

# 循环流化床床料与燃料粒径对脱硝反应的影响研究

黄柳娟 罗晓敏

广西建工集团第一安装公司 广西南宁 530000

**【摘要】**循环流化床锅炉是目前常用工业锅炉之一, 研究表明, 氨还原剂有效还原  $\text{NO}_x$  的温度范围为  $860^\circ\text{C} \sim 950^\circ\text{C}$ ; 不同反应温度下, 氨脱硝效率随氨氮摩尔比的增大呈先增大后减小的趋势; 增大细颗粒床料的占比, 能有效减少  $\text{NO}_x$  的生成量、提高脱硝效率、降低 SNCR 活性反应温度; 细颗粒占比最大的床料的脱硝效率随着 NSR 的增加不断升高。适当减小煤粉的平均粒径, 可降低  $\text{NO}_x$  的生成量并促使 SNCR 反应在较低的温度下进行。在较低温度下, 平均粒径为  $330\ \mu\text{m}$  的煤粉产生的  $\text{NO}_x$  较  $425\ \mu\text{m}$  的煤粉下降了  $10\text{--}30\text{mg}/\text{m}^3$ 。在高温下, 氨还原剂的脱硝效率随燃料粒径的增大而明显上升; 在较低温度时, 氨的脱硝效率随燃料粒径的增大可能下降。 $910^\circ\text{C}$  时, 燃烧平均粒径为  $600\ \mu\text{m}$  的煤粉在不同的 NSR 下, 脱硝效率比燃烧  $425\ \mu\text{m}$  的煤粉显著高出  $20\%\text{--}30\%$ ; 在  $860^\circ\text{C}$  时, 平均粒径为  $425\ \mu\text{m}$  的煤粉脱硝效率明显低于  $330\ \mu\text{m}$  的煤粉。确定燃料粒径后, 需要匹配合适的工艺操作参数以满足  $\text{NO}_x$  排放要求。

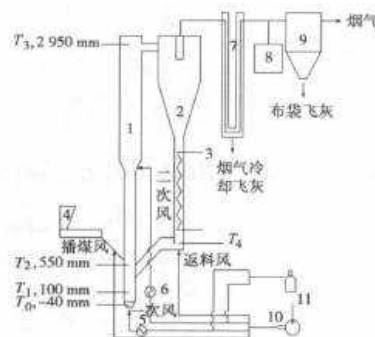
**【关键词】**脱硝反应; 煤粉颗粒; 氨氮摩尔比

## 引言

选择性非催化还原技术是流化床锅炉中一种低成本烟气脱硝技术, 占地面积小、无需催化剂、设施简单。不过 SNCR 技术理论上可以达到  $90\%$  以上的脱硝效率, 但实际锅炉应用中, 由于温度场的不均一、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。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。许多学者对 SNCR 脱硝技术进行了研究, 对温度窗口、氨氮摩尔比、 $\text{N}$  和  $\text{NO}$  初始浓度等影响因素进行了分析。SNCR 的温度窗口大致在  $850^\circ\text{C} \sim 1150^\circ\text{C}$  范围内, 最佳反应温度在  $950^\circ\text{C}$  左右。管壳式反应器上进行的实验表明, 当氨氮摩尔比为  $1.5$  时, 脱硝反应效果较好, 具有较高脱硝效率。

## 1 实验

实验时, 先往炉膛内投入石英砂床料, 将管式电炉和预热炉设置到需要的温度, 打开风机, 预热系统中所有管道与设备。等炉膛平均温度大于  $800^\circ\text{C}$  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的氧含量为  $6\% \pm 0.5\%$ 。温度稳定于工况温度后, 将氨水喷入炉膛的烟气出口处, 用烟气分析仪采集和分析分离器后的烟气成分。如图所示。



烟气分析仪测得的数据中,  $\text{NO}_x$  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。

#1: 颗粒粒径分布:  $300\text{--}600$ 、 $425\text{--}850$ 、 $850\text{--}2000$ ; 颗粒质量:  $30$ 、 $30$ 、 $30$ ; 颗粒质量占比:  $33\%$ 、 $33\%$ 、 $33\%$ ; 平均粒径:  $840$ 。

#2: 颗粒粒径分布:  $300\text{--}600$ 、 $425\text{--}850$ 、 $850\text{--}2000$ ; 颗粒质量:  $35$ 、 $40$ 、 $15$ ; 颗粒质量占比:  $39\%$ 、 $44\%$ 、 $17\%$ ; 平均粒径:  $7000$ 。

#3: 颗粒粒径分布:  $300\text{--}600$ 、 $425\text{--}850$ 、 $850\text{--}2000$ ; 颗粒质量:  $40$ 、 $45$ 、 $5$ ; 颗粒质量占比:  $44\%$ 、 $50\%$ 、 $6\%$ ; 平均粒径:  $590$ 。

在 SNCR 技术中, 氨氮摩尔比是一个重要的影响因素。NSR 的定义是喷入的氨还原剂中的有效成分与烟气中氮氧化物浓度的摩尔比。理论上, 还原  $1$  摩尔  $\text{NO}$  需要  $1$  摩尔氨还原剂。实验用煤的工业分析和元素分析:

焦作无烟煤: Car:  $66.1$ ; Har:  $2.2$ ; Oar:  $2.0$ ;  
Nar:  $1.0$ ; Sar:  $0.4$ ; Mar:  $7.0$ ; Aar:  $21.3$ ; Var:  $5.0$ ;  
FCar:  $66.7$ ; MJ/kg:  $22.9$

## 2 结果及分析

### 2.1 炉膛温度的影响

炉膛的温度对于循环流化床锅炉运行和 SNCR 脱硝反应都极其重要, 实验过程中需要严格控制温度。实际流化床中, 循环物料极大地增强了炉膛内的传热传质性能, 炉内温度应较为均匀。因此运行良好的流化床实验台, 炉膛温度也应该具备良好的均匀性。

在炉膛中段 60cm-90cm 处, 炉温较为稳定。但是, 在炉膛底部和顶部附近的位置, 虽有保温措施, 炉管仍不可避免地与周围环境大量换热, 致使温度明显下降。炉膛底部因供入流化风和燃尽风, 温度较顶部下降地更为严重, 比炉膛中段降低了 150℃-200℃。图中的黑色曲线是投放了床料和煤粉时测得的炉膛温度。与未投放时相比, 炉膛温度的均匀性得到了极大的改善。虽然炉膛温度仍呈现中部高、两端低的分布, 但最高温度与最低温度间的差值降到了 20℃-30℃ 以内。这也从侧面印证了此时流化床系统内的运行工况良好。因还原剂的喷射位置在炉膛烟气出口处, 其高度位置在 120cm, 所以后续讨论的反应温度以 120cm 处的温度为准。

### 2.2 氨氮摩尔比的影响

当氨氮摩尔比从 0.5 升高至 1.0 时, 各温度下氨的还原作用均有提高。但值得注意的是, 当 NSR 继续提高至 1.5 时, 氨的还原作用整体降低了, 这一现象随着温度的升高愈发明显。当温度低于 860℃, NSR=1.5 的还原效果和 NSR=1.0 时相当; 当温度在 860℃-910℃ 时, NSR=1.5 的还原效率介于 NSR=0.5 和 NSR=1.0 之间; 当温度升高至 960℃ 时, 其脱硝效果与 NSR=0.5 时相当。这主要是由于在温度较高的情况下, 氨还原剂的还原效果已达到此实验工况的上限, 其选择性下降。喷入过量的氨, 氧化反应将占据主导作用而生成 NO<sub>x</sub>。此现象会随反应温度的升高而加剧。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, 优化还原剂的使用剂量。如此一来, 可以达到最佳的还原效果, 有效降低 NO<sub>x</sub> 的排放量。还可以节约氨用量, 避免大量的氨逃逸, 降低运行成本, 延长锅炉设备使用寿命。

### 2.3 床料粒径的影响

经预实验测试, 床料中 850 μm-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 μm-600 μm 和 425 μm-850 μm 两个区间的床料可以保证炉膛温度在 840℃-1000℃ 的所有工况下, 都有细颗粒在炉膛中上部形成快速床, 确保循环流化床实验台的良好运行。相对于 #1 床料, #2 的无效床料比例减少了一半, 有效床料的比例增加, 但两者 NO<sub>x</sub> 的生成量几乎一致。当无效床料的比例进一步减少时, #3 床料的 NO<sub>x</sub> 生成量明显降低, 各温度下均能减少约 50mg/m<sup>3</sup> 的 NO<sub>x</sub>。

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<sub>x</sub>。#1 床料和 #2 床料的变化趋势仍比较接近: 随着 NSR 的增大, NO<sub>x</sub> 排放量逐渐降低; 当 NSR=1.5 时, #1 和 #2 床料的脱硝效率达到最大值 28%, NO<sub>x</sub> 排放量降低了 120mg/m<sup>3</sup> 左右; 当 NSR 继续增大至 2.0, 脱硝效率有所降低, 为 20% 左右。#3 床料的变化趋势与其他床料有明显不同。随着 NSR 的增加, #3 床料的脱硝效率不断升高, 当 NSR=2.0 时, 脱硝效率达到了最高的 42%, NO<sub>x</sub> 排放量也降至 215mg/m<sup>3</sup>。造成这一现象的主要原因是, #3 床料中有效床料的比例最大, 炉膛出口到旋风分离器的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<sub>x</sub> 能更加充分地混合, 有利于 SNCR 反应的进行。

### 2.4 煤粉粒径的影响

选用 #1 床料, 以及 330 μm、425 μm、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, 使三种粒径煤粉的落料量均为 (1100±30) g/h。整体来说, 煤粉的平均粒径越大、反应温度越高, NO<sub>x</sub> 生成量也越高。平均粒径 330 μm 和 425 μm 的煤粉 NO<sub>x</sub> 生成量随温度变化的趋势较为一致。在各温度下, 330 μm 的 NO<sub>x</sub>, 较 425 μm 下降了 10mg/m<sup>3</sup>-30mg/m<sup>3</sup>。在 840℃-900℃ 的温度范围内, 粒径 600 μm 煤粉的 NO<sub>x</sub> 生成量较 425 μm 增加了 120mg/m<sup>3</sup>-140mg/m<sup>3</sup>; 但当温度继续升高, 粒径 600 μm 煤粉的 NO<sub>x</sub> 生成量急剧上升, 910℃-930℃ 时, 其 NO<sub>x</sub> 生成量达到了 800mg/m<sup>3</sup> 左右。由此可知增大煤粉粒径不利于控制 NO<sub>x</sub> 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。细煤粉在热解过程中氮化物的生成量偏少; 粗粒径的煤粉, 热解时释放的氮化物总量较大。另一方面, 煤粉粒径越小, HCN、NH<sub>3</sub> 析出浓度越大, 这些还原性组分有助于减少 NO<sub>x</sub> 的生成量。

整体来看, 当氨氮摩尔比逐渐增大, 氨水的脱硝效率逐步提升, 对应的 NO<sub>x</sub> 排放量也不断降低。当 NSR 增加到 1.5, 两种粒径的煤粉燃烧生成的 NO<sub>x</sub> 都达到各自的最低排放量, 600 μm 时为 359mg/m<sup>3</sup>, 425 μm 时为 292mg/m<sup>3</sup>。当 NSR 继续增大至 2.0, 脱硝效率有所下降。平均粒径 600 μm 的煤粉, 脱硝效率明显大于 425 μm 的煤粉, 在 NSR 不同的情况下, 高出了 20%-30%。当 NSR=1.5 时, 脱硝效率达到了 55%。因为 600 μm 煤粉的初始 NO<sub>x</sub> 生成量 (793mg/m<sup>3</sup>) 高于 425 μm 时。在化学反应中, 反应物浓度越高, 反应速率越快, 且反应向正方向进行。所以在其他条件不变时, 793mg/m<sup>3</sup> 的初始 NO<sub>x</sub> 生成量相对于 406mg/m<sup>3</sup>, 有更多的 NO<sub>x</sub> 会被还原。

氨还原剂在使用这两种煤粉粒径时展现出不同的选择性。燃烧粒径 425 μm 的煤粉时, 氨水在此温度下的选择性差, 被氧化生成额外的 NO<sub>x</sub>, 且 NSR 越大, 此现象越严重。而燃烧粒径为 330 μm 的煤粉时, 随着 NSR 从 0.5 增加至 2.0, NO<sub>x</sub> 的排放量不断降低。当 NSR=2.0 时, 烟气中 NO<sub>x</sub> 含量降低 174mg/m<sup>3</sup>, 对应的脱

硝效率为 38%。所以在此工况下,适当降低煤粉的平均粒径,可促使 SNCR 反应在较低的温度下进行。

### 3 结束语

循环流化床锅炉技术属于低温燃烧技术,在锅炉

调试及燃烧调整中,床温、风量、燃料粒径、床层高度和返料量是几个最为重要的指标,这些参数对循环流化床炉安全稳定运行是非常关键的。控制返料量及燃料粒径,使锅炉达到最佳的运行工况,最大限度地减少循环流化床锅炉的磨损,提高锅炉燃烧效率。

#### 【参考文献】

- [1] 叶伟平,邱国铭,杜振,魏宏鸽,张杨,朱跃.循环流化床锅炉烟气超低排放改造技术路线分析[J].发电与空调,2017,38(2):34-37.
- [2] 王华山,陈庆杰,于秀春,王春生.小型循环流化床锅炉的选择性非催化还原脱硝工艺改造[J].科学技术与工程,2018,18(16):318-322.
- [3] 赵强,向轶,张玉洋,冷健,陈艳艳.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.
- [4] 张建平,万凯迪,王荣涛,徐超群,贾卫卫,王智化.生物质循环流化床锅炉臭氧脱硝试验研究[J].环境工程技术学报,2019,9(1):8-13.