

蜂窝式 SCR 催化剂烟气脱硝试验研究

朱崇兵, 金保升, 仲兆平

(东南大学 洁净煤燃烧及发电技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

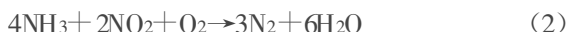
摘 要: 用模具挤出的方法制备了蜂窝式 $0.98\% \text{V}_2\text{O}_5-9.65\% \text{WO}_3/\text{TiO}_2$ 的 SCR 脱硝催化剂, 采用 BET、XRD、SEM、XRF 等方法对微观结构进行考察。在 SCR 脱硝试验装置上测试各种条件下催化剂的性能, 并与结构类似的商业催化剂进行对比。通过试验发现, 在空速比 (SV) 为 $4\,000\text{ h}^{-1}$ 、 $\text{NH}_3/\text{NO}=0.9\sim 1.0$ 、 $300\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 自制催化剂的 NO 脱除率、 SO_2 氧化率、 N_2O 生成率和氨逃逸量, 与商业催化剂相比性能接近, 基本达到商业应用的要求。在水蒸气含量超过 5% 时对 NO 脱除率影响不大, 因此催化剂适用于实际烟气。试验中未观察到 SO_2 对 NO 脱除的促进作用。自制催化剂结构强度低于商业催化剂, 有待进一步改进。

关 键 词: 蜂窝式催化剂; $\text{V}_2\text{O}_5-\text{WO}_3/\text{TiO}_2$; 商业催化剂; SCR; 脱硝

中图分类号: TQ426; X701.3 文献标识码: A

引 言

选择性催化还原 (SCR) 脱硝技术采用 NH_3 作为还原剂将烟气中的氮氧化物 (NO_x) 还原为无害的 N_2 和 H_2O , 达到污染物减排的目的, 主要化学反应式为^[1-3]:



电厂实际运行条件下还会发生部分副反应:



催化剂是 SCR 法烟气脱硝技术的核心。对脱硝效率和成本有很大影响, 目前电厂常用的催化剂是蜂窝式 $\text{V}_2\text{O}_5-\text{WO}_3/\text{TiO}_2$ 催化剂。该种催化剂中, V_2O_5 作为活性组分具有效率高和选择性好的优点; 锐钛型 TiO_2 本身是比表面积较高、抗硫中毒性良好、稳定性强的脱硝催化剂, 而且可与 V_2O_5 和 WO_3

发生电子协同效应, 提高催化剂的脱硝性能; WO_3 作为助催化剂可提高催化剂酸度、热稳定性和机械性能^[4]。蜂窝式催化剂通常采用连续挤出成型的方法制造, 由于活性组分在催化剂中均匀分布, 即使 SCR 反应器运行过程中催化剂表面发生磨损, 仍可保持较好的活性, 故适用于高灰段布置 (即置于电除尘器之前)。

本研究在脱硝试验装置上通过改变试验条件对制备的蜂窝式催化剂性能进行研究, 并与国外某种商业催化剂进行比较, 为催化剂国产化研究提供参考。

1 试验部分

1.1 蜂窝式催化剂制备及选用

本研究采用的蜂窝式催化剂为自制催化剂 (以下称为 A) 和取自某公司的商业催化剂 (以下称为 B)。

A 由实验室制备, 所用原料为 TiO_2 粉体 (含 $10\% \text{WO}_3$)、偏钒酸铵溶液、CMC, 以及玻璃纤维、丙三醇、乙醇胺等^[4-7], 其中偏钒酸铵溶液作为催化剂中活性物质 V_2O_5 的前驱物, CMC 作为粘合剂, 乙醇胺作为助挤剂, 丙三醇作为润滑剂和脱模剂, 玻璃纤维在成型催化剂内起结构加强剂的作用。

试验中采用整体成型的方法制备出蜂窝式催化剂。将纳米 TiO_2 粉体添加适量的 CMC 在小型双轴捏合机中进行充分的搅拌混合后, 再加入偏钒酸铵溶液, 乙醇胺和水等进行搅拌、捏合制成塑性适当的膏体, 经练泥后陈腐 24 h , 将所得膏体加入小型挤出机通过专用模具挤出成蜂窝式催化剂坯体。在可控制温湿度的烘箱内进行干燥, 缓慢升高温度至 $80\text{ }^\circ\text{C}$, 同时将湿度缓慢的降为 10% 以下。干燥完成的样品 (水含量 $< 2\%$) 至于马弗炉中, 控制升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$, 升高温度直至 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 保持 5 h 进行充分的

收稿日期: 2008-06-12; 修订日期: 2008-12-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 基金资助项目 (2008AA05Z303), 中国博士后科学基金资助项目 (2004035090)

作者简介: 朱崇兵 (1978-) 男, 江苏淮安人, 东南大学博士研究生。

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

焙烧,通过大量的实验已证明该温度足以使坯体中的 CMC、乙醇胺、丙三醇等添加剂燃烧分解完全,偏钒酸铵分解为 V_2O_5 ,并且此温度不会造成催化剂的烧结和金红石化^[6]。最终制备出孔数为 6×6 , 长度为 60 mm, 孔间距 8.2 mm, 壁厚 1.1 mm, 内孔边长 7.1 mm 的蜂窝式催化剂,如图 1 所示。

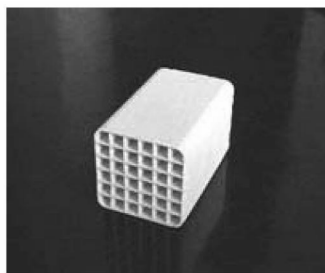


图 1 自制的蜂窝式催化剂 A

B 为从某公司的商业催化剂 (150 mm $\times$ 150 mm) 上截取的孔数为 6×6 的蜂窝式催化剂, 孔间距 8.2 mm, 壁厚 1.1 mm, 内孔边长 7.1 mm, 长度为 60 mm。

1.2 催化剂的微观结构表征

催化剂比表面积采用 Nova1000 比表面积测定仪测试, SEM 采用荷兰飞利浦公司 EDAX-9100 扫描电子显微镜-X 射线能谱仪测量。XRD 使用 XD-3AX 射线衍射仪测试。X 荧光 (XRF) 分析采用仪器为 ARL-9800 (瑞士 ARL 公司)。

催化剂 A 的 BET 比表面积为 $78.5 \text{ m}^2/\text{g}$, B 的 BET 表面积为 $83.76 \text{ m}^2/\text{g}$ 即自制的催化剂比表面积略小于商业催化剂。SEM 图表明两种催化剂均未发生烧结, 颗粒分布比较均匀, 堆积比较密实, 可提供较大的比表面积。XRD 测试结果发现, 催化剂 A、B 主相均为锐钛型 TiO_2 。

经 XRF 分析得知自制催化剂 A 的组成为 $0.98\% \text{ V}_2\text{O}_5 - 9.65\% \text{ WO}_3/\text{TiO}_2$, B 的组成为 $0.95\% \text{ V}_2\text{O}_5 - 9.2\% \text{ WO}_3/\text{TiO}_2$, 其中还包括部分硫酸盐, 表明所用的载体 TiO_2 是采用硫酸法制备的。

1.3 试验装置

自制 SCR 脱硝试验装置如图 2 所示, 主要包括气体混合、预热、SCR 反应、烟气净化和烟气分析 5 个部分。

1.3.1 气体混合

试验采用标准钢瓶气模拟烟气。烟气组成包括 N_2 、 O_2 、 NO_x 、 SO_2 、 NH_3 和水蒸气。燃煤烟气 NO_x 中 NO 占 95% 以上^[4], NO_2 的影响很小可以忽略, 试验中的 NO_x 采用 NO 代替。各气体成分经质量流量

计定量后进入混合器混合后再送入烟气预热器。水蒸气在烟气预热器上方以液体形式均匀加入, 水滴在烟气预热器中加热汽化, 生成水蒸气与其它气体混合后进入 SCR 反应器。 NH_3 在烟气进入反应器前加入^[9~10]。

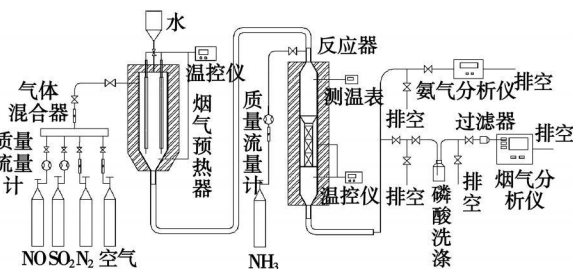


图 2 SCR 脱硝试验装置

1.3.2 预热

SCR 反应温度一般为 $300 \sim 400^\circ\text{C}$, 系统采用两级加热。烟气预热器将烟气加热至一定温度, 以确保反应器内能达到适宜的温度。混合后的烟气从预热器侧进入, 水蒸气从顶部加入。采用温控仪 (精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$) 控制温度。烟气预热器及反应器均进行外保温, 预热器与反应器之间采用金属软管连接并保温。

1.3.3 SCR 反应

不锈钢反应器直径 133 mm、长度 750 mm, 内设托架摆放蜂窝式催化剂, 催化剂外壁与反应器间的缝隙填满玻璃纤维等惰性材料以防烟气短路^[8~10]。反应器采用电加热, 以温控仪 (精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$) 控制温度。在紧靠催化剂下部设置热电偶测试反应区的温度。

催化剂上下两侧设测压管, 采用微压计测量催化剂前后压差, 与未装填催化剂时反应器内的压差相减, 得到烟气通过催化剂的压力损失。

1.3.4 烟气净化

SCR 反应器后的管道温度较低, 可能发生反应式 (5) 生成硫酸氢铵等物质^[4], 烟气流动造成催化剂磨损会携带部分粉末, 故在烟气分析仪前设置陶瓷过滤器除尘, 并采用浓磷酸洗涤烟气以防逃逸的 NH_3 对烟气分析仪测试结果造成影响^[5~8]。

1.3.5 烟气分析

进口 NO 、 NH_3 、 SO_2 浓度采用质量流量计控制。德国产 Rosemount NGA 2000 烟气分析仪用于在线测量 O_2 、 NO 、 N_2O 和 SO_2 , 根据测试结果可计算出催化剂的 NO 的脱除率、 N_2O 的生成率。Z-800XP 氨气分析仪 (美国 Environmental Sensors 公司) 用于在线测

量出口 NH_3 逃逸量。

2 试验结果与讨论

在 SCR 脱硝试验装置上测试不同反应条件下催化剂的脱硝效率、 N_2O 的生成率、 SO_2 的氧化率和 NH_3 逃逸量。烟气组成为 NO 500 $\mu\text{L/L}$ 、 NH_3 500 $\mu\text{L/L}$ 、 O_2 为 5%， N_2 为平衡气。试验中通过改变烟气流量调整空速 (SV)，反应温度区间为 250 ~ 450 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.1 温度的影响

将烟气量定在 600 L/h (STP)，即 $\text{SV} = 4\,000\text{ h}^{-1}$ ， $\text{NH}_3/\text{NO} = 1$ ，试验结果如图 3 和图 4 所示。从图中发现，对于两种催化剂，低温段 NO 脱除率相对较低，随温度上升， NO 脱除率逐渐增大，当达到一定温度后保持相对稳定。A 的 NO 脱除率略高于 B，这源于 A 中的主要活性组分 V_2O_5 含量较大。随温度的进一步升高由于发生一系列副反应， NO 脱除率略有降低。在常规 SCR 要求的温度范围 (300 ~ 420 $^{\circ}\text{C}$)，SV 为 4 000 h^{-1} 时，A、B 的 NO 脱除率均大于 85%。

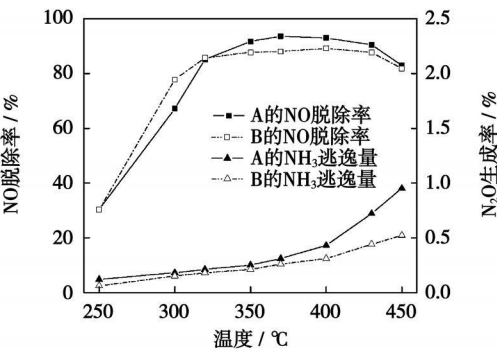


图 3 温度对催化剂脱硝 NO_x 性能的影响

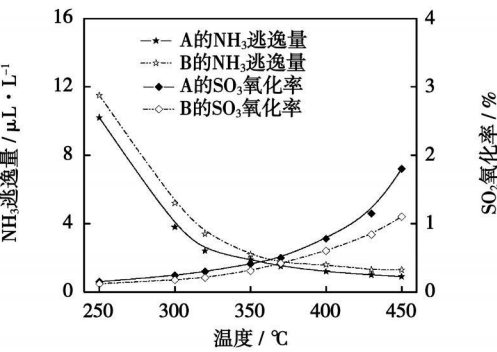


图 4 温度对催化剂 SO_2 氧化和 NH_3 逃逸的影响

A、B 的 N_2O 的生成率和 SO_2 的氧化率随着温度上升而升高，在整个温度范围 N_2O 生成率也低于

1%，而 SO_2 的氧化在温度高于 420 $^{\circ}\text{C}$ 后才变得明显，当温度高于 430 $^{\circ}\text{C}$ 时 SO_2 的氧化率会大于 1%。温度较低时 NH_3 逃逸量相对较大 (250 $^{\circ}\text{C}$ 时均大于 10 $\mu\text{L/L}$)，在温度高于 300 $^{\circ}\text{C}$ 后氨逃逸量均降低，温度高于 320 $^{\circ}\text{C}$ 后均低于 3 $\mu\text{L/L}$ 。出现这样的现象，是因为反应温度低时，反应速率较小造成较大的 NH_3 逃逸。同样是因为 A 中的主要活性组分 V_2O_5 含量较大的缘故，A 的 SO_2 的氧化率和 N_2O 的生成率均略高于 B 但 NH_3 逃逸量较少。

2.2 空速 (SV) 的影响

将反应温度定为 370 $^{\circ}\text{C}$ ，在 $\text{NH}_3/\text{NO} = 1$ 、调节通入反应器的烟气流量，考察空速比 (SV) 对催化剂的 NO 脱除率的影响。

两种催化剂的 SV 变化规律对 NO 脱除率的影响规律，如图 5 所示。 NO 脱除率随 SV 的增加先上升再降低，因 SV 较小时，催化剂孔表面形成层流边界层，反应气体不易到达催化剂表面，当 SV 逐渐增加时，情况得到改善，但当 SV 过大时，反应气体在催化剂中停留时间缩短，与催化剂活性位接触的概率下降， NO 脱除率将会下降。工业应用通常要求催化剂的 NO 脱除率 $> 80\%$ ，图中当 SV 为 4 000 h^{-1} 时， NO 脱除率达最大值，A、B 情况类似，但 B 的最佳空速比区间略大，这与催化剂的孔径分布情况有关。

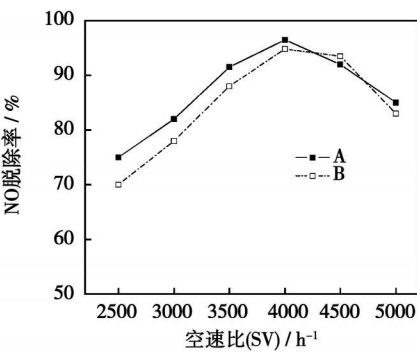


图 5 空速比 (SV) 对 NO 脱除率的影响

2.3 NH_3/NO 的影响

设定烟气流量为 600 L/h (即 $\text{SV} = 4\,000\text{ h}^{-1}$)，温度为 370 $^{\circ}\text{C}$ 时，研究 NH_3/NO 变化对 NO 脱除率和 NH_3 的逃逸量的影响，如图 6 所示。

对于两种催化剂，当 $\text{NH}_3/\text{NO} < 1$ 时， NO 脱除率随 NH_3/NO 线性上升。当 $\text{NH}_3/\text{NO} > 1$ 后， NO 脱除率增加已不明显，当 $\text{NH}_3/\text{NO} > 1.1$ 后， NO 脱除率几乎不变，故从 NO 脱除率来看， NH_3/NO 控制在 1.1 以内比较合适，此时 NO 脱除率已经远高于商业应

用的要求,若 NH_3/NO 过大则 NH_3 逸量也增大,逃逸的氨会在尾部烟道温度较低处与烟气中的水蒸气、 SO_3 等反应生成硫酸氢铵,造成空预器的堵塞腐蚀等问题。试验中 $\text{NH}_3/\text{NO} < 1$ 时, NH_3 的逸量小于 $3 \mu\text{L/L}$,随着 NH_3/NO 增加, NH_3 逸量迅速增加,当 $\text{NH}_3/\text{NO} = 1.05$ 时, NH_3 逸量分别为 3.1 和 $3.3 \mu\text{L/L}$,而当 NH_3/NO 增加到 1.1 时, NH_3 逸量升至 6.3 和 $6.9 \mu\text{L/L}$ 。如果工业应用需要将 NH_3 逸量控制在 $5 \mu\text{L/L}$ 以下时,可控制 $\text{NH}_3/\text{NO} < 1.05$,如果需要控制在 $3 \mu\text{L/L}$,则要控制 $\text{NH}_3/\text{NO} < 1$ 。商业上一般采用 $\text{NH}_3/\text{NO} < 1$,自制催化剂已能达到要求。

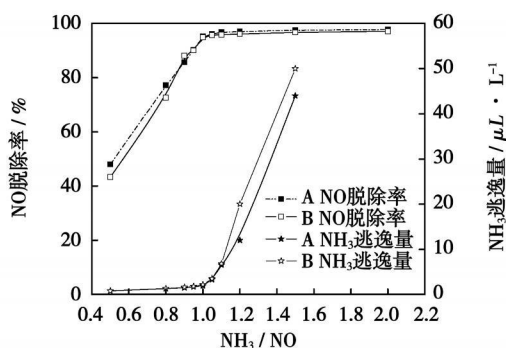


图 6 NH_3/NO 对 NO 脱除率和 NH_3 逸量的影响

2.4 水蒸气的影响

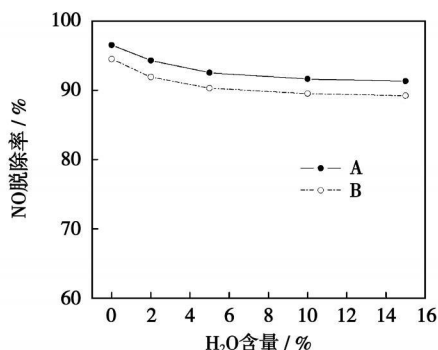


图 7 水蒸气含量对 A、B 的 NO 脱除率的影响

试验中研究了不同含量的水蒸气对催化剂 A、B 性能的影响。烟气条件为 370°C , O_2 5%, NO $500 \mu\text{L/L}$, $\text{NH}_3/\text{NO} = 1.0$, $\text{SV} = 4\,000 \text{ h}^{-1}$,水蒸气含量分别取 2%、5%、10%和 15%(体积比)。如图 7 所示,当烟气中的水蒸气含量增加时,NO 脱除率略有下降,这是因为烟气中水蒸气所具有的大量 OH^- ,会占据部分催化剂活性位,导致 NH_3 与活性位的接触机会减少而造成的^[4~5, 13~14],但同时水蒸气对 SCR

的副反应如 NH_3 的氧化反应和 N_2O 的生成反应亦有抑制作用,使这些副反应的发生温度升高,同时可拓宽催化剂的适用温度范围,因而水蒸气含量增加时,NO 脱除率下降并不显著。

试验结果表明,水蒸气含量大于 5%时对 NO 脱除率影响不大,对于实际烟气中水蒸气含量较高时(10%左右),已能满足 NO 脱除率 $> 80\%$ 的要求。水蒸气对催化剂 B 的脱硝性能的影响与 A 类似。

2.5 SO_2 的影响

以往研究结果认为,烟气中的 SO_2 对 NO 脱除有促进作用,源于烟气中的 SO_2 部分被氧化成 SO_3 ,生成的硫酸盐会在催化剂表面沉积,而硫酸盐对 NO 的 SCR 反应具有促进作用^[10~12]。试验中考察了不同含量 SO_2 对两种催化剂 NO 脱除率的影响,如图 8 所示。进口烟气条件为 370°C , O_2 5%, NO $500 \mu\text{L/L}$, $\text{NH}_3/\text{NO} = 1.0$, SV 为 $4\,000 \text{ h}^{-1}$,调整 SO_2 含量进行试验。结果发现 SO_2 含量对 NO 脱除影响较小。分析认为,反应时间太短,硫酸盐尚未能在催化剂表面达到平衡吸附,且催化剂 A 制备过程中已添加部分硫酸盐, XRF 检测发现 B 中也含有硫酸盐,且 NO 脱除率已经较高,故烟气中 SO_2 对催化剂的 NO 脱除活性的作用不明显。

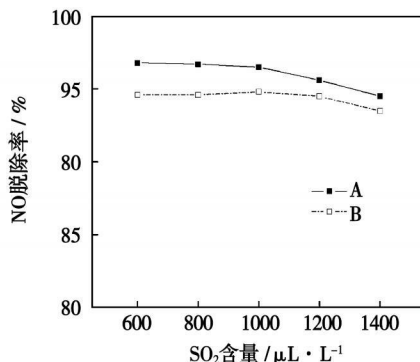


图 8 SO_2 含量对 A、B 的 NO 脱除率的影响

2.6 机械强度

催化剂机械强度测试采用日本导津公司 AG-10TA 万能试验机。抗压强度测试方法为立方体抗压试验,将蜂窝催化剂块分别垂直和水平置于测试平台上,如图 9 所示,待测负载面直接承受试验机所施压力直至催化剂块发生破裂。测试加压速度 5 mm/min ,选用量程 $2\,000 \text{ N}$ 。每种催化剂两个方向分别测试 3 组试样,取平均值后的结果如表 1 所示。

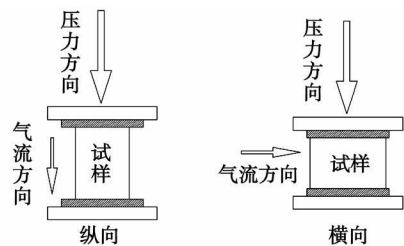


图 9 催化剂机械强度测试示意图

结果表明, 商业催化剂 B 的纵向强度大于自制催化剂 A, 而横向强度略小。B 的试样是从 150 mm × 150 mm 的商业催化剂上切割取样, 而自制的催化剂 A 为整体挤出成型, 因此横向强度测试值的参考意义较小。从纵向强度来看, B 的强度比 A 大 25% 以上, 这与催化剂的制备过程工艺有关, 且在今后的试验中调整催化剂中玻璃纤维、粘结剂等添加量和捏合过程参数, 改进制备工艺中挤出条件以及干燥焙烧的工况, 并探索新的结构添加剂, 研究提高催化剂机械强度的方法, 为下一步的工业规模试验做准备。

表 1 催化剂 A 和 B 的机械强度比较
(N/cm²)

	纵向机械强度	横向机械强度
催化剂 A	137.4	55.7
催化剂 B	172.4	53.3

3 结 论

在 SCR 脱硝试验装置上通过改变烟气条件, 反应工况对自制蜂窝式催化剂与商业催化剂的性能进行对比研究, 结论如下:

SCR 反应的温度区间(300 ~ 420 °C)内, 当空速比为 4 000 h⁻¹、NH₃/NO=0.9 ~ 1.0 时, 自制蜂窝式催化剂的 NO 脱除率、SO₂ 氧化率、N₂O 生成率和 NH₃ 逃逸量与商业催化剂相比性能接近, 基本达到商业应用的要求。烟气中水蒸气含量超过 5% 时对 NO 脱除率影响不大, 因此自制催化剂适用于实际烟气。试验过程未观察到烟气中的 SO₂ 对催化剂 NO 脱除的促进作用, 但自制催化剂的结构强度低于商

业催化剂, 有待进一步改进。

参考文献:

[1] PIO FORZATTI. Present Status and perspectives in de- NO_x SCR catalysis[J] . Applied Catalysis A: General, 2001, 222(3): 221— 236.

[2] 董建勋, 王松岭, 李永华. 选择性催化还原烟气脱硝过程数学模拟研究[J] . 热能动力工程, 2007, 22 (5): 569— 573.

[3] OLIVER KROCHER, MARTIN ELSENER. Chemical deactivation of V₂O₅— WO₃/TiO₂ SCR catalysts by additives and impurities from fuels, lubrication oils and urea solution I. Catalytic studies[J] . Applied Catalysis B: Environmental, 2007, 75(7): 41— 253.

[4] GUIDO BUSCA, LUCA LIETTI, GIANGUIDO RAMIS, et al. Chemical and mechanistic aspects of the selective catalytic reduction of NO_x by ammonia over oxide catalysts: a review[J] . Applied Catalysis B: Environmental, 1998, 18(2): 1— 36.

[5] PIO FORZATTI, DANIELE BALLARDINI, LORENZO SIGHICELLI. Preparation and characterization of extruded monolithic ceramic catalysts[J] . Catalysis Today, 1998, 41(1): 87— 94.

[6] 庞斯莱特 G. 催化剂的制备 III: 制备非均相催化剂的科学基础[M] . 北京: 化学工业出版社, 1991.

[7] ISABELLA NOVA, LUCA LIETTI, ENRICO TRONCONI, et al. Dynamics of SCR reaction over TiO₂— supported vanadia— tungsta commercial catalyst[J] . Catalysis Today, 2000, 60(3): 73— 82.

[8] JIRI SVACHULA, NATALE FERLAZZO, PIO FORZATTI. Selective reduction of NO_x by NH₃ over honeycomb DeNO_xing catalysts[J] . Ind Eng Chem Res, 1993, 12(6): 1053— 1060.

[9] ANA BAHAMONDE, ALESSANDRA BERETTA, PEDRO AVILA, et al. An experimental and theoretical investigation of the behavior of a monolithic Ti— V— W— sepiolite catalyst in the reduction of NO_x with NH₃[J] . Ind Eng Chem Res, 1996, 35(8): 2516— 2521.

[10] LIETTI L, ALEMANY J L, FORZATTI P, et al. Reactivity of V₂O₅— WO₃/TiO₂ catalysts in the selective catalytic reduction of nitric oxide by ammonia[J] . Catalysis Today, 1996, 29(2): 143— 148.

[11] ALEMANY LUIS J, LUCA LIETTI, ALE FERLAZZO, et al. Reactivity and physicochemical characterization of V₂O₅— WO₃/TiO₂ De- NO_x catalysts[J] . Journal of Catalysis, 1995, 155(4): 117— 130.

[12] LUCA LIETTI, ISABELLA NOVA, GIANGUIDO RAMIS, et al. Characterization and reactivity of V₂O₅— MoO₃/TiO₂ De- NO_x SCR catalysts[J] . Journal of Catalysis, 1999, 187(3): 419— 435.

[13] LALEMANY LUIS J, FRANCESCO BERTI, GUIDO BUSCA, et al. Characterization and composition V₂O₅— WO₃— TiO₂ SCR catalysts[J] . Applied catalysis B: Environmental, 1996, 10(1): 299— 311.

[14] YE ZHUANG, JASON LAUMB, RICHARD LIGGETT, et al. Impacts of acid gases on mercury oxidation across SCR catalyst[J] . Fuel Processing Technology, 2007, 88 (7): 929— 934.

(编辑 何静芳)

The load of a ball mill in a thermal power plant features such complicated characteristics as a big lagging, slow time variation and strong non-linearity etc., and it is difficult for conventional control methods to obtain a satisfactory control effectiveness. Therefore, the authors have presented a method for controlling the load of a ball mill based on a grey prediction PID (proportional, integral and differential) control, which integrates the design approach of the grey prediction with that of the conventional PID control, replaces the measured values of the controlled object with the on-line predicted results obtained from the grey prediction, and then performs a PID control operation. The Simulink simulation results show that the grey prediction-based PID control is superior to the conventional PID control and Smith-prediction-based PID one in respect of speediness, stability, adaptability, robustness and disturbance-resistant capability. **Key words:** ball mill load, grey prediction, GM (1, 1) model, PID (proportional, integral and differential) control, Smith predictor

真空条件下珠状凝结传热特性的理论分析与试验研究 = Theoretical Analysis and Experimental Study of Bead-shaped Condensing Heat Transfer Characteristics under a Vacuum Condition [刊, 汉] / GAO Ming, SHI Yue-tao, SUN Feng-zhong, et al (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 635 ~ 638

In contrast to the study of bead-shaped condensing heat transfer characteristics at a normal pressure, investigated were the above characteristics in a vacuum state from the following two aspects: theoretical analysis and experimental study. First, the authors have conducted a theoretical analysis from three angles: steam flow field, air-film heat resistance and surface energy. The analytic results show that the bead-shaped condensing heat exchange coefficient K increases with an increase of vacuum. Subsequently, the authors have also performed a bead-shaped condensing test under a vacuum condition. Data analysis shows that the test results are in agreement with the theoretical analytic ones, i. e. under a vacuum condition, the condensing heat exchange coefficient K increases with an increase of vacuum. In case of a relatively big Re number ($Re = 34755$), the heat exchange coefficient can increase by around 10% when the vacuum goes up by every 0.01 MPa. **Key words:** vacuum, bead-shaped condensing, heat transfer characteristics, surface energy

蜂窝式 SCR 催化剂烟气脱硝试验研究 = Experimental Study of Flue Gas Denitration by Using a Honeycomb Type SCR (Selective Catalytic Reduction) Catalyst [刊, 汉] / ZHU Chong-bing, JIN Bao-sheng, ZHONG Zhao-ping (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Combustion and Power Generation Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 639 ~ 643

By employing a die set extrusion method, prepared was a honeycomb type 0.98%V₂O₅-9.65%WO₃/TiO₂-contained SCR (selective catalytic reduction) catalyst. By using BET (brunauer-emmett-teller), XRD (X-ray diffractometer), SEM (scanning electron microscope) and XRF (X-ray fluorescence) method etc., inspected and explored was the microstructure. On a SCR denitration test rig, tested was the performance of the catalyst under various conditions and conducted was a comparison with commercial catalysts having a similar structure. Through tests, it has been found that when the space velocity (SV) equals to 4 000 h⁻¹ and NH₃/NO ratio is 0.9 to 1.0 at a temperature within a range from 300 to 400 °C, under such circumstances, NO removal rate, SO₂ oxidation rate, N₂O formation rate and ammonia escape quantity of the self-prepared catalyst are comparatively close in performance to those of commercial catalysts, basically meeting the requirements for commercial applications. When the steam content is in excess of 5%, it has little influence on the NO removal rate, thus applicable for practical flue gases. During the tests, it has not been observed that SO₂ played a role of promoting the elimination of NO. The structural strength of the self-prepared catalyst is lower than that of the commercial catalysts, necessitating further improvement. **Key words:** honeycomb type catalyst, V₂O₅-WO₃/TiO₂, commercial catalyst, selective catalytic reduction (SCR), denitration