

NO-N₂ 系统不同电离度下非平衡等离子体 脱除 NO 的数值模拟

赵毅, 曹春梅

(华北电力大学环境科学与工程学院, 河北省 保定市 071003)

Numerical Simulation on the Removal of NO in NO-N₂ Mixtures by Non-equilibrium Plasma With Different Ionization Degree

ZHAO Yi, CAO Chunmei

(School of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University,

Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The behavior of main particle species and the removal of NO with different ionization degrees were analyzed and calculated by using the simple model of removing NO in NO-N₂ mixtures under non-equilibrium plasma discharge. The results show that the electron number density presents the exponential decay rule along with the time change; the initial electron relative number density is the critical factor to the removal of NO in non-equilibrium plasma, the removal efficiency of NO increases with the initial electron relative number density increases; As intermediate products, N and O have high number densities under higher ionization degrees, N and O number densities rise fast first and then decay fast to zero. The final reaction products are N₂, as well as some O₂ and a little NO₂. O₂ production increases with the ionization degree increases, the maximum of O₂ is the same order of magnitude with the initial NO number density; the temporal changes of NO₂ production with different ionization degrees are complex, NO₂ production is quite low if the ionization degree is very high or very low, the maximum of NO₂ is lower at least one order of magnitude than the initial NO number density.

KEY WORDS: non-equilibrium plasma; ionization degree; removal of NO; numerical simulation

摘要: 采用非平衡等离子体脱除 NO-N₂ 系统中 NO 的简化模型, 对不同电离度下反应中主要粒子的变化规律及 NO 脱除效率进行分析和计算。结果表明, 电子数密度随时间按指

数规律快速衰减; 初始电子相对数密度是决定体系非平衡等离子体 NO 脱除的本质因素, 初始电子相对数密度大, 体系 NO 脱除效率高; 较高的电离度适合产生高密度的中间产物 N 和 O, N 和 O 数密度随时间呈现快速增长达到峰值又快速衰减为 0 的变化趋势; 反应的最终产物为 N₂, 但也有一定量的 O₂ 和少量的 NO₂。O₂ 产率随电离度的增大而增大, O₂ 最大产率与 NO 初始数密度同一量级; NO₂ 产率随电离度变化规律较复杂, 电离度过高或偏低, NO₂ 产率都较低, 最大 NO₂ 产率比 NO 初始数密度至少低一个数量级。

关键词: 非平衡等离子体; 电离度; NO 脱除; 数值模拟

0 引言

十一五期间, 我国燃煤电站安装了大批烟气脱硫设施。随着烟气中二氧化硫排放量的显著下降, 氮氧化物排放所造成的大气环境问题日渐凸现。根据国家近期有关政策和法律法规, 可以预见, 十二五期间, 氮氧化物控制将是大气污染控制的重要工作。有关烟气中氮氧化物脱除的研究和报道已有很多^[1-6], 而等离子体法是其中的研究热点之一^[7-14]。利用等离子体技术净化气态污染物的研究始于 20 世纪 70 年代, 其脱除废气中的气态污染物是集物理学、化学和环境科学于一体的交叉学科的应用课题, 具有独特的优点和良好的发展前景。非平衡等离子体的特点^[15]是电子温度远远高于重粒子温度, 通常采用辉光放电、微波放电、电晕放电或无声放电产生, 不同放电形式下反应器内电子呈现不同的电离度, 电子数密度可达 $10^{14} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的数量级^[16-17]。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2006CB200300-G)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2006CB200300-G).

在非平衡等离子体中,当电子获得足够的能量,与其他粒子碰撞使反应物分子发生激发过程、电离过程、复合过程、电子依附过程、转荷过程及各种类型的化学反应,这主要取决于体系的电离度、电子的平均能量、气体温度、污染物气体分子浓度及共存的气体成分^[18]。已有研究^[19]对非平衡等离子体中电子平均能量对脱除 NO 的影响进行了探讨,本文则选用文献[20]的 NO-N₂ 模拟气体系统非平衡等离子体脱除 NO 的主要反应模型,考虑不同强度、不同模式的放电在反应器内模拟气体系统中将产生不同的电离度,对气体系统中各种不同粒子在不同电离度下随时间的变化进行数值模拟,为非平衡等离子体脱除 NO 过程提供理论依据和参考。

1 计算模型

1.1 假设条件

1) 不考虑具体的放电形式,只关注气体放电后具有一定的电离度,产生相应初始数密度的高能电子,与其他粒子碰撞使反应物分子激发、离解和电离,从而产生一系列的非平衡等离子体反应过程;

2) 不考虑粒子的空间分布和运动状态,假设电离所产生的各组分粒子在反应器空间均匀分布,反应器内的反应为气相的均相反应;

3) 认为反应在常温($T=300\text{ K}$)、常压($p=10^5\text{ Pa}$)下进行并忽略离子效应^[21];

4) 将整个反应过程的模型分为两部分:高能电子撞击气体分子的过程和后续的化学反应过程^[22]。

1.2 动力学方程组

在 NO-N₂ 模拟气体系统非平衡等离子体放电的简化模型^[20]中,主要考虑自由基和其他活性物种引起的与脱除 NO 有关的氧化还原反应,共 8 个主要反应方程式,涉及 7 种主要反应物,设第 i 种粒子的浓度为 $[C_i]$,为便于数值计算取为粒子数密度,分别表示为 $[N_2]$ 、 $[e]$ 、 $[N]$ 、 $[NO]$ 、 $[O]$ 、 $[NO_2]$ 、 $[O_2]$,每种反应物的速率方程如下:

$$\frac{d[N_2]}{dt} = -k_1[N_2][e] + k_2[N][NO] + k_7[N_2][N]^2 \quad (1)$$

$$\frac{d[e]}{dt} = -k_1[N_2][e] - k_5[e][O_2] \quad (2)$$

$$\frac{d[N]}{dt} = -2k_1[N_2][e] - k_2[N][NO] - k_7[N_2][N]^2 - k_8[N_2][N][O] \quad (3)$$

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_2[N][NO] - k_3[N_2][NO][O] + k_4[O][NO_2] + k_8[N_2][N][O] \quad (4)$$

$$\frac{d[O]}{dt} = k_2[N][NO] - k_3[N_2][O][NO] - k_4[NO_2][O] + 2k_5[e][O_2] - k_6[N_2][O]^2 - k_8[N_2][N][O] \quad (5)$$

$$\frac{d[NO_2]}{dt} = k_3[N_2][O][NO] - k_4[O][NO_2] \quad (6)$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} = k_4[NO_2][O] - k_5[e][O_2] + k_6[N_2][O]^2 \quad (7)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 、 k_6 、 k_7 、 k_8 为反应速率常数,其值分别为 9.0×10^{-11} 、 5.9×10^{-11} 、 9.0×10^{-32} 、 1.0×10^{-11} 、 7.9×10^{-10} 、 8.0×10^{-33} 、 4.0×10^{-33} 、 1.0×10^{-32} , 两体反应的反应速率常数的单位为 $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 三体反应的反应速率常数的单位为 $\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

方程(1)–(7)构成反应中各粒子浓度相互关联、相互耦合的一阶常微分方程组初值问题,求解前提是各相关粒子的初始数密度已知。

1.3 初值的确定

初始电子数密度 $[e]_0$ 量级为 $10^{14} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。在 NO-N₂ 系统放电主要涉及的其他组分粒子及其初始数密度设定为 $[N_2]_0 = 2.45 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $[NO]_0 = 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $[N]_0 = [O]_0 = [NO_2]_0 = [O_2]_0 = 0$ 。

2 模拟结果及讨论

2.1 不同电离度对电子数密度随时间变化的影响

电离度是衡量等离子体电离程度的一个重要参数,对于给定体系,可用电子初始数密度 $[e]_0$ 表示^[23]。非平衡等离子体脱除 NO 是利用高能电子与烟气中其他粒子碰撞使反应物分子发生激发过程、电离过程、复合过程、电子依附过程、转荷过程及各种类型的化学反应,电离度即高能电子初始数密度在其中起主要作用。图 1 给出了在 NO-N₂ 模拟气体系统中不同电离度下电子数密度随时间的演化, $[e]_0$ 取值分别为 10^{14} 、 10^{15} 、 10^{16} 、 10^{17} 、 10^{18} cm^{-3} 。从图 1(纵坐标为对数坐标)可以看出,电子数密度随时间快速衰减,且遵从 e 指数衰减规律,不同电离度下高能电子数密度分别在 1.05×10^{-9} 、 2.1×10^{-9} 、 3.2×10^{-9} 、 4.2×10^{-9} 、 $5.4 \times 10^{-9} \text{ s}$ 内降为 0,远远小于后续的基元反应时间,意味着高能电子被消耗完毕,成为低能电子,在这个时间段内,属于高能电子撞击气体分子,失去能量,为后续的化学反应提

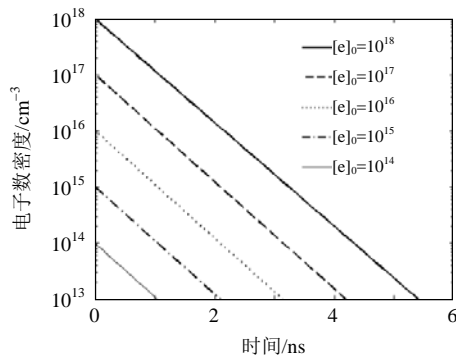


图 1 不同电离度下电子数密度随时间的变化

Fig. 1 Number density of electron as functions of time under different ionization degrees

供大量的活性分子和自由基等活性粒子的过程,也充分证明了假设 4) 的合理性。

2.2 不同电离度对 NO 数密度随时间变化的影响

为了更直观地表达电离度对 NO 数密度随时间变化的影响,用 $[e]_0$ 代替电离度。图 2 为 NO 初始数密度 $[NO]_0=4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $[e]_0$ 分别取为 $10^{14}, 10^{15}, 10^{16}, 10^{17}, 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, NO 数密度随反应时间的变化曲线。由图 2 可知,当 $[e]_0$ 为 10^{18} cm^{-3} 时, NO 数密度随时间迅速减小, $0.1 \mu\text{s}$ 时即达到 $0.001 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 此后随反应时间增长基本保持不变; $[e]_0$ 为 10^{17} cm^{-3} 时, NO 数密度于 $1 \mu\text{s}$ 时达到 $1.6529 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 此后随反应时间增长基本保持不变; $[e]_0$ 为 10^{16} cm^{-3} 时, NO 数密度于 $10 \mu\text{s}$ 时达到 $3.6379 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 此后随反应时间增长基本保持不变; 而当 $[e]_0$ 分别为 $10^{14}, 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时, NO 数密度随反应时间的增长几乎保持不变, 意味此时 NO 几乎未被脱除。由此可见, 固定 $[NO]_0$, 不同 $[e]_0$ 对 NO 数密度随时间的变化和 NO 脱除有明显影响, 即 $[e]_0$ 越大, NO 达到高脱除效率所需的反应时间越短; 在相同反应时间内, $[e]_0$ 越大, NO 脱除效率越高。

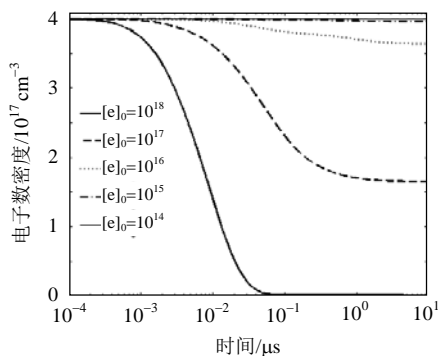


图 2 不同电离度下 NO 数密度随时间的变化

Fig. 2 Number density of NO as functions of time under different ionization degrees

2.3 电离度和 NO 初始数密度对体系 NO 脱除效率的影响

为揭示初始电子数密度对所研究体系非平衡等离子体 NO 脱除的本质影响, 定义初始电子数密度与初始 NO 数密度的比值为初始电子相对数密度,

用 u_r 表示, 即 $u_r = \frac{[e]_0}{[NO]_0}$ 。分别设置以下条件, 即:

1) 改变 $[e]_0$, 固定 $[NO]_0(4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})$;

2) 改变 $[NO]_0$, 固定 $[e]_0(2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3})$;

3) 改变 u_r 。分别计算了 NO 的脱除效率, 其计算公式为

$$\eta_{NO} = \frac{[NO]_0 - [NO]}{[NO]_0} \times 100\% \quad (8)$$

计算结果见表 1—3。由表 1 可知, 固定 $[NO]_0$, NO 脱除效率 (η_{NO}) 随 $[e]_0$ 的增大而增大, 表 2 则说明, 固定 $[e]_0$, η_{NO} 随 $[NO]_0$ 的增大而减小, 出现这两种情况的原因是一致的, 即 NO 的脱除与高能电子的量成正相关关系, 此结论与已有实验结果一致^[20,24-26]。表 3 显示, η_{NO} 主要依赖 u_r , 当 u_r 为 1/5 以上时, η_{NO} 不低于 50%, u_r 为 1/3 时, η_{NO} 为 72.38%, 而当 u_r 为 1/2 时, η_{NO} 高达 97.91%。由此说明初始电子相对数密度是决定体系非平衡等离子体 NO 脱除的本质因素, u_r 大, 高能电子与 N₂ 分子碰撞概率高, N₂ 分子被激发解离为 N 原子的数量多, 导致 N 原子撞击 NO 分子的几率增加, 从而提高了 NO 的脱除效率。这一结论可为不同工况

表 1 NO 脱除效率随初始电子数密度的变化

Tab. 1 Removal efficiency of NO with the initial electron number density

$[e]_0/\text{cm}^{-3}$	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}
$\eta_{NO}/\%$	0.15	0.99	9.05	58.68	99.97

表 2 NO 脱除效率随 NO 初始数密度的变化

Tab. 2 Removal efficiency of NO with the initial NO number density

$[NO]_0/10^{17} \text{ cm}^{-3}$	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$\eta_{NO}/\%$	97.91	72.36	58.66	49.92	43.69	38.95	35.20	32.15	29.61

表 3 NO 脱除效率随初始电子相对数密度的变化

Tab. 3 Removal efficiency of NO with the initial electron relative number density

u_r	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2
$\eta_{NO}/\%$	38.96	43.70	49.94	58.68	72.38	97.91

下,利用烟气非平衡等离子体技术脱除不同NO浓度时电离度的选择提供理论依据和参考。

2.4 不同电离度对反应中其他组分数密度随时间变化的影响

图3、图4分别给出了 $[\text{NO}]_0$ 为 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,不同电离度下N和O数密度随时间的变化。从图3、图4可以看出,N和O数密度随时间呈脉冲变化。当 $[e]_0$ 分别为 10^{17} 和 10^{18} cm^{-3} 时,反应初期有大量的N和O产生,且其数密度随时间快速增长,达到峰值,之后减小至0,说明N和O作为中间产物产生后迅速被消耗,N与NO反应还原NO为 N_2 : $\text{N} + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{N}_2$,O与NO反应氧化NO为 NO_2 : $\text{O} + \text{NO} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_2$,实现了NO的脱除,且脱除效率较高。由于N数密度总比O数密度高一个量级,因此NO- N_2 体系非平衡等离子体脱除NO以还原为 N_2 的反应为主。

图5、图6分别给出了体系中不同电离度时, NO_2 数密度和 O_2 数密度随时间的变化。由图5可知,不同电离度下 NO_2 数密度变化较复杂,呈现了

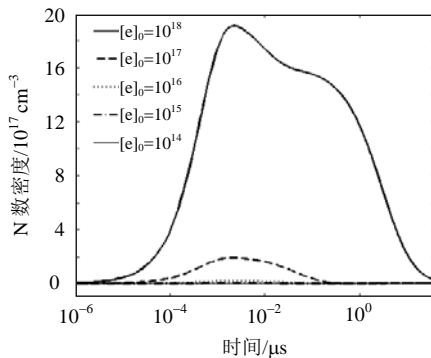


图3 不同电离度下N数密度随时间变化
Fig. 3 Number density of N as functions of time under different ionization degrees

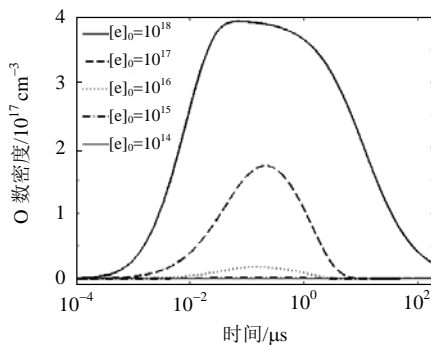


图4 不同电离度下O数密度随时间变化
Fig. 4 Number density of O as functions of time under different ionization degrees

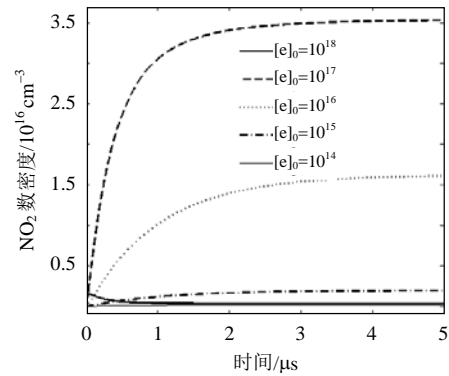


图5 不同电离度下 NO_2 数密度随时间变化
Fig. 5 Number density of NO_2 as functions of time under different ionization degrees

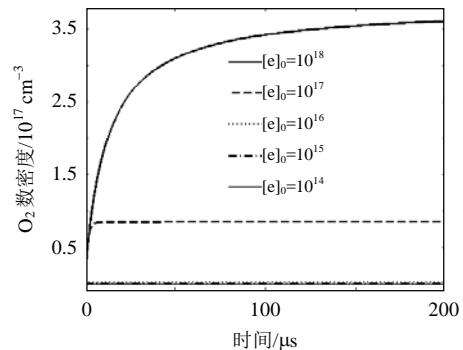


图6 不同电离度下 O_2 数密度随时间变化
Fig. 6 Number density of O_2 as functions of time under different ionization degrees

脉冲变化特征:当 $[e]_0$ 分别为 10^{18} 和 10^{14} cm^{-3} 时,体系中 NO_2 产率均较低,这可能因为 $[e]_0$ 较大时,体系产生的N较多,优先快速与NO进行了还原反应,阻碍了O氧化NO为 NO_2 的反应;而当 $[e]_0$ 较小时,体系中氧化NO为 NO_2 的O数密度也较小,减小了O与NO的碰撞几率,因此电子初始数密度偏高或偏低2种情况下体系中 NO_2 产率均较低。当 $[e]_0$ 取 10^{18} 和 10^{14} cm^{-3} 中间其他量级时, NO_2 数密度随反应时间快速增大,达到最大值,然后基本保持不变,形成稳定的氧化反应产物 NO_2 ,其最大值随 $[e]_0$ 的增大而增大,但最大值比NO初始数密度总是至少低一个数量级,考虑到反应中的N平衡,进一步说明了体系中NO脱除以还原为主;由图6不难看出,在不同电离度下, O_2 数密度随反应时间快速增长,很快达到最大值,然后基本保持不变,形成稳定的反应产物 O_2 ,其最大值随 $[e]_0$ 的增大而增大,当 $[e]_0$ 较大,为 10^{18} cm^{-3} , O_2 产率达到与NO同一数量级,说明活性氧原子在等离子体状态下能发生自结合生成氧气的内循环反应: $\text{O} + \text{O} + \text{N}_2 \rightarrow$

O₂+N₂。以上模拟计算结果表明, NO-N₂ 系统中非平衡等离子体脱除 NO 的最终主要产物为 N₂, 但也有一定量的 O₂ 和少量的 NO₂ 产生, 与报道的实验结论及相应机制^[21,24-27]一致。

3 结论

1) 不同电离度下高能电子数密度随时间按指数规律快速衰减, [e]₀ 分别取 10¹⁴, 10¹⁵, 10¹⁶, 10¹⁷, 10¹⁸ cm⁻³ 时, 电子数密度分别在 1.05×10⁻⁹, 2.1×10⁻⁹, 3.2×10⁻⁹, 4.2×10⁻⁹, 5.4×10⁻⁹ s 内衰减为 0, 体现了高能电子撞击气体分子失活的微观过程。

2) 保持 NO 初始数密度不变, 不同电离度对 NO 数密度随时间的变化影响较大, [e]₀ 越大, NO 数密度随时间衰减越快, NO 脱除效率越高; 初始电子相对数密度是决定体系非平衡等离子体 NO 脱除的本质因素, 初始电子相对数密度大, 体系 NO 脱除效率高。

3) 较高的电离度适合产生高密度的中间产物 N 和 O。N 和 O 数密度随时间呈现快速增长达到峰值又快速衰减为 0 的脉冲变化趋势。反应的最终产物为 N₂, 但也有一定量的 O₂ 和少量的 NO₂。O₂ 产率随电离度的增大而增大, O₂ 最大产率与 NO 初始数密度同一量级; NO₂ 产率随电离度的变化较复杂, 电离度过高或偏低, NO₂ 产率都较低, 最大 NO₂ 产率比 NO 初始数密度至少低 1 个数量级, 反应中的 N 平衡说明总的反应趋势表现为 NO 被 N 还原为 N₂ 而脱除。

4) 由于实际烟气中还含有 SO₂、H₂O 等其他气体, 它们的存在可能对电离和 NO 的脱除产生影响。进一步的工作应基于烟气中可能存在的多种化学反应, 采用精确的计算模型, 深入揭示放电过程中 NO_x 的脱除机制。

参考文献

- [1] 朱崇兵, 金保升, 李峰, 等. 蜂窝状 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂脱硝性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 45-50.
Zhu Chongbin, Jin Baosheng, Li Feng, et al. Study of deNO_x performance of honeycomb V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalysts[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 45-50(in Chinese).
- [2] 张彦文, 蔡宁生. 加入甲烷促进选择性非催化还原反应的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(35): 7-11.
Zhang Yanwen, Cai Ningsheng. Experimental investigations of enhanced selective non-catalytic reduction reaction with methane[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(35): 7-11(in Chinese).
- [3] 栾积毅, 孙锐, 路军锋, 等. 生物质再燃脱硝的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 73-78.
Luan Jiyi, Sun Rui, Lu Junfeng, et al. Experimental studies on reburning with biomass for NO_x reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 73-78(in Chinese).
- [4] 吴碧君, 肖萍, 马进, 等. MnO_x-WO₃/TiO₂ 用于 NH₃ 选择性催化还原 NO_x 的性能与抗 SO₂ 毒性研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(11): 62-67.
Wu Bijun, Xiao Ping, Ma Jin, et al. Performance and tolerance to SO₂ of MnO_x-WO₃/TiO₂ catalyst for selective catalytic reduction of NO_x with NH₃[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 62-67(in Chinese).
- [5] 董若凌, 周俊虎, 岑可法, 等. 水煤浆再燃降低锅炉 NO_x 排放的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(23): 20-28.
Dong Ruoling, Zhou Junhu, Cen Kefa, et al. Experimental study on reducing furnace NO_x emission through coal water slurry reburning[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(23): 20-28(in Chinese).
- [6] 韩奎华, 路春美, 王永征, 等. 选择性非催化还原脱硝特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 80-85.
Han Kuihua, Lu Chunmei, Wang Yongzheng, et al. Experimental study on De-NO_x characteristics of selective non-catalytic reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 80-85(in Chinese).
- [7] 裴梅香, 林赫, 上官文峰, 等. 等离子体在同时去除 NO_x 和碳烟催化反应中的作用[J]. 物理化学学报, 2005, 21(3): 255-260.
Pei Meixiang, Lin He, Shang Guan Wenfeng, et al. The effects of plasma on simultaneously catalytic removal of NO_x and soot[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2005, 21(3): 255-260(in Chinese).
- [8] Chalise P R, Yu Wang, Mustafa K A, et al. NO_x treatment using low-energy secondary emission electron gun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(3): 1392-1399.
- [9] Yamamoto T, Okubo M, Nagaoka T, et al. Simultaneous removal of NO_x, SO_x and CO₂ at elevated temperature using a plasma chemical hybrid process[J]. Transactions on Industry Applications, 2002, 38(5): 1168-1173.
- [10] He Yuanji, Dong Liming, Yang Jiaxiang. Removal of NO and SO₂ in corona discharge plasma reactor with water film[J]. Plasma Science & Technology, 2004, 6(2): 2250-2255.
- [11] Chang J S, Urashima K, Tong Y X, et al. Simultaneous removal of NO_x and SO₂ from coal boiler flue gases by DC corona discharge ammonia radical shower systems - pilot plant tests[J]. Journal of Electrostatics, 2003, 57(3/4): 313-323.
- [12] Yamamoto T, Yang C L, Behran M R, et al. Plasma-

- assisted chemical process for NO_x control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 923-927.
- [13] 曹玮, 骆仲洪, 徐飞, 等. 脉冲电晕放电协同烟气脱硫脱硝试验研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(12): 2487-2491.
Cao Wei, Luo Zhongyang, Xu Fei, et al. Simultaneous removal of NO and SO₂ from flue gas by pulsed corona discharge[J]. Acta Scientiae Circumstantia, 2008, 28(12): 2487-2491(in Chinese).
- [14] Orlandini I, Riedel U. Chemical kinetics of NO removal by pulsed corona discharges[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(19): 2467-2474.
- [15] 陈殿英. 低温等离子体及其在废气处理中的应用[J]. 化工环保, 2001, 21(3): 136-139.
Chen Dianying. Cold plasma and its application in treatment of waste gas[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2001, 21(3): 136-139(in Chinese).
- [16] 解宏端, 孙冰, 朱小梅, 等. 大气压氩气微波等离子体参数的光谱诊断[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2009, 25(3): 256-261.
Xie Hongduan, Sun Bing, Zhu Xiaomei, et al. Diagnosis for the parameters of microwave argon plasma using emission spectroscopy at atmospheric pressure[J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2009, 25(3): 256-261(in Chinese).
- [17] 章程, 邵涛, 龙凯华, 等. 大气压空气中纳秒脉冲介电阻挡放电特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 111-117.
Zhang Cheng, Shao Tao, Long Kaihua, et al. Characteristics of nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in atmospheric air[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 111-117(in Chinese).
- [18] 康颖, 吴祖成, 冯元群. 非平衡等离子体技术脱除气态污染物及工业应用[J]. 科技通报, 2010, 26(1): 195-170.
Kang Ying, Wu Zucheng, Feng Yuanqun. Gaseous pollutants removal by non-equilibrium plasma technology and its industrial application[J]. Bulletin of Science and Technology, 2010, 26(1): 195-170(in Chinese).
- [19] 曹春梅, 甄钊. NO-N₂系统不同电子平均能量下非平衡等离子体脱除 NO 的数值模拟[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1167-1170.
Cao Chunmei, Zhen Zhao. Numerical simulation study on the removal of NO in NO-N₂ mixtures by non-equilibrium plasma with different average energy[J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1167-1170(in Chinese).
- [20] 张旭东. 介质阻挡放电冷等离子体去除 NO 的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
Zhang Xudong. Study on the NO removal with the dielectric barrier discharges non-thermal plasma [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003 (in Chinese).
- [21] 宫野, 张建红, 王晓东, 等. 应用特雷纳法和吉尔法求解脱硫脱硝中化学反应动力学方程[J]. 计算物理, 2006, 23(1): 103-108.
Gong Ye, Zhang Jianhong, Wang Xiaodong, et al. Treanor's and gear's methods in the chemical reaction dynamics of NO_x/SO₂ removal[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2006, 23(1): 103-108(in Chinese).
- [22] 高旭东, 孙保民, 肖海平, 等. 介质阻挡放电脱除NO_x反应器的评价方法及运行流量特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 27-32.
Gao Xudong, Sun Baomin, Xiao Haiping, et al. An evaluation method of dielectric barrier discharge reactors for NO_x removal and characteristics analysis of gas flow rate [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(11): 27-32(in Chinese).
- [23] 赵青, 刘述章, 童洪辉. 等离子体技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 3-10.
Zhao Qing, Liu Shuzhang, Tong Honghui. Plasma technology and its applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 3-10(in Chinese).
- [24] 李华, 唐晓龙, 易红宏, 等. NO 在等离子体中氧化分解特性研究[J]. 热力发电, 2010, 38(5): 9-12.
Li Hua, Tang Xiaolong, Yi Honghong, et al. Study on oxidation and decomposition properties of NO in plasma [J]. Thermal Power Generation, 2010, 38(5): 9-12(in Chinese).
- [25] 张强, 顾璠, 余刚, 等. 氮氧化物在等离子体中的分解与转化[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(6): 512-514.
Zhang Qiang, Gu Fan, Yu Gang, et al. Decomposition and conversion of nitrogen oxides using non-equilibrium plasma in flue gas[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2002, 8(6): 512-514(in Chinese).
- [26] 唐军旺, 杨黄河, 任丽丽, 等. 微波放电脱除 NO[J]. 高等学校化学学报, 2002, 23(4): 632-635.
Tang Junwang, Yang Huanghe, Ren Lili, et al. The decomposition of NO in microwave discharge [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2002, 23(4): 632-635(in Chinese).
- [27] Akishev Y S, Deryugin A A, Kochetov I V. DC glow discharge in air flow at atmospheric pressure in connection with waste gases treatment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(10): 1630-1637.



赵毅

收稿日期: 2011-05-04。

作者简介:

赵毅(1956), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大气污染控制方面的研究, zhaoyi9515@163.com;

曹春梅(1965), 女, 博士研究生, 主要从事大气污染控制方面的基础理论研究, caochunmeihd@126.com。

(责任编辑 张媛媛)