

## 同轴结构微波灭菌装置电磁特性模拟

张 海, 曾葆青, 杨中海

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**根据细胞电穿孔机理,当外加电场达 $10^6$  V/m,细胞膜将被击穿,内部物质外泄导致细胞死亡。以微波生物效应、电磁场集中理论为指导,采用CST软件模拟分析2 450 MHz, $\lambda/4$ 同轴腔形式的微波灭菌装置,得出电磁场结构分布图。结果表明,当输入功率达到 $10^2$  W量级时,灭菌区域满足细胞瞬态击穿的场强要求,能够实现空气的快速灭菌。

**关键词** 同轴谐振腔; 电穿孔; 快速灭菌; 微波脉冲

中图分类号 TN99

文献标识码 A

## Simulation of the Characteristics of Electromagnetic Field within the Coaxial Microwave Sterilization Equipment

ZHANG Hai, ZENG Bao-qing, YANG Zhong-hai

(School of Physical Electronics, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** Based on the microwave biological effects, the mechanism of electroporation, and the theory of electromagnetic, a  $\lambda/4$  coaxial resonant structure of microwave sterilization is simulated and analyzed with CST software in this paper. The results of simulation indicates that when the input power reaches 100 W, the amplitude of the E-field in the area of sterilization will attain  $10^6$  V/m. So the cell of virus will be punctured; and the air can be sterilized fast.

**Key words** coaxial resonant cavity; electroporation; fast sterilization; microwave pulses

近年来,在卫生安全领域人类面临着一系列新的问题,最显著的例子就是SARS的流行<sup>[1]</sup>。新型呼吸道类传染性疾病的一度猖獗,要求人们应能快速有效地对空气进行消毒灭菌。尤其在医院的公共卫生系统内,需要保障空气环境的安全,防止交叉感染,避免病毒在患者与患者之间、患者和医护人员之间大规模地流行传播。为此人们迫切地需要找到能够解决这一问题的有效途径。

文献[2-6]指出了现今较典型的消毒灭菌方法、设备及其进展。针对空气灭菌,目前的主要方法有:(1)紫外线照射;(2)电子束照射;(3)臭氧消毒等。在空气中细菌、病毒直径在 $0.5 \sim 15 \mu\text{m}$ 之间,一般以气溶胶形式存在并传播,而紫外线在很大程度上是一种表面消毒方式,难以渗透<sup>[1]</sup>;电子束设备体积过于庞大;臭氧则较难储存。并且上述三种方式对环境有一定的污染,对人体可能造成危害。相比之下,基于电磁生物效应的微波脉冲灭菌装置结构较为简单<sup>[7]</sup>,易实现较小功率输入下瞬态快速灭菌。微波脉冲灭菌的生物电磁理论基础是细胞电穿孔机

理<sup>[8-12]</sup>;细胞膜是微波生物效应的作用点,细胞膜本身有着约50~100 mV的静息电位,外加电场会破坏细胞膜的电位平衡。当外加电场的强度达到 $10^6$  V/m时,细胞膜发生电穿孔,直接导致细胞的破灭。问题的关键在于如何获得电击穿所需的高电场。

本文提出了一种较为简单的、利用商用磁控管(2 450 MHz)微波源和 $\lambda/4$ 同轴谐振腔的结构,并运用驻波叠加及尖端效应的原理在一定的区域内形成灭菌所需的高场强,实现毫秒量级<sup>[13]</sup>的瞬态快速灭菌方案。

### 1 同轴腔结构及模拟结果

高场强的同轴腔结构在国内外航天领域已有研究应用<sup>[14]</sup>。本文采用 $\lambda/4$ 同轴谐振腔,工作频率为2 450 MHz,由探针天线将微波脉冲耦合至同轴谐振腔。具体结构如图1所示。图中,外导体半径为20 mm,内导体半径为5 mm,前部为圆锥形尖端,尖端高为5 mm。

采用Cst Microwave Studio软件,对腔体结构进

行瞬态分析, 得出场结构分布。计算结果表明, 腔内电磁场主要集中在圆锥尖端与外导体内端面之间半径 5 mm 的圆柱形区域, 如图 2、3 所示。当输入功率为 1 W 时, 平均电场强度达到  $5 \times 10^4$  V/m。

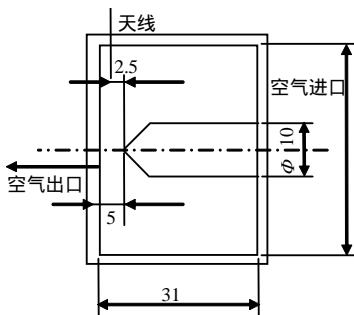


图1 腔体结构图

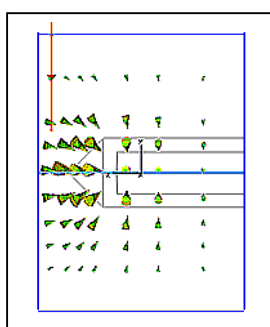
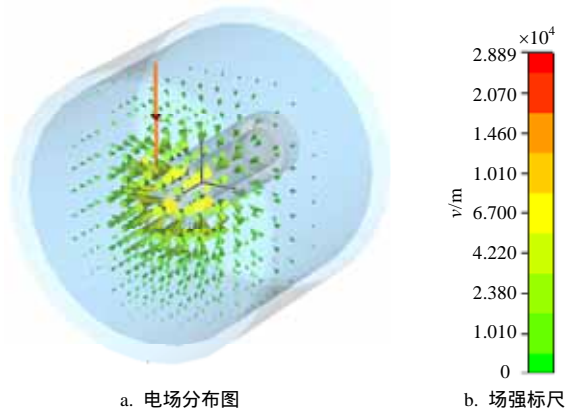


图2 电场分布正视图



a. 电场分布图

b. 场强标尺

图3 电场分布轴侧图

图4显示的是内导体尖端至外导体轴线上的电场分布(图中距离0处为内导体最尖端), 图5表明的是距内导体尖端1 mm处电场的径向分布(图中半径为0处位于轴线上)。

因此, 当输入功率为 400 W 时, 在内导体尖端到外导体前端面之间的  $5 \times (3.14 \times 5^2)$  mm<sup>3</sup> 的空间区域里能获得杀菌所需的  $10^6$  V/m 的电场强度。由于外导体的有效屏蔽, 微波能量没有辐射损失, 也就避免了对人体可能造成的危害。

但是, 在最尖端部分其场强大于空气的介电强

度<sup>[15]</sup>, 若发生空气击穿, 将会改变内部的电场结构。为了防止击穿的发生, 可以采取在尖端部分涂抹介电常数接近于 1, 介电强度高于空气的介质(如泡沫聚苯乙烯<sup>[16]</sup>等), 确保图中电磁场结构的分布。

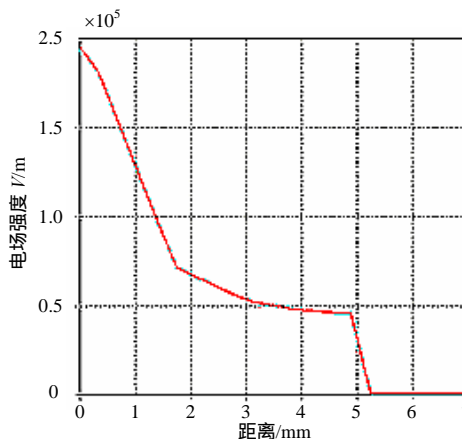


图4 腔体轴线上电场分布

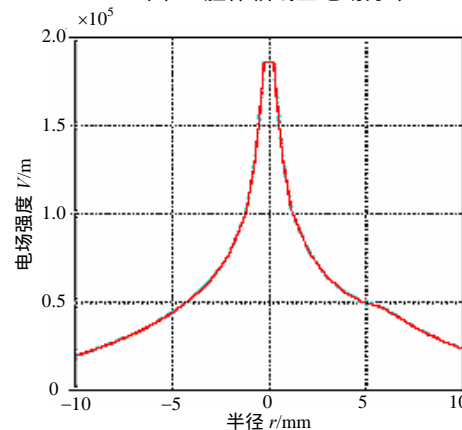


图5 距内导体尖端1mm处电场径向分布

## 2 灭菌方案及讨论

上述结构在具体应用中一般与室内的通风系统相结合, 探针天线馈入 100 ~ 400 W 的功率, 空气被吹送进入腔体。外导体的两端面采用网状结构, 一方面将微波能量屏蔽在谐振腔体内, 防止微波泄漏对人体造成危害; 另一方面利于未消毒空气由外导体后端面进入, 消毒区域(圆锥尖端与外导体内端面之间), 从而达到消毒灭菌的目的。由于微波脉冲的快速灭菌性能, 空气可以高速通过灭菌区域, 以弥补腔体体积较小的缺陷。

腔体结构的具体形式仍可进一步探讨。图6所示为改变内导体圆锥型尖端半径, 内导体尖端至外导体之间轴线上的电场分布关系图。图7所示为内导体圆锥型尖端高度与内导体尖端至外导体之间轴线上的电场分布关系图。

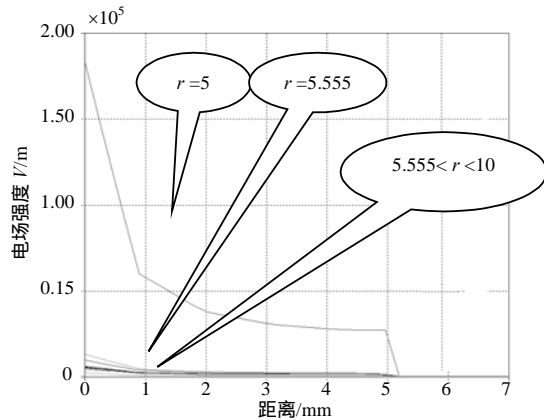


图6 尖端半径与轴线上电场分布关系图

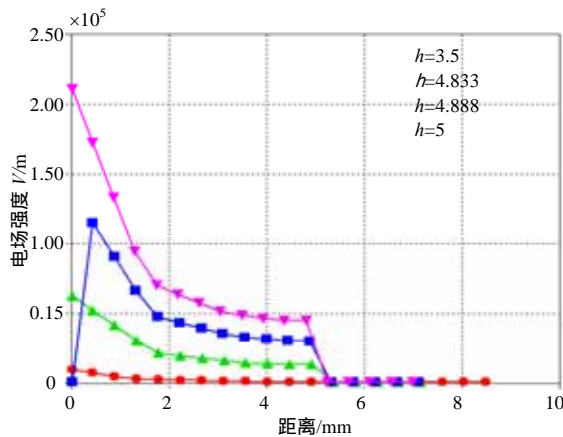


图7 尖端高度与轴线上电场分布关系图

### 3 结论

在传统基于信号传输的腔体设计中,电磁场的集中分布是设计者尽力避免的问题。本文为了高效利用微波能量,则与其相反,主要运用同轴内导体的尖端效应,同时又由于内导体尖端起着类似二次波源的作用,它与天线场在消毒灭菌区域形成驻波场的有效叠加。尖端与驻波场的结合使电磁场集中分布在一个体积较小的区域。采用同轴形式的微波灭菌装置在空气及空调系统灭菌领域具有其特殊的性能。与传统方法相比,该装置利用了微波的非热效应进行灭菌,灭菌效果更为彻底可靠目前同轴腔结构装置已经应用在航空领域的动力源和牙科医学的检测治疗仪器中。本文利用了该结构并将其拓展到消毒灭菌方面,同时也为在低功率情况下实现高场、高能流密度的微波场分布提供了依据,为进一步开展电磁生物学效应等方面的工作提供了技术方案。另外,在生物电磁领域中,可研发区别于传

统结构<sup>[17]</sup>、基于同轴结构的实验设备,作为细胞生物电磁研究的实验仪器,在定向给药,药物提取等方面<sup>[18]</sup>,也有广泛地应用前景。

### 参考文献

- [1] 寅平, 赵彬, 成通宝. 空调系统生物污染防治方法概述[J]. 暖通空调HV&AC, 2003, 33: 41-45.
- [2] SATO T. Sterilization characteristics by a coaxial microwave plasma flow at atmospheric pressure[C]// IAS2004, NJ. USA. [地址不详]: IEEE, 2004.
- [3] 丁兰英, 杨华明, 蒋莉, 等. W B M-4 A型微波灭菌器对微生物杀灭效果的试验观察[J]. Chinese Journal of Disinfection, 1998, 15(2): 74-77.
- [4] 袁康, 张廷霞. WXD-650A型微波快速灭菌器灭菌效果的检测[J]. 中国消毒杂志, 1995, 12(2): 75.
- [5] 郑玳珍. 国内外消毒灭菌技术及设备的新进展[J]. 医疗卫生装备, 1996, 6: 20-22.
- [6] 朱林泉, 朱苏垒. SARS病毒紫外C杀灭技术[J]. 应用激光, 2003, 23(6): 342-344.
- [7] KUMAR A. Nonthermal effects of electromagnetic fields at microwave frequencies[C]//CCECE2003-CCGEI. NJ. USA. [地址不详]: IEEE, 2003.
- [8] WEAVER J C. Electroporation of cells and tissues[J]. IEEE Transactions of Plasma Science, 2000, 28(1): 24-33.
- [9] WEAVER J A. Electroporation of biological membranes from multicellular to nano scales[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 754-768.
- [10] 王保义, 刘长军, 郭庆功, 等. 电穿孔—解释生物体中非热生物效应的关键机理[J]. 四川大学学报(自然科学版), 1997, 34(3): 310-314.
- [11] 姚学玲, 陈景亮, 徐传骥. 脉冲电流电磁场对生物膜的非热效应分析[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(2): 76-81.
- [12] WEAVER J A, KARL H. Schoenbach. bioelectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 715-716.
- [13] 赵武奇, 殷涌光, 关伟, 等. 高压脉冲电场杀菌系统设计及实验[J]. 农业机械学报, 2002, 33(3): 67-69.
- [14] 唐金兰, 何洪庆, 韩先伟, 等. 微波等离子体推力器同轴谐振腔内的电磁场特性[J]. 推进技术, 2003, 24(2): 148-151.
- [15] 郑钧 D. 电磁场与波[M]. 赵姚同, 黎滨洪, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 1984.
- [16] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [17] 王保义, 黄卡玛, 徐润民, 等. 低强度微波辐射对人细胞非热生物效应的研究[J]. 中国医学物理杂志, 1995, 12(1): 9-14.
- [18] FRANKE M, WINEK L C, KINGSTON H M. Extraction of selected drugs from serum using microwave irradiation[J]. Forensic Science International, 1996, 81: 51-59.

编辑 孙晓丹