

Non-Thermal Plasma Technique and Its Application in the Field of Environmental Protection

Zhiwei Ding, Yunlong Xie*, Kai Yan, Hongjuan Xu, Yijun Zhong

Key Laboratory of the Ministry of Education for Advanced Catalysis Materials, Zhejiang Normal University, Jinhua

Email: *xieyunlong@zjnu.edu.cn

Received: May 24th, 2014; revised: Jun. 20th, 2014; accepted: Jun. 29th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

In the last thirty years, non-thermal plasma (NTP) technology has been developed for the environmental protection, which has been more and more widely used in air pollutants, especially in volatile organic compounds (VOCs), NO_x, SO₂, etc. This work systematically introduces the mechanism of producing NTP and eliminating pollutants, and highlights its application to the treatment of air pollutants. Furthermore, the influencing factor of treatment efficiency of the NTP and the current research situation of the NTP combined with other technologies are further summarized and analyzed. At last, this paper puts forward a promising viewpoint to better use the Non-thermal Plasma technology.

Keywords

Non-Thermal Plasma (NTP), Air Pollution Treatment, Environmental Protection, Synergistic Effect

低温等离子体技术及其在环保领域的应用

丁志威, 谢云龙*, 颜 凯, 许红娟, 钟依均

浙江师范大学先进催化材料教育部重点实验室, 金华

Email: *xieyunlong@zjnu.edu.cn

*通讯作者。

收稿日期：2014年5月24日；修回日期：2014年6月20日；录用日期：2014年6月29日

摘要

近30年，低温等离子体(Non-thermal plasma, NTP)技术的研究和在环境保护领域的应用取得了长足的进步。NTP技术在空气污染物净化、特别是挥发性有机化合物(VOCs)、NO_x和SO₂的消除等方面得到了越来越广泛的应用。本综述介绍了NTP的产生和消除污染物的基本原理，重点阐述其在处理空气污染物领域的应用，分析影响NTP处理效率的因素，总结NTP与其他技术联用的研究现状，并为如何更好地应用NTP技术提出了建议。

关键词

低温等离子体(NTP)，空气污染治理，环境保护，协同作用

1. 引言

自然界中存在着各种各样的物质，以其状态可以分为固态、液态和气态。除此之外，还存在一种由带电离子、自由电子以及未电离的中性粒子集合组成、整体呈中性状态的物质——等离子体，人们为区别等离子体与其他三种状态物质，将等离子体归为物质第四态。1928年Langmuir[1]最先提出等离子体这一术语，其含义是离子和电子群的近似电中性的集合体。等离子体主要通过气体放电法和热电离法产生，将空气发生电离、离解，产生电子、离子等带电粒子。按粒子的温度分类，等离子体可分为高温等离子体和低温等离子体。前者电离度可以达到1，温度通常高达5000 K，各种粒子的温度基本相同，即达到热平衡，因此又称为热平衡等离子体[2]。而低温等离子体[3]是指包括电子、各种离子、原子和自由基的混合物，体系中物质非完全电离，电子温度远高于离子温度，但宏观表现上温度相对较低，总体处于非热平衡状态，故又称为非平衡态等离子体。

2. NTP的产生

虽然等离子体普遍存在宇宙中，但是地球表面自然状态存在的等离子体比较少，人工获取NTP主要通过气体放电法[4]等方法来实现。按NTP发生器结构可划分为填充床式反应器[5]、介质阻挡放电反应器[6]、沿面放电反应器[7]和脉冲电晕放电反应器[8]等。按发生器外加电流形式可以分为直流放电、交流放电[9][10]等。根据其内部放电形式又可分为电晕放电、辉光放电等。每种放电都有它的特点和应用领域，下面介绍几种气体放电形式。

2.1. 电晕放电[11]

电晕放电是最常见的一种气体放电形式，它是一种弱放电，电流密度只有 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 量级[12]。在曲率半径很小的尖端电极附近，局部电场强度超过气体的电离场强，使气体发生电离和激励，因而出现电晕放电。电晕放电时在电极周围可以看到光亮，此时电极两端的电压称为起晕电压。根据曲率半径较小一端电极的极性，电晕放电可以分为正电晕和负电晕两种，其表现出来的外观形态是不一样的。电晕放电技术目前被广泛用于臭氧制备[13]，空气净化[14]，废水处理[15]和表面处理[16]中。

2.2. 辉光放电[17]

辉光放电特点在于空间放电均匀、放电效率高且能产生典型的非平衡等离子体[18]。辉光放电包括亚

正常辉光放电和反常辉光放电两个过渡阶段。辉光放电不需要真空系统，制造和使用成本大幅降低，广泛用于灭菌、消毒、空气净化、臭氧制备等方面。辉光放电可以采用介质阻挡放电[19]、电阻性介质阻挡放电[20]、电晕增强放电[21]、微空心阴极放电[22]和射频等离子体炬[23]等形式来实现。下面介绍几种主要的辉光放电形式。

2.2.1. 介质阻挡放电

介质阻挡放电(DBD)又称为无声放电，是一种将绝缘介质置入放电空间的非平衡态放电形式。通常情况下，在两电极上施加交流电流，当电压足够高时，放电空间内气体被击穿形成 DBD。虽然 DBD 放电时间不到 10 ns，但是瞬时电流密度可以达到 $0.1\sim 1\text{ kA/cm}^2$ 。介质阻挡放电常用工作条件为 104~106 Pa 气压、50 Hz~1 MHz 频率[24]。

2.2.2. 电阻性介质阻挡放电[20]

电阻性介质阻挡放电(RBD)是基于介质阻挡放电发展而来的一类放电，其电极中至少有一个被电阻性材料覆盖。一般的 DBD 介质材料的电阻率应大于 $10^{13}\ \Omega\cdot\text{cm}$ ，而 RBD 的介质材料的电阻率与介电常数的乘积应满足 $10^8\sim 10^9\ \Omega\cdot\text{cm}$ ，因此 RBD 可以在直流或者工频条件下发生。2001 年，Laroussi 等首次报道了电阻性介质阻挡放电方法，于氦气环境中，在电极上施加直流或者交流(60 Hz)电流，可以产生辉光等离子体。

2.2.3. 微空心阴极放电

微空心阴极放电由空心阴极放电发展而来。空心阴极放电是因空心的阴极包围着放电阴极区域而得名，特点是高放电电流和高等离子体密度，而微空心阴极放电是将阴极孔径变为了亚毫米量级，并在高气压下进行的辉光放电。微空心阴极放电经历 Townsend 放电、空心阴极辉光放电到弧光放电三个阶段[12]。微空心阴极放电效应目前被广泛应用到光谱分析、真空镀膜、表面处理、气体激光器等领域。

3. NTP 技术在环保领域应用

上世纪七八十年代发展起来的 NTP 技术是一门涉及生物学、物理学、化学、环境科学的综合性学科，被认为是 21 世纪治理污染物的关键技术之一。在净化室内气态污染物和工业生产废弃物方面兼具物理、化学和生物作用，并且具有处理费用低、净化效率高、二次污染物少等显著优点[25]。以下介绍几种主要污染物净化处理技术的应用。

3.1. NTP 处理空气污染物技术

3.1.1. NTP 去除 VOCs 的方式和原理

近几年来，甲醛、苯系物等室内有机物污染得到了人们越来越多的关注。一般情况下，室内装修材料、打印设备、清洗剂、杀虫剂、香烟烟雾都会释放出 VOCs[26]。传统去除 VOCs 的方法已经不能很好地满足健康生活的需求。在这种情况下，NTP 技术应运而生，其以高效、节能、覆盖面广等优势迅速成为空气净化市场新焦点，经过实验验证，NTP 对苯[27]、甲苯[28]和甲醛[29]的净化效率可以达到 90% 以上。与其他物理方法去除原理不同，NTP 技术采用化学反应原理除去 VOCs。首先在外加高强电场的作用下，通过高频电流，在反应器中产生低温等离子体群。这些等离子体群通常表现出极高的化学反应活性。接着，等离子体群与空气中的挥发性有机物发生接触碰撞，粒子所带的巨大能量释放于有机物分子中，使其发生离解反应，产生小分子碎片，此时在氧气的参与下，小分子碎片与等离子体群发生一系列物理化学变化，最终降解成对人体无危害的 CO_2 、 H_2O 等产物，达到挥发性有机物无害化处理的效果[30]-[32]。

3.1.2. NTP 去除 NO_x 技术及应用

随着环境中氮氧化物浓度的增加, NO_x 对人体健康造成的危害越来越严重。近年来, NTP 净化 NO_x 技术逐渐引起人们的重视。等离子体还原 NO_x 的原理为: 等离子体放电产生的 O₃、羟基离子及其他大量活性物质, 将空气中的 NO_x 氧化成硝酸, 然后与之前添加的氨进行中和反应, 生成硝酸铵[33]。

目前, 电子束法、介质阻挡法消除 NO_x 技术开始应用于实际生产中。但是, 此技术仍需要进行更深入的研究。余刚等[34]采用 NTP 对 NO 进行分解研究, 发现当反应温度小于 300℃时, NO_x 降解效率随电功率的增大而提高, 而温度高于 300℃时情况则相反。王川等人[35]研究发现在低电压范围条件下(≤6.5 kV), 放电电压与 NO 分解率的关系是非线性的, 其影响随电压的升高而减弱, 而选择介电常数较大的介质材料也更易获得较高的分解率。

3.1.3. NTP 脱硫技术与应用

自工业革命以来, 化石燃料的使用量与日俱增, 工业锅炉、火力电厂和机动车排放的大量 SO₂ 废气[36]严重污染环境。经过几十年广泛深入研究, NTP 技术已逐步应用于 SO₂ 的处理, 目前工业上采用的主要有电子束脱硫技术[37]、脉冲电晕放电技术[38]等。其大致的处理过程为: 废气中的 SO₂ 与高能粒子碰撞打开分子键, 产生自由基和强氧化粒子。这些活性粒子将 SO₂ 与投入的 NH₃ 反应生成低污染性的铵盐。脉冲电晕处理 SO₂ 技术根据电子束特点进行改进提升, 采用脉冲电源产生等离子体的方式进行净化处理, 该法成本低, 二次污染少, 具有广阔应用前景。电子束脱硫工艺首先在 1970 年由日本科学家提出, 在随后的应用实践中证明了该技术的可行性和优越性。1997 年, 中日合作在成都建造了一座烟气处理量为 30 万 N·m³/h 的电子束装置, 用以处理一个 100 MW 工业锅炉产生的烟气, 其脱硫率达到 80%[33]。2001 年, 波兰北部什切青的 Pomorzany 电站建造第一座烟气处理量为 27 万 N·m³/h 的电子束烟气脱硫工业应用装置, 用以处理 65 MW 和 100 MW 的两个锅炉产生的烟气, SO₂ 脱除率可达到 95%[39]。

3.1.4. 颗粒捕集器净化技术应用

为缓解大气颗粒污染的严峻形势和达到愈加严格的车用柴油机排放规定, 颗粒捕集器被认为是降低颗粒物排放的有效手段。但在捕集阶段, 随着颗粒物的增多, 会在一定程度上影响柴油发动机的正常运行。NTP 技术作为一种清洗颗粒捕集器新型手段, 同时可以净化尾气中的细颗粒物(PM)和 NO_x。其原理[40]是, 利用高能电子激活, 裂解废气中的各组分, 这些高能电子具有很强的氧化性, 在高温下, 有害气体分子通过高能电子定向链式反应, 生成 N₂、CO₂ 等无害的气体分子。Lin 等[41]开展了 NTP 技术有效去除柴油机 PM 的试验工作, 指出具有强氧化性的活性物质, 如 O·、O₂ 等, 在 215℃时即可有效氧化 PM 中的固体微粒和煤烟成分, 使之转化为 CO₂ 和 H₂O。于文英等[42]在研究 NTP 处理 PM 效率时发现, 净化效率受能流密度影响较大, 能流密度越大, 净化效率越高, PM 的净化效率最高可达 67%。

3.1.5. NTP 灭菌消毒技术应用

NTP 的生物学效应包括对微生物的致死作用和对动物细胞的刺激作用, 这分别形成了一批灭菌技术和临床医药技术。NTP 灭菌法[43]是一种广泛应用的低温灭菌技术, 最早开始于 20 世纪 60 年代, 随着科技的发展, 该方法已经日趋完善。其作用机理为等离子体群中的过氧化羟基, 氢基等活性粒子与细菌中的核酸和蛋白质结合, 破坏其新陈代谢, 从而达到灭菌效果。Moisan 等[44]通过研究微波等离子体余辉的灭菌作用, 指出氧原子自由基以及紫外光子对灭菌有重要的影响, 相比于环氧乙烷、甲醛等消毒水, 具有操作方便, 安全性高, 残留物少等优点。该技术的应用可以克服传统高温消毒方法耗时长、成本高等缺点, 大幅提高医疗器械消毒效率和使用次数, 因此适合在医疗部门推广使用。

3.2. NTP 在处理废液方面的应用

废液主要包括工业废水和生活废水。传统净化废水的方法有生物法，化学法和物理法。NTP 处理法的原理是，首先利用高能粒子轰击水溶液，水分子发生电离，激发产生活性氧化物质，如 $\cdot\text{OH}$ ，然后氧化性基团作用于有机物分子，将其进一步分解成小分子和自由基，最终氧化成 N_2 ， H_2O ， CO_2 等[45]。何正浩等[46]进行了脉冲电晕放电处理焦化废水的研究，发现脉冲电晕放电对焦化废水中的氰化物和酚含量的处理效果较好，氰化物脱除率达 90% 以上，酚脱除率近 70%。

3.3. NTP 在处理废渣方面的应用

随着社会经济的高速发展，生活废弃物和工业废渣的数量逐年增多，其中包含了许多危险性废弃物，如放射性废弃物，化学污染物[47]。这些废弃物通常采用焚烧法和填埋法进行处理，但是处理过程中会产生许多有毒物质，如二噁英、呋喃类化合物，氯化氢等。由于 NTP 处理技术在绿色环保方面具有优势，可利用低温氧等离子体灰化法(简称低温灰化 LTA) [48]对废渣进行处理，其原理是在高频电场的作用下，低压下的氧由于气体放电而产生具有强氧化能力的氧等离子体，它可在较低的温度下氧化分解固体废弃物中的杂质。在低温灰化过程中，保持系统真空和低压状态，有利于提高处理效率。

4. 影响低温等离子体废气处理效率的因素

近年来，低温等离子体技术被越来越多应用到污染物的处理中，等离子体处理废气处理效率的影响因素也做过诸多研究，下面通过 NTP 发生器参数、背景气体等方面的影响进行阐述。

4.1. 发生器结构及填充介质的影响

等离子体发生器结构和填充介质对于等离子体活化非常重要，因为它不仅关系到等离子体能否发生，而且关系到等离子体活化反应物的效果[49]。低温等离子体发生器的形式很多，按机械结构划分主要有：填充床式，介质阻挡放电反应器，沿面放电反应器和脉冲电晕放电反应器等。填充床式反应器内填充介质通常为 BaTiO_3 ， TiO_2 ， CaTiO_3 ， Al_2O_3 和陶瓷等，相对介电常数较大，可以产生更多促进有机物的分解的氧化性物质。介质阻挡放电反应器中至少一个电极被介质覆盖，阻挡介质与另一电极之间的空气间隙被高频高压电场所激励产生非平衡态等离子体，并且不同阻挡介质材料对有机物的分解效率有不同影响。竹涛等人[50]实验发现处理甲醛时，99 瓷反应器效率优于普通瓷和有机玻璃反应器。Wang 等[51]处理空气中的丙酮、苯、四氯乙烯、间二甲苯等混合体的研究发现，双极脉冲功率驱动的 DBD 放电能够有效地输入脉冲能量，产生强持续放电和活性粒子，效果优于单独使用阳性脉冲放电和阴性脉冲放电。

4.2. 放电参数的影响

放电参数主要指发生器放电形式、外加电压和输出频率等。实验发现，放电形式对除去 VOCs 效率有重要影响。设置发生器外加电压和输出频率参数时都需要平衡能耗和效率的关系，虽然电压越高产生电子数越多，但是也会增加能耗，因此需要找到一个最好的“性价比”。Chae 等人[52]通过试验发现电压的应用可以加快氨分解过程，在高电压作用下，去除效率容易达到 90%，即使在低压等离子体放电下也有一些去除效率。很明显，电压增加导致去除效率的提高，但在这种情况下也容易形成高浓度臭氧。经试验，氨分解最好的结果的条件是在 4~5 kV 之间。党小庆等人[53]在使用混合填充物吸附甲醛实验中，控制外加电压为 18 KV 到 20 KV 之间时，甲醛去除率可达 95%。周志培[54]在研究输入功率与 NO 的去除率关系中发现输入功率越大，NO 去除率越高。Futamura 等[55]利用铁电小球填料床等离子体反应器降解甲醇和甲苯或二氯甲烷混合 VOCs，研究了能量利用效率的影响因素，VOCs 初始浓度越高，反应器的

能量利用效率越高。

4.3. 发生器气体流速影响因素

在等离子体发生器中, 气体流速影响气体在发生器中的停留时间。通常以改变气体流量、改变等离子体反应器的有效体积和添加吸附剂等途径来改变停留时间。理论上气体在反应器中停留时间越长, VOCs 分子与高能活性粒子碰撞的几率越大, 分解效率越高[56]。但是停留时间过长会造成废气处理量减低, 杜彬等[57]研究了在 65 W 放电功率下, 不同停留时间对液化石油气(LPG)中硫醇转化率的影响, 随着停留时间增加, 硫醇转化率增大, 当停留时间达 200 s 时, 硫醇转化率超过 90%, 继续增加停留时间则转化率增加变慢。因此停留时间是影响处理效果和效率的一个重要因素。

4.4. 背景气体影响因素

在气体放电过程中, 空气中气体分子会与高能电子发生碰撞产生高能活性粒子, 这些高能活性粒子均有可能直接或间接参与到低温等离子体的降解反应之中, 从而影响污染物的降解以及副产物的生成。当反应系统中氧气含量增加时, 高能电子与氧气分子碰撞产生更多的 $O\cdot$ 自由基, 引发更激烈的自由基反应; 但同时高能电子会与氧气分子发生电子附着反应而不利于 VOCs 的降解。Ogata 等人[58]对背景气体中 O_2 浓度的影响进行了研究, 发现当 O_2 浓度小于 5% 时, 苯的转化率随着 O_2 浓度的增加而增加; 而当 O_2 浓度在 5%~30% 范围内时, 苯的转化率保持不变。背景气体湿度[59] [60]对物质降解的影响有两个方面: 1) H_2O 在高能电子的作用下可以产生活性物质 $\cdot OH$ 自由基, 有利于物质的降解; 2) H_2O 是电负性的, 对电子有亲和作用, 会使自由电子减少而不利于物质的降解。周勇平等人[61]利用直流电晕自由基簇射对甲苯有机废气进行试验, 考察湿度因素对去除率的影响。试验结果表明, 降低一定的湿度能够提高脱除效率, 当甲苯的含湿量达到 8%~9% 时, 脱除率达到最大值, 随后又有明显的下降。

5. NTP 与其他技术联用的研究

NTP 的处理效率易受电场强度、放电时间和干扰物等因素影响, 为提高低温等离子体技术的工作效率, 多采用等离子体技术与其他技术联用的方法。研究者将 NTP 与催化剂相结合, 催化剂的引入改变活性粒子的空间分布、作用时间, 降低反应活化能, 增加反应选择性。催化剂使用较多的有铁电体材料[62]、半导体催化剂[63]和铜锰型催化剂[64]。在 NTP-铁电性物质[65]联合治理技术中, 添加铁电性物质如 Cr 和 Ni[66], 可以改变发生器放电特性, 铁电性物质在电场作用下被极化, 在颗粒接触点周围形成局部电场, 提高反应器能量利用率; 催化剂在等离子体净化系统中起着重要作用, Song 等人[67]发现在利用 NTP 技术净化时, 结合使用石英、大孔 $\gamma-Al_2O_3$ 氧化铝材料或者混合有 $\gamma-Al_2O_3$ 的 5A 分子筛材料, 有机物去除率随温度升高而增加。Katamoto 等[68]发现反应器中引入 TiO_2 催化剂时, NO_x 去除率提高了 10%~30%。在处理 VOCs 方面, NTP 与光催化氧化技术联合应用是一个新的方法[69]。等离子体技术具有效率高、范围广等优点; 光催化技术则具有反应温和、操作容易等优点, 将两者结合应用使低温等离子体技术得到优化, 并且抑制处理过程中副产物的产生。Sun 等[70]以非热等离子体作为光催化光源, TiO_2/ACF 作为光催化剂, 可有效提高对甲苯的去除效果, 并减少副产物的生成。Lee 等[71]研究发现, 在等离子体光催化体系中, 将 TiO_2 负载于玻璃或 $\gamma-Al_2O_3$ 上, 利用等离子体过程产生的紫外光作为光源可使苯的降解率比单一等离子体反应过程提高 10%, 较好抑制了副产物的产生, 使苯更彻底地降解为 CO_2 。此外, 在工业中应用比较广泛的还有 NTP-吸附剂[72]联合治理技术, 在等离子体放电区域内填充吸附剂, 可以在不改变气体流速, 反应器大小的前提下延长气体在反应器内的停留时间, 从而提高处理效率; Ikaunieks 等人[73]认为由于单独使用低温等离子体去除 VOCs 时会产生高浓度的副产品, 如癸烷类衍生物, 使用催

化剂或吸附剂可以减少副产品形成和提高去除 VOCs 效率。

6. 总结与展望

随着等离子体技术研究的不断深入，等离子体的应用领域不断拓展，其中低温等离子体(NTP)技术在室内空气净化、汽车尾气处理、工业废气治理等环保领域的应用越来越普及。等离子技术对传统工艺技术的改造和高科技经济结构的改变产生了越来越显著的影响。因此，可以预计将来会有更多低温等离子体环保产品应用于生活和生产中。作者通过分析国内外文献资料认为，NTP 技术研究的重点包括：1) 开发反应活性好，选择性高，寿命长的 NTP 联用催化剂和填充物，进一步拓展应用范围；2) 提高等离子体反应器运行稳定性和安全性；3) 研发高效低能耗的低温等离子体发生设备；4) 研究 NTP 消除 VOCs 的机理，控制副产物的生成。

项目基金

本研究由浙江省科技计划项目(2012C23049)及浙江师范大学“浙江省省属高校化学重中之重学科”和“先进催化材料教育部重点实验室”开放课题基金项目资助完成，在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Tonks, L. and Langmuir, I. (1929) A general theory of the plasma of an Arc. *Physical Review*, **34**, 876-922.
- [2] Fauchais, P. and Vardelle A. (1997) Thermal plasmas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **25**, 1258-1280.
- [3] Denes, F.S. and Manolache, S. (2004) Macromolecular plasma-chemistry: An emerging field of polymer science. *Progress in Polymer Science*, **29**, 815-885.
- [4] Vandenbroucke, A.M., Morent, R., De Geyter, N. and Leys, C. (2011) Non-thermal plasmas for non-catalytic and catalytic VOC abatement. *Journal of hazardous materials*, **195**, 30-54.
- [5] Ogata, A., Ito, D., Mizuno, K., Kushiyama, S. and Yamamoto, T. (2001) Removal of dilute benzene using a zeolite-hybrid plasma reactor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **37**, 959-964.
- [6] Einaga, H., Ibusuki, T. and Futamura, S. (2001) Performance evaluation of a hybrid system comprising silent discharge plasma and manganese oxide catalysts for benzene decomposition. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **37**, 1476-1482.
- [7] Oda, T., Takahashi, T. and Yamaji, K. (2002) Nonthermal plasma processing for dilute VOCs decomposition. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **38**, 873-878.
- [8] Zhao, G.B., John, S., Zhang, J.J., Wang, L., Muknahallipatna, S., Hamann, J.C., Ackerman, J.F., Argyle, M.D. and Plumb, O.A. (2006) Methane conversion in pulsed corona discharge reactors. *Chemical Engineering Journal*, **125**, 67-79.
- [9] Zhang, X., Feng, W., Yu, Z., Li, S., Zhu, J. and Yan, K. (2013) Comparison of styrene removal in air by positive and negative DC corona discharges. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **10**, 1377-1382.
- [10] Akishev, Y., Grushin, M., Napartovich, A. and Trushkin, N. (2002) Novel AC and DC non-thermal plasma sources for cold surface treatment of polymer films and fabrics at atmospheric pressure. *Plasmas and Polymers*, **7**, 261-289.
- [11] Feng, F., Ye, L., Liu, J. and Yan, K. (2013) Non-thermal plasma generation by using back corona discharge on catalyst. *Journal of Electrostatics*, **71**, 179-184.
- [12] 任春生 (2008) 常压空气辉光放电的形成和介质阻挡放电聚合物表面处理研究. 博士论文, 大连理工大学, 大连.
- [13] 罗强强, 解光勇, 全汝岱, 马晓娜 (2009) 电晕放电法制备臭氧技术研究. *信息技术*, **4**, 18-20.
- [14] 朱益民, 杨树, 黄丽萍, 张零零, 唐晓佳, 李想 (2010) 电晕放电及催化法净化室内空气. *环境科学与技术*, **6**, 86-88.
- [15] 邵瑰玮, 李劲, 王万林, 李胜利 (2004) 脉冲电晕放电下焦化废水脱硫的研究. *环境科学*, **2**, 77-80.
- [16] 朱文苑, 曾金芳, 王斌 (2009) 电晕方法在聚合物表面处理中的应用进展. *化工新型材料*, **7**, 7-8.
- [17] Stryczewska, H.D., Jakubowski, T., Kalisiak, S., Gizewski, T. and Pawlat, J. (2013) Power systems of plasma reactors for non-thermal plasma generation. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, **16**, 52-62.

- [18] Kunhardt, E.E. (2000) Generation of large-volume, atmospheric-pressure, nonequilibrium plasmas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **28**, 189-200.
- [19] Wang, J.J., Choi, K.S., Feng, L.H., Jukes, T.N. and Whalley, R.D. (2013) Recent developments in DBD plasma flow control. *Progress in Aerospace Sciences*, **62**, 52-78.
- [20] Laroussi, M., Alexeff, I., Richardson, J.P. and Dyer, F.F. (2002) The resistive barrier discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **30**, 158-159.
- [21] Akishev, Y., Goossens, O., Callebaut, T., Leys, C., Napartovich, A. and Trushkin, N. (2001) The influence of electrode geometry and gas flow on corona-to-glow and glow-to-spark threshold currents in air. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **34**, 2875.
- [22] Schoenbach, K.H., Verhappen, R., Tessnow, T., Peterkin, F.E. and Byszewski, W.W. (1996) Microhollow cathode discharges. *Applied Physics Letters*, **68**, 13-15.
- [23] Koide, M., Horiuchi, T., Inushima, T., Lee, B.J., Tobayama, M. and Koinuma, H. (1998) A novel low temperature plasma generator with alumina coated electrode for open air material processing. *Thin Solid Films*, **316**, 65-67.
- [24] 蔡忆昔, 王军, 刘志楠, 赵卫东, 吴江霞, 王攀 (2006) 介质阻挡放电等离子体发生器的负载特性. *高电压技术*, **10**, 62-64.
- [25] 刘道清, 季学李 (2004) 低温等离子体技术及在空气污染控制中的应用. *四川环境*, **3**, 1-4.
- [26] Aguado, S., Polo, A.C., Bernal, M.P., Coronas, J. and Santamaría, J. (2004) Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes. *Journal of Membrane Science*, **240**, 159-166.
- [27] Ogata, A., Einaga, H., Kabashima, H., Futamura, S., Kushiya, S. and Kim, H.H. (2003) Effective combination of nonthermal plasma and catalysts for decomposition of benzene in air. *Applied Catalysis B: Environmental*, **46**, 87-95.
- [28] Demidiouk, V., Moon, S.I. and Chae, J.O. (2003) Toluene and butyl acetate removal from air by plasma-catalytic system. *Catalysis Communications*, **4**, 51-56.
- [29] Ding, H.X., Zhu, A.M., Yang, X.F., Li, C.H. and Xu, Y. (2005) Removal of formaldehyde from gas streams via packed-bed dielectric barrier discharge plasmas. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **38**, 4160.
- [30] Van Durme, J., Dewulf, J., Leys, C. and Van Langenhove, H. (2008) Combining non-thermal plasma with heterogeneous catalysis in waste gas treatment: A review. *Applied Catalysis B: Environmental*, **78**, 324-333.
- [31] 郭玉芳, 叶代启, 陈克复 (2005) 挥发性有机化合物(VOCs)的低温等离子体-催化协同净化. *工业催化*, **11**, 1-5.
- [32] 李歆, 黄海涛, 丁凝 (2008) 非热平衡等离子体处理 VOCs 的研究. *能源环境保护*, **6**, 5-9.
- [33] 邵德荣, 韩宾兵 (1999) 电子束烟气脱硫技术工业示范工作进展. *环境科学进展*, **2**, 125-135.
- [34] 余刚, 余奇, 翟晓东, 顾璠, 徐益谦 (2005) 等离子体脱硝与等离子体-催化联合脱硝的对比实验研究. *动力工程*, **2**, 284-288.
- [35] 王川, 唐晓龙, 易红宏, 李凯, 陈晨, 向璞 (2013) 低温等离子体分解脱除 NO 影响因素研究. *环境科学学报*, **10**, 2694-2698.
- [36] Nasonova, A., Pham, H.C., Kim, D.J. and Kim, K.S. (2010) NO and SO₂ removal in non-thermal plasma reactor packed with glass beads-TiO₂ thin film coated by PCVD process. *Chemical Engineering Journal*, **156**, 557-561.
- [37] Basfar, A.A., Fageeha, O.I., Kunnummal, N., Chmielewski, A.G., Pawelec, A., Zimek, Z. and Warych, J. (2010) A review on electron beam flue gas treatment (EBFGT) as a multicomponent air pollution control technology. *Nukleonika*, **55**, 271-277.
- [38] Shang, K.F., Wu, Y., Li, J., Li, G.F., Li, D. and Wang, N.H. (2006) Reduction of NO_x/SO₂ by wire-plate type pulsed discharge reactor with pulsed corona radical shower. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **26**, 443-454.
- [39] Chmielewski, A.G., Licki, J., Pawelec, A., Tyimiński, B. and Zimek, Z. (2004) Operational experience of the industrial plant for electron beam flue gas treatment. *Radiation Physics and Chemistry*, **71**, 441-444.
- [40] Takaki, K., Chang, J.S. and Kostov, K.G. (2004) Atmospheric pressure of nitrogen plasmas in a ferroelectric packed bed barrier discharge reactor. Part I. Modeling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **11**, 481-490.
- [41] Lin, H., Huang, Z., Shangguan, W. and Peng, X. (2007) Temperature-programmed oxidation of diesel particulate matter in a hybrid catalysis-plasma reactor. *Proceedings of the Combustion Institute*, **31**, 3335-3342.
- [42] 于文英, 刘波, 单宝龙 (2011) 一种多元催化系统对柴油机排气净化研究. *汽车技术*, **1**, 25-29.
- [43] 郑超, 徐羽贞, 黄逸凡, 刘振, 闫克平 (2013) 低温等离子体灭菌及生物医药技术研究进展. *化工进展*, **9**, 2185-2193.
- [44] Moisan, M., Barbeau, J., Moreau, S., Pelletier, J., Tabrizian, M. and Yahia, L.H. (2001) Low-temperature sterilization

- using gas plasmas: A review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms. *International Journal of Pharmaceutics*, **226**, 1-21.
- [45] 陈军海 (2011) 低温等离子体处理废液技术研究概述. *污染防治技术*, **4**, 44-45.
- [46] 何正浩, 邵瑰玮, 王万林, 李劲, 李胜利, 杨怀远, 张瑜, 杜建敏 (2003) 脉冲电晕放电处理焦化废水的研究. *高压技术*, **4**, 29-31.
- [47] Mountouris, A., Voutsas, E. and Tassios, D. (2006) Solid waste plasma gasification: Equilibrium model development and exergy analysis. *Energy Conversion and Management*, **47**, 1723-1737.
- [48] 杨丽丽, 田向勤, 刘昕, 朱书全, 舒新前 (2006) 低温等离子体技术在固体废弃物处理中的应用. *环境与可持续发展*, **5**, 58-60.
- [49] 李国平, 胡志军, 李建军, 杨振亚, 何忠, 王志良 (2013) 低温等离子体-催化协同净化有机废气研究进展. *环境工程*, **3**, 71-75.
- [50] 竹涛, 李坚, 金毓鉴, 梁文俊 (2009) 高频介质阻挡放电反应器结构研究. *高压电器*, **4**, 16-20.
- [51] Wang, H., Li, D., Wu, Y., Li, J. and Li, G. (2009) Removal of four kinds of volatile organic compounds mixture in air using silent discharge reactor driven by bipolar pulsed power. *Journal of Electrostatics*, **67**, 547-553.
- [52] Chae, J.O., Demidiouk, V., Yeulash, M., Choi, I.C. and Jung, T.G. (2004) Experimental study for indoor air control by plasma-catalyst hybrid system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **32**, 493-497.
- [53] 党小庆, 刘晓, 黄家玉, 吴涛, 康露 (2012) 吸附联合低温等离子体法去除甲苯废气. *环境工程学报*, **9**, 3223-3228.
- [54] 周志培 (2009) 介质阻挡放电脱除烟气中 NO 的实验研究. 硕士论文, 华北电力大学, 北京.
- [55] Futamura, S., Zhang, A., Einaga, H. and Kabashima, H. (2002) Involvement of catalyst materials in nonthermal plasma chemical processing of hazardous air pollutants. *Catalysis Today*, **72**, 259-265.
- [56] 徐兴祥, 杨永进, 孙家言, 张劲松 (2005) 微波复合直流等离子体转化天然气制乙炔的研究. *化学学报*, **7**, 625-630.
- [57] 杜彬, 杨熙, 李丰, 康小孟, 梁建友 (2012) 低温等离子体脱除液化气中硫醇的研究. *辽宁化工*, **12**, 1238-1239.
- [58] Ogata, A., Shintani, N., Mizuno, K., Kushiya, S. and Yamamoto, T. (1999) Decomposition of benzene using a non-thermal plasma reactor packed with ferroelectric pellets. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **35**, 753-759.
- [59] Kim, J.C. (2002) Factors affecting aromatic VOC removal by electron beam treatment. *Radiation Physics and Chemistry*, **65**, 429-435.
- [60] Yamashita, R., Takahashi, T. and Oda, T. (1996) Humidify effect on non-thermal plasma processing for VOCs decomposition. *31st IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, San Diego, 6-10 October 1996, 1826-1829.
- [61] 周勇平, 高翔, 吴祖良, 骆仲泱, 魏恩宗, 倪明江, 岑可法 (2003) 直流电晕自由基簇射治理甲苯的试验研究. *环境科学*, **4**, 136-139.
- [62] Holzer, F., Kopinke, F.D. and Roland, U. (2005) Influence of ferroelectric materials and catalysts on the performance of non-thermal plasma (NTP) for the removal of air pollutants. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **25**, 595-611.
- [63] Zhao, L., Wang, Y., Jin, L., Qin, M., Li, X., Wang, A., Song, C. and Hu, Y. (2013) Decomposition of hydrogen sulfide in non-thermal plasma aided by supported CdS and ZnS semiconductors. *Green Chemistry*, **15**, 1509-1513.
- [64] 孙毅, 王东辉, 白书培, 贾佳, 秦越, 金君素, 张泽廷 (2011) 低温等离子体协同催化剂催化氧化一氧化碳的研究. *精细石油化工*, **4**, 27-31.
- [65] 王健壮, 贾春玲, 吴爽, 宁晓宇, 翟增秀 (2013) 低温等离子体技术在恶臭治理方面的研究进展. *环境科技*, **3**, 74-78.
- [66] Yamamoto, T., Mizuno, K., Tamori, I., Ogata, A., Nifuku, M., Michalska, M. and Prieto, G. (1996) Catalysis-assisted plasma technology for carbon tetrachloride destruction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **32**, 100-105.
- [67] Song, Y.H., Kim, S.J., Choi, K.I. and Yamamoto, T. (2002) Effects of adsorption and temperature on a nonthermal plasma process for removing VOCs. *Journal of Electrostatics*, **55**, 189-201.
- [68] Katamoto, A., D., Doi, K. and Kogoshi, S. (2003) Efficient NO_x removal using silent discharges and TiO₂ photocatalyst simultaneously. *IEEE International Conference on Plasma Science*, Jeju, 2-5 June 2003, 284.
- [69] Huang, H. and Ye, D. (2009) Combination of photocatalysis downstream the non-thermal plasma reactor for oxidation of gas-phase toluene. *Journal of Hazardous Materials*, **171**, 535-541.
- [70] Sun, R.B., Xi, Z.G., Chao, F.H., Zhang, W., Zhang, H.S. and Yang, D.F. (2007) Decomposition of low-concentration

gas-phase toluene using plasma-driven photocatalyst reactor. *Atmospheric Environment*, **41**, 6853-6859.

- [71] Lee, B.Y., Park, S.H., Lee, S.C., Kang, M. and Choung, S.J. (2004) Decomposition of benzene by using a discharge plasma-photocatalyst hybrid system. *Catalysis Today*, **93**, 769-776.
- [72] 李俊宁, 王丽娜, 齐涛, 初景龙, 刘长厚, 张懿 (2008) 介孔气体吸附剂. *化学进展*, **6**, 851-858.
- [73] Ikaunieks, J., Mezmale, L., Zandeckis, A., Pubule, J., Blumberga, A. and Veidenbergs, I. (2011) Non-thermal plasma for VOC treatment in flue gases. *Environmental and Climate Technologies*, **6**, 31-37.