

低温等离子体协同处理 Hg^0 、 NO_x 、 SO_2 的机理研究*

阿热依古丽 陈 扬 贾保军 刘俐媛 冯钦忠

(中国科学院高能物理研究所,北京 100049)

摘要:低温等离子体污染物处理技术具有工艺简单、可协同控制多种污染物、占地面积小等特点,是目前在污染物控制技术领域的研究热点。主要介绍气体放电产生低温等离子体去除污染物过程中存在的 O_2 、 CO_2 气体对污染物去除效率的影响、 NO_x 和 SO_2 对 Hg 去除效率的影响和加入 H_2O 、 NH_3 、 HCl 对污染物去除效率的影响研究。

关键词:低温等离子体;气态污染物;协同控制;去除效率

DOI:10.7617/j.issn.1000-8942.2013.05.015

THE MECHANISM OF COOPERATIVE DISPOSAL OF Hg^0 , NO_x AND SO_2 BY LOW TEMPERATURE PLASMA

Areyiguli Chen Yang Jia baojun Liu Liyuan Feng Qinzhong

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Because of simple process, cooperative control of several kinds of pollutants and small floor area, low temperature plasma is a research hotspot in pollution control technology field. It was mainly recommended the effect of gas components on the efficiency of pollution disposal using low temperature plasma which generated by gas discharge, such as the effect of O_2 , CO_2 on pollution treatment efficiency, the effect of NO_x , SO_2 on Hg treatment efficiency, the effect of H_2O , NH_3 , HCl on pollution treatment efficiency.

Keywords: low temperature plasma; gas pollutants; cooperative control; treatment efficiency

0 引言

为推动大气污染控制、改善大气环境质量,“十一五”期间,我国已将主要污染物排放总量显著减少作为经济社会发展的约束性指标^[1]。《国家环境保护“十二五”科技发展规划》重点领域与主要任务中也将“大气污染防治领域”列入其中^[2]。科技部和环境保护部也组织制定了《蓝天科技工程“十二五”专项规划》推进大气污染防治^[3],而氮氧化物、硫氧化物、细颗粒和重金属等污染物控制成为重点。传统的脱硫脱硝技术在实际应用中存在能耗效率低和运行成本高,尽管细颗粒和汞等重金属等污染物可通过除尘器等大气污染控制设备收集处理,如大多数氧化生成的 Hg^{2+} 和颗粒态的 Hg_p ,但汞的第三种形态的 Hg^0 因其较低的反应活性和难溶解性相对于其他两种形态较难捕获^[4,5]。

因低温等离子体技术(非热平衡等离子体技术)

所具有的能耗低、污染物去除效率高、反应器结构简单、适用范围广、无二次污染物、运行成本低,且在常温、常压下实现 NO 、 SO_2 、 Hg^0 等多污染物协同控制等特点,能够较好的克服传统气体污染物处理技术的不足,但在实现多污染物协同控制的技术机理及参数控制等方面还存在诸多的研究空间。

1 O_2 、 CO_2 的影响

等离子体技术实现污染控制的机理是在外加电场的作用下放电产生大量高能电子(3~10 eV),使气体污染物中的 H_2O 、 O_2 等分子被激活、电离或裂解,产生氧化性粒子和自由基(如 O 、 O_3 、 OH 自由基、 HO_2 自由基)与气体组分作用实现去除污染物的目的^[6]。研究该技术污染物去除机理过程中模拟废气组分时,通常加入 N_2 、 O_2 、 CO_2 气体,其中 N_2 作为载气。

1.1 O_2 对去除效率的影响

O_2 是 O 和臭氧等自由基和活性粒子的主要来源^[7], Wang Z H^[5]、Hongmin Yang^[8] 等人针对 O_2 体

* 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA062902)。

积分数的变化对污染物去除效率的影响进行了研究, 结果如表1所示。

表1 O₂ 体积分数变化对污染物去除效率的影响

Table 1 The effect of O₂ percentage change on pollutant treatment efficiency

O ₂	气体组分	气体	去除效率	电压/kV	反应器类型
0.0% ~ 50% ^[5]	1 L/min(50 μg/m ³ Hg ⁰ , O ₂ , N ₂)	Hg ⁰	33.8% ~ 90.6%	3.8	DBD
1.5% ~ 4.5% ^[8]	2 L/min(50 μg/m ³ Hg ⁰ , O ₂ , N ₂)	Hg ⁰	66.0% ~ 73.0%	4	DBD 筒式
1.5% ~ 10% ^[9]	2 L/min(50 μg/m ³ Hg ⁰ , O ₂ , N ₂)	Hg ⁰	97.5% ~ 98.7%	5	DBD
1.0% ~ 8% ^[10]	6 L/min(110 μg/m ³ Hg ⁰ , 1% ~ 8% O ₂ , N ₂ , 3% H ₂ O, 17% ~ 10% CO ₂)	Hg ⁰	70.5% ~ 98.7%	14 ~ 15	线-筒式
21.0% ~ 40% ^[11]	16.7 L/min(2240 μg/m ³ NO, 15% CO ₂ , O ₂ , 70% N ₂)	NO	增加 9%	—	自由基簇射

由表1可以看出:增加气体中O₂的体积分数可增强污染物的去除效率。其原因在于,增加放电产生的O、臭氧等自由基和活性粒子含量将促进NO和Hg⁰去除效率。侯文慧^[9]等人的研究表明,当O₂体积分数达到15%左右时,增加O₂含量对污染物去除效率的影响不大。这是因为当O₂体积分数达到15%左右时,氧气电离产生活性粒子足以氧化97%的污染物,再增加O₂体积分数对污染物去除效率的影响不大^[9]。从表1分析还可以得出,O₂体积分数在4.5%~8%对提高污染物的去除效率比较有利。

1.2 CO₂ 对去除效率的影响

Wang Meiyang 等^[12-14]研究发现调节CO₂的含量分别为0.6%、12%得到对应的可用电压为11,12,14 kV,较高的O₂/CO₂比率下可以获得较高的可用电压和输入能量。O₂/CO₂的比率为1/17、7/29、1/2、4/5时,能量密度分别为114,127,188,

204 J/L。Wang ZH 等^[5]研究表明提高电压可以提高污染物的去除效率。增加CO₂的含量对污染物去除效率的提高没有直接的影响,但通过增加CO₂量或者提高O₂/CO₂比率来提高相应的可用电压可获得较高的可用电压和输入能量,有利于间接的提高去除效率。

2 污染物相互之间的影响

低温等离子体技术针对于多污染物协同控制具有独到的优势,但尚未在工程实践中获得采纳和应用。因此研究低温等离子体处理污染物时,其对多污染物的协同控制效果值得关注。

2.1 Hg⁰和NO之间的影响

低温等离子体技术协同控制NO和Hg⁰时,需要考虑NO和Hg⁰相互之间去除效率的影响。Wang ZH^[5]、Wang Meiyang^[12]、Kyung Bo Ko^[14]等人通过增加NO的含量来研究NO对Hg⁰去除效率的影响,如表2所示。

表2 NO_x浓度变化对Hg⁰去除效率的影响

Table 2 NO_x concentration variation effect on Hg⁰ treatment efficiency

NO(0.001%)	气体组分	去除效率	电压/kV	反应器类型
0, 70, 130 ^[5]	1 L/min(52 μg/m ³ Hg ⁰ , 5% O ₂ , N ₂ , NO)	55%, 27%, 5%	3.6	DBD 筒式
0, 226, 672 ^[12]	3 L/min((110 ± 5) μg/m ³ Hg ⁰ , 6% O ₂ , N ₂ , NO, 12% CO ₂ , 2.3% H ₂ O)	87.5%, 25.4%, 12.5%	14	电晕线-筒式
0, 200 ^[14]	3.5 L/min(45 μg/m ³ Hg ⁰ , 10% O ₂ , N ₂ , NO, 3% H ₂ O)	86%, 60%	—	脉冲电晕线-板式

由表2可以看出:在其他条件不变时,增加NO的量可降低Hg⁰的去除效率,其原因在于O、O₃与NO反应过程中会减少生成的O、O₃量,从而降低Hg⁰去除效率。因此Hg⁰和NO对放电过程中生成的O和O₃存在竞争反应^[14]。低温等离子体过程放电产生的O和O₃与NO反应^[5,12],Hg⁰与O和O₃发生反应^[8,10,15]。

2.2 Hg⁰和SO₂之间的相互影响

Wang ZH^[5]、Wang Meiyang^[12]等人通过增加SO₂的含量研究SO₂对Hg去除效率的影响,如表3所示。

由表3可以看出:在不存在水蒸气且其他条件不

变时,增加SO₂的含量会降低Hg⁰的去除效率,其原因在于不存在水蒸气的条件下,O、O₃与SO₂反应过程中会减少O、O₃的生成量,从而影响Hg⁰去除效率。Hg⁰和SO₂对放电过程中生成的O和O₃存在竞争反应^[5]。在存在水蒸气的同等条件下,增加SO₂的量对降低Hg⁰的去除效率影响不大。这是因为SO₂优先与OH自由基反应,且生成的SO₃进一步与HgO反应,生成硫酸盐会抑制HgO的分解,造成对Hg⁰的去除效率影响较小^[12,14]。可能发生的反应如式(1)一式(3)^[12,14-16]所示:

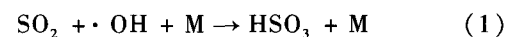
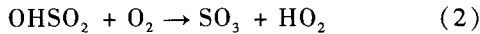


表3 SO₂浓度变化对Hg⁰去除效率的影响

Table 3 SO₂ concentration variation effect on Hg⁰ treatment efficiency

NO(0.001‰)	气体组分	去除效率	电压/kV	反应器类型
0, 70, 175 ^[5]	1 L/min(52 μg/m ³ Hg ⁰ , 5% O ₂ , N ₂ , SO ₂)	55%, 45%, 9%	3.6	DBD线-筒式
0, 580, 1 050 ^[12]	3 L/min((110 ± 5) μg/m ³ Hg ⁰ , 6% O ₂ , N ₂ , SO ₂ , 12% CO ₂ , 2.3% H ₂ O)	80%, 90%, 93%	14	电晕线-筒式
0, 675, 1 100 ^[12]	3 L/min((110 ± 5) μg/m ³ Hg ⁰ , 6% O ₂ , N ₂ , SO ₂ , 12% CO ₂ , 2.3% H ₂ O, 5 376 μg/m ³ NO)	22%, 26%, 27%	14	电晕线-筒式
0, 200 ^[14]	3.5 L/min(45 μg/m ³ Hg, 10% O ₂ , N ₂ , SO ₂ , 3% H ₂ O, 2 352 μg/m ³ NO, 6 272 μg/m ³ HCl)	91.1%, 68.9%	—	脉冲电晕线-板式



3 H₂O、NH₃、HCl对污染物去除效率的影响

Yang Hongmin^[8]、Kyung Bo Ko^[14]、Xu Fei^[17]等人在研究采用等离子体技术处理气体污染物时采用加入H₂O、NH₃、HCl的方法对污染物的去除效率进

行了研究。

3.1 水蒸气对污染物去除影响

侯文慧^[9]、Xu Fei^[17]等人研究发现,在放电过程中存在水分时能生成OH、HO₂等强氧化性自由基,可提高污染物的去除效率,并降低能耗。水蒸气对污染物去除效率的影响如表4所示。

表4 水蒸气对污染物去除效率的影响

Table 4 Water vapor concentration variation effect on pollution treatment efficiency

H ₂ O	气体组分	气体	去除效率	反应器类型
1.0% ~ 6.0% ^[8]	2 L/min(22 μg/m ³ Hg, N ₂ , H ₂ O)	Hg ⁰	75.20% ~ 98.4%	DBD和催化剂
0.0% ~ 1.2% ^[5]	1 L/min(Hg, 99.999% N ₂ , H ₂ O)	Hg ⁰	35.42% ~ 49.2%	DBD
0.0% ~ 0.43% ^[5]	1 L/min(50 μg/m ³ Hg, 5% O ₂ , N ₂ , H ₂ O)	Hg ⁰	72.49% ~ 81.7%	DBD
3.3% ~ 9.3% ^[9]	2 L/min(50 μg/m ³ Hg, N ₂ , H ₂ O)	Hg ⁰	75.40% ~ 92.5%	DBD
1.0% ~ 2.0% ^[12]	(1.04 × 10 ⁶ μg/m ³ SO ₂ , 4.79 × 10 ⁵ μg/m ³ NO, H ₂ O)	SO ₂	38.00% ~ (95 ± 3)%	脉冲电晕线-板式
2.2% ~ 5.6% ^[18]	15 m ³ /h ((21280 ± 627) μg/m ³ SO ₂ , (2688 ± 112) μg/m ³ NO, H ₂ O, C ₃ H ₆ , NO _x)	NO	增加10.5% ~ 14%	脉冲线-板式

由表4可知:加入H₂O或增加H₂O含量会提高污染物的去除效率,其原因在于当含有水蒸气时,H₂O首先与高能电子作用生成OH和HO₂自由基,促进NO_x、SO₂、Hg⁰等污染物的去除^[8,17-18];其次,当同时存在NH₃、H₂O时,SO₂更容易转化成亚硫酸铵气溶胶,可增强SO₂的去除效率^[17-18]。Wang Z H等^[5]研究表明,在有N₂和H₂O条件下,当H₂O < 0.74%时对污染物的去除效率影响显著,这是因为水蒸气很容易捕获生成的高能电子,进而影响O原子、

臭氧等自由基和活性粒子的生成量^[9,11,17],因此反应器中不宜加入过多的水蒸气。

3.2 NH₃对污染物去除影响

Shang Kefeng^[18]、Young Sun Mok^[19]等人采用低温等离子体技术研究在加入NH₃的情况下对NO和SO₂的去除效率的影响,如表5所示。

由表5可以看出:加入相应含量的NH₃可提高NO和SO₂的去除效率,其原因在于反应器中加入的NH₃在低温等离子体放电作用下生成NH₂、NH、OH

表5 NH₃对污染物去除效率的影响

Table 5 NH₃ concentration variation effect on pollution treatment efficiency

NH ₃ (0.001‰)	气体组分	气体	去除效率	反应器类型
0, 470 ^[14]	3.5 L/min(45 μg/m ³ Hg, 10% O ₂ , N ₂ , 3% H ₂ O, 2 352 μg/m ³ NO, 4 480 μg/m ³ SO ₂ , 6 272 μg/m ³ HCl)	Hg ⁰	91.1%、44.4%	脉冲线-板式
— ^[18]	16 Nm ³ /h(1.2% H ₂ O, 22 848 μg/m ³ SO ₂ , 2 912 μg/m ³ NO)	NO	增加8%	脉冲线-板式
		NO _x	增加6.5%	
		SO ₂	增加6.5%	
0, 360 ^[19]	2 260 m ³ /h(15% O ₂ , 70% N ₂ , 8% H ₂ O, 5% CO ₂ , 1% CO, (3360 ± 448) μg/m ³ SO ₂ 和NO,直径10 μm的颗粒物)	SO ₂	10.44%、92.7%	电晕放电

等活性自由基,从而促进 NO/NO₂ 转化生成 N₂、亚硝酸盐、硝酸盐等物质。其中的 SO₂ 与生成的 OH 自由基反应生成 HSO₃、H₂SO₄, 然后再与 NH₃ 反应生成硫酸盐气溶胶达到促进 SO₂ 去除的目的^[18]。当废气中同时存在 SO₂、NO 和 Hg 且同时加入 HCl 和 NH₃ 时, NH₃ 对 Hg 的氧化具有副作用。这是因为加入 NH₃ 后和气体氛围中的 HCl 反应形成 NH₄Cl^[14], 进而减

少 Cl 自由基的量,降低 Hg⁰ 与 Cl 反应生成的 HgCl₂ 的量。

3.3 HCl 对污染物去除影响

烟气中普遍存在着 HCl^[20-21], 其在低温等离子体放电过程中可生成 Cl 自由基或 Cl₂ 气体。Kyung Bo Ko^[14] 等人研究了在添加 HCl 时对 Hg 去除效率的影响,如表 6 所示。

表 6 HCl 对 Hg⁰ 去除效率影响

Table 6 HCl concentration variation effect on Hg⁰ treatment efficiency

HCl(0.001%)	气体组分	去除效率	反应器类型
35~85 ^[8]	2 L/min(22 μg/m ³ Hg ⁰ , 1.5%~10% O ₂ , N ₂ , HCl)	83%~94%	DBD
30~60 ^[5]	1 L/min(50 μg/m ³ Hg ⁰ , 5% O ₂ , N ₂ , HCl)	47.9%~89.1%	DBD
700~1 224 ^[9]	1.7 L/min(23.5 μg/m ³ Hg ⁰ , N ₂ , HCl)	30%~80%	DBD
0~280 ^[14]	3.5 L/min(45 μg/m ³ Hg ⁰ , 10% O ₂ , N ₂ , HCl, 3% H ₂ O, 2 352 μg/m ³ NO)	29%~91%	脉冲线-板式
30~85 ^[22]	2 L/min(280 μg/m ³ Hg ⁰ , N ₂ , HCl)	70%~90%	DBD

由表 6 可以看出: HCl 有助于提高气体中 Hg⁰ 的去除效率。Wang Z. H. 等^[5] 研究显示, HCl 与高能电子碰撞生成 Cl 或 Cl₂, 促进 Hg⁰ 氧化生成 HgCl₂^[8,14,17]。Kyung Bo Ko 等^[14] 的研究也显示, 在存在 NO、SO₂、HCl、Hg⁰ 等气体条件下加入 10 528 μg/m³ NH₃ 时, Hg 的浓度从 4 μg/m³ 增加到 25 μg/m³。这是因为只存在 HCl 或 Cl₂ 时对 Hg 具有氧化去除作用, 而同时加入 HCl 和 NH₃ 时, 生成 NH₄Cl 消耗生成 Cl 自由基或 Cl₂ 会阻碍 Hg⁰ 氧化生成 HgCl₂。因此污染物处理过程中不能同时加入 HCl 和 NH₃。

4 展望

低温等离子体技术相对于传统的污染物处理技术具有工艺简单、可协同控制多种污染物、占地面积小等特点, 但目前大多数有关等离子体技术处理环境污染物的研究尚在实验室阶段。为推进该项技术的工业化, 有必要进一步加强系统设备研制, 从脉冲电源、反应器设计、系统集成控制等开展研究, 并推进工程化应用和示范, 以便为推进建立规范的多污染物协同控制新技术提供条件。

参考文献

- [1] 国发[2011]42号. 国务院关于印发国家环境保护“十二五”规划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zw/gk/2011-12/20/content_2024895.htm, 2011-12-20.
- [2] 环发[2011]63号. 国家环境保护“十二五”科技发展规划[EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201106/t20110628_214154.htm, 2011-06-09.
- [3] 国科发计[2012]719号. 蓝天科技工程“十二五”专项规划[EB/OL]. http://www.gov.cn/zw/gk/2012-10/24/content_

2250329.htm, 2012-10-24.

- [4] Lulamilé T Jongwana, Andrew M Crouch. Mercury speciation in South African coal[J]. Fuel, 2012, 94(1): 234-239.
- [5] Wang Z H, Jiang S D, Zhu Y Q, et al. Investigation on elemental mercury oxidation mechanism by non-thermal plasma treatment[J]. Fuel Processing Technology, 2010, 91: 1395-1400.
- [6] 许根慧, 姜恩永, 盛京, 等. 等离子体技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 233-234.
- [7] Steluta Teodoru, Yukihiro Kusano, Annemie Bogaerts. The effect of O₂ in a humid O₂/N₂/NO_x gas mixture on NO_x and N₂O remediation by an atmospheric pressure dielectric barrier discharge[J]. Plasma Process and Polymers, 2012(9): 652-689.
- [8] Hongmin Yang, Hao Liu, Hao Wu, et al. Photochemical removal of gaseous elemental mercury in a dielectric barrier discharge plasma reactor[J]. Plasma Chem Plasma Process, 2012, 32: 969-977.
- [9] 侯文慧. 采用化学反应动力学耦合 CFD 方法的等离子体烟气多污染物净化机理研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011: 50-51.
- [10] Wang Meiyang, Zhu Tianle, Luo Hongjing, et al. Effects of reaction conditions on elemental mercury oxidation in simulated flue gas by DC nonthermal plasma[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50: 5914-5919.
- [11] 魏恩宗. 直流电晕氧化结合化学吸收烟气脱硝实验及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 51-53.
- [12] Wang Meiyang, Zhu Tianle, Luo Hongjing, et al. Oxidation of gaseous elemental mercury in a high voltage discharge reactor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21: 1652-1657.
- [13] Wang Meiyang, Zhu Tianle, Wang Hong. Oxidation and removal of NO from flue gas by DC corona discharge combined with alkaline absorption[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2011, 39(2): 704-710.

(下转第 74 页)

4 结论

本文针对火电厂湿法烟气脱硫系统中的螺旋喷嘴,通过雾化实验对流量、雾化粒径、雾化角等雾化性能进行了研究和分析。得出结论:

1)螺旋喷嘴的流量随着压力的增大呈现出稳定增大的趋势。从拟合的数值上来说流量是压力平方根的二次多项式。

2)螺旋喷嘴的雾化粒径随着流体压力的增大呈现出减小的趋势,即雾化效果随着压力的增大逐渐提高,且各工况在0.3~0.55 MPa 雾化粒径减小的趋势比较明显。从拟合的数值上来说雾化粒径与压力呈指数关系。

3)螺旋喷嘴的雾化角度随着流体压力的增大呈现出增大的趋势,即雾化范围随着压力的提高逐渐变大,且各工况在0.25~0.4 MPa 雾化角比较稳定。从拟合的数值上来说雾化角是压力的四次多项式。

4)螺旋喷嘴的分散度指标从总体上随着压力的增大呈现出增大的趋势,即雾化效果随着压力的提高趋向于不稳定,且各工况在0.2~0.4 MPa 分散度比较稳定。

结果表明,螺旋喷嘴具有良好的雾化性能,雾化区域范围大,正常工作时可以提供稳定、细密的水雾。在电厂脱硫塔使用螺旋喷嘴的喷淋层中,若要取得较好的雾化以及节能效果,推荐使用密度在 $1\ 050\sim 1\ 100\text{ kg/m}^3$ 的石灰石浆液,并将螺旋喷嘴的流体压力控制在0.3~0.5 MPa,此时粒径大约为 $138\ \mu\text{m}$,雾

化角为 150° 。

参考文献

- [1] 李兆东,王世和,王小明.湿法脱硫螺旋喷嘴雾化性能[J].东南大学学报.自然科学版,2008,38(3):493-495.
- [2] 刘乃玲,张旭.螺旋型喷嘴液滴分布特性及液滴直径经验公式的拟合[J].实验流体力学,2006,20(3):8-12.
- [3] 冯玲,杨景玲,蔡树中.烟气脱硫技术的发展及应用现状[J].环境工程,1997,15(2):19-25.
- [4] 张三虎,包俊江.湿法烟气脱硫系统中影响脱硫效率的关键参数[J].环境工程,2009,27(2):22-26.
- [5] 刘定平,余海龙.基于“液包气”雾化的脱硫喷嘴特性[J].动力工程学报,2012,32(9):693-699.
- [6] 刘定平,李小伟,黄泳华,等.基于LSSVM的石灰石浆液制取电耗优化[J].环境工程,2010,28(6):104-107.
- [7] 杜云贵,刘艳荣,喻江涛,等.湿法脱硫用大流量低背压喷嘴开发[J].环境工程,2010,28(5):54-57.
- [8] Santangelo P E. Characterization of high-pressure water-mist sprays: Experimental analysis of droplet size and dispersion[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2010,34:1353-1366.
- [9] Kashdan J T, Shrimpton J S. A digital image analysis technique for quantitative characterisation of high-speed sprays[J]. Optics and Lasers in Engineering,2007,45:106-115.
- [10] Blaisot J B, Yon J. Droplet size and morphology characterization for dense sprays by image processing: application to the Diesel spray[J]. Experiments in Fluids,2005,39:977-994.

作者通信处 刘定平 510640 广东省广州市天河区五山路318号
华南理工大学电力学院

E-mail dpliu@scut.edu.cn

2012-11-21 收稿

(上接第70页)

- [14] Kyung Bo Ko, Youngchul Byun, Moohyun Cho, et al. Influence of gas components on the oxidation of elemental mercury by positive pulsed corona discharge [J]. Main Group Chemistry, 2008, 7(3): 191-204.
- [15] Youngchul Byun, Dong Jun Koh, Dong Nam Shin. Removal mechanism of elemental mercury by using non-thermal plasma[J]. Chemosphere, 2011, 83: 69-75.
- [16] Zhou Qi, Yu Qi, Li Lingwei, et al. Simulation of simultaneous desulfurization and denitrification of flue gas using pulsed discharge plasma[J]. Advanced Materials Research, 2012, 356-360: 1118-1121.
- [17] Xu Fei, Luo Zhongyang, Cao Wei, et al. Simultaneous oxidation of NO, SO₂ and Hg⁰ from flue gas by pulsed corona discharge[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21: 328-332.
- [18] Shang Kefeng, Yueran Zhuo, Yan Wu. Simultaneous removal of SO₂/NO_x by corona discharge plasma[C]//International Conference on Energy and Environment Technology, 2009: 106-109.
- [19] Young Sun Mok, In-Sik Nam. Positive pulsed corona discharge process for simultaneous removal of SO and NO from Iron-Ore sintering flue gas [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27(4): 1188-1196.
- [20] 潘卫国, 吴江, 王文欢, 等. 添加 NH₄Cl 对煤燃烧生成 Hg 和 NO 影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29: 41-46.
- [21] 刘少辉, 王伟, 赵予生. 氯碱企业“三废”排放与综合利用[J]. 中国氯碱, 2012(9): 30-32.
- [22] Kyung Bo Ko, Youngchul Byun, Moohyun Cho, et al. Influence of HCl on oxidation of gaseous elemental mercury by dielectric barrier discharge process[J]. Chemosphere, 2008, 71: 1674-1682.

作者通信处 阿热依古丽 100049 北京市石景山区玉泉路19号
(乙)中国科学院高级物理研究所同位素厅核分析室 207

E-mail arygl@ihep.ac.cn

2012-12-27 收稿