

煤焦还原法脱硝技术研究

付文杰,柴 彤,徐明明,郝京华,赵瑞红

(河北科技大学化学与制药工程学院,河北石家庄 050018)

摘 要:为了更有效地控制燃煤烟气中 NO 的排放,通过模拟工业锅炉燃煤烟气,在固定床反应器中进行脱硝反应,研究了煤焦种类、反应条件、烟气成分等因素对 NO 转化率的影响。结果表明:在所考察的 3 种煤焦中,工业兰炭适合作为实验煤焦,其粒径为 0.6~1.0 mm 较为适宜;随着温度的增加,NO 转化率逐渐增加,在温度为 700 °C、空速为 10 000 h⁻¹ 的条件下,NO 转化率可达 99%;随着空速的增加,NO 转化率逐渐减少,但在 700 °C 时空速变化对 NO 转化率没有影响;在无氧条件下,NO 浓度变化对 NO 转化率没有影响;相同温度下,有氧存在时 NO 转化率较无氧时 NO 转化率高,O₂ 浓度达 4%(体积分数)时 NO 转化率最高;在有氧条件下,SO₂ 和 CO₂ 的浓度变化对 NO 转化率没有影响。

关键词:煤化学工程;煤焦;氮氧化物;转化率;脱硝

中图分类号:TQ 536.9 **文献标志码:**A

Study on denitration technology of coal char reduction method

FU Wenjie, CHAI Tong, XU Mingming, HAO Jinghua, ZHAO Ruihong

(School of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to more effectively control NO emissions in coal-fired flue gas, the denitration reaction is carried out with simulated industrial boiler flue gas in a fixed bed reactor. The influence of char types, reaction conditions, the composition of flue gas and other factors on the conversion rate of NO are discussed. The result shows that the industrial semi-coke is the most suitable experimental coal in the three coals studied, and the industrial semi-coke particle size of 0.6 ~ 1.0 mm is relatively suitable; The conversion rate of NO increases gradually with the increase of temperature, and when the reaction temperature is 700 °C and the space velocity is 10 000 h⁻¹, the conversion rate of NO can reach 99%; the conversion rate of NO decreases gradually as airspeed increases, but the airspeed change has no effect on the conversion rate of NO at 700 °C; under anaerobic conditions, the change of NO concentration has no effect on the conversion rate of NO; at the same temperature, NO conversion rate is higher at the presence of oxygen compared with that at anaerobic situation, and the conversion rate of NO is the highest when O₂ concentration is 4%; under aerobic conditions, the concentration change of SO₂ and CO₂ has no effect on the conversion rate of NO.

Keywords: coal chemical engineering; coal char; nitric oxide; conversion rate; denitration

收稿日期:2016-01-12;修回日期:2016-03-12;责任编辑:张士莹

基金项目:国家自然科学基金(21206030)

作者简介:付文杰(1991—),男,河北承德人,硕士研究生,主要从事清洁化工及脱硫、脱硝工艺方面的研究。

通讯作者:赵瑞红教授。E-mail:2002b0208@163.com

付文杰,柴 彤,徐明明,等.煤焦还原法脱硝技术研究[J].河北科技大学学报,2016,37(3):255-261.

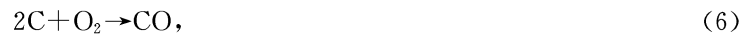
FU Wenjie, CHAI Tong, XU Mingming, et al. Study on denitration technology of coal char reduction method[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(3): 255-261.

氮氧化物(NO_x)是大气中的主要污染物之一,对人体和环境危害严重。据中华人民共和国环境保护部统计,2013年中国 NO_x 排放总量为2 227.4万t,其中工业源 NO_x 排放量为1 545.6万t,电力、热力行业 NO_x 排放量占工业源 NO_x 排放量的60%左右。所以,控制燃煤烟气中的 NO_x 的排放是中国能源和环境领域的重点课题。目前治理燃煤烟气中的 NO_x 多采用有选择性非催化还原法(SNCR)、选择性催化还原法(SCR)以及SNCR-SCR混合法等^[1-2]。SNCR法^[3-6]是以尿素或氨基化合物作为还原剂,在800~1 200℃温度范围内将 NO_x 还原为氮气和氨,脱硝效率为30%~50%。SCR法^[7-10]是以氨或尿素等作为还原剂,在250~500℃且催化剂存在的条件下,有选择性地还原成 N_2 ,脱硝效率可达80%~90%。这2种方法都采用了氨作为还原剂,如果将燃煤烟气中的 NO_x 全部采用SCR或者SNCR方法处理,每年需要消耗中国总产量10%左右的合成氨才能实现,且催化剂投资成本高,经济上非常不合理,所以亟需寻找一种经济合理、技术可行、环境友好的新技术。

近年来,煤焦还原法脱硝技术引起了许多研究者的关注。煤焦还原法利用煤焦作为还原剂,还原烟道气中的氮氧化物,反应机理^[11-12]如下:



当尾气中存在 O_2 时, O_2 与碳反应生成 CO , CO 也能还原 NO_x :



该技术使用煤焦作为还原剂,成本低廉,无需添加催化剂,而且所需装置结构简单、易操作。式(1)~式(8)均为放热反应,在反应过程中产生的热量可观,若将这部分热量在废热锅炉中进行回收,将使煤焦还原法在燃煤锅炉体系中具有极大的应用潜力。

本研究通过模拟工业锅炉燃煤烟气,在固定床反应器中进行脱硝反应,考察煤焦种类、反应条件、烟气成分等因素对 NO 转化率的影响,确定适宜的工艺参数,为该技术工业化应用提供参考。

1 实验部分

1.1 材料

选取工业兰炭、自制半焦、工业焦炭3种煤焦作为还原剂,对煤焦颗粒进行筛分,选取粒度为0.35~2 mm范围内粒径均匀的颗粒,对煤焦进行煤质分析和比表面积分析,结果如表1和表2所示。

表1 3种煤焦的煤质分析

Tab. 1 Analysis of three kinds of coal char

煤焦种类	工业分析				元素分析				
	M_{ad}	A_d	V_d	FC_d	C	H	N	S	O
工业兰炭	3.55	5.17	4.37	86.91	89.26	3.56	0.39	0.88	1.17
自制半焦	2.65	7.83	5.62	83.90	86.32	2.15	1.14	0.85	1.23
工业焦炭	0.32	18.36	0.65	80.49	79.24	0.47	0.43	0.68	0.49

注:表中数据为质量分数;氧元素分析采用差减法获得。

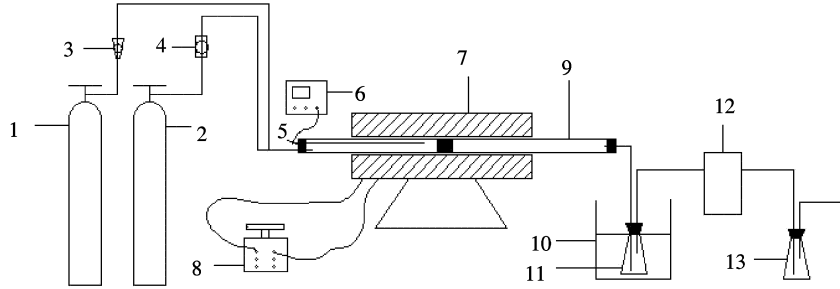
表2 3种煤焦的比表面积

Tab. 2 Three kinds of coal surface area

煤焦种类	BET/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔容/($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/nm
工业兰炭	12.257	0.004	1.864
自制半焦	60.219	0.001	1.855
工业焦炭	0.073	0.023	1.875

1.2 装置

煤焦对 NO 的还原反应在固定床反应器上进行,实验装置如图 1 所示。其中,氮气瓶中装的是普通氮气,纯度为 99.5%;混合气瓶中为模拟的烟气,由配气装置配制;转子流量计和质量流量计分别控制氮气和混合气的流量;智能 PID 温控仪控制温度变化,最高温度为 1 000 ℃;石英管反应器长度为 1 200 mm,内径为 18 mm;通过冷却槽将出口烟气降温,确保分析仪入口温度适宜;采用 KM940 烟气分析仪测定 NO,NO₂,O₂,CO,SO₂ 等气体浓度;吸收瓶中为 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液,吸收反应过程中产生的尾气。



1—氮气瓶;2—混合气瓶;3—转子流量计;4—质量流量计;5—热电偶;6—PID 温控仪;7—管式炉;
8—变压器;9—石英管反应器;10—冷却槽;11—冷却瓶;12—KM940 烟气分析仪;13—吸收瓶。

图 1 脱硝反应装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of denitrification reactor

1.3 方法

称取 4.2 g 煤焦,放入石英管反应器中,在 N₂ 气氛下加热到反应温度,测定模拟烟气的初始浓度。然后将模拟烟气以一定的气速通过石英管反应器与煤焦发生反应,反应后的烟气经过冷却后,用 KM940 烟气分析仪测量各组分浓度并计算脱硝效率。

2 结果与讨论

2.1 煤焦种类对脱硝效率的影响

采用工业兰炭、工业焦炭、自制半焦 3 种煤焦作为还原剂,煤焦粒径为 0.35~2 mm;反应气氛为 N₂+NO,其中 NO 为 1 000×10⁻⁶ (体积分数,下同),N₂ 为平衡气,在温度为 400~900 ℃、空速为 10 000 h⁻¹ 条件下进行脱硝反应,考察煤焦种类对 NO 转化率的影响,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,3 种煤焦都具有一定的还原能力,工业兰炭和自制半焦的脱硝效果相近,工业焦炭的脱硝效果低于其他两者。黄哲等^[13] 采用 3 种不同性质的炭,考察了不同炭种对 NO 的还原性能。结果表明,还原性能与原料炭的物理性质,尤其是与比表面积和孔结构有关,与碳含量的多少无关。由表 2 可知,自制半焦和工业兰炭的比表面积大于工业焦炭。工业兰炭的脱硝效果与自制半焦相近且市场价格比工业焦炭低很多,故选用价格低廉、脱硝效果好的工业兰炭作为实验煤焦。

2.2 煤焦粒径对脱硝效率的影响

将工业兰炭粉碎筛分,采用粒径为 0.35~0.6,0.6~1.0,1.0~2.0 mm 的 3 种工业兰炭作为还原剂,反应气氛为 N₂+NO,其中 NO 浓度为 1 000×10⁻⁶,N₂ 为平衡气,在温度为 400~900 ℃、空速为 10 000 h⁻¹ 条件下进行脱硝反应,考察工业兰炭不同粒径对 NO 转化率的影响,结果如图 3 所示。

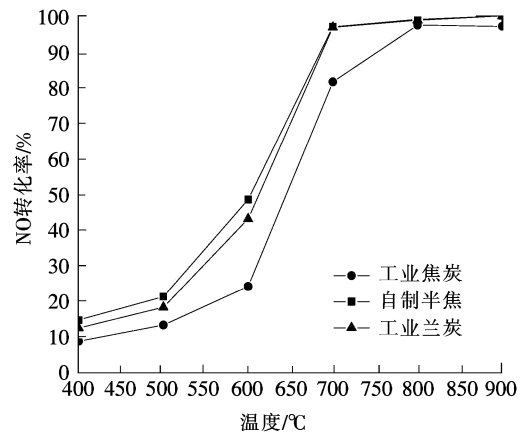


图 2 煤焦种类对 NO 转化率的影响

Fig.2 Effect of coal type on the conversion rate of NO

由图3可以看出,粒径的变化对NO转化率有一定的影响,粒径为0.6~1.0 mm时NO转化率最高。煤焦-NO反应发生的第1步为NO与煤焦表面接触,当煤焦粒径较大或较小时,影响床层的空隙率变化,会造成煤焦表面与NO接触面积变小,使反应速率降低。因此,选择粒径为0.6~1.0 mm较为适宜。

2.3 温度对脱硝效率的影响

由阿伦尼乌斯定律可知,反应温度对脱硝效率具有重要的影响。在实际工程应用中,反应温度对整个工艺过程至关重要。采用粒径为0.6~1.0 mm的工业兰炭作为还原剂,反应气氛为 $N_2 + NO$,其中NO浓度为 $1\ 000 \times 10^{-6}$ (体积分数,下同), N_2 为平衡气,在空速为 $10\ 000\ h^{-1}$ 条件下进行脱硝反应,考察反应温度对NO转化率的影响,结果如图4所示。

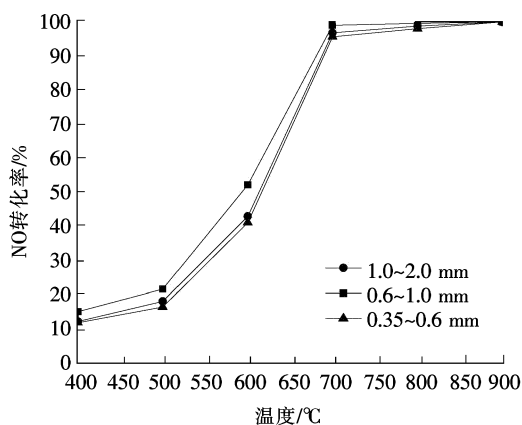


图3 工业兰炭粒径对NO转化率的影响

Fig. 3 Effects of industrial coal particle size on the conversion rate of NO

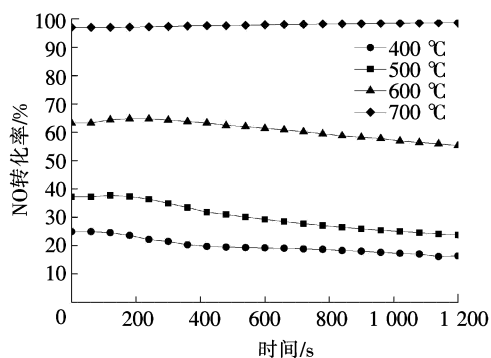


图4 反应温度对NO转化率的影响

Fig. 4 Effects of reaction temperature on the conversion rate of NO

由图4可以看出,随着反应时间的增加,同一温度下NO的转化率基本保持在稳定状态。随着反应温度的增加,NO的转化率迅速升高,当温度为 $700\ ^\circ C$ 时,NO的转化率达99%。这是由于随着温度的升高,煤焦表面活化反应中心的数量增多,提高了煤焦表面对NO的化学吸附能力^[14],增加了煤焦对NO的吸附量;温度升高,NO分子运动程度加剧,使NO与煤焦碰撞的几率增加;随着温度的升高,煤焦表面反应生成物的解附、吸附速率提高^[15]。

2.4 空速对脱硝效率的影响

空速既可以反映气体在床层中的停留时间,也是设计反应设备体积的重要依据。采用粒径为0.6~1.0 mm的工业兰炭作为还原剂,反应气氛为 $N_2 + NO$,其中NO浓度为 $1\ 000 \times 10^{-6}$, N_2 为平衡气,在温度为 $400 \sim 700\ ^\circ C$ 条件下进行脱硝反应,考察空速对NO转化率的影响,结果如图5所示。

由图5可知,当反应温度为 $400, 500, 600\ ^\circ C$ 时,随着空速的增加,NO的转化率显著降低。这是因为空速越大,气体在床层中的停留时间就越短,NO还未充分接触就已经通过了床层,造成NO转化率降低。当温度为 $700\ ^\circ C$ 时,随着空速的增加,NO的转化率基本保持稳定,这说明当温度达 $700\ ^\circ C$ 时,反应速率较大,在较短停留时间内NO也可以反应完全,温度成为反应的主要控制因素。但是空速过大时,消耗的模拟烟气体量加大,也会同时带走大量热量,所以选取空速为 $10\ 000\ h^{-1}$ 较为适宜。

2.5 NO初始浓度对脱硝效率的影响

在实际工业燃煤锅炉中,烟气中 NO_x 的浓度不是恒

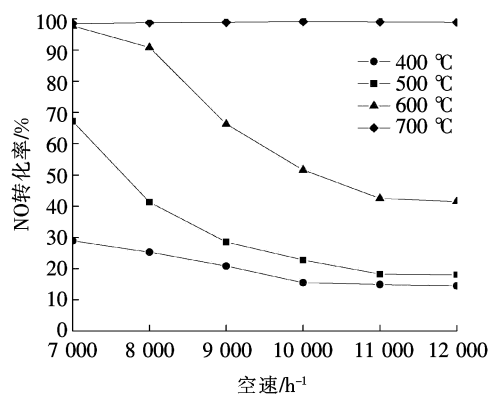


图5 空速对NO转化率的影响

Fig. 5 Effects of space velocity on the conversion rate of NO

定的,NO 初始浓度的变化可考量煤焦对 NO 处理量的大小。采用粒径为 0.6~1.0 mm 的工业兰炭作为还原剂,反应气氛为 $N_2 + NO$,其中 NO 浓度为 $450 \times 10^{-6} \sim 1\,500 \times 10^{-6}$, N_2 为平衡气,在温度为 $400 \sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 、空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 条件下进行脱硝反应,考察 NO 初始浓度变化对 NO 转化率的影响,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,相同温度下,NO 初始浓度在 $450 \times 10^{-6} \sim 1\,500 \times 10^{-6}$ 范围内变化时 NO 的转化率基本保持稳定。这主要是由于在相同温度和气氛下,NO 初始浓度的变化不会改变煤焦表面活性。随着 NO 初始浓度的增加,气相中 NO 的分压升高,NO 与煤焦表面活性位发生碰撞的概率增大,氧化还原的速度也得以提高,单位时间内被还原的 NO 量增大,但对 NO 转化率几乎没有影响。

2.6 O_2 浓度对脱硝效率的影响

根据相关研究^[16-19], O_2 对煤焦-NO 反应有重要的影响。AARNA 等^[20]总结了之前的各项研究,提出 O_2 对煤焦-NO 反应速率的提高幅度通常为 2 倍~4 倍。采用粒径为 0.6~1.0 mm 的工业兰炭作为还原剂,反应气氛为 $N_2 + NO + O_2$,其中 NO 浓度为 $1\,000 \times 10^{-6}$, O_2 浓度为 $0 \sim 6\%$, N_2 为平衡气,在温度为 $400 \sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ 、空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 条件下进行脱硝反应,考察 O_2 浓度变化对 NO 转化率的影响,结果如图 7 所示。

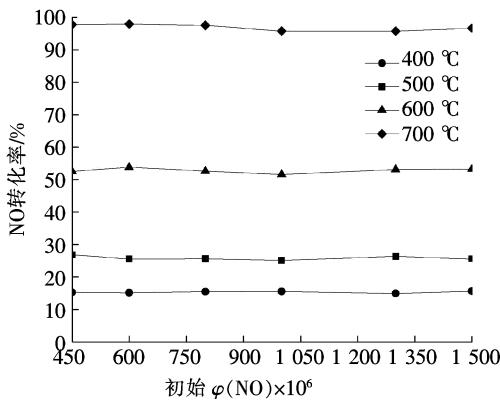


图 6 NO 初始浓度对 NO 转化率的影响

Fig. 6 Effects of NO concentration on the conversion rate of NO

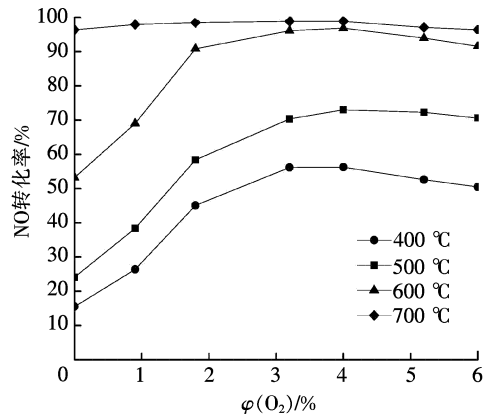


图 7 O_2 浓度对 NO 转化率的影响

Fig. 7 Effects of O_2 concentration on the conversion rate of NO

由图 7 可知,有氧存在时 NO 转化率均较无氧时的 NO 转化率高,同一温度下,随着 O_2 浓度的增加,NO 转化率逐渐升高;当 O_2 浓度达 4% 时,NO 转化率最高;继续增加 O_2 浓度,NO 转化率略有下降。这是由于 O_2 与煤焦发生气化反应,煤焦表面活性位增多,活性比表面积增大,从而使得 NO 易被吸附于煤焦表面进而被还原;当 O_2 浓度较高时,煤焦会快速消耗,煤焦表面活性中心数量减少,同时煤焦表面的活性位被产生的 CO_2 占据,使得反应速率下降。

2.7 SO_2 浓度对脱硝效率的影响

在锅炉燃烧过程中,煤中的含硫化合物被氧化生成 SO_2 进入烟气中,因此研究 SO_2 对脱硝效率的影响具有工程实际意义。采用粒径为 0.6~1.0 mm 的工业兰炭作为还原剂,反应气氛为 $N_2 + NO + O_2 + SO_2$,其中 NO 浓度为 $1\,000 \times 10^{-6}$, O_2 浓度为 4%, SO_2 浓度为 $0 \sim 2\,250 \times 10^{-6}$, N_2 为平衡气,在温度为 $400 \sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 、空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 条件下进行脱硝反应,考察 SO_2 浓度变化对 NO 转化率的影响,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,相同温度下, SO_2 浓度变化时

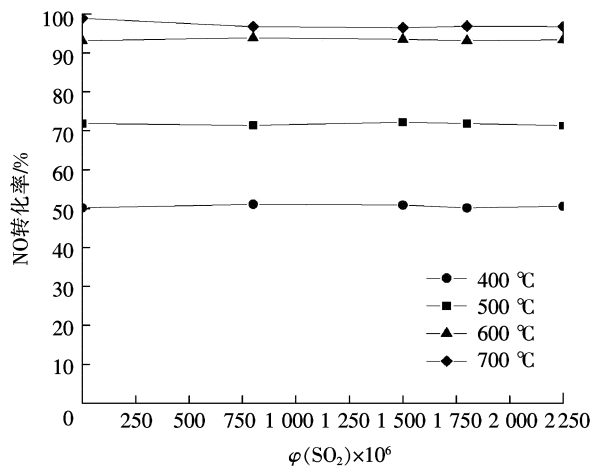


图 8 SO_2 浓度对 NO 转化率的影响

Fig. 8 Effects of SO_2 concentration on the conversion rate of NO

NO 转化率基本保持不变,这说明 SO_2 对煤焦-NO 反应的影响很小,这和 GUPTA 等^[21]的研究结果相似,却与 KRUSE 等^[22]的研究结论不同。其主要原因是反应时间不同,本实验中在空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 下进行,停留时间为 0.36 s ,反应瞬时完成,更接近实际燃煤锅炉烟气工况。由此可以得出结论:在接近实际燃煤锅炉的工况下, SO_2 浓度发生变化时,NO 的转化率基本保持不变。

2.8 CO_2 浓度对脱硝效率的影响

在锅炉燃煤燃烧过程中, CO_2 的含量是在不断增加的,在燃烧末期其最高浓度可以达到 15% 。采用粒径为 $0.6\sim 1.0\text{ mm}$ 的工业兰炭作为还原剂,反应气氛为 $\text{N}_2 + \text{NO} + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{SO}_2$,其中 NO 浓度为 $1\,000 \times 10^{-6}$, O_2 浓度为 4% , SO_2 浓度为 500×10^{-6} , CO_2 浓度为 $0\sim 16\%$, N_2 为平衡气,在温度为 $400\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 、空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 的条件下进行脱硝反应,考察 CO_2 浓度变化对 NO 转化率的影响,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,相同温度下,随着 CO_2 浓度的增加,NO 转化率基本保持不变,这说明 CO_2 对煤焦-NO 反应的影响很小。

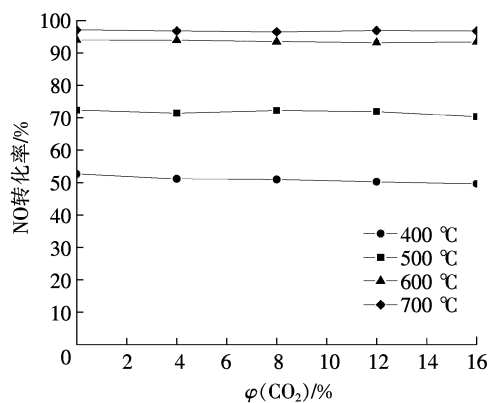


图 9 CO_2 浓度对 NO 转化率的影响

Fig. 9 Effects of CO_2 concentration on the conversion rate of NO

3 结 论

由 3 种煤焦对比发现,工业兰炭价格低廉,脱硝效果好,适合作为煤焦还原剂,且粒径为 $0.6\sim 1.0\text{ mm}$ 较为适宜。在温度为 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 、空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 条件下,NO 转化率可达 99% 。随着空速的增加,NO 的转化率下降,但当温度为 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时,空速变化对 NO 转化率没有影响,实验中适宜的空速值为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 。在无氧条件下,NO 浓度变化对 NO 转化率没有影响。相同温度下,有氧存在时 NO 转化率均较无氧时的 NO 转化率高。随着 O_2 浓度的增加,NO 转化率逐渐升高, O_2 浓度达到 4% 时,NO 转化率最高,继续增加 O_2 浓度,NO 转化率略有下降。在有氧条件下, SO_2 和 CO_2 的浓度变化对 NO 转化率没有影响。

参考文献/References:

- [1] MUZIO L J, QUARTUCY G C. Implementing NO_x control: Research to application[J]. Prog Energy Combust, 1997, 23(3): 233-266.
- [2] 李建军. 电厂脱硝方法浅议[J]. 科技视界, 2015, 27(2):300-322.
LI Jianjun. Discussion on the method of denitrification in power plant[J]. Science & Technology Vision, 2015, 27(2):300-322.
- [3] 祝百东. SNCR 烟气脱硝技术的实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
ZHU Baidong, Experimental Study on SNCR Flue Gas Denitrification Technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2006.
- [4] 凌绍华,景长勇,马婧,等. 选择性非催化还原法烟气脱硝工业试验[J]. 化工环保, 2013, 33(4) 304-307.
LING Shaohua, JING Changyong, MA Jing, et al. Industrial test for flue gas denitration by selective non-catalytic reduction [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2013, 33(4) 304-307.
- [5] 杨宏民,段景卫,兰增林. 低氮燃烧加 SNCR 脱硝技术在超临界锅炉上的应用[J]. 电站系统工程, 2011, 27(2):30-35.
YANG Hongmin, DUAN Jingwei, LAN Zenglin. Application of low NO_x combustion and SNCR denitration technology in supercritical boiler[J]. Power System Engineering, 2011, 27(2):30-35.
- [6] 唐君实,宋蕾,高攀,等. SNCR 应用于水泥窑氮氧化物控制的氮氧化[J]. 清华大学学报, 2011, 51(6):831-835.
TANG Junshi, SONG Qiang, GAO Pan, et al. NH_3 oxidation using SNCR to the control cement kiln NO_x [J]. Journal of Tsinghua University, 2011, 51(6):831-835.
- [7] 宋涛. SCR 烟气脱氮催化剂及技术研究[D]. 青岛:山东科技大学, 2010.
SONG Tao. The Study of SCR Flue Gas NO_x Catalyst and Technology [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [8] 缪明烽,钟秦,李云涛,等. 活性组分含量和复合载体对 SCR 催化剂脱硝活性的影响[J]. 化工环保, 2011, 31(6) 553-556.
MIAO Mingfeng, ZHONG Qin, LI Yuntao, et al. Effects of active component and composite carrier on denitrating activity of selective catalytic reduction catalyst[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2011, 31(6) 553-556.

- [9] 孔缓运. 纳米二氧化钛催化燃烧脱氮机理的实验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
KONG Huanyun. Study on the Denitrification and Combustion Mechanism Catalysis by Nano-TiO₂[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [10] 吴彦霞, 房晶瑞, 雷本喜, 等. 制备条件对 Mn-Fe/TiO₂ 催化剂低温脱硝性能的影响[J]. 化工环保, 2014, 34(4): 380-384.
WU Yanxia, FANG Jingrui, LEI Benxi, et al. Effects of preparation conditions on Mn-Fe/TiO₂ catalyst activity at low temperature[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2014, 34(4): 380-384.
- [11] 杨颢. 烟气脱硫脱硝净化工程技术与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 411-412.
- [12] 张亚通, 王晓承, 李立. 可再生有机胺烟气脱硝试验研究[J]. 河北科技大学学报, 2012, 33(2): 179-183.
ZHANG Yatong, WANG Xiaocheng, LI Li. Flue gas desulfurization test by using reproducible organic amine[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2012, 33(2): 179-183.
- [13] 黄哲, 陈甘棠, 温锦荣. 一氧化氮的炭还原[J]. 燃料化学学报, 1983, 11(3): 41-47.
HUANG Zhe, CHEN Gantang, WEN Jinrong. Carbon reduction of nitric oxide[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1983, 11(3): 41-47.
- [14] 张超群, 姜秀民, 黄岸永, 等. 煤焦吸附 NO 特性与红外光谱分析[J]. 化工学报, 2007, 58(3): 581-586.
ZHANG Chaoqun, JIANG Xiumin, HUANG Xiangyong, et al. Characteristics of adsorption of NO gas on coal char and FTIR analysis [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2007, 58(3): 581-586.
- [15] GUERRERO M, MILLERA A, ALZUETA M U, et al. Experimental and kinetic study at high temperatures of the NO reduction over eucalyptus char produced at different heating rates[J]. Energy & Fuel, 2011, 25(3): 1024-1033.
- [16] YAMASHITA H, TOMITA A, YAMADA H, et al. Influence of char surface chemistry on the reduction of nitric oxide with char[J]. Energy & Fuels, 1993, 7(1): 85-89.
- [17] SUZUKI T, KYOTANI T, TOMITA A. Study on the carbon-nitric oxide reaction in the presence of oxygen[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1994, 33(11): 2840-2845.
- [18] SLOVAK V, WANG S B, HAYNES B S. Kinetic studies of graphon and coal-char reaction with NO and O₂: Direct non-linear regression from TG curves[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(6): 651-660.
- [19] LI Dong, GAO Shuqiu, SONG Wenlin, et al. Experimental study of NO reduction over biomass char[J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88(7): 707-715.
- [20] AARNA I, SUUBERG E M. A review of the kinetics of the nitric oxide-carbon reaction[J]. Fuel, 1997, 76(6): 475-491.
- [21] GUPTA H, BENSON S A, FAN L S, et al. Pilot-scale studies of NO_x reduction by activated high-sodium lignite chars: A demonstration of the carbo NO_x process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, 43(18): 5820-5827.
- [22] ANGELIDIS T N, KRUSE N. Promotional effect of SO₂ on the selective catalytic reduction of NO_x with propane/propene over Ag/γ-Al₂O₃[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2001, 34(3): 201-212.

《河北科技大学学报》《河北工业科技》

影响因子再创新高

据中国知网发布的中国学术期刊影响因子年报, 2015 年《河北科技大学学报》《河北工业科技》的复合影响因子和排名再创新高。《河北科技大学学报》的复合影响因子为 0.899, 在 422 种综合性科学技术类期刊中位列第 27 名, 比 2014 年上升 11 位; 《河北工业科技》的复合影响因子为 0.827, 在 422 种综合性科学技术类期刊中位列第 43 名, 比 2014 年上升 22 位。

(河北科技大学学报编辑部)