

# 介质阻挡放电低温等离子体脱硝性能研究

郭彬<sup>1,2</sup>, 栾涛<sup>\*1</sup>

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 山东农业大学水利与土木工程学院, 泰安 271018)

**摘要:**进行了介质阻挡放电低温等离子体脱除伴有  $\text{SO}_2$  的烟气中  $\text{NO}$  的研究, 分别进行了直接等离子体脱硝和间接等离子体脱硝实验。在直接等离子体脱硝实验中, 模拟烟气等混合气直接通入等离子体发生器, 在反应器中电离分解  $\text{NO}$  以及和生成的高能电子、离子和自由基等离子体相互反应而进行脱除  $\text{NO}$ ; 间接等离子体脱硝实验中, 模拟烟气连接在等离子体发生器出口与从反应器中产生出的等离子体发生氧化反应而进行脱除  $\text{NO}$ 。结果表明, 无论直接形式还是间接形式, 脱硝效率都要比脱硫效率高, 间接脱硝能够大大降低功率输入, 节省能耗, 具有重要的实际应用价值和意义。氨气的加入, 有利于脱除效率的提升。

**关键词:** 低温等离子体; 发生器; 脱硝; 脱硫; 能耗

**中图分类号:** O539

**文献标识码:** A

## 1 引言

近年来, 煤炭的消耗量每年增长 2.2%, 增长速度比其他任何燃料都快。从现在到 2030 年间, 煤炭的耗量将持续上升, 增长量预计超过现有量 70%, 其中发展中国家占有 97% 的份额。到 2030 年, 煤炭在全球发电中所占比例将从 40% 提高到 45%<sup>[1]</sup>。煤炭燃烧会释放大量的  $\text{SO}_2$  和氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ), 污染空气质量, 产生雾霾, 导致酸雨, 严重污染环境, 危害人类健康<sup>[2]</sup>。有效地并且经济地控制排放烟气中的  $\text{SO}_2$  和氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 含量已经成为可持续发展的重要战略问题<sup>[3, 4]</sup>。

低温等离子体 (NTP) 在大气环境污染控制, 尤其是脱硫脱硝方面的研究逐渐成为了热点课题, 汪涛、孙保民、肖海平等研究分析了介质阻挡放电 (DBD) 中气体成分对  $\text{NO}_x$  脱除的影响<sup>[5]</sup>, 蔡忆昔、雷利利、王攀等利用低温等离子体协同纳米催化技术脱除柴油机中的  $\text{NO}_x$ <sup>[6]</sup>, 于琴琴等对低温等离子体协同  $\text{B}_2\text{O}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  选择催化还原  $\text{NO}$  进行研究分析<sup>[7]</sup>, 王川、唐晓龙等通过改变介质阻挡放电参

数(放电电压、介质材料、放电间隙等)考察介质阻挡放电低温等离子体对分解  $\text{NO}$  的影响<sup>[8]</sup>。

NTP 主要是通过气体放电而产生, 放电形式主要包括电晕放电、辉光放电、介质阻挡放电、光电离或激光辐射电离、射线辐照等, 其中在大气污染治理方面主要是介质阻挡放电和脉冲电晕放电。介质阻挡放电可在常温常压下能够稳定产生大量低温等离子体, 施蕴曦、蔡忆昔等研究了放电区表面温度、放电电压、放电频率、空气流量 4 个因素对 NTP 发生器产生活性物质浓度的影响<sup>[9]</sup>, 介质阻挡放电产生等离子体容易控制, 使其在脱除烟气中的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  具有良好的应用前景<sup>[10~13]</sup>。

本文重点介绍介质阻挡放电产生等离子体直接脱硫脱硝和间接脱硫脱硝情况, 并比较分析其脱硫效率和脱硝效率以及与等离子体发生器耗功率的关系, 寻找提高脱硫脱硝效率和降低能耗的方法, 兼顾脱硫脱硝高效率 and 输入低能耗, 开发其实用价值。直接等离子体脱硝实验是模拟模拟烟气等混合气直接通入等离子体发生器, 在反应器中电离

收稿日期: 2016-03-22; 修订日期: 2017-04-10

作者简介: 郭彬(1977-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 从事低温等离子体与环境应用研究。

\*通讯作者: 栾涛(1962-), 男, 山东淄博人, 教授, 博士生导师, 从事燃烧与污染物排放控制。

出的高能电子、离子和自由基相互反应而进行分解脱除 NO 和 SO<sub>2</sub>；间接等离子体脱硫脱硝是等离子体发生器通入 O<sub>2</sub> 利用介质阻挡放电产生的高能电子、离子、自由基以及 O<sub>3</sub> 与连接在等离子体发生器出口模拟烟气发生氧化等化学反应而进行脱除 NO 和 SO<sub>2</sub>。实验分别进行单独脱硝，单独脱硫，以及同时脱硫脱硝等，对各自脱除效率和能耗进行了比较分析研究，研究脱除效率和能耗最佳结合点，得出合理的经济性能指标，为推广和实现工业应用提供有力依据。

2 试验部分

2.1 等离子反应器

反应器所有结构本体均采用不锈钢材料制作，放电区域长度 150mm，放电间隙 3mm(单边)。介质阻挡放电放电间隙越小，需要输入产生放电电压就越低，阻挡介质的厚度也一定程度的影响电极放电。钢玉管外径 25mm，内径 20mm，齿形电极芯 10mm，凸台直径 14mm。反应器结构如图 1 所示。

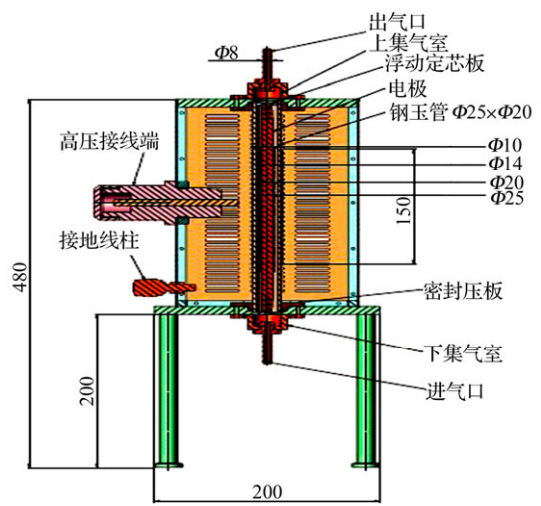


图 1 DBD-NTP 反应器结构图

2.2 试验台

2.2.1 配气系统

试验采用的模拟烟气组份为 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、NO、NH<sub>3</sub> 和 SO<sub>2</sub>，燃煤电厂中 NO 占 NO<sub>x</sub> 组分 95%以上，NO<sub>2</sub>

含量仅为 5%，含量相对较少且影响较小，可以忽略不计。因此，试验中采用标准 NO 气体模拟电厂烟气中的 NO<sub>x</sub><sup>[14, 15]</sup>。各个钢瓶中的气体以浮子流量计控制流量，先进入混合器中混合，混合均匀后通入烟气预热段。模拟烟气的基本情况列于表 1 中。

表 1 试验台烟气基本情况表

参数	数值
温度/	20
NO 初始浓度/ppm	380
SO <sub>2</sub> 初始浓度/ppm	500
模拟气体流量/ml·min <sup>-1</sup>	500

NO/SO<sub>2</sub> 脱除率定义为：

$$\eta = \frac{\text{NO/SO}_2 \text{入口浓度} - \text{NO/SO}_2 \text{出口浓度}}{\text{NO/SO}_2 \text{入口浓度}} \times 100\%。$$

各气体进入混合器后，充分混合，然后通入等离子体发生器。这种混合气体流经等离子体发生器，对混合气体进行电离和分解，电离和分解后的高能电子、离子、自由基等发生化学反应进行脱硫脱硝，这个过程为低温等离子体直接脱硫脱硝，系统如图 2a 所示；模拟气体进入混合器后，充分混合，接在等离子体发生器出口处，O<sub>2</sub> 进入等离子体发生器利用介质阻挡放电产生高能电子、离子、自由基(O•、OH•、HO<sub>2</sub>•)和 O<sub>3</sub> 等，然后流出发生器与混合气体发生氧化反应，进行脱硫脱硝，这个过程为低温等离子体间接脱硫脱硝，系统如图 2b 所示。

2.2.2 烟气分析系统

采用德国 MRU 的 MGA-5 在线烟气分析仪在线测量 NO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、CO、O<sub>2</sub> 浓度，测试精度±1ppm。仪器由内置的气体采样泵通过采样探管和采样管线从烟道内抽取烟气样气，烟气样气被汽水分离器脱水和烟尘过滤，仪器内部的电化学传感器测量这些样气内各气体组分的浓度。样气的氧含量测量采用两电极电化学传感器；毒性气体比如一氧化碳(CO)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO<sub>2</sub>)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)和硫化氢(H<sub>2</sub>S)采用三电极传感器。电化学传感器采用气体扩散技术，这个技术的优点是输出信号与被分析气体的体积浓度(ppm)成线性

比例关系。3 个电极包括：S(测量电极)，C(负电极)和 R(参比电极)。当被测气体到达测量电极时，在电极表面发生氧化或还原反应，通过测量反应产生的电流( $\mu\text{A}$  级)和微处理器处理，可以得到被测气体的浓度。

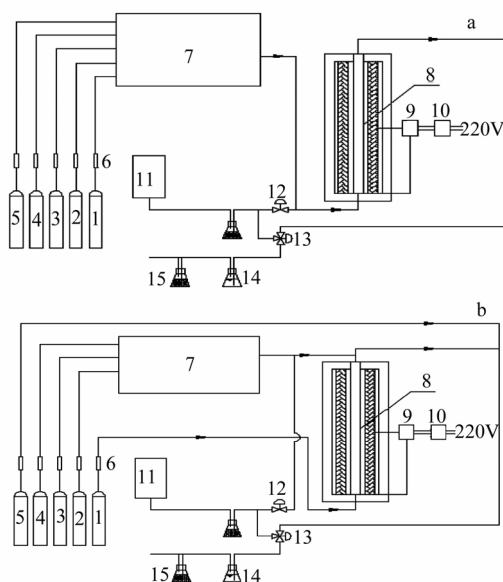


图2 直接(a)、间接(b)脱硫脱硝测试试验台流程

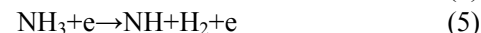
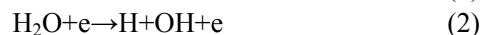
1—— $\text{O}_2$  瓶；2—— $\text{SO}_2$  瓶；3—— $\text{N}_2$  瓶；4—— $\text{NO}$  瓶；5—— $\text{NH}_3$  瓶；6——流量计；7——气体混合器；8——反应器；9——等离子体电源；10——变压器；11——烟气分析仪；12——闸阀；13——三通阀；14——倒吸瓶；15——干燥瓶。

## 2.3 反应机理

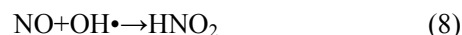
等离子体是在高电压下被电离的气体<sup>[16]</sup>，具体说就是通过放电、放热等使气体电离，当粒子的数量达到一定量时所形成的含有电子、离子、原子等微观粒子，且正负电荷数量相当、具导电性的流体。等离子体具有导电和受电磁影响的特性，且其活性极强，在许多方面又区别于固体、液体和气体，因此，它又被称为物质的第四种状态<sup>[17]</sup>。DBD-NTP 是一种高压低温非平衡等离子体，由于它可以在大气压或高于大气压的条件下产生，不需要真空设备就能在较低的温度下获得化学反应所需的活性粒子，具有特殊的光、热、声、电等物理过程及化学过程，在 DBD 电极之间的距离是几个毫米，产生浓度很高的高能电子、离子、自由基( $\text{O}\cdot$ 、 $\text{OH}\cdot$ 、

$\text{HO}_2\cdot$ )和  $\text{O}_3$  等。等离子体以及  $\text{O}_3$  与  $\text{NO}$  和  $\text{SO}_2$  反应，进行脱硫脱硝，其化学反应式为<sup>[18-20]</sup>：

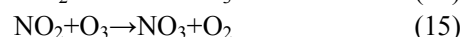
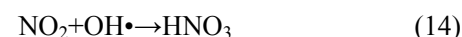
(1)  $\text{O}_2$ 、水蒸气、 $\text{NH}_3$  通过等离子体反应器进行的反应：



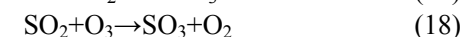
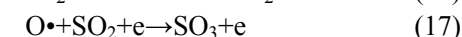
(2) 自由基( $\text{O}\cdot$ 、 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{HO}_2\cdot$ )和臭氧  $\text{O}_3$  与  $\text{NO}$  的反应机理：



(3) 自由基和臭氧与  $\text{NO}$  反应生成的  $\text{NO}_2$  进一步与自由基和  $\text{O}_3$  的反应：



(4) 高能电子、自由基( $\text{O}\cdot$ 、 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{HO}_2\cdot$ )和臭氧  $\text{O}_3$  与  $\text{SO}_2$  的反应机理：



## 3 试验结果与讨论

### 3.1 低温等离子体直接单独脱硝、脱硫性能分析

在含有  $\text{N}_2$  和  $\text{NO}$  的模拟烟气流量  $500\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$  情况下，入口的  $\text{NO}$  浓度一般控制在  $380\text{ppm}$  左右，低温等离子体反应器在不同输入功率下的脱硝效率如图 3 所示。等离子体反应器输入电压达到  $15\text{V}$  时，DBD-NTP 反应器开始放电，电离各种气体，产生高能电子、离子以及自由等，相互之间发生化学反应， $\text{NO}$  开始被脱除，脱除效率在  $25\%$  左右。随着输入电压调高，输入功率增加，脱硝效率较快调高，在输入功率从  $17\sim 28\text{W}$  之间较为明显，脱硝效率升至  $71.2\%$ ，随后随着 NTP 发生器输入功率提高，脱硝效率提高趋于平缓。为追求一点点脱硝效率提高而付出巨大能耗代价，经济性能比较低，无实用价值。但是从实验曲线可以看出，随着等离子

体反应器输入的功率升高,脱硝活性随之提高,因为发生器分解 NO 和生成的负责氧化 NO 的自由基  $O\cdot$ 、 $OH\cdot$ 、 $HO_2\cdot$ 和  $O_3$  与能量密度成正比。把电压调至 40V,电流 1.3A,当输入电压和电流继续提高,脱硝效率也继续提高,但是提高幅度已不是很明显,直到电压高到一定值,介质阻挡放电被击穿,产生弧光放电,脱硝效率急剧下降。

在含有  $N_2$  和  $SO_2$  模拟烟气流量  $500\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$  情况下,入口的  $SO_2$  浓度一般控制在 600ppm,低温等离子体反应器在不同输入功率下的脱硫效率也表现在图 3 上。从实验发现, $SO_2$  电离比 NO 的电离要困难的多,其脱除效率仅在 20%左右,从图上看看出  $SO_2$  的脱除率远低于 NO 的脱除率,而且脱除分解过程中十分不稳定, $SO_2$  浓度波动幅度十分大。

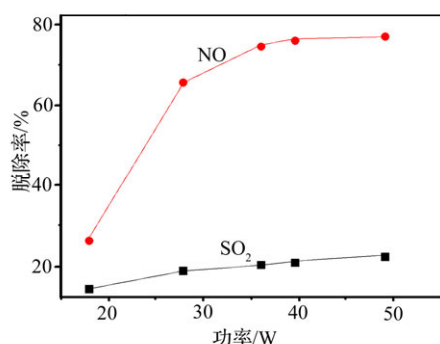


图3 直接单独脱硫和脱硝性能分析

输入电压和电流继续提高,脱硝效率也继续提高,但是提高幅度已不是很明显。当输入电压高到一定值,介质阻挡放电被击穿,产生弧光放电,脱硝效率急剧下降。

### 3.2 低温等离子体间接单独脱硝、脱硫性能分析

在含有  $N_2$  和 NO 模拟烟气流量  $500\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$  情况下,入口的 NO 浓度在 380ppm 左右;在含有  $N_2$  和  $SO_2$  模拟烟气流量  $500\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$  情况下,入口的  $SO_2$  浓度在 500ppm 左右。低温等离子体反应器中通入  $O_2$ ,在不同输入功率下的脱硫脱硝效率如图 4 所示。

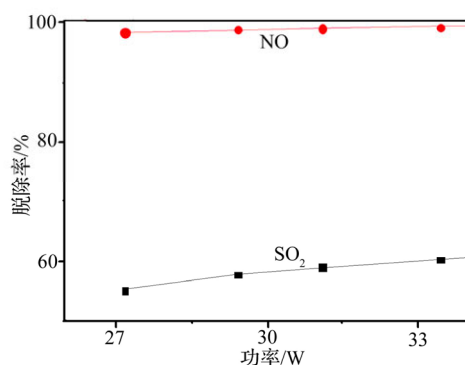


图4 间接单独脱硫和脱硝性能分析

NO 的脱除效率十分高效,达到 95%以上,而且是在等离子体发生器最小触发电压输入产生出等离子体情况下,脱除效率就高达 95%,这时等离子体发生器输入功率最小,因此可以说脱硝效率和耗功率都达到了一个最佳值,效果十分理想。但是脱除 NO 的过程伴随着有一定的  $NO_2$  生成,对于本次实验,反应前进口 NO 的浓度值为 397ppm, $NO_2$  的浓度值为 55ppm,出口  $NO_2$  的浓度值达到 125ppm,对于  $NO_2$  极易溶于水或者很容易发生其他氧化反应,这里对于  $NO_2$  的脱除没作考虑。从图上看可以看出, $SO_2$  的脱除效率能达到 58%,相比较直接单独脱硫,脱除效率有很大的提高,但过程很不稳定,浓度波动大,氧化困难,随着输入功率提高, $SO_2$  脱除率有降低趋势。脱硫过程初始阶段,有一定的  $H_2S$  生成,随着反应进程, $H_2S$  被氧化反应,浓度下降为零。基于目前其他脱硫方式已经十分成熟,利用低温等离子体分解和氧化脱硫效果和经济性都不是十分理想,因此不建议 DBD-NTP 脱硫。

从实验效果来看,脱除效率十分满意,推测为 DBD-NTP 发生器产生的高能电子、离子和自由基对 NO、 $SO_2$  发生化学反应,主要因素为等离子体发生器产生大量  $O_3$  对 NO、 $SO_2$  发生强氧化作用,在脱除过程中占用重要的作用。有文献介绍等离子体不能通过距离输送,高能电子、离子和自由基通过一定距离输送,自身相互发生化学反应,这里实验没有进行去检验,下一步将用实验去验证。

### 3.3 增大模拟烟气流量情况下直接脱硝效率分析

在加大模拟烟气流量的情况下,脱硝效率如图 5 所示。烟气流量最大曲线位于最下方,依次类推,烟气流量最小的曲线位于最上方。

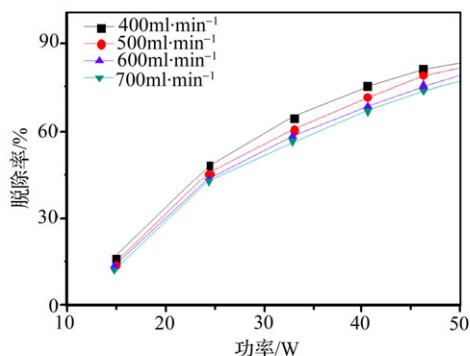


图5 变流量脱硝性能分析

增加烟气流量与小流量时烟气脱硝效率比较,在等离子体发生器输入功率相等的情况下比较,效率有所降低。在相同等离子体反应器耗功率,进口 NO 浓度相同的条件下,700ml·min<sup>-1</sup> 流量烟气脱硝效率比 400ml·min<sup>-1</sup> 流量烟气脱硝效率下降 10%左右。这和等离子体发生器反应机理相吻合,产生的高能电子、离子和自由基越多,需要消耗的能量越多,同时,可以看出无论烟气流量大小,总体脱除效率随发生器耗功率成正比关系。在输入相同电压和电流情况下,4 种不同流量的模拟烟气脱硝效率如图 5 所示。流量越大,脱硝效率相比较越小,流量最小的,脱硝效率值最大,为最上面的那条曲线。

### 3.4 直接同时脱硫脱硝分析

进行直接同时脱硫脱硝时,脱硝效率实验结果如图 6 所示。模拟气体为 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO 在混合器里充分的混合后,通入等离子体反应器。

相对于单独脱硝,SO<sub>2</sub> 的加入,进行同时脱硫脱硝,影响是十分显著的,效果有很大不同。反应器输入功率加大到 66W,脱硝效率仅为 24.1%,而 SO<sub>2</sub> 的脱除率不到 5%,如图 6 曲线所示。对放电反应也有很大影响,输入电压提高到 35V,等离子体反应器才始触发放电,脱硝效率十分低,随着等离子

体发生器的输入功率提高,NO 的脱除率有提高的走势。等离子体发生器的输入功率增加,对 SO<sub>2</sub> 的脱除率没有影响变化,一直效率低下,也就是说对于脱除 SO<sub>2</sub> 几乎不起作用,反而对脱除 NO 的性能影响巨大。原因推测可能有以下几种情况:SO<sub>2</sub> 抑制了 O<sub>3</sub> 的生成;有文献研究分析是 SO<sub>2</sub> 吞噬自由基 OH<sup>[21]</sup>,而使与 NO 反应的 OH 份额减少所致;混合气体影响介质阻挡放电,导致阻碍了 NO 和 SO<sub>2</sub> 的分解和电离,同时抑制了等离子体数量的生成。利用 DBD-NTP 实现同时脱硫脱硝的愿望是美好的,但是利用直接的方式,把 NO 和 SO<sub>2</sub> 混合气体直接通入等离子体发生器进行电离,实验结果表明,效果十分不理想,不现实的。

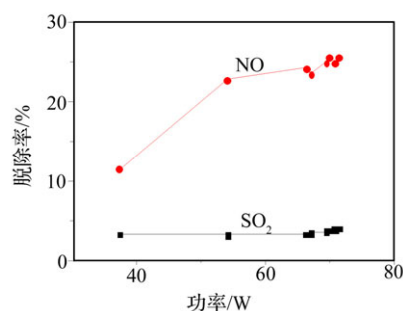


图6 直接同时脱硫脱硝情况下脱硝性能分析

### 3.5 间接同时脱硫脱硝分析

进行间接同时脱硫脱硝时脱硝效率实验结果如图 7 所示。在输入电压 15V 的情况下,等离子体反应器就开始产生放电反应,反应器输入的功率 18.9W,随后改变输入电压为 23V,反应器输入的功率 33.81W。在流量 500ml·min<sup>-1</sup> 的情况下,NO 进口浓度 380ppm,SO<sub>2</sub> 进口浓度 500ppm,脱硝效率一直保持较高,脱硫脱硝都维持较高的效率。

从图 7 可以看出,反应器从开始工作,脱硝效率就十分高,达到 94%以上,同时脱硫的效率也能达到 46%,与直接同时脱硫脱硝的效果截然不同。直接同时脱硫脱硝不管是脱硝效率还是脱硫效率都十分低,无论输入功率提高到多大,直到低温等离子体反应器被高压放电击穿对脱硫脱硝效率提高都不起很大作用。而间接同时脱硫脱硝只需要输



入介质阻挡放电最低的触发电压,输入功率很小的情况下,就可以达到很高的脱硝效率和一定的脱硫效率。等离子体发生器输入功率从 18W 到 33W,其脱除效率始终保持一个高度,因此对于最小功率输入,可以获得与高耗能相同脱除效率。实验结果十分理想,能够大大降低功率输入,节省能耗,具有重要的实际应用价值和意义。从反应机理来看,间接同时脱硫脱硝是等离子体发生器产生  $O_3$  和  $SO_2$  与  $NO$  进行反应进而脱除了  $SO_2$  与  $NO$ 。但是在间接同时脱硫脱硝的过程中, $NO$  被  $O_3$  氧化成  $NO_2$  和  $O_2$ ,导致有大量的  $NO_2$  的生成,而  $NO_2$  的活性很强,在后续的实验中采取措施(添加还原剂或者吸附剂)脱除  $NO_2$ ,做到真正意义上的脱硝。这里的脱硫效率和间接单独脱硫效率比较,有一定的降低,但是可以满足同时脱硫脱硝,对于工艺简化,具有很大的实用价值。

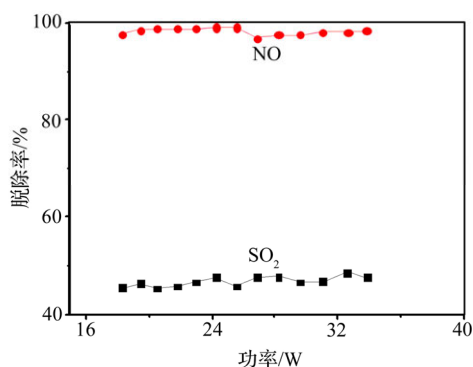


图7 间接同时脱硫脱硝情况下脱硝性能分析

### 3.6 实验分析 $NH_3$ 加入对脱硝效率影响分析

直接单独脱硝,加入氨气和未加入氨气对于脱硝效率有很明显的影响,脱除效率曲线如图 8 所示。直接单独脱硝过程中,加入氨气和未加入氨气,总体上脱硝效率都是随着等离子体发生器输入功率的增加而提高。但是加入氨气,在同等能耗下,其脱硝效率明显大于没有加入氨气的情况。在发生器最小触发电压产生等离子体和分解  $NO$  时,脱硝效率就高达 61%,输入功率 35W,脱硝效率就达到了 83%。从能耗表现和脱除效率,加入氨气对脱硝具

有十分积极的作用。从机理上分析, DBD-NTP 发生器不仅分解了  $NO$ ,同时电离  $NH_3$ ,促使生成了大量高能电子、离子和自由。其中, $NH_3$  首先分解为  $NH$  和  $H_2$ ,  $H_2$  又电离为  $2H$  和高能电子,  $H$  和  $NH_3$  反应生成  $NH_2$  和  $H_2$ ,这些离子对  $NO$  氧化,发生化学反应,进而脱除了  $NO$ 。因此, DBD-NTP 脱硝过程,利用氨气通入有利于脱除  $NO$ 。

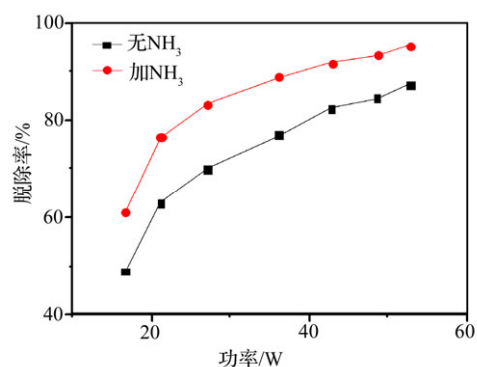


图8 加氨与未加氨脱硝性能比较

## 4 结论

根据试验研究分析,低温等离子体脱硫脱硝可以得出如下结论:

(1) 无论是直接脱硫脱硝还是间接脱硫脱硝,脱出效率和等离子体发生器输入功率成线性正比关系,脱硝效率都要比脱硫效率要好。说明 DBD-NTP 产生的等离子体对于  $NO$  的氧化强于对  $SO_2$  的氧化, DBD-NTP 对  $NO$  的分解电离也要强于对  $SO_2$  的分解和电离。DBD-NTP 产生的等离子体的数量取决于 DBD-NTP 发生器的输入功率,等离子体的数量决定了电力分解、氧化  $NO$  和  $SO_2$  的程度,反映出脱除率的大小。

(2) 直接单独脱硝,脱硝效率还比较理想,加大等离子体发生器的耗功率的情况下脱除效率也能够达到 80%。直接单独脱硫,脱硫效率没有脱硝效率理想。直接同时脱硫脱硝,相比于单独脱硝和单独脱硫影响是十分明显,  $SO_2$  脱除效率更加低,而且对脱除  $NO$  的性能影响巨大,导致脱硝效率只能达到 20%左右。另外,对低温等离子体反应器放

电影响也十分大,输入电压提高很大的情况下才产生放电,实验得出结果认为直接同时脱硫脱硝想要实现脱除烟气中 NO 和 SO<sub>2</sub> 不现实。

(3) 间接同时脱硫脱硝过程中,脱硝效率会达到很高,同时脱硫效率也很理想。这是因为除了自由基与 NO、SO<sub>2</sub> 反应外, O<sub>3</sub> 也起到了主要作用。另外,间接的情况下,反应器只需电离 O<sub>2</sub> 或者 H<sub>2</sub>O,在很小触发电压的情况下就可以产生等离子体,耗功率小,节能效果十分明显。对于需要同时脱硫脱硝的场合,间接方法值得推广应用,其性能经济性好,即在输入功率较低的情况下,获得较好的脱硫脱硝效率。间接同时脱硫脱硝,不管是脱硝效率还是脱硫效率,间接氧化更高效,但是氧化过程中伴随有一定量的 NO<sub>2</sub> 生成,其中包括自由基、O<sub>3</sub> 与 N<sub>2</sub> 反应生成 NO<sub>2</sub>,这是一个严重的问题。后期需要采取相应措施,对 NO<sub>2</sub> 也实现脱除,达到真正意义上的脱硝。

(4) NH<sub>3</sub> 的加入对于单独脱硝具有积极的作用,对脱除 NO 效率有明显的体现。NH<sub>3</sub> 的电离等离子体间接脱除烟气中的 NO 和 SO<sub>2</sub>,以及 NH<sub>3</sub> 的对于单独脱硫具有怎样的效应等在后期实验研究中要进行进一步的分析。

低温等离子体脱除 NO 技术还处于实验研究阶段,需要加大研究力度,降低能耗,提高脱硝效率,实现实际应用价值,使其尽早实现工业化。

#### 参考文献:

- [1] International Energy Agency. World energy outlook 2007 [R]. OECD/IEA, Paris, 2007.
- [2] 高岩, 栾涛, 徐宏明, 等. 焙烧温度对选择性催化还原催化剂表征及活性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 32: 143-148.
- [3] 丁凝, 黄海涛, 李歆, 等. 电晕等离子体烟气脱硫脱硝机理及影响因素探讨 [J]. 安全与环境工程, 2008, 15(1): 25-29.
- [4] 刘新, 王树东. 非热等离子体烟气脱硝中的二氧化硫、氨和温度的效应 [J]. 化工学报, 2006, 57 (10): 2411-2415.
- [5] 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.
- [6] 蔡忆昔, 雷利利, 王攀, 等. 低温等离子体协同纳米催化技术降低柴油机 NO<sub>x</sub> 排放 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 67-71.
- [7] YU Qinqin, Liu Tong, Wang Hui. Cold plasma-assisted selective catalytic reduction of NO over B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2012, 33(5): 783-789.
- [8] 王川, 唐晓龙, 易红宏, 等. 低温等离子体分解脱除 NO 影响因素研究 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2694-2698.
- [9] 施蕴曦, 蔡忆昔, 李小华, 等. 低温等离子体发生器工作参数优化 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 60-66.
- [10] 魏培平, 董丽敏, 杨嘉祥, 等. 脉冲电晕等离子体脱硫、脱氮研究 [J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2001, 17 (6): 68-72.
- [11] Clements J S. Combined removal of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and fly ash from simulated flue gas using pulsed streamer corona [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1989, 25(1): 62-69.
- [12] Kim H H. Non-thermal plasma processing for air-pollution control: a historical review, current issues, and future prospects [J]. Plasma Processes and Polymers, 2004, 1: 91-110.
- [13] 王晓臣, 刘向宏, 商克峰. 低温等离子体烟气脱硫脱硝技术的研究进展 [J]. 环境保护与循环经济, 2009, 07: 26.
- [14] Svachula J, Ferlazzo N, Forzatti P, et al. Selective reduction of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub> over honeycomb DeNO<sub>x</sub>ing catalysts [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1993, 32(6): 1053-1060.
- [15] Liu Q, Liu Z, Huang Z, et al. A honeycomb catalyst for simultaneous NO and SO<sub>2</sub> removal from flue gas: preparation and evaluation [J]. Catalysis Today, 2004, 93-95(0): 833-837.
- [16] 朱爱国, 许雪艳, 朱仁义, 等. 介质阻挡放电产生等离子体简介 [J]. 巢湖学院学报, 2008, 10(6): 56-60.
- [17] 张贵剑, 李凯, 林强, 等. 低温等离子体技术脱除大气污染物的研究进展 [J]. 材料导报 A, 2015, 29(1): 137-142.
- [18] 胡征. 等离子体化学基础 [J]. 化学时刊, 1999, 10: 23-25.
- [19] Francis F Chen, Jane P Chang. Lecture notes on principles of plasma processing, [M]. Springer: Plenum / Khwer, 2002.
- [20] 严国奇, 潘理黎, 黄小华. 脉冲电晕放电烟气脱硫脱硝技术 [J]. 环境技术, 2005, 24(3): 1-4.
- [21] Zhu Y M. Optimization off pulsed corona discharged for flue gas treatment [J]. Advances Environmental Science, 1997, 5(5): 75.

## NO removal from coal-combustion flue gas with dielectric barrier discharge non-thermal plasma

GUO Bin<sup>1, 2</sup>, LUAN Tao<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061;

2. College of hydraulic and civil engineering, Shandong agricultural university, Tai'an 271018)

**Abstract:** Reducing NO from exhaust gas was studied with dielectric barrier discharge (DBD) non-thermal plasma (NTP) generator. The measures to increase DBD denitration efficiency were analyzed. The DBD generator was used in either a mode where flue gas was directed through the discharge zone (direct oxidation), or a mode where produced ozonized air was injected in the flue gas stream (indirect oxidation). Following the approach of increasing energy efficiency, it can successfully seek a measure to increase denitration efficiency and reduce reactor energy consumption, so as to realize the purpose of saving energy and actual value of DBDP-based denitration. The result showed that denitrification efficiency is higher than the efficiency of desulfurization under whether direct oxidation or indirect oxidation. And indirect oxidation can greatly reduce power consumption. The removal efficiency of NO can be improved by the addition of ammonia.

**Key words:** Non-thermal plasma; Generator; Denitration; Desulfidation; Energy consumption