涡的影响	266
8.6 小结	268

参考文献	269
<b>第 9 章 大气压冷等离子体射流(江南 曹则贤)</b>	272
9.1 引言	272
9.2 等离子体射流的基本特性	276
9.2.1 实验装置	276
9.2.2 氦气石英管共轴 DBD 的基本电特性	277
9.2.3 电晕放电等离子体射流	280
9.2.4 电荷溢流现象	282
9.3 等离子体子弹传输特性	284
9.4 等离子体-气流相互作用	289
9.5 氦气与氩气冷等离子体射流的比较	291
9.6 彭宁效应在冷等离子体射流中的作用	295
9.6.1 实验	296
9.6.2 讨论	299
9.7 小结	301
参考文献	302
<b>第 10 章 等离子体高能合成射流(夏智勋 罗振兵 王林)</b>	306
10.1 引言	306
10.2 设计思想	308
10.3 国内外研究进展	310
10.4 等离子体高能合成射流数值模拟	312
10.4.1 数值模拟方法	313
10.4.2 能量效率及工作特性	316
10.4.3 参数影响特性	320
10.5 等离子体高能合成射流实验	323
10.5.1 实验系统与方法	323
10.5.2 激励器放电特性	325
10.5.3 射流流场特性及参数影响规律	327
10.6 三电极等离子体高能合成射流激励器	334
10.6.1 激励器设计及工作过程	334
10.6.2 不同环境气压下放电特性	336
10.6.3 不同环境气压下流场特征	338
10.7 小结	340
参考文献	341
<b>第 11 章 射频介质阻挡放电与脉冲射频等离子体(刘大伟)</b>	345

11.1	引言	345
11.2	国内外研究现状	346
11.3	射频绝缘介质阻挡放电	348
11.3.1	电子加热机制	348
11.3.2	$\gamma$ 模式下的扩散放电模式	352
11.3.3	电特性及动态过程	356
11.3.4	射频介质阻挡放电同金属电极放电对比	360
11.3.5	射频介质阻挡放电的模拟计算	364
11.4	脉冲射频等离子体	368
11.4.1	脉冲调制射频介质阻挡辉光放电模式	368
11.4.2	脉冲放电模式转变和脉冲射频容性耦合等离子体 $O(^5P_1)$ 产生机制	372
11.4.3	脉冲射频等离子体射流推进特性	377
11.5	小结	380
	参考文献	381

### 第三篇 放电及等离子体应用

<b>第12章</b>	<b>大气压放电等离子体在材料表面改性中的应用(方志 邵涛)</b>	385
12.1	引言	385
12.2	等离子体材料表面改性的方法及原理	387
12.3	国内外研究进展	390
12.4	DBD 表面亲水改性	392
12.4.1	丝状模式 DBD 改性	392
12.4.2	均匀模式 DBD 改性	395
12.4.3	功率密度对改性效果的影响	399
12.4.4	纳秒脉冲下丝状和均匀模式改性效果对比	402
12.5	DBD 表面憎水性改性	404
12.5.1	提高玻璃表面憎水性	404
12.5.2	提高有机玻璃表面憎水性	408
12.6	等离子体改性机理探索	411
12.6.1	亲水性改性机理	411
12.6.2	憎水性改性机理	413
12.7	小结	414
	参考文献	415
<b>第13章</b>	<b>大气压放电等离子体在废水处理中的应用(李杰 商克峰 鲁娜 吴彦)</b>	418

13.1	引言	418
13.2	液体放电等离子体过程	419
13.2.1	液体电击穿过程	419
13.2.2	液体电击穿机理	420
13.3	放电等离子体水处理研究进展	421
13.3.1	放电等离子体水处理物理与化学特性	421
13.3.2	放电等离子体水处理	424
13.4	几种放电等离子体水处理方法	425
13.4.1	水中多针-板脉冲放电等离子体水处理	425
13.4.2	水中脉冲放电等离子体流注诱导 $\text{TiO}_2$ 提高水处理效果	427
13.4.3	气液联合脉冲放电等离子体水处理	432
13.4.4	介质阻挡型气相放电等离子体活性物质注入水处理	435
13.4.5	活性炭吸附-等离子体氧化联合处理废水	437
13.5	小结	441
	参考文献	442
<b>第 14 章</b>	<b>大气压等离子体在医学中的应用(刘定新)</b>	<b>446</b>
14.1	引言	446
14.2	发展历史	448
14.3	基本原理	450
14.3.1	等离子体细胞生物学基础	450
14.3.2	等离子体生物化学基础	453
14.3.3	等离子体动物与临床试验基础	459
14.3.4	医用等离子体源及其基本特性	463
14.4	研究现状与前沿问题	467
14.4.1	医用等离子体化学特性的定量分析与控制	467
14.4.2	等离子体生物效应的选择性效果及其分子机制	470
14.4.3	等离子体医学应用与等离子体源的发展现状	472
14.5	小结	477
	参考文献	478
<b>第 15 章</b>	<b>等离子体流动控制在改善气动特性中的应用(吴云 李应红 梁华)</b>	<b>484</b>
15.1	引言	484
15.2	国内外研究现状	485
15.3	DBD 等离子体气动激励特性	486
15.3.1	正弦波 DBD 等离子体气动激励特性	487



15.3.2	纳秒脉冲 DBD 等离子体气动激励特性 .....	491
15.4	提高抑制流动分离能力的等离子体冲击流动控制原理 .....	504
15.4.1	基本原理 .....	504
15.4.2	等离子体冲击气动激励机理 .....	505
15.4.3	提高抑制流动分离能力的数值仿真 .....	505
15.4.4	实验验证 .....	509
15.5	小结 .....	514
	参考文献 .....	515
<b>第 16 章</b>	<b>大气压射频辉光放电等离子体在生物诱变育种中的应用(李和平 邢新会 张翀)</b> .....	<b>519</b>
16.1	概述 .....	519
16.1.1	大气压放电等离子体简介 .....	519
16.1.2	微生物诱变育种的发展趋势及对育种技术的要求 .....	521
16.2	大气压射频辉光放电等离子体源物理特性研究 .....	525
16.2.1	等离子体产生方法 .....	525
16.2.2	环境空气对等离子体特性影响 .....	528
16.3	大气压射频辉光放电等离子体射流生物学效应 .....	533
16.3.1	等离子体射流对生物体遗传物质的作用效果 .....	534
16.3.2	等离子体射流对蛋白质的作用效果 .....	537
16.4	常压室温等离子体诱变育种研究进展 .....	538
16.4.1	常压室温等离子体生物诱变仪研制 .....	539
16.4.2	常压室温等离子体诱变育种应用 .....	540
16.5	小结 .....	544
	参考文献 .....	544
<b>第 17 章</b>	<b>大气压分区激励等离子体反应器阵列及其高级氧化技术应用(张芝涛 白敏冬 俞哲 田一平)</b> .....	<b>548</b>
17.1	引言 .....	548
17.2	国内外研究现状 .....	549
17.3	大气压平板等离子体反应器及其特性 .....	550
17.3.1	平板等离子体反应器 .....	550
17.3.2	放电模式 .....	560
17.3.3	尺度放大效应及其成因 .....	573
17.3.4	分区激励技术 .....	574
17.4	高级氧化技术应用 .....	576
17.4.1	高级氧化技术应用模式 .....	576