

Research Progress on the Pollutants Removal of Marine Diesel Engine Exhaust by Non-Thermal Plasma

Jiafu Liu, Qing Kong, Ning Zhang

Qingdao Sunrui Marine Environment Engineering Co., Ltd., Qingdao Shandong
Email: liujiafu@sunrui.net

Received: Jun. 1st, 2018; accepted: Jun. 15th, 2018; published: Jun. 22nd, 2018

Abstract

Marine diesel engine exhaust gas contains a large number of nitrogen oxides, sulfur oxides, particulate matter, volatile organic compounds and other pollutants, which causes air pollution problems of the port cities particularly. In recent years, the relevant scholars carried out a lot of researches on the ship exhaust pollutant post-treatment technology. Non-thermal plasma as a simultaneous treatment of nitrogen oxides, sulfur oxides, PM and VOCs technology attracted more researchers' attention. In this paper, the latest research progress and representative results of non-thermal plasma exhaust pollutant removal were discussed. The shortcomings of the technology were pointed out, and some possible research directions were put forward.

Keywords

Non-Thermal Plasma, Marine Diesel Exhaust, Nitrogen Oxides, Sulfur Oxides, Particulate Matter

低温等离子体用于船舶废气污染物脱除的研究进展

刘嘉夫, 孔清, 张宁

青岛双瑞海洋环境工程股份有限公司, 山东 青岛
Email: liujiafu@sunrui.net

收稿日期: 2018年6月1日; 录用日期: 2018年6月15日; 发布日期: 2018年6月22日

摘要

船舶柴油机废气包含大量氮氧化物、硫氧化物、颗粒物以及挥发性有机物等污染物, 由此导致的大气污

染问题对港口城市而言尤其严重。近年来,相关学者针对船舶废气污染物后处理技术开展了大量研究,低温等离子体作为一种可同时处理氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)、颗粒物(PM)以及挥发性有机物(VOCs)的技术受到更多研究人员的关注。本文对低温等离子体用于船舶废气污染物脱除技术的最新研究进展和代表性成果进行了分析总结,指出了这一技术目前存在的缺点和不足,提出了今后重点研究方向。

关键词

低温等离子体, 船舶废气, 氮氧化物, 硫氧化物, 颗粒物

Copyright © 2018 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

1. 引言

近年来,随着我国经济的发展,人们生活水平的提高,公众的环保意识也越来越高。前些年的酸雨问题以及近两年国内大部分城市的雾霾问题,使政府和公众逐渐意识到以环境为代价发展经济的做法是不可取的。我国大部分人口聚集在东部和南部沿海的港口城市,船舶给港口城市带来的空气污染问题也越来越严重。目前远洋船舶的主机、发电柴油机和燃油锅炉多采用劣质重油作为燃料,其燃烧后的产物含有大量氮氧化物(Nitrogen Oxides, NO_x)、硫氧化物(Sulfur Oxides, SO_x)、颗粒物(Particulate Matter, PM)以及挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)等污染物,由此产生的酸雨、光化学烟雾、雾霾等严重污染生存环境,危害人类身体健康。香港 2007 年的船舶大气污染物排放清单显示,远洋船舶 SO_2 和 NO_x 的排放量分别占香港所有船舶废气排放量的 79%和 44% [1]。梁永贤等[2]的研究结果表明船舶排放的细颗粒物、 SO_2 和 NO_x 分别占深圳市大气污染物排放总量的 5.2%、16.4%和 58.9%,远洋船舶占船舶排放总量的 90%。因此,船舶废气给港口城市带来的空气污染问题亟待解决。

世界海事组织(IMO)的 MARPOL73/78 公约附则 VI [3]对船舶产生的 SO_x 和 NO_x 分阶段作出了排放限制要求。我国政府也于 2015 年首次在长三角、珠三角以及环渤海(京津冀)水域设立了船舶排放控制区[4]。针对船舶废气的处理,相关企业和科研院所提出了许多技术,包括前处理技术、机内净化技术以及后处理技术等,而后处理技术被众多学者所关注,认为是有望最终解决船舶废气污染的技术。后处理技术中目前比较流行的是湿法脱硫技术、催化还原脱硝技术(Selective Catalytic Reduction, SCR)以及颗粒捕集器(Diesel Particular Filter, DPF)。但这些技术只能处理单一污染物,并且处理效率还会受到其他污染物的影响,目前还没有成熟的能同时处理多种污染物的单一技术。低温等离子体(Non-thermal Plasma, NTP)废气处理技术开始于 20 世纪 70 年代,其可同时脱除多种船舶废气污染物,且几乎不产生二次污染,也是目前的研究热点之一,具有较大的应用前景。本文从等离子体的分类、等离子体脱除污染物的机理、几种常用的等离子体脱除污染物技术等几个方面概述等离子体脱除船舶废气污染物的研究现状,并探讨其今后在船舶废气处理领域的研究趋势和应用前景。

2. 等离子体的分类

物质除了传统的气、液、固三种聚集态以外,还存在第四种聚集态,即等离子体态,宇宙中 99%的物质其实都是以等离子体态存在的[5]。早在 1808 年 Davy 就开始了对等离子体的研究,直到 1879 年,由英国物理学家 Crookes 提出了等离子体第四物态的概念,1928 年美国化学家 Langmuir 首次将辉光放电

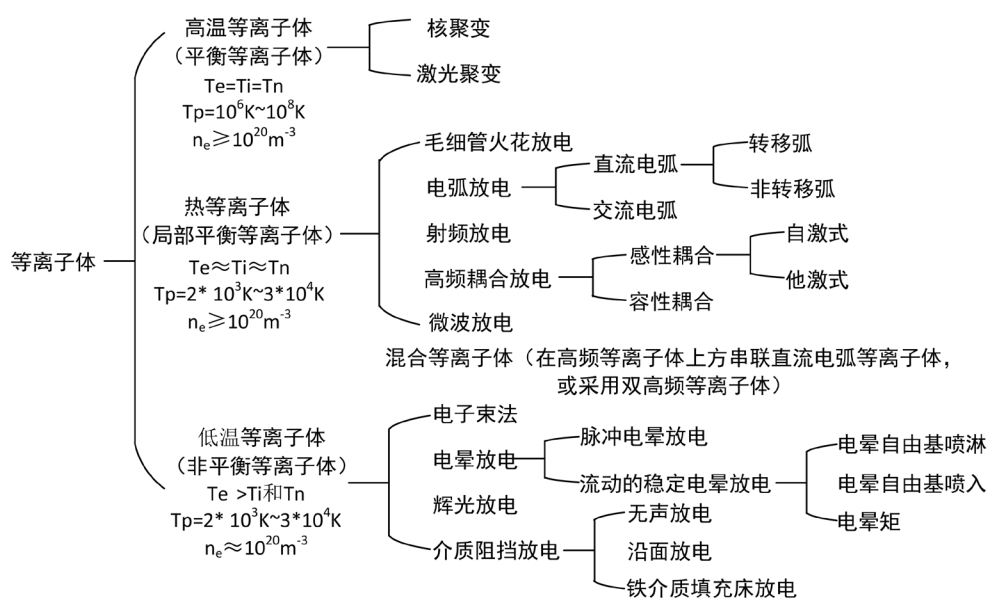
产生的电离气体命名为“Plasma” [6], 其最早传到中国时被译为“电浆”, 后来才改为“等离子体” [7]。等离子体的分类有多种方法: 按存在类型可以分为天然等离子体和人工等离子体; 按电离程度可以分为完全电离等离子体($\alpha = 1$), 部分电离等离子体($0.01 < \alpha < 1$)和弱电离等离子体($10^{-6} < \alpha < 0.01$); 按粒子密度可以分为稀薄等离子体(粒子密度 $n < 10^{12-14}/\text{cm}^3$)和致密等离子体(粒子密度 $n > 10^{15-18}/\text{cm}^3$)。目前, 比较主流的是按照等离子体的热力学平衡进行分类, 如图 1 所示。其中电子、离子、中性粒子的温度分别用 T_e 、 T_i 和 T_n 表示: 1) 完全热力学平衡等离子体, 也称为高温等离子体($T_e = T_i = T_n$); 2) 局部热力学平衡等离子体, 也称为热等离子体($T_e \approx T_i \approx T_n = 3000 \sim 30,000 \text{ K}$); 3) 非热力学平衡等离子体, 也称为低温等离子体($T_e \gg T_i \approx T_n$)。

3. 等离子体脱除废气污染物的机理(表 1)

一般认为, 由于废气中含有较高浓度的 O_2 , 废气中的 NO_x 是无法单独应用低温等离子体脱除的。等离子体中的活性成分大多具有强氧化性, 而想要将 NO_x 转化成无害的 N_2 , 必须加入还原剂或者有催化剂的存在。在足够大的放电功率下, 单独应用低温等离子体技术处理柴油机废气中的 NO_x , 可以将 NO_x 中的 NO 大量氧化成 NO_2 , 而 NO_x 总量一般下降 20% 左右, NO_x 转化率随放电能量密度变化的典型曲线如图 2 所示。周奇 [12] 通过模拟废气实验表明, 在等离子体环境下, 只有 N_2 和 NO 两种气体时, 脱硝率达到 97%, NO 几乎全部通过还原途径脱除; 当再加入 O_2 时, 随着 O_2 浓度的增大, 氧化脱除率增大, NO 还原脱除受到抑制, 过多的 O_2 加入, 会跟载气 N_2 反应生成 NO , 反而不利于 NO 脱除。

4. 几种常用技术

目前, 实验室中常用产生低温等离子体的方式主要有: 电晕放电(corona discharge)、辉光放电(Glow discharge)、介质阻挡放电(dielectric barrier discharge DBD)、滑动电弧放电(Glide discharge)及射流放电(jet discharge)等 [13], 而低温等离子体(NTP)用于废气治理方面在国际上先后采用了电子束法、脉冲电晕法、直流电晕法、介质阻挡放电法等。



T_e : 电子温度; T_i : 离子温度; T_n : 中性粒子温度; T_p : 等离子体温度; n_e : 电子密度。

Figure 1. Classification of plasma [8] [9]

图 1. 等离子体的分类 [8] [9]

Table 1. Main reactions of desulfurization and denitrification by plasma
表 1. 等离子脱硫脱硝发生的主要反应

| SO ₂ 氧化 | NO _x 氧化 | NO _x 还原 |
|--|---|----------------------------|
| $O_2+H_2O+e\rightarrow\cdot OH+O\cdot+HO_2\cdot$ | | $NO+N\rightarrow N_2+O$ |
| $SO_2+O\cdot\rightarrow SO_3$ | $NO+O\cdot\rightarrow NO_2$ | $N+NO_2\rightarrow 2NO$ |
| $SO_3+H_2O\cdot\rightarrow H_2SO_4$ | $NO+O_3\rightarrow NO_2+O_2$ | $O+NO_2\rightarrow NO+O_2$ |
| $SO_2+H_2O\cdot\rightarrow H_2SO_3$ | $NO+HO_2\cdot\rightarrow NO_2+\cdot OH$ | $N+O+M\rightarrow NO+M$ |
| $H_2SO_3+\cdot OH\rightarrow H_2SO_4$ | $NO_2+\cdot OH\rightarrow HNO_3$ | $N+N+M\rightarrow N_2+M$ |
| $H_2SO_4+NH_3\rightarrow (NH_4)_2SO_4$ | $NH_3+HNO_3\rightarrow NH_4NO_3$ | $NO+O+M\rightarrow NO_2+M$ |

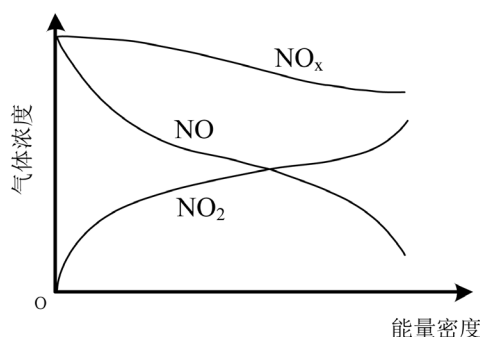


Figure 2. Typical degradation curve of NO_x [11]
图 2. 典型的 NO_x 降解曲线 [11]

4.1. 电子束法

电子束法是由日本荏原(Ebra)公司于 1970 年首先提出, 1977 年, 同新日本钢铁公司合作建成了烟气处理量为 1 万 m³/h 的示范装置, 初步证明了电子束法烟气脱硫脱硝的工业化应用的可行性。至今, 在日本、德国、中国、美国、俄罗斯等国家投入运行了多座该型处理装置。该技术的主要原理是通过电子加速器产生的高能电子束辐射含有水蒸气的烟气, 使烟气中的 N₂、O₂ 和 H₂O 等气体分子发生电离, 产生具有强氧化性的 O·、·OH、HO₂·和 O₃ 等各种氧活性粒子, 通过氧活性粒子将烟气中的 SO₂ 和 NO_x 氧化为 SO₃ 和高价氮氧化物, 其与水反应生成 H₂SO₄ 和 HNO₃。反应过程中一般会加入氨气, 最终生成的硫酸铵和硝酸铵可回收利用, 并使烟气得到净化。

4.2. 脉冲电晕法

脉冲电晕法是采用高压、窄脉冲放电来代替电子加速器产生高能电子, 将高压窄脉冲电源加在普通反应器中的放电电极上, 使其发生电晕放电, 利用其产生的强电场瞬时加速并产生高能电子, 由于加速时间短, 能量高, 能够在电场内形成低温等离子体, 电离、离解、激发气体组分, 生成 O·、·OH、O₃ 等自由基。20 世纪 80 年代, 日本学者首先开始采用脉冲电晕放电产生等离子体用于废气污染物脱除的研究。1986 年, Masuda [14] 和 Mizuno [15] 根据电子束法的特点, 提出采用高压脉冲电源代替电子束加速器产生氧活性离子的脉冲电晕法来脱硫脱硝。1998 年许德玄首次报道了以水蒸气和蒸馏水作为高压绝缘介质的电晕放电低温等离子体技术 [16]。2001 年, Young Sun Mok 等 [17] 研究发现窄脉冲高压电晕放电获得的电子平均能量约为 2eV, 大部分的电子能量消耗在气体分子的激发上, 而具有将 O₂、H₂O 离解电离的电子 (>8.4eV) 只有一小部分, 所以产生·OH、O·等自由基浓度较低, 很难将 SO₂、NO 直接氧化, 需要结合传统吸收剂提高脱除效率。

4.3. 直流电晕法

相对于高压脉冲电源, 直流电源的造价更为低廉, 而且大功率高压直流电源容易实现, 但是其能耗仍是比较高的。为了降低吸收剂氨气的泄漏, 提高脱除效率, Chang 等[18]提出用高压直流电源给喷嘴电极供电产生电晕自由基, 并将氨气从电晕放电的喷嘴注入反应器中。随后 Chang 等[19]进行了 1000~1500 Nm³/h 工业小试实验, 处理 SO₂ 和 NO 的能量利用率分别约为 9 kg/kWh 和 125 g/kWh, 脱硫和脱硝率分别达到 99%和 75%, 这也是目前已知的规模最大的直流电晕等离子体烟气脱硝脱硫工业应用研究。T Ohkubo [20]以 Ar-NH₃ 为电极气, 将其从安装在高压电极上的喷嘴喷出, 在喷嘴尖端的强电场区被激发、分解和电离, 以活性粒子进入反应器, 形成自由基喷淋系统, 得到 NO_x 的脱除率与所加电压成正比的结论。吴祖良等[21]以 NH₃-Ar-Air 为电极气进行实验, 分别获得了 96%和 60%的脱硫和脱硝率, 去除 NO_x 的能量利用率达到了 28 g/kWh 以上, 高于电子束法和脉冲电晕法。

4.4. 介质阻挡放电法

由于脉冲电晕放电法产生的高能电子平均电子能量较低, 为了提高放电电场中高能电子的平均电子能量, 一些学者提出了介质阻挡放电法(Dielectric Barrier Discharge, DBD)来产生低温等离子体用于脱硫脱硝。早在 19 世纪, 就有科学家采用 DBD 来产生等离子体, 1857 年, 科学家 Siemens 用 DBD 来产生臭氧。由于 DBD 的放电过程比较安静, 1860 年, 科学家 Andrews 将其命名为无声放电(silent discharge)。20 世纪初, 科学家 W Arburg 对其放电特性进行了研究, 1970 年后, 科学家开始模拟 DBD 的放电机理及过程, 而 DBD 的工业化应用开始于 20 世纪 80 年代末, 主要被用来产生臭氧。由于各种 DBD 工作条件不同, 且放电过程中既有物理变化, 又有化学变化, 无法从最终的结果断定中间发生的具体过程, 故对于各种 DBD 目前还没有一个统一的理论。由于电极结构、尺寸、材料, 电介质材料的性质、结构, 反应气体以及电源频率、电压等的影响, DBD 常常表现出非常复杂的放电现象和多种不同的放电模式, 主要有流注放电模式和均匀放电模式[22]。DBD 反应器一般有管式和板式两种, 介电体布置一般有以下 4 种形式[23]:

a, b 构型——常用来制造臭氧发生器, 放电产生的热量可以通过金属电极散发掉;

c 构型——放电发生在两层之间, 可以防止放电等离子体直接与金属电极接触; 对于具有腐蚀性气体或高纯度等离子体, 这种构型具有独特的优点;

d 构型——可以在介质两边同时生成两种成份不同的等离子体(图 3)。

1991 年, MooBeenChang 等[24]采用管式 DBD 模拟了干式烟气脱硫, 但由于反应器产生的平均电子能量不够高, 产生·OH 量较少, 脱硫效率很低。2000 年, Filimonovae [25]对柴油机废气、甲烷燃烧气和污染空气三种不同的气体通过 DBD 后污染物脱除效果以及能耗进行了分析。Hong bin Ma 等[26]研究的 DBD 反应器平均放电场强度、流光占空比比脉冲电晕放电高出了 10 倍。美国的 PowerPsna 公司设计的电催化氧化多种污染物控制系统(Electro-Catalytic Oxidation, ECO), 其核心即是 DBD 技术, 脱硫率和脱硝率分别达到了 98%和 90% [27]。S Yao 等[28]设计的 DBD 反应器能够处理柴油车废气中 90%以上的固体碳颗粒物, 平均能耗只有 2.25 Wh/m³。

4.5. 几种方法的对比分析

以上几种产生 NTP 用于污染物脱除的有效成分主要是 NTP 内部电离产生的具有强氧化性的·OH、O·、O₃ 等自由基, 不同的方法产生的自由基的成分和浓度不同, 因此污染物的脱除效果也不同。如表 2 所示, 介质阻挡放电法具有较高的脱硝率, 同时能耗较低。电子束法主要产生的是·OH, 脉冲电晕放电和介质阻挡放电主要产生的是 O₃。相比而言, ·OH 的活性要比 O₃ 高, 因此以 O₃ 作为主要活性成分的污染物脱

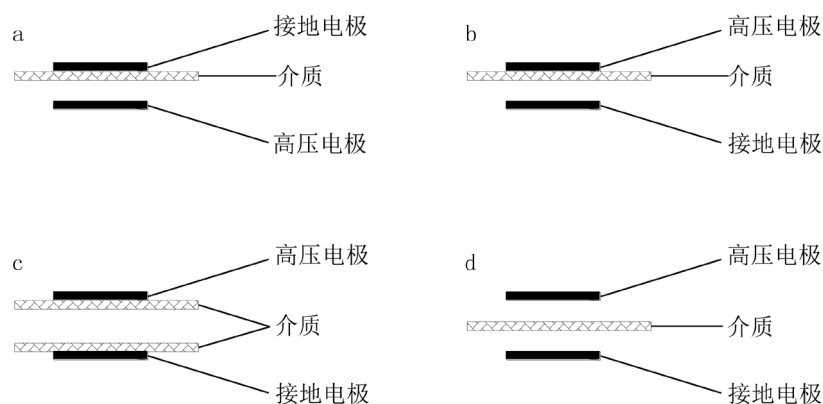


Figure 3. Dielectric arrangement during barrier discharge

图 3. 介质阻挡放电介电体布置

Table 2. Comparison and analysis of several NTP methods

表 2. 几种 NTP 处理方法的对比分析

| 方法 | 脱硝率 | 脱硫率 | 脱PM率 | 能耗 | 优缺点 | 参考文献 |
|--------|---------|---------|---------|----|---|----------------|
| 电子束 | 85% | >95% | - | 最高 | 建设成本高、运行管理要求高、有X射线辐射、适用于中小型废气处理系统 | [29] [30] [31] |
| 脉冲电晕放电 | >80% | 90%~98% | 60%~90% | 较高 | 无X射线辐射、相比于电子束法产生的高能电子平均电子能量低、大功率脉冲电源是其技术瓶颈 | [22] [23] [32] |
| 直流电晕放电 | 60%~75% | 96%~99% | - | 中等 | 直流电源造价低廉、大功率高压直流电源容易实现、但大气压下放电功率密度和平均电子能量较低, 脱硝效率不高 | [19] [33] |
| 介质阻挡放电 | 90% | 98% | >90% | 较低 | 放电比较安静、可结合脉冲放电技术、适合于中小烟气量的处理 | [27] [28] |

除方法一般需要结合液相吸收才能实现较高的脱硫脱硝效率。但是, 相比电子束法, 脉冲电晕放电法的能量利用率更高, 运行成本较低, 并且无 X 射线的辐射问题, 具有一定的应用前景。介质阻挡放电法结合脉冲电源放电法是比较有望应用于船舶柴油机废气污染脱除的技术, 但其污染物脱除效率很大程度上受反应器结构的影响, 反应器结构的优化设计是其今后的主要发展方向。

5. NTP 技术应用于船舶领域的研究方向

NTP 应用于船舶废气污染物脱除的技术主要有以下几个重点研究方向:

1) 目前对 NTP 技术的研究主要集中在陆地电厂锅炉烟气的净化以及在实验室条件下采用模拟气进行相关污染物的脱除。由于燃料以及排放特性的不同, 锅炉烟气和真实柴油机废气的成分和性质差别很大, 模拟烟气也很难真实的反应柴油机废气, 而且由于各学者采用的等离子反应器的结构、电源电压和频率等等千差万别, 有时甚至得出相反的结论, 实验得到的数据也是有待进一步验证的。由于船舶的特殊性, 将 NTP 技术应用在船舶废气脱除的工业化应用研究更少。孙永明等[34]根据化学反应动力学原理, 采用 MATLAB 建立了低温等离子体技术处理船舶废气中 NO_x 和 SO_2 的数学模型, 理论研究结果表明此方法用于船舶废气净化是可行的。刘立冬等[35]在不同工况和电压等级下采用 DBD 对柴油机废气进行处理, 获得了 83% 的 HC 脱除率。蔡忆昔等[36]在柴油机不同负荷下对废气中的芳香烃采用 DBD 进行处理, 净化效果最高可达 78.63%。王攀[37]研究了柴油机不同转速和负荷下的 PM 捕集率, 当放电功率为 360 W

时, 捕集率达到了 60%。俞文焱[38]将 NTP 氧化与海水洗涤相结合对船舶柴油机废气进行同步脱硫脱硝试验, 获得了 70%的脱硝率和 90%的脱硫率。T. Kuwahara [39]进行了 NTP 技术在船用柴油机废气治理的半工业规模应用实验, 其开发的后处理系统净化 PM 和 NO_x的效率分别达到 95%和 94%, 这意味着 NTP 技术治理柴油机废气从实验室往工业应用又迈进了一大步。但目前低温等离子体脱除船舶废气污染物技术仍停留在实验室或工业小试阶段, 还需要更多的投入对系统的放大进行研究, 以及在规模化工业应用时对反应温度、系统压降、系统能耗等方面产生的实际问题的解决。

2) 反应器的优化设计以及反应器与电源的优化匹配是低温等离子体技术真正能够应用的前提, 上文以及孙万启等[40]都对等离子反应器的现有形式进行了总结, 现阶段脉冲电源配合 DBD 反应器是 NTP 发动机废气处理技术的研究热点。但大功率脉冲电源技术还远不成熟, 功率高密度化、电容器储能以及开关技术都面临着瓶颈, 脉冲参数与等离子特性之间的关系需要进一步研究; 另外, DBD 反应器中的介电体的材料、结构、布置等对等离子体的影响也并不十分明朗。因此, 优化反应器系统结构, 提高电源效率将是另一个未来的发展方向。

3) 单独的 NTP 脱硫脱硝效率有待提高, 尤其在处理含氧量较高的废气时。因此有必要研究 NTP 协同下废气污染物的脱除效果, 比如加入与等离子体耦合的贵金属或者金属氧化物催化剂[41] [42] [43], 或者光催化下的脱除效率。研究表明[42], 经与催化剂耦合后, 等离子体反应器的能量效率可提高 1.1~1.2 倍。深入研究等离子体与催化剂的协同机理, 甚至开发出应用于等离子体技术的专用催化剂。

4) 为了更好的工业应用, 需要对低温等离子体的基本参数有更加深入的研究, 比如电子温度、电子密度等。目前的几种测量方法, 比如 Langmuir 探针、微波干涉、激光 Thomson 散射等在大气压下对等离子体参数进行测量仍存在较大难度。因此开发更为可行的等离子体参数诊断工具将有助于对等离子体用于废气污染物脱除机理的研究。

6. 结语

相比传统废气治理技术, NTP 技术投资小、维护管理相对容易、处理时间短、基本不会产生二次污染问题, 而且可同时处理 NO_x、SO_x、PM 以及 VOCs 等多种废气污染物, 具有很好的应用前景。但其大规模应用于船舶废气处理仍然有一些限制因素, 应重点在如下几个方面开展工作:

1) 影响 NTP 脱除废气污染物性能的因素众多, 污染物的脱除机理也比较复杂, 有些废气成分的脱除机理在国内外并未形成统一结论, 因此有必要对其脱除机理开展深入的分析研究工作, 尤其是在多种 NTP 方法联合使用情况下。

2) 与陆地上的应用不同, 远洋船舶多采用重油作为燃料, 废气成分更加复杂, 这也使得低温等离子体应用于船舶废气污染物的脱除相比于陆地上的应用更加复杂。因此, 急切需要结合实际船舶的应用情况, 开展相关研究工作。

3) 总体上来说, 介质阻挡放电法具有较高的污染物脱除效率, 且具有较低的能耗, 在船舶废气处理中, 应重点考察该方法, 但其污染物脱除效率很大程度上受反应器结构的影响, 反应器结构的优化设计是其今后的主要发展方向。

4) 不同的 NTP 方法具有不同的特点, 可尝试将不同的 NTP 方法进行组合使用以达到更好的处理效果, 如介质阻挡放电法结合脉冲电源放电法对船舶废气进行处理。

参考文献

- [1] 自然资源保护协会. 船舶和港口空气污染防治白皮书[EB/OL].
<http://nrdc.cn/information/informationinfo?id=91&cid=49&cook=2>, 2014-10.

- [2] 梁永贤, 廖汝娥, 颜敏, 等. 深圳港船舶大气污染物排放核算[J]. 环境科学导刊, 2016(2): 27-31.
- [3] IMO. Resolution MEPC (2011) 203(62)-Amendments to MARPOL Annex VI on Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships by Inclusion of New Regulations on Energy Efficiency for Ships.
- [4] 中华人民共和国交通运输部. 珠三角、长三角、环渤海(京津冀)水域船舶排放控制区实施方案[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-12/04/content_5019932.htm, 2017-07-05.
- [5] 谢春雪. 等离子体脱硫相关问题分析及脱硫实验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉纺织大学, 2015.
- [6] 菅井秀郎. 等离子体电子工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 国家自然科学基金会. 自然科学发展战略研究报告之十四: 等离子体物理学[J]. 科技导报, 1994(5): 16.
- [8] Fridman, A.A. (2008) Plasma Chemistry. Cambridge University Press, Cambridge.
- [9] 祁国恕, 王承智, 石荣, 等. 气态污染物的非平衡等离子体处理技术[J]. 辽宁城乡环境科技, 2006(3): 43-46.
- [10] Babaie, M., Davari, P., Zare, F., *et al.* (2013) Effect of Pulsed Power on Particle Matter in Diesel Engine Exhaust Using a DBD Plasma Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **41**, 2349-2358. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2270015>
- [11] Rajanikanth, B.S. and Ravi, V. (2002) Pulsed Electrical Discharges Assisted by Dielectric Pellets/Catalysts for Diesel Engine Exhaust Treatment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **9**, 616-626. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2002.1024440>
- [12] 周奇. 反应器结构优化及电源参数和气体条件对等离子体脱硝的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉纺织大学, 2013.
- [13] Fridman, A., Chirokov, A. and Gutsol, A. (2005) Non-Thermal Atmospheric Pressure Discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **38**, R1-R24.
- [14] Masuda, S. and Nakao, H. (1986) Control of NO_x by Positive and Negative Pulsed Corona Discharge. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **26**, 374.
- [15] Mizuno, A., Clements, J.S. and Davis, R.H. (1986) A Method for the Removal of Sulfur Dioxide from Exhaust Gas Utilizing Pulsed Streamer Corona for Electron Energyization. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **IA-22**, 516-522. <https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504752>
- [16] Dexuan, X., Kyongju, K.P. and Zhongyang, L. (1998) Removal of the Aerosol Formed in PPCP and EBDS by Electrostatic Precipitator. *Proceedings of 7th International Conference on Electrostatic Precipitation*, Kyongju, 20-25 September 1998, 229.
- [17] Young, S.M., Ho, W.L. and Yang, J.H. (2001) Flue Gas Treatment Using Pulsed Corona Discharge Generated by Magnetic Pulse Compression Modulator. *Electrostatics*, **53**, 195-208.
- [18] Chang, J.S., Looy, P.C., Nagai, K., *et al.* (1996) Preliminary Pilot Plant Tests of a Corona Discharge-Electron Beam Hybrid Combustion Flue Gas Cleaning System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **32**, 131-137.
- [19] Chang, J.S., Urashima, K., Tong, Y.X., *et al.* (2003) Simultaneous Removal of NO_x and SO₂ from Coal Boiler Flue Gases by DC Corona Discharge Ammonia Radical Shower Systems: Pilot Plant Tests. *Electrostatics*, **57**, 313-323.
- [20] Ohkubo, T. (1994) NO_x Removal by a Pipe with Nozzle-Plate Electrode Corona Discharge System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **30**, 856-861.
- [21] 吴祖良, 高翔, 李济吾, 等. 电晕放电自由基簇射同时脱硫脱硝反应特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(2): 325-331.
- [22] 刘辰, 宋宝华, 李玲密, 董丽彦. 离子体法脱硫脱硝一体化试验研究[J]. 环境工程, 2014(S1): 597-599.
- [23] 曾科, 龙学明, 刘兵, 等. 采用低温等离子体技术降低柴油机有害排放物的研究[J]. 内燃机学报, 2003, 21(1): 45-48.
- [24] Moo, B.C., Jeanne, H.B., Mark, J.R., *et al.* (1991) Removal of SO₂ from Gas Streams Using a Dielectric Barrier Discharge and Combined Plasma Photolysis. *Applied Physics*, **69**, 4409-4417.
- [25] Filimonova, E.A., Amirov, R.H., Kim, H.T., *et al.* (2000) Comparative Modeling of NO_x and SO₂ Removal from Pollutant Gases Using Pulsed Corona and Silent Discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **33**, 1716-1727.
- [26] Ma, H.B., Chen, P., Zhang, M.L., *et al.* (2002) Study of SO₂ Removal Using Non-Thermal Plasma Induced by Dielectric Barrier Discharge (DBD). *Plasma Chemistry and Processing*, **22**, 239-254.
- [27] Christopher, R., McLaren, P. and Morgan, D.J. (2000) Electro-Catalytic Oxidation Process for Multi-Pollutant Control at First Energys R E Burger Generating Station. Electric Power 2000 Cincinnati Convention Center.
- [28] Yao, S., Madokoro, K., Fushimi, C. and Fujioka, Y. (2007) Experimental Investigation on Diesel PM Removal Using DBD Reactors. *AIChE Journal*, **53**, 1891-1897.

- [29] 潘巧媛. 氧活性粒子注入烟气资源化脱硫脱硝研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [30] 汤宗慧, 徐光. 电子束半干法烟气净化技术[J]. 华东电力, 2003(8): 9-10.
- [31] 李盼宋, 李建军, 贺尧祖, 等. 电子束氨法协同脱硫脱硝技术的研究进展[J]. 四川化工, 2016(1): 7-9.
- [32] 白希尧, 张芝涛, 白敏冬. 气体放电非平衡等离子体化学脱硫脱硝理论基础研究[J]. 工业安全与防尘, 2000(9): 14-17.
- [33] 吴祖良, 高翔, 李济吾, 等. 电晕放电自由基簇射同时脱硫脱硝反应特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(2): 325-331.
- [34] 孙永明, 夏文虎, 张勤. 低温等离子体技术净化船舶柴油机废气的化学反应动力学模拟[J]. 上海海事大学学报, 2015(2): 79-83.
- [35] 刘立东, 史永万, 高俊华, 等. 低温等离子体对柴油机废气净化效果的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 116-120.
- [36] 蔡忆昔, 董淼, 李小华, 等. 低温等离子体降低柴油机多环芳香烃的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 380-385.
- [37] 王攀. NAPC 技术降低柴油机 NO_x 和 PM 排放的机理分析及试验研究[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [38] 喻文焱. 等离子体脱硫脱硝及其用于船舶柴油机废气处理的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉纺织大学, 2013.
- [39] Kuwahara, T., Yoshida, K., Okubo, M., *et al.* (2015) A Pilot Scale Experiment for Total Marine Diesel Emission Control Using Ozone Injection and Non-Thermal Plasma Reduction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **51**, 1168-1178.
- [40] 孙万启, 宋华, 韩素玲, 等. 废气治理低温等离子体反应器的研究进展[J]. 化工进展, 2011(5): 930-935.
- [41] Xing, Y., Liu, Z.X., Couttenye, R.A., *et al.* (2008) Processing of Hydrocarbons in an AC Discharge Non-Thermal Plasma Reactor: An Approach to Generate Reducing Agents for On-Board Automotive Exhaust Gas Cleaning. *Journal of Catalysis*, **253**, 28-36.
- [42] 刘跃旭, 王少波, 原培胜. 催化型低温等离子体反应器净化废气研究进展[J]. 化工进展, 2009, 28(12): 2232-2236.
- [43] 丁卫科, 段钰锋, 张君, 等. 低温等离子改性复合钙基吸附剂烟气脱硫实验研究[J]. 化工进展, 2017(3): 1107-1112.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org