

# 水泥分解炉中 CO 还原 NO 试验研究

李 森<sup>1</sup>, 方立军<sup>2</sup>, 孙立超<sup>2</sup>, 赵 砣<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室 北京 100190;

2. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院 河北 保定 071003)

**摘要:** 水泥窑炉是典型的高污染排放的工业窑炉, 水泥行业已成为第三大氮氧化物排放源。目前, 国内外对燃料分级技术在电站锅炉上的应用进行了大量研究, 而对水泥窑炉上应用燃料技术涉及较少。针对水泥分解炉高钙环境分级燃烧特点, 在流化床反应器上开展了还原气体 CO 脱除 NO 的试验研究, 研究了 CO 浓度、CaO 和温度对 CO 脱硝过程的影响机制, 采用一维柱塞流反应器模拟分析了 CO 还原 NO 反应路径。研究结果表明: CO 在还原气氛中具有较强的脱硝作用, CO 体积分数对脱硝具有较大影响, 随着 CO 浓度增加, 脱硝效率提高; 随 CO 浓度提升可有效降低 NO 排放, 当 CO 浓度由 1% 增加到 5%, NO 脱除效率提高了 37.8%; CO 脱硝过程中产生 NH 和 H 等中间产物, NH 和 H 对 CO 还原 NO 具有重要作用; HCN 可吸附于 CaO 表面并与 CaO 反应, 在还原气氛中, NH<sub>3</sub> 吸附到—CaO 表面并发生反应生成 Ca(N), 最终生成 N<sub>2</sub>。NO 主要通过 4 条路径被还原为 N<sub>2</sub>, 其中 NO→N<sub>2</sub>O→N<sub>2</sub> 和 NO→HNO→NH→N<sub>2</sub> 为最主要反应路径。在试验温度范围内, 温度升高促进了 CO 还原脱硝; CaO 对 CO 脱硝具有较强的正催化作用, 且在 850~1 050 °C, CaO 均具有催化作用。CO 体积分数为 4%、温度大于 900 °C 时, CO 脱硝效率明显提高, 说明在高温区域, CaO 具有显著的催化作用; 在 1 050 °C, 脱硝效率提高 7.56%。

**关键词:** 水泥分解炉; CO; CaO; NO 还原

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)05-0064-06

## Experimental study on NO reduction by CO in cement precalciner

LI Sen<sup>1</sup>, FANG Lijun<sup>2</sup>, SUN Lichao<sup>2</sup>, ZHAO Tuo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of High-temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Energy & Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Cement kiln is a typical industrial furnace with high pollution emission, and the cement industry has become the third largest source of NO<sub>x</sub> emission. At present, a lot of research has been done on the application of fuel staged combustion technology in utility boilers at home and abroad, but less on cement kiln. According to the characteristics of staging combustion for high calcium environment in cement precalciner, the experimental study on NO removal by reducing gas CO was carried out in fluid bed reactor, and the effects of CO concentration, CaO and temperature on the denitrification process of CO were studied. The reaction path of NO reduction by CO was simulated in a one-dimensional plug flow reactor. The results indicate that CO has a strong denitrification effect in reducing atmosphere, and CO concentration has a great influence on denitrification. With the increase of CO concentration, the NO reduction efficiency increases. The NO emission is effectively reduced with the increase of CO concentration, and when the CO concentration increases from 1% to 5%, the efficiency of NO reduction increases by 37.8%. During NO reduction by CO, the intermediate products such as NH and H are produced, and NH and H play an important role in the NO reduction by CO. HCN can be adsorbed on CaO surface and reacts with CaO. In reducing atmosphere, NH<sub>3</sub> adsorbs on CaO surface and reacts to form Ca(N) and finally forms N<sub>2</sub>. NO is reduced to N<sub>2</sub> mainly through four pathways, and the paths of NO→N<sub>2</sub>O→N<sub>2</sub> and NO→HNO→NH→N<sub>2</sub> are the most important reaction paths. In the experimental temperature range, the increase of temperature promotes the reduction and denitrification of CO. CaO has a strong positive catalysis on CO denitrification at

收稿日期: 2020-08-06; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.IF20080607

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601503)

作者简介: 李 森(1973—), 男, 陕西宝鸡人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为洁净燃烧及大气污染排放控制。E-mail: lisen@imech.ac.cn

引用格式: 李森, 方立军, 孙立超, 等. 水泥分解炉中 CO 还原 NO 试验研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(5): 64-69.

LI Sen, FANG Lijun, SUN Lichao, et al. Experimental study on NO reduction by CO in cement precalciner[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 64-69.



移动阅读

850 °C < T < 1 050 °C. Compared with the absence of CaO, when CO concentration is 4% and the temperature is higher than 900 °C, NO reduction efficiency significantly increases, which indicates that CaO has effective catalysis in the high temperature region. At 1 050 °C, the denitrification efficiency is increased by 7.56%.

**Key words:** cement precalciner; CO; CaO; NO reduction

## 0 引 言

水泥窑炉是典型的高污染排放的工业窑炉,该窑炉主要包括回转窑和分解炉 2 部分。回转窑中温度达 1 800 °C,可产生大量热力型和燃料型 NO<sub>x</sub>;分解炉中温度较低,主要产生燃料型 NO<sub>x</sub><sup>[1]</sup>。目前,我国 2 000~5 000 t/d 干法水泥生产线的 NO<sub>x</sub> 排放浓度一般大于 850 mg/Nm<sup>3</sup>,水泥行业已成为继电力和汽车之后第三大氮氧化物排放源。我国颁布的《水泥工业大气污染物排放标准》规定:新建企业自 2014 年 3 月 1 日起,现有企业自 2015 年 7 月 1 日起,NO<sub>x</sub> 排放不得超过 400 mg/m<sup>3</sup>,重点地区不得超过 320 mg/m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>。NO<sub>x</sub> 能引起酸雨和光化学烟雾,危害人们身体健康,污染大气环境,减少水泥行业 NO<sub>x</sub> 的排放迫在眉睫。

再燃技术被证明是一种经济有效的脱硝方式,脱硝效率可达 50%<sup>[3-5]</sup>。目前,国内外对再燃技术在电站锅炉上的应用进行了大量研究<sup>[6-8]</sup>,而对水泥窑炉上应用再燃技术涉及较少。水泥分解炉中燃料与水泥生料共同存在,耦合换热,炉中物理化学反应复杂,且分解炉温度较低,因此在分解炉中利用再燃技术引起众多学者的重点关注。王世杰等<sup>[9]</sup>在研究水泥分解炉中煤焦还原脱硝时发现,煤焦在存在大量生料的分解炉中具有一定的脱硝作用,且水泥生料可催化煤焦脱硝。吕刚等<sup>[10]</sup>比较了水泥分解炉中煤粉和煤焦还原 NO 的效果,以及水泥生料对煤粉和煤焦的催化效果,发现在水泥分解炉中煤粉对 NO 的还原作用比煤焦强,水泥生料催化煤粉脱硝可得到更大的脱硝效率。

煤、天然气和生物质等均可以作为再燃燃料<sup>[11-14]</sup>,在贫氧气氛中燃烧产生 CH<sub>4</sub>、CO 和半焦,CH<sub>4</sub>、CO 和半焦可将 NO 还原为 N<sub>2</sub><sup>[15-16]</sup>。目前研究主要关注 CH<sub>4</sub> 和半焦脱硝,而对 CO 脱硝鲜见报道,我国在水泥分解炉中 CO 脱硝方面的研究极少。水泥分解炉中含有大量 CaO,高钙环境对脱硝有极大影响,研究表明 CaO 对煤焦还原 NO 具有催化作用<sup>[17-18]</sup>,而对水泥分解炉中 CO 脱硝的催化作用鲜有研究。因此,研究水泥分解炉中 CO 脱硝以及 CaO 对 CO 脱硝作用的影响,为水泥分解炉中再燃技术的应用提供了理论指导与数据支撑,具有重要

的实际应用价值。

本文以 CO 为还原剂,利用流化床反应器模拟水泥分解炉,研究了 CO、CaO 和温度对 NO 脱硝的影响机制。

## 1 试验设备及方法

### 1.1 试验设备

试验采用流化床反应器,试验系统如图 1 所示。试验系统由管式电阻炉、石英管、温度控制仪、烟气分析仪、计算机、质量流量计和气瓶组成。石英管有效反应段长度为 500 mm,内径为 30 mm,有研究表明<sup>[10]</sup>石英管对脱硝无影响。烟气浓度采用德国芬兰公司生产的 Gasmeter DX-4000 红外分析仪在线测量,分析仪可测量 H<sub>2</sub>O、CO、CO<sub>2</sub>、NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub> 和 HCN 等气体浓度,测量精度可达到标定量程的 ±2%,其中 NO 的误差为 ±20 × 10<sup>-6</sup>,CO 的误差为 ±10 × 10<sup>-6</sup>。

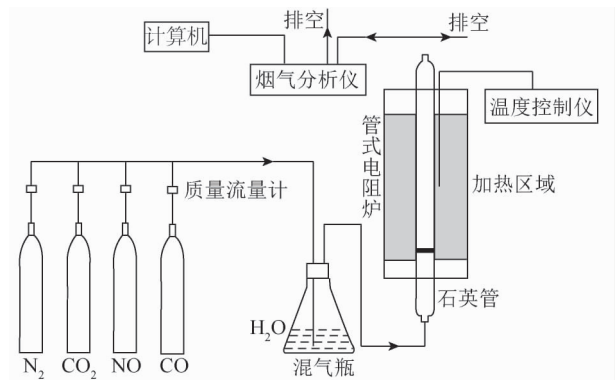


图 1 试验系统示意

Fig.1 Schematic of experimental system

### 1.2 试验方法

试验所用气体均由气瓶提供,由于分解炉烟气中氮氧化物 90% 以上为 NO,因此本试验主要研究 CO 还原 NO。试验中用 15% CO<sub>2</sub>、2% H<sub>2</sub>O、0.1% NO 及平衡气 N<sub>2</sub> 模拟水泥分解炉中实际烟气,其中 H<sub>2</sub>O 由混合气瓶中的气体携带进入试验系统,还原性气体为 CO。所有气体(H<sub>2</sub>O 除外)流量通过质量流量计调控,试验过程中保持气体流量恒定,总流量为 3.5 L/min。试验用 CaO 为上海沪泰精化科技研究所生产,分析纯 ≥ 98.5%。CaO 用磨煤机研磨后,经筛分选取粒径 125~150 μm,通过试验表明该粒径的 CaO 颗粒可实现流化。CaO 由石英管上部加入,

加入量为 6 g ,CaO 在反应段处于悬浮状态。各试验气体首先进入混气瓶中混合,而后将混合气送入试验系统中。气体由石英管底部送入,由顶部排出,部分进入烟气分析仪,多余部分排空。

本文以 NO 还原效率作为判断脱硝效果的依据,NO 还原效率的计算公式为

$$\eta(\text{NO}) = \frac{C_{\text{in}}(\text{NO}) - C_{\text{out}}(\text{NO})}{C_{\text{in}}(\text{NO})} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $C_{\text{in}}(\text{NO})$  为入口 NO 浓度;  $C_{\text{out}}(\text{NO})$  为出口 NO 浓度;  $\eta(\text{NO})$  为 NO 还原效率。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 CO 浓度的影响

目前,我国水泥窑炉主要以煤粉为燃料,煤粉燃烧可产生大量 CO,炉中气氛和温度不同,产生的 CO 浓度不同。因此,首先研究了水泥分解炉中不同 CO 浓度对脱硝的影响。本文在 900 °C、CO<sub>2</sub> 体积分数为 15%、NO 初始浓度为  $1\ 000 \times 10^{-6}$  的条件下研究 CO 浓度为 1%~5% 时的脱硝效果。

不同 CO 浓度对脱硝的影响规律如图 2 所示。可知在还原性气氛中,CO 可还原 NO,且随着 CO 体积分数增加,NO 的还原效率升高。试验结果表明:CO 浓度为 1% 时,几乎无脱硝效果;CO 体积分数为 5% 时,NO 还原效率达 38%;CO 浓度由 1% 增至 5%,NO 还原效率提高了 37.8%,表明 CO 可有效脱除 NO。

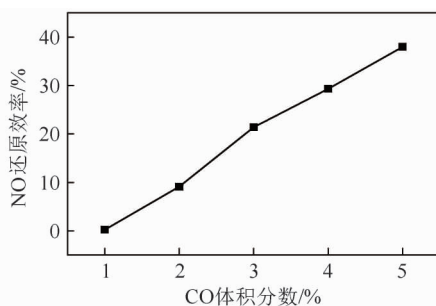


图 2 CO 浓度对脱硝效率的影响

Fig.2 Effect of CO concentration on NO reduction efficiencies

为了探究 CO 还原 NO 的主要反应,利用 Chemkin 软件模拟了 CO 体积分数为 3% 时 CO 脱硝的反应路径。Chemkin 是一种求解复杂化学反应问题的软件包,常用于模拟燃烧过程、催化过程、化学气相沉积及其他化学反应过程。模拟采用一维柱塞流反应器(plug-flow reactor, PFR),条件与试验条件完全相同,机理采用 GRI 3.0 机理,该机理包括 53 个组分,325 个反应<sup>[19]</sup>。

CO 脱硝过程中 N 转化的主要反应路径如图 3

所示,其中箭头方向为反应方向,百分数为物质或自由基在反应中的比重。

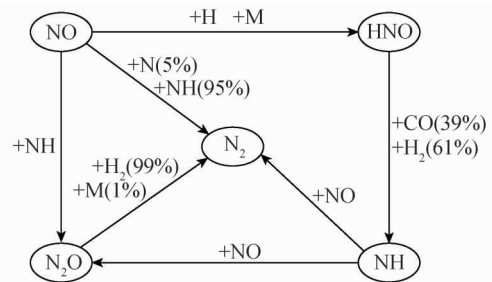
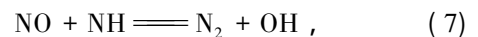
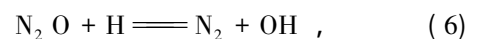
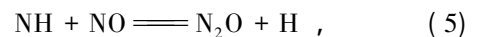
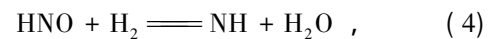
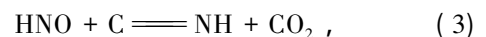


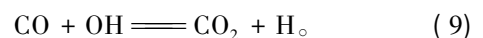
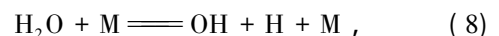
图 3 CO 脱硝过程中 N 转化主要反应路径

Fig.3 Main reaction path of N conversion for NO reduction by CO

由图 3 可知,NO 主要通过 4 条路径被还原为 N<sub>2</sub>,其中 NO→N<sub>2</sub>O→N<sub>2</sub>和 NO→HNO→NH→N<sub>2</sub>为最主要反应路径,这与 Li Sen 等<sup>[20]</sup>的研究结果相似。其具体反应如下:



可以看出,NH 和 H 对 NO 还原具有重要作用,是 CO 还原 NO 中的关键自由基,这与刘栗等<sup>[21]</sup>的研究相似。其中 H 的唯一来源是 H<sub>2</sub>O,高温下 H<sub>2</sub>O 分解为 OH 和 H,CO 与 OH 反应生成 CO<sub>2</sub>和 H。具体反应如下:



CO 与 OH 反应促进了反应(8)的进行,从而促进 H 生成,H 浓度升高,有利于 NO 的还原。质量定律指出,在一定温度下,化学反应速率与所有参与反应的物质浓度的乘积成正比,随着 CO 体积分数升高,式(9)的反应速率提高,更多的 H 生成,促进了反应(2)~(7)向右进行,从而促进 NO 还原,因此,CO 体积分数增加,NO 脱除率提高。

### 2.2 CaO 的影响

水泥分解炉的作用是完成生料的分解,生料成分中 75%~80% 为 CaCO<sub>3</sub>,分解炉中主要是 CaCO<sub>3</sub>的分解。600 °C 时 CaCO<sub>3</sub>已开始分解,高温下分解为 CaO 和 CO<sub>2</sub>,在分解炉中 CaCO<sub>3</sub>和 CaO 共同存在,但以 CaO 为主。因此,本文重点研究 900 °C、CO<sub>2</sub> 体积分数为 15%、CO 体积分数为 1%~5% 时,CaO 对脱硝效果的影响。

图 4 为添加 CaO 后 CO 对脱硝效率的影响。可知,CaO 存在时,随着 CO 体积分数增加,脱硝效果

增强。与不添加 CaO 时对比发现,添加 CaO 后,CO 还原 NO 的作用增强,脱硝效率提高,说明 CaO 促进了 CO 还原 NO,可催化 CO 与 NO 反应。试验结果表明:加入 CaO 后,CO 体积分数大于 3% 左右时,脱硝效率均大于 30%;CO 体积分数为 4% 时,脱硝效率为 36.7%;CO 体积分数为 5% 时,脱硝效率高达 57.7%。不添加 CaO 时,CO 体积分数不超过 4% 时的脱硝效率均小于 30%。另外,随 CO 体积分数升高,CaO 的催化作用增强,加入 CaO 后,CO 体积分数为 3%,NO 的还原效率提高了 21.26%;CO 体积分数为 4%,NO 的还原效率提高了 24.78%,表明 CaO 对高 CO 浓度脱硝具有更强的催化作用。式 (10) 为 CaO 催化 CO 脱硝过程。

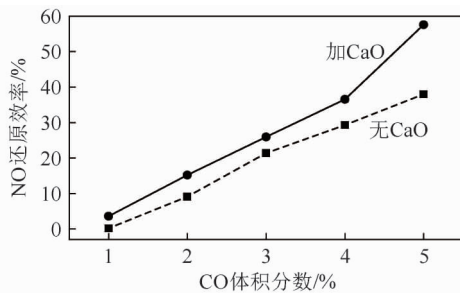
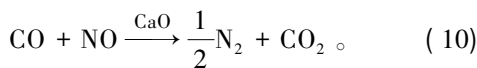


图 4 CaO 对脱硝率的影响

Fig.4 Effect of CaO on NO reduction efficiency

CaO 对 CO 还原 NO 具较强的催化作用,CaO 可催化 CO 还原脱硝的原因是:CaO 在 NO 与 CO 之间传递氧。高温下 NO 化学键断裂后,O 吸附在 CaO 上形成 CaO(O),而 CaO(O) 被周围的 CO 包围,CO 得到 CaO(O) 上的 O 后形成 CO<sub>2</sub> 和 CaO,N 之间相互结合生成 N<sub>2</sub>,完成 CaO 对氧的传递。在高 CO 体积分数下,CaO(O) 周围的 CO 增多,CaO 传递 O 的速度加快,CO 消耗的 O 浓度增加,导致 NO 消耗量增加,CO 还原作用增强。

CaO 催化 CO 脱硝可能存在另一个原因:CaO 存在时,试验中测得出口烟气中含有少量 HCN,且随着 CO 体积分数增加,HCN 浓度增加,如图 5 所示。试验配气中无 HCN,说明加入 CaO 后产生了 HCN。有研究表明<sup>[21-22]</sup>,HCN 可吸附于 CaO 表面并与 CaO 反应生成 CaCN<sub>2</sub>。CaCN<sub>2</sub> 性质较活泼,遇气体易反应生成 NH<sub>3</sub>,在还原气氛中,NH<sub>3</sub> 吸附到 -CaO 表面并发生反应生成 Ca(N),最终生成 N<sub>2</sub>,具体反应如下:

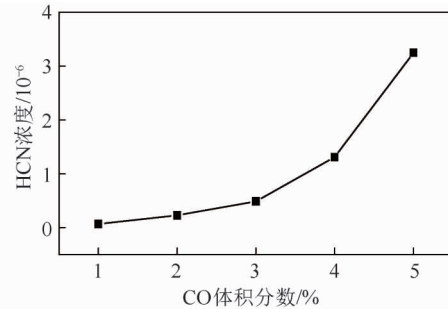
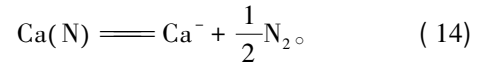
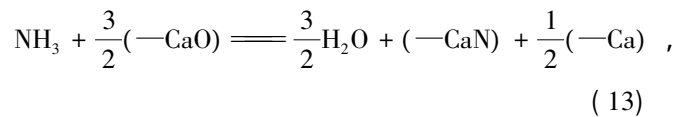
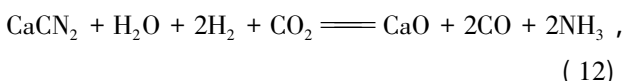
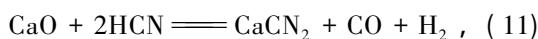


图 5 CaO 存在时 HCN 浓度随 CO 体积分数的变化

Fig.5 Change of HCN concentration with CO concentration in the presence of CaO

### 2.3 温度的影响

温度是影响脱硝的重要因素,一般认为温度越高脱硝效果越好,水泥分解炉中温度为 850 ~ 1 100 °C。为模拟分解炉中真实运行状况,本文主要研究了 CO 体积分数为 4%、CO<sub>2</sub> 体积分数为 15%、850 ~ 1 050 °C 时的 CO 还原 NO 效果。

图 6 为脱硝效率随温度变化曲线,可以看出,在试验温度范围内,随着温度升高,脱硝效率提高,CO 的脱硝作用增强。在其他条件不变的情况下,无 CaO 存在时,850 °C 的脱硝效率为 19.67%;1 050 °C 的脱硝效率达 72.56%。加入 CaO 后,超过 900 °C 时,CO 脱硝效率明显提高,说明高温区域,CaO 具有显著的催化作用;1 050 °C 脱硝效率提高了 7.56%。

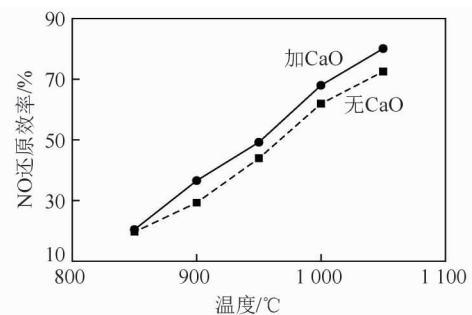


图 6 温度对脱硝效率的影响

Fig.6 Effect of temperature on NO reduction efficiencies

CO 脱硝过程中会生成大量中间物质,如 NH 和 H。化学反应速率对中间物质的生成以及还原 NO 具有重要影响。阿累尼乌斯定律指出,化学反应速率受反应温度的影响,随反应温度升高,反应速率呈指数增长。随着温度升高,H 和 NH 的生成速率加快,单位时间内 NH 和 H 的生成量增加,从而提高了

NO 的还原效率。CaO 存在时,温度升高,NO 更易解离性化学吸附于 CaO 上形成 CaO(O),CaO(O) 浓度提高;温度升高,CO 热运动增强,CO 与 CaO(O) 更易接触,提高了 CaO 传递 O 的速度,从而强化了脱硝。另外,随着温度升高,HCN 浓度提高(图 7),低温区几乎没有 HCN 产生。HCN 浓度提高促进反应(11)~(14)向右进行,提高催化效果。

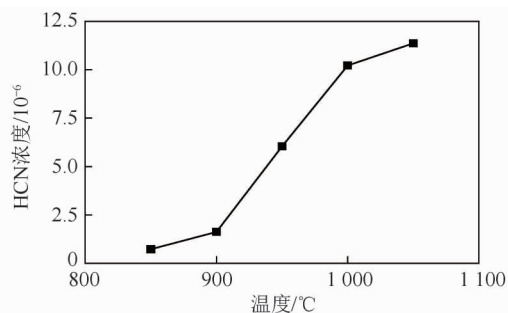


图7 加CaO时HCN浓度随温度的变化

Fig.7 Change of HCN concentration with temperature in the presence of CaO

### 3 结 论

1) CO 在还原气氛中具有较强的脱硝作用,CO 体积分数对脱硝具有较大影响,随着 CO 浓度增加,脱硝效率提高。CO 体积分数为 1% 时,几乎无脱硝效果;CO 体积分数为 5% 时,NO 还原效率达 38%;CO 浓度由 1% 增至 5%,NO 还原效率提高了 37.8%,表明 CO 可以有效脱除 NO。

2) CO 脱硝过程中产生 NH 和 H 等中间产物,NH 和 H 对 CO 还原 NO 具有重要作用;HCN 可吸附于 CaO 表面并与 CaO 反应,在还原气氛中,NH<sub>3</sub> 吸附到—CaO 表面并发生反应生成 Ca(N),最终生成 N<sub>2</sub>。NO 主要通过 4 条路径被还原为 N<sub>2</sub>,其中 NO→N<sub>2</sub>O→N<sub>2</sub> 和 NO→HNO→NH→N<sub>2</sub> 为最主要反应路径。

3) CaO 具有催化 CO 还原 NO 的作用,CO 体积分数越高,CaO 的催化作用越强。在分解炉中采取 CO 再燃脱硝,可大大降低 NO 排放浓度。温度超过 900 °C 时,CO 脱硝效率明显提高,说明高温区域,CaO 具有显著的催化作用,温度为 1 050 °C,脱硝效率提高了 7.56%。

### 参考文献(References):

[1] 丁奇生,王亚丽,崔素萍. 水泥预分解窑煅烧技术及装备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 261-267.  
DING Qisheng, WANG Yali, CUI Suping. Calcination technology and equipment of cement precalciner kiln [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 261-267.

[2] 国家环境保护总局. 水泥工业大气污染物排放标准: GB/T 4915—2013 [S]. 北京: 中国国家标准出版社, 2013.  
State Environmental Protection Administration. Emission standard of air pollutants for cement industry: GB/T 4915—2013 [S]. Beijing: China National Standards Press, 2013.

[3] LIU H, EDWARD H, BERNARD M G. Evaluation of the optimal fuel characteristics for efficient NO reduction by coal reburning [J]. Fuel, 1997, 76(11): 985-993.

[4] LIU Y H, ZHANG X Y, LIU I H. NO reduction behavior coal powder used for reburning [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 35(5): 523-527.

[5] 斯东波,池作和,黄郁明,等. 200 MW 煤粉锅炉实施超细煤粉再燃的试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 1-6.  
SI Dongpo, CHI Zuohe, HUANG Yuming, et al. Experimental study on micronized coal reburning for a 200 MW coal-fired boiler [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(26): 1-6.

[6] TEODORA R, JOHN C K, PHILIP C. M. Nitrous oxide emissions control by reburning [J]. Combustion and Flame, 1996, 107: 453-463.

[7] 周俊虎,刘茂省,周志军,等. 常规煤粉再燃技术在电站锅炉上的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(26): 14-18.  
ZHOU Junhu, LIU Maosheng, ZHOU Zhijun, et al. Utilization of conventional pulverized-coal reburning on a plant boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(26): 14-18.

[8] 高正阳,阎维平. 煤粉再燃过程再燃煤比脱硝量的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 32-36.  
GAO Zhengyang, YAN Weiping. Experimental investigation on specific NO reduction quantity for coal reburning process [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 32-36.

[9] 王世杰,陆继东,胡芝娟,等. 煤焦还原 NO 的试验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 21-23.  
WANG Shijie, LU Jidong, HU Zhijuan, et al. Study on NO reduction by char [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(1): 21-23.

[10] 吕刚,陆继东,谢新华,等. 水泥分解炉内煤焦及煤粉还原 NO 的试验 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 124-128.  
LYU Gang, LU Jidong, XIE Xinhua, et al. Experiment of the reduction of NO by coal in precalciners [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(8): 124-128.

[11] 王智化,周俊虎,张彦威,等. 煤粉再燃还原 NO<sub>x</sub> 动态过程试验研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(8): 1411-1416.  
WANG Zhihua, ZHOU Junhu, ZHANG Yanwei, et al. Experimental study on coal reburning dynamic process for NO<sub>x</sub> reduction [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(8): 1411-1416.

[12] EDUARDO V, ULRIK S, ANKER D J. Experimental and modeling study of biomass reburning [J]. Energy and Fuels, 2004, 18(5): 1442-1450.

[13] 苏胜,何金亮,向军,等. 生物燃料再燃脱硝特性实验研究

- [J]. 中国电机工程学报 2011 31( 8) : 38-44.  
SU Sheng ,HE Jingliang ,XIANG Jun ,et al. Experimental study on characteristics of nitrogen oxides reduction by biofuel reburning [J]. Proceedings of the CSEE 2011 31( 8) : 38-44.
- [14] 沈伯雄 姚强. 天然气再燃脱硝的原理和技术 [J]. 热能动力工程 2001 ,17( 1) : 7-9.  
SHENG Boxiong ,YAO Qiang. Basic Principles and technology of denitration through the reburning of natural gas [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2001 ,17( 1) : 7-9.
- [15] 钟北京 傅维标. 气体燃料再燃对 NO<sub>x</sub> 还原的影响 [J]. 热能动力工程 1999 ,14( 6) : 419-423.  
ZHONG Beijing ,FU Weibiao. Effect of gas fuel reburning on NO<sub>x</sub> reduction [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power ,1999 ,14( 6) : 419-423.
- [16] 钟北京 施卫伟 傅维标. 烟煤焦催化还原 NO<sub>x</sub> 实验研究 [J]. 燃烧科学与技术 2001 7( 1) : 44-47.  
ZHONG Beijing ,SHI Weidong ,FU Weibiao. Experimental study of catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by bituminous Char [J]. Journal of Combustion Science and Technology 2001 7( 1) : 44-47.
- [17] 赵宗彬 李文 李保庆. 半焦负载钙和铁催化还原 NO 的研究 [J]. 环境科学 2001 22( 5) : 17-20.  
ZHAO Zongbin ,LI Wen ,LI Baoqing. Catalytic reduction of NO by chars loaded with Ca and Fe [J]. Environmental Science , 2001 22( 5) : 17-20.
- [18] ZHAO Zongbin ,LI Wen ,LI Baoqing . Catalytic reduction of NO by coal chars loaded with Ca and Fe in various atmospheres [J]. Fuel 2002 81: 1559-1564.
- [19] GREGORY P S ,DAVID M G. GRI - Mesh 3.0 [EB/OL]. [2011-05-12]. <http://www.me.berkeley.edu/gri~mesh/version30/text30.html>.
- [20] LI Sen ,WEI Xiaolin ,GUO Xiaofeng . Effect of H<sub>2</sub>O vapor on NO reduction by CO: Experimental and kinetic modeling study [J]. Energy Fuels 2012 26: 4277-4283.
- [21] 刘粟 邱朋华 吴少华. 煤热解挥发分还原 NO 的反应过程分析 [J]. 工程热物理学报 2010 31( 2) : 331-334.  
LIU Li ,QIU Penghua ,WU Shaohua. Analysis of NO reduction by volatile matter from coal pyrolysis [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2010 31( 2) : 331-334.
- [22] JENSEN A ,JOHNSSON J E ,DAM - JOHANSEN K. Catalytic and gas - solid reactions involving HCN over limestone [J]. AIChE Journal ,1997 43( 11) : 3070-3084.
- [23] HANSEN P F B ,DAM - JOHANSEN K ,JOHNSSON J E. Catalytic reduction of NO and N<sub>2</sub>O on limestone during sulfur capture under fluidized bed combustion condition [J]. Chemical Engineering Science ,1992 47: 2419-2424.