

# 放电等离子体反应器装置及其电场分析评述

王晓明, 赵莹, 史文祥, 管磊

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

## Review of Nonthermal Plasma Reactors and Its Electric Field Analysis

WANG Xiao-ming, ZHAO Ying, SHI Wen-xiang, GUAN Lei

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**摘要:** 对反应器的结构、催化剂等制约放电等离子体产生、反应过程和特性的重要因素进行了分析评述。结合应用,对典型反应器的特点进行了说明,指出了电场分析对改进和优化结构的指导作用。就几种典型反应器内电场的分析,说明电场分析研究法在放电等离子体反应器研究中的重要地位。

**关键词:** 等离子体; 反应器; 电场; 有限元分析

**中图分类号:** TM832

**文献标识码:** A

**Abstract:** The construction of reactor and catalyzer etc. are analysed and reviewed which are important factors to affect the discharge plasma creation, reaction process and its characteristics. It is indicated that the electric field analysis can be used for improving and optimizing the construction of reactors. With some typical analysis of electric field of reactors, it is demonstrated that electric field analysis method plays an important role in the research of nonthermal plasma reactor.

**Key words:** plasma; reactor; electric field; finite element analysis

## 1 引言

放电等离子体可在常温常压下产生,其应用技术在近10~20年获得迅猛发展,尤其在烟气处理、空气净化、难降解污染物处理、材料改性、表面处理等方面对传统方法提出强有力的挑战。相关理论及应用技术的研究成为关注的热点。放电等离子体中的基本过程和特性的研究涉及多学科技术的交叉渗透,其理论体系、研究方法还处于发展过程之中。

## 2 典型放电等离子体反应器装置及其特点和电场分析

放电等离子体反应器系统结构见图1。

收稿日期:2004-02-07; 修回日期:2004-04-29

基金项目:航天科技创新基金项目(天科研2001181-19)

哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金项目  
(HIT.MD2002.1)

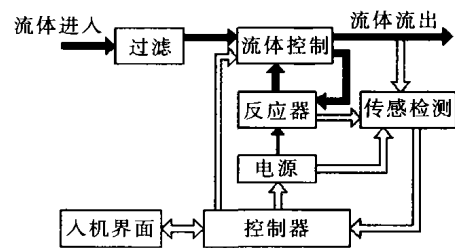


图1 放电等离子体反应器系统结构

### 2.1 针-板反应器

图2给出一种针-板等离子体反应器的应用<sup>[1]</sup>,针电极放置在距水表面20mm处,负极板浸入水中,电晕放电发生在针与水表面之间。配合气流所形成的电晕风因为水的存在而提高了污染气体的清除效率,在一定范围内增大直流电压会提高清除效率。从扩大电晕区的角度出发,反应器内电场分析将能指导针极分布的优化设计和电压幅值的选取,分析将涉及气液两相流体介质。

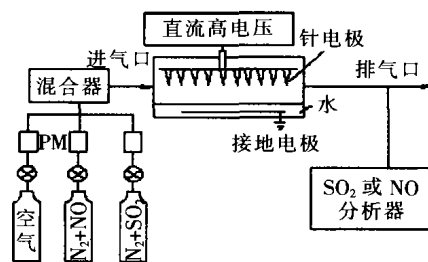


图2 去除NO和SO<sub>2</sub>的针-板反应器装置

### 2.2 针-网反应器

图3给出一种针-网电极结构的反应器<sup>[2]</sup>,网状电极可迎面通过气流,也方便催化剂放入。特别的催化剂加入位置有利于其发挥作用,加催化剂时分解甲苯的效率提高了1~2倍。试验气流量为1L/min,甲苯浓度到达稳定状态后开始放电。反应器内电场分布的计算,将有助于改进包括蜂窝催化剂在内的网状电极结构尺寸设计。

### 2.3 线-板反应器

一种线-板式放电等离子体室内空气净化反应

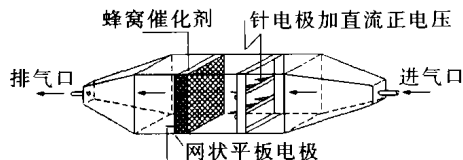


图3 加有催化剂的针-网等离子体反应器

器见图4<sup>[3]</sup>,特点是在反应器的一端安装了涂有TiO<sub>2</sub>光催化剂层的网,脉冲放电电晕流注将对微粒和乙醛产生较高的排除率。催化剂涂敷网周围的电场分布分析计算将对网结构的设计和优化提供依据。

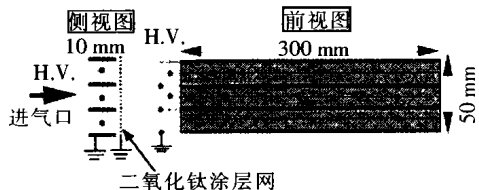


图4 加TiO<sub>2</sub>催化剂网的等离子体空气净化反应器

### 2.4 线-筒反应器

一种利用线-筒结构反应器进行等离子体室内空气净化的装置示于图5<sup>[4]</sup>,结合了作为二级除尘的静电集尘器,可去除普通的正电晕静电除尘器无法去除的烟气和难闻气味等。在反应器的气体通道部分也填充了催化剂。通过对装置电场分布的计算,可以观测到反应器和集尘器两部分场的状况,以及微小污染颗粒周围电场的畸变。

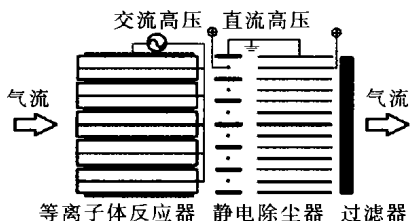


图5 结合静电除尘的室内空气净化装置

图6的线-筒反应器中分别载入不同的催化剂:一种是掺杂铜的沸石催化剂Cu-ZSM-5或TiO<sub>2</sub>和钒V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>圆球;另一种是催化剂附着网<sup>[5]</sup>。装置去除废气的效率很高,但受温度影响,当气体温度低于200℃时,能有效去除NO或NO<sub>x</sub>,去除率随输入功率的增大而增加,在30W时最大的去除率达60%。催化剂形态和附着方式的不同将影响反应器内电场的分布,场是脉冲放电场,温度场的影响也将使反应器内有某种程度的耦合场分析问题。

### 2.5 同轴反应器

图7所示的同轴电晕反应器用于重整来自甲烷

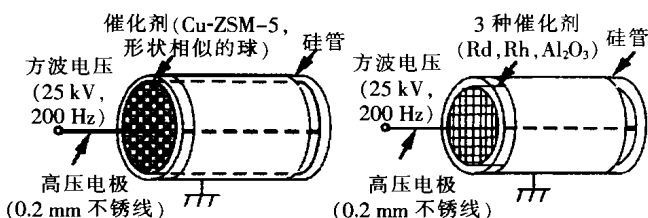


图6 带催化剂球或网的线-筒反应器

的碳化氢<sup>[6]</sup>,放电间隙仅1.0mm。两极间插入的石英管产生了很大的影响,当输入功率相同时,产生的碳化氢气体比没有绝缘材料的多,这在乙烯生产效率的提高中作用明显。绝缘层的加入使原先场的分布产生变化,有些类似于介质阻挡放电的情况,电场计算有助于分析加速碳化氢气体生成的原因,并据此确定改进的方向。

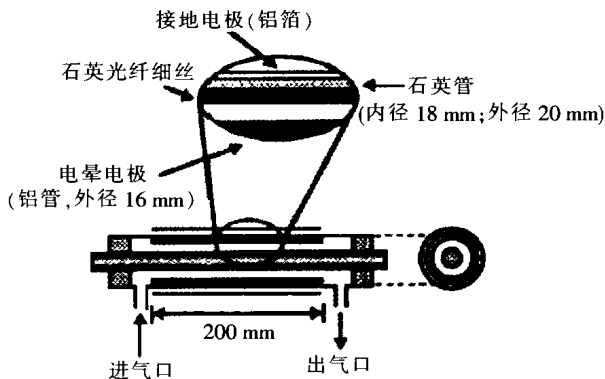


图7 同轴等离子体反应器

### 2.6 填充床反应器

甲基溴CH<sub>3</sub>Br用作粮仓或温室土壤调节的熏蒸剂,但其残留排放的气体与同温层的高能光子反应将减小臭氧浓度。图8的一种非平衡等离子体填充床铁电体反应器可用于去除残留甲基溴<sup>[7]</sup>。处理表明,当以氮气为载体时去除率高达90%,空气为载体去除率达50%。图8中同轴管状反应器内充满了相对介电常数10000的铁电体BaTiO<sub>3</sub>球,两端的聚四氟乙烯板挡住小球。当工频交流高压径向加到填充床时,圆球被极化且在球间交界处形成强电场,造成局部放电产生非平衡等离子体。施加电压和气体滞留时间(流量)将显著影响处理效率。

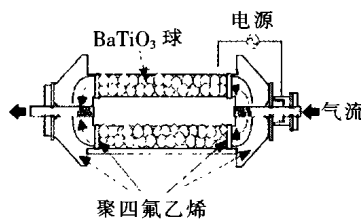


图8 填充床等离子体反应器示意图

### 2.7 等离子体-催化剂反应器

加入适当的催化剂,有利于放电产生等离子体,提高反应活性。上述一些反应器中催化剂多以球状填充或附着在网上的形式存在。图9是另一种形式的介质阻挡放电非平衡等离子体-催化反应器系统,它被用于氮氧化物的去除<sup>[8]</sup>。

氮氧化物的选择性催化还原反应将受等离子体反应条件的影响,因而先要进行等离子体过程特性的试验。反应器中从NO到NO<sub>2</sub>的氧化反应在室温下容易发生,然而随温度的上升,反应率大大降低,加入乙烯可在100~200℃范围内增加氧化率。采用

交流和脉冲高压两种电源的 NO 氧化效率几乎没有差别。在  $V_2O_5/TiO_2$  催化剂上等离子体放电的  $NO_x$  去除率大大增加。在观察到显著数量一氧化碳和氨释放时, 由乙烯所形成的副产品甲醛在催化剂反应器中可被完全地移除。系统在  $100\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$  范围内可去除超过 80% 的  $NO_x$ , 这远低于选择性催化还原反应的典型温区  $250\sim 450\text{ }^\circ\text{C}$ 。同轴的介质阻挡放电反应器由玻璃管和不锈钢钢棒构成, 二者间充满玻璃珠, 玻璃管外包接地的铝箔。所使用的催化剂为蜂窝状的  $V_2O_5/TiO_2$ , 反应器在烘箱中以维持所需的气体温度, 进入的气体也先经过螺旋管道加温。

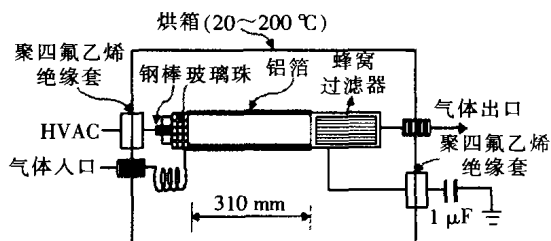
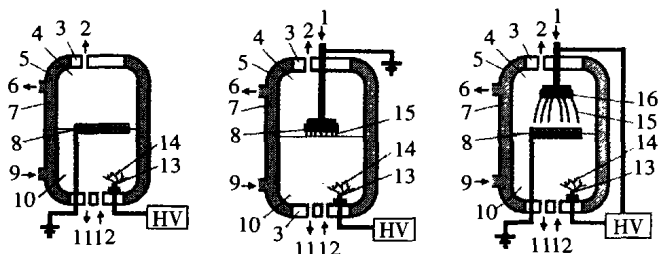


图 9 等离子体-催化剂反应器示意图

催化剂及其附载形式将对反应有重要影响, 例如选用介电常数很高的载体, 其表面场强很高, 有利于产生强烈的放电, 而在其内部场强接近零, 活性成分几乎不能发挥作用; 如果采用介电常数较低的材料, 催化剂内部场强可提高, 表面场强则降低。催化剂及其载体的加入将改变电场的形态, 电场分析将提供依据去改进催化剂加入形式, 使反应朝着快速彻底的方向发展。

### 2.8 气液混合放电反应器

图 10 是一个气液混合放电反应器的实例<sup>[9]</sup>, 相对单相液体放电反应器, 它有明显优势。对比表明, 降解水中的臭氧和过氧化氢污染物, 混合-并联反应器是最有利的配置。其内电场的分析是典型的多相介质放电电场的分析, 包括液相、气液两相串联或并联放电等不同的情况, 分析将有助于配置更合理的反应器运行形式。



(a)液相放电反应器 (b)串联放电反应器 (c)并联放电反应器  
1——进气口 2——排气口 3——聚四氟乙烯帽 4——气相介质  
5——玻璃体反应器 6——冷却水出口 7——冷却水套  
8——玻璃质碳网接地电极 9——冷却水入口 10——液相介质  
11——流体出口 12——流体入口 13——液相高压电极  
14——液相放电 15——气相放电 16——玻璃质碳网高压电极

图 10 气液相混合放电反应器的结构

## 3 反应器电场分析的相关问题和有限元方法

鉴于放电等离子体应用技术只在近 20 年取得蓬勃的发展, 加之分析方法的多样性, 以致电磁场有限元分析计算方法的使用并不像其它领域那样热烈, 但在近 10 年来相关研究的文献报导开始增多, 从中可以了解研究者的关注点。

### 3.1 剖分方法

图 11 所示为有限元分析高压脉冲烟气处理线-筒反应器的剖分结构, 剖分采用镜像对称的方案, 4 个象限的剖分是相同的<sup>[10]</sup>。分析中利用泊松方程计算每个节点的电压和每个单元的电场。因为介质为干燥的气体, 在高电压和低电流下工作, 故磁场的场影响不予考虑。

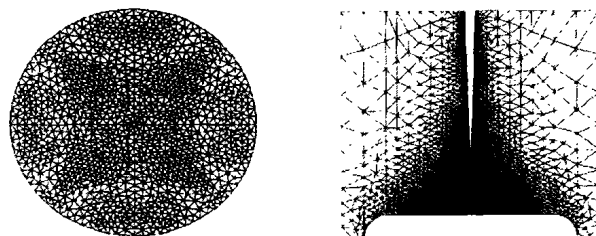


图 11 烟道截面的镜像对称剖分 图 12 针电极正流注区域的剖分

图 12 用有限元分析针电极正流注的增长<sup>[11]</sup>。图中选择线性三角形单元剖分针和平板电极之间的区域。由于针尖附近是流注增长的重要研究区域, 因此网格剖分较密, 离开针尖端则剖分单元逐渐增大。

### 3.2 针电极正先导电场

图 13 用二维数学模型计算正先导尖端附近的有限区域电离空气的特性<sup>[12]</sup>。图中给出整个计算区域平面的等场强线。等场强线开始于  $9\text{ kV/cm}$ , 并以  $1\text{ kV/cm}$  的幅度减小, 虚线为区域的边界。针尖端周围的等场强线类似于同心形式, 并且径向( $r$  方向)比轴向( $z$  方向)的密。

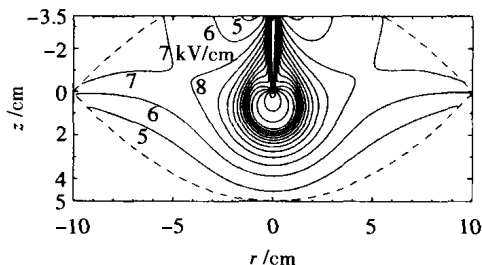


图 13 针电极正先导的场强分布

### 3.3 介质阻挡放电电场

一种介质阻挡放电的模型和场强分析在图 14 中给出<sup>[13]</sup>。图 14(a)为置于环氧树脂中一对电极的几何模型, 当置于原点的水滴直径改变时, 在绝缘塑料表面的  $x$  方向场强  $E_x$  分布曲线见图 14(b), 由于绝缘层的阻挡, 场的分布发生改变。

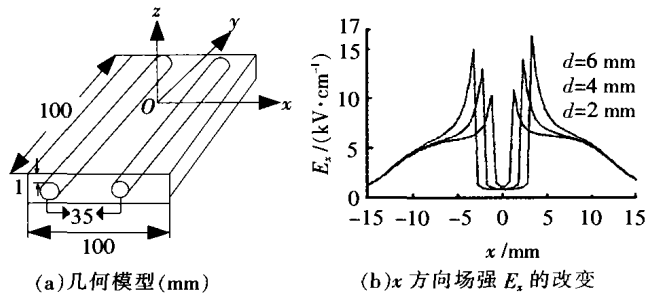


图 14 介质阻挡放电的分析

## 4 结语

结合应用对典型的针板、针网、线板、线筒、同轴以及填充床和混合介质放电反应器等特点进行分析说明,还基于电场分析的方法说明了其着眼点及面临和要解决的问题。通过几种典型反应器或电极间电场分析的实例,包括电场有限元分析中剖分方法、电场分布形态等,说明了作为一种有力的分析方法——电场分析法在放电等离子体反应器研究中具有重要的地位。

## 参考文献:

- [1] Dong Limin, Chen Chuntian. The Influence of Interface Phenomenon on Removal of NO and SO<sub>2</sub> in Corona Discharge Reactor with Water Film[A]. IEEE 37th Industry Applications Conference[C], Salt Lake City, USA, 2002.
- [2] Duan Li, Daisuke Yakushiji. Decomposition of Toluene by Using a Streamer Discharge Reactor Combined with Catalysts [A]. IEEE 36th Industry Applications Conference[C], Chicago, USA, 2001.
- [3] Akira Mizuno, Yoshiyuki Kisanuki. Indoor Air Cleaning Using a Pulsed Discharge Plasma[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1999, 35(6): 1284-1288.
- [4] Masaaki Okubo, Toshiaki Yamamoto. Electric Air Cleaner Composed of Nonthermal Plasma Reactor and Electrostatic Precipitator[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 37(5): 1505-1510.
- [5] Kazuo Shimizu, Tetsuji ODA. DeNO<sub>x</sub> Process in Flue Gas Combined with Non Thermal Plasma and Catalyst[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1999, 35(6): 1311-1317.
- [6] M Okumoto, Z Su. An Insert Effect of Insulation Materials in Plasma Chemical Reactions[A]. Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials[C], Toyohashi, Japan, 1998.
- [7] Graciela Prieto, Oscar Prieto. Destruction of Residual Fumigant Using a Plasma Reactor[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2003, 39(1): 72-78.
- [8] Young Sun Mok, V Ravi. Abatement of Nitrogen Oxides in a Catalytic Reactor Enhanced by Nonthermal Plasma Discharge [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2003, 31(1): 157-165.
- [9] P Lukes, A T Appleton, B R Locke. Hydrogen Peroxide and Ozone Formation in Hybrid Gas-liquid Electrical Discharge Reactors[A]. IEEE 37th Industry Applications Conference[C], Salt Lake City, USA, 2002.
- [10] Ko Kwang-Cheol, Choi Jung-Mo. High Efficient Discharge Processes of Large-capacity Flue Gas by Using Bidirectional Pulse Generator[A]. IEEE 12th International Pulsed Power Conference[C], California, USA, 1999.
- [11] Nadeem N Bunni, Paul B Mcgrath. Computer Analysis and Observation of Streamer Growth at a Dielectric Interface [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(1): 136-143.
- [12] Francois Vidal, Ivo Gallimberti. Modeling of the Air Plasma Near the Tip of the Positive Leader[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2002, 30(3): 1339-1349.
- [13] S Keim, D Koenig. The Dynamic Behaviour of Water Drops in an AC Field[A]. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena[C], Kitchener, Canada, 2001.

作者简介:王小明(1948-),男,工学博士,教授,主要从事放电等离子体及应用、脉冲功率技术、测控技术方面的研究。

## 广告单位

### 彩色广告:

扬州万能电器有限公司  
 宁波伟隆电器成套有限公司  
 上海德力西集团有限公司  
 长沙正元橡胶特种制品有限公司  
 大连第一互感器有限责任公司  
 余姚市兴邦高压电器开关厂  
 南通市神马电力科技有限公司  
 宏伟电气有限公司  
 上海中科电气集团有限公司  
 南京因泰莱电器股份有限公司  
 乐清市东盟电力智能化设备有限公司

广州启能开关有限公司  
 广州市增强绝缘电器厂  
 河南庆华机器厂庆华电气有限公司  
 上海珂利电气有限公司  
 无锡市南方电器制造有限公司  
 武汉市协力电气设备有限公司  
 西安向阳航天材料股份有限公司  
 特种橡胶厂  
 常州市天创智能化技术有限公司  
 浙江万控电气成套设备有限公司  
 江阴市科达电气技术有限公司  
 浙江黄华电气有限公司  
 北京兴迪仪器有限责任公司  
 南中国国际高低压电器及成套设备展览会  
 文尼国际电力设备与控制装备展

览会  
 华仪电器集团

### 黑白广告:

咸阳秦华特种电子元器件厂  
 西安西电高压开关有限责任公司  
 西安西容电器制造有限公司  
 武汉三鑫华泰电气测试设备有限公司  
 武汉中试高压电器研究所  
 武汉市合众电气设备制造有限公司  
 第四届北京国际电力电工高低压电器展览会  
 溧阳市永新绝缘粉末有限公司  
 鞍山华瑞继保电气有限公司  
 武汉科新电力设备有限公司