

# 平行板双介质阻挡放电等离子体 处理氮氧化物影响因素

胡雅琴<sup>1\*</sup>, 朱永军<sup>1</sup>, 吕永康<sup>2</sup>

(1. 山西大同大学化学化工学院, 山西 大同 037009;  
2. 太原理工大学煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

**摘要:**通过自行设计的双介质阻挡反应器产生的等离子体对氮氧化物去除过程进行了研究。考察峰值电压为14~21 kV, NO的初始质量分数为400~600 μg/g, O<sub>2</sub>的体积分数为0~8%, 气体流量在600~1 600 mL/min, 等离子产生方式, 即O<sub>2</sub>单独经过等离子体, O<sub>2</sub>与N<sub>2</sub>共同经过等离子体, O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和NO共同经过等离子体对氮氧化物去除的影响。结果表明:提高峰值电压有利于氮氧化物脱除, 增加氧的体积分数和气体流速, 抑制了氮氧化物的脱除。

**关键词:**等离子体; 介质阻挡放电; NO<sub>x</sub>

**中图分类号:** X701.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2014)07-0069-05

## Influencing factors for removal of nitrogen oxides by dielectric barrier discharge reactor

HU Ya-qing<sup>1\*</sup>, ZHU Yong-jun<sup>1</sup>, LV Yong-kang<sup>2</sup>

(1. School of Chemical and Chemical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;  
2. Key laboratory of Coal Science and Technology, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** An experimental setup of flat dielectric barrier discharge reactors is designed to remove NO<sub>x</sub> through generating plasma. The influences of the gas flow rate (600-1 600 mL/min), NO<sub>x</sub> initial concentration (400-600 ppm), applied voltage (14-21 kV) and contents of O<sub>2</sub> (0-8%) on the NO<sub>x</sub> removal rate are investigated. The NO<sub>x</sub> removal rate is high at small gas flow rate or low NO<sub>x</sub> initial concentration. By increasing the concentration of gas flow rate or NO<sub>x</sub> initial concentration, the NO<sub>x</sub> removal rate decreases remarkably. Moreover, the removal rate will increase with increasing the discharge voltage. The existence of O<sub>2</sub> can lead to the decrease of the NO<sub>x</sub> removal rate.

**Key words:** plasma; dielectric barrier discharge; NO<sub>x</sub>

近年来我国机动车数量以及能源消耗出现了显著地增长, NO<sub>x</sub>排放的增加对人体健康以及生态环境造成了巨大的威胁。因此, 国家出台了一系列相关的法律法规, 但是各类 NO<sub>x</sub>的排放量仍然没有得到有效的控制。据相关报道2011年氮氧化物的排放量不仅没有下降反而升高了5.73%, 使得“十二五”第1年排放总量的减排没有能够按计划实现<sup>[1]</sup>, 因此开展废气中氮氧化物的处理已经迫在眉睫。目前, 在富氧条件下净化 NO<sub>x</sub>的技术主要有: 选择催化还原、氮氧化物存储还原技术和非热等离子体技术, 其中非热等离子体处理“三废”是近年来的研究热点<sup>[2]</sup>。等离子体脱除 NO<sub>x</sub>具有占地面积小, 投资少, 没有二次污染, 运行费用低, 无设备腐蚀等优点, 已经成为国际上公认的具有良好的应用前景和潜力的脱硝新工艺<sup>[3]</sup>。

国内外学者<sup>[4-10]</sup>对等离子体进行了大量的研究, 主要集中在3大部分: 一是反应机理研究; 二是反应器的研究设计; 三是高压电源的设计。等离子

体产生的机理以及 NO<sub>x</sub>的去除机理的认识仍处于摸索阶段, 缺乏完善的模型来指导装置和工艺的优化设计。笔者从实验装置的设计出发, 对实验条件进行了考察, 为等离子体技术的实际应用提供一定的理论依据和技术支持。

## 1 实验部分

等离子体处理氮氧化物的实验系统如图1所示。

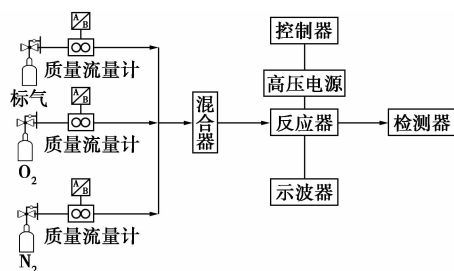


图1 实验系统简图

氮气(太原福江特种气体有限公司生产, 纯度

为 99.999%) ; 氧气(太原福江特种气体有限公司生产,纯度为 99.999%) ; NO 标准气(北京龙辉京城气体有限公司生产,NO 体积分数为 10%,氮气为平衡气)。气体减压阀、质量流量计(北京七星华创生产)和自制混合器。放电反应单元由高压电源和反应器 2 部分组成。高压电源为 CTP-2000 K 低温等离子体实验电源(南京苏曼电子有限公司生产),其中心频率为 10 kHz,电压采用电压器调节,调节范围为 0~30 kV。

实验采用板-板式双介质阻挡反应器,如图 2 所示。上下两圆形石英介质的厚度各为 2.5 mm,直径为 60 mm;中间放电间隙为 8 mm;上下两圆形电极材质为不锈钢,上电极接高压电为高压电极,下电极接地为低压电极。

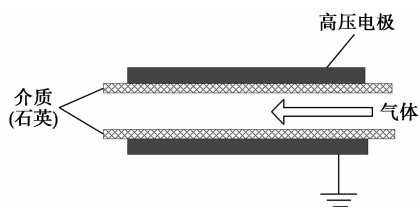


图 2 面-面式等离子体反应器结构图

检测仪器主要是烟气分析仪和示波器。烟气分析仪采用英国凯恩生产的 KM9106 综合烟气分析仪,配有  $O_2$ 、NO、 $NO_2$  传感器,通过内置传感器将  $O_2$ 、NO、 $NO_2$  的含量显示在显示屏上。示波器采用美国泰克生产的 TDS1012C-SC 型。 $N_2$ 、 $O_2$  与 NO 标气经质量流量计后进入混合器,混合均匀后进入 DBD 反应器,经反应器处理后进入检测器进行分析检测。

实验中 NO 和  $NO_x$  去除率分别为:

$$\text{NO 去除率} = \frac{[C(\text{NO}_0) - C(\text{NO})]/C(\text{NO}_0)}{\times 100\%} \quad (1)$$

$$\text{NO}_x \text{ 去除率} = \frac{[C(\text{NO}_{x0}) - C(\text{NO}_x)]/C(\text{NO}_{x0})}{\times 100\%} \quad (2)$$

式中: $C(\text{NO}_0)$  为 NO 初始质量分数; $C(\text{NO})$  为反应

后 NO 的质量分数; $C(\text{NO}_{x0})$  为反应前 NO 和  $NO_2$  的总质量分数; $C(\text{NO}_x)$  为反应后 NO 和  $NO_2$  的总质量分数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 峰值电压对氮氧化物去除率的影响

峰值电压对等离子体放电有着很重要的影响<sup>[11]</sup>。在  $N_2/O_2/NO$  气氛下,未加任何填充介质, $O_2$  的体积分数为 2%,气体流量为 800 mL/min,电源频率为 9.6 MHz, $NO_x$  质量分数为 400  $\mu\text{g/g}$  和 600  $\mu\text{g/g}$  时,NO 和  $NO_x$  去除率与峰值电压的关系如图 3 所示。

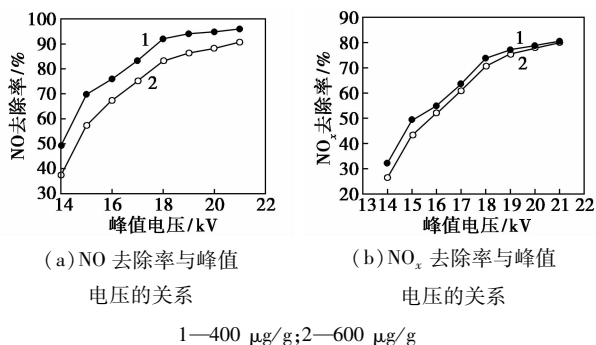


图 3 NO、 $NO_x$  去除率与峰值电压的关系

由图 3(a)可知,在  $NO_x$  质量分数为 400、600  $\mu\text{g/g}$  时,NO 去除率随着峰值电压的升高而增大。当峰值电压到达某一个值后去除率趋于平稳,以初始质量分数为 400  $\mu\text{g/g}$  为例:当峰值电压 > 18 kV 时,NO 去除率接近 100%,这是因为随着峰值电压的升高,活性粒子产生的量在增加,而 NO 的量保持不变,基本能够反应掉全部的 NO,所以 NO 去除率保持不变。而且相同条件下,初始浓度为 400  $\mu\text{g/g}$  时的处理效果要优于初始质量分数为 600  $\mu\text{g/g}$  时的处理效果。由图 3(b)可知, $NO_x$  去除率随着峰值电压的升高而增大,初始质量分数为 400  $\mu\text{g/g}$  时, $NO_x$  去除率高于初始质量分数为 600  $\mu\text{g/g}$  时  $NO_x$  去除率。当峰值电压 < 18 kV 时,随峰值电压的升高  $NO_x$

(上接第 68 页)

- [8] Zhai Q Z. Preparation and controlled release of mesoporous MCM-41/propranolol hydrochloride composite drug[J]. Journal of Microencapsulation, 2013, 30(2): 173-180.
- [9] Xu C, Niu Y T, Popat A, et al. Rod-like mesoporous silica nanoparticles with rough surfaces for enhanced cellular delivery[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2014, 2(3): 253-256.
- [10] Chen Q R, Han L, Gao C B, et al. Synthesis of monodispersed mesoporous silica spheres (MMSSs) with controlled particle size using gemini surfactant[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2010, 128(1/2/3): 203-212.

- [11] 许晓颖,孔岩,陈玉,等.球形 V-MCM-48 的简单合成方法[J].无机化学学报,2012,28(11):2478-2484.
- [12] Lee H I, Kim J H, Stucky G D, et al. Morphology-selective synthesis of mesoporous SBA-15 particles over micrometer, submicrometer and nanometer scales[J]. Journal of Materials Chemistry, 2010, 20: 8483-8487.
- [13] 乐园,陈建峰,汪文川.表面活性剂对二氧化硅空心微球结构的影响[J].现代化工,2004,24(3):43-45.
- [14] 孔岩,张瑞,徐鑫杰,等.高钒掺杂量 MCM-41 合成及表征[J].无机化学学报,2008,24(7):1124-1127. ■

去除率增幅较大,但是当峰值电压  $> 18$  kV 后,峰值电压对  $\text{NO}_x$  去除率的影响不大。

## 2.2 $\text{O}_2$ 体积分数对氮氧化物去除率的影响

$\text{O}_2$  体积分数与氮氧化物去除率有明显的关系。峰值电压为 16 kV,电源频率为 9.6 MHz,气体流量为 800 mL/min,  $\text{NO}_x$  质量分数分别为 400  $\mu\text{g/g}$  和 800  $\mu\text{g/g}$  时,NO 和  $\text{NO}_x$  去除率与  $\text{O}_2$  体积分数的关系如图 4 所示。

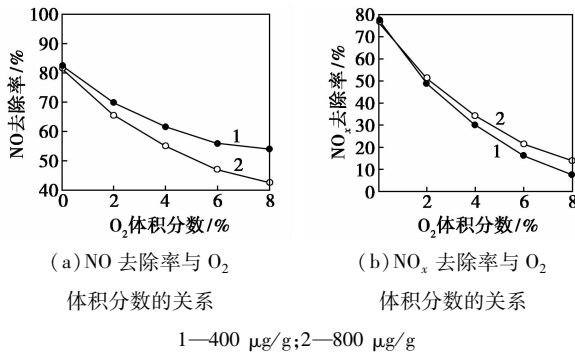


图 4 NO、 $\text{NO}_x$  去除率与  $\text{O}_2$  体积分数的关系

由图 4(a)可以看出,  $\text{NO}_x$  质量分数为 400  $\mu\text{g/g}$  和 800  $\mu\text{g/g}$  时,NO 去除率都随着  $\text{O}_2$  体积分数的增加而减少,并且相同条件下,质量分数为 400  $\mu\text{g/g}$  时 NO 去除率大于质量分数为 800  $\mu\text{g/g}$  时 NO 去除率。由图 4(b)可知,  $\text{NO}_x$  去除率随着  $\text{O}_2$  体积分数的增加而减少,相同条件下质量分数为 800  $\mu\text{g/g}$  时去除率优于质量分数为 400  $\mu\text{g/g}$  时去除率。由此可见,NO 在低浓度时,  $\text{O}_2$  体积分数的增加有利于 NO 的去除;NO 质量分数较高时,  $\text{O}_2$  体积分数的增加不利于 NO 的去除。同时文献[12]中,  $\text{O}_2$  的加入会使放电产生高能电子数密度降低,同样会造成 NO 去除率的下降。在相同的  $\text{O}_2$  体积分数下,  $\text{NO}_x$  去除率随着  $\text{NO}_x$  质量分数的增加反而降低,原因是在较低质量分数的  $\text{NO}_x$  下,NO 很大一部分转化为  $\text{NO}_2$ ,而 NO 质量分数较高时,NO 转变为  $\text{NO}_2$  的程度相对较低。

## 2.3 初始质量分数对氮氧化物去除率的影响

实际废气中的氮氧化物的质量分数各不相同。在反应气氛中  $\text{O}_2$  体积分数为 2%,电源频率为 9.6 MHz,峰值电压为 16 kV 时,NO 和  $\text{NO}_x$  去除率与 NO 和  $\text{NO}_x$  初始浓度的关系如图 5 所示。实验时气体流量分别取 600、800、1 000 mL/min 进行对比。

由图 5(a)可知,NO 去除率随着 NO 初始质量分数的增加而减小。当气体流量为 600 mL/min,NO 初始质量分数为 400  $\mu\text{g/g}$  时,NO 去除率约为 80%;随着 NO 初始质量分数的增加,NO 去除率越

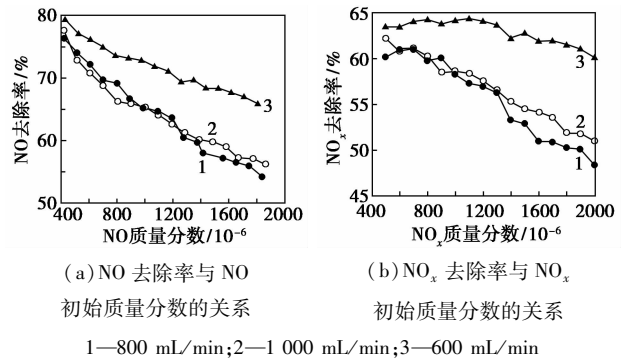


图 5 NO 和  $\text{NO}_x$  去除率与 NO 和  $\text{NO}_x$  初始质量分数的关系

来越低,当 NO 初始质量分数为 1 800  $\mu\text{g/g}$  时,NO 去除率为 65% 左右。当气体流量为 800 和 1 000 mL/min 时,NO 去除率随着 NO 初始质量分数的增加而减小,但是相同条件下去除率相差不大,都小于气体流量为 600 mL/min 时的去除率。由图 5(b)可知,  $\text{NO}_x$  去除率随着  $\text{NO}_x$  初始质量分数的增加而减小。当气体流量为 600 mL/min 时,  $\text{NO}_x$  去除率为 63% 左右,随着  $\text{NO}_x$  初始质量分数的增加,  $\text{NO}_x$  去除率略有上升但变化不大;当  $\text{NO}_x$  质量分数  $> 1 300$   $\mu\text{g/g}$  时,  $\text{NO}_x$  去除率会下降但是幅度很小;当  $\text{NO}_x$  质量分数为 2 000  $\mu\text{g/g}$  时,  $\text{NO}_x$  去除率仍在 60% 以上。当气体流量为 800 mL/min 和 1 000 mL/min 时,  $\text{NO}_x$  去除率随着  $\text{NO}_x$  初始质量分数的增加而减小,相同条件下对两者去除率相差不大,但是都  $< 600$  mL/min 时  $\text{NO}_x$  去除率。

## 2.4 气体流量对氮氧化物去除率的影响

在实际处理废气时,各种场所产生的废气量的大小不同,同时不同的反应器处理量也有所不同,所以有必要对气体流量大小进行考查。在  $\text{O}_2$  体积分数为 2%,电源频率为 9.6 MHz,峰值电压为 16 kV 时,NO 和  $\text{NO}_x$  去除率与气体流量之间的关系如图 6 所示。实验取  $\text{NO}_x$  初始质量分数为 400  $\mu\text{g/g}$  和 600  $\mu\text{g/g}$  进行对比研究。

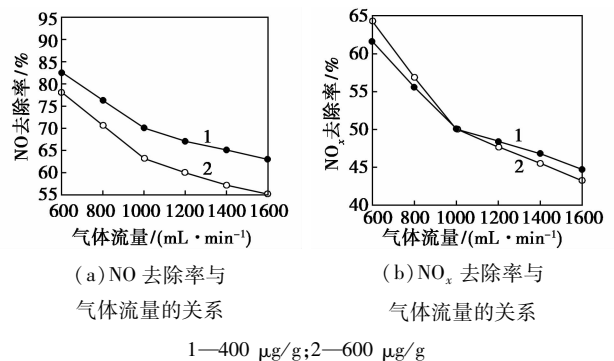


图 6 NO、 $\text{NO}_x$  去除率与气体流量的关系

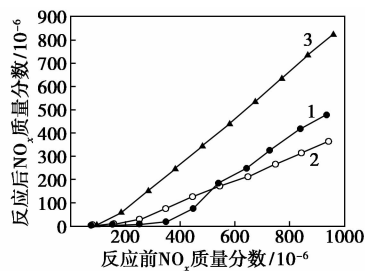
由图6(a)可知,当 $\text{NO}_x$ 初始质量分数为 $400 \mu\text{g/g}$ 和 $600 \mu\text{g/g}$ 时, $\text{NO}$ 去除率随着气体流量的增加而减小。当气体流量 $<1000 \text{ mL/min}$ 时,气体流量对 $\text{NO}$ 去除率的影响较大;当气体流量到达 $1000 \text{ mL/min}$ 后,气体流量对 $\text{NO}$ 去除率的影响较小, $\text{NO}$ 去除率基本不随气体流量的变化而变化。由图6(b)可知,当 $\text{NO}_x$ 质量分数为 $400 \mu\text{g/g}$ 和 $600 \mu\text{g/g}$ ,气体流量 $<900 \text{ mL/min}$ 时, $\text{NO}_x$ 去除率降幅明显;当气体流量 $>900 \text{ mL/min}$ 时,降幅趋于平缓。主要是因为在一一定的输入功率下,只能产生一定量的活性粒子,气体流量越小则气体在反应器内的停留时间越长, $\text{NO}$ 与活性粒子的碰撞几率就会增大,反应也越充分,所以 $\text{NO}$ 和 $\text{NO}_x$ 去除率升高;但是当停留时间增大到一定值以后, $\text{NO}$ 与活性粒子的反应处于平衡状态,所以 $\text{NO}$ 和 $\text{NO}_x$ 去除率基本不随停留时间的增大而增大。

气体流量增加会导致气体流速的增加,则相应单位体积内活性粒子的数目便会下降, $\text{NO}$ 和 $\text{NO}_x$ 去除率下降;同时,使得废气在等离子区内的停留时间变短,活性粒子与废气发生碰撞几率就会降低,这也导致了 $\text{NO}$ 去除率的降低。因此将气体流量控制在一定范围内有利于 $\text{NO}$ 和 $\text{NO}_x$ 的去除。

### 2.5 等离子体产生臭氧对氮氧化物去除率的影响

$\text{O}_3$ 属于活性自由基的一种,现已证明在有 $\text{O}_2$ 存在的环境下等离子体放电能够产生大量的 $\text{O}_3$ ,而且 $\text{O}_3$ 存在周期相对较长,对氮氧化物的脱除有一定影响。王智化等<sup>[13]</sup>研究发现,在温度为 $100^\circ\text{C}$ 和 $200^\circ\text{C}$ , $n(\text{O}_3):n(\text{NO})=1.0$ 时,氧化效率分别达到了 $89.2\%$ 和 $85.0\%$ ,表明温度对氮氧化物去除率的影响不大。魏林生等<sup>[14]</sup>发现, $\text{O}_3$ 能够将 $\text{NO}$ 氧化,结合化学吸收的方法达到去除的目的。为证实等离子体过程当中产生的 $\text{O}_3$ 对氮氧化物脱除的影响,分别采用纯 $\text{O}_2$ 单独通过等离子体, $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 通过等离子体, $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$ 共同通过等离子体方式。 $\text{O}_2$ 体积分数为 $2\%$ ,频率为 $9.6 \text{ MHz}$ ,峰值电压为 $31.2 \text{ kV}$ ,气体流量为 $800 \text{ mL/min}$ ,结果如图7所示。由图7可知,对于 $\text{NO}$ 的去除只有纯 $\text{O}_2$ 通过等离子体时去除效果最差。当 $\text{NO}$ 质量分数 $<550 \mu\text{g/g}$ 时, $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 经过等离子体对 $\text{NO}$ 去除率要高于 $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$ 共同经过等离子体时 $\text{NO}$ 去除率。主要原因是当有 $\text{NO}$ 经过等离子体时,由于分解 $\text{NO}$ 的能量要小于分解 $\text{O}_2$ 的能量,故会有部分能量被用来分解 $\text{NO}$ ,所以当 $\text{NO}$ 初始质量分数较低时, $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 经过等离子体时的 $\text{NO}$ 去除率要高于

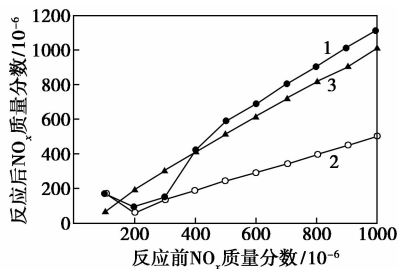
$\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$ 共同经过等离子体时 $\text{NO}$ 去除率。当 $\text{NO}$ 初始质量分数 $>550 \mu\text{g/g}$ 时, $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$ 共同经过等离子体时的处理效果要好于 $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 经过等离子体的处理效果,原因是随着 $\text{NO}$ 初始质量分数的增加,虽然分解 $\text{NO}$ 会消耗部分能量,但是 $\text{NO}$ 质量分数的增加使其与 $\text{N}$ 和 $\text{O}$ 等粒子的碰撞几率增加,所以出现 $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$ 共同经过等离子体时 $\text{NO}$ 质量分数低于 $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 经过等离子体时 $\text{NO}$ 的质量分数。



1— $\text{O}_2 + \text{N}_2$  经过等离子体; 2— $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$  经过等离子体;  
3— $\text{O}_2$  经过等离子体

图7 反应后 $\text{NO}$ 的浓度变化曲线

同时考察了不同的 $\text{NO}$ 初始质量分数与 $\text{O}_2$ 、 $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 、 $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$ 3种通过等离子体方式的影响,结果如图8所示。由图8可知,当 $\text{NO}$ 初始质量分数为 $100 \mu\text{g/g}$ , $\text{O}_2$ 单独经过等离子体时 $\text{NO}_x$ 质量分数最低, $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 和 $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$ 经过等离子体生成 $\text{NO}_x$ 的量基本相同,约为 $190 \mu\text{g/g}$ ;当 $\text{NO}$ 初始质量分数 $>200 \mu\text{g/g}$ 后, $\text{NO}_x$ 生成量随着 $\text{NO}$ 初始质量分数的增大而增加,其中当 $\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$ 共同经过等离子体时 $\text{NO}_x$ 的质量分数最低;而当 $\text{NO}$ 初始质量分数 $<400 \mu\text{g/g}$ 时, $\text{O}_2$ 单独经过等离子体时 $\text{NO}_x$ 质量分数要高于 $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 经过等离子体时 $\text{NO}_x$ 质量分数;当 $\text{NO}$ 初始质量分数超过 $400 \mu\text{g/g}$ 时, $\text{O}_2$ 单独经过等离子体时 $\text{NO}_x$ 质量分数要比 $\text{O}_2 + \text{N}_2$ 经过等离子体时 $\text{NO}_x$ 的质量分数高 $100 \mu\text{g/g}$ 左右。



1— $\text{N}_2 + \text{O}_2$  经过等离子体; 2— $\text{N}_2 + \text{O}_2 + \text{NO}$  经过等离子体;  
3— $\text{O}_2$  经过等离子体

图8 反应后 $\text{NO}_x$ 质量分数变化曲线

## 2.6 不同粒径的陶粒对氮氧化物去除率的影响

等离子体反应器内的填充物质会对NO的脱除有很大的影响<sup>[15]</sup>。研究者们通过不同的反应器中添加多种不同的填充物来研究填充物的加入对要处理气体的影响。常用的填充物有玻璃珠、分子筛等。笔者采用等离子体反应器当中填充陶粒,研究在O<sub>2</sub>体积分数为2%,气体流量为800 mL/min,频率为9.6 MHz,峰值电压为32 kV时,陶粒的加入对氮氧化物去除率的影响,结果如图9所示。其中1~4号陶粒的平均直径分别为3.0、4.2、5.3、6.3 mm,加入的陶粒使其填满整个反应器。

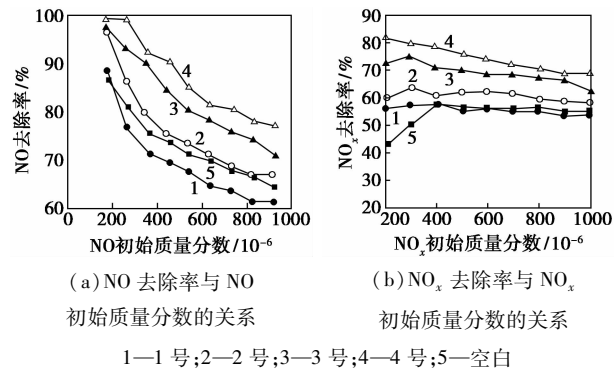


图9 NO、NO<sub>x</sub>去除率与NO、NO<sub>x</sub>初始质量分数的关系  
1—1号;2—2号;3—3号;4—4号;5—空白

由图9(a)可以看出,NO去除率随着NO初始质量分数的增加而降低,并且在相同条件下,NO去除率大小为:4号>3号>2号>1号,即相同条件下NO去除率随着陶粒粒径的增大而增加。由图9(b)可以看出,填充4号陶粒时,NO<sub>x</sub>去除率由200 μg/g时的82%下降到1000 μg/g时的70%,降幅很小;1、2、3号陶粒的NO<sub>x</sub>去除率稳定在一个值附近变化不大。同时由图9可以看出,随着陶粒的加入,NO、NO<sub>x</sub>去除率要明显优于没有加入任何填充物单纯等离子体时NO、NO<sub>x</sub>去除率,特别是随着陶粒粒径的增大,NO、NO<sub>x</sub>去除率增加。这是因为:陶粒的加入将占据部分放电空间,使得气体的停留时间减少,但是陶粒的加入能够加强传质效率,使粒子间的接触加强。同时陶粒的填充能够使DBD装置的放电区域气隙场强增加,这将对气体的击穿放电非常有利,从而能够降低装置的起始放电电压<sup>[16]</sup>,同时气隙场强的增加能够使得细丝状放电的空间密度增大,放电电流增加。

## 3 结论

利用双介质阻挡放电反应器考查了反应条件对

氮氧化物去除率的影响。NO和NO<sub>x</sub>去除率随峰值电压(14~21 kV)的升高而升高;随O<sub>2</sub>体积分数、NO初始质量分数在400、800 μg/g时和气体流量为600、800、1000 mL/min的增加而降低;等离子体产生的O<sub>3</sub>对NO和NO<sub>x</sub>去除率的影响,与纯O<sub>2</sub>单独通过等离子体,然后再与N<sub>2</sub>和NO混合;O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>通过等离子体,NO混合;O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>+NO共同通过等离子体方式有很大关系。放电区域内填充陶粒越大,越有利于等离子体去除氮氧化物,并且能够有效减少NO<sub>2</sub>的产生。

## 参考文献

- [1] 环保部. 年内将出台国V排放标准[J]. 中国石油石化, 2012, (18): 14.
- [2] 吴宇皇, 杨学昌, 陈波, 等. 非热等离子体对柴油机尾气中NO<sub>x</sub>的治理[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(1): 1-4.
- [3] 杨宽辉, 王保卫, 许根慧. 介质阻挡放电等离子体特性及其在化工中的应用[J]. 化工学报, 2007, 58(7): 1609-1615.
- [4] 王新新. 介质阻挡放电及其应用[J]. 高压电技术, 2009, 35(1): 1-11.
- [5] 刘彤, 宋志民, 石川, 等. 介质阻挡放电等离子体直接分解NO<sub>x</sub>影响因素[J]. 环境科学, 2009, 21(5): 80-82.
- [6] 赵文华, 张旭东. 介质阻挡放电去除NO的实验研究[J]. 环境科学学报, 2004, 24(1): 107-110.
- [7] 孙琪, 朱爱民, 牛金海, 等. 介质阻挡放电引发氮氧化物等离子体反应[J]. 物理化学学报, 2005, 21(2): 192-196.
- [8] 陈刚, 孙琪, 石雷, 等. 介质阻挡放电与CuZSM-5结合脱除NO<sub>x</sub>的影响[J]. 催化学报, 2010, 31(7): 817-821.
- [9] 汪涛, 孙保民, 肖海平, 等. 介质阻挡放电中气体成分对NO<sub>x</sub>脱除的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(11): 3652-3659.
- [10] 孙琪, 牛金海, 宋志民. 温度对等离子体与催化剂结合脱除NO<sub>x</sub>的影响[J]. 环境化学, 2007, 26(5): 569-572.
- [11] Snyder H R, Anderson G K. Effect of air and oxygen content on the dielectric barrier discharge decomposition of chlorobenzene[J]. Plasma Science, IEEE Transactions on, 1998, 26(6): 1695-1699.
- [12] 王文春, 吴彦, 李学初, 等. NO、N<sub>2</sub>气体中电晕放电高能电子密度分布的光谱实验研究[J]. 环境科学学报, 1998, 18(1): 51-55.
- [13] 王智化, 周俊虎, 温正城, 等. 利用臭氧同时脱硫脱硝过程中NO的氧化机理研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2007, 41(5): 765-769.
- [14] 魏林生, 周俊虎, 王智化, 等. 臭氧氧化结合化学吸收同时脱硫脱硝的研究——石灰石浆液吸收特性理论分析[J]. 动力工程, 2008, 28(1): 112-116.
- [15] McLarnon C, Mathur V. Nitrogen oxide decomposition by barrier discharge[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000, 39(8): 2779-2787.
- [16] 赵卫东, 蔡忆昔, 郑荣耀, 等. 介质球填充对介质阻挡放电装置性能的影响[J]. 高电压技术, 2010, (6): 1537-1541. ■