

大气条件等离子体针处理 *Enterococcus faecalis* 菌^{*}

张先徽^{1)2)†} 黄 骏²⁾ 刘筱娣³⁾ 彭 磊³⁾ 孙 岳¹⁾ 陈 维¹⁾ 冯克成¹⁾ 杨思泽²⁾

1) (长春理工大学, 长春 130022)

2) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

3) (口腔生物教研室, 北京大学口腔医院, 北京 100080)

(2008 年 3 月 29 日收到 2008 年 8 月 22 日收到修改稿)

自行研制的等离子体针在大气压下通过介质阻挡放电产生的等离子体,再由喷嘴处安装的漏斗形装置聚焦形成针状等离子体. 然后对针状等离子体的基本特性和杀 *Enterococcus faecalis* (*E. faecalis*) 菌进行了研究, *E. faecalis* 菌是一种引起完善充填根管再感染的主要微生物. 当等离子体针功率为 5—28 W 时,对等离子体的温度进行了测量,表明它不同于其他热杀菌方式. 通过改变等离子体针内电极末端注入的氧气量,发现适当的氧气量,不仅增加等离子体内含氧粒子的浓度而且对等离子体的长度影响也不明显. 实验表明最佳参数为功率 15 W, $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 氮和 2.5% 氧气,间距 12 mm,处理时间 30 s. 为了找出杀菌的关键粒子,进一步比较了大气压下的等离子体针的发射光谱与 agar(琼脂) 2 mm 下的光谱并找出关键粒子.

关键词: 大气压等离子体, 介质阻挡放电, *E. faecalis* 菌, 光谱

PACC: 3320L, 5225, 8720

1. 引 言

近年来等离子体在生物方面的应用引起了人们的注意^[1-3],由于等离子体内能够产生存在时间极短的粒子,这些粒子与样品发生作用后,随之消失,不会继续影响样品. 而生物样品不可能在真空条件下进行处理,这就对等离子体提出了要求. 利用介质阻挡放电原理设计的放电装置能够在室温条件下产生大气压等离子体,然后通过漏斗形装置聚焦产生针状等离子体. 分别研究了针状等离子体的基本特性以及杀 *E. faecalis* (粪肠球菌) 菌. *E. faecalis* 为革兰氏阳性兼性厌氧菌,可以在 60℃ 条件下持续 30 min. 在牙根管内可以与其他细菌引起混合感染,也可以发生单一细菌感染,并且可以耐受充填根管内苛刻的生态环境^[4]. 用机械化学预备,抗感染药物冲洗及根管消毒等传统治疗方法,难以将定植于根管内的 *E. faecalis* 彻底清除^[5]. 研究表明,在经过完善充填后持续感染的根管中,粪肠球菌是主要的病原微生物.

2. 实 验

2.1. 装 置

等离子体针主要由以下四部分组成: 两个电极,一个橡皮塞,一个特氟纶固定器以及漏斗形装置,如图 1(a) 所示. 石英管(内径 6 mm,外径 8 mm)作为阻挡介质,其中心是特氟纶固定器固定的不锈钢管(内径 1 mm,外径 2 mm)电极,可以通过其向等离子体内输入气体,内电极距喷嘴的距离可以随意调整. 实验中发现当内电极与石英管的水平间距为 2 mm 时,石英管内部电场强度明显增加,放电电压降低,管内等离子体浓度显著增加. 外电极是同轴电缆外包层,覆盖在石英管的外部. 氮气由石英管侧臂输入,由内、外电极通过石英介质阻挡放电,产生等离子体,在通过漏斗形装置聚焦输出. 漏斗形装置采用石英材料,固定在石英管末端.

等离子体针内外电极分别与波形发生器(CTP-2000K)相连,其最大输出电压 $3 \times 10^4 \text{ V}$,频率范围

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 210675165)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhang_xh16@yahoo.com.cn

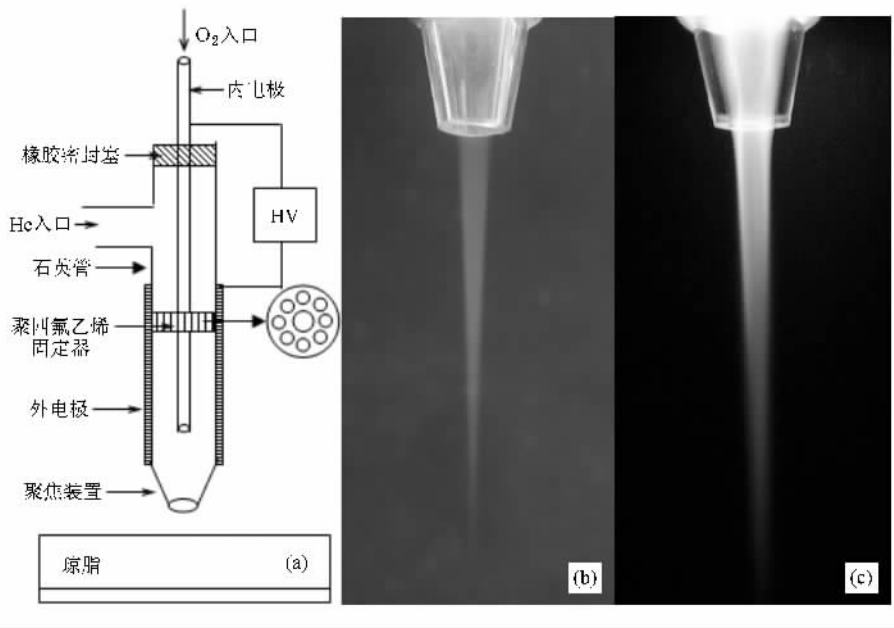


图1 (a)等离子体结构图;(b)氦流量为 $0.1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,15 W 时针形等离子体图;(c)氦流量为 $0.1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,氧气流量为 $26\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,15 W 时针形等离子体图

15—30 kHz,试验表明 22 kHz 放电最佳. 等离子体从漏斗形装置喷出如图 1(b)和(c)所示,氦等离子体与氧气和氦形成的等离子体竖直向下,呈现聚焦态,说明同样的处理面积上可得到更多的粒子.

2.2. 样品制备

E. faecalis 接种于 BHI(牛心脑浸液)液体培养基,于 37℃,5% 的 CO₂ 条件下过夜培养. 过夜培养的菌液经镜检无污染后,调整菌液 OD630 nm 值为 0.5. 使用螺旋接种仪(model D, Spiral. System Instruments)将调整好浓度的菌液均匀接种于含 BHI 琼脂培养基(agar)的培养皿(直径 9 cm). 经等离子

体处理后,平皿置于 37℃,5% 的 CO₂ 条件下继续培养 36 h 后观察.

3. 温度测量

由于温度对 *E. faecalis* 菌的影响很大,温度测量是为了研究等离子体在处理 *E. faecalis* 菌的过程中,样品表面温度的变化对 *E. faecalis* 菌的影响.

面积 7 mm × 7 mm 的铂电阻温度探测器(PT-100, STT-F)与电源(TRM006)连接后放置于 agar(琼脂)表面以下 1 mm, agar 表面温度如图 2 所示. 图 2(a)是在等离子体轴线方向不同处理时间的温度曲

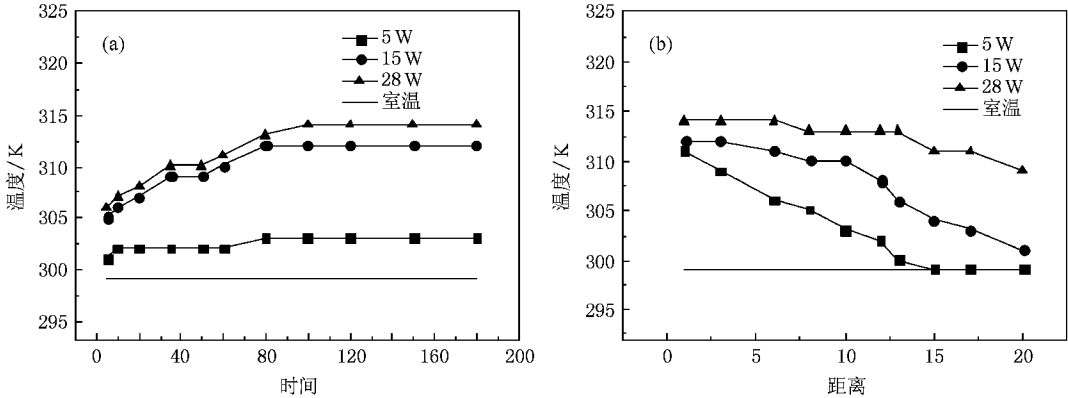


图2 表面温度随处理时间和间距在不同功率变化曲线 (a)氦流量 $0.1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 间距为12mm;(b) $0.1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 处理时间为

线,图 2(b)是沿等离子体轴线方向不同距离相同处理时间的温度曲线. 结果表明当等离子体针功率不超过 28 W 时,agar 表面温度不超过 315 K. 由此可知等离子体处理 *E. faecalis* 菌过程中,温度变化对于 *E. faecalis* 没有影响.

4. 结果和讨论

在内外电极两端并联高压探头 (KEYTHLEY, M1600),在内电极回路中串联一个 50 Ω 的标准电阻,用数字示波器 (Tektronix TDS210) 的两路测量高压探头的电压,另外两路测量 50 Ω 电阻上的电压,进而转化成电流. 图 3 是等离子体针放电时的电流和电压曲线. 曲线表明一个周期内放电两次,而且电压是正弦曲线. 当在内电极内加入氧气对放电电流电压没有任何影响,这是由于输入的氧气没有直接进入放电区,而氧气分子比氦分子重不会进入放电区,对放电区内电场没有影响.

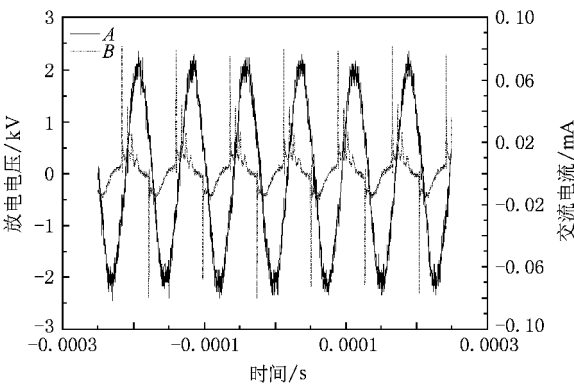


图 3 等离子体针放电电压和电流曲线图 (氦流量为 0.1 m³·h⁻¹; A 为电压曲线, B 为电流曲线)

4.1. 等离子体的基本性质

图 4 为功率对等离子体长度的影响以及在 20 W 时针状等离子体作用于人手图,感觉像微风吹过,皮肤组织没有热和疼痛感. 当功率小于 28 W 时,针状等离子体的长度与功率的关系基本呈线性. 当功率大于 28 W 时针状等离子体长度开始减小,当功率大于 30 W 时,末端呈 Y 形分岔,功率继续增加时,放电变的更加剧烈,颜色加深呈明显细丝状,等离子体变得不稳定. 当石英管内通入 0.1 m³·h⁻¹ 氦气时,氦的平均速度是 3.9 m·s⁻¹,该速度对应的雷诺数 (*Re*) 约为 93,可以确定为层流. 当内电极内通

入 26 mL·min⁻¹ 氧气时,平均速度为 0.42 m·s⁻¹,对应 *Re* 为 3.21^[6].

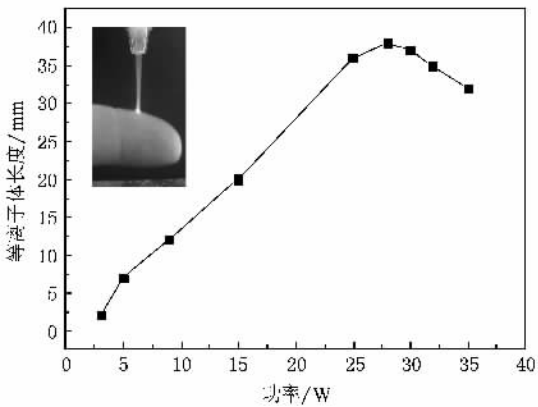


图 4 氦流量为 0.1 m³·h⁻¹,放电频率为 22 kHz 时,功率对等离子体长度的影响

图 5 给出了氧气从内电极末端注入对固定流量 He 等离子体长度的影响. 当氧气和氦气混合进入放电区,等离子体长度变短,颜色变白,而且喷出粒子数减少. 这是由于氧气吸收了大量电子,使电子与其他粒子碰撞产生的粒子也相应的减少^[6]. 为了产生更多的粒子,采用了在内电极末端注入氧气进入氦等离子体的方法. 通常低频 (i. e. kHz) 条件下放电时,产生的亚稳态氦原子能够在每个半周期再激发电子放电,同样亚稳态氦 (≈ 20 eV) 能够电离和分解氧气等分子^[7]. 当氧气的流量为 26 mL·min⁻¹ 时,等离子体长度几乎没有发生变化,只是等离子体中心部分变白,继续增加氧气流量到 35 mL·min⁻¹ 时,针状等离子体的长度仍基本保持不变. 然而当氧气流量大于 35 mL·min⁻¹ 时,等离子体针的长度迅速减小而且明显变白.

4.2. 等离子体光谱

等离子体内电子与气体原子碰撞发出的光谱可作为分析等离子体内粒子的工具. 光纤探测头置于等离子体下方 4 mm 测得发射光谱如图 6 所示,发射谱线中都含有激发态的氦、氧气、氮气以及其他激发空气分子. 图 6(a) 0.1 m³·h⁻¹ 氦气等离子体光谱,图 6(b) 0.1 m³·h⁻¹ 氦气和 26 mL·min⁻¹ 氧气光谱,图 6(c) 0.1 m³·h⁻¹ 氦气和 100 mL·min⁻¹ 氧气光谱,从图 6(c) 中可以看出氧气在 100 mL·min⁻¹ 时等离子体针内 O, OH 和 N 等自由基急剧减少. 而图 6(b) 中含氧的自由基最多. 说明适当地添加氧气可以增加含氧自由基,但是氧气的加入可能会导致氦发射强度

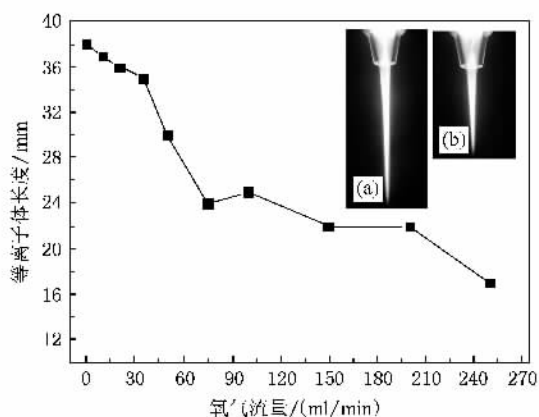


图5 功率为 25 W, 氦流量为 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 氧气对长度的影响

(a) 氧气为 $35 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 照片, (b) 氧气为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 照片

的减弱^[8]。图 6(b)中,可找出电子与氧气作用产生氧的自由基(O_2^+ 和 O),与空气和水分子碰撞产生氮自由基(N_2^+ 和 N_2^*)、OH 和 H_a ,以及与氮碰撞产生氮的自由基(He_n^+ 和 He^*)。

由于光谱仪(EPP2000C)的原因不能够把 N_2 (309 nm 和 316nm) 和 N_2^+ (427 nm) 与 O_2 的 (316 nm), OH 谱线 (309 nm)^[9] 以及 O_2^+ 的 427 nm 谱线区分开. 其中 O_2^+ 是等离子体内发生 Penning ionization(彭宁电离)而产生的, 电离过程可能是 $(He^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + He)$ ^[10] 和 $(He^* + O_2 \rightarrow He + O_2^+ + e^-)$ ^[11, 12], 而原子氧通常是由电子与氧气分子碰撞产生, $e^- + O_2 \rightarrow O + O + e^-$ ^[13-15], 而 Penning ionization 也可能产生氧自由基($N_2^+ + O_2 \rightarrow N_2 + O + O$)^[10, 14]. 彭宁电离主要指在含有惰性气体的混合气体放电中, 由于惰性气体的亚稳原子有较大的激发能, 只要前者的激发能大于后者的电离能, 后者将被电离, 前者则返回基态. 多余的能量就转变为电子的动能, 或使离子激发.

除了氮的发射谱线,强度最大是 N_2 的发射谱线包括 (316, 337, 357, 380 和 405 nm), N_2^+ 线在图 6 (a) 和 (b) 中的存在, 说明空气也参与了反应, N_2^+ 的产生通过以下两种途径, Penning ionization ($He^* + N_2 \rightarrow He + N_2^+ + e^-$) 和电荷转移 ($He_2^+ + N_2 \rightarrow 2He + N_2^{+ [16,17]}$). N_2^+ 离子谱线 391 nm 是典型的 first negative system (第一负带系), 可以作为检验是否存在 He_2^+ 和 He^* 的方法^[14]. N_2^* 的产生是由于电子直接碰撞氮气 ($e^- + N_2 \rightarrow N_2^* + e^-$), 不过这个反应依赖于电子的能量^[13,18], 而 N_2^* 也有助于增加氧原子

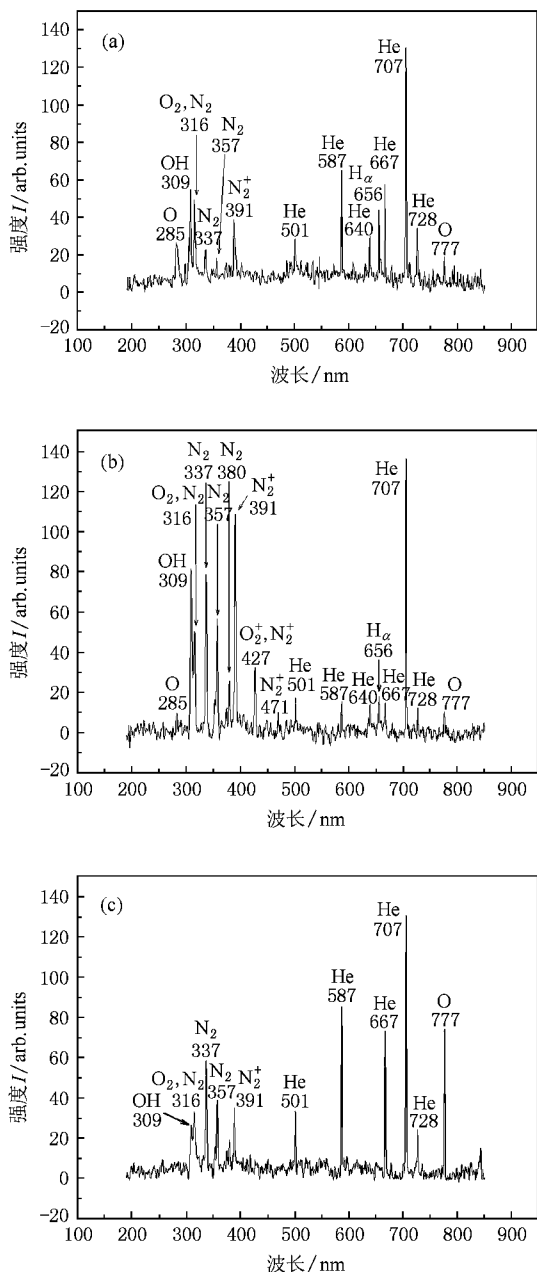
的数量^[13]

图6 功率 15 W 时,等离子体下方 4 mm 处测量的发射光谱图

(a) 氮流量为 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 氮和 $26 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 氧气,
(c) $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 氮和 $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 氧气

图 6 中的氢谱线主要由以下跃迁产生 2^3P-3^3S 707 nm; 2^1S-3^1P 501 nm; 2^3P-3^3D 587 nm, 2^1P-3^1D 667 nm 以及 2^1P-3^1S 728 nm. 发射光谱 656 nm 对应 H_α 线, 这表明空气中的水分子参与了反应 ($H_2O + e^- \rightarrow H + OH + e^-$), 实验中发现存在 656 nm 线时, 相应能够找到 309 nm 线^[19], 但是图 6(b) 中 309 nm 线的强度比 656 nm 明显要强, 表明

OH 基可能由激发态的氧与水分子结合产生 ($\text{H}_2\text{O} + \text{O}^* \rightarrow 2\text{OH}$)。

4.3. 等离子体杀 *E. faecalis* 菌

等离子体作用于 agar 表面时,会产生一个小凹面,当电压升高或喷嘴到样品的间距减小时,凹形面积扩大,深度也会加深,但其不随着时间改变。图 7 为杀 *E. faecalis* 菌,并且培养后的照片。白色的是 *E. faecalis* 菌经培养 48 h 后的生物膜,黑色的是 agar 的颜色。黑色的实心圆为等离子体针处理 *E. faecalis* 菌后,由于 *E. faecalis* 菌已经死亡所以呈现 agar 的颜色,同时还可以看出等离子体针能够在特定区域进行杀菌。图 7 中杀菌后的实心圆直径为 7 mm,而且实验表明,当参数不变时,杀菌过程具有可重复性。等离子体针杀菌过程有四个参数可以调节,喷嘴距样品的距离,电压,处理时间,以及气体流量(氮和氧气)。图 8(a), (b) 可知,不同距离,电场条件下,自由基空间分布不同,通常中心部分自由基分布较少而边缘自由基较多,Goeree 等人对射频放电等离子体内自由基空间分布进行了测量得出类似图片^[20]。本实验中可能的原因是由于氮较轻,从喷嘴出来向边缘扩散时,空气从底部上来和氮一起将其他自由基也带到边缘。当氧气从内电极输出时,部分与氮和电子碰撞形成氧自由基,从喷嘴出来时由于氧气较重,可以减缓将其他自由基带到边缘的过程,从而得到较大的参数范围。在标准参数($0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ He 和 $26 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ O_2 , 间距 12 mm, 电压为 1800 V, 处理时间 30 s.) 内,保持其他参数不变间距可调范围为 10—15 mm, 电压范围 1700—2040 V, 处理时间 22 s 以上,均可得到相同实心圆。实验中,仅改变内电极末端注入的氧气为 35 和 $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,杀菌效果如图 8(c) 所示。实验中当氧气为 $87 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,图形中部分细菌仍然存活, $100 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时开始出现环状。可能是由于过量的氧气吸收了大量电子致使等离子体内自由基减少。图 6(c) 中可以看出峰值较图 6(b) 弱了很多,含氧的自由基也减少了很多。由此证明过量的氧气不能产生更多的自由基,也不能够改善杀菌条件。

为了找出杀 *E. faecalis* 菌的关键粒子,我们将光纤头置于 agar 以下 2 mm 处,喷嘴距 agar 表面 12 mm。光谱如图 9 所示。由光谱可知,UV(紫外线),含氧自由基, N 自由基和氮自由基都可能与 *E. faecalis* 菌发生作用,致死细菌。通过图 9 与图 6(b)

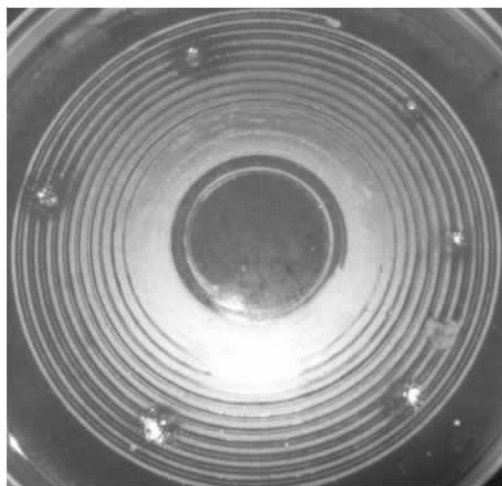


图 7 功率为 15 W, $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 氮 $26 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 氧, 处理时间 30 s, 间距 12 mm 时, 同一条件处理后的 6 个点

比较,可知含氧自由基消失了,而 N 的自由基却基本没有改变,这表明含氧自由基被 agar 吸收,同时证明 316 nm 和 427 nm 为 N 的谱线,这与文献所述相符^[21]。比较图 9 和图 6(b) 可知 N 自由基强度基本没有变化,表明 2 mm 内 agar 没有吸收 N 自由基,同时也表明 *E. faecalis* 菌没有吸收 N 自由基, N 自由基与 *E. faecalis* 菌没有直接发生作用, N 自由基没有直接致死 *E. faecalis* 菌。等离子体内除了含氧、氮自由基外,氮自由基和紫外线都与 *E. faecalis* 菌发生作用。如图 9 所示,大部分氮谱线都消失了,仅 707 nm 谱线存在,但是强度已经减弱了很多,尽管氮自由基与 *E. faecalis* 菌发生作用,但是从电镜照片上可看出形貌完整没有破损(如图 10 所示),与置于放电区内细菌形貌完全不同^[22]。此外氮原子稳定性强,化学性质为惰性,通常不与其他元素发生反应。这表明氮自由基不能够直接致死 *S. mutans* 菌。尽管低温等离子体能够提供一个有效的自由基源,但却不是一个很好的紫外线源,在 200—300 nm 范围内辐射强度低于 $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ^[23]。多数谱线均在可见光范围,仅一条谱线(285 nm)在 200—300 nm 范围。此外,具有杀菌功能的紫外线(UV-C)其范围在 200—280 nm 之间主要通过破坏生命中枢 DNA 和 RNA 的结构,使构成该微生物的蛋白质无法形成,使其立即死亡或丧失繁殖能力^[24]。这表明辐射不是致死 *S. mutans* 菌的主要原因。O 和 OH 自由基都能与 *S. mutans* 菌作用,部分氧自由基能够间接的转化为 OH 自由基^[25],他们都能够通过攻击细菌胞膜的不饱和脂肪酸,致使胞膜破裂致死细菌^[23,26]。实验

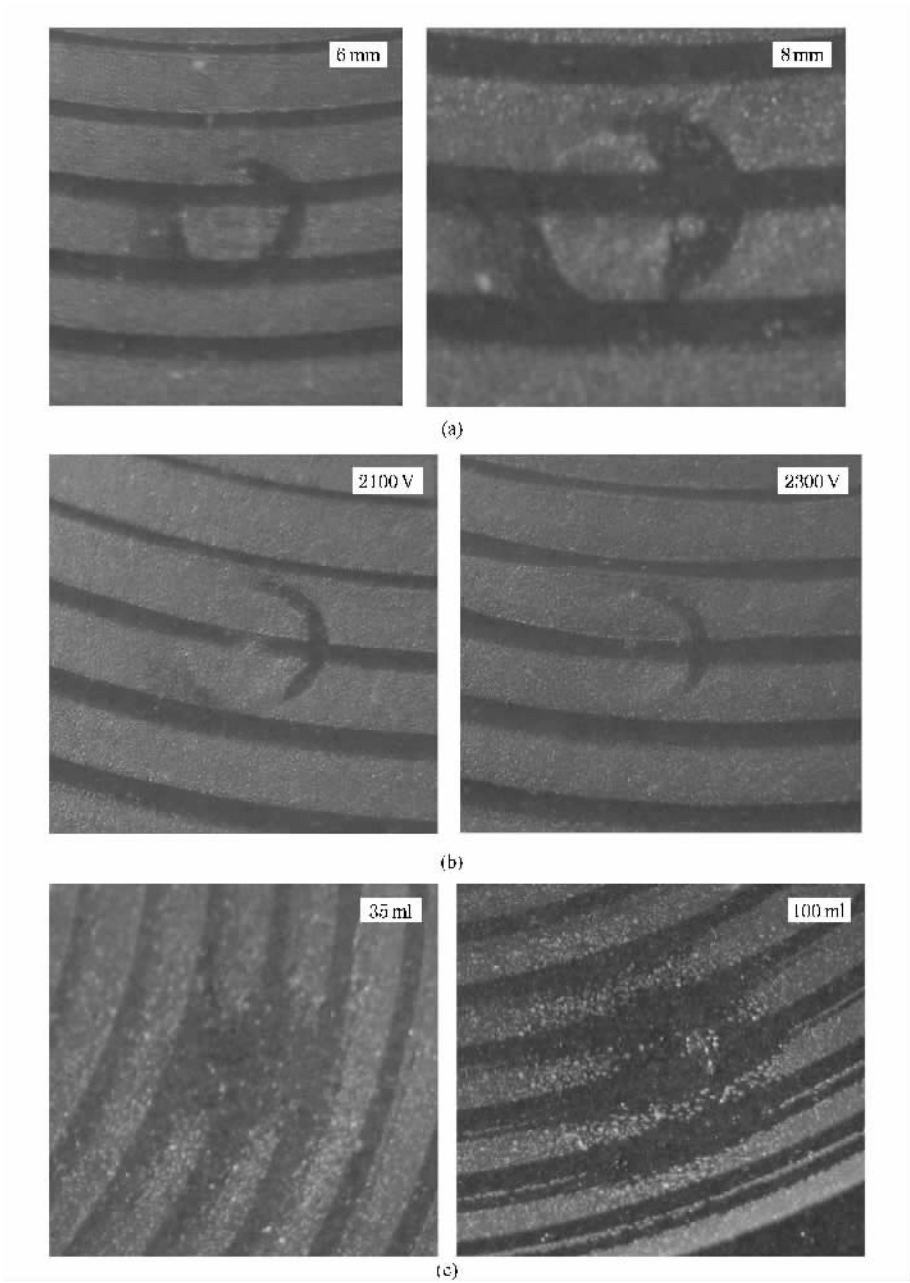


图 8 在不同条件下的杀菌照片. 每行只调节一个参数, (a) 等离子体针到样品的距离, (b) 电压, (c) 注入的氧气流量. 标准杀菌条件为 $20.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ He 和 $26 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ O_2 , 间距 12 mm , 电压为 1800 V , 处理时间 30 s

中可以通过调节输入氧气量, 得到不同浓度含氧自由基.

为了增加 O 和 OH 自由基的含量, 提高功率是一条有效途径, 然而当功率大于 30 W 时, 等离子体长度开始变短, 这意味着等离子体辐射强度开始减弱. 此外实验证明, 提高功率将改变自由基的空间分布, 致使区域内不能够完全杀灭细菌^[20]. 增加氧气输入量也能够增加提高 O 和 OH 自由基含量, 通过光谱分析得知, 氧气的输入量为 2.5% 时, 此时 O

和 OH 谱线强度最高. 仅增加气体的流量对提高含氧自由基的含量没有影响. 结果表明功率 15 W , $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 氦和 $26 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 氧气, 处理时间 30 s , 间距 12 mm 时, 杀菌效果最佳.

5. 结 论

文中给出了自行设计的带漏斗形装置的等离子体针以及杀 *E. faecalis* 菌图. 同时实验表明在数十

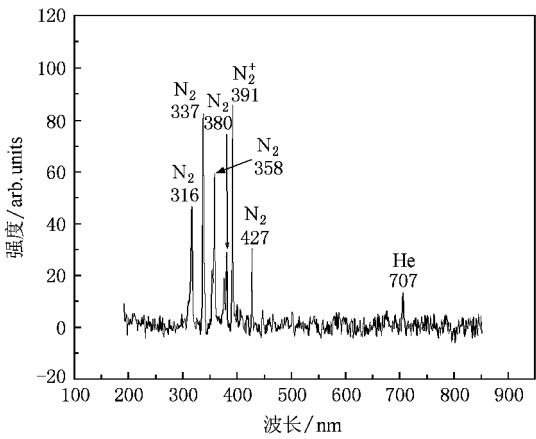


图 9 功率 15 W,0.1 m³·h⁻¹氮 26 mL·min⁻¹氧,间距 12 mm 时,琼脂下 2 mm 处测量的发射光谱图

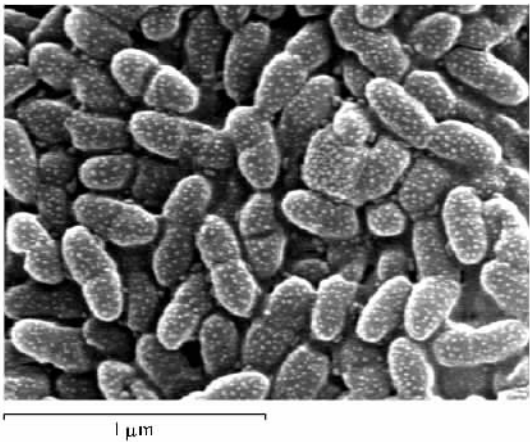


图 10 功率为 15 W,0.1 m³·h⁻¹氮 26 mL·min⁻¹氧气,处理时间 30 s,间距 12 mm 时,处理后的电镜照片

秒时间内杀 *E. faecalis* 菌的过程具有可重复性,并且取得了在 7 mm 的特定区域内杀菌.

等离子体针能够产生低温等离子体,杀菌时 agar 表面温度不超过 315 K,等离子体长度随功率和气体流量而改变其范围在 2—38 mm. 当输入 100 mL·min⁻¹ O₂ 时等离子体发生剧烈变化,而添加 26 mL·min⁻¹ O₂ 时,等离子体内能够产生大量的原子氧,同

时对等离子体长度基本没有影响. 文中还比较了大气与 agar 中的光谱,在 agar 表面发现含氧的自由基被吸收,而含 N 的自由基不与 *E. faecalis* 菌发生作用,并找出了含氧自由基是致死 *E. faecalis* 菌关键粒子. 通过实验,找出了杀 *E. faecalis* 菌的最佳参数条件.

[1]

Stoffels E, Flikweert A J, Stoffels W W, Kroesen G M W 2002 *Plasma Sources Sci. Technol.* **11** 383

[2]

Laroussi M, Akan T 2007 *Plasma Process. Polym.* **4** 777

[3]

Duan Y, Huang C, Yu Q 2005 *IEEE T. Plasma Sci.* **33** 328

[4]

Arias C A, Singh K V, Panesso D, Murray B E 2007 *J Antimicrob Chemoth* **60** 594

[5]

Reynaud A F, Geijerstam A H, Ellington M J, Warner M 2006 *Oral Microbiol Immun* **21** 164

[6]

Léeveillé V, Coulombe S 2005 *Plasma Sources Sci. Technol.* **14** 467

[7]

Massines F, Gouda G, Gherardi N, Duran M, Croquesel E 2001 *Plasmas Polym.* **6** 35

[8]

Goree J, Liu B, Drake D 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 3479

[9]

Gaydon A G 1957 *The Spectroscopy of Flames* (New York: Wiley)

[10]

Alvarez R', Quintero M C, Rodero A 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 3768

[11]

Lee Y H, Yi C H, Chung M J, Yeom G Y 2001 *Surf. Coat. Technol.* **146-147** 474

[12]

Seo D C, Chung T H 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 2854

[13]

Eliasson B, Hirth M, Kogelschatz U 1987 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **20** 1421

[14]

Naidis G V 1997 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30** 1214

[15]

Andrade F J, Wetzal W C, Chan G C Y, Webb M R, Gamez G, Ray S J, Hieftje G M 2006 *J. Anal. At. Spectrom.* **21** 1175

[16]

Bibinovl N K, Fateev A A, Wiesemann K 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 1819

[17]

Krohn S, Amitay Z, Baer A, Zajfman D 2000 *Phys. Rev. A* **62** 032713

[18]

Jai C H, Inho H, Hong B K, Mi L H, Dong-Wook H, Jong-Chul P, In-Seob L, Moon S K, Yong L S 2006 *J. Electrostat.* **64** 17

[19]

Cheng C, Liu P, Xu L, Zhang L Y, Zhan J R 2006 *Chin. Phys.* **15** 1544

[20]

Goree J, Liu B, Drake D, Stoffels E 2006 *IEEE T. Plasma Sci.* **34** 1317

[21]

Massines F, Segur P, Gherardi N, Khamphan C, Ricard A 2003 *Surf. Coat. Technol.* **174-175** 8

[22]

Choi J H, Han I, Baik H K, Lee M H, Han D W, Park J C, Lee I S, Song K M, Lim Y S 2006 *J. Electrostat.* **64** 17

[23]

Laroussi M, Leipold F 2004 *Int. J. Mass Spectrom.* **233** 81

[24]

Wang L K, Hung Y T, Shammas N K 2006 *Advanced Physicochemical Treatment Processes* (New Jersey: Humana Press)

[25]

Freeman B A, Crapo J D 1982 *Lab. Invest.* **47** 421

[26]

Asoh S, Nishimaki K, Nanbu-Wakao R, Ohta S 1998 *J. Biol. Chem.* **273** 11384

Treatment of *Enterococcus faecalis* bacteria using a plasma needle at atmospheric pressure^{*}

Zhang Xian-Hui^{1)2)†} Huang Jun¹⁾ Liu Xiao-Di³⁾ Peng Lei³⁾ Sun Yue¹⁾ Chen Wei¹⁾ Feng Ke-Cheng¹⁾ Yang Si-Ze²⁾

1) (Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

2) (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (Department of Oral Biology, Peking University School of Stomatology, Beijing 100080, China)

(Received 29 March 2008 ; revised manuscript received 22 August 2008)

Abstract

A Plasma Needle using a dielectric barrier discharge reactor at atmospheric pressure with a funnel-shaped nozzle was designed and realized. The preliminary characteristics of the plume and applications in the sterilization of *Streptococcus mutans* (*S. mutans*), which is the most important microorganism causing dental caries, were presented in this paper. The reactor produced a cold plasma plume with temperature not higher than 315 K at 28 W. The effect of oxygen, which was injected downstream in the plasma afterglow region through a steel tube, was studied using its spectrum. The results show that addition of $26 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1} \text{ O}_2$ led to the transport of atomic O further without significant effects on the jet length. The experiments show the best parameters are 15 W power, $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ He with 2.5% O_2 addition and separation of needle-to-sample 12 mm. It is found that ultraviolet rays, O, OH and He radicals can reach and act with *S. mutans*. To find critical radicals which are related to sterilization, we compared the probe spectrum at atmospheric pressure with that in agar.

Keywords : plasma needle, sterilization, *E. faecalis*, spectrum

PACC : 3320L, 5225, 8720

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10675165).

[†] Corresponding author. E-mail : zhang_xh16@yahoo.com.cn