

Experimental Research on Low Temperature Manganese Oxides SCR Denitrification for Oxy-Fuel Combustion Flue Gas

Dong Zhao, Yamei Li, Ziyi Zhen, Yating Wang, Xiang Gou*

School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin
Email: gouxiang@sina.com

Received: Nov. 16th, 2016; accepted: Dec. 3rd, 2016; published: Dec. 6th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Nitrogen oxides are one of the major sources of pollution in coal-fired power plants, and they may produce nitrate particles further forming PM_{2.5}, which causes serious damage to human health. In this paper, the denitrification effects of manganese oxides on low-temperature oxy-fuel combustion flue gas were studied based on the different SCR catalysts with different morphology and specific surface area obtained by two different preparation methods of solution combustion synthesis and coprecipitation. The results from experiments show that the denitrification rate of Mn₃O₄ increases first and then decreases with the increase of temperature under CO₂ atmosphere, and it reaches the peak value of 90.2% at 200°C; the denitrification rate of Mn₃O₄ increases first and then decreases with the increase of temperature under N₂ atmosphere, and it reaches the peak value of 93.6% at 200°C. As for Mn₃O₄/AC catalyst, under CO₂ atmosphere, the denitrification rate increases with the increase of temperature and reaches 75% at 300°C; under N₂ atmosphere, it increases with the temperature increasing and reaches 78% at 300°C. In CO₂ or N₂ atmosphere, Mn₃O₄/AC denitrification rate increases as the oxygen concentration increases and the rate decreases as the SO₂ concentration increases.

Keywords

Oxy-Fuel Combustion, Low-Temperature SCR, Manganese Oxides, Mn₃O₄/AC

*通讯作者。

富氧燃烧烟气低温锰氧化物SCR脱硝实验研究

赵 栋, 李亚梅, 甄子毅, 王雅婷, 苟 湘*

河北工业大学, 能源与环境工程学院, 天津

Email: gouxiang@sina.com

收稿日期: 2016年11月16日; 录用日期: 2016年12月3日; 发布日期: 2016年12月6日

摘 要

氮氧化物是燃煤电厂的主要污染排放源之一, 而且烟气中的氮氧化物还会产生硝酸盐等颗粒物, 从而进一步形成PM_{2.5}, 严重危害人类的身体健康。本论文通过实验研究锰氧化物对低温富氧燃烧烟气的脱硝作用, 并且使用溶液燃烧合成以及共沉淀这两种不同的制备方法, 得到了不同的结构形态和比表面积的SCR催化剂。在实验范围内, 研究发现, 在CO₂气氛下, Mn₃O₄脱硝率随温度的上升先增大后减小, 当温度为200℃时, Mn₃O₄脱硝率可达峰值90.2%; 在N₂气氛下, Mn₃O₄脱硝率随温度的上升先增大后减小, 当温度为200℃时, Mn₃O₄脱硝率可达峰值93.6%。在CO₂气氛下, Mn₃O₄/AC脱硝率随温度的上升而增大, 当温度为300℃时, Mn₃O₄/AC脱硝率可达峰值75%; 在N₂气氛下, Mn₃O₄/AC脱硝率随温度的上升而增大, 当温度为300℃时, Mn₃O₄/AC脱硝率可达峰值78%。在CO₂或N₂气氛下, Mn₃O₄/AC脱硝率随氧浓度的上升而增大, 随二氧化硫浓度的上升而减小。

关键词

富氧燃烧, 低温SCR, 锰氧化物, Mn₃O₄/AC

1. 绪论

1.1. 富氧燃烧低温 SCR 技术

富氧燃烧技术是高纯度 O₂ 与再循环烟气相混合后再进入锅炉中与煤粉燃烧, 燃烧后的产物经过脱水除尘后就可以获得较高 CO₂ 浓度的烟气; 这与传统的空气燃烧相比较, 富氧燃烧方式可减小单位燃料的 NO_x 排放量[1], 但随着国家对 NO_x 的排放标准日趋严格。因此, 富氧燃烧锅炉也必须采用相关脱硝措施来降低 NO_x 排放量, 以达到国家的环保要求。SCR 技术是以 NH₃ 为还原剂(NH₃-SCR), V₂O₅/TiO₂ 等作为催化剂, NO_x 的脱除效率可达 85% 以上[2]。从这一技术开发中获得的主要优点就是它的高效率和可靠性, 以及作为催化反应的稳定性, 但成本高是一个相当大的缺点, 以及其需要一个有效性能内的适当温度范围来放置 SCR 单元。SCR 技术的突破点是烟气一旦被除尘脱硫装置处理后, 温度下降至 200℃ 左右, 如若继续选用之前的商业催化剂来脱除烟气中的氮氧化物(NO_x), 则因为要提高烟温而须重新加热, 浪费巨大能量[3]。

1.2. 锰氧化物(MnO_x)催化剂的研究

在此项研究中, 研究了作为低温催化剂的锰氧化物(MnO_x), 不同的锰氧化物(MnO_x)催化剂是由不同的操作方法制备的, 并且具有不同的特征。此项研究工作中用到的是两种不同方法之间的比较: 共沉淀法和溶液燃烧合成法, 这是一种创新和廉价的综合替代方法, 其可以获得高纯度的、单一的混合氧化物,

其优点在于高的比表面积值，并且能够通过改变操作参数，得到各种形态和氧化态。

SCS(溶液燃烧合成)方法是基于放热反应，其中的关键是将所需的氧化物和有机燃料的金属硝酸盐溶解在水中并形成溶液，然后放置在不同温度下的烤箱中加热[4]。供给的热量使水分蒸发并使反应物非常快的分解，从而产生了一个软团聚纳米粒子的放热氧化还原反应；其可以分析烤箱的温度对结晶度的影响，而且能得到 SSA(比表面积)的氧化锰形态。研究又采用共沉淀法，通过不同的合成方法来获得锰氧化物(MnOx) [5]，从而得到具有相同氧化状态的催化剂，并研究这些制备方法是如何影响催化活性的。最后，为了将原有对 MnOx 的研究应用于 NH₃-SCR，通过在反应介质中引入二氧化硫(SO₂)以及除去反应系统中的硫来对比研究硫对锰系统特性的影响[6]。

本文主要研究在富氧燃烧下低温 MnOx 催化剂的最佳脱硝效率以及最佳 MnOx 负载于 AC 上时脱硝效率的影响因素。在确保脱硝效率的前提下，采用创新和廉价的综合替代方法来降低 MnOx 催化剂的制作成本。

2. SCR 脱硝实验设计

2.1. 催化剂的制备

2.1.1. 实验系统

① 采用溶液燃烧合成法和共沉淀法，制备出不同结构和形貌的锰氧化物(MnOx)低温 SCR 催化剂，并对所制备的样品进行了催化活性的测试。

② 用活性炭作为负载，在反应温度为 100℃~300℃的范围内，采用不同的烟气组分比例，测试最佳 MnOx/AC 催化剂的脱硝性能和效率[7]。

催化剂的脱硝活性测试是在实验室燃烧定碳炉上进行的，实验装置如图 1 所示，催化反应部分的主体结构为陶瓷管反应系统，并在陶瓷管的中间位置放入催化剂[8]。

2.1.2. 催化剂制备具体过程

通过 SCS 方法进行合成，甘氨酸/硝酸盐的摩尔比等于 1:2 是样品 I 以及甘氨酸/硝酸盐的摩尔比等于 2:1 是样品 II。随后将溶液倒入到氧化铝碗中，样品 I 和样品 II 在温度达到 400℃后，分别在 1 h 和 1.5 h 后完全反应。随后将样品收集并用研钵手工粉碎，可得到不同颜色的最终产物：黑色的样品 I 和暗棕色的样品 II。

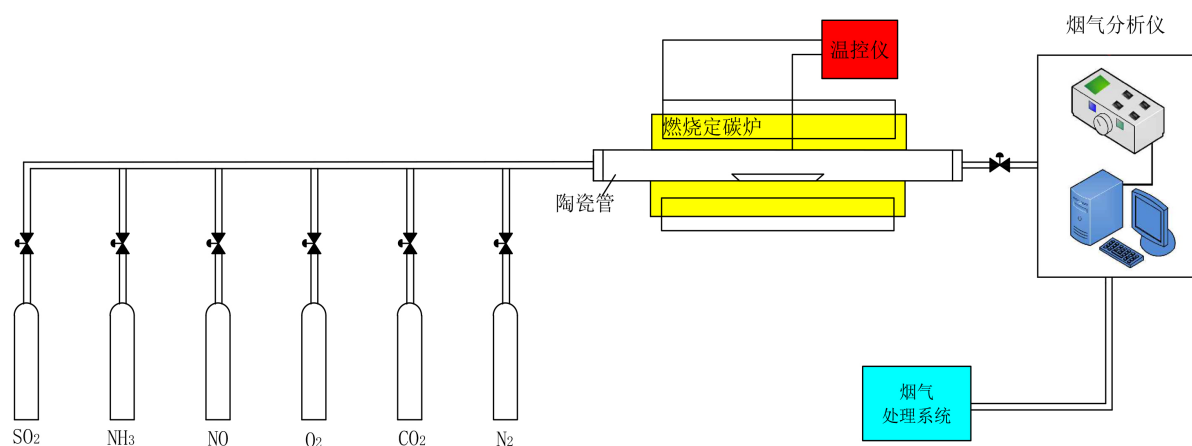


Figure 1. Catalyst activity testing device

图 1. 催化剂活性测试装置

通过共沉淀法进行合成是以高锰酸钾与抗坏血酸(维生素 C)的摩尔比 2/3, 从高锰酸钾 KMnO_4 和抗坏血酸 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ 之间的反应得到了样品 III。具体的制备方法是: 将适量的两种反应物分别放入到两个不同的烧杯中, 其中分别是含有 60 毫升的抗坏血酸(维生素 C)和 90 毫升的高锰酸钾。在大约 10 分钟的时间内就发生了沉淀反应, 烧杯底部产生了黄色沉淀。接着, 将样品 III 静置几个小时, 在 100°C 的马弗炉中干燥并随后在 400°C 下焙烧 1 小时; 对于样品 IV, 借助高锰酸钾 KMnO_4 和马来酸 $\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$ 之间的反应来制备, 马来酸与高锰酸钾的摩尔比为 1/3。首先, 在烧杯中添加这两种反应物, 同时添加 20 mL 的蒸馏水, 将溶液搅拌两小时, 并注意在搅动的第一阶段所发生的反应, 其会导致烧杯的温度略有增加, 并形成了黑色的凝胶。通过继续搅拌, 发生阶段性分离, 在底部形成了固体沉淀物, 收集此沉淀物, 并用蒸馏水和乙醇洗涤, 在 100°C 下干燥 5 小时, 最后在 600°C 下焙烧 30 分钟[9]。

通过等体积浸渍法来将催化剂负载于活性炭上, 粉碎活性炭并将其筛分成 40~60 目, 浸渍到 2 mol/L 的醋酸中, 并在 80°C 的恒温水浴箱中静置 1.5 小时, 随后把活性炭过滤干净, 并使用去离子水洗涤多次[10]。最后, 取出一定量的载体, 加入到等体积的 MnO_x 溶液中, 静置 12 h 后, 在 50°C 下干燥 2 h; 110°C 下干燥 10 h, 并在 300°C 下焙烧 3 h, 制备出 MnO_x/AC 催化剂。最后, 制备出的 SCR 催化剂包括: 样品 I (匹配 Mn_2O_3)、样品 II 和样品 III (匹配 Mn_3O_4)、样品 IV (匹配 MnO_2) 以及 MnO_x/AC 催化剂。实验合成样品及组分见表 1。

2.2. 实验工况

样品 I、II、III 和 IV 在实验中采用的模拟烟气是由 CO_2 或 N_2 、 O_2 、 NO 、 NH_3 等气体通过一定比例配比而成: 800 ppm 的 NO , 800 ppm 的 NH_3 , 6% 的 O_2 。在室温和大气压下测量, 1200 ml/min 的流量, 3408 h^{-1} 的空速, 从 50°C 进行至 350°C [11]。各种反应气经过混合器混合后进入燃烧定碳炉中, NO 转化率的表示方法为: $\eta = ((\text{NO}_{\text{in}} - \text{NO}_{\text{out}})/\text{NO}_{\text{in}}) * 100\%$

MnO_x/AC 催化剂则通过改变烟气组分含量, 反应温度以及平衡气体种类来测试 SCR 催化剂活性, 具体实验变量[12]见表 2。

Table 1. The experimental synthetic samples and components
表 1. 实验合成样品及组分

制备方法	合成样品	主要成分
溶液燃烧合成法	样品 I	Mn_2O_3
	样品 II	Mn_3O_4
共沉淀法	样品 III	Mn_3O_4
	样品 IV	MnO_2
等体积浸渍法	$\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{AC}$	$\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{AC}$

Table 2. Experimental variable
表 2. 实验变量

实验变量	变量范围
反应温度	$100^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$
反应气氛	CO_2/N_2
O_2 浓度	1%、3%、6%、9%、12%
空速	3408 h^{-1}
SO_2 浓度	0 ppm、100 ppm、200 ppm、300 ppm、400 ppm

3. 实验数据处理及分析

3.1. SCR 催化剂脱硝性能曲线分析

SCR 活性测试是通过在燃烧定碳炉中, 将催化剂与下述组成的反应气充分接触: 气体总流量为 1200 mL/min, 其中 800 ppm 的 NO, 800 ppm 的 NH₃, 6% 的 O₂, 平衡气为 CO₂ 或 N₂。

该反应气在室温下稳定后测量, 从 50℃ 进行至 350℃, 脱硝性能曲线如图 2、图 3 所示。在燃烧定碳炉中测量时, 先测量进口通入气体的浓度值, 通入反应气一段时间后, 待气体浓度保持稳定, 放入预先配制的催化剂, 再进行反应气出口值的测量。可以观察到, NO_x 的浓度在逐步下降后至一个稳定值不再变化, 然后又逐步上升至进口值。之后, 取出放置在燃烧定碳炉中的催化剂, 再通入一段时间气体, 排出进入到管子中的空气, 然后再放入另一组催化剂进行实验, 如此反复进行催化剂活性测试, 并改变实验工况。

其结果表明通过溶液燃烧合成法(SCS)合成的所有样品, 在一个比较低的温度范围内, 表现出了良好的脱硝性能, 这其中就包括了样品 I, II, III。相反地, 样品IV显示出了非常差的 NO_x 转化率, 大约被限制在了不超过 5% 的整个研究范围的温度, 这样差的转换率应该是由非常低的表面积值所引起的。但所有其他正在研究的催化剂, 在温度范围为 120℃~350℃内是处于活性状态的。因此, SCR 方法在低温度区的研究是有意义的。所有曲线都有着相同的趋势, 其中转化率呈现出了最大值, 并随后降低从而得到了图表上的贝尔曲线。从最大值降低而不是遵循典型的 S 型走势, 显然是归因于其具有至少两种副反应的竞争: 氨的催化氧化, 从而得到 N₂ 或 N₂O。锰平均氧化态值较高的样品获得了对 N₂O 的高选择性, 从获得的转换曲线可以推断出通过 SCS 合成的样品, 其较高的催化活性是由于在低温下增加的表面积。对于其他的样品, 表面积逐渐减少, 导致氮氧化物(NO_x)的转化率逐渐降低, 温度范围缩短, 在较高的温度下其最大转换峰会发生偏移[13]。而且, 通过样品 II 和样品 III 之间的比较, 虽然它们是由相同的 MnO_x 和几乎相同的比表面积值来表征, 但共沉淀样品显示出了较低的 NO_x 转化率, 却具有在更高的温度下 NO_x 转化的情形, 在温度高于 200℃ 时具有更低的选择性, 这表明合成方法影响了催化性能。在 CO₂ 和 N₂ 两种气氛下, 含有 SO₂ 浓度值 (100ppm) 时与不含 SO₂ 相比, 转换率明显下降, 这是选择性加速钝化的现象, 结果分别示于图 4、图 5。样品 I 和样品 II 具有相同的特性, 都是通过提高温度来增加转化率的。

3.2. 最佳 MnO_x 催化剂脱硝性能曲线分析

对于溶液燃烧合成法和共沉淀法所制备的样品, 以上实验测试了它们的脱硝性能, 故通过等体积浸渍法配置了 Mn₃O₄/AC 催化剂, 脱硝性能见图 6 所示。实验温度在 100℃~300℃ 之间, 6% 氧浓度, CO₂ 和 N₂ 两种不同的平衡气下的脱硝效果相比较, 催化剂在氮气(N₂)平衡气下的脱硝率明显高于相同温度下在二氧化碳(CO₂)平衡气下的脱硝率。随着温度的增加, 二者的差值逐渐缩小。SCR 催化剂在氮气(N₂)平衡气下的脱硝率大于其在二氧化碳(CO₂)平衡气下的脱硝率很可能与 CO₂ 对 NO 的吸附存在妨碍机制相关; 这也可能跟 CO₂ 与 NO 的竞争吸附有关[14]。

3.3. 氧浓度对 MnO_x 催化剂脱硝性能的影响

实验研究了氧气浓度对于 SCR 脱硝活性的影响。实验温度为 300℃, 反应气速度为 3408 h⁻¹, 在气氛分别为 N₂ 和 CO₂ 下进行活性测试。O₂ 浓度分别为 1%、3%、6%、9%、12%。NO_x 转化率如图 7 所示。氧气借助自由扩散被 SCR 催化剂所吸收, 从而进入到活性介质中参加反应。所以氧气浓度越大, 扩散作用越强, 越利于催化剂对其进行吸收并反应。实验发现催化剂对于氧气存在着较强的吸收效果, 而且 O₂ 并不直接参与反应而是以离子形式进入催化剂内部的。其一, 氧气可以将 NO 氧化为 NO₂ 这种对于氨气

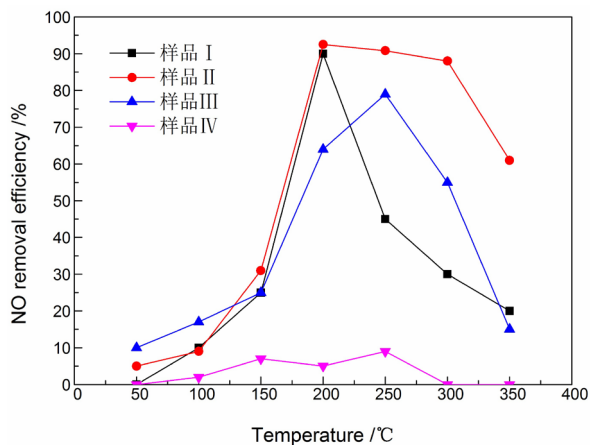


Figure 2. The change of the rate of denitrification with temperature (CO₂ atmosphere)

图 2. 样品脱硝率随温度的变化(CO₂ 气氛)

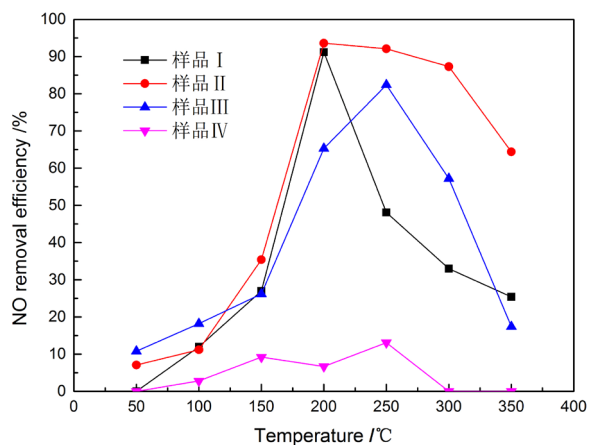


Figure 3. The change of the rate of denitrification with temperature (N₂ atmosphere)

图 3. 样品脱硝率随温度的变化(N₂ 气氛)

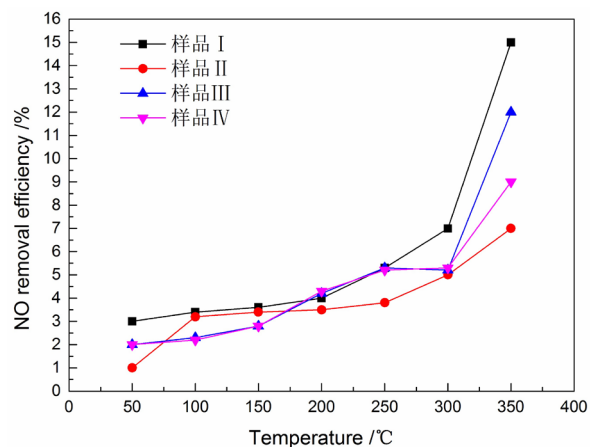


Figure 4. The change of the rate of denitrification with temperature (CO₂ atmosphere, with SO₂)

图 4. 样品脱硝率随温度的变化(CO₂ 气氛, 含 SO₂)

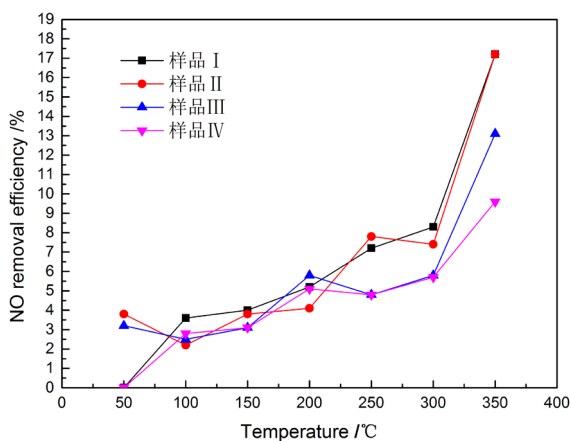


Figure 5. The change of the rate of denitrification with temperature (N_2 atmosphere, with SO_2)

图 5. 样品脱硝率随温度的变化(N_2 气氛, 含 SO_2)

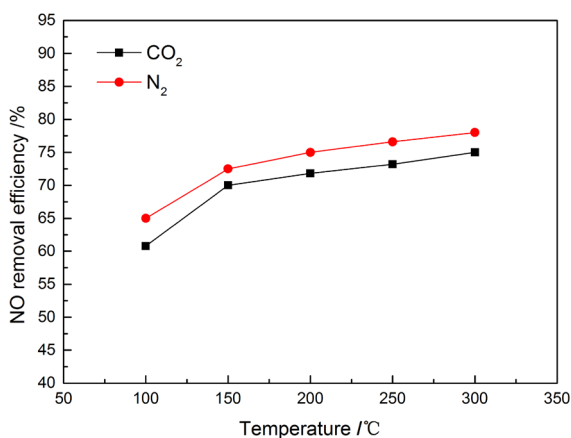


Figure 6. The change of the rate of Mn_3O_4/AC denitrification with temperature (CO_2 or N_2 atmosphere)

图 6. Mn_3O_4/AC 脱硝率随温度的变化(CO_2 或 N_2 气氛)

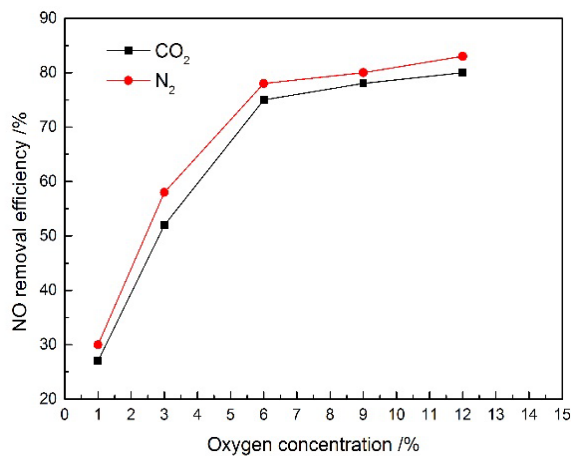


Figure 7. The change of the rate of Mn_3O_4/AC denitrification with oxygen concentration (CO_2 or N_2 atmosphere)

图 7. Mn_3O_4/AC 脱硝率随 O_2 浓度的变化(CO_2 或 N_2 气氛)

来说更容易反应为氮气和水的物质；其二，氧气可以把 NH_3 中的氢离子脱除从而使其成为 NH_2 的活性物质并与 SCR 催化剂反应[15]。实验针对在不同的氧浓度下，催化剂在其他工况均相同的条件下进行了活性测试，从而可以得到一个最佳的氧气浓度。在实践中，可以利用出口烟气预混进口反应气从而来进一步调整氧气浓度的多少。其含量的大小直接影响脱硝性能，将氧气浓度控制在一个合适的范围则有利于催化剂的性能最大化。

3.4. SO_2 对 MnO_x 催化剂脱硝性能的影响

硫元素是燃煤中的主要化学成分，对其进行燃烧反应时会直接氧化生成二氧化硫(SO_2)。少量的 SO_2 会被氧化至 SO_3 ，一旦烟道的壁面温度低于气化后的硫分露点温度后，气化硫分就会马上液化为硫酸液附着在烟道内壁从而腐蚀烟道[16]。为了研究不同的 SO_2 浓度对于脱硝活性的影响，于催化温度到达 300°C ，氧浓度为 6%，NO 进口值达到 800 ppm，氨氮比设为 1:1，反应气速度为 3408 h^{-1} ，在反应气氛分别是 N_2 和 CO_2 下进行实验。 SO_2 浓度分别为 0 ppm、100 ppm、200 ppm、300 ppm、400 ppm。NOx 转化率如图 8 所示。这是催化剂其中的一项中毒机理，催化剂活性受到多种因素的影响，但其中 SO_2 是最易发生的中毒因素。而且，在现有的燃煤电厂中，烟气中均会含有一定量 SO_2 ，催化剂的发展也会向着抗 SO_2 的这个方向进行。但在近几年研究发现， SO_3 毒化催化剂比起 SO_2 更为严重，而且与 SO_2 的中毒机理不同，活性复原几乎是不可能的。

4. 结论

不同结构和形貌的锰氧化物(MnO_x)的制备，通常可用来证实用于氮氧化物(NO_x)的低温 SCR 具有的性质。催化剂中存在的四氧化三锰(Mn_3O_4)是获得活性的关键因素，并且是最重要的选择性样品。其结晶度也起到了明显的作用，因为在低表面积的催化剂上，结晶度高的催化剂表现要差得多。实验研究发现，在 CO_2 气氛下， Mn_3O_4 脱硝率在实验温度范围内随温度的上升先增大后减小，温度为 200°C 时， Mn_3O_4 出现了脱硝峰值达 90.2%；在 N_2 气氛下， Mn_3O_4 脱硝率在实验温度范围内随温度的上升先增大后减小，温度为 200°C 时， Mn_3O_4 出现了脱硝峰值达 93.6%。 $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{AC}$ 脱硝率两种气氛下均在实验温度范围内随温度的上升而增大。在 CO_2 气氛下， $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{AC}$ 在 300°C 时获得最佳脱硝率为 75%；在 N_2 气氛下， $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{AC}$ 在 300°C 时获得最佳脱硝率为 78%。

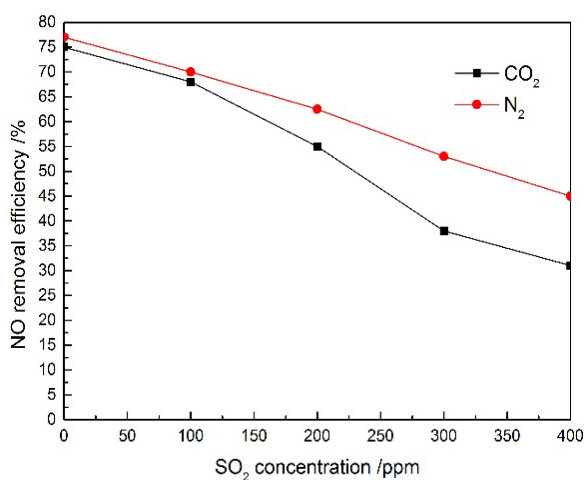


Figure 8. The change of the rate of $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{AC}$ denitrification with SO_2 concentration (CO_2 or N_2 atmosphere)

图 8. $\text{Mn}_3\text{O}_4/\text{AC}$ 脱硝率随 SO_2 浓度的变化(CO_2 或 N_2 气氛)

对于锰氧化物(MnOx)催化剂, 氧气浓度、二氧化硫以及温度均对其催化活性产生了不同程度的影响。Mn₃O₄/AC 脱硝率在实验氧浓度范围内随氧浓度的上升而增大; SO₂ 浓度对 Mn₃O₄/AC 有极大抑制作用, 且随着 SO₂ 浓度的增大催化剂脱硝率随之下降。在 CO₂ 气氛下, 100 ppm 的 SO₂ 时, Mn₃O₄/AC 脱硝率为 66%, 400 ppm 时 Mn₃O₄/AC 脱硝率为 32%; 在 N₂ 气氛下, 100 ppm 的 SO₂ 时, Mn₃O₄/AC 脱硝率为 68%, 400 ppm 时 Mn₃O₄/AC 脱硝率为 46%。

参考文献 (References)

- [1] 游卓. 富氧燃烧过程中的 NO_x 控制及其系统效率研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [2] 张玉华, 束航, 范红梅, 张亚平. 商业 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂 SCR 脱硝过程中 PM_{2.5} 的排放特性及影响因素研究[J]. 中国电机工程学报, 2015(2): 383-389.
- [3] Zhang, D., Wang, Z. and Song, C. (2014) Low-Temperature SCR Denitrification with Manganese-Cerium Composite Oxide Supported on Modified ACF. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, **34**, 1102-1107.
- [4] 刘焯. 溶液燃烧合成制备铁/镍基纳米粉末的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [5] 贺嘉. 共沉淀法制备载体及催化剂用于耐硫甲烷化的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [6] 刘树军. SO₂ 和 H₂O 对 Mn-Ge/TiO₂ 低温 SCR 催化剂的影响[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [7] Zhang, Q., Qiu, C. and Xu, H. (2011) Low-Temperature Selective Catalytic Reduction of NO with NH₃ over Monolith Catalyst of MnO_x/CeO₂-ZrO₂-Al₂O₃. *Catalysis Today*, **175**, 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.05.009>
- [8] 谭青, 冯雅晨. 我国烟气脱硝行业现状与前景及 SCR 脱硝催化剂的研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30(2): 212-219.
- [9] 张蕊. F 掺杂铈钛低温 SCR 催化剂的制备及脱硝性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [10] 张凯. 富氧燃烧烟气低温 SCR 脱硝的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [11] Shin, B. (2016) Physico-Chemical Property and Catalytic Activity of a CeO₂-Doped MnO_x-TiO₂ Catalyst with SO₂ Resistance for Low-Temperature NH₃-SCR of NO_x. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Mater, Busan, **16**, 4370-4376. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.10977>
- [12] Li, Y., Yi, H. and Tang, X. (2016) Study on the Performance of Simultaneous Desulfurization and Denitrification of Fe₃O₄-TiO₂ Composites. *Chemical Engineering Journal*, **304**, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.06.035>
- [13] 贺尧祖, 李建军. 燃煤电厂 SCR 催化剂再生和回收利用研究进展[J]. 四川化工, 2015(6): 22-24.
- [14] Chen, L., Sun, C. and Tang, C. (2016) Influencing Factors for NO_x Reduction by SCR. *Advanced Materials Research*, **591-593**, 2418-2421.
- [15] 吕刚, 吴虎, 宋崇林. Mn/ZSM-5 催化剂及其 SCR 催化性能研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(9): 1597-1600.
- [16] 史伟伟. SCR 脱硝催化剂再生浸渍及其 SO₂ 氧化控制[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2013.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网覆盖推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org