

# 煤粉工业锅炉臭氧脱硝应用的可行性分析

闫黎黎<sup>1,2,3</sup>

(1. 煤科院节能技术有限公司,北京 100013;2. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013;  
3. 煤炭资源开采与环境保护国家重点实验室,北京 100013)

**摘要:**煤炭在短期内依然是我国能源消费结构的主体,但其燃烧产生的污染物带来了严重的环境污染问题。现有脱硫脱硝工艺普遍占地大且投资及运行成本较高,不适宜煤粉工业锅炉应用。根据臭氧氧化机理,提出一种高效的锅炉烟气污染物脱除方法,并通过文献研究,证明脱硝效果,分析了影响其污染物脱除效率的主要因素,阐述了技术在国外的应用情况。介绍了煤粉工业锅炉系统现有烟气净化技术,提出采用臭氧氧化法耦合煤炭科学技术研究院有限公司自主高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD)技术,完成高阶态氮氧化物和SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>等酸性气体、重金属Hg、As等的有效脱除,达到超低排放效果,对于形成符合煤粉工业锅炉自身特点的一体化烟气净化技术具有重要意义。

**关键词:**煤粉工业锅炉;臭氧;脱硝;氮氧化物;二氧化硫

中图分类号:X701 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)04-0095-06

## Feasibility analysis of denitration by ozone oxidation and its application in coal fired industrial boilers

Yan Lili<sup>1,2,3</sup>

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Environment Protection, Beijing 100013, China; 3. Energy State Key Laboratory of Coal Efficient Utilization and Energy-Saving Equipment, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Coal will still be the main part of the energy consumption structure in China in a short term, but the pollutants produced by its combustion bring serious environmental pollution problems. The existing desulfurization and denitration process generally occupies a large area, and the investment and operation cost is higher, which is not suitable for the application of pulverized coal industrial boilers. According to the mechanism of ozone oxidation, proposed an efficient boiler flue gas pollutants removal methods, and through literature research, proved that denitrification results of this method, analyzed the main factors affecting the pollutant removal efficiency, expounded the application of technology in foreign countries. Finally introduced the existing flue gas purification technology pulverized coal industrial boiler system, the ozone oxidation coupling of China Coal Research Institute independent high rate ash calcium circulating flue gas desulfurization (NGD) technology, effective removal of nitrogen oxides and completed the high order acid gases such as SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, and, heavy metal hg, As, to achieve ultra the effect of low emissions, is of great significance for the formation of the integration of flue gas with the characteristics of pulverized coal industrial boiler purification technology.

**Key words:** pulverized coal industrial boilers; O<sub>3</sub>; denitration; NO<sub>x</sub>; SO<sub>2</sub>

## 0 引言

煤炭在我国能源消费结构的主体地位在短时期

内是不会改变的,但其燃烧产生的二氧化硫、氮氧化物等在内的污染物带来了严重的环境污染问题。现阶段,锅炉烟气脱硫脱硝工艺大多选用选择性催化

收稿日期:2017-05-24;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.04.015

基金项目:北京市重大科技成果转化落地培育资助项目(Z161100004816012)

作者简介:闫黎黎(1984—),女,吉林四平人,助理研究员,硕士,从事煤炭洁净燃烧技术研究和产品推广工作。E-mail:sunnyd.a.y@163.com

引用格式:闫黎黎.煤粉工业锅炉臭氧脱硝应用的可行性分析[J].洁净煤技术,2017,23(4):95-100.

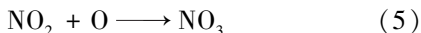
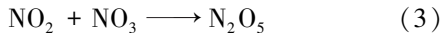
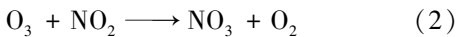
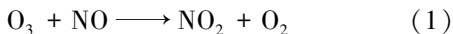
Yan Lili. Feasibility analysis of denitration by ozone oxidation and its application in coal fired industrial boilers[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(4):95-100.

还原(SCR)技术脱硝串联湿法(wet FGD)脱硫装置,虽然脱除效率较高,但一次性投资及运行成本大,不适宜应用于煤粉工业锅炉烟气净化。近年来,同时脱硫脱硝的烟气净化技术不断涌现,例如以氧化性为特征的利用等离子体、电子束等方法,在实现污染物脱除效果的同时,存在能耗大、费用昂贵等突出问题<sup>[1-2]</sup>。

燃煤烟气中,NO占NO<sub>x</sub>组成的95%,且不溶于水,反应活性差。臭氧作为一种强氧化剂,可氧化烟气中的多种污染物,能快速有效地将NO氧化到高价态,而高价态NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等可溶于水生成HNO<sub>2</sub>和HNO<sub>3</sub>,提高了溶解能力,并能够在脱硫洗涤塔内与SO<sub>2</sub>同时吸收,达到NO<sub>x</sub>与SO<sub>2</sub>联合脱除的效果。此外,臭氧自身还原产物为O<sub>2</sub>,无二次污染,目前该技术于国外已有应用实例,而国内只在中小型锅炉上有少数应用案例。煤粉工业锅炉是一种集高效、节能及清洁排放为一体的燃烧技术,现已在市政供热及工业生产领域有了应用,研究臭氧脱硝在煤粉工业锅炉中应用的可行性,形成完整的、符合煤粉工业锅炉自身特点的烟气净化技术,使系统排放符合国家相关标准,甚至达到天然气锅炉或电站锅炉等当水平,对于煤粉工业锅炉技术进步及推广意义重大。

## 1 臭氧脱硝原理

臭氧脱硝的原理是将NO<sub>x</sub>中难溶于水的NO氧化成NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等易溶于水的高价态氮氧化物。低温条件下,臭氧与NO的关键反应可描写<sup>[3]</sup>如下



## 2 臭氧联合脱硫脱硝

臭氧联合脱除NO<sub>x</sub>与SO<sub>2</sub>的原理是利用强氧化性将NO氧化为高价态氮氧化物,再通过洗涤塔同时将NO<sub>x</sub>与SO<sub>2</sub>吸收转化为溶于水物质,实现脱硫脱硝。

王智化等<sup>[4]</sup>对臭氧氧化技术同时脱除NO<sub>x</sub>及SO<sub>2</sub>效果进行了基础实验研究。结果显示:在150℃无催化条件下,10s内臭氧热分解率为28%,

已知0.01s即可完成化学动力学反应,可见臭氧与NO<sub>x</sub>及SO<sub>2</sub>之间的反应基本不受其自身分解反应影响。在100~200℃条件下,臭氧可有效氧化NO,且氧化趋势相似。在O<sub>3</sub>/NO摩尔比为1.0时,100℃条件下,臭氧对NO的氧化效率为85.7%,200℃条件下,臭氧对NO的氧化效率为84.8%;高于300℃时,臭氧热分解反应速度变快,氧化NO效率下降;到400℃时,氧化能力基本丧失。此外,臭氧对NO的氧化效率不受SO<sub>2</sub>影响,尾部加装湿法洗涤装置后,可以实现NO<sub>x</sub>及SO<sub>2</sub>同时高效脱除,脱除SO<sub>2</sub>效率接近100%,脱除NO<sub>x</sub>效率随着O<sub>3</sub>/NO摩尔比的增加而提高,在O<sub>3</sub>/NO摩尔比为0.9时,脱硝效率达到86.27%。

代邵凯等<sup>[5]</sup>在固定床反应器上,以模拟烟气为对象研究了臭氧对NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>以及Hg的去除作用。结果表明:臭氧对NO氧化效率在150℃以内基本不变,温度升高时也无明显变化,超出150℃后开始降低;臭氧对NO的氧化效率随着O<sub>3</sub>/NO摩尔比的增大而升高,当O<sub>3</sub>/NO摩尔比超过1.0时增速变缓。臭氧对Hg<sup>0</sup>的脱除效率随着温度的增加先升后降,在150℃时为曲线顶点,脱除效率最高,达到90%;臭氧对Hg<sup>0</sup>的氧化效率随着O<sub>3</sub>/Hg<sup>0</sup>摩尔比的增大而升高,当O<sub>3</sub>/Hg<sup>0</sup>摩尔比超过30000后,氧化效率趋于平稳,基本不再增加。当NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>和Hg同时存在时,臭氧对Hg<sup>0</sup>的氧化作用受到抑制,但对NO的氧化效率依然很高。

综上,在锅炉典型排烟温度下,臭氧能够实现很好的污染物脱除效果。

## 3 影响臭氧脱硝效率的主要因素

影响臭氧氧化技术脱硝效果的因素主要包括反应时间、反应温度、摩尔比、吸收液性质等,这些因素对NO<sub>x</sub>脱除效率都有不同程度的影响。

### 3.1 反应时间的影响

刘志龙<sup>[6]</sup>、姜树栋<sup>[7]</sup>等研究发现,在1~104s反应时间内,反应器出口的NO摩尔数没有变化,且停留时间的增加也未影响NO的脱除率。分析原因,在于关键反应在很短时间内便达到反应平衡,无需臭氧较长时间停留,所以该技术臭氧在烟气中的停留时间只需能够使氧化反应完成即可。

### 3.2 反应温度的影响

臭氧的生存周期关系到NO<sub>x</sub>及SO<sub>2</sub>的脱除效

率,若在锅炉排烟温度下,臭氧快速分解,在与 NO 和 SO<sub>2</sub> 接触前便已分解成 O<sub>2</sub>,该技术的存在便失去意义,因此研究臭氧的温度敏感性十分重要。

臭氧分解率可用臭氧测量浓度与初始浓度 ( $[O_3]/[O_3]_0$ ) 的关系来表达。

$$\eta = (1 - [O_3]/[O_3]_0) \times 100\% \quad (6)$$

王智化等<sup>[4]</sup>依据关系式(6)系统研究了臭氧的热分解特性,结果显示:150℃的低温条件下,臭氧的分解率不高,随时间变化  $[O_3]/[O_3]_0$  呈线性下降趋势,10 s 时,  $[O_3]/[O_3]_0$  的值下降到 0.72,分解率为 28%。200℃条件下,10 s 时,  $[O_3]/[O_3]_0$  的值降低到 0.133,分解率上升到 86.7%,分解明显加快。250℃条件下,分解速度显著加快,2 s 内已基本分解完全。同时实验结果还显示,臭氧在室温环境下分解较慢,10 s 时间仅分解约 0.5%。

不同温度下臭氧对 NO 的氧化效率也明显不同。王智化<sup>[4]</sup>、代邵凯<sup>[5]</sup>等通过实验考察了 O<sub>3</sub> 浓度 429 mg/m<sup>3</sup>、NO 初始浓度 264 mg/m<sup>3</sup>、NO<sub>2</sub> 初始浓度 17 mg/m<sup>3</sup>、O<sub>2</sub> 浓度 6% 的条件下,臭氧在不同温度下对 NO 的氧化效率。实验结果显示:在低于 150℃条件下,臭氧对 NO 的氧化效率始终接近 100%,温度高低对氧化效率基本没有影响。在高于 150℃条件下,随着温度的升高臭氧对 NO 的氧化效率逐渐降低,如 200℃时臭氧对 NO 的氧化效率为 98%,250℃时臭氧对 NO 的氧化效率降低至 76%。根据臭氧的热分解特性,随着温度的升高,O<sub>3</sub> 分解为 O<sub>2</sub> 速度越来越快,导致丧失了对 NO 的氧化能力。图 1 为臭氧在不同温度条件下对 NO 的氧化效率。

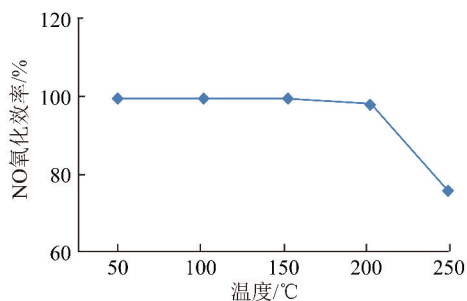


图 1 不同温度下 NO 的氧化效率

Fig. 1 NO oxidation efficiency under different temperature

### 3.3 摩尔比的影响

O<sub>3</sub>/NO 摩尔比能够反映出臭氧量与一氧化氮量的相对高低。代邵凯等<sup>[5]</sup>通过实验考察了 O<sub>3</sub> 质量浓度为 429 mg/m<sup>3</sup>、O<sub>2</sub> 体积分数为 6% 条件下, O<sub>3</sub>/NO 摩尔比在 0.4 ~ 1.2 臭氧对 NO 的氧化效率。

结果显示:O<sub>3</sub> 对 NO 的氧化效率随着 O<sub>3</sub>/NO 摩尔比增大而逐渐增高。150℃低温条件下,当 O<sub>3</sub>/NO 摩尔比从 0.4 增加到 1.0 时,臭氧对 NO 的氧化效率对应从 38.9% 升至 96.0%,呈直线上升趋势。当 O<sub>3</sub>/NO 摩尔比小于 1.0 时,O<sub>3</sub> 对 NO 的氧化效率随 O<sub>3</sub>/NO 摩尔比变化的曲线斜率接近于 1;当 O<sub>3</sub>/NO 摩尔比大于 1.0 时,曲线变化趋于平缓。目前已有研究表明,在 0.9 ≤ O<sub>3</sub>/NO 摩尔比 < 1 的情况下,脱硝率可达到 85% 以上。根据式(1)可见,O<sub>3</sub> 与 NO 完全反应的摩尔比理论值为 1,但在实际中,由于受到其他物质干扰,可发生一系列其他反应(式(2) ~ (5)),使得臭氧不能 100% 与 NO 进行反应。图 2 为不同 O<sub>3</sub>/NO 摩尔比和温度条件下臭氧对 NO 的氧化效率<sup>[5-7]</sup>。

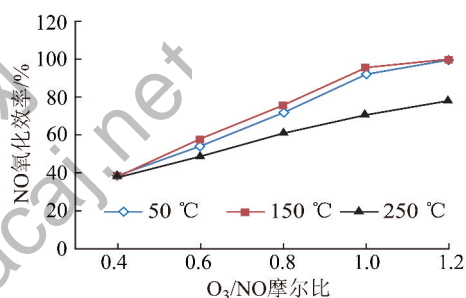


图 2 不同 O<sub>3</sub>/NO 摩尔比和温度条件下 NO 的氧化效率<sup>[5-7]</sup>

Fig. 2 NO oxidation efficiency under different molar ratio and temperature<sup>[5-7]</sup>

### 3.4 吸收液性质的影响

臭氧与 NO 发生反应,将 NO 转化为高价态氮氧化物,还需要选用吸收液进行吸收。NaOH、Ca(OH)<sub>2</sub> 等碱液是较为常见的吸收液,不同吸收液会产生不同的脱除效果。王智化等<sup>[3-4]</sup>选用水作为吸收剂,利用气体在水中的溶解度进行实验,实验结果 NO 的脱除效率达到 86.27%,SO<sub>2</sub> 的脱除效率达到 100%。也有实验选用 NaOH 和 Na<sub>2</sub>S 溶液做为吸收液,实验结果 NO 和 SO<sub>2</sub> 的脱除效率分别为 95% 和 100%,但此方法的弊端是吸收液消耗量较大<sup>[8]</sup>。

## 4 臭氧脱硝技术的工程应用

该技术在美国已有工程应用<sup>[8]</sup>,例如 LoTox 脱硝技术就是利用臭氧的氧化性,将 NO<sub>x</sub> 氧化成易溶于水的高价态氮氧化物 N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,再洗涤形成 HNO<sub>3</sub>。LoTox 技术由 BOC 公司开发,烟气处理流程如图 3 所示。

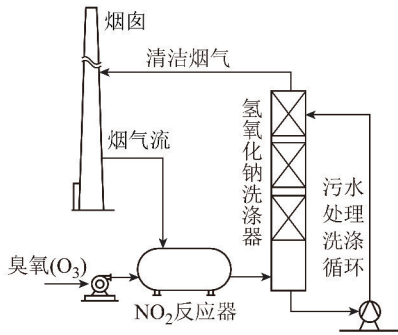


图3 LoTox 技术烟气处理流程

Fig.3 LoTox Flue gas treatment process

该过程主要反应为式(1)~(3),生成 $N_2O_5$ ,以及式(7)为( $N_2O_5 + H_2O \longrightarrow 2HNO_3$ )。

LoTox 技术 $NO_x$ 的脱除效果为70%~95%,有较高的 $NO_x$ 脱除率,且在不同的 $NO_x$ 浓度和不同的 $NO$ 、 $NO_2$ 的比例下也可以保持较高的效率。此外,该技术也不存在类似SCR技术中臭氧的泄漏问题,因为没有与 $NO_x$ 发生反应的臭氧会在洗涤器内被除去。同时,该技术应用中 $NO_x$ 的脱除既不受 $SO_2$ 和 $CO$ 的存在干扰,也不影响其他污染物控制技术。

BELCO公司将LoTox技术结合自主研发的EDV(electro-dynamic venturi)洗涤设备形成一体化脱硫脱硝系统,用于锅炉等的废气治理。基本工作流程为 $NO$ 氧化后生成的高价态氮氧化物 $N_2O_5$ ,再通过EDV洗涤器,使 $N_2O_5$ 与烟气中的水分发生反应,再与吸收液反应生成盐类排出。反应过程为式(7),生成 $HNO_3$ ,以及式(8)( $HNO_3 + NaOH \longrightarrow NaNO_3 + H_2O$ )。

实践证明,该系统的 $NO_x$ 脱除效果能满足最严格的污染物排放要求,且对二氧化硫和粉尘等颗粒物也有明显的脱除效果。同时烟尘中的硫化物、颗粒物等的存在也不影响脱除效率,并且没有氨泄漏、堵塞等问题。

## 5 臭氧脱硝技术用于煤粉工业锅炉烟气净化的可行性

### 5.1 煤粉工业锅炉系统

煤粉工业锅炉系统是在国家科技支撑、863等计划支持下,由煤炭科学技术研究院有限公司历时10余年开发的煤炭高效清洁利用技术。由煤粉集中制备、安全储存、精确供粉、浓相燃烧、烟气净化等关键技术系统集成,实现全过程自动控制<sup>[9]</sup>。

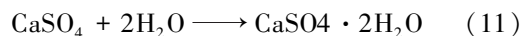
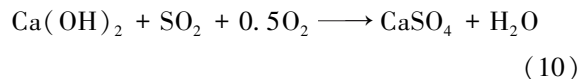
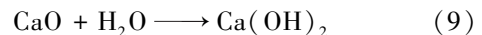
该系统具有以下特点:一集中,清洁环保。煤粉集中制备与供应,既保证煤粉质量的稳定,又取消分散的堆煤场,减少地面污染;二转化,循环经济。完成由传统的人工操作向智能操作的转化,锅炉废渣集中处理利用,构建良好循环经济模式;三不见,环境友好。全过程密闭运行,不见煤、不见烟、不见灰;四节约,节能降耗。节煤30%~50%,节地50%~60%,节省人力40%~50%,节电15%~20%。

### 5.2 煤粉工业锅炉低排放烟气净化技术

相比电站锅炉,煤粉工业锅炉容积小,且布置分散,电站锅炉目前的烟气净化技术投资和运行成本昂贵,所以不能完全照搬。开发低成本、适应煤粉工业锅炉自身特点的烟气净化技术,形成燃烧组织优化与污染物脱除一体化技术系统,是其未来发展的可行之路<sup>[10]</sup>。

煤粉工业锅炉系统的脱硫目前采用煤炭科学技术研究院有限公司自主研发的高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD)技术,该技术的工艺原理是对炉膛内温、温度场及煤粉的快速升温充分利用和挖掘,预先在煤粉中掺混入石灰石协同煤粉中的原生钙质碳酸盐,可实现吸附 $SO_2$ 50%以上于燃烧过程中,并通过煅烧,使剩余的石灰石形成活性 $CaO$ (炉膛平均温度为800~900℃)富含于系统的活性灰中。用锅炉与除尘器间的烟道作为反应器,活性灰通过富集、增湿,循环返回反应器,将烟气中剩余的 $SO_2$ 、 $SO_3$ 、 $HCl$ 、 $HF$ 等酸性气体继续脱除,同时重金属 $Hg$ 及 $As$ 的脱除<sup>[11-14]</sup>。目前燃烧后的脱硫技术主要有干法脱硫、半干法脱硫及湿法脱硫3类,该技术属于湿法脱硫技术类别,但与所有湿法脱硫工艺相比具有占地面积小、流程简单、运行成本低、耗水量少等特点,是一种经济、实用的创新技术。

主要化学反应有



高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD)技术工艺流程如图4所示。

### 5.3 臭氧氧化技术用于煤粉工业锅炉烟气净化的可行性

煤粉工业锅炉的设计排烟温度在120℃左右,通过实验可知,臭氧在低于150℃时对 $NO$ 的氧化效率始终接近100%,能够保证脱硝反应进行,且达

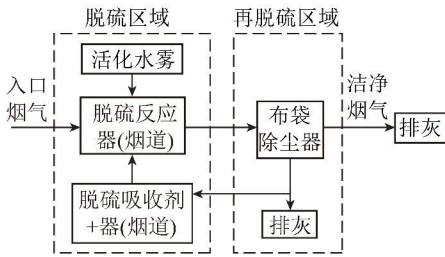


图4 高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD)技术工艺流程

Fig. 4 Calcium ash cycle flue gas desulfurization technology process

到最好脱除效果,同时流程简单,具备应用于煤粉工业锅炉系统的条件。该技术还能够与煤科院自主高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD)技术耦合,将脱硫装置作为氧化反应后的吸收装置,利用水和反应(9)生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  为吸收剂,脱除高阶态氮氧化物。根据王智化等<sup>[4]</sup>选用水吸收剂的实验结果,NO 的

脱除效率为 86.27%,以国家重点地区燃煤锅炉大气污染物排放限值要求( $\text{NO}_x$  不能超过  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ )为基准计算,锅炉燃烧  $\text{NO}_x$  原始排放低于  $1400 \text{ mg}/\text{m}^3$  臭氧氧化法便可满足要求,而现有燃烧技术完全可达到该标准,煤科院煤粉工业锅炉低氮燃烧技术已使原始  $\text{NO}_x$  排放达到  $400 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,甚至以下。同时,已有工业示范显示,高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD)技术对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$  等酸性气体、重金属 Hg、As 等脱除效果良好,耦合臭氧氧化技术,对于形成煤粉工业锅炉烟气污染物协同脱除系统有一定研究意义。

此外,臭氧发生器的耗电量是影响该技术经济性和工业推广可行性的主要因素<sup>[15]</sup>,表1为某厂家臭氧发生器的技术参数,按此计算,20 t/h 锅炉需  $\text{O}_3$  量  $6000 \text{ L}/\text{h}$ ,  $13 \text{ kg}/\text{h}$  ( $\text{NO}_x$  质量浓度以  $400 \text{ mg}/\text{m}^3$  计算)耗电量约  $104 \text{ kW}$ 。

表1 大型变频臭氧机技术参数

Table 1 Technical parameters of large frequency conversion ozone machine

型号	产量/ $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	氧气流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	臭氧质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	冷却水流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	放电室尺寸/mm
CF-G-1k	1	6~10	125~180	1.5~2	2200×800×2000
CF-G-2k	2	12~20	125~180	3~4	2200×900×1900
CF-G-3k	3	18~30	125~180	5~6	2200×1000×1900
CF-G-4k	4	24~40	125~180	6~8	2200×1000×2100
CF-G-5k	5	30~50	125~200	6~10	2200×1000×2100
CF-G-6k	6	36~60	125~200	9~12	2200×1200×2200
CF-G-8k	8	48~80	125~200	12~16	2200×1400×2200
CF-G-10k	10	50~100	125~200	16~19	2200×1400×2200
CF-G-15k	15	80~125	125~200	22~30	2200×1600×2200
CF-G-20k	20	120~160	125~200	30~40	4800×1400×2200
CF-G-30k	30	160~250	125~200	45~60	4800×1600×2200
CF-G-50k	50	220~330	125~200	75~100	4800×1800×2200
CF-G-100k	100	280~420	125~200	150~200	4800×2000×2200

注:功耗均为 6~8 kWh/kg。

## 6 结 论

1)传统的烟气脱硫脱硝工艺不能满足日益严格的减排要求,且设备投资高、占地面积大、系统复杂,因此开发工艺简单、使用经济的脱硫脱硝工艺十分必要。

2)臭氧氧化技术不仅对  $\text{NO}_x$  具有良好的脱除效果,而且对烟气中的其他有害污染物,比如重金属

汞也有一定的去除能力。

3)影响臭氧脱硫脱硝的主要因素有反应时间、反应温度、摩尔比、吸收液性质等。

4)LoTox 技术的工程应用表明该技术在国外已进入工业化应用阶段,且随着臭氧发生装置的逐步改进,臭氧氧化同时脱硫脱硝技术必将会有更加广泛的应用前景。

5)臭氧氧化技术在煤粉工业锅炉领域具有一

定应用前景,且可耦合高倍率灰钙循环烟气脱硫(NGD)技术,对于形成技术完整的符合煤粉工业锅炉自身特点的一体化烟气净化技术具有重要意义,但高耗电量是该技术弊端,有待改善。

#### 参考文献 (References):

- [1] 李澎. 加快燃煤锅炉清洁能源替代[J]. 中国化工装备, 2016(6):19-21.  
Li Peng. Status of coal fired industrial boilers and ways to improve energy efficiency [J]. China Chemical Industry Equipment, 2016(6):19-21.
- [2] 张东辉, 庄烨, 朱润孺, 等. 燃煤烟气污染物超低排放技术及经济分析[J]. 电力建设, 2015, 36(5):125-130.  
Zhang Donghui, Zhuang Ye, Zhu Runru, et al. Ultra-low air pollutant control technologies for coal-fired flue gas and its economic analysis [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5):125-130.
- [3] 王智化, 周俊虎, 温正成, 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, 2007, 41(5):765-769.  
Wang Zhihua, Zhou Junhu, Wen Zhengcheng, et al. Mechanism investigation on NO oxidization during NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> Simultaneous removal process by ozone [J]. Journal of Zhejiang University, 2007, 41(5):765-769.
- [4] 王智化, 周俊虎, 魏林生, 等. 用臭氧氧化技术同时脱除锅炉烟气中NO<sub>x</sub>及SO<sub>2</sub>的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(11):1-5.  
Wang Zhihua, Zhou Junhu, Wei Linsheng, et al. Experimental research for the simultaneous removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> in flue gas by O<sub>3</sub> [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(11):1-5.
- [5] 代绍凯, 徐文青, 陶文亮, 等. 臭氧氧化法应用于燃煤烟气同时脱硫脱硝脱汞的实验研究[J]. 环境工程, 2014, 32(10):85-89.  
Dai Shaokai, Xu Wenqing, Tao Wenliang, et al. Experimental research for the application of O<sub>3</sub> oxidation in simultaneous removal of SO<sub>2</sub>, NO and Hg in coal-fired flue gas [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(10):85-89.
- [6] 刘志龙. 臭氧氧化法烟气脱硝初步研究[J]. 炼油技术与工程, 2012, 42(9):23-25.  
Liu Zhilong. Preliminary study on flue gas denitrification by ozone oxidation [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2012, 42(9):23-25.
- [7] 姜树栋, 王智化, 周俊虎, 等. 臭氧氧化烟气脱硝制硝酸的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2010, 16(1):57-61.  
Jiang Shudong, Wang Zhihua, Zhou Junhu, et al. Experimental re-
- search on production of nitric acid using ozone denitration flue gas [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010, 16(1):57-61.
- [8] 马双忱, 苏敏, 马京香, 等. 臭氧同时脱硫脱硝技术研究进展[J]. 中国环保产业, 2009(4):29-31.  
Ma Shuangchen, Su Min, Ma Jingxiang, et al. Research progress of simultaneous desulfurization and denitrification of ozone [J]. China Environmental Protection Industry, 2009(4):29-31.
- [9] 纪任山, 王乃继, 肖翠微, 等. 高效煤粉工业锅炉技术现状及应用[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(5):52-56.  
Ji Renshan Wang Naiji, Xiao Cuiwei, et al. Present situation and application of high efficiency pulverized coal fired industrial boiler [J]. Clean Coal Technology, 2009, 15(5):52-56.
- [10] 李高亮, 王乃继, 肖翠微, 等. 空气分级对降低煤粉工业锅炉氮氧化物排放的实验研究[J]. 工业锅炉, 2014(6):1-5.  
Li Gaoliang, Wang Naiji, Xiao Cuiwei, et al. Experimental study on low-nitrogen effect of air classification to pulverized coal fired industrial boiler [J]. Industrial Boiler, 2014(6):1-5.
- [11] 尚庆雨. 我国煤粉工业锅炉技术现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1):201-206.  
Shang Qingyu. Current status and development trend of pulverized coal industrial boilers in China [J]. Coal Science And Technology, 2016, 44(1):201-206.
- [12] 罗伟, 何海军, 纪任山, 等. 高倍率灰钙循环耦合脱硫脱硝技术研究[J]. 煤化工, 2012(5):74-76.  
Luo Wei, He Haijun, Ji Renshan, et al. Study on desulfurization and dust removal technology with high rate lime calcium circulation coupling. [J]. Coal Chemical Industry, 2012(5):74-76.
- [13] 项昆. 3种烟气脱硝工艺技术经济比较分析[J]. 热力发电, 2011, 40(6):1-3.  
Xiang Kun. Comparison and analysis in techno-economic aspects for three kinds of flue gas denitrification technologies [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(6):1-3.
- [14] 刘志江. 低氮燃烧器改造及其存在问题处理[J]. 热力发电, 2013, 42(3):77-82.  
Liu Zhijiang. Low NO<sub>x</sub> burner modification and the problems processing [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(3):77-82.
- [15] 唐雄民, 章云, 朱燕飞. 串联谐振式介质阻挡放电型臭氧发生器等效模型及电源特性分析[J]. 高压电技术, 2012, 38(5):1051-1058.  
Tang Xiongmin, Zhang Yun, Zhu Yanfei. Equivalent model of series resonant dielectric barrier discharge type ozonizer and analysis of its power supply characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5):1051-1058.