

循环流化床床料与燃料粒径对脱硝反应的影响

张 曜, 于 娟, 林 晨, 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:随着能源动力产业的大力发展,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)能有效降低 NO_x 排放,为了进一步降低循环流化床的 NO_x 排放,需要从源头降低 NO_x 生成量,有必要研究床料及燃料粒径对脱硝反应的影响规律。利用循环流化床热态试验系统探讨了反应温度、氨氮摩尔比、床料粒径配比、煤粉平均粒径对 NO_x 排放的影响。结果表明:氨还原剂有效还原 NO_x 的温度为 $860\sim 950\text{ }^\circ\text{C}$;不同反应温度下,氨的脱硝效率随氨氮摩尔比的增大均先增大后减小;增大细颗粒床料占比能有效减少 NO_x 生成量、提高脱硝效率、降低 SNCR 活性反应温度;其中,细颗粒占比最大的床料脱硝效率随 NSR 的增加不断升高,当 $\text{NSR}=2.0$ 时,脱硝效率达到了最高 42% , NO_x 排放量降至 $215\text{ mg}/\text{m}^3$ 。适当减小煤粉平均粒径,可降低 NO_x 生成量并促使 SNCR 反应在较低温度下进行。各温度下,平均粒径 $330\text{ }\mu\text{m}$ 煤粉产生的 NO_x 较 $425\text{ }\mu\text{m}$ 煤粉下降 $10\sim 30\text{ mg}/\text{m}^3$ 。高温下,氨还原剂的脱硝效率随燃料粒径的增大明显上升;较低温度时,氨的脱硝效率随燃料粒径的增大可能下降。 $910\text{ }^\circ\text{C}$ 时,燃烧平均粒径 $600\text{ }\mu\text{m}$ 煤粉在不同 NSR 下,脱硝效率比燃烧 $425\text{ }\mu\text{m}$ 煤粉显著高出 $20\%\sim 30\%$; $860\text{ }^\circ\text{C}$ 时,平均粒径 $425\text{ }\mu\text{m}$ 煤粉脱硝效率明显低于 $330\text{ }\mu\text{m}$ 煤粉。造成这一现象的主要原因是,氨的还原反应与 NO_x 初始浓度和反应温度有关。在不同初始浓度和温度下氨具有不同的反应选择性。确定燃料粒径后,需要匹配合适的工艺操作参数以满足 NO_x 排放要求。

关键词:循环流化床;脱硝;反应温度;氨氮摩尔比;床料粒径;煤粉粒径

中图分类号:TK211;TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2020)06-0196-07

Influence of particle sizes of bed material and fuel on denitration reaction in circulating fluidized bed

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

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

Abstract: With the vigorous development of the energy power industry, the situation of air pollution becomes increasingly severe, and the relevant environmental protection standards for NO_x emission control become increasingly strict. Selective non-catalytic reduction technology(SNCR) can effectively reduce NO_x emission, but the production of NO_x needs to be reduced from the source in order to further reduce NO_x emission in circulating fluidized bed. Therefore, the influence law of bed material and fuel particle size on denitration reaction has great research value. The effects of reaction temperature, molar ratio of ammonia to NO_x , particle size ratio of bed material and average particle size of pulverized coal on NO_x emission were investigated by using the circulating fluidized bed thermal experiment system. The results show that the temperature range of NO_x reduction with ammonia reducing agent is $860\sim 950\text{ }^\circ\text{C}$. The denitration efficiency of ammonia increases first and then decreases with the increase of NSR at different reaction temperatures. Increasing the proportion of fine particle bed material can effectively reduce the production of NO_x , improve the denitration efficiency, and reduce the SNCR active reaction temperature. Among them, the denitrification efficiency of the bed material with the largest proportion of fine particles increases with the increase of NSR. When $\text{NSR}=2.0$, the denitrification efficiency reaches the highest 42% , and the NO_x emission decreases to $215\text{ mg}/\text{m}^3$. By appropri-

收稿日期:2020-04-05;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CFB20040501

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600202)

作者简介:张 曜(1996—),男,云南德宏人,硕士研究生,从事 NO_x 超低排放研究。E-mail:1504424744@qq.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:张曜,于娟,林晨,等.循环流化床床料与燃料粒径对脱硝反应的影响[J].洁净煤技术,2020,26(6):196-202.

ZHANG Yao, YU Juan, LIN Chen, et al. Influence of particle sizes of bed material and fuel on denitration reaction in circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 196-202.



移动阅读

ately reducing the average particle size of pulverized coal, the production of NO_x can be reduced and the SNCR reaction can be carried out at a lower temperature. At each temperature, the NO_x generated by pulverized coal with an average particle size of $330 \mu\text{m}$ decreases by $10\text{--}30 \text{ mg/m}^3$ compared with that of pulverized coal with an average particle size of $425 \mu\text{m}$. At high temperature, the denitration efficiency of ammonia reducing agent increases obviously with the increase of fuel particle size. At lower temperature, the denitration efficiency of ammonia may decrease with the increase of fuel particle size. At $910 \text{ }^\circ\text{C}$, the denitration efficiency of pulverized coal with an average particle size of $600 \mu\text{m}$ is significantly $20\%\text{--}30\%$ higher than that of pulverized coal with an average particle size of $425 \mu\text{m}$ under different NSR. At $860 \text{ }^\circ\text{C}$, the denitration efficiency of pulverized coal with an average particle size of $425 \mu\text{m}$ is significantly lower than that of pulverized coal with an average particle size of $330 \mu\text{m}$. The main reason for this phenomenon is that the reduction reaction of ammonia is related to the initial concentration of NO_x and the reaction temperature. Ammonia has different reaction selectivity at different initial concentration and temperature. After determining the fuel particle size, the appropriate process operating parameters should be matched to meet the NO_x emission requirements.

Key words: circulating fluidized bed; denitration; reaction temperature; molar ratio of ammonia to NO_x ; bed materials size; pulverized coal particle size

0 引 言

随着大气污染形势日趋紧张,循环流化床锅炉 NO_x 排放要求日益严格。选择性非催化还原技术(SNCR)是流化床锅炉中广泛应用的一种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。SNCR 技术虽然在理论上能达到 90% 以上的脱硝效率,但实际锅炉应用中,受温度场不均一、烟气与还原剂混合不充分、停留时间短等因素影响,综合脱硝效率往往只有 50% 左右^[1-3]。因此,为了提高脱硝效率,研究流化床中 SNCR 反应的影响因素十分重要。

不少学者研究了温度窗口、氨氮摩尔比(NSR)和 NO 初始浓度等影响因素对 SNCR 反应的影响。SNCR 的温度窗口在 $850\text{--}1\ 150 \text{ }^\circ\text{C}$, 最佳反应温度在 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右^[4-7]。金山^[8]在管壳式反应器上进行试验,结果表明氨氮摩尔比为 1.5 时,脱硝反应效果较好,具有较高脱硝效率。姜金东等^[9]针对 NO 初始浓度对脱硝反应的影响进行了数值模拟研究,结果表明当初始 NO 浓度高于一定值后,其对 SNCR 的影响变弱,对最大脱硝率几乎没有影响。不过,以上研究大多在一维反应器中进行,且着重在反应机理层面讨论。在循环流化床实际运行过程中,还要考虑相对复杂的气固流动和传热传质等因素。

薛现恒等^[10]基于一台实际流化床锅炉烟气流动特性,模拟研究了温度、氨氮摩尔比、 NO 初始浓度和 O_2 浓度对 SNCR 反应的影响规律。但为了简化,未考虑流化床层及燃料的影响。为了解决流化床中烟气与还原剂混合不充分的问题,曾勇等^[11]开发了一种气力式雾化喷枪,提高了 SNCR 反应效率。任宪红等^[12]认为,减少流化床中粗颗粒床料,增加

细颗粒床料,可使传热传质过程更加剧烈,有利于还原剂与烟气中的 NO 充分混合,从而提高 SNCR 反应效率。因此,在不改变现有流化床系统结构的基础上,可通过调整流化床自身的床料和燃料粒径,获得较好的脱硝效果。目前,在具有循环物料、炉内流场相对复杂的循环流化床系统上针对床料与燃料粒径的影响研究较为缺乏。因此,本文在自行搭建的循环流化床试验系统上,研究了不同反应温度、不同氨氮摩尔比下床料粒径和煤粉粒径对 NO_x 生成量及脱硝效率的影响。

1 试 验

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。试验使用的床料粒径分布见表 1,根据床料颗粒粒径不同分为 1 号、2 号、3 号床料。使用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。

试验时,首先向炉膛内投入石英砂床料,然后将管式电炉和预热炉设置到所需温度,同时打开风机,预热系统中所有管道和设备。待炉膛平均温度大于 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 后,投入煤粉,使用 S 型铂铑热电偶对炉膛温度实时监测。调节供风量,控制分离器后烟气出口处烟气氧含量为 $6\% \pm 0.5\%$ 。当温度稳定于工况温度后,将氨水喷入炉膛的烟气出口处,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,且氧含量之间有略微区别 ($6\% \pm 0.5\%$),为统一标准,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、 $6\% \text{O}_2$ 的 NO_x 浓度 (mg/Nm^3) 为

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

式中, $\rho(\text{NO}_x)$ 为标准状态、 6% 氧量、干烟气下 NO_x

射位置在炉膛烟气出口处,其高度位置在 120 cm,因此后续讨论的反应温度以 120 cm 处的温度为准。

2.1 反应温度的影响

床料平均粒径 700 μm 、煤粉平均粒径 425 μm 工况下测得的 NO_x 排放随温度变化如图 3 所示。可知不使用还原措施时, NO_x 生成量随反应温度的升高快速增加,且增幅呈增大趋势。孙健秋等^[15]研究表明,随着锅炉密相区燃烧温度的上升, NO_x 排放浓度上升且排放浓度的增长速率不断增加。

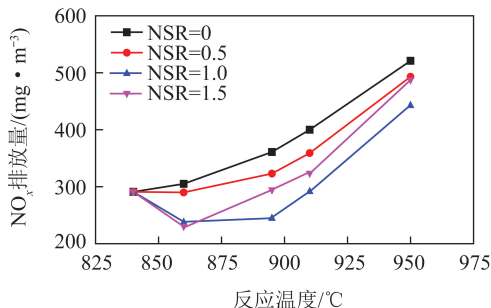


图3 反应温度和氨氮比对氮氧化物排放的影响

Fig.3 Effect of reaction temperature and NSR on NO_x emissions

当喷射氨还原剂时,各工况温度下的 NO_x 还原效果有所不同。在较低温度(840 $^{\circ}\text{C}$)下,喷射氨氮摩尔比为 0.5、1.0、1.5 的氨水均无法起到还原 NO_x 的作用。反应温度升高后,以 $\text{NSR}=1.0$ 为例,氨水开始还原 NO_x 。860 $^{\circ}\text{C}$ 时, NO_x 排放降低了 67 mg/m^3 ;895 $^{\circ}\text{C}$ 时, NO_x 排放降低了 116 mg/m^3 ,此温度下的还原效率达到最大,为 32%;910 $^{\circ}\text{C}$ 时, NO_x 排放量降低 108 mg/m^3 ;950 $^{\circ}\text{C}$ 时, NO_x 排放量降低 78 mg/m^3 。这些结果表明,当反应温度在 860~950 $^{\circ}\text{C}$,氨还原剂均能有效还原 NO_x ;最佳反应温度区间在 895~910 $^{\circ}\text{C}$ 。国内外学者在不同反应器上进行试验,得出 SNCR 有效温度区间有所区别(850~1150 $^{\circ}\text{C}$)^[4-7]。根据 SNCR 反应机理,OH、O、H 基元是反应进行的必要条件^[4]。在足够高的温度下,基元的活性增强,数量增加;反之,低温环境下活性基元数量会降低。温度低于反应温度窗口时,烟气中的活性基元产生量不足,脱硝反应速率下降;温度较高时,还原剂的扩散成为反应的主要制约因素,高温时还原剂 NH_3 易被氧化生成中间产物 HNO ,并进一步被氧化生成 NO ,因此温度太高反而使 NO 浓度升高^[16]。

2.2 氨氮摩尔比的影响

由图 3 可知,氨氮摩尔比从 0.5 升高至 1.0 时,各温度下氨的还原作用均有提高。但 NSR 继续提高至 1.5 时,氨的还原作用整体降低,这一现象随温度升高愈发明显。温度低于 860 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\text{NSR}=1.5$ 的

还原效果和 $\text{NSR}=1.0$ 时相当;温度在 860~910 $^{\circ}\text{C}$ 时, $\text{NSR}=1.5$ 的还原效率介于 $\text{NSR}=0.5$ 和 $\text{NSR}=1.0$ 之间;温度升高至 960 $^{\circ}\text{C}$ 时,其脱硝效果与 $\text{NSR}=0.5$ 时相当。这主要是由于温度较高时,氨还原剂的还原效果已达到此试验工况的上限,选择性下降。喷入过量的氨,氧化反应将占据主导作用而生成 NO_x ^[17],此现象会随反应温度的升高而加剧^[18]。

在实际锅炉运行中,充分利用氨还原剂在不同反应温度下的选择性,可以优化还原剂的使用剂量。这样不仅可以达到最佳的还原效果,有效降低 NO_x 排放量;还可以节约氨用量,避免大量氨逃逸,达到降低运行成本,延长锅炉设备使用寿命的目的。

2.3 床料粒径的影响

经预试验测试,床料中 850~2000 μm 的粗颗粒始终停留在炉膛底部,保证燃料的着火和停留时间;300~600 μm 和 425~850 μm 两个区间的床料可以保证炉膛温度在 840~1000 $^{\circ}\text{C}$ 所有工况下,都有细颗粒在炉膛中上部形成快速床,确保循环流化床试验台的良好运行。

3 种试验床料的 NO_x 生成量随反应温度的变化如图 4 所示。相对于 1 号床料,2 号无效床料比例减少了一半,有效床料比例增加,但两者 NO_x 的生成量几乎一致。当无效床料比例进一步减少时,3 号床料的 NO_x 生成量明显降低,各温度下均减少 NO_x 约 50 mg/m^3 。吕俊复等^[19]、王秀国^[20]提出适当减少无效床料,增大有效床料的占比,可使流化床的密相区高度增加,还原性气氛的区域增大,抑制燃料中的 N 元素转化为 NO_x 。

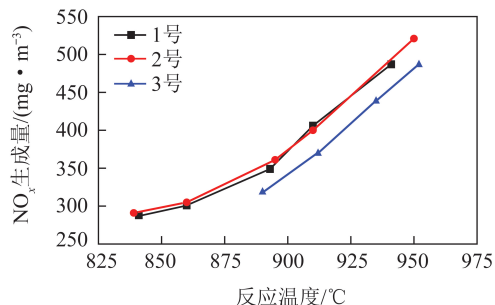


图4 床料比对 NO_x 排放的影响

Fig.4 Effect of bed material ratio on NO_x emission

反应温度 910 $^{\circ}\text{C}$ 时采用 3 种床料的 NO_x 排放量和脱硝效率随 NSR 变化如图 5 所示。可知 1 号床料和 2 号床料的变化趋势比较接近:随着 NSR 的增大, NO_x 排放量逐渐降低;当 $\text{NSR}=1.5$ 时,1 号和 2 号床料的脱硝效率达到最大值 28%, NO_x 排放量降低了 120 mg/m^3 左右;当 NSR 继续增大至 2.0,脱硝效率有所降低,为 20% 左右。3 号床料的变化趋势

与其他床料明显不同。随着NSR的增加,3号床料的脱硝效率不断升高,NSR=2.0时,脱硝效率达到最高42%, NO_x 排放量降至 215 mg/m^3 。造成这一现象的主要原因是,3号床料中有效床料比例最大,炉膛出口到旋风分离器管道中颗粒浓度相对更大,传热传质更加剧烈,还原剂与烟气中的 NO_x 能充分混合,有利于SNCR反应进行。

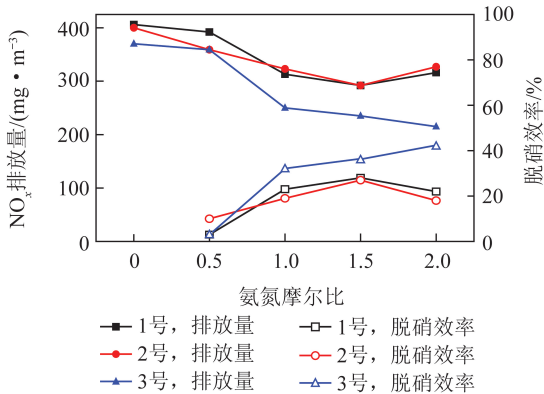


图5 910 °C时不同床料的 NO_x 排放量和脱硝效率随氨氮摩尔比的变化

Fig.5 Variation of NO_x emission and denitration efficiency with NSR under different bed materials at 910 °C

860 °C、喷射不同NSR还原剂时,1号、2号床料 NO_x 排放量和脱硝效率的变化如图6所示。1号、2号床料的 NO_x 生成量和910 °C时的脱硝效率具有很强的一致性,但反应温度860 °C时,两者的脱硝效果产生本质区别。使用1号床料时,喷射氨水并未降低 NO_x 排放量,反而有部分氨被氧化,增加了烟气中 NO_x 含量。结合喷氨量和 NO_x 排放量,从氮元素守恒的角度看,大量氨或转化为其他含氮化合物,或在较低温度下来不及参与反应,造成氨漏失。使用2号床料时,在喷射不同NSR还原剂后, NO_x 排放量均有所降低,NSR=1.5时,有最低排放量 230 mg/m^3 。

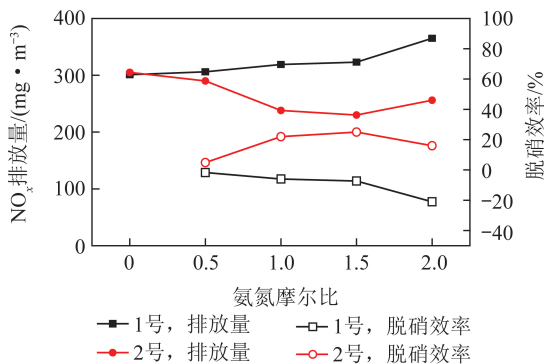


图6 860 °C时不同床料下的 NO_x 排放量和脱硝效率随氨氮摩尔比的变化

Fig.6 Variation of NO_x emission and denitration efficiency with NSR under different bed materials at 860 °C

由1号和2号床料采用氨还原剂的不同选择性可知,适当降低无效床料、增加有效床料的比例,可促使SNCR脱硝反应在较低温度进行。

2.4 煤粉粒径的影响

选用1号床料,以及330、425、600 μm 三种平均粒径煤粉作为燃料,研究燃料粒径对脱硝反应的影响。给粉机经过标定,使3种粒径煤粉的落料量均为 $(1100\pm30) \text{ g/h}$ 。

不同煤粉粒径下, NO_x 生成量随反应温度的变化如图7所示。可知整体来说,煤粉的平均粒径越大、反应温度越高, NO_x 生成量也越高。平均粒径330、425 μm 煤粉 NO_x 生成量随温度变化的趋势较为一致。各温度下,330 μm 的 NO_x 较425 μm 下降了10~30 mg/m^3 。840~900 °C,粒径600 μm 煤粉的 NO_x 生成量较425 μm 增加了120~140 mg/m^3 ;继续升高温度,粒径600 μm 煤粉的 NO_x 生成量急剧上升,910~930 °C时, NO_x 生成量达到 800 mg/m^3 左右。可见,增大煤粉粒径不利于控制 NO_x 原始生成量。一方面,煤粉粒径对煤热解过程中挥发分N的排放总量产生较大影响。魏砾宏等^[21]研究表明,细煤粉热解过程中氯化物的生成量偏少;粗粒径煤粉热解时释放的氯化物总量较大。另一方面,宋国良等^[22]提出,煤粉粒径越小,HCN、 NH_3 析出浓度越大,这些还原性组分有助于减少 NO_x 的生成量。此外,煤粉颗粒也是流化床中循环物料的一部分,根据2.3节所述,降低其颗粒粒径也可增大炉膛内的还原性气氛区域,抑制燃料中的N元素转化为 NO_x 。

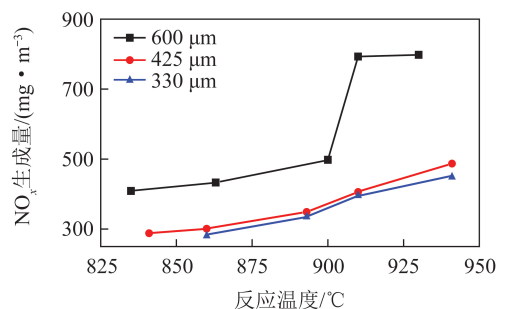


图7 不同煤粉粒径下 NO_x 生成量随反应温度的变化

Fig.7 Variation of NO_x generation with reaction temperature under different coal particle size

反应温度910 °C、喷射不同NSR还原剂时,燃烧平均粒径600、425 μm 煤粉的 NO_x 排放量及脱硝效率曲线如图8所示。可知整体来看,随氨氮摩尔比增大,氨水的脱硝效率逐步提升,对应的 NO_x 排放量不断降低。NSR增加到1.5,2种粒径煤粉燃烧生成的 NO_x 达到各自最低排放量,600 μm 时为 359 mg/m^3 ,425 μm 时为 292 mg/m^3 。NSR继续增

大至 2.0, 脱硝效率有所下降。值得注意的是, 平均粒径 600 μm 煤粉的脱硝效率显著大于 425 μm 煤粉, 在不同 NSR 下, 高出了 20%~30%。NSR = 1.5 时, 其脱硝效率达到了 55%。造成这一现象的主要原因是, 600 μm 煤粉的初始 NO_x 生成量 (793 mg/m^3) 显著高于 425 μm 时 (406 mg/m^3)。在化学反应中, 反应物的浓度越高, 其反应速率越快, 且反应向正方向进行的程度也越大。这意味着在其他条件不变时, 793 mg/m^3 的初始 NO_x 生成量相对于 406 mg/m^3 , 有更多的 NO_x 被还原。薛现恒等^[10]基于一台 410 t/h 循环流化床锅炉进行模拟研究, 发现在与本文相近的氨氮摩尔比和反应温度下, NO 初始浓度越高, 脱硝效率也越大。

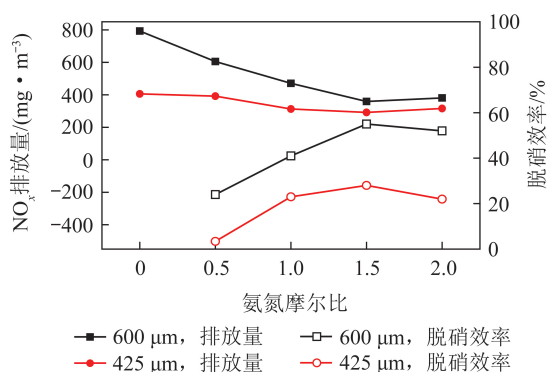


图 8 910 $^{\circ}\text{C}$ 时不同煤粉粒径的 NO_x 排放量和脱硝效率随氨氮摩尔比的变化

Fig.8 Variation of NO_x emission and denitration efficiency with NSR under different coal particle size at 910 $^{\circ}\text{C}$

反应温度 860 $^{\circ}\text{C}$ 、喷射不同 NSR 还原剂时, 燃烧平均粒径 425、330 μm 煤粉的 NO_x 排放量及脱硝效率曲线如图 9 所示。氨还原剂在使用这 2 种煤粉粒径时展现出不同的选择性。燃烧粒径 425 μm 煤粉时, 氨水在此温度下的选择性差, 被氧化生成额外的 NO_x , 且 NSR 越大, 此现象越严重。而燃烧粒径

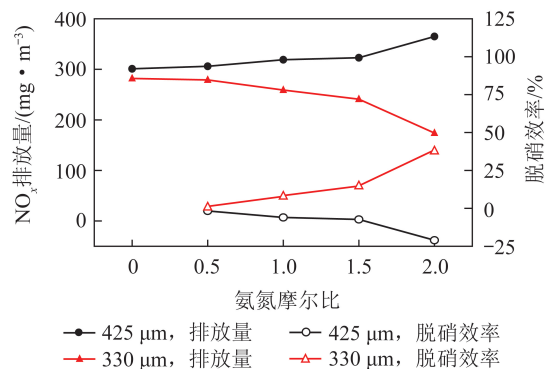


图 9 860 $^{\circ}\text{C}$ 时不同煤粉粒径的 NO_x 排放量和脱硝效率随氨氮摩尔比的变化

Fig.9 Variation of NO_x emission and denitration efficiency with NSR under different coal particle size at 860 $^{\circ}\text{C}$

330 μm 煤粉时, NSR 从 0.5 增加至 2.0, NO_x 排放量不断降低。NSR = 2.0 时, 烟气中 NO_x 含量降到 174 mg/m^3 , 对应的脱硝效率为 38%。所以在此工况下, 适当降低煤粉平均粒径, 可促使 SNCR 反应在较低温度下进行。

图 8、9 中煤粉平均粒径对脱硝效率的影响规律截然不同, 主要原因是 NO_x 初始浓度和反应温度对氨的还原反应有影响。Kasuya 等^[23]研究表明, 在较低温度段, NO 初始浓度越高, 脱硝效率越低, 而在高温段则正好相反。姜金东等^[9]对 NO 初始浓度影响的模拟计算也得到了同样结果。本文试验工况下, 粒径 425 μm 煤粉的 NO_x 初始浓度比 330 μm 高, 但低于 600 μm , 温度不是最佳脱硝反应温度, 因此在较低温度 860 $^{\circ}\text{C}$ 和较高温度 910 $^{\circ}\text{C}$ 下都表现出很低的脱硝效果。说明燃料粒径发生变化时, 需相应调整其他工艺操作参数, 才能保证较高的脱硝效率。

3 结 论

1) 反应温度和氨氮比对脱硝效率有很大影响。860~950 $^{\circ}\text{C}$, 氨还原剂均能有效还原 NO_x 。最佳反应温度在 895~910 $^{\circ}\text{C}$ 。氨在不同温度下具有不同的选择性。为保证较高脱硝效率, 在一定反应温度下需选择合适的氨氮比。

2) 适当减少粗颗粒床料, 增大细颗粒床料的占比, 能有效减少 NO_x 生成量, 提高脱硝效率, 促使 SNCR 反应在较低温度下进行。

3) 适当降低煤粉平均粒径, 可降低 NO_x 生成量并促使 SNCR 反应在较低温度下进行。

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 denitration 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] 仇云霞, 朱冲. 一种改善 SNCR 窗口温度的新工艺[J]. 中国环保产业, 2016(12): 43-44.
QIU Yunxia, ZHU Chong. A new technology for improvement

- of SNCR window temperature[J]. China Environmental Protection Industry, 2016(12):43-44.
- [5] 王俊杰,房晶瑞,雷本喜,等.水泥窑炉 SNCR 反应机制及优化运行[J].水泥,2018(2):52-55.
WANG Junjie, FANG Jingrui, LEI Benxi, et al. SNCR reaction mechanism and optimized operation of cement kiln [J]. Cement, 2018(2):52-55.
- [6] 董陈,赵树春,徐宏杰,等.燃煤锅炉 SNCR 脱硝工艺关键技术[J].热力发电,2016,45(12):73-77,88.
DONG Chen, ZHAO Shuchun, XU Hongjie, et al. Key points of SNCR denitrification technology for coal fired boilers [J]. Thermal Power Generation, 2016,45(12):73-77,88.
- [7] 孔红.生活垃圾焚烧厂 SNCR 脱硝系统的自动控制[J].环境卫生工程,2018,26(3):23-25.
KONG Hong. Automatic control of SNCR system in waste incineration plant [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018, 26(3):23-25.
- [8] 金山.选择性非催化还原(SNCR)脱硝反应影响因素的探索与研究[J].能源研究与信息,2019,35(3):142-145.
JIN Shan. Exploration and research on influential factors of selective non-catalytic reduction denitrification [J]. Energy Research and Information, 2019,35(3):142-145.
- [9] 姜金东,林晨,张曜,等.工艺操作参数对烟气 SNCR 脱硝性能影响的数值模拟[J].中国电机工程学报,2018,38(2):383-389.
JIANG Jindong, LIN Chen, ZHANG Yao, et al. Numerical simulation of effect of process operation parameters on flue gas denitrification performance of SNCR[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(2):383-389.
- [10] 薛现恒,邓雨生,段伦博,等.基于410 t/h Compact 型流化床锅炉的 SNCR 影响因素探究[J].锅炉技术,2019,50(3):30-35.
XUE Xianheng, DENG Yusheng, DUAN Lunbo, et al. The research of the influences of the SNCR on a 410 t/h circulating fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2019,50(3):30-35.
- [11] 曾勇,周俊虎.循环流化床锅炉 SNCR 关键因素及工程应用[J].工业锅炉,2016(5):36-38.
ZENG Yong, ZHOU Junhu. Key factor and engineering application of SNCR on circulating fluidized bed boiler[J]. Industrial Boiler, 2016(5):36-38.
- [12] 任宪红,刘爱成.基于流态重构的循环流化床锅炉多污染物协同控制技术[J].工业锅炉,2013(5):59-63.
REN Xianhong, LIU Aicheng. Coordination control technology on multiple pollutants of CFB boiler based on fluidization state reconstruction[J]. Industrial Boiler, 2013(5):59-63.
- [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(SO₂、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 SO₂, 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] 孙健秋,曹林涛.运行调整对循环流化床锅炉 NO_x 排放影响分析[J].应用能源技术,2014(2):28-30.
SUN Jianqiu, CAO Lintao. Analysis of the influence of the operation adjustment for NO_x mission of circulating fluidized bed boiler[J]. Applied Energy Technology, 2014(2):28-30.
- [16] 全志辉,刘汉涛.一维火焰燃烧过程中 SNCR 脱硝试验研究[J].锅炉技术,2012,43(1):77-80.
TONG Zhihui, LIU Hantao. Experimental studies on SNCR in one-dimensional furnaces[J]. Boiler Technology, 2012,43(1):77-80.
- [17] 林宗虎.循环流化床锅炉[M].北京:化学工业出版社,2004.
LIN Zonghu. Circulating fluidized bed boiler [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [18] 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.
- [19] 杨石,杨海瑞,吕俊复,等.基于流态重构的低能耗循环流化床锅炉技术[J].电力技术,2010,19(2):9-16.
YANG Shi, YANG Hairui, LYU Junfu, et al. The lower energy consumption (LEC) CFB technology based on state specification design theory [J]. Electric Power Standardization, 2010,19(2):9-16.
- [20] 王秀国.循环流化床锅炉流态重构节能超低排放技术应用小结[J].中氮肥,2017(4):57-59.
WANG Xiuguo. Summary of application of energy saving and ultra-low emission technology for flow pattern reconstruction of circulating fluidized bed boiler[J]. Nitrogenous Fertilizer Progress, 2017(4):57-59.
- [21] 魏砾宏,姜秀民,张超群,等.超细煤粉在热解条件下氮的迁移特性试验研究[J].中国电机工程学报,2006,26(7):62-66.
WEI Shihong, JIANG Xiumin, ZHANG Chaoqun, et al. A experimental investigation on nitrogen emission properties of micro-pulverized during pyrolysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(7):62-66.
- [22] 宋国良,吕清刚,周俊虎,等.煤粉浓度对 HCN 与 NH₃ 析出特性的影响[J].中国电机工程学报,2008,28(17):49-54.
SONG Guoliang, LYU Qinggang, ZHOU Junhu, et al. Effect of pulverized coal concentration on emission characteristics of HCN and NH₃ [J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(17):49-54.
- [23] KASUYA F, GLARBORG P, JOHNSON J E, et al. The thermal DeNO_x process: Influence of partial pressures and temperature [J]. Chemical Engineering Science, 1995,50(9):1455-1466.