

# 烟气主要成分对基于高活性吸收剂的烟气脱硫脱硝过程影响

许佩瑶<sup>1</sup>, 赵 毅<sup>1</sup>, 康 玺<sup>2</sup>, 汪黎东<sup>1</sup>

(华北电力大学 环境科学与工程学院, 河北 保定 071003; 2 华北电力科学研究院, 北京 100045)

**摘 要:**采用自行制备的“富氧型”高活性吸收剂,在最佳工艺条件下,通过固定床实验研究了烟气中 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 对高活性吸收剂脱硫脱硝效率的影响和 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 共存时对彼此脱除效率的影响。研究表明:O<sub>2</sub> 的存在对脱硫脱硝有一定的促进作用;CO<sub>2</sub> 的存在对脱硫有抑制作用,但对脱硝有促进作用;SO<sub>2</sub> 在浓度小于 2 500 mg/m<sup>3</sup> 时对 NO 的脱除起促进作用,大于 2 500 mg/m<sup>3</sup> 时则阻碍 NO 的脱除;NO 的存在对脱硫起促进作用,使脱硫产物中硫酸钙比例增加。该研究结果对基于高活性吸收剂脱硫脱硝工艺深入研究和应用提供了理论依据。

**关 键 词:**高活性吸收剂;烟气成分;固定床;脱硫效率;脱硝效率

中图分类号: X701.3      文献标识码: A

## 引 言

燃料燃烧产生的 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 已经对环境和人类健康产生了严重的影响。随着人们环保意识的提高以及政府对锅炉二氧化硫和氮氧化物最高允许排放浓度政策的颁布和实施<sup>[1]</sup>,对烟气中的 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 进行控制已是非常紧迫的任务。近年来,为了提高脱除效率降低运行费用,脱除技术已经从过去分步脱硫脱硝技术向工艺简单、运行成本低、具有良好运行性能的同时脱硫脱硝技术方向发展。文献[2~4]研发的基于高活性吸收剂的烟气循环流化床同时脱硫脱硝技术,可同时获得 95% 的脱硫效率和 68% 的脱硝效率,应用前景广阔。本研究利用自制的“富氧型”高活性吸收剂,对烟气中 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 存在时对脱硫脱硝效率的影响、脱除过程中 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 之间的相互影响关系等进行深入研究,以期为该技术的工业应用提供理论依据。

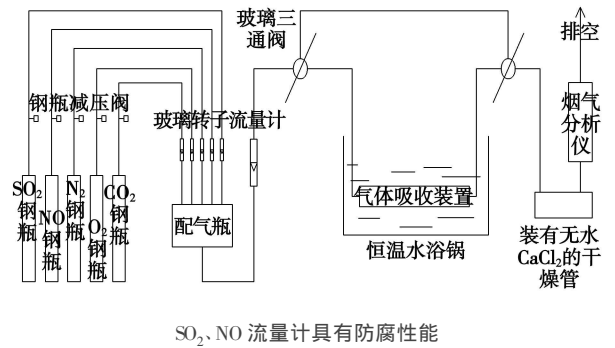
## 1 实验过程

### 1.1 “富氧型”高活性吸收剂(OHAA)的制备

高活性吸收剂的制备参照了赵毅等人的方法<sup>[3,5]</sup>,在高活性吸收剂中加入氧化剂 C,即制得“富氧型”高活性吸收剂。考虑到氧化剂 C,具有见光易分解等不稳定特性,实验中氧化剂 C 以溶液的形式加入到高活性吸收剂中,搅拌一段时间使其高度分散在吸收剂的表面,晾干即可用于脱硫脱硝实验。

### 1.2 实验装置和仪器

实验条件参照李燕中的实验<sup>[9]</sup>。称取 2~3 g 准备好的“富氧型”高活性吸收剂,均匀涂抹在玻璃棉上固定,放入直径为 15 mm,长为 400 mm 的固定床吸收装置中,固定床装置放入水浴中以控制反应温度。根据燃煤锅炉烟道气的主要成分,用 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 5 种气体配制模拟烟气。模拟烟气过三通阀后进入固定床进行脱硫脱硝实验。用 MRU 2000 CD<sup>-2</sup>型多功能烟气分析仪测出各气体的初始浓度和脱除后的浓度。计算相应的脱除效率。实验流程如图 1 所示。



SO<sub>2</sub>、NO 流量计具有防腐性能

图 1 固定床脱硫脱硝实验装置图

1.3 实验参数设定

实际运行的煤粉锅炉中考虑到烟气中存在 SO<sub>2</sub> 会引起露点腐蚀以及综合经济技术指标, 其尾部排烟温度一般在 120 ℃ 以上, 但是在实际烟气循环流化床脱硫脱硝装置内部, 最佳运行温度在对应烟气露点附近<sup>[7]</sup>, 即 50~60 ℃。由此确定本实验温度为 50 ℃。

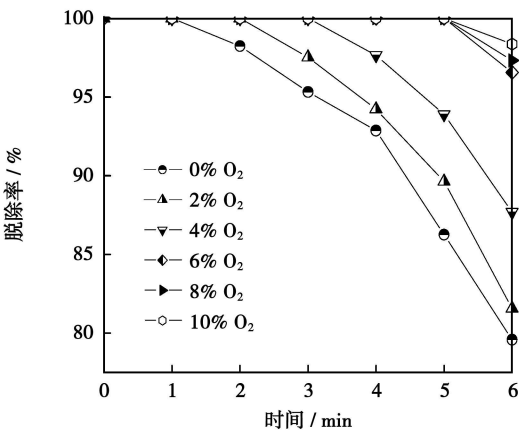
根据实际烟气情况, 选定 SO<sub>2</sub> 浓度范围为 500~4 000 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> 浓度范围为 400~2 000 mg/m<sup>3</sup>; 选定 O<sub>2</sub> 浓度范围为烟气流量的 2%~10%, CO<sub>2</sub> 浓度范围为烟气流量的 6%~14%。

根据文献[8]研究结果, 选定氧化剂 C 的最佳投加量为吸收剂质量的 1.6%, 吸收剂的最佳含湿量为吸收剂质量的 15%。

2 结果与分析

2.1 O<sub>2</sub> 对脱硫脱硝效率的影响

2.1.1 O<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 脱除效率的影响



实验条件: 烟气流量 0.048 m<sup>3</sup>/h; 烟气温度为 50 ℃; 固定 SO<sub>2</sub> 的浓度为 2 500 mg/m<sup>3</sup>; 烟气湿度为 15%; 吸收剂的投加量为 3 g/次。

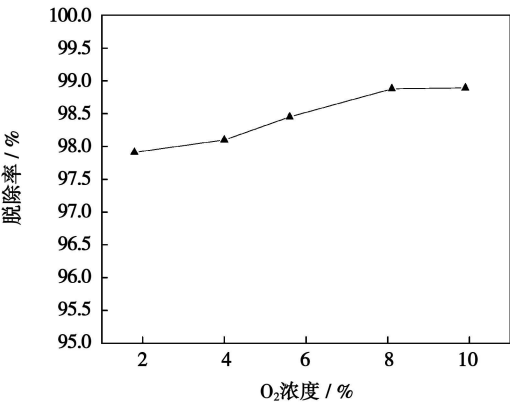
图 2 O<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 脱除效率影响随着时间的变化

不同浓度 O<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 脱除效率的影响如图 2 所示。从图中可看出, 在任何氧气浓度下, 烟气初始脱硫效率都可以达到 100%。但在不同浓度的 O<sub>2</sub> 下, 吸收剂的穿透时间不同。当 O<sub>2</sub> 浓度为零时, 穿透时间能维持 1 min 左右, 随着 O<sub>2</sub> 浓度的增大, 穿透时间明显增加。这与赵毅等人以前的实验结论相符<sup>[9]</sup>。当 O<sub>2</sub> 的浓度达到烟气流量的 6% 以上时, 吸收剂的穿透时间维持在 5 min 左右, 大约为 O<sub>2</sub> 浓度为零时的 5 倍。这是由于 SO<sub>2</sub> 水溶性不如 SO<sub>3</sub>, 在较短的时间内会在表面液膜中达到饱和, 从而穿透吸

收剂。当有 O<sub>2</sub> 存在时, O<sub>2</sub> 可以将 SO<sub>2</sub> 氧化成溶解度大的多的 SO<sub>3</sub>, 且 SO<sub>3</sub> 溶于水后形成的硫酸比 SO<sub>2</sub> 形成的亚硫酸更容易与碱性吸收剂反应, 所以吸收剂的穿透时间增加。吸收剂穿透时间延长, 可以增加吸收剂的利用效率, 所以氧气的浓度较低时对 SO<sub>2</sub> 的脱除是有利的, 这一结论与 Keat Teong Lee 的实验结论相符<sup>[19]</sup>。但是当氧气量达到 6% 以上时, 氧气浓度的增加对脱硫效率几乎不在有影响, 这是因为当 O<sub>2</sub> 浓度达到一定值时, 氧气量相对 SO<sub>2</sub> 过量, 过量的氧气对 SO<sub>2</sub> 的氧化和固定不再有影响。

2.1.2 O<sub>2</sub> 对 NO<sub>x</sub> 脱除效率的影响

从图 3 中可以看出脱硝效率随着氧气浓度的增大呈缓慢增加趋势, O<sub>2</sub> 浓度从烟气流量的 2% 增加到 8%, 脱硝效率提高了大约 1%, 对脱硝效率有一定的促进作用, 但影响不大; O<sub>2</sub> 浓度达到烟气流量的 8% 以后对 NO 脱除效率不再有影响。这是由于脱硝反应主要由 NO 向 NO<sub>2</sub> 转化所控制<sup>[3 11]</sup>。NO 必须首先被氧化成 NO<sub>2</sub> 才能被碱性吸收剂固定, 最终生成 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。但 NO 的氧化主要依靠氧化性添加剂 C, O<sub>2</sub> 的作用比较小<sup>[12]</sup>。所以 O<sub>2</sub> 浓度增加, NO 的脱除效率只有很微弱的增加。当 O<sub>2</sub> 的浓度达到 8% 以后, 氧气量相对于 NO 过饱和, 对于 NO 的脱除不再有影响。



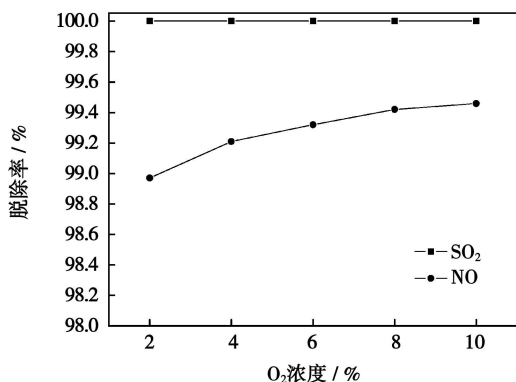
实验条件: 烟气流量 0.048 m<sup>3</sup>/h; 烟气温度为 50 ℃; 固定 NO 的浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup>; 烟气湿度为 15%; 吸收剂的投加量为 3 g/次。

图 3 O<sub>2</sub> 对 NO<sub>x</sub> 脱除效率的影响

2.1.3 SO<sub>2</sub> 和 NO 同时存在时 O<sub>2</sub> 对脱除效率的影响

当 SO<sub>2</sub> 和 NO 共同存在时, O<sub>2</sub> 浓度对二者脱除效率的影响如图 4 所示。从图中可看出, 氧气浓度的改变对 SO<sub>2</sub> 脱除没有影响, 其脱除效率均为 100%, 与 2.1.1 结论一致。但 O<sub>2</sub> 对 NO 脱除的影响与 NO 单独存在时的影响相比要明显一些, 氧气浓度从 0 变为 10%, NO 脱除效率增加值为 1.4%。

Keat Teong Lee 指出<sup>[10]</sup>: 烟气中 NO 和 O<sub>2</sub> 的存在, 能使更多的 SO<sub>2</sub> 转化成硫酸盐而不是亚硫酸盐, 且当 NO 和 O<sub>2</sub> 同时存在时比单独 O<sub>2</sub> 存在时 SO<sub>2</sub> 转化成硫酸盐的比例更高。更多硫酸的生成使整个系统的酸度增加, 从而使氧化性添加剂 C 的氧化性增强, 更多的 NO 被氧化, 脱硝效率增加。这与文献[13]实验中得到的结论一致。



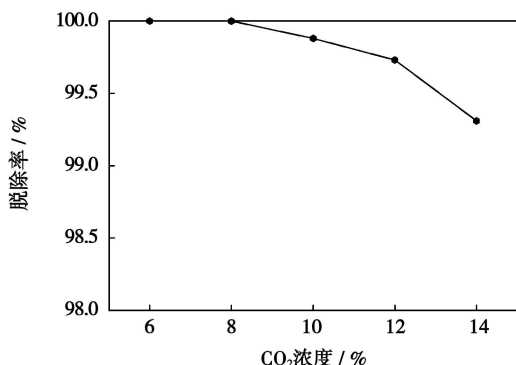
实验条件: 烟气流量 0.048 m<sup>3</sup>/h; 烟气温度为 50 °C; 固定 NO 的浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup>; 固定 NO 的浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup>; 烟气湿度为 15%; 吸收剂的投加量为 3 g/次。

图 4 O<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 和 NO 同时脱除效率的影响

## 2.2 CO<sub>2</sub> 对脱硫脱硝效率的影响

### 2.2.1 CO<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 脱除效率的影响

从图 5 中可以看出, 随烟气中 CO<sub>2</sub> 浓度的增加, SO<sub>2</sub> 的脱除效率呈下降趋势。通过对反应后的吸收剂进行离子色谱分析, 证实有少量碳酸根离子产生, 说明 CO<sub>2</sub> 和“富氧型”高活性吸收剂中的碱性钙物质发生了反应, 使 Ca/S 相对降低, 同时生成的难溶碳酸钙覆盖在吸收剂表面, 阻碍内层吸收剂进入液膜和烟气接触, 从而降低了吸收剂的脱硫效率。

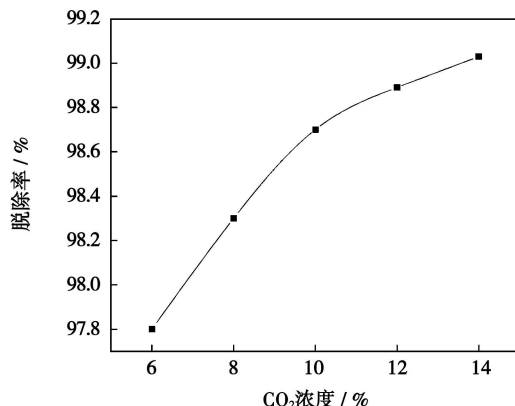


实验条件: 烟气流量 0.048 m<sup>3</sup>/h; 烟气温度为 50 °C; 固定 SO<sub>2</sub> 的浓度为 2 500 mg/m<sup>3</sup>; 烟气湿度为 15%; 吸收剂的投加量为 3 g/次。

图 5 CO<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 脱除效率的影响

### 2.2.2 CO<sub>2</sub> 对 NO<sub>x</sub> 脱除效率的影响

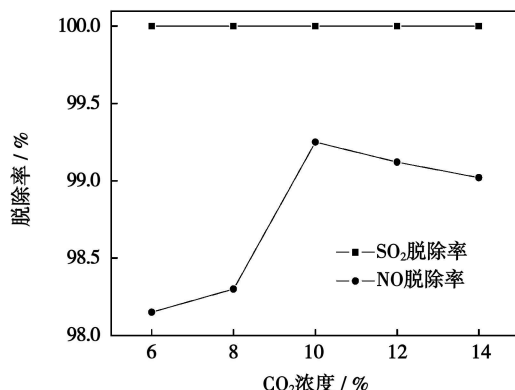
从图 6 中可以看出烟气中 CO<sub>2</sub> 对脱硝的影响和对脱硫的影响恰好相反, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加, NO 的脱除效率呈上升趋势。这是因为 NO 和 SO<sub>2</sub> 的脱除机理不同<sup>[11]</sup>, NO 的脱除主要取决于 NO 被氧化的程度, 而添加剂 C 的氧化能力与 pH 有很大关系<sup>[14]</sup>。酸度越高, C 的氧化能力越大。在脱除反应过程中, CO<sub>2</sub> 与吸收剂中的水分结合生成碳酸, 导致整个系统的酸度增加, 从而使 NO 的脱除效率升高。



实验条件: 烟气流量 0.048 m<sup>3</sup>/h; 烟气温度为 50 °C; 固定 NO 的浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup>; 烟气湿度为 15%; 吸收剂的投加量为 3 g/次。

图 6 CO<sub>2</sub> 对 NO<sub>x</sub> 脱除效率的影响

### 2.2.3 CO<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 和 NO 同时存在的影响



实验条件: 烟气流量 0.048 m<sup>3</sup>/h; 烟气温度为 50 °C; 固定 NO 的浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup>; 固定 SO<sub>2</sub> 的浓度为 2 500 mg/m<sup>3</sup>; 烟气湿度为 15%; 吸收剂的投加量为 3 g/次。

图 7 CO<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 和 NO 同时脱除效率的影响

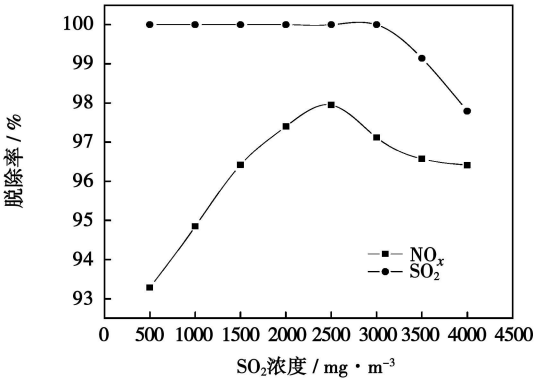
从图 7 可以看出, CO<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 和 NO 同时存在时的影响与二者单独存在时的影响不同。当 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 同时存在时, SO<sub>2</sub> 的脱除效率不受 CO<sub>2</sub> 影响, 均为 100%, 与图 5 的结果不同。原因是由于 NO 对

SO<sub>2</sub> 脱除效率的增加与 CO<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub> 脱除效率的减少, 二者相互抵消的结果。对于 NO, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加, NO 的脱除效率呈现先增加后减小的趋势。当 CO<sub>2</sub> 浓度达到烟气量的 10% 左右时, NO 的脱除效率达到最大。与图 6 的结果相比有一定的区别。这是由于在 CO<sub>2</sub> 浓度低时, 可以提供有效的酸度增加 NO 的氧化程度, 而在高浓度时, 过多的反应产物碳酸钙和 SO<sub>2</sub> 脱除生成的硫酸钙等一起覆盖在吸收剂表面, 阻碍了 NO 与吸收剂中有效成份的接触, 从而影响 NO 的脱除。

2.3 SO<sub>2</sub> 和 NO 的相互影响

2.3.1 SO<sub>2</sub> 浓度对 NO 脱除效率的影响

从图 8 可以看出, 脱硫效率随 SO<sub>2</sub> 浓度的增高呈总体下降趋势, 在低浓度区则较为平缓; 在高浓度区下降的幅度较大, 这是因为在吸收剂用量和湿度一定的情况下, 随 SO<sub>2</sub> 浓度变大, Ca/S 比减少, 导致脱硫效率降低; 而脱硝效率随着 SO<sub>2</sub> 浓度的增加先增加后降低。在 SO<sub>2</sub> 浓度为 2 500 mg/m<sup>3</sup> 时达到顶点。原因是由于: 随着 SO<sub>2</sub> 浓度的增加, 反应生成的酸度增加, 氧化性添加剂 C 的氧化能力增加, 从而增加脱硝效率。但 SO<sub>2</sub> 浓度过大时, SO<sub>2</sub> 的反应产物微溶的硫酸钙会覆盖在吸收剂表面, 阻止 NO<sub>x</sub> 进入吸收剂内部参与反应, 使脱硝效率降低。



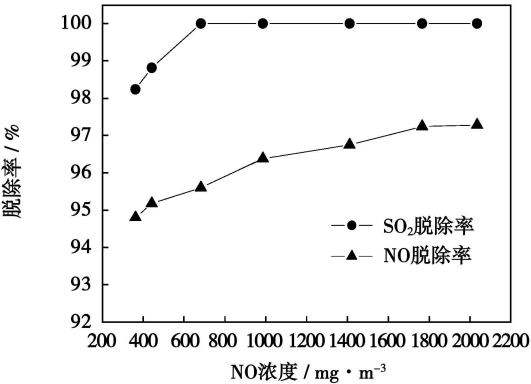
实验条件: 烟气流量 0.048 m<sup>3</sup>/h; 烟气温度为 50 ℃; 固定 NO 的浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup>; 烟气湿度为 15%; 吸收剂的投加量为 3 g/次。

图 8 SO<sub>2</sub> 浓度对 NO<sub>x</sub> 脱除效率的影响

2.3.2 NO 浓度对 SO<sub>2</sub> 脱除效率的影响

图 9 显示, 随着入口烟气中 NO 浓度的增加, 脱硫效率随之增加, 可见 NO 对 SO<sub>2</sub> 的脱除效率有一定的促进作用。Keat Teong Lee 等人的试验中指出<sup>[10]</sup>: O<sub>2</sub> 的存在使 NO 氧化为 NO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 可以作为一种氧化剂, 使 SO<sub>2</sub> 氧化成 SO<sub>3</sub> 被吸收剂吸收去除; H Nakamura 等人的研究也认为 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 之间在液相

条件下能进行反应<sup>[15~17]</sup>。本实验通过添加氧化剂 C, 将 NO 氧化为 NO<sub>2</sub>, 在提高 NO 脱除效率的同时, 由于有更多的 NO<sub>2</sub> 产生, 可以使更多的 SO<sub>2</sub> 被氧化为 SO<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub> 与 SO<sub>2</sub> 相比, 更易被碱性吸收剂所固定。从而提高脱硫效率。由此可以推断, 当有 NO 存在时, 脱硫产物硫酸钙的含量应增加, 这与我们前期的实验结果是一致的<sup>[3 11]</sup>。



实验条件: 烟气流量 0.048 m<sup>3</sup>/h; 烟气温度为 50 ℃; 固定 SO<sub>2</sub> 的浓度为 2 500 mg/m<sup>3</sup>; 烟气湿度为 15%; 吸收剂的投加量为 3 g/次。

图 9 NO 浓度对 SO<sub>2</sub> 脱除效率的影响

随着入口烟气中 NO 浓度的增加, 脱硝也有微弱的增加, 特别是在低 NO 浓度区增加较为明显。这是由于随着 NO 浓度的增加, 体系的酸度增加, 提高了添加剂 C 的氧化性, 导致脱硝效率增加。

3 结 论

(1) O<sub>2</sub> 的存在促进了 SO<sub>2</sub> 的脱除, 使吸收剂穿透时间延长。当 O<sub>2</sub> 浓度达到烟气量的 6% 左右时, 吸收剂的脱硫性能基本上稳定在同一水平。

O<sub>2</sub> 的存在使脱硝效率增加。O<sub>2</sub> 增加了烟气的氧化能力, 使 NO 氧化为 NO<sub>2</sub> 比例增加; 同时由于脱硫效率的提高, 使体系酸度升高, 在酸性环境中吸收剂对 NO 的脱除能力也有一定的提高。

(2) CO<sub>2</sub> 对脱硫效率有一定的抑制作用, 但对脱硝有一定的促进作用。

(3) 在浓度小于 2 500 mg/m<sup>3</sup> 时 SO<sub>2</sub> 对 NO 的脱除起促进作用, 大于 2 500 mg/m<sup>3</sup> 时则阻碍 NO 的脱除; NO 的存在对脱硫起促进作用, 使脱硫产物中硫酸钙比例增加。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家标准 (GWBP 3—1999), 锅炉大气污染物排

- 放标准[S].
- [2] 赵 毅, 马双忱, 黄建军 等. 高活性吸收剂脱硫和脱氮实验及机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 236—240.
- [3] 赵 毅, 孙小军, 许佩瑶 等. 烟气同时脱硫脱氮的高活性吸收剂的表征及脱除机理研究[J]. 中国科学 E 辑技术科学, 2006, 36(3): 326—340.
- [4] YI Z, YAN CHUN F, SHUANG CHEN M, et al Experimental study on the simultaneous desulfurization and denitrification by duct injection [J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(4): 674—677.
- [5] 赵 毅, 马双忱, 李燕中 等. 利用粉煤灰吸收剂对烟气脱硫脱氮的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 108—112.
- [6] 李燕中. 高活性吸收剂脱除烟气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  的实验研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2000.
- [7] 樊保国, 项光明, 祁海鹰 等. 常温循环流化床烟气脱硫影响脱硫效率的参数及机理[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(3): 228—232.
- [8] 李海宗. 烟气循环流化床同时脱硫脱硝技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- [9] 赵 毅, 赵建海, 马双忱 等. 高活性吸收剂去除二氧化硫的实验研究[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(1): 72—75.
- [10] KEAT TEONG LEE, SUBHASH BHATIA, ABDUL RAHMAN MOHAMED Removal of sulfur dioxide using absorbent synthesized from coal fly ash; Role of oxygen and nitrogen oxide in the desulfurization reaction[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(2): 3419—3423.
- [11] 赵 毅, 许佩瑶, 孙小军, 等. 烟气循环流化床同时脱硫脱硝试验及机理研究[J]. 中国科学 B 辑化学, 2006, 36(5): 439—448.
- [12] 赵建海. 高活性吸收剂联合脱硫脱氮技术的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2001.
- [13] TSUNG WEN CHIEN, HSIN CHU, YARN—CHI LI Absorption kinetics of nitrogen oxides using sodium chlorite solutions in twin spray columns[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 166(3): 237—250.
- [14] HSIN CHU, TSUNG WEN CHIEN The absorption kinetics of  $\text{NO}$  in  $\text{NaClO}_2/\text{NaOH}$  solutions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, B84(2): 241—252.
- [15] NAKAMURA H, KATSUKI Y. Simultaneous  $\text{SO}_x$   $\text{NO}_x$  removal employing absorbent prepared from fly ash //Proceedings of 1991  $\text{SO}_2$  Control Symposium[C]. Washington DC: EPA Research and Development, 1991: 3392—3396.
- [16] 周芸芸, 钱 枫, 付 颖. 烟气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  相互作用的研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(9): 32—33.
- [17] 北京轻工业学院环境工程教研室. 环境监测补充教材[M]. 北京: 北京轻工业学院出版社, 1998.

(编辑 单丽华)

## 新技术、新设计

# 不用催化或不喷入水的超低 $\text{NO}_x$ 燃烧系统

据《Gas Turbine World》2009 年年度手册报道, GE Energy 推出了用于新的生产以及它的 Fr6B、7E 和 7EA 型燃气轮机生产线升级改进的先进一代干式低  $\text{NO}_x$  燃烧系统。

新的 DLN1+ 设计严密地控制燃烧过程, 以便在整个负荷谱和燃气轮机运行环境温度条件下限制  $\text{NO}_x$  排放不超过 5 mg/kg, CO 排放不超过 25 mg/kg。

使用 DLN1+ 系统可以代替现有的为了得到超低  $\text{NO}_x$  所需要的湿式低排放系统, 避免了喷水或回注蒸汽的复杂性, 省去了其相关费用, 同时还省去了除盐水处理或蒸汽生产的相关费用。该设计使燃气轮机燃烧检查的时间间隔延长到 24 000 h。

在推出这个技术前, 唯一可以满足 3~5 mg/kg  $\text{NO}_x$  级的可利用方案是燃烧后处理或 SCR(选择催化还原)系统。由于现场限制或初投资费用高, 在现有设备上安装 SCR 系统是有困难的。

在正常安排的燃烧、热燃气通路检查或大修时, 就可以对原有的燃烧系统进行升级改进, 装上超低排放的干式低  $\text{NO}_x$  燃烧系统。

(吉桂明 摘译)

Nanjing Xiaguan Power Plant, Nanjing, China, Post Code: 210011)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 481 ~ 485

In the light of the deficiencies in the control of current ball mill systems, proposed was a self-adaptive fuzzy decoupling control algorithm for ball mill systems based on operating mode identification. Firstly, the authors have analyzed the dynamic characteristics of a ball mill system and in combination with a test performed in a power plant, obtained a mathematical model for the ball mill systems. Secondly, the authors have used the least square supportive vector machine (LS-SVM) algorithm to identify and classify the operating state of the ball mill system. For normal operating conditions, a self-adaptive decoupling fuzzy controller was designed for the coupling loop to control the ball mill. For abnormal operating conditions, corresponding control tactics were given. Finally, a simulation study was performed of the algorithm in question at normal operating conditions. The simulation results show that the algorithm can effectively realize the identification of the ball mill system operating mode and the decoupling control of the coupling loops. The control system exhibit relatively good dynamic properties and robustness. **Key words:** ball mill system, mode identification, least square supportive vector machine, adaptive fuzzy control, decoupling control

无磨损磁密封泄灰阀的试验研究 = **Experimental Study of an Abrasion-free Magnetic Sealed Ash Unloading Valve** [刊, 汉] / YUAN Yong-tao, QI Li-qiang, YANG Qian (North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), JI Yuan-xun (Hebei Provincial Electric Power Survey and Design Institute, Shijiazhuang, China, Post Code: 050031)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 486 ~ 489

The end platen and sealing strip currently used on the seal of an electrically-operated clapper valve under the ash hopper of a static precipitator are easily worn out, have a short service life and a relatively inferior sealing performance. A novel magnetic sealed ash-unloading valve has made use of the presence of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and other magnetic media in pulverized-coal-fired ash to additionally install a permanent magnet on the top of the clapper blade to adsorb the magnetic media in the ash to realize a seal. The authors have employed a self designed test rig and chosen three kinds of permanent magnetic iron with different magnetic flux and four kinds of powder with a variety of content of magnetic substances to conduct respectively seal performance tests. The test results show that the magnetic sealed ash-unloading valve has a good seal performance, no abrasion and no need to frequently replace the parts. **Key words:** magnetic seal, ash unloading valve, powder

干法/半干法脱硫中脱硫剂利用率及脱硫灰利用研究 = **Study of the Utilization Rate of Desulfurization Agents and Utilization of Desulfurized Ash During Desulfurization by Dry-method/Semi-dry-method** [刊, 汉] / WANG Wen-long, DONG Yong, REN Li, et al (Research Center of Engineering for Environment Thermodynamic Process under the Ministry of Education, College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 490 ~ 493

From an innovative view point, i. e. the chemical and mineral constituents of desulfurized ash, an analytical study was made. It has been further verified that the dry-method and semi-dry-method flue gas desulfurization process represented by the circulating fluidized bed technologies features an excessively low utilization rate of desulfurization agents. The technology by using desulfurized ash as a raw material to produce sulfoaluminate cement can realize a highly effective utilization of dry-method-semi-dry method desulfurization products. On the one hand, to intensify the desulfurization reaction can enhance the utilization rate of desulfurization agents. On the other hand, the realization of an effective comprehensive utilization of desulfurization products can also remedy the defect of a low utilization rate of the desulfurization agents. The method under discussion can promote the resource development of desulfurization technologies, representing an approach full of latent potentialities. **Key words:** desulfurization, calcium utilization rate, desulfurized ash, sulfoaluminate cement

烟气主要成分对基于高活性吸收剂的烟气脱硫脱硝过程影响 = **Influence of the Main Constituents of Flue Gas**

**on the Desulfurization and Denitrification Process Based on Highly Active Absorbents**[刊, 汉] / XU Pei-yao, ZHAO Yi, WANG Li-dong (College of Environment Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), KANG Xi (North China Electric Power Research Institute, Beijing, China, Post Code: 100045) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 494 ~ 498

By using a self-prepared “oxygen-enriched type” highly active absorbent, the influence of  $\text{CO}_2$  and  $\text{O}_2$  in flue gas on the desulfurization and denitrification efficiency of the highly active absorbent and the influence of the coexistence of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  on the desulfurization efficiency were experimentally studied at an optimum technological condition and through the use of a fixed bed. The research results show that  $\text{O}_2$  can play a definite role of enhancing both the desulfurization and denitrification, while  $\text{CO}_2$  can function to prohibit the desulfurization but promote the denitrification. When  $\text{SO}_2$  concentration is less than  $2\,500\text{ mg/m}^3$ , it contributes to the removal of  $\text{NO}$ . When  $\text{SO}_2$  concentration is greater than  $2\,500\text{ mg/m}^3$ , it prohibits the removal of  $\text{NO}$ . The presence of  $\text{NO}$  can promote the desulfurization and increase the proportion of calcium sulphate in desulfurization products. The foregoing can provide a theoretical basis for the further study and application of the simultaneous desulfurization and denitrification process based on highly active absorbents. **Key words:** highly active absorbent, constituents of flue gas, fixed bed, desulfurization efficiency, denitrification efficiency

**SCR 氮氧化物脱除系统对燃煤烟气汞形态的影响 = Influence of the SCR (Selective Catalytic Reduction)-based  $\text{NO}_x$  Removal System on Mercury Morphology in Coal-fired Flue Gas**[刊, 汉] / HU Chang-xing (Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo, China, Post Code: 315100), ZHOU Jin-song, HE Sheng, LUO Zhong-yang (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Source, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 499 ~ 502

By adopting the standard Ontario method, measured and analyzed were the morphological distribution of mercury in flue gas before and after the selective catalytic reduction (SCR) denitrification system of a 300 MW unit. In combination with the chemical theory for SCR reactions to remove  $\text{NO}_x$ , the influence of a SCR-based denitrification system on the mercury morphology of coal-fired flue gas was studied as a key problem. It has been found that the SCR catalyzer ( $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3(\text{MoO}_3)/\text{TiO}_2$ ) plays a relatively small role of adsorbing the mercury in flue gas and has no influence on the total mercury concentration in flue gas. However, after a SCR, the mercury morphology in gas state underwent a relatively great change with the  $\text{HgO}$  concentration decreasing from 49.01% to 7.30% while the  $\text{Hg}^{2+}$  concentration increasing from 38.96% to 82.67%. The  $\text{NH}_3$  in the SCR-based denitrification system plays no role in transforming the mercury morphology. The oxidation of  $\text{Hg}^0$  by  $\text{HCl}$  was mainly completed through the  $\text{Cl}$ -Deacon reaction and the intermediate ( $\text{HgO}$ ) under the catalytic action of the system and, eventually,  $\text{HgCl}_2$  was formed. **Key words:** coal-firing, mercury, morphology, SCR (selective catalytic reduction), catalytic oxidation

**5 000 t/d 级水泥窑低温余热利用方式对比研究 = A Contrast Study of Low-temperature Waste Heat Utilization Modes for a 5000 t/d Class Cement Kiln**[刊, 汉] / JIN Ge, DAI Yi-ping (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), WANG Jia-quan (Luoyang Zhong-zhong Power Generation Equipment Co. Ltd., Luoyang, China, Post Code: 471003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 503 ~ 506

To more effectively utilize low temperature waste heat and reduce the energy consumption of a cement kiln, an exploratory study was conducted of the low-temperature waste heat utilization modes for power generation in a 5 000 t/d class new type dry-method cement kiln. With the exhaust gas extracted from a cooler in the front portion of the kiln and a preheater in its tail portion serving as a heat source, the models of single-pressure, dual-pressure and flash circulation system were established. By using genetic algorithms, optimized were the thermodynamic characteristic parameters for various cycles. The dual-pressure system configuration was improved with the respective merits and demerits of the single-pressure, dual-