

活性焦联合脱硫脱硝工艺试验研究

熊 银 伍^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院,北京 100013;2. 煤基节能环保炭材料北京市重点实验室,北京 100013;
3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

摘 要:为了开发活性焦联合脱硫脱硝工艺,选取一种商用活性焦在微型反应器上进行 NH_3 对 NO 、 SO_2 脱除影响及 NO 和 SO_2 脱除交互影响试验,提出了活性焦联合脱硫脱硝工艺路线,并在实验室搭建的模拟装置上进行了工艺路线的模拟试验验证。结果表明,活性焦脱硝是低温 SCR 反应, NH_3 的存在使 SO_2 吸附量提高约 18%,说明 NH_3 与 SO_2 发生化学反应,有利于 SO_2 脱除,但生成的硫酸铵会降低工业装置的稳定性;当活性焦无吸附 NH_3 时, NO 对 SO_2 脱除无影响,当活性焦吸附 NH_3 时,通入 NO 前后, SO_2 出口体积分数由 0.15% 降至 0.13% 左右,说明 NO 对 SO_2 脱除有促进作用;通入 SO_2 气体后, NO 出口体积分数由 0.045% 迅速增至 0.065%,说明 SO_2 与 NO 争抢 NH_3 ,不利于脱硝。通过工艺路线模拟试验发现,当联合脱硫脱硝空速为 400 h^{-1} 时,脱硫效率 $\geq 95\%$,脱硝效率 $\geq 70\%$,验证了活性焦联合脱硫脱硝工艺的可行性。

关键词:活性焦;脱硫;脱硝;烟气

中图分类号:X701;TD849

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)02-0014-06

Experimental research of combined removal of SO_2/NO by activated coke

XIONG Yinwu^{1,2,3}

(1. Beijing Research Institute of Coal Chemistry, Coal Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Beijing Key Laboratory of Coal Based Carbon Materials, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to develop combined removal of SO_2/NO process by activated coke, a commercial activated coke was chosen as research object, the influence of NH_3 on desulfurization and denitrification as well as the interactive effects of NO and SO_2 removal was investigated on micro reactor. The route of combined removal of SO_2/NO process was obtained and the simulated experiment was conducted in the lab. The results showed that the denitrification was low-temperature SCR reaction. The participation of NH_3 increased SO_2 adsorption by 18% which indicated that the reaction of NH_3 and SO_2 was helpful to remove SO_2 , while the generated ammonium sulfate reduced the stability of industrial device. When the activated coke didn't adsorb NH_3 , the presence of NO had no effects on SO_2 removal. When the activated coke adsorbed NH_3 , the concentration of SO_2 at outlet decreased from 0.15% to 0.13% after piping NO . The concentration of NO at outlet increased from 0.045% to 0.065% after piping SO_2 . The results indicated that the NO benefited desulfurization, while the reaction of SO_2 and NH_3 hindered denitrification. The combined removal of SO_2/NO process was feasible by simulation experiment. The desulfurization efficiency was equal or more than 95% and the denitration efficiency was equal or more than 70% when the space velocity was 400 h^{-1} .

Key words: activated coke; desulfurization; denitration; flue gas

0 引 言

我国 60% 以上的燃煤被火电站和燃煤工业锅

炉消耗,同时我国也是世界上少数几个以煤炭为主要能源的国家之一。据统计,我国 SO_2 的 90%、 NO_x 的 67%,烟尘排放量的 70% 均来自煤炭燃烧。燃煤

收稿日期:2015-01-20;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.004

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA060803)

作者简介:熊银伍(1982—),男,湖南常德人,副研究员,硕士,主要从事活性炭生产及应用研究工作。E-mail:wanlianqing2000@126.com

引用格式:熊银伍.活性焦联合脱硫脱硝工艺试验研究[J].洁净煤技术,2015,21(2):14-19.

XIONG Yinwu. Experimental research of combined removal of SO_2/NO by activated coke[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 14-19.

烟气中的 SO_2 和 NO_x 是我国大气污染的主要原因^[1-4]。随着近年来环保要求的日益提高,控制 SO_2 和 NO_x 排放尤为重要,相继出台了多项法律法规以及重点行业的大气污染物排放标准,对 SO_2 和 NO_x 排放限值有了明确规定。相对于传统脱硫、脱硝技术,联合脱除技术在经济性、资源利用效率等方面具有明显优势。活性焦具有原料易得、价格低廉、燃点高、机械强度高等特点,从 20 世纪 60 年代起在德国、日本等国家已开始研究开发活性炭(焦)烟气脱硫技术,并在 20 世纪 80 年代末得到工业化应用^[5-7]。我国烟气治理的重点起初是脱硫,近年来逐渐开展了烟气中 NO_x 脱除技术研究,特别是对 SO_2 和 NO_x 联合脱除技术尤为重视。国内学者在联合脱硫脱硝方面进行了大量研究,陶贺等^[8]通过研究烟气组分、工艺参数等对活性焦脱硫脱硝性能影响,得出联合脱硫脱硝最优工艺参数组合。李兰廷等^[9]研究了 SO_2 、 NO_x 在活性焦上的吸附行为,应用扫描电镜 (SEM) 等表征手段分析了活性焦表面物理化学性质与活性焦脱硫脱硝的相关性。解炜等^[10]利用 SEM、X 射线光电子能谱仪 (XPS) 等手段研究了活性焦联合脱硫脱硝过程中活性焦表面物理化学性质变化,并提出了活性焦表面性质的关键影响因素。笔者通过模拟烟气组分,在微型反应器上研究活性焦脱除过程中污染物交互影响,并提出一套联合脱硫脱硝工艺,然后采用 2 套固定床反应器模拟与验证该联合脱硫脱硝工艺,考察工艺的可行性,以期开发可工业化的活性焦干法联合脱硫脱硝技术提供依据。

1 试验部分

1.1 试验样品

选取内蒙古太西无烟煤为原料生产的 $\phi 9\text{ mm}$ 柱状活性焦为试验样品。样品常规指标检测分析见表 1。

表 1 样品常规指标检测结果

碘值/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	堆密度/ ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	强度/N	灰分/%	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
458	717	452	12.2	355

对样品微观结构进行 SEM 分析,如图 1 所示。由图 1 可知,活性焦内部孔隙丰富,具有大量的棱角结构,微孔发达,为 SO_2 与 NO 的吸附或反应提供有

利场所。

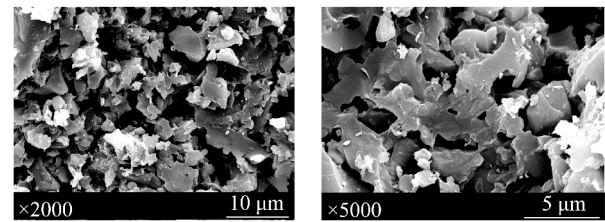
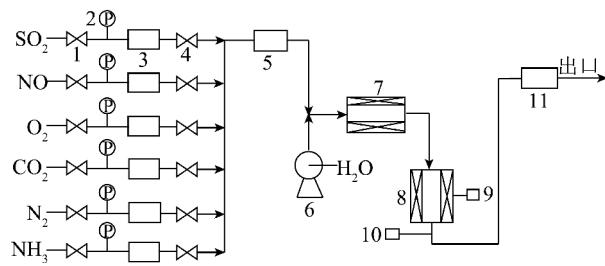


图 1 样品 SEM 分析

1.2 试验装置与流程

试验分为 2 部分,第 1 部分在微型反应装置上进行,主要考察活性焦脱硫、脱硝过程中关键组分的交互影响,最终提出活性焦联合脱硫脱硝工艺;第 2 部分是验证联合脱硫脱硝工艺的可行性,通过 2 个固定床反应器模拟联合脱硫脱硝工艺过程。

1)交互影响试验。交互影响试验反应装置如图 2 所示。试验系统由微型反应器、加热温控系统、气体配气系统和烟气尾气检测系统组成。以 $\phi 10\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 石英玻璃管作为反应器,活性焦层夹在 2 层石英棉之间。反应器采用外加热方式,筒壁上缠绕套有绝缘磁柱的电炉丝,外面是保温材料,保证良好的恒温性能。模拟烟气组分通过质量流量计在线计量控制,进入气体混合器均匀混合,然后再与水蒸气混合并进入反应器,出口模拟烟气组分的浓度用德国 IPI 公司的 GMA200 型质谱仪连续取样检测。



1—压力调节阀;2—压力表;3—质量流量计;4—截止阀;
5—气体混合器;6—微量泵;7—汽化器;8—反应器;9—温
控仪;10—反应温度显示仪;11—质谱仪

图 2 交互影响试验反应装置

2)联合脱硫脱硝工艺模拟试验。整套联合脱硫脱硝装置分为配气系统、吸附反应系统、检测系统 3 部分(图 3)。配气系统由高压钢瓶提供原料气模拟烟气各组分,主要包括 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 SO_2 、 NO 及 NH_3 ,其中 NH_3 在脱硝过程从反应器上端加入。水蒸气通过水泵将水送入水蒸气发生器汽化产生。吸附反应系统由 2 个反应器组成,采用 2 个固定床模拟移动床操作过程,其中一个反应器脱硫时,另一个

反应器脱硝。通过阀门的切换可控制气体的流向,即气体可以从 1 号反应器流向 2 号反应器,也可以从 2 号反应器进入 1 号反应器。气体进入检测仪器前需进行预处理。

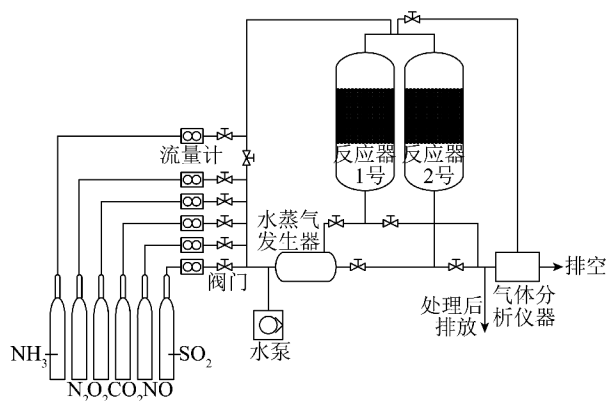


图 3 联合脱硫脱硝试验装置

模拟烟气在水蒸气发生器中混合均匀后进入脱硫反应器,气体经过活性焦床层时, SO_2 因吸附或部分反应生成 H_2SO_4 被脱除^[11-12]。在装置上部配入少量 NH_3 与脱硫后的烟气混合进入脱硝反应器,使 NO 与 NH_3 发生选择性催化还原(SCR)反应而被脱除。由于 NH_3 为碱性气体,易与 SO_2 反应,因此必须控制脱硫后烟气中 SO_2 含量,脱硫反应器初期出口 SO_2 浓度很低或为零,随着反应时间的进行,脱硫反应器出口 SO_2 浓度逐渐升高,进入脱硝反应器后与 NO 争抢 NH_3 ,从而影响脱硝反应器内脱硝效率,因此在脱硫反应器出口处需监测控制 SO_2 浓度。其他尾气成分在通过脱硝反应器后进行在线分析检测。下次试验时更换气流方向,即实现脱硝反应器样品作为下一次试验的脱硫反应器样品,只需更换脱硫反应器内样品。

1.3 试验条件与表征方法

1)交互影响试验。研究 NH_3 对脱硫、脱硝影响以及 SO_2 与 NO 脱除的交互影响。将样品破碎至 0.5~0.3 mm,样品装填量 1.809 g。烟气采用模拟组分,吸附反应温度控制在 150 $^{\circ}\text{C}$,空速 3000 h^{-1} ,烟气总流量为 150 mL/min 。

试验结果采用出口浓度变化或 SO_2 脱除量表示, SO_2 脱除量计算公式如下

$$q = \frac{MQ}{22.4m} (C_0 t - \int_0^t C dt) \quad (1)$$

式中, M 为 SO_2 分子质量, g/mol ; Q 为气体总流量, mL/min ; m 为样品质量, g ; C_0 为气体进口体积分数, 10^{-6} ; t 为吸附反应时间, min ; C 为气体出口体积

分数, 10^{-6} 。

2)联合脱硫脱硝工艺模拟试验。试验采用模拟烟气组分, CO_2 、 O_2 、 H_2O 、 SO_2 、 NO 体积分数分别为 10%、6%、10%、 2050×10^{-6} 、 780×10^{-6} ,氨氮比为 1.2,其余 N_2 作为平衡气。试验分别考察了 5 个不同空速下(300、350、400、450 和 500 h^{-1})活性焦的脱硫脱硝效率变化趋势。脱硫反应器试验用料为前一个脱硝反应器用料,装料量为活性焦 6.2 kg,吸附反应温度 125 $^{\circ}\text{C}$ 。

试验结果采用瞬时脱除效率与一段时间内的平均脱除效率进行表征。瞬时脱除效率计算公式如下

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C} \times 100\% \quad (2)$$

一段时间内的平均脱除效率计算公式如下

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^t \eta dt}{t} \quad (3)$$

2 交互影响试验结果

2.1 NH_3 的影响

1) NH_3 对脱硝影响。试验通入的模拟烟气组分为 3% 水蒸气、3% CO_2 、3% O_2 、 1000×10^{-6} NO 和 1000×10^{-6} NH_3 ,其余 N_2 为平衡气。首先不通入 NH_3 ,但通入其他气体,待 NO 吸附稳定后通入 NH_3 ,考察通入 NH_3 后, NO 出口浓度变化,结果如图 4 所示。

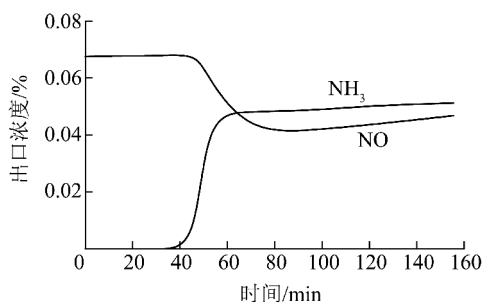
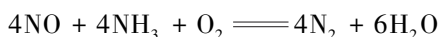


图 4 NH_3 对活性焦脱硝的影响

由图 4 可知,未通入 NH_3 前, NO 出口浓度较高,这个阶段主要发生 NO 的物理吸附,活性焦丰富的孔隙结构为其吸附提供了基础。通入 NH_3 后,随着 NH_3 在活性焦上的吸附, NO 出口浓度迅速降低,说明 NO 与 NH_3 发生化学反应,多数学者认为在活性焦脱硝过程中,喷入少量 NH_3 使其发生 SCR 反应^[13-14],化学反应方程式如下



2) NH_3 对脱硫影响。试验通入的模拟烟气组分为 6% O_2 , 8% 水蒸气, 10% CO_2 , 1000×10^{-6} SO_2 , 其余 N_2 作为平衡气。试验采用 2 种活性焦样品, 一种是未经过任何吸附过程的原焦, 另一种为配入 NH_3 脱除 NO 后的活性焦样品 (该样品表面有吸附态 NH_3), 主要考察活性焦含有少量吸附态 NH_3 时对 SO_2 脱除的影响, 结果如图 5 所示。

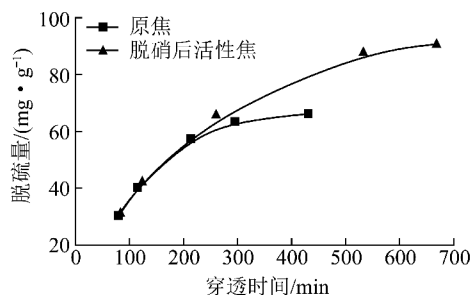
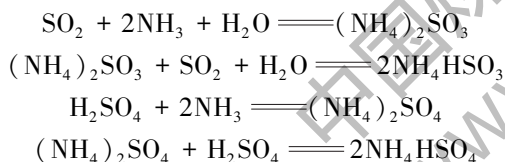


图5 吸附态 NH_3 对活性焦脱硫的影响

由图 5 可知,原焦在吸附时间 300 min 后,吸附量变化非常缓慢,在 400 min 时约为 65 mg/g ,而脱硝后的活性焦在穿透时间 400 min 时吸附量达到 77 mg/g 左右,比原焦吸附量增加 18%。这是由于活性焦上存在吸附态 NH_3 时,吸附态 NH_3 与 SO_2 或脱硫生成的 H_2SO_4 发生反应,促进了 SO_2 的脱除。反应方程式如下^[15]



从理论上来说, NH_3 的存在有利于 SO_2 的脱除,但是生成的硫铵易黏附在管道内壁及活性焦表面,不利于活性焦的再生及装置的正常运行。因此在活性焦脱硫过程中,不应混入气态 NH_3 ,其对活性焦的脱除能力和装置稳定运行将产生不利影响。

2.2 SO_2 与 NO 脱除交互影响

1) NO 对 SO_2 脱除影响。试验通入的模拟烟气组分为 2% O_2 , 2% 水蒸气, 2% CO_2 , 2000×10^{-6} SO_2 和 2000×10^{-6} NO, 其余 N_2 作为平衡气。进行 2 组试验:①选取一种原焦,不通入 NO,但是先通入其他气体组分,待 SO_2 浓度基本不变时,再通入 NO;②选取一种经过 NH_3 吸附后的活性焦,其他方法同上。分别考察活性焦在无 NH_3 吸附与有 NH_3 吸附条件下,NO 对 SO_2 脱除影响,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,使用原焦作为试验样品时,通入

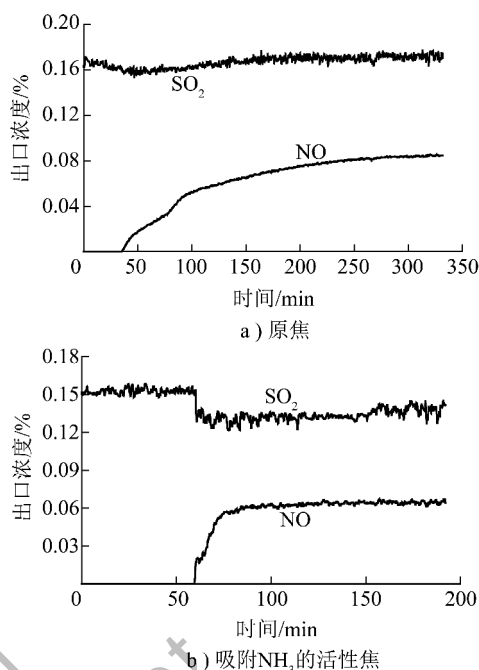


图6 NO 对 SO_2 脱除的影响

NO 前后 SO_2 出口浓度无明显变化,说明在没有 NH_3 吸附的条件下,NO 对 SO_2 脱除基本无影响;使用吸附 NH_3 的活性焦作为试验样品时,通入 NO 前后 SO_2 出口浓度有明显变化,出口体积分数由 0.15% 降至 0.13% 左右,说明有 NH_3 吸附的条件下,NO 对 SO_2 脱除具有促进作用。

2) SO_2 对 NO 脱除影响。试验通入的模拟烟气组分为 2% O_2 , 2% 水蒸气, 2% CO_2 , 2000×10^{-6} SO_2 和 2000×10^{-6} NO, 其余 N_2 作为平衡气。选取一种吸附 NH_3 的活性焦作为试验样品,先不通入 SO_2 ,但通入其他气体,待 NO 出口浓度稳定后通入 SO_2 气体,考察 SO_2 通入前后,NO 浓度变化,结果如图 7 所示。

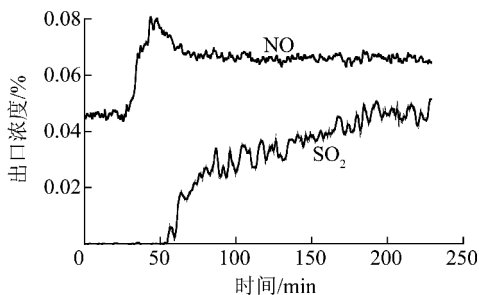


图7 NH_3 存在时 SO_2 对 NO 吸附的影响

由图 7 可知,通入 SO_2 气体后,NO 出口体积分数由 0.045% 迅速增至 0.065%,随后趋于平稳,说明 SO_2 与 NO 会争抢 NH_3 。通入 SO_2 后, SO_2 与模拟

烟气中的一部分 NH_3 反应,从而抑制 NO 与 NH_3 反应,使 NO 曲线出现一个较大的峰,但是随着 NH_3 与 SO_2 反应达到稳定后, NO 脱除率趋于平衡。说明 SO_2 与 NH_3 反应强于 NO 与 NH_3 反应,即 SO_2 与 NH_3 优先反应, SO_2 的存在对 NO 的脱除具有抑制作用,因此,在脱除 NO 时应尽可能降低 SO_2 浓度。

3 联合脱硫脱硝工艺模拟试验

3.1 工艺路线的提出

由于 NO 对脱硫基本无影响, SO_2 对脱硝具有负面影响,因此需严格控制脱硫反应器出口 SO_2 浓度,这就要求工艺的脱硫效率高,将烟气中 SO_2 尽可能完全脱除,然后再进入脱硝反应器,消除 SO_2 对脱硝的负面影响。因此,设计活性焦联合脱硫脱硝工艺路线(图8)为烟气先脱硫后脱硝,活性焦先脱硝后脱硫,具体为:将移动床分为上下2部分,床层内活性焦的移动方向与烟气流动方向垂直交叉,体现

为烟气从下部进入,活性焦从上部进入,下部脱硫,上部脱硝,下部脱硫后的活性焦去再生反应器再生,然后返回上部入料口,完成整个循环过程。

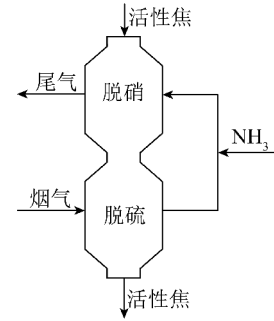


图8 活性焦联合脱硫脱硝工艺路线

3.2 工艺的验证

为了验证上述工艺路线的可行性,利用2个固定床装置进行联合脱硫脱硝工艺模拟,主要研究不同空速下装置的联合脱硫脱硝效率,结果如图9所示。

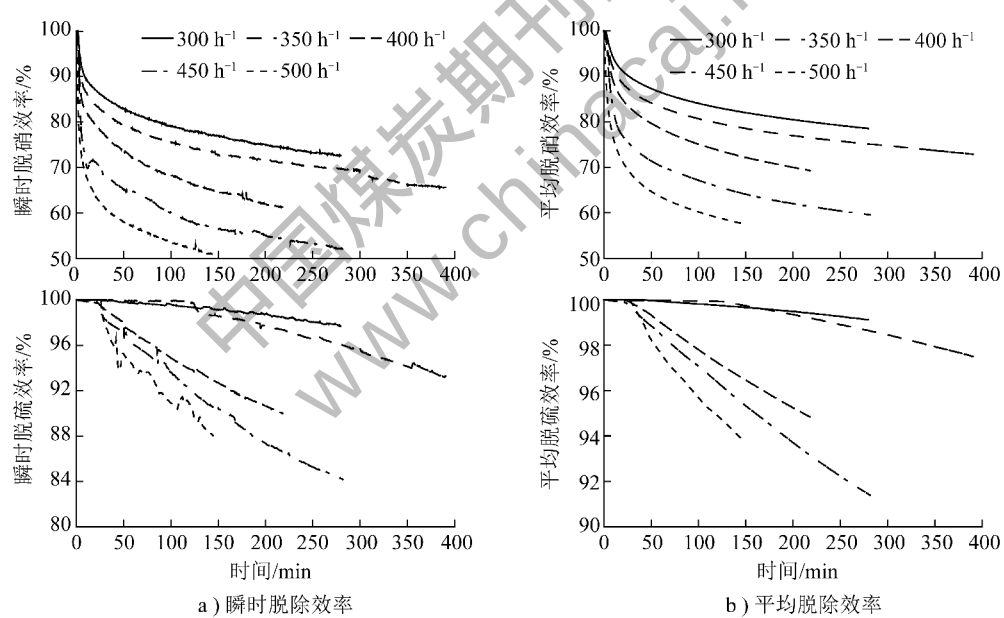


图9 不同空速下活性焦脱硫脱硝效率

由图9可知,随着空速的增大,相同时间内脱硫脱硝效率下降,说明空速对联合脱硫脱硝效率影响很大,空速低有利于烟气与活性焦充分接触,增加脱除效率。由于瞬时脱除效率表征的是一段以后活性焦的脱除性能,而平均脱除效率表征的是从吸附反应开始到这段时间内活性焦总体脱除性能,一般以平均脱除效率作为参考依据,总体评价活性焦的脱除性能。

分别取吸附反应时间2 h 的瞬时脱除效率与平

均脱除效率进行对比,结果如图10所示。
由图10可知,吸附反应时间小于2 h 时,瞬时脱除效率在90%以上,平均脱除效率高达95%。脱硝效率波动较大,500 h⁻¹ 时,瞬时脱硝效率为52.19%,当空速降为400 h⁻¹ 时,瞬时脱硝效率升高到66.68%,350 h⁻¹ 时升高到74.54%,而300 h⁻¹ 时瞬时脱硝效率高达78.07%。400 h⁻¹ 时平均脱硝效率高达73.82%,此时平均脱硫效率为97.23%,因此,在实际工业应用中,联合脱硫脱硝空速为

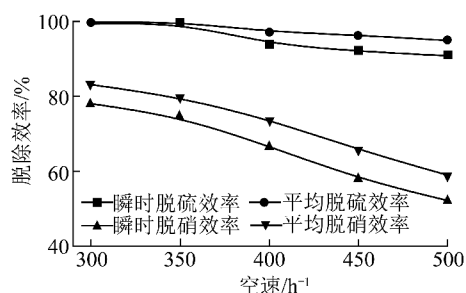


图10 不同空速下活性焦脱硫脱硝效率对比

400 h⁻¹时,脱硫效率≥95%,脱硝效率≥70%,满足工业应用要求。

4 结 论

1) NH₃ 与烟气中的 NO 在活性焦上会发生低温 SCR 反应,从而有效脱除 NO; NH₃ 的存在会与 SO₂ 发生化学反应,虽然能促进 SO₂ 脱除,但对装置产生不利影响,因此,应尽可能避免气态 NH₃ 混入脱硝过程。

2) 活性焦上无吸附态 NH₃ 时,NO 对 SO₂ 的脱除无影响,当活性焦上有吸附态 NH₃ 时,NO 会促进 SO₂ 脱除;在脱硝过程中,SO₂ 会争抢 NH₃,导致脱硝效率降低,因此,应尽可能避免 SO₂ 混入脱硝过程。

3) 活性焦联合脱硫脱硝工艺路线为烟气先脱硫后脱硝,活性焦先脱硝后脱硫。当联合脱硫脱硝空速为 400 h⁻¹ 时,平均脱硝效率高达 73.82%,平均脱硫效率为 97.23%,满足工业应用要求。

参考文献:

[1] 吴晓青. 我国大气氮氧化物污染控制对策[J]. 环境保护, 2009,37(16):9-11.

[2] 李名升,任晓霞,周 磊,等. 中国大气 SO₂ 污染与排放的空间分离分析[J]. 环境科学学报,2013,33(4):1150-1157.

[3] 朱红霞,赵淑莉. 中国典型城市主要大气污染物的浓度水平及分布的比较研究[J]. 生态环境学报,2014,23(5):791-796.

[4] 康新园. 燃煤烟气脱硫脱硝一体化技术研究进展[J]. 洁净煤技术,2014,20(6):115-118.

[5] 翟尚鹏,刘 静,杨三可,等. 活性焦烟气净化技术及其在我国的应用前景[J]. 化工环保,2006,26(3):204-208.

[6] Olson David G, Tsuji K, Shiraishi I. The reduction of gas phase air toxics from combustion and incineration sources using the MET-Mitsui-BF activated coke process[J]. Fuel Processing Technology, 2000,65/66:393-405.

[7] 李云鹏,王 彬,方月兰,等. 活性焦联合脱硫脱硝技术及应用前景[J]. 化学工业与工程技术,2008,29(6):38-40.

[8] 陶 贺,金保升,朴桂林,等. 活性焦烟气脱硫脱硝的静态实验和工艺参数选择[J]. 东南大学学报:自然科学版,2009,39(3):635-640.

[9] 李兰廷,解 炜,梁大明,等. 活性焦脱硫脱硝的机理研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(8):79-83.

[10] 解 炜,梁大明,孙仲超,等. 烟气联合脱硫脱硝过程中活性焦表面化学的变化及影响[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(3):448-452.

[11] Marla Teresa Izquierdo, Begoña Rubio, Carmen Mayoral, et al. Low cost coal-based carbons for combined SO₂ and NO removal from exhaust gas[J]. Fuel, 2003,82(2):147-151.

[12] Davini P. SO₂ adsorption by activated carbons with various burn-offs obtained from a bituminous coal[J]. Carbon, 2001,39(9):1387-1393.

[13] Manfred Koebel, Madia Giuseppe, Martin Elsener. Selective catalytic reduction of NO and NO₂ at low temperatures[J]. Catalysis Today, 2002,73(3/4):239-247.

[14] Isao Mochida, Yozo Korai, Masuaki Shirahama, et al. Removal of SO_x and NO_x over activated carbon fibers[J]. Carbon, 2000,38(2):227-239.

[15] Marla Teresa Izquierdo, Begoña Rubio, Carmen Mayoral, et al. Low cost coal-based carbons for comined SO₂ and NO removal from exhaust gas[J]. Fuel, 2003,82(2):147-151.

(上接第5页)

[7] 张彦文,蔡宁生. 加入甲烷促进选择性非催化还原反应的机理验证和分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(2):49-54.

[8] 杨 梅,张忠孝,于 娟,等. 循环流化床烟气 SNCR 脱硝机理与试验[J]. 燃烧科学与工程,2014,10(2):101-105.

[9] Rota R. Chemical kinetic analysis of the thermal De NO_x process at high reactant concentration[J]. Chemical Engineering and Technology, 2001,24(5):539-541.

[10] Loeffler G, Wartha C, Winter F, et al. Study on NO and N₂O formation and destruction mechanisms in a laboratory-scale fluidized bed[J]. Energy Fuels, 2002,16(5):1024-1032.

[11] Miller J A, Glarborg P. Modeling the thermal De-NO_x process;

closing in on a final solution[J]. International Journal of Chemical Kinetics, 1999,31(11):757-765.

[12] 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.

[13] Lyon R K. Thermal De NO_x controlling nitrogen oxides emissions by a non-catalytic process[J]. Environmental Science and Technology, 1987,21(3):231-236.

[14] 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.

[15] 李德龙,杨 梅,于 娟,等. 添加煤气化合成气的 SNCR 脱硝反应实验与机理研究[J]. 电站系统工程,2014,30(3):5-8.