

机械加工车间油雾净化技术研究进展

戴险峰

广东环境保护工程职业学院, 环境监测学院, 佛山市, 广东省, 中国

摘要: 近年来, 工业发展引发了许多环境问题, 如油雾、灰尘、有毒气体等, 因此现代室内空气净化技术受到了更多人的关注。尽管传统的过滤和静电沉积 (ESP) 方法无法满足现代空气净化器的要求, 但纳米技术引起了人们的极大兴趣, 克服了传统设备中去除效率低的问题。除了传统方法外, 本文还介绍了一些新颖的方法, 如光催化、放电等离子体和生物技术。生物技术克服了其他方法的缺点, 成为一种潜在的室内空气净化技术。然而, 由于技术难度, 这种新方法仅限于某些领域。通过机理研究, 一些科学家发现, 组合技术可以大大提高去除效率, 这表明机理研究比应用研究更为重要。最后, 可以得出结论, 油雾净化的趋势是低成本、高效率且无二次污染。

关键词: 油雾; 净化; 生物过滤器; 光催化; 等离子体

Research Progress on Oil Mist Purification Technology in Machining Workshops

Xian-feng Dai

Department of Environmental Monitoring, Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan City, Guangdong Province, China

Abstract: In recent years, the development of industries has caused many environmental problems, such as oil mist, dust, toxic gases etc, so modern technology for indoor air purification attracts the interest of more people. Although conventional methods such as filtration and ESP (electrostatic precipitation) can not satisfy the requirement of modern air purification, nano-technology seizes much interest to people, overcoming the removal efficiency in conventional devices. Besides conventional methods, the novel methods such as photocatalysis, discharge plasma and bio-technology were introduced in this paper. Bio-technology overcomes the disadvantage of other methods, becoming a potential technology for indoor air purification. However, this novel method is confined to certain fields because of the technical difficulties. By the mechanism research, some scientists found that combination technology can greatly increase the removal efficiency, which indicated that mechanism study is more important than application study. In the end, it can be concluded that the tendency of oil mist purification is low cost, high efficiency and non-second pollutants.

Keywords: Oil mist; Purification; Bio-filter; Photocatalysis; Plasma

基金项目: 广东省高职院校高水平专业群建设项目 (GSPZYQ2020004); 广东环境保护工程职业学院 2022 年度教研教改项目 (J446122072306); 广东省职业教育龚盛昭名师工作室教改项目 (Z1); 2022 年度广东省教育科学规划课题(高等教育专项) (2022GXJK512); 中国轻工业联合会课题 2022 年度课题 (QGJY2022031)。

作者简介: 戴险峰, 女, 副教授, 硕士, E-mail: dxf_dai@126.com。

1 引言

近年来，室内空气质量受到更多关注，因为车间内漂浮的油雾对工人的健康有害。由于工业设备的摩擦，从工厂或其他设备排放的油雾漂浮在空气中，降低了空气质量并导致了許多疾病。许多科学家对去除油雾进行了研究，引起了环境科学家的巨大兴趣。传统的空气净化技术是机械过滤和静电沉积，但这些方法存在许多缺点，包括体积大、能耗高、噪音过大，以及需要定期维护[1]。为了提高效率和减少副产品，新技术如纳米技术和等离子体技术被应用到这一领域。尽管传统方法今天已经过时，但新技术还不成熟，因此在工业中通常与其他传统方法结合使用。

本文介绍了光催化、放电等离子体和生物技术。生物技术克服了其他方法的缺点，成为一种潜在的室内空气净化技术。然而，由于技术难度，这种新方法仅限于某些领域。通过机理研究，一些科学家发现组合技术可以大大提高去除效率，这表明机理研究比应用研究更为重要。最后，可以得出结论，油雾净化的趋势是低成本、高效率且无二次污染。

2 净化机理的研究进展

2.1 过滤机理

过滤机理可以分为六种类型，包括筛选、重力沉降、静电沉积、惯性碰撞、直接拦截和扩散[2]（图1）。油雾在纤维上的沉积是这六种机制共同作用的结果。其中，拦截、惯性碰撞和扩散的贡献较大。为了避免数学细节，分别研究了六种过滤机制，并结合其他机制来评估过滤效率。在过滤过程中，筛选机制是指当油雾的颗粒大小大于过滤器孔径时，颗粒无法通过过滤器而沉积在过滤器表面。

拦截机制在过滤中起着重要作用，与筛选机制有很大的不同，因为拦截不仅筛除大颗粒，还

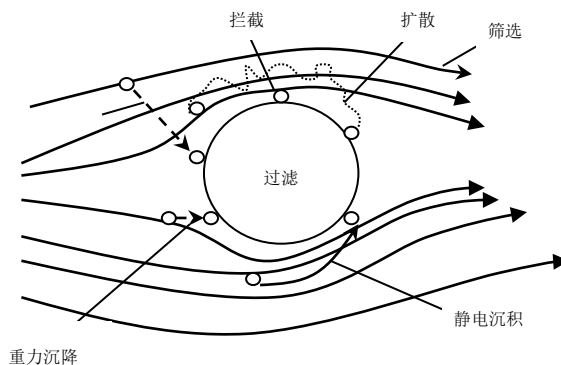


图1 过滤机理

去除那些大于过滤器孔径的颗粒。容易理解的是，细颗粒在重力场中沉积在纤维表面，因为重力改变了运动颗粒的轨迹，导致细颗粒的聚集。

已知如果纤维和颗粒带电，相邻带电的颗粒会相互吸引。当颗粒与纤维碰撞时，颗粒和纤维都会带电。在静电力的作用下，细颗粒沉积在纤维上。对于大颗粒（直径 $>1\mu\text{m}$ ），过滤是有效的，效率可以达到99%或更高。然而，当颗粒大小小于 $1\mu\text{m}$ 时，过滤效率急剧下降。机理研究已经非常成熟，提出了许多过滤改进方法用于实际应用。结合其他方法和传统过滤是一个不错的选择，可以解决现有的问题。

2.2 静电沉积的机理

静电沉积（ESP）是一种有效去除空气中细颗粒的方法。传统ESP的效率可以达到约95%，它由变压器、电极、收集板和电源组成[3]（图2）。在电极区域内的电场足够加速高能级的自由电子，从而电离气体并产生负离子。当细颗粒通过电极区域时，与负离子和电子碰撞后会被放电。

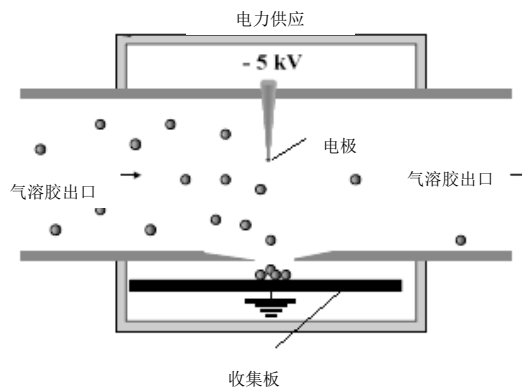


图2 静电沉积器示意图

由于电荷的相互作用, 这些颗粒会向带正电的收集板移动。传统 ESP 的效率取决于电晕电荷、收集板的距离以及电晕电极的结构[4]。

2.3 光催化反应的机理

尽管物理方法去除效率较高, 但存在的一些其他问题如噪音大、能耗高也限制了它们的应用。为了解决这些问题, 科学家们发现光催化是一种理想的替代传统方法的方式, 因为反应后的产物是二氧化碳和水, 对环境友好[5]。自 1970 年代以来, 人们发现 TiO_2 在光催化分解有机化合物方面表现出色。自从 Fujishima 和 Honda 发现半导体 TiO_2 电极上水的分解后, 引起了科学家们的更大兴趣。自 1977 年 Frank 和 Bard 首次研究使用 TiO_2 分解水中的氰化物以来, 人们对其在环境应用中的兴趣不断增加[6]。在光催化技术中, 半导体材料是最重要的因素。在研究中, 常用的半导体材料包括 TiO_2 、 CdS 、 SnO 。由于 TiO_2 在化学上稳定、无毒、成本低且在分解 VOCs 方面效率高, TiO_2 是一种潜在的应用于油雾净化的材料[7]。光催化反应机理图如图 3 所示。

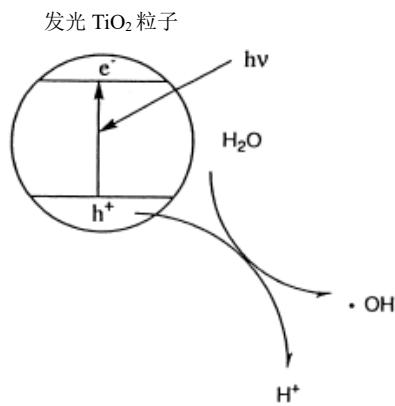


图 3 光催化反应机理

与 ESP 相比, 光催化机理更为复杂, 涉及反应动力学、热力学、固体物理学和光学。实际上, 尽管有许多优点, 但光催化不能作为工业中唯一的净化方法, 因为光催化反应器的设计涉及一些参数, 如反应器尺寸、形状、材料和光源, 这些对设备的去除效率至关重要。当光催化 TiO_2 应用于空气净化时, 光源的波长必须小于 400 纳米, 在紫光范围内, 这限制了该技术只能用于窄范围的光源。

2.4 放电等离子体

低温等离子体技术是一种用于油雾净化的新方法, 具有高效、无毒产物和低能耗等优点。从原理上讲, 低温等离子体是一种由电子、离子、自由基和一些颗粒物组成的中性导电液体。在放电区域, 大量高能电子从电极发射出来并与油雾颗粒碰撞, 导致污染物空气的分解、电离和激发, 同时过程中产生大量等离子体。去除过程可以分为三步: ①在产生等离子体的过程中, 瞬时高能破坏有害气体的化学键, 分解成无害分子; ②能量高于键能的活性粒子与有害气体碰撞, 产生大量 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{HO}_2$ 、 $\cdot\text{O}$ 自由基; ③自由基与有害气体反应[8]。相较于其他方法, 等离子体的净化研究吸引了更多关注, 这使其发展速度非常快。

2.5 生物技术

通过将有害物质转化为简单的无机化合物 (CO_2 , H_2O), 微生物实现了空气净化。S.P.P. Ottengraf[9]认为微生物净化可以分为三步: ①污染物从气相转移到液相; ②污染物从液膜表面扩散到生物膜; ③污染物被转化为 CO_2 和 H_2O (图 4)。Shareefdeen 等人[10]提出了一个类似于 Ottengraf 模型的模型, 该模型在微观动力学方面做了修改。Hodge 等人[11]建立了一个输入浓度对生物分解影响的模型。

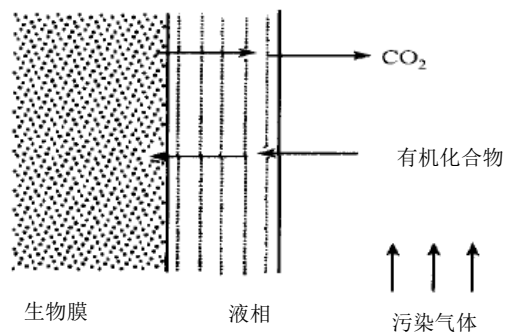


图 4 生物反应器的工作原理

3 油雾净化的应用进展

3.1 过滤材料的发展

近年来, 一些新型过滤材料被开发用于油雾净化, 克服了传统过滤材料的不足。装载活性炭的钢过滤器可以提高过滤效率。该装置由活性炭纤维制成, 具有微孔结构、大吸附容量和大表面积等优点[12]。新材料被认为是提高过滤效率的新途径。王旭[12]认为, 针刺非织造布是一种优

异的过滤材料，其纤维无序分布具有优势。在这种情况下，颗粒容易与单根纤维碰撞并沉积在上面。在无序结构的纤维中，颗粒的速度可以增加，从而缩短过滤时间。通过控制纤维的工艺，可以制造不同密度和结构的纤维以满足不同需求。自1950年代以来，针刺非织造布已发展成为用于收集大气中细颗粒的过滤材料。典型的熔喷法织物工艺使用特殊的聚丙烯树脂来制造针刺非织造布。自1960年代以来，玻璃纤维已被开发为HEPA材料用于空气净化。在1970年代，合成了去除效率达到95%的超细玻璃纤维[13]，用于0.3 μm 细颗粒的净化，这加速了电力、机械和航天工业的发展。在制造过程中混合不同的过滤材料，表明其在空气净化中具有各自的优势。玻璃纤维表现出优异的稳定性、低延伸率、高强度、不衰减，但其易碎是一个棘手的问题。但是，涤纶具有一些特性，可以弥补玻璃纤维的弱点。复合材料用于空气净化成为趋势[14]。

3.2 静电沉淀的发展

随着电气技术的发展，新型静电技术被应用于油雾净化领域，赋予静电设备新的特征。

3.2.1 静电沉淀的AC电源

通常，集尘板的电源是DC，其电荷与颗粒相反，因此改变了颗粒的轨迹。最近，AC电源被应用于集尘板的电源，由于交流电(AC)的特性，比DC具有更多优势[15]。当颗粒经过AC集尘板区域时，电源方向的变化导致颗粒上下移动。因为颗粒的运动方向垂直于电场方向，AC电源使颗粒在收集区域的轨迹变长，有利于沉积。当然，电源电压越高，沉积效率越高。然而，运行成本昂贵，因此不合理。Charles G. Noll[16]研究了静电沉淀的AC电源发现，AC电源的效率实际上高于DC电源。

3.2.2 水雾化静电沉淀

电荷量对沉积效率很重要。由于颗粒的电阻不同，决定沉积的表面电荷量也不同。由于电阻低，水颗粒比其他颗粒更容易带电。SHI[17]研究了水雾化静电沉淀的机制。第一步是通过水雾化装置使水充满装置。基于这个原理，与带电水颗粒碰撞的细颗粒因容易吸附在水表面而被充电。被充电后，带有水颗粒的细颗粒流经收集区到达集尘板。过程中最重要的部分是碰撞段，它决定了带电颗粒的数量。一些参数，如电力、结构特

征、集尘板距离、电晕放电和速度，是影响设备效率的最重要因素。

3.2.3 磁场应用于静电沉淀

为了提高传统ESP的效率，Yuan等人[18]提出了一种在传统ESP中应用磁场的新方法，旨在增加颗粒在收集区的轨迹。这种方法结合了电气技术和磁技术，涉及一些关于磁场分布和电晕放电的原理。在收集区应用磁场是为了改变带电移动颗粒的轨迹，因为带电颗粒在磁场中受到洛伦兹力的作用。当磁场方向与电场方向平行时，颗粒的轨迹呈螺旋形，延长了停留时间(图5)。相比之下，带电颗粒在电场中的轨迹是抛物线。经过研究，Yuan等人[18]发现，当在静电沉淀中应用磁场时，去除效率可达95%或更高。

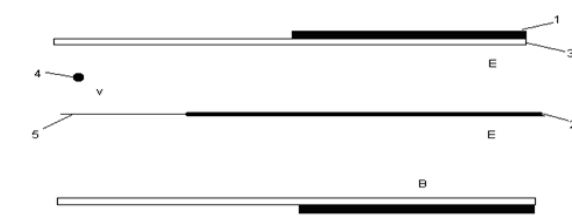


图5 应用于静电沉淀的磁场

1-磁体；2-高压集尘板；3-接地集尘板；4-带电细颗粒；5-放电针

3.2.4 ESP与纳米TiO₂的结合

Vinodgopal等人[19]结合电气技术和纳米技术，开发出一种新的空气净化设备，去除效率可提高到99%。在这种新型传统ESP中，集尘板涂有纳米二氧化钛膜，可以产生更多的电子-空穴对。电场可以增加电子-空穴对的分离，从而提高反应活性。

磁场的方向也会影响效率，因为洛伦兹力改变了颗粒的轨迹，这对沉积过程至关重要。Jiang等研究了电场方向、电压和电极材料等三个因素对电场辅助TiO₂膜分解的影响，发现这三个因素对去除效率很重要[20]。

3.3 TiO₂/AC过滤器

近年来，一些新型过滤材料被开发用于油雾净化，克服了传统过滤材料的不足。装载活性炭的钢过滤器可就光催化反应而言，也存在许多限制因素，如光源、光强度、吸收效率和反应效率，这些都会影响去除效率。基于上述问题，Gu等[21]开发了活性炭和纳米二氧化钛光催化剂网，该网结合了纳米二氧化钛和活性炭的优点。应用这种网后，去除效率将达到95%或更高。C.H. Ao, S.C. Lee[22]

研究了通过在活性炭过滤器上固定光催化剂 TiO_2 来进行室内空气净化。在他们的研究之后，他们发现在高湿度水平下，对于多种室内空气污染物的去除， TiO_2/AC （活性炭）的去除效率比仅使用 TiO_2 高出七倍。他们的实验装置包括 HEPA 过滤器、活性炭过滤器、离心风机、紫外线灯和 TiO_2/AC 过滤器（图 6）。

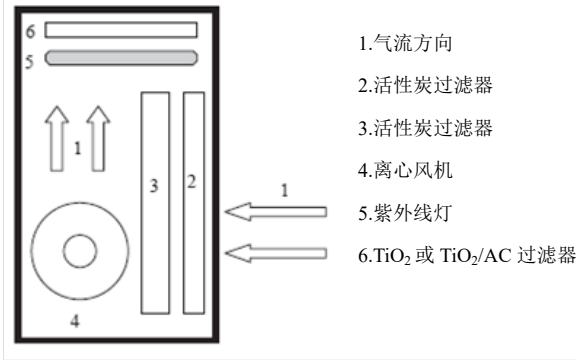
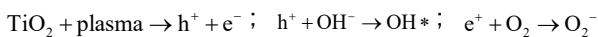


图 6 空气净化器示意图

3.4 新型等离子技术的发展

尽管放电等离子法为工业提供了高效率，但高能耗等问题使得该方法仅局限于实验研究或小型工厂。为了改进用于去除油雾的等离子技术，提出了一些新方法，例如结合吸附剂、催化剂、铁电材料和放电等离子。吸附剂不仅可以延长颗粒在反应区域中的停留时间，还可以吸附活性物质，从而延长活性物质的寿命以提高反应速度。Song[23]研究了填充在放电区域的不同吸收材料（玻璃球、微孔 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ）以测试去除效率。实验表明，吸收过程不仅增强了油雾的去除能力，而且在存在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 时，放电产生的臭氧减少了[24]。原则上，当温度升高时，吸收次数明显下降。然而，高温下组合系统的去除量大于室温下的系统，这表明高温对去除效率的影响超过了对吸附的负面影响[25, 26]。活性炭与放电等离子体的结合是另一个提高去除效率的好方法，它克服了单独使用活性炭的缺点。如上所述，在放电过程中，会产生大量活性物质，激活光催化剂从而提高了效率。但这种方法仍处于实验阶段。一些研究人员认为电子可以有效地激活 TiO_2 ，因此在存在 TiO_2 的情况下可以提高油雾的分解率[27]。在氧气环境下，通过放电等离子激活 TiO_2 的基本过程是[28, 29]:



3.5 生物方法的进展

目前，拜耳公司、孟山都等公司将生物膜技术应用工业各个领域。然而，高成本和昂贵的维护限制了其应用。尽管存在缺点，但生物分解在空气净化方面具有潜力。由于生物技术适用于低浓度污染物，因此需要开发用于高浓度污染物的设备。就生物膜而言，因为膜容易被堵塞，所以填料的寿命是过滤过程的关键[30]。

4 结论与建议

目前，各种方法和技术被提出用于油雾净化，如放电等离子、生物膜和组合系统。随着新技术的开发，新设备的趋势是低成本、高效率且无二次污染，其中高效率和无二次污染是最重要的因素。在材料科学中，合成了高强度、稳定性好的材料，特别是纳米材料的发展。由于高能耗，电除尘器研究的重点是降低能耗。Young Sun Mok 等[31]研究了传统的电除尘器，发现添加（丙烯）可以减少能耗。

表 1 油雾净化技术性能比较

	过滤	静电沉积	等离子技术	生物方法
去除效率	80-92%	85-99%	90-99%	95%-99%
降低压力	高	低	低	高
投入成本	低	高	高	高
二次污染	n/a	n/a	n/a	n/a
维护	便利	便利	便利	不便利
其他	可靠的	可靠的	可靠的	低浓度污染物

根据表 1 得出的结论是，新技术在去除效率上优于传统技术。然而，发展趋势是降低电力成本。尽管生物膜技术仍处于初期阶段，但它为油雾净化提供了较好的前景。显然，在大工厂中，由于污染物气体量巨大，仅使用光催化和生物膜等新方法是不够的，需要安装包括 ESP 和过滤器在内的预处理设备，以减轻设备的负荷。随着润滑剂市场的扩展，所有生产润滑剂的公司都在致力于减少润滑剂的油雾。目前，减少润滑剂油雾最有效的方法是在产品配方中添加添加剂并提高润滑剂的纯度。

参考文献

- [1] 王元元, 张立志. 室内空气净化技术的研究与进展[J]. 暖通空调, 2006, 12:24-27+39.
- [2] Huang H.L., Yang S.H. Filtration characteristics of polysulfone membrane filters. *Aerosol Science*, 2005, 2: 70-79.
- [3] Elayyan H.S.B., Bouziane A., Waters R.T. Theoretical and experimental investigation of a pulsed ESP. *Journal of Electrostatics*, 2002, 56:219-234.
- [4] Bologna A., Paur H.R., Wscher T. Electrostatic charging of aerosol as a mechanism of gas cleaning from submicron particles. *Filtration and Separation*, 2001, 11.
- [5] 侯海燕, 朱冬生, 程军. 纳米 TiO₂ 光催化材料在空气净化中的应用. 微纳系统集成与商业化国际会议, 2007年1月10-13日, 中国海南三亚.
- [6] Fujishima A., Rao T.N., Tryk D.A. Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2000, 1: 1-21
- [7] Tanaka K., Capule M.F.V., Hisanaga T. *Chem. Phys. Lett.* 1991, 73:29.
- [8] 杨武, 荣命哲. 低温等离子体空气净化原理及应用[J]. 电气工程, 2000, 3:31-32.
- [9] Ottengraf S.P.P., Oever V.D. Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1983, 25 (5): 3089-3102.
- [10] Shareefdeen Z., Baltzis B.C., Young Sook Oh, et al. Biofiltration of methanol vapor. *Biotechnol*, 1993, 41: 512-514.
- [11] Hodge D.S., Deviny J.S. Biofilter treatment of ethanol vapors. *Environ. Drog*, 1994, 13 (3): 167.
- [12] 王旭, 焦晓宁, 赵小翠. 针刺非织造布的空气净化过滤材料的实验与分析[J]. 污染控制与空调技术, 2006, 1: 16-18.
- [13] 刘来红, 王世宏. 空气过滤器的发展及其应用[J]. 过滤与分离, 2000, 4(10):8-9+18.
- [14] 姜坪, 刘梅红. 空气过滤材料的发展与应用[J]. 现代纺织技术, 2002, 4(10):52-55.
- [15] 章志昕, 叶青, 来佳磊. 高频电源在静电除尘器上的应用[J]. 浙江电力, 2016, 35(01):57-60.
- [16] Noll C.G., Castle G.S. Electrostatics in gas cleaning: contributions of Professor James R. Melcher. *Journal of Electrostatics*, 1995, 34: 299-305.
- [17] 时鹏辉, 李多松, 杨玲霞. 荷电水雾除尘器的机理研究[J]. 中国环保产业, 2006, 11:17-19.
- [18] 原乃武, 杨武, 姜建勇等. 引入磁场的预荷电集尘空气净化效率的研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35: 785-789.
- [19] Vinodgopal K., Hotchandani S., Khmat P.V. Electrochemically assisted photocatalysis: titania particulate film electrodes for photocatalytic degradation of 4-chlorophenol. *J. Phys. Chem.*, 1993, 97:9040-9044.
- [20] Jiang Z.P., Wang H.Y., Huang H., et al. Photocatalysis enhancement by electric field: TiO₂ thin film for degradation of dye X-3B. *Chemosphere*, 2004, 56: 503-508.
- [21] 古政荣, 陈爱平, 戴智铭, 等. 活性炭-纳米二氧化钛复合光催化空气净化网的研制[J]. 华东理工大学学报, 2000, 26 (4): 367-371.
- [22] Ao C.H., Lee S.C. Indoor air purification by photocatalyst TiO₂ immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60: 103-109.
- [23] Song Y.H., Kim S.J., Choi K.I., et al. Effects of adsorption and temperature on a nonthermal plasma progress for removing VOCs. *Journal of Electrostatics*, 2002, 55:189-201.
- [24] 谢志辉, 叶齐政, 陈林根等. 放电等离子体联合其他物化方法处理 VOCs 技术的研究进展[J]. 高压设备, 2004, 6:449-452.
- [25] Ogata A., Yamanouchi K., Mizumo K., et al. Decomposition of benzene using adsorbent-hybrid plasma reactor. *Proceedings of the 1998 IEEE Industry Applications Conference*[C].
- [26] Ogata A., Ito D., Mizuno K., et al. Removal of dilute benzene using a zeolite-hybrid plasma reactor. *IEEE Trans. On Industry Applications*, 2001, 37(4):959-964.
- [27] Lee B., Park S., Lee S., et al. Decomposition of benzene by using a discharge plasma-photocatalyst hybrid system. *Catalysis Today*, 2004, 93:769-776.
- [28] 张晓明, 黄碧纯, 叶代启. Y 低温等离子体-光催化净化空气污染物技术研究进展[J]. 化工进展, 2005, 34(9): 964-967.
- [29] Kang M., Kim B.J., Cho S.M., et al. Decomposition of toluene using an atmospheric pressure plasma/TiO₂ catalytic system. *Journal of Molecular Catalysis A:*

Chemical, 2002, 180:125-132.

[30] Rao J.J., Chen B.C., Sun X.F., et al. Study on biological treatment of airstreams contaminated with VOCs. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2004, 9(5):56-59.

[31] Young S.M., Lee H.W., Young J.H. Flue gas treatment using pulsed corona discharge generated by magnetic pulse compression modulator. *Journal of Electrostatics*, 2001, 53: 195-208.

Copyright © 2024 by author(s) and Global Science Publishing Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access