

循环流化床喷射混合还原剂的脱硝反应试验研究

林 晨,张 曜,于 娟,冯 帆,张忠孝

(上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240)

摘要:随着大气污染形势日趋严峻,控制 NO_x 排放的相关环保标准也日益严格。选择性非催化还原技术(SNCR)可以有效降低 NO_x 排放,但受限于反应温度窗口狭窄,在流化床中的脱硝效率有限。研究表明 H_2 、碳氢化合物和 CO 作为添加剂时,可以拓宽 SNCR 的反应温度窗口,促使低温下的脱硝反应得以进行;但在循环流化床热态试验系统上,鲜有使用工业副产品如煤气化合成气作为添加剂,分析 H_2 、碳氢化合物和 CO 共存时对 SNCR 产生的影响效果。为了探究合成气与氨构成的混合还原剂对脱硝反应的影响,在循环流化床热态试验系统上,对比了合成气与氨水构成的混合还原剂和氨水的脱硝效果,同时考虑了反应温度、NSR、添加剂浓度、添加剂喷射位置等影响因素。结果表明:在 840°C 低温下,使用氨还原剂的 SNCR 反应已经失效,还会增加 NO_x 排放量。混合还原剂可大幅提高低温区的脱硝效率,添加合成气能促使 SNCR 反应在此较低温度下进行。 840°C 时,脱硝效率从 0 提升至 $44\% \sim 62\%$ 。在氨氮摩尔比较低的情况下,如 $\text{NSR}=0.5$ 或 1.0 、合成气为 120×10^{-6} 时,合成气喷射位置的不同对 NO_x 排放量影响不大;但当氨过量时($\text{NSR} > 1.0$),将合成气喷射至分离器前温度较低的烟气管道中,能增强氨的选择性,进一步降低 NO_x 排放量。当 $\text{NSR}=1.5$ 时, NO_x 的排放量达到了最低 $101 \sim 110 \text{ mg}/\text{m}^3$,相比炉膛出口处喷射降低了约 $60 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。独立喷射氨水与合成气使其在炉内混合的方式,比氨气与合成气预混后喷射方式好, NO_x 排放量会降低 $60 \text{ mg}/\text{m}^3$ 左右。合成气添加剂与氨存在很强的相互协同、相互促进作用,合成气可以提高氨还原剂的选择性。

关键词:循环流化床;脱硝;混合还原剂;氨水;反应温度;氨氮摩尔比(NSR)

中图分类号:TK223

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2020)03-0114-06

Experimental study on denitration reaction of injecting mixed reductant in circulating fluidized bed

LIN Chen, ZHANG Yao, YU Juan, FENG Fan, ZHANG Zhongxiao

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the increasingly severe situation of air pollution, the relevant environmental protection standards for controlling NO_x emissions have become increasingly strict. Selective non-catalytic reduction(SNCR) can effectively reduce NO_x emissions, but the denitration efficiency in fluidized bed is limited due to the narrow reaction temperature window. Previous studies have proved that when H_2 , hydrocarbon and CO are used as additives, the reaction temperature window of SNCR can be can widened and the denitration reaction at low temperature can be carried out. However, in the thermal test system of circulating fluidized bed, few studies have been carried out to analyze the effect of coexisting H_2 , hydrocarbon and CO on SNCR by using industrial by-products such as coal gasification syngas as additives. In order to study the influence of the mixture reducing agent composed of syngas and ammonia on the denitrification reaction, the denitrification effects of ammonia water and the mixed reductant composed of syngas and ammonia water were compared in a combustion experimental system of circulating fluidized bed. At the same time, the factors such as reaction temperature, molar ratio of ammonia to NO_x (NSR), addi-

收稿日期:2020-04-05;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CFB20040502

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600202)

作者简介:林 晨(1994—),男,福建福州人,硕士研究生,从事 NO_x 超低排放研究。E-mail:lynch0923@163.com。通讯作者:

于娟,副教授,研究方向为 NO_x 超低排放、 CO_2 捕集与利用。E-mail:yujuan@sjtu.edu.cn

引用格式:林晨,张曜,于娟,等.循环流化床喷射混合还原剂的脱硝反应试验研究[J].洁净煤技术,2020,26(3):114-119.

LIN Chen, ZHANG Yao, YU Juan, et al. Experimental study on denitration reaction of injecting mixed reductant in circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 114-119.



移动阅读

tive concentration and injection location were considered. The experimental results show that at low temperature of 840 °C, the SNCR reaction using ammonia reducing agent not only fails, but also the NO_x emission increases. The denitrification efficiency in the low temperature zone can be greatly improved by mixing reductants, and the addition of syngas can promote the SNCR reaction to be carried out at a lower temperature. At 840 °C, the denitration efficiency increases from 0 to 44%–62%. When the NSR is relatively low, such as $\text{NSR} = 0.5$ or 1.0 , and the syngas is 120×10^{-6} , the different syngas injection positions have little impact on NO_x emissions. However, when ammonia is in excess ($\text{NSR} > 1.0$), the syngas is injected into the flue gas pipe with a low temperature in front of the separator to enhance ammonia selectivity and further reduce NO_x emissions. When $\text{NSR} = 1.5$, NO_x emissions reaches a minimum of $101 - 110 \text{ mg/m}^3$, which is about 60 mg/m^3 lower than injection at the outlet of the furnace. The way of injecting ammonia water and syngas to independently mix in the furnace has a better denitration effect than the way of injecting premixed ammonia and syngas. NO_x emissions are about 60 mg/m^3 lower than that of premixed injection. Syngas additive and ammonia have a strong synergistic and promoting effect on each other. Synthesis gas can improve the selectivity of ammonia reducing agent.

Key words: circulating fluidized bed; denitration; mixed reducing agent; ammonia; reaction temperature; molar ratio of ammonia to NO_x (NSR)

0 引言

随着大气污染形势日趋严峻, NO_x 排放法规日益严格。选择性非催化还原技术(SNCR)是流化床锅炉中广泛应用的低成本烟气脱硝技术,具有占地面积小、无需催化剂、设施简单等优点。但流化床负荷变化、炉内温度改变时,SNCR 狭窄的反应温度区间(850~1 100 °C)容易使其失效。此外,SNCR 在实际锅炉中的脱硝效率有限,仅有 50%^[1-3],难以满足低负荷运行时的流化床锅炉工况。

已有研究表明, H_2 、 CH_4 、 CO 作为还原剂的添加剂可以改善温度窗口,提高脱硝效率。Lyon 等^[4]研究表明添加 H_2 后温度窗口向低温方向移动;曹庆喜^[5]研究发现,加入氢气后,SNCR 的温度窗口明显变窄,且随氢气浓度增大而持续变窄;吕洪坤^[6]试验和模拟计算结果显示, H_2 的参与能促使 SNCR 反应在较低温度下进行,添加的 H_2 浓度合适时可以扩大反应窗口。Hemberger 等^[7]针对甲烷和乙烷参与的 SNCR 反应进行了试验和计算研究,结果表明碳氢化合物的参与使得 SNCR 反应温度窗口向低温方向移动,同时氨逃逸量也有所下降;Bae^[8]研究发现,甲烷添加剂可以使 NO 还原的最佳反应温度降低,同时增宽反应温度窗口;Suhlmann 等^[9]在石英管反应器中,研究了 CO 添加剂对 SNCR 反应的影响,发现 CO 可促使脱硝反应的温度向低温移动 100 °C 左右;Javed 等^[10]发现加入 CO 能使 SNCR 的反应温度窗口向低温移动 200 °C 以上;高亮^[11]研究表明,添加 CO 可以改善低温下氨气的还原能力,但会抑制高温下 NO_x 的还原。

如上所述,添加剂如氢气、碳氢化合物和 CO 可以改善 SNCR 反应条件,但以往研究大多针对单一的添加剂,并未使用包含上述有效气体添加剂的工

业副产品,如煤气化气、焦炉煤气作为整体添加剂。此类研究大多在一维反应器中进行,鲜见在具有循环物料、炉内流场相对复杂的循环流化床系统上进行相关试验。因此本文在自行搭建的循环流化床热态试验系统上,针对反应温度、氨氮摩尔比、添加剂浓度、添加剂喷射位置等影响因素,对比了氨水以及合成气与氨水构成的混合还原剂的脱硝效果。

1 试验

1.1 试验系统

本文在自行搭建的循环流化床热态试验系统上进行试验,系统示意如图 1 所示。使用的还原剂为氨水与合成气添加剂构成的混合还原剂,合成气的有效气体成分参照典型工业煤气化气、焦炉煤气的成分^[12],具体组成见表 1。试验煤种为河南焦作无烟煤,煤质的工业分析和元素分析见表 2。

表 1 煤气化合成气组分及摩尔分数

Table 1 Composition and mole fraction of coal gasification syngas

合成气组分	H_2	CO	CH_4	N_2
摩尔分数/%	0.5	0.33	0.17	Balance

表 2 试验用煤的工业和元素分析

Table 2 Proximate and ultimately analysis of experiment coal

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/$
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}	($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
7.00	21.30	5.00	66.70	66.10	2.20	2.00	1.00	0.40	22.90

1.2 试验方法

试验时,首先向炉膛内投入石英砂床料,将管式电炉和预热炉设置到所需温度,同时打开风机为系统中所有的管道和设备预热。待炉膛平均温度大于 800 °C 后,投入煤粉,使用 S 型铂铑热电偶对炉膛温

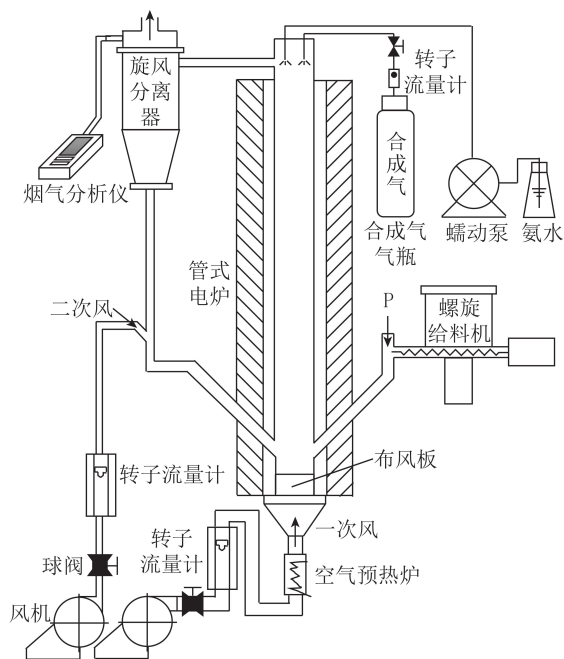


图1 循环流化床试验台系统示意

Fig.1 Schematic diagram of circulating fluidized bed experimental system

度实时监测。调节供风量,控制分离器后烟气出口处烟气的氧含量为 $(6\pm 0.5)\%$ 。当温度稳定于工况温度后,将氨水或混合还原剂喷入炉膛的烟气出口处,并用烟气分析仪对分离器后的烟气成分进行采集和分析。

烟气分析仪测得数据中, NO_x 以 10^{-6} 显示,按照国家固定污染源烟气排放监测技术规范^[13-14],折算至干基、标态、6% O_2 的 NO_x 浓度(mg/Nm^3),折算公式如下:

$$\rho(\text{NO}_x) = 2.05\psi(\text{NO}_x) \frac{21 - 6}{21 - \psi(\text{O}_2)} \quad (1)$$

式中, $\rho(\text{NO}_x)$ 为标准状态、6%氧量、干烟气下 NO_x 浓度, mg/m^3 ; $\psi(\text{NO}_x)$ 为实测干烟气中 NO 体积分数, 10^{-6} ; $\psi(\text{O}_2)$ 为实测干烟气中氧含量,%;2.05为 NO_2 由体积分数(10^{-6})转化为质量浓度(mg/m^3)的转换系数。

在SNCR技术中,氨氮摩尔比(NSR)是一个重要影响因素。NSR的定义是喷入的氨还原剂中有效成分与烟气中 NO_x 浓度的摩尔比。还原剂的脱硝效率按式(2)计算。

$$\eta(\text{NO}_x) = \left[1 - \frac{1 - \rho_b(\text{NO}_x)}{1 - \rho_a(\text{NO}_x)} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\eta(\text{NO}_x)$ 为 NO_x 脱除效率,%; $\rho_a(\text{NO}_x)$ 为不喷射任何还原剂时 NO_x 的生成量, mg/m^3 ; $\rho_b(\text{NO}_x)$ 为喷射还原剂后 NO_x 的排放量, mg/m^3 。

2 结果及分析

炉膛温度对于循环流化床锅炉运行和SNCR脱硝反应都极其重要,试验过程中要严格控制温度。经测试,投入床料和燃料后,炉内温度差在 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,具有较好的均匀性。

2.1 添加剂浓度的影响

840 $^\circ\text{C}$ 时,同时喷射合成气和氨还原剂的 NO_x 排放量和脱硝效率随氨氮摩尔比的变化如图2所示。喷入合成气的浓度是合成气中除去 N_2 的有效成分,分别是 240×10^{-6} 和 120×10^{-6} 。在840 $^\circ\text{C}$ 低温下,使用单一氨还原剂的SNCR反应已失效,喷射氨还原剂不但无法降低 NO_x ,还会增加 NO_x 排放量,造成大量氨漏失。但添加合成气能促使SNCR反应在较低温度下进行。氨氮摩尔比从0.5升至1.0时,混合还原剂的脱硝效率不断提高。NSR=1.0时,添加 240×10^{-6} 和 120×10^{-6} 合成气的 NO_x 排放量分别降至158和107 mg/m^3 ,脱硝效率达到44%和62%。但NSR继续提高至1.5时,其还原作用整体降低。这主要是由于840 $^\circ\text{C}$ 、氨氮摩尔比为1.0时,混合还原剂的还原效果已达到此试验工况的上限;喷入过量的氨会导致其选择性下降,发生氧化作用而生成 NO_x ^[15]。

由图2(b)可知, 120×10^{-6} 合成气的脱硝效率大于 240×10^{-6} 合成气,这主要是由于合成气有效成分 H_2 、 CH_4 和 CO 的脱硝机理和效果不同,合成气体现其综合作用的效果。曹庆喜^[5]和吕洪坤^[6]试验研究和模拟计算均显示,随着 H_2 添加剂浓度的增加,脱硝效率呈下降趋势;随 CO 添加剂浓度的增加,脱硝效率呈上升趋势,而 CH_4 对脱硝效率影响不大。合成气中氢气含量最高,当合成气浓度从 120×10^{-6} 增至 240×10^{-6} 时,氢气主导了脱硝的综合效果。

这说明合成气添加剂与氨存在很强的相互协同、促进作用。此外,添加合成气后,氨从被氧化转变为大量还原 NO_x ,说明合成气提高了氨还原剂的选择性。实际锅炉运行中,添加合成气不仅能提高脱硝效率,还可以节约氨用量、降低氨逃逸,达到节省成本、延长锅炉设备寿命的目的。

添加不同浓度合成气,在一定反应温度下,喷射具有最高脱硝效率的NSR时, NO_x 的排放量如图3所示。可知根据不同温度工况优选NSR后,使用不同浓度合成气所能达到的最低 NO_x 排放。整体来说,与单纯使用氨还原剂相比,添加合成气后均不同程度降低了烟气中 NO_x 。反应温度在860~910 $^\circ\text{C}$

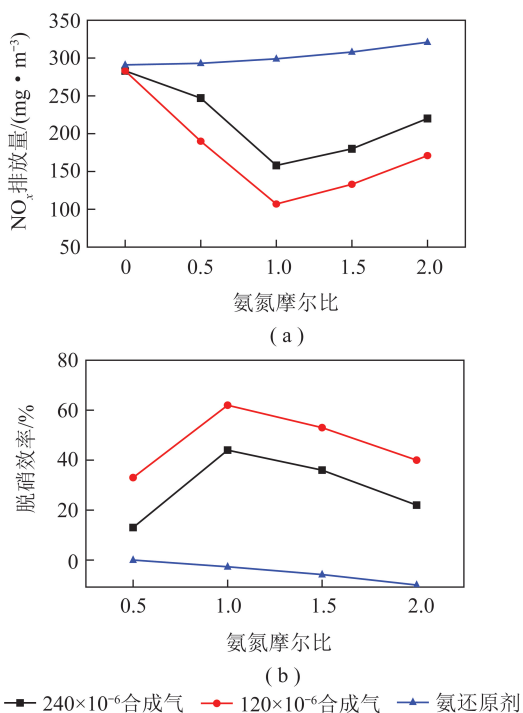


图2 840 °C下添加不同浓度合成气时NO_x排放量和脱硝效率随NSR的变化

Fig.2 Change of NO_x emission and denitration efficiency with NSR of different concentration of syngas at 840 °C

时,氨本身的还原效率较高,添加合成气后NO_x降幅相对较小(15~90 mg/m³);在更高的温度区间,氨的还原效率快速下降,添加合成气后NO_x排放量最高降低300 mg/m³,降至124 mg/m³;在更低温度下(840 °C),氨还原剂失效,无法脱除NO_x,但喷射合成气后可促使反应进行,NO_x排放量最低降至107 mg/m³。反应温度超过900 °C的高温段,喷射120×10⁻⁶合成气的NO_x排放量超过了喷射240×10⁻⁶合成气。这主要是由于合成气的有效成分均为可燃气体,随温度上升,其在炉膛内参与燃烧反应的比例增加,而参加脱硝反应的比例下降。此时适当提高合成气的用量将有助于脱硝反应的进行,因此喷射240×10⁻⁶合成气的脱硝效果优于120×10⁻⁶合成气。综上所述,合成气的作用一方面体现在与氨的协同、促进作用,可有效提高脱硝效率;另一方面,SNCR技术的缺点是反应温度窗口狭窄,而合成气的参与可以明显拓宽SNCR的反应窗口。

工程应用中,使用合成气添加剂对于负荷灵活多变的流化床锅炉系统有实用意义。当流化床在较低负荷下运行时,炉膛温度有所下降。如云南某75 t/h循环流化床锅炉调节至低负荷燃烧运行时,炉膛温度在850~900 °C^[16];四川白马电站600 MW超临界循环流化床机组在60%额定负荷下运行时,炉

膛的平均温度为825.1~838.3 °C^[17];刘锁清等^[18]针对一台350 MW超临界循环流化床机组建模仿真,结果表明低负荷运行时,床温稳定在830 °C左右。较低的运行温度使传统SNCR技术失效。而本文使用的合成气是参照工业副产品,如煤气化气、焦炉煤气的成分,具有价格低廉、来源广泛的特性。添加合成气可在不过多增加成本的条件下,有效降低流化床锅炉低负荷运行时的NO_x排放量。

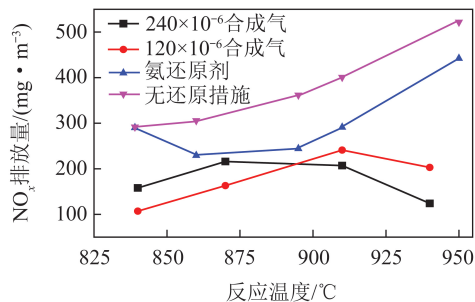


图3 搭配最佳脱硝效率NSR时,添加不同浓度合成气的NO_x排放量

Fig.3 NO_x emission of adding different concentration of syngas with best denitration efficiency NSR

2.2 添加剂喷射位置的影响

实际锅炉运行中,氨还原剂往往在分离器前后的管道中喷射,管道中的烟温相较炉膛温度有所降低。尤其是当循环流化床以低负荷工况运行时,此处的烟温常因不满足温度窗口使SNCR反应失效。云南铜业股份公司某75 t/h循环流化床在低负荷运行时,炉膛出口的烟温为580~800 °C^[16],低于SNCR反应的下限温度。在此背景下,本文分别在炉膛出口和后方分离器前的烟气管道中喷射合成气,考察其对脱硝反应的影响。经热电偶测定,炉膛出口处喷射点的温度为860 °C,烟气管道喷射点的温度为740 °C。

分别在炉膛出口(860 °C)和烟气管道(740 °C)处喷射不同浓度合成气时,NO_x排放量随NSR的变化如图4所示。在烟气管道中喷射有效成分120×10⁻⁶和240×10⁻⁶合成气的NO_x排放曲线比较接近。与炉膛出口喷射240×10⁻⁶合成气相比,在烟气管道中添加合成气能大幅降低NO_x排放量;与炉膛出口喷射120×10⁻⁶合成气相比,当NSR=0.5和1.0时,合成气喷射位置的不同对NO_x排放量影响不大。NSR进一步增加,在炉膛出口喷射合成气时,NO_x不再降低;而在烟气管道中加入合成气能增强氨的选择性。当NSR=1.5时,NO_x排放量最低,为101~110 mg/m³,比在炉膛出口处喷射降低了约60 mg/m³。与炉膛出口处添加合成气不同的是,在烟气管道中添加

240×10^{-6} 的合成气,其脱硝效率整体稍高于添加 120×10^{-6} 的合成气。

由此,在 NO_x 过量,氨还原剂不足的情况下,合成气的喷射位置对脱硝效率的影响不大;但当氨过量时($\text{NSR} > 1.0$),将合成气加入至烟气管道中,能增强氨的选择性,从而进一步降低 NO_x 的排放量。实际锅炉中,为保证脱硝效率,使用的氨通常是过量的, $\text{NSR} = 1.2 \sim 2.5$ ^[19-21],在负荷较低工况下,将合成气喷射至温度较低的烟气管道中效果更好。

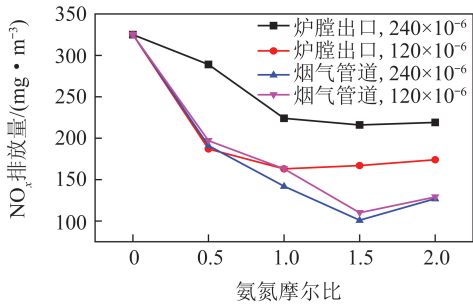


图4 不同合成气喷射位置 NO_x 排放量随 NSR 的变化

Fig.4 Change of NO_x emission with NSR at different locations of injecting syngas

2.3 添加剂与氨混合方式的影响

化学反应中,不同物质间良好的混合是反应的基本条件。流化床锅炉中,氨还原剂、合成气与烟气之间良好的混合不但可以加快 SNCR 反应速率,还能相对延长反应时间,有利于 NO_x 的脱除。试验对比了2种氨与合成气的混合方式,即独立喷射氨水与合成气使其在炉内混合,以及将氨气与合成气进行预混,一同喷射的 NO_x 脱除情况。

合成气添加剂与氨还原剂混合方式不同时 NO_x 排放量如图5所示。独立喷射为氨水和合成气分别独立喷射,在炉膛出口处混合的试验结果;预混喷射为氨气与合成气预先在钢瓶中混合,再一同供入炉膛内进行试验。理论上,预混的混合还原剂更有利于脱除 NO_x 。但从试验结果看,独立喷射氨水与合成气能达到更高的脱硝效率,在各温度下, NO_x 排放

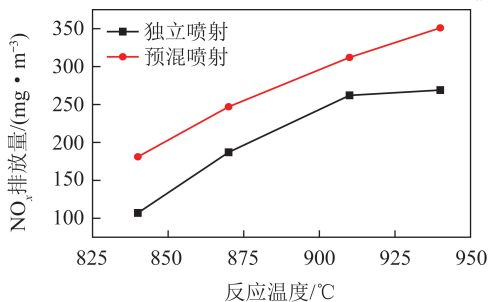


图5 合成气添加剂与氨还原剂混合方式不同时 NO_x 排放量

Fig.5 NO_x emission with different mixing method between syngas and ammonia

量比预混低 60 mg/m^3 左右。一方面,说明在良好运行的流化床系统上,传质过程足够剧烈,能快速有效混合独立喷入的氨水、合成气与烟气;另一方面,独立喷射脱硝效率更高可能是因为还原剂氨水喷入后,由于水的汽化吸热,造成局部温度降低,一定程度上抑制了 NO_x 生成和氨的氧化。有学者研究表明,在 SNCR 反应体系中,加入水蒸气能略微提高脱硝效率。而预混还原气中使用的是氨气。

3 结论

1) 合成气与氨水构成的混合还原剂可大幅提高低温区的脱硝效率,并促使脱硝反应在较低温度下进行。840 °C 时,脱硝效率从 0 提升至 44%~62%。

2) 在 NO_x 过量,氨还原剂不足的情况下,合成气的喷射位置对脱硝效率影响不大;但当氨过量时($\text{NSR} > 1.0$),将合成气喷射至分离器前温度较低的烟气管道中,能增强氨的选择性,进一步降低 NO_x 排放量。

3) 独立喷射氨水与合成气,使其在炉内混合的脱硝效果比氨气与合成气预混的喷射方式好。在各温度下, NO_x 排放量比预混低 60 mg/m^3 左右。

4) 合成气添加剂与氨存在很强的相互协同、促进作用。合成气可以提高氨还原剂的选择性。实际锅炉运行中,添加合成气不仅能提高脱硝效率,还可以节约氨用量、降低氨逃逸。

参考文献 (References):

- [1] 屈卫东,周建强,杨建华,等. 循环流化床锅炉 SNCR 脱硝系统优化及应用[J]. 热力发电,2014,43(1):133-136.
QU Weidong, ZHOU Jianqiang, YANG Jianhua, et al. SNCR denitrification system in CFB boilers: optimization and application[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(1): 133-136.
- [2] 李明波,杜向前,巴换粉,等. SNCR 脱硝技术在循环流化床锅炉上的应用[J]. 中国环保产业,2014(2):13-15.
LI Mingbo, DU Qianqian, BA Huanfen, et al. Application of SNCR denitration technology in circulating fluidized bed boiler[J]. China Environmental Protection Industry, 2014(2): 13-15.
- [3] 李秀平. SNCR 烟气脱硝技术在循环流化床锅炉中的应用[J]. 中国资源综合利用,2015(5):51-52.
LI Xiuping. Application of SNCR flue gas denitration technology in circulating fluidized bed boiler[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2015(5): 51-52.
- [4] LYON R K, HARDY J E. Discovery and development of the thermal De NO_x process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1986, 25(1): 19-24.
- [5] 曹庆喜. 气体添加剂对选择性非催化还原脱硝反应过程影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.

- CAO Qingxi. Effects of gaseous additives for selective non-catalytic reduction of NO_x [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [6] 吕洪坤. 选择性非催化还原与先进再燃技术的实验及机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
- LYU Hongkun. Experimental and mechanism study on selective non-catalytic reduction and advanced reburning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [7] HEMBERGER R, MURIS S, PLEBAN K U, et al. An experimental and modeling study of the selective noncatalytic reduction of NO by ammonia in the presence of hydrocarbons [J]. Combustion & Flame, 1994, 99(3/4): 660-668.
- [8] BAE S W, ROH S A, KIM, S D. NO removal by reducing agents and additives in the selective non-catalytic reduction (SNCR) process [J]. Chemosphere, 2006, 65(1): 170-175.
- [9] SUHLMANN J, ROTZOLL G. Experimental characterization of the influence of CO on the high-temperature reduction of NO by NH_3 [J]. Fuel, 1993, 72(2): 175-179.
- [10] JAVED M T, NIMMO W, GIBBS B M. Experimental and modeling study of the effect of CO and H_2 on the urea DeNO_x process in a 150 kW laboratory reactor [J]. Chemosphere, 2008, 70(6): 1059-1067.
- [11] 高亮, 王智化, 凌忠钱, 等. 炉内高温喷射尿素溶液脱硝机理及其影响因素 [J]. 锅炉技术, 2005(2): 72-75.
- GAO Liang, WANG Zhizhua, LING Zhongqian, et al. Mechanism and parameters study on NO_x abatement use urea as agent in boiler [J]. Boiler Technology, 2005(2): 72-75.
- [12] 杨春生. 煤制天然气产业发展前景分析 [J]. 中外能源, 2010(7): 41-46.
- YANG Chunsheng. Prospects for coal gasification in China [J]. Sino-global Energy, 2010(7): 41-46.
- [13] 中国环境监测总站, 上海市环境监测中心, 湖北省环境监测中心站, 河北省环境监测中心站. 固定污染源烟气(SO_2 、 NO_x 、颗粒物)排放连续监测技术规范; HJ 75—2017 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.
- China National Environmental Monitoring Center, Shanghai Environmental Monitoring Center, Hubei Environmental Monitoring Center Station, Hebei Environmental Monitoring Center Station. Specifications for continuous emissions monitoring of SO_2 , NO_x , and particulate matter in the flue gas emitted from stationary sources; HJ 75—2017 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017.
- [14] 雷琼. 燃气轮机氮氧化物排放规律及转化机制 [D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- LEI Qiong. Emission characteristics and conversion mechanism of nitrogen oxide from gas turbines [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [15] 王继华. SCR、SNCR 和 SNCR/SCR 烟气脱硝技术应用及比较 [J]. 电力科技与环保, 2018, 34(5): 39-40.
- WANG Jihua. Application and comparison of SCR, SNCR and SNCR/SCR flue gas denitration technology [J]. Electric Power Environmental Protection, 2018, 34(5): 39-40.
- [16] 欧阳晓辉, 陈金华. 75 t/h 循环流化床锅炉点火启动和低负荷运行的探讨 [J]. 工业设计, 2018(4): 141-142.
- OUYANG Xiaohui, CHEN Jinhua. Discussion on ignition and low load operation of 75 t/h CFB Boiler [J]. Industrial Design, 2018(4): 141-142.
- [17] 赵永宏, 韩平. 超临界循环流化床锅炉低负荷掺烧试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2016, 22(6): 76-81.
- ZHAO Yonghong, HAN Ping. Co-combustion tests under low load condition on supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(6): 76-81.
- [18] 刘锁清, 宋进玲, 张妍. 350 MW 超临界循环流化床锅炉床温动态仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 142-145, 170.
- LIU Suoqing, SONG Jinling, ZHANG Yan. Simulation study on the bed temperature dynamic characteristics of 350 MW CFB boiler [J]. Computer Simulation, 2016, 33(1): 142-145, 170.
- [19] JAVED M T, IRFAN N, GIBBS B M. Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 83(3): 251-289.
- [20] 赵强, 向轶, 张玉洋, 等. 煤泥循环流化床锅炉 SNCR 脱硝系统的优化措施研究 [J]. 工业加热, 2019, 48(3): 15-19.
- ZHAO Qiang, XIANG Yi, ZHANG Yuyang, et al. Research on optimization measures of SNCR denitrification system for coal slime circulating fluidized bed boiler [J]. Industrial Heating, 2019, 48(3): 15-19.
- [21] 史磊, 张世鑫. 循环流化床锅炉 SNCR 脱硝技术优化改造 [J]. 洁净煤技术, 2018, 24(6): 107-111.
- SHI Lei, ZHANG Shixin. Optimization of SNCR denitration technology in circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(6): 107-111.