国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 大气压非平衡等离子体射流

## Ⅱ生物医学应用

ATMOSPHERIC PRESSURE NONEQUILIBRIUM PLASMA JET
II BIOMEDICAL APPLICATIONS

卢新培 著




華中科技大學出版社
http://www.hustp.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 大气压非平衡等离子体射流

## Ⅱ 生物医学应用

ATMOSPHERIC PRESSURE NONEQUILIBRIUM PLASMA JET

Ⅱ BIOMEDICAL APPLICATIONS

卢新培 著

华中科技大学出版社
http://www.hustp.com
中国·武汉

## 内 容 简 介

等离子体诱导的生物效应与其作用于生物体的剂量紧密相关，低剂量处理可以促进细胞的增殖与分化，中等剂量处理可以诱导细胞的凋亡，高剂量处理则导致细胞坏死。本书介绍了我们采用低剂量处理诱导干细胞分化，中等剂量处理诱导癌细胞凋亡，高剂量处理杀灭各种致病菌、真菌、病毒的研究成果，并对几个核心科学问题，即活性成分穿透组织的深度、等离子体对细胞的遗传毒性和诱变特性、等离子体剂量的科学定义等的研究成果进行了介绍。

**图书在版编目(CIP)数据**

大气压非平衡等离子体射流. Ⅱ，生物医学应用/卢新培著. —武汉：华中科技大学出版社，2021.11

ISBN 978-7-5680-6901-4

Ⅰ.①大… Ⅱ.①卢… Ⅲ.①非平衡等离子体-等离子体射流-应用-生物医学工程-研究 Ⅳ.①O53 ②R318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 097916 号

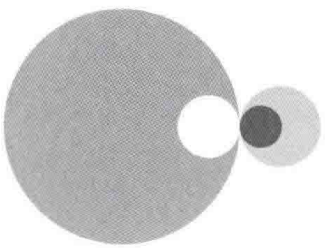
**大气压非平衡等离子体射流：Ⅱ. 生物医学应用**

Daqiya Feipingheng Dengliziti Sheliu：Ⅱ. Shengwu Yixue Yingyong

卢新培 著

策划编辑：徐晓琦
责任编辑：徐晓琦 曾小玲
装帧设计：原色设计
责任校对：张会军
责任监印：周治超
出版发行：华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话：(027)81321913
武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编：430223
录 排：武汉市洪山区佳年华文印部
印 刷：湖北新华印务有限公司
开 本：710mm×1000mm 1/16
印 张：17.75
字 数：285 千字
版 次：2021 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
定 价：148.00 元

本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线：400-6679-118 竭诚为您服务
华中出版
版权所有 侵权必究



# 致谢

本书是我从2007年回国以来与我的所有学生及合作者一起工作的部分研究内容的一个总结。这些学生包括现在工作于重庆大学的熊青博士，华中科技大学的鲜于斌博士、聂兰兰博士、熊紫兰博士、程鹤博士，南京航空航天大学的吴淑群博士，加州大学伯克利分校的裴学凯博士，北京市神经外科研究所的闫旭博士，武汉科技大学的赵沙沙博士，华中科技大学同济医学院附属同济医院的宋珂博士、石琦博士，郑州大学第一附属医院的杜田丰博士，成都市第二人民医院的杨平，深圳市宝安区妇幼保健院的周鑫才博士，湖北省十堰市太和医院的刘得玺博士，以及邱云昊博士、谭笑博士、李丛云博士、苟建民博士、涂亚龙博士、邹长林博士，硕士岳远富、唐志渊、余飞、程素霞、卢佳敏、曹星、徐海涛，在读博士生吴帆、李嘉胤、刘凤梧、李志宇、晋绍辉、吕洋、雷昕雨、李旭，在读硕士生杨莹、徐家兴、彭布成、刘嘉林、毛鹏飞等。在此对他们为本书所做的贡献表示感谢。

这里还要特别对2007年以来一直和我合作的华中科技大学生命科学与技术学院的何光源教授、华中科技大学同济医学院附属同济医院的曹颖光教授、华中科技大学同济医学院附属协和医院的冯爱平教授、华中科技大学电气与电子工程学院的刘大伟教授表示由衷的感谢。他们长期以来的大力支持，才使得本书出版成为可能。

此外，在本书的撰写过程中得到了刘大伟博士、熊青博士、鲜于斌博士、聂兰兰博士、程鹤博士、吴淑群博士、闫旭博士、赵沙沙博士、段江伟博士、马明宇

博士，以及吴帆、李嘉胤、刘凤梧、雷昕雨、李志宇等的帮助，在此对他们表示诚挚的感谢。

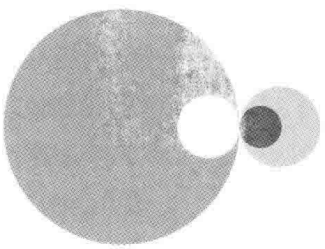
还要感谢我的导师潘垣院士这些年来对我的鼓励和帮助，他对我不厌其烦的教诲及他咬定青山不放松的科研精神使我终生受益。在此感谢华中科技大学各级领导和电气与电子工程学院历任院长、书记，特别是段献忠教授、冯征书记、康勇教授、于克训书记、文劲宇教授、陈晋书记，没有他们给予我的一次次有求必应的帮助，为我提供研究平台，我也就无法安心从事我所喜爱的研究工作。

尤其感谢我的朋友孙明江、邵惠玉夫妇在这近半年疫情期间对我的关心和帮助，让我可以完全投入到本书的撰写之中。

最后还要感谢我的家人，是他们这么多年对我的无私奉献，使得我有时间和精力投入到我所喜爱的研究中。

作　者

2020 年 6 月 25 日端午节于黟县



# 序

2020年注定是不平凡的一年，一转眼我回华中科技大学工作已经十几年了。回顾这些年，虽有过不少迷茫，但更多的是快乐，特别是这么多年和学生们一起在实验中获得的一次次的小惊喜总是那样令人难忘。

今年由于疫情我被困老家，得以陪伴母亲以尽孝道，弥补这几十年在外不能尽孝的缺憾，同时静心写书再合适不过了，因此思考着能否把这些年的工作进行一次梳理，著书出版；但又有点诚惶诚恐，毕竟本人的水平有限，之前多次被他人劝说著书都被自己坚决否定了。因为要写一本全面介绍国内外大气压等离子体射流研究最新成果方面的书，本人深知着实没有那个能力，但细想能否把该书定位为我们课题组这些年所做工作的一个总结呢？虽然所做工作不成体系，但本人所幸这些年坚持只做了一件事情，也就是研究大气压非平衡等离子体射流（N-APPJ）及其生物医学应用，这也还算别有特色。因此将这些内容进行梳理、归纳总结也算在我的能力范围之内。

本书见证了我青春岁月的日日夜夜、实验的点点滴滴、情绪的起起落落，是我的研究团队热情与心血的结晶。

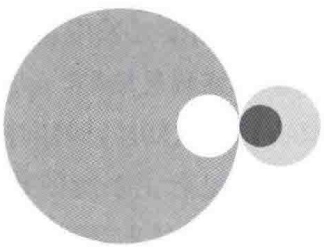
本书包括两册，第一册介绍N-APPJ的物理基础，包括我们课题组研制的多种N-APPJ装置，各种实验参数对N-APPJ物理特性的影响，我们发现的N-APPJ所呈现出的诸多有趣的新现象，以及N-APPJ所发射的真空紫外光谱和N-APPJ放电可重复性的讨论，最后还介绍了几种大气压非平衡等离子体诊断方法。

第二册介绍了我们在 N-APPJ 生物医学应用方面所做的工作，主要包括围绕口腔疾病利用 N-APPJ 处理病菌、真菌、病毒方面的研究，围绕伤口愈合方面的研究，以及 N-APPJ 诱导癌细胞凋亡和促进干细胞分化方面的工作。本书还针对等离子体医学的几个核心问题，对我们在这方面所做的工作进行了介绍，具体包括等离子体射流所产生的各种活性粒子在生物组织中的穿透问题，N-APPJ 的生物安全性问题，等离子体剂量的科学定义问题。

由于水平有限，本人虽然对书中的内容进行了多次核对，但书中错误之处仍在所难免，因此恳请大家批评指正，以期在将来有机会再版时更正。

作　者

2020 年 6 月 25 日端午节于黟县



# 前言

大气压非平衡等离子体射流(N-APPJ)是在开放空间而不是在两个电极间隙之间产生大气压非平衡等离子体,这就使得被处理对象不受空间尺寸的限制,从而大大拓展了其应用范围。N-APPJ 的研究同时极大地推动了其在生物医学方面的应用,并形成了一个新兴的研究方向,即等离子体医学。等离子体医学是研究等离子体所产生的各种活性成分,包括各种自由基、带电粒子、激发态粒子、紫外线、电场等对生物体的综合效应的一门学科。

大气压非平衡等离子体射流与传统的流注放电有许多共同点,如它的推进速度与流注推进速度在一个数量级,它所产生的空间电荷会对电场产生畸变,光电离在其推进过程中扮演着重要的角色等。但人们在研究 N-APPJ 时又发现了传统流注放电所未观测到的许多新现象。

本书分为两册,其中第一册介绍了我们在 N-APPJ 相关物理机理的研究方面所做的一些工作,第二册介绍了我们在 N-APPJ 用于生物医学应用方面所做的一些基础性研究。第一册第 1 章简要介绍针对各种具体应用研制的几种惰性气体 N-APPJ 和空气 N-APPJ。第 2 章较为系统地介绍了各种实验参数对 N-APPJ 的影响的研究结果。第 3 章对 N-APPJ 中所观测到的诸多新现象做了详细的分析,包括 N-APPJ 随机推进与可重复推进模式之间的转换、人体可任意触摸的等离子体射流激发次级等离子体射流的接力现象、一个电压脉冲出现的多子弹现象、射流呈现的羽毛状现象、蛇形推进现象、射流的分节现象等,以及在外加电压消失后的放电现象和无外加磁场的螺旋状等离子体

现象。

大约一个世纪前流注理论提出，正流注推进过程中，流注头部的光电离是二次电子崩的主要电子来源。1982 年，Zheleznyak 提出了较为完整的空气放电光电离假设。他认为在空气等 $N_2/O_2$ 混合气体放电中，辐射来源主要是氮分子三种激发态 $b^1\Pi_u$、$b'^1\Sigma_u^+$ 和 $c'^1_4\Sigma_u^+$ 在 98～102.5 nm 范围内的辐射，但一直未在大气压放电中测量到该辐射。第一册第 4 章介绍了我们最近采用真空差分窗口首次对大气压等离子体射流及空气放电的 VUV 光谱测量结果。

N-APPJ 的一个显著特点是其子弹推进模式往往具有高可重复性，即其时间和空间的确定性。第一册第 5 章对国内外相关研究工作进行了系统的梳理，并根据我们的研究成果，指出了实现放电可重复性所需要满足的条件，最后提出了高种子电子密度放电理论。

研究大气压非平衡等离子体的一个难点是诊断其各种参数。第一册最后一章对几种适合于大气压非平衡等离子体的诊断方法做了较为详细的介绍，包括利用辐射光谱法诊断气体的温度、电子密度和温度，以及空间电场分布；利用毫米波干涉诊断电子的密度和温度；利用激光诱导荧光获得 OH 和 O 原子密度；利用激光散射获得电子温度和密度，以及中性粒子密度。该章最后介绍了利用液相化学分析方法测量液体中羟基(OH)、单线态氧($^1O_2$)、超氧阴离子($\cdot O_2^-$)、过氧亚硝酸(ONOOH)、双氧水($H_2O_2$)、亚硝酸盐($NO_2^-$)和硝酸盐($NO_3^-$)的方法。

本书第二册介绍了大气压等离子体射流在生物医学应用方面的研究成果。第二册第 2 章首先对 N-APPJ 用于杀灭典型的口腔内的致病菌、细菌生物膜、混合菌种生物膜、真菌和病毒的研究成果进行了较为系统、全面的介绍，然后介绍了利用 N-APPJ 活化油促进伤口愈合的研究成果。

研究发现，在合适的处理条件下，N-APPJ 可以诱导癌细胞凋亡，与此同时对正常的细胞无显著影响，这就使得 N-APPJ 因具有在癌症治疗方面的潜在应用价值而受到研究者的关注。第二册第 3 章首先介绍了 N-APPJ 对质粒 DNA 的影响、N-APPJ 对多种肿瘤细胞系的增殖抑制作用，探讨了 N-APPJ 在各种癌症治疗中的应用潜力；然后分别介绍了 N-APPJ 对 HepG2 细胞形态、细胞染色质、细胞线粒体膜电位、细胞凋亡率的影响；最后介绍了 N-APPJ 诱导细胞凋亡机制的研究成果，包括氧化/硝化应激与 N-APPJ 诱导 HepG2 细胞凋亡的关系，内质网应激与 N-APPJ 诱导 HepG2 细胞凋亡的关系等。

神经系统疾病严重危害着人类健康，中枢神经系统修复成为临床医学的热点和难点；替代丢失的神经细胞，修复损伤的神经网络结构，促进神经功能的恢复，是治疗这类疾病的一种方法。等离子体中的重要活性粒子——一氧化氮(NO)是一种重要的神经递质，在神经系统的发育、信号传递中发挥重要作用。在第二册第4章中，给出了大气压非平衡等离子体对小鼠C17.2-NSCs细胞分化影响的研究成果，同时使用细胞形态分析、免疫荧光技术、Western Blot和qRT-PCR等细胞生物学和分子生物学技术研究了大气压非平衡等离子体对小鼠C17.2-NSCs细胞分化的影响，鉴定所产生的神经元亚型，并探讨NO及下游信号通路对细胞分化的调控机制。

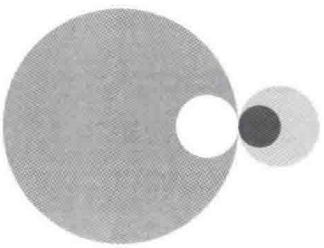
等离子体产生的RONS能在生物组织中穿透多深是等离子体医学重要的基础课题。研究该课题一方面可以帮助人们更加深入地理解等离子体医学的基本原理，另一方面也能为进一步优化等离子体医学应用时的等离子体源的各种参数，甚至拓宽其医学应用领域提供参考和指导。第二册第5章分别介绍了我们采用肌肉组织、皮肤组织、皮肤角质层为组织模型，研究RONS穿透这些组织模型的情况。由于接收池内的液体种类可能会对RONS浓度的测量产生影响，因此该章还探究了接收池内的液体种类对穿透组织的长寿命RONS浓度的影响。此外，为了从微观上理解RONS穿透皮肤角质层的行为，该章还介绍了采用分子动力学模拟的方法模拟并分析等离子体产生的主要RONS穿透角质层双脂质分子层的研究成果。

N-APPJ直接作用于人体时对人体可能造成的热损伤、电损伤、紫外辐射等潜在的直接物理伤害，以及放电过程中产生的$O_3$等气体可能对人体造成的伤害比较容易评估，也是早期N-APPJ安全性研究所关注的。除了直接的物理损伤，N-APPJ对生物体还可能存在潜在的生物安全风险。例如，N-APPJ与细胞或组织相互作用过程中生成的各种RONS在生物体中的作用效果存在着明显的剂量依赖效应，如果处理剂量过高，就可能会导致一系列病理生理效应，甚至可能具有致突变的风险，造成细胞遗传的不稳定性。针对N-APPJ的生物安全性问题，第二册第6章首先阐述了通过化学方法配制不同浓度的长寿命活性粒子($H_2O_2$、$NO_2^-$和$NO_3^-$)溶液及其组合，得到了这些长寿命粒子对人体正常细胞的细胞毒性的实验结果；接着，为了深入了解等离子体处理介质(PAM)在肝癌治疗中的应用前景，系统研究了PAM对肝癌细胞的选择性杀伤作用；然后系统比较了使用化学方法配制的RONS溶液、PAM和N-APPJ

直接处理三种方法对正常细胞和癌细胞的毒性；最后，为了确认 N-APPJ 的长期安全性，还介绍了 N-APPJ 对正常细胞的遗传毒性和诱变特性的实验结果。

“等离子体剂量”是等离子体生物医学领域的重要基本概念之一。尽管国内外研究者在等离子体生物医学领域开展了大量的基础和应用研究，然而，关于“什么是等离子体剂量”这一基本问题仍没有一个被广泛接受的科学定义。科学定义“等离子体剂量”是开展等离子体临床应用的基础和前提。正如临床药理学中所讨论的“剂量-效应”关系，在利用等离子体处理特定对象时，同样需要回答“等离子体剂量”与“生物效应”的对应关系。由于 RONS 是主导等离子体生物效应的关键活性粒子，并且在细胞的病理过程中起重要作用，因此基于 RONS 定义等离子体剂量就成了一种自然的选择。基于此，第二册第 7 章提出等效总氧化势（*ETOP*）作为等离子体剂量的定义，其值代表等离子体对其生物效应的总贡献。进一步地，该章通过构建拟合模型研究了 *ETOP* 作为等离子体剂量的可行性。结果表明，*ETOP* 可以很好地预测 kINPen® 和 Flat-Plaster 的杀菌效果。此外，为了进一步了解 *ETOP* 作为等离子体剂量的可行性，我们采用自制的一种典型的 N-APPJ 装置处理了干燥的金黄色葡萄球菌，并结合诊断和模拟方法计算了 *ETOP*。相应的拟合结果同样表明，*ETOP* 与抑菌效率之间存在线性关系，进一步验证了 *ETOP* 作为等离子体剂量的适用性。

本书是我们最新研究成果的一个总结，故有许多科学问题还有待今后进一步研究。如“高种子电子密度放电理论”是否适用于空气放电，这仍有待进一步实验与理论研究。再比如用总氧化势来定义等离子体剂量，这里做了许多简化，在未来还需要考虑各种活性粒子的权重因子、带电粒子的影响、电场效应以及各种液相活性粒子等。希望本书的内容能起到抛砖引玉的作用，从而推进等离子体射流及其生物医学应用的发展。



# 目录


**第 1 章　绪论　/1**

1.1　引言　/1
1.2　等离子体对细菌的消杀　/1
1.3　等离子体对病毒的消杀　/3
1.4　等离子体治疗伤口　/5
1.5　大气压非平衡等离子体射流诱导癌细胞凋亡　/5
1.6　大气压非平衡等离子体射流促进神经干细胞的增殖与分化　/6
1.7　活性氮氧粒子穿透组织的深度　/8
1.8　大气压非平衡等离子体的生物安全性　/8
1.9　等离子体的剂量　/10

**第 2 章　大气压非平衡等离子体射流灭活口腔内致病微生物及促进伤口愈合　/16**

2.1　引言　/16
2.2　大气压非平衡等离子体射流各组分对微生物灭活的影响研究　/21
2.3　大气压非平衡等离子体射流针对口腔内细菌灭活及生物膜作用研究　/27
2.4　大气压非平衡等离子体射流对致病真菌的灭活研究　/47

2.5 大气压非平衡等离子体射流灭活病毒研究 /52
2.6 大气压非平衡等离子体射流活化油作用伤口愈合研究 /56

**第 3 章 大气压非平衡等离子体射流诱导癌细胞凋亡 /85**

3.1 引言 /85
3.2 大气压非平衡等离子体射流对质粒 DNA 的影响 /86
3.3 大气压非平衡等离子体射流对多种肿瘤细胞系的增殖抑制作用 /90
3.4 大气压非平衡等离子体射流诱导 HepG2 细胞的凋亡 /92
3.5 大气压非平衡等离子体射流诱导细胞凋亡的机制 /97
3.6 大气压非平衡等离子体射流对 HepG2 细胞周期的影响 /111

**第 4 章 大气压非平衡等离子体射流促进干细胞分化 /118**

4.1 引言 /118
4.2 大气压非平衡等离子体射流对小鼠 C17.2-NSCs 增殖的影响 /119
4.3 大气压非平衡等离子体射流对小鼠 C17.2-NSCs 分化的影响 /120
4.4 大气压非平衡等离子体射流对小鼠 C17.2-NSCs 分化神经元亚型的影响 /126
4.5 一氧化氮与大气压非平衡等离子体射流促进小鼠 C17.2-NSCs 分化的关系 /127
4.6 大气压非平衡等离子体射流对小鼠 C17.2-NSCs 分化相关信号通路的影响 /130
4.7 大气压非平衡等离子体射流对大鼠原代神经干细胞分化的影响 /132

**第 5 章 大气压非平衡等离子体射流产生的活性粒子穿透生物组织的研究 /138**

5.1 引言 /138
5.2 RONS 穿透肌肉组织的研究 /140
5.3 液体溶质对穿透肌肉组织的长寿命活性氮氧化物浓度的影响 /146
5.4 活性氮氧化物穿透皮肤组织的研究 /156

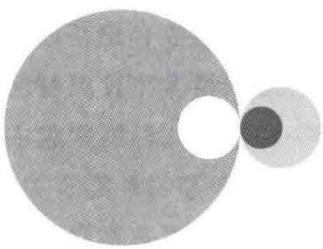
5.5 活性氮氧化物穿透皮肤角质层的研究 /165
5.6 活性氮氧化物穿透皮肤角质层的分子动力学模拟研究 /172
5.7 总结 /181

**第 6 章 大气压非平衡等离子体射流的生物安全性 /190**

6.1 引言 /190
6.2 大气压非平衡等离子体射流产生的 $H_2O_2$、$NO_2^-$ 和 $NO_3^-$ 的细胞毒性研究 /192
6.3 PAM 对肝癌细胞的选择性杀伤研究 /197
6.4 活性氮氧化物溶液、PAM 和大气压非平衡等离子体射流处理对黑色素瘤细胞和角质形成细胞的毒性比较研究 /204
6.5 大气压非平衡等离子体射流对正常细胞的遗传毒性和诱变特性研究 /215
6.6 总结 /225

**第 7 章 等离子体的剂量——等效总氧化势 /234**

7.1 引言 /234
7.2 基于“等效总氧化势”的等离子体剂量模型描述 /238
7.3 基于“等效总氧化势”的等离子体剂量模型的有效性分析评估 /243
7.4 讨论 /253



# 第1章 绪论

## 1.1 引言

近年来，大气压非平衡等离子体在飞机隐形、表面处理、废气处理、脱硫脱硝、紫外光源、有毒化学物质的降解、生化武器的去毒、海水赤藻的处理、生物医学等方面的应用受到了广泛的关注。在这些应用中，它在生物医学方面的应用近二十多年来得到了快速发展，并已经形成一门新兴的学科，即等离子体医学。等离子体医学是研究等离子体对生物体（病毒、细菌、细胞、组织、器官等）的作用效应的一门学科。等离子体对生物体的作用是通过等离子体所产生的各类自由基（其寿命从纳秒到秒量级）、带电粒子、紫外线等对生物体在分子层面的综合作用来实现的。

## 1.2 等离子体对细菌的消杀

等离子体医学早期的研究主要关注于医疗卫生领域灭菌消毒方面的应用。这主要是由于传统的灭菌消毒方法都有各自固有的缺点。如传统的紫外线消毒法，紫外线只能照射到物体表面，如果被处理的对象形状不规则，则紫外线照射可能会产生很大的死角；而化学试剂灭菌法存在剩余试剂的二次污染问题；至于加热灭菌法，包括干热和湿热，其最大的缺点是对于一些对温度

敏感的材料无法使用。

用于灭菌消毒的低温非平衡等离子体，其气体温度通常要求维持在几十摄氏度以下，甚至是室温。但是它的电子温度却很高，通常在几千到几万摄氏度的范围，该特性对于一些温度敏感材料的消毒至关重要。由于其气体温度较低，因此不会对被处理的材料造成损坏；而其较高的电子温度则使等离子体具有很高的活性，可以产生很强的紫外线、大量的带电粒子和活性自由基。非平衡等离子体灭菌消毒就是利用这些紫外线、各种带电粒子和活性自由基的共同作用来达到灭菌消毒的效果。这些因素中具体哪一种或哪几种因素起主导作用由特定的等离子体源所决定，并和被处理的细菌、病毒等的种类有关。当灭菌消毒过程结束后，等离子体被关闭，这些活性粒子、带电粒子等在较短的时间内都将消失，因此不存在剩余的有害物质。

利用非平衡等离子体来杀菌消毒，等离子体源是至关重要的。在二十世纪七八十年代，为了利用非平衡等离子体来杀菌消毒，通常工作气体的压力在10～1000 Pa范围。为了保持工作气体在这样的压力下，真空系统将不可避免。这就使得整个系统的成本上升，导致该技术的推广使用受到了极大的限制。随着大气压非平衡等离子体技术的发展，到了二十世纪九十年代中期，Laroussi博士首次利用大气压非平衡等离子体对大肠杆菌等做了消毒实验[1]。实验结果表明大气压非平衡等离子体能够达到较好的灭菌效果。在此之后，大气压非平衡等离子体在杀菌消毒领域的研究在国际上受到了极大的关注。与此同时，人们研制出多种大气压非平衡等离子体源，主要以千赫兹交流电源驱动的电介质阻挡放电和以射频电源驱动的射频（radio frequency，RF）放电为代表。当这些等离子体源被用来灭菌消毒时，通常有两种做法：一种是利用等离子体直接消毒，即将被消毒的对象放到放电间隙之间；另一种是等离子体间接消毒，它是将被消毒对象放在放电间隙外并尽量靠近放电间隙，通过气体的定向流动，使等离子体所产生的各种活性粒子输运到被消毒物体的表面来达到消毒的目的。第一种方法的局限性是放电间隙的尺寸往往是非常有限的，这就极大地限制了被消毒对象的范围。第二种方法的缺点是带电粒子和一些具有很强活性但存在时间很短的活性粒子在到达被消毒物体表面前就已经消失了，这就使消毒效率大大降低[2]。为了克服上述两种消毒方式各自的缺点，新型的大气压非平衡等离子体射流（nonequilibrium atmospheric pressure plasma jet，N-APPJ）应运而生。这就使被消毒对象不受放电间隙尺

寸的限制，同时保证较高浓度的带电粒子和活性粒子能到达被消毒对象的表面，从而达到有效消毒的目的。

在过去的十几年里，N-APPJ 在杀菌消毒方面的应用得到了极大的关注。国内也有多所高校和研究所在大气压非平衡等离子体灭菌消毒的机理方面做了一些很好的基础性研究。除了对传统的电介质阻挡放电、射频放电等离子体的杀菌消毒特性做了基础性的研究外，还利用表面介质阻挡放电等离子体、千赫兹交流电源驱动的等离子体射流和射频放电等离子体射流等对一些典型的微生物，如大肠杆菌等的消毒机理做了研究。

微生物的种类繁多，不同的应用背景下种类差别很大。本书第 2 章介绍了采用等离子体杀灭引起牙髓疾病的细菌的相关研究。这是因为牙髓疾病是口腔科中的常见病。牙髓疾病的治疗主要是根管治疗，其根本目的是对被感染的根管内表面及根管三维网状系统的消毒。现在临床上通常通过器械的清除、抗生素的冲洗及根管内的暂封存物（如氢氧化钙）来实现治疗，大部分对根管治疗的追踪报道显示，根管治疗的成功率大概在 85%～90%，失败的主要原因是微生物持续存在。Sjogren 等[3] 发现，在根管充填时，如在根管内检测到阳性细菌，则治疗的成功率仅为 68%；而检测到阴性细菌时，五年随访成功率为 94%。Peters 等[4] 也认为根充时根管内存在细菌会导致根尖周炎的发生，即意味着根管治疗的失败。导致根管治疗失败的细菌有多种，如粪肠球菌被认为是导致根管治疗失败的主要细菌之一，且根管治疗中采用的药物对其无效。

在当今的治疗策略中，如何清除根管内持续存在的细菌，对治疗后牙齿的长期保存至关重要。现在临床中采用的器械治疗有激光、微波以及超声法来进行根管消毒，它们主要是利用其热效应或声波效应，在消毒效能和生物相容性等方面均未能达到最佳状态。

而利用非平衡等离子体射流对引起牙髓疾病的细菌进行消毒就有可能取代上述消毒手段。本书第 2 章将介绍这方面的相关研究成果。

## 1.3 等离子体对病毒的消杀

国内外的研究表明，N-APPJ 不仅能杀死单个的各类细菌，而且能杀灭各类孢子、真菌、生物膜。那么能否用 N-APPJ 来杀灭人类的隐形杀手——病毒。自然界中存在着各种各样的病毒，它们以 DNA 或 RNA 作为遗传物质，