

基于等离子体反应器的室内空气 净化装置研究

王晓明 史文祥 赵莹 唐宇 张建功 管磊
(哈尔滨工业大学电气工程与自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要 在对比若干室内空气净化方法之后,介绍了等离子体空气净化能力、机理以及光催化反应,对基于等离子体反应器的室内空气净化典型装置进行系统分析。对等离子体空气净化技术的研究进行了展望,指出存在的问题和发展的方向。

关键词 室内空气净化 等离子体 反应器

Study of indoor air cleaning devices based on plasma reactor

Wang Xiaoming Shi Wenxiang Zhao Ying Tang Yu Zhang Jianguo Guan Lei
(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The cleaning capacity, fundamental of indoor air cleaning using discharge plasma and photocatalysis reaction are introduced with comparing methods for cleaning indoor air. The typical devices of indoor air cleaning based on plasma reactor are systematically analyzed. The future study development of this technology is presented, the problems to be solved and the study terms are pointed out.

Key words indoor air cleaning; plasma; reactor

1 室内空气净化技术的发展进程

现代室内空气污染的危害引起人们广泛的关注,也推动了室内空气净化技术的进程。目前,仍被大量采用的净化方法主要有通风换气式、过滤式和吸附式等。然而,在可处理污染物颗粒大小、处理效率、处理有毒有害气体(如 NO_x, SO_x, VOCs 等)以及杀灭细菌等方面,传统方法已无法满足现代室内空气污染治理的需求^[1,2]。静电收集、臭氧氧化和气相过滤(gas-phase filtration)等新方法应运而生。众多方法中首推等离子体室内空气净化法。表1为各种空气净化系统的综合比较^[3],可见等离子体空气净化法的优势。

2 等离子体空气净化的机理

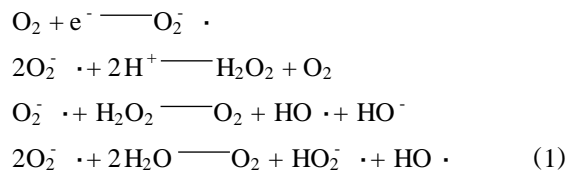
2.1 空气净化范围的扩展

采用空气电晕放电等方法,可在常温常压下获得非平衡等离子体,大量高能电子的轰击,产生 O⁻ 和 OH⁻ 等活性粒子,一系列反应使有机物分子最终降解为 CO₂、H₂O,伴随的紫外光辐射还有杀菌消毒之功效。采用等离子体净化法可净化的污染物尺寸

达 0.0001 μm,与传统的空气净化方法相比下降了几个数量级^[4]。

2.2 等离子体空气净化反应

产生非平衡等离子体的反应器常采用线-板电极结构,当施加直流、交流或脉冲高压到电极上,便会在极不均匀电场作用下产生电晕放电,气隙将保持在不被击穿状态^[5]。合理的空气净化等离子体反应系统的设计,应保证被处理空气在反应器内处于稳定的电晕放电状态。电晕区内污染空气净化的主要反应如下^[3,6]:



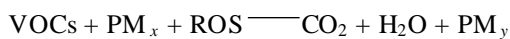
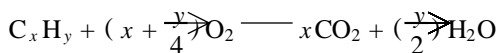
基金项目: 航天科技创新基金资助项目(天科研 20018-19)哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目(HIT-MD2002.13)

收稿日期: 2003-05-27; 修订日期: 2003-07-20

作者简介: 王晓明(1948~),男,工学博士,教授,主要从事放电技术及应用、等离子体中的基本过程和特性、测控技术方面的研究。E-mail: xmw2002@hit.edu.cn

表 1 几种空气净化系统的比较
Table 1 Comparison of various air cleaning systems

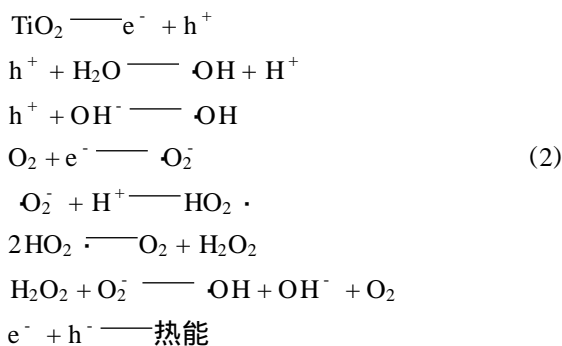
系 统	等离子体反应器	臭氧发生器	静电收集器	气相过滤器	过滤器
方法	电子的	电子的	电子的	物理化学的	物理的
原理	电晕放电	火花放电	高电压线板	选择性吸附及反应	板状、褶状或 HEPA 媒质
过程	等离子化	臭氧发生	微粒充电	吸附和反应	收集于多孔媒质
有效形式	高能电子、紫外辐射、氧基、羟基	臭氧	带电粒子	吸附和反应的部位	大的表面积
产物	CO ₂ 、H ₂ O、大 PM _x	CO ₂ 、H ₂ O、O ₃	大的 PM _x	少量的 VOCs	少量的 PM _x
副产物	极少量的 O ₃ (若无控制)	大量 O ₃ 和大气反应物	O ₃ (若不定期清理)	携带污染物的失效媒质	携带污染物的失效媒质
健康隐患	O ₃ (可控)	大量的 O ₃ 泄漏	高电压及 O ₃ 泄漏	饱和、有限的选择性、清理	污染的过滤器及其处理
VOCs	化学氧化	化学氧化	吸附于颗粒	吸附/吸收	不能处理
PM _x	聚结	不能处理	收集于板上	收集于媒质	撞击、沉积和渗透
臭味	氧化	氧化	不能处理	吸附/吸收	不能处理
微生物	使失活	使失活	通过微粒去除	不能处理	通过微粒去除
控制	按需发生	连续产生	按处理过程要求设计	按处理过程要求设计	按处理过程要求设计
费用	低	低	中等	高	高
能量需求	低	中等	高	无	无
消耗	低	低	低	高	高
维护	定期清洗	更换元件	定期清洗板	更换媒质	更换滤网



其中 VOCs 为挥发性有机物, PM_x、PM_y 为微小粒子, C_xH_y 为碳氢化合物, ROS 为活性氧类。

2.3 光催化等离子体反应

使用光催化可使等离子空气净化效率进一步提高。多相光催化剂 TiO₂ 具有抗氧化和光腐蚀、稳定无毒、催化活性高、价廉等优点,近十年来倍受重视并迅速开拓应用^[7~10]。光催化反应(为在价带上产生的带正电的空穴)如下:



为增加表面光生载流子的浓度,减小迁移到表面的强还原力电子与强氧化力空穴复合几率,同时增大比表面积,以利于反应物吸附而增大反应几率,采用纳米甚至量子级 TiO₂。悬浮方式的 TiO₂ 有难以回收、容易中毒等缺点,而凸显出负载型 TiO₂ 光催化反应器的优点,用先进的负载技术甚至有更高的催化效率^[10]。

3 典型的等离子体空气净化装置

3.1 采用光催化的等离子体空气净化装置

一种典型的反应器结构如图 1 所示,经过线-板放电区的空气被等离子化,与板极等电位的 TiO₂ 催化剂附着网加速反应过程^[11]。

装置对空气中悬浮颗粒的去除效果示于图 2,当施加脉冲电压进行等离子体处理时,仅需几分钟的空气循环,空气中悬浮颗粒的含量就降到接近零的程度。对几种典型的 VOCs 的处理效果在表 2 给出,处理效果也是很明显的。

经过脉冲放电等离子空气净化的主要产物为二氧化碳和水,而氮氧化物则很少,通过有效的方法可

控制只产生很少的 O₃, 无二次污染也是显著的优点之一。

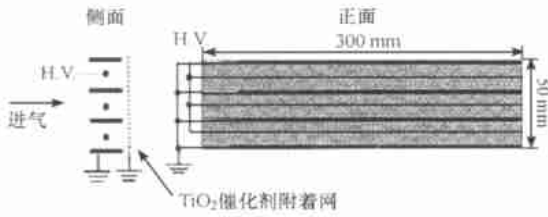


图1 采用光催化的等离子体反应器的结构

Fig. 1 The plasma air cleaning equipment with photocatalysis

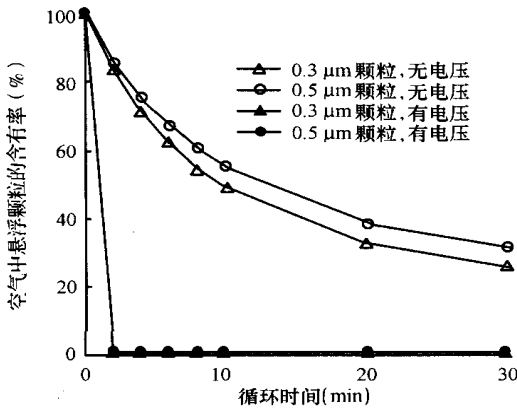


图2 对悬浮颗粒的去除效果

Fig. 2 The cleaning effect for difference suspend particles

表2 对 VOCs 处理效果的比较^[5]

Table 2 Treatment of VOCs and effect comparison^[5]

空气中的 VOCs 物质	无等离子体处理 (μg/m ³)	有等离子体处理 (μg/m ³)
异辛烷	5.4	3.5
苯	8.3	3.5
甲苯	29.9	16.1

3.2 与静电收集器结合的空气净化装置

静电收集器 (ESPs) 可对空气中的众多种类离子进行吸附, 但对诸如香烟产生的富含有毒成分的气体等却无能为力。其令人讨厌的气味成分主要是乙醛, 在干燥空气中采用非平衡等离子体法可实现对乙醛的净化。静电收集器则在很大程度上减轻了等离子反应器的负担, 并可对等离子净化过程产生的 CO₂、H₂O 进行吸附, 所以采用二者结合的装置可较大提高效率^[12, 13]。

空气中难闻气味的分子通过等离子反应器被分解, 其净化的机理如前所述。等离子反应器出来的气

流将进入第 2 处理过程——静电吸附阶段。半径较大的分子以及等离子体未处理的粒子在此被吸附。

系统中等离子反应器的结构示于图 3。试验表明在频率 60 Hz、峰峰值 20 kV 交流高压的作用下, 配以光催化作用的该等离子反应器对乙醛的一次净化效率可达 90% 以上, 除臭效果显著。

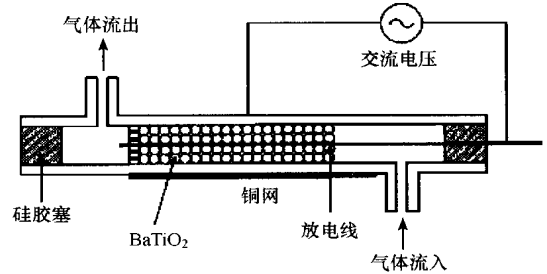


图3 等离子反应器的结构

Fig. 3 Structure of plasma reactor

二段式静电吸附装置的结构示于图 4, 前一段为离子化部分、随后一段为收集部分, 最后是碳过滤网部分。离子化部分为线板 (接地) 结构, 施加 4.8 kV 直流电压, 其直流电晕放电可产生大量的离子, 从而将悬浮粒子吸附。离子吸附粒子后在静电场库伦力或热扩散的作用下以一定的迁移速度进入收集单元, 对大于 2 μm 的粒子静库伦力的作用占主要部分, 而小于 0.2 μm 的粒子热扩散起主要作用。

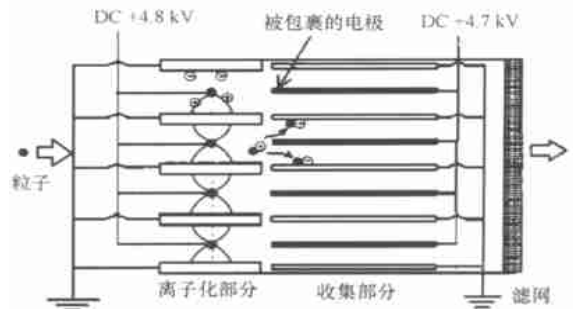


图4 二段式静电吸附装置的结构

Fig. 4 Two section electrostatic precipitator

3.3 空气净化装置的智能控制

一种智能控制的空气清净机结构如图 5 所示, 系统通过传感器组检测空气中的粉尘和有机污染物浓度等, 控制器根据手动或自动控制指令和传感检测信号以及最优控制策略, 发出指令控制等离子反应器以及风机的运行, 并实时显示空气净化的结果。系统的空气循环净化回路包括过滤、光催化等离子体反应、紫外光杀菌消毒和静电集尘等环节, 系统可

实现对家居、办公等场所的室内空气快速分子级净化。

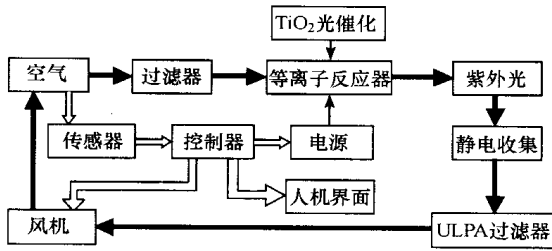


图5 智能控制的空气清净机的结构

Fig. 5 Intelligent air cleaning device

4 等离子体空气净化技术的展望

等离子体空气净化技术方兴未艾,既有诸多亟待解决的技术问题,也有进一步创新和发展的空间,这些都成为该领域工作者们致力研究的动力。

(1)大量高能电子的不断产生是等离子体反应高效进行的关键,陡前沿高压窄脉冲建立短持续时间的强电场,能量被有效地分配给小惯量的电子,使之加速获得高能。脉冲电压的高幅值虽然有利于电子动能的提高,但提高受到击穿电压的制约,所引起的温升则是另一个不利因素。新型反应器以及电源的设计和组合是解决问题的出路之一^[14]。

(2)直接决定高能电子产生的是脉冲放电区域电磁场分布和参数,这与包括电极在内的反应器设计、脉冲电压参数等有关。场是非静态和非均匀的,又有等离子体产生、电晕放电乃至弧光放电等变化,使电磁场理论分析计算非常复杂,但它是放电处理过程研究和反应器优化等一系列工作的基础,系统专门的分析计算研究有待深入进行。

(3)施加光催化剂可有效加速原有的等离子体反应,但施加方法,包括光催化剂载体的结构形式、与电极的关系、乃至光源形态参数,都将影响催化效率。

(4)线-板或线-半筒反应器仍被大量采用,但填充式反应器也在崭露头角,新型或结合方式以及多级反应器正展现其生命力。

(5)模块化使生产、维护成本降低,可靠性提高,小型轻量化既是家居、办公使用的要求,也是其他诸如汽车驾驶室等场合空气净化的需求。

(6)对于大型的室内场合(如电影院、健身房等),需要多个等离子体空气净化装置构成净化系统,从而存在对不同方位污染情况的检测及数据的

处理,以及对相应位置等离子体发生单元的控制等诸多问题。采用智能控制方法将成为大势所趋,即便在单机控制上也是一个发展的方向。

参考文献

- [1] N. S. Panikov, S. Paduraru, et al. Destruction of bacillus subtilis cells using an atmospheric-pressure dielectric capillary electrode discharge plasma. *IEEE Trans. on Plasma Science*, **2002**, 30(4): 1424 ~ 1428
- [2] Keping Yan, Hexing Hui, et al. Corona induced nonthermal plasmas: Fundamental study and industrial applications. *Journal of Electrostatics*, **1998**, 44(1): 17 ~ 39
- [3] Stacy L. Daniels. On the ionization of air for removal of noxious effluvia. *IEEE Trans on Plasma Science*, **2002**, 30(4): 1417 ~ 1418
- [4] Kimberly Kelly-Wintenberg, Daniel M. Sherman, et al. Air filter sterilization using a one atmosphere uniform glow discharge plasma (the Volfilter). *IEEE Trans. on Plasma Science*, **2000**, 28(1): 64 ~ 70
- [5] J. Reece Roth. *Industrial Plasma Engineering/ Vol. 1: Principles*. Iop publishing Ltd., **1995**
- [6] L. Tanasomwang, F. C. Lai. Long-term ozone generation from electrostatic air cleaners. *IEEE IA. Society Annual Meeting*. New Orleans, **1997**. 75 ~ 78
- [7] Hoffman M. R., Martin S. T., et al. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chem. Rev.*, **1995**, 95(2): 69 ~ 96
- [8] Mills A., Hunte L. S. An overview of semiconductor photocatalysis. *J. Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **1997**, 108(1): 1 ~ 35
- [9] Hofstadler K., Bauer R., et al. TiO₂-assisted degradation of environmentally relevant organic compounds in wastewater using a novel fluidized bed photoreactor. *Environ. Sci. & Technol.*, **1996**, 30(3): 817 ~ 824
- [10] Peill N. I., Hoffmann M. R. Development and optimization of a TiO₂-coated fiber-optic cable reaction: Photocatalytic degradation of 4-chlorophenol. *Environ. Sci. & Technol.*, **1995**, 29(12): 2974 ~ 2981
- [11] Akira Mizuno, Yoshiyuki Kisanuki, et al. Indoor air cleaning using a pulsed discharge plasma. *IEEE Trans. on IA*, **1999**, 35(6): 1284 ~ 1288
- [12] Masaaki Okubo, Toshiaki Yamamoto, et al. Electric air cleaner composed of nonthermal plasma reactor and electrostatic precipitator. *IEEE Trans. on IA*, **2001**, 37(5): 1505 ~ 1511
- [13] A. Mizuno. Electrostatic precipitation. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, **2000**, 7(5): 615 ~ 624
- [14] Shigeru Futamura, Hisahiro Einaga, et al. Comparison of reactor performance in the nonthermal plasma chemical processing of hazardous air pollutants. *IEEE Trans. on IA*, **2001**, 37(4): 978 ~ 985