

选择性催化还原蜂窝状催化剂工业试验研究

高岩, 栾涛, 程凯, 吕涛, 郑衍娟

(山东大学能源与动力工程学院, 山东省 济南市 250061)

Industrial Experiment on Selective Catalytic Reduction Honeycomb Catalyst

GAO Yan, LUAN Tao, CHENG Kai, LÜ Tao, ZHENG Yanjuan

(School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

ABSTRACT: The selective catalytic reduction selective catalytic reduction (SCR) honeycomb catalysts were prepared with industrial grade chemicals. The NO_x reduction was studied by using the catalysts at an industrial test set. The influences of space velocity, catalyst dosage, temperature, NH₃ to NO_x ratio, NO_x initial concentration on the catalytic activity of the catalysts were investigated. The results indicated that there was an optimal working condition for the catalysts in this study. When the inlet temperature of SCR reactor was in the range of 360~390 °C, the outlet temperature was in the range of 330~360 °C, NH₃ to NO_x ratio was in the range of 0.85-1, the space velocity was in the range of 4000~6000 h⁻¹, the highest NO_x reduction of 84% could be obtained. The temperature window with the NO_x reduction over 75% was 320~400 °C, and the highest NO_x reduction was got at 380 °C. The NO_x reduction changed obviously with different NH₃ to NO_x ratios, and over 80% NO_x reduction could be obtained when NH₃ to NO_x ratio was 0.9. The catalysts adapted well to the change of the concentration of NO_x. The NO_x reduction stayed above 70% in the range of 615~3 485 mg·m⁻³ of the NO_x concentration.

KEY WORDS: honeycomb catalysts; selective catalytic reduction (SCR); industrial flue gas; influencing factor; V₂O₅-WO₃-MoO₃/TiO₂

摘要: 以工业级药品为主要成分, 制备选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)蜂窝状催化剂, 利用工业试验台对其活性进行测试, 取得了催化剂在真实烟气情况下, 不同空速、催化剂用量、温度、氨氮比、NO_x初始浓度等因素对催化剂活性的作用效果。文中真实烟气环境下SCR脱硝系统运行存在最佳工况范围: SCR反应塔入口温度360~390 °C, 出口温度330~360 °C, 氨氮比为0.85~1, 空速在4 000~6 000 h⁻¹。此工况下, 催化剂脱硝效率可以达到84%。催化剂的75%活性温度窗口为320~400 °C, 且峰值在380 °C处取得。催化剂的脱硝效率随氨氮比变化明显, 当氨

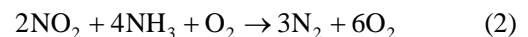
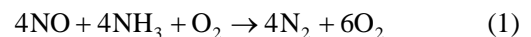
氮比达到0.9时, 催化剂脱硝效率超过80%。催化剂对NO_x浓度适应性较好, NO_x初始浓度在615~3485 mg·m⁻³范围内, 催化剂的脱硝效率始终保持在70%以上。

关键词: 蜂窝状催化剂; 选择性催化还原; 真实烟气; 影响因素; V₂O₅-WO₃-MoO₃/TiO₂

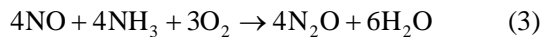
0 引言

随着《火电厂大气污染物控制排放标准》和《大气污染防治法》的颁布实施, 我国对NO_x排放的控制将日趋严格。我国在建的电厂机组基本都配套建设了选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)脱硝系统或者预留了SCR脱硝系统建设场地。目前, 至少约有2亿kW的机组容量需要建设脱硝系统。国华北京热电厂^[1]、大唐北京高井发电厂^[2]、厦门嵩屿电厂^[3]、广东台山电厂^[4]等都已经建成或在建SCR脱硝项目。目前SCR脱硝用催化剂基本都是采用国外的生产线制造或直接从外国进口。催化剂在SCR脱硝系统建设费用中占有相当大的比重, 且需要周期性更换, 采用进口SCR脱硝用催化剂无疑增加了SCR脱硝系统建设和运行的成本。因此研发SCR脱硝用催化剂对我国节能减排, 治理环境污染具有重要的经济和社会意义。

SCR NO_x是目前应用最为广泛, 同时也是技术最为成熟的固定源脱硝技术。通过向燃煤电厂烟气中投入还原剂NH₃, 在催化剂的作用下发生氧化还原反应, 生成N₂和H₂O, 实现烟气脱硝的目的。其主反应^[5-6]为:



300~400 °C时发生副反应^[5-6]为



燃煤电厂 SCR 脱硝用催化剂按其主要活性成分主要有 V-W 系, V-Mo 系, V-W-Mo 系 3 类。国内外很多学者对各类催化剂均进行了相关研究并取得了一定成果, 如: Luca Lietti^[7]、张润铎^[8]、钟秦^[9]、田柳青^[10]、朱崇兵^[11-12]等人对 TiO₂ 附载 V₂O₅、WO₃、MoO₃ 催化剂的活性及反应动力学特性进行了相关研究。但催化剂在工业应用方面及燃煤电厂实际工况运行条件下的相关研究还较少^[13-14]。本文采用工业级原料, 以 TiO₂ 为载体, V₂O₅ 为主要活性成分, 同时负载 WO₃ 与 MoO₃, 自制了具有工业应用价值的蜂窝状 SCR 催化剂, 并对该催化剂在某电厂真实烟气条件下的催化活性进行了试验研究。取得了催化剂在真实烟气情况下, 不同空速、催化剂用量、温度、氨氮比、NO_x 初始浓度等因素对催化剂活性的作用效果, 找到适合于本 SCR 脱硝系统运行最佳工况参数, 为该催化剂在燃煤电厂的工业化推广打下基础。

1 试验部分

1.1 催化剂制备

本试验所制备蜂窝状催化剂以工业级锐钛型 TiO₂、偏钒酸铵、偏钨酸铵、钼酸铵为主要原料(其质量百分比 w(V): w(W): w(Mo): w(TiO₂): 成型剂=1:4.5:4.5:72:18)溶于草酸溶液中混合搅拌 4 h, 取出进行锤打、碾压, 然后密封静置 24 h, 最后利用成型模具挤压成型。成型后催化剂于烘箱 110 °C 烘干 24 h, 马弗炉 350 °C 焙烧 4.5 h^[15-16], 温度控制精度为 ±1 °C。单块催化剂尺寸为 L 61 mm × W 61 mm × H 100 mm, 方孔尺寸 5 mm × 5 mm, 壁厚 1 mm。

1.2 工业试验台

工业试验台以山东某燃煤电厂 30 MW 机组为依托搭建, 其烟气来自该机组燃煤锅炉的尾部烟道。试验过程中, 锅炉的运行参数和烟气参数如表 1、2、3 中所示。

如图 1 所示, 试验台烟气入口布置于回转式空气预热器之前, 出口布置于静电除尘器之后。试验台管路采用 219 mm 无缝钢管。自烟气入口至 SCR 反应塔沿程布置管道旁路、烟气加热器、供氨系统、反应塔以及温度、烟气成分、流速测点。SCR 反应塔内腔尺寸为 500 mm × 500 mm, 高 2000 mm, 塔内蜂窝状催化剂分三箱布置, 每箱布置 2 层催化剂,

表 1 锅炉主要设计及运行参数

Tab. 1 Flue gas basic condition in reaction tower

参数	数值
锅炉额定蒸发量/(t·h ⁻¹)	410
过热器出口压力/MPa	10.1
汽包压力/MPa	11.7
过热气温/°C	540
给水温度/°C	227

表 2 设计用煤: 西山、埠村混贫煤

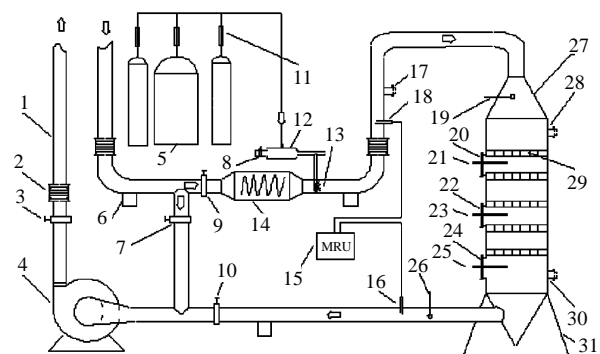
Tab. 2 Design coal: Western Hills, Bucun mixed lean coal

参数	C	H	O	N	S	W	A
元素含量/%	56.78	2.88	3.96	0.85	1.95	7.4	26.18
挥发分/%	18.34						
应用基发热量/ kJ·kg ⁻¹	5 220						

表 3 省煤器后主要设计参数

Tab. 3 Main design parameters after the economizer

参数	未加暖风器	加暖风器
烟气温度/°C	394.7	394.7
烟气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	465 173	463 883
烟气流速/(m·s ⁻¹)	6.6	6.6
飞灰浓度/(kg·m ⁻³)	0.031 0	
飞灰份额/%	0.246 0	
燃烧烟气量/(kg·m ⁻³)	7.960 2	



1—钢管; 2—波形补偿器; 3—系统出口阀门; 4—引风机; 5—气瓶; 6—管道支架; 7—旁路阀门; 8—空气进口阀门; 9—反应塔入口阀门; 10—反应塔出口阀门; 11—流量计; 12—氨/空气混合器; 13—还原剂喷孔; 14—烟气加热器; 15—烟气分析仪; 16—反应塔出口烟气测孔; 17—烟气流量测孔; 18—反应塔入口烟气测孔; 19—反应塔入口温度测点; 20—上吹灰窗; 21—上测孔; 22—中吹灰窗; 23—中测孔; 24—下吹灰窗; 25—下测孔; 26—反应塔出口温度测点; 27—反应器塔体; 28—反应塔入口压力测孔; 29—催化剂床层; 30—反应塔出口压力测点; 31—反应器塔体支架。

图 1 工业试验台

Fig. 1 Industrial test bed

第三箱底层为催化剂替换预留层。每层的尺寸为 500 mm × 500 mm × 100 mm, 合计 0.125 m³。试验台尾部布置引风机, 保证烟气的流通。

供氨系统由液氨钢瓶、减压阀、体积流量计、氨/空气混合器组成。

试验台入口设计烟气流量为 $1\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (标准状态)。入口烟气温度约为 $350\sim 380\text{ }^\circ\text{C}$ 。经烟气加热器和氨/空气混合器调节, 可实现烟气温度在 $180\sim 450\text{ }^\circ\text{C}$ 的区间内变化, 满足测定催化剂在不同温度下脱硝效率的试验需求。通过引风机、节流阀门以及管道旁路可以实现 SCR 脱硝反应器主干路管道内烟气流速在 $0\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内变化, 相应烟气流量可以控制在 $(0\sim 2\,000)\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内, 控制精度为 $\pm 2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。试验过程中控制 SCR 反应塔内空速在 $2\,000\sim 10\,000\text{ h}^{-1}$ 范围内, 对应烟气流量约为 $50\sim 350\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 保证烟气在 SCR 反应塔内与催化剂的接触时间可以达到 $0.15\sim 0.9\text{ s}$ 。每个工况稳定 10 min 。采用 VARIO Plus (MRU 烟气分析仪) 进行气样分析, 测量精度为 $\pm 2.05\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 试验工况

试验过程中分别对不同空速(停留时间)、催化剂用量、温度、氨氮比、 NO_x 初始浓度条件下催化剂的脱硝效率进行了测试。为取得单一影响因素的作用效果, 各试验过程选用相同基本工况, 针对需要测试变量进行调整。反应塔中烟气基本工况如表 4 所示。

表 4 反应塔中烟气基本工况

Tab. 4 Flue gas basic condition in reaction tower

参数	数值
入口温度/ $^\circ\text{C}$	360~390
出口温度/ $^\circ\text{C}$	330~360
氨氮比	1
NO_x 初始浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	615~820
空速/ h^{-1}	5 500

试验过程中各数据维持 10 min 以上稳定工况测定。

2.2 空速对脱硝效率的影响

脱硝反应过程为气体流过固体表面的化学反应过程, 其反应程度与烟气和催化剂接触时间长短、反应是否充分进行有直接关系^[17]。而影响烟气与催化剂接触时间的主要因素为空速和催化剂体积。空速=烟气流量/催化剂体积, 是烟气在催化剂内停留时间的倒数。空速越大, 烟气在催化剂内停留的时间越短, 催化反应作用时间越短, 反应效率

越低。然而, 在烟气流量确定的条件下, 降低空速需要更多体积催化剂。实际空速的选择需要对脱硝效率和催化剂用量两者进行权衡。现有在建或者已运行的 SCR 系统中空速一般为 $4\,000\text{ h}^{-1}$ 左右。

图 2 所示为空速对脱硝效率的影响, 试验过程中控制空速在 $2\,000\sim 10\,000\text{ h}^{-1}$ 的范围内变化, 其他条件采用表 4 所示基本工况。

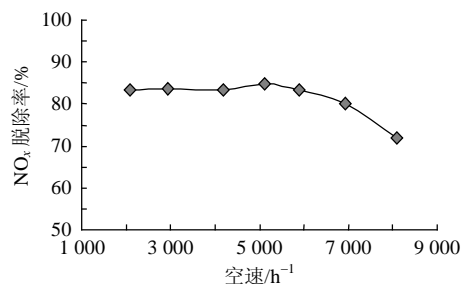


图 2 空速对脱硝效率的影响

Fig. 2 Effect of space velocity on NO_x removal efficiency

由图 2 可以看出, 在空速增大即反应时间减小的情况下, 催化剂脱硝效率总体趋势是降低的。虽然催化剂脱硝效率总体呈现下降趋势, 但在一定空速范围内催化剂活性较高且较为稳定。空速在 $2\,000\sim 6\,500\text{ h}^{-1}$ 范围内时, 催化剂的脱硝效率均高于 80% , 当空速为 $5\,000\text{ h}^{-1}$ 时, 催化剂的脱硝效率可达到 84% 。此空速范围内, 随着空速的增大, 脱硝效率变化不明显; 当空速大于 $6\,500\text{ h}^{-1}$ 时, 催化剂的脱硝效率开始明显下降, 当空速达到 $8\,000\text{ h}^{-1}$ 时, 催化剂的脱硝效率下降为 68% 。

造成脱硝效率变化较大的原因在于: 真实烟气中含有较高的烟尘含量, 在低空速下, 虽然烟气与催化剂有更充分的接触时间, 但是同时导致烟尘在催化剂表面附着、沉积, 堵塞了催化剂的微孔结构, 不利于烟气向催化剂内部微孔结构的扩散, 导致了有效接触面积的减少^[18]。由于烟气停留时间过长, 反应完的尾气在催化剂微孔结构中贮存, 难于及时扩散出, 使得内扩散作用效果减弱, 使得脱硝反应主要在外扩散过程进行, 内扩散过程对脱硝效率影响甚微。所以, 虽然烟气与催化剂有较长的接触时间, 但是催化剂的有效接触面积较低, 二者影响效果相互抵消, 导致脱硝效率基本保持不变。在高空速下, 烟尘不易在催化剂表面沉积, 但烟气与催化剂的接触时间明显减短, 内扩散过程难以充分进行, 并且随着空速的不断增大, 外扩散过程也进行不充分, 导致脱硝效率开始下降^[19-20]。

空速 2 000~6 500 h⁻¹ 范围内,脱硝效率变化甚微,基本保持水平,即脱硝效率与停留时间在此范围内达到一种动态稳定。虽然随着停留时间的延长,微孔内贮存尾气难于散出,内扩散作用减弱,但是由于空速较低烟气在催化剂表面产生较长的停留,外扩散作用得以增强,内外扩散作用变化趋势相反,变化效果相互抵消,即在宏观上呈现脱硝效率与停留时间达到动态稳定。

在高空速下,由于存在大量的灰分,在高空速下发生剧烈碰撞,加剧了烟气的扰动,烟气与催化剂表面有更多的接触机会,有效减缓了脱硝效率的下降速度,烟气在空速 5 000 h⁻¹ 处,烟尘沉积与内扩散过程达到最佳平衡点,在宏观上体现为脱硝效率最大值。

2.3 催化剂用量对脱硝效率的影响

SCR 脱硝系统中催化剂是其核心部分,且催化剂的费用占据脱硝系统总投资的 50% 以上,催化剂用量不仅直接决定脱硝效率的高低,并直接影响 SCR 脱硝系统的造价。催化剂设计用量少,会导致还原能力有限,脱硝效率较低,尾部烟气达不到排放标准;催化剂设计用量过多,不能最大限度发挥催化剂活性,造成浪费,且 SCR 脱硝系统空间需求增大,为 SCR 系统建设造成不便。

本工业试验中,催化剂在 SCR 脱硝反应塔中为三箱布置方式,分别在第一、二、三箱尾部设烟气成分测点,各测点对应催化剂体积分别为 0.025、0.075、0.125 m³,如图 1 所示。采用表 4 中所示基本工况,催化剂体积对脱硝效率影响的试验结果如图 3 所示。从图中可以看出随着催化剂体积的增加,总的脱硝效率也随之增加,但是随着催化剂体积的增加,所增加的催化剂体积对总脱硝效率的贡献会减少。在图 3 中表现为随催化剂体积的增加,总的脱硝效率的增加速率减小,即图中变化曲线的斜率

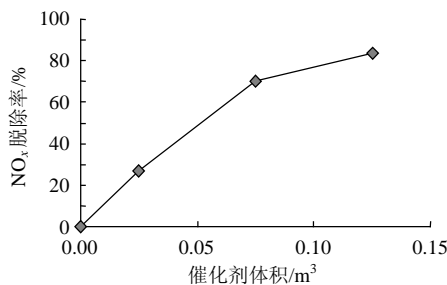


图 3 催化剂体积对脱硝效率的影响

Fig. 3 Effect of catalyst volume on NO_x removal efficiency

减小,因此当脱硝效率达到一定值后,继续增大催化剂体积所带来的活性收益不明显。

本次试验的测试数据显示,当脱硝效率达到 80% 以上时,其出口 NO_x 排放已经满足排放标准^[21-22],继续增加催化剂体积虽然可以进一步提高脱硝效率,但是这将会导致脱硝成本的提高。SCR 脱硝系统中催化剂的用量应根据各燃煤电厂设计标准及排放要求布置,寻求最佳脱硝效率与催化剂体积的比值,从而避免单一追求脱硝效率导致其他资源的浪费。

2.4 温度对脱硝效率的影响

NO_x 还原反应的速率决定烟气脱硝效率。NO_x 的还原反应需要在一定的温度范围内进行。当温度低于 SCR 系统所需温度时,NO_x 反应速率降低,氨逸出量增大;当温度高于 SCR 系统所需温度时,生成 N₂O 量增大,同时造成催化剂的烧结和失活。SCR 系统的最佳操作温度决定于催化剂成分和烟气组成。一般工业用 SCR 催化剂的最佳操作温度为 250~430 °C。为了观察温度对上述催化剂的影响,本文利用温控仪以及加热装置控制脱硝反应温度,精度为 ±1 °C。

试验过程中控制脱硝反应温度在 250~450 °C 的范围内变化,其他条件采用表 4 中所示的基本工况。试验结果如图 4 所示。

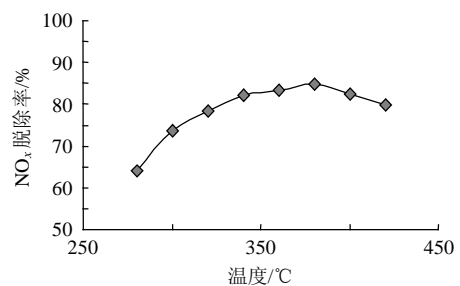


图 4 温度对脱硝效率的影响

Fig. 4 Effect of temperature on NO_x removal efficiency

由图 4 可以看出,温度对催化剂脱硝效率的影响十分显著,在所测试温度区间内,其脱硝效率随温度的升高呈现先升高后降低的趋势,变化幅度较大,单一峰值明显。

在真实烟气中,脱硝效率在 350~400 °C 处获得最大值。温度低于 350 °C 时,活性随温度的升高而增大且增长幅度较大,在 350~400 °C 范围内,脱硝效率变化平缓,在 380 °C 处脱硝效率达到峰值。当温度超过 400 °C 时,脱硝效率开始下降。

比较图 4 中曲线与前期实验室所获得试验结果^[15-16]可以发现,在真实烟气中催化剂活性高于 75% 的温度窗口缩减为 320~400 °C,最佳活性点偏移至 380 °C 处,且峰值降至 84%。这是由于,在真实烟气中,气体成分较为复杂,各种杂质含量较多,催化剂对温度有更为严格的区间要求。烟气中含有的 SO₂ 与 NO_x、NH₃ 在催化剂表面会形成竞争吸附,As、碱金属元素使得催化剂钝化、失活,所以真实烟气中催化剂的脱硝效率较前期实验室中模拟烟气测试结果有所下降。SO₂ 在 400 °C 以下时其氧化率较低,当温度超过 400 °C,其氧化率会大幅上升,竞争吸附作用加强^[23],因此在真实烟气中脱硝效率对温度的变化更为敏感,高温区间脱硝效率变化较为剧烈。

2.5 氨氮比对脱硝效率的影响

氨氮比是氨气与氮氧化物的摩尔比。在理想情况下氨氮比取 1:1,但是在实际的 SCR 运行过程中,随着机组运行情况的不同,氨气注入量需随时进行调节。如果氨氮比太小则会导致脱硝反应过程中还原剂供给不足,氮氧化物脱除不完全;如果氨氮比过大则会导致氨逃逸量增加,逃逸的氨气会与烟气中的 SO₂(SO₃)、H₂O 反应形成硫酸氢铵,堵塞催化剂的微孔结构,减少催化剂反应表面积,最终导致活性降低,并且所造成的失活是不可逆转的。此过程中所形成的化合物还将吸附烟气中的飞灰,造成空气预热器堵塞,并对尾部烟道造成腐蚀。本文通过体积流量计控制 NH₃ 的投入量,测试在不同氨氮比下催化剂的脱硝效率,确定最合理的氨氮比取值。

试验过程中控制氨氮比在 0.6~1.4 的范围内变化,其他条件采用表 4 所示的基本工况。试验结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出在试验测试范围内,催化剂

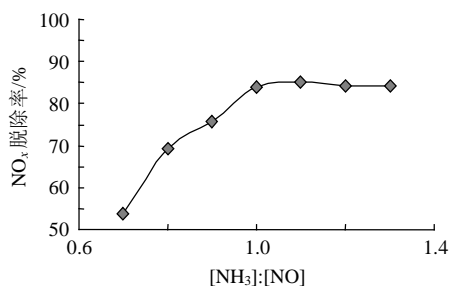


图 5 氨氮比对脱硝效率的影响

Fig. 5 Effect of NH₃ to NO_x ratio on NO_x removal efficiency

的脱硝效率随着 NH₃ 注入量的增加呈现先急剧上升后稳定不变的趋势。当氨氮比小于 1 时,催化剂的脱硝效率随着氨氮比的增加而上升。当氨氮比为 1h,催化剂的脱硝效率可以达到 84%,此后继续增加氨氮比脱硝效率变化不大。考虑到氨气溢出等因素的影响,继续增大氨氮比的研究意义不大。

在模拟烟气中氨氮比达到 0.8 时,催化剂的脱硝效率已经超过 80%^[15-16],而在真实烟气中,当氨氮比达到 0.85~0.9 时催化剂的脱硝效率才能满足脱硝要求。这是由于真实烟气中含有的 SO₂,微量元素均会对脱硝反应起抑制作用。SO₂ 的存在会与 NH₃、NO_x 在催化剂表面形成竞争吸附。因此在脱硝反应中,只有进一步增加反应物的用量才能有效促进该反应向正反应方向进行。所以只有当氨氮比较高时即投入氨气量较多时,才能有效降低杂质对脱硝反应的抑制作用,达到较为理想的脱硝效率。宏观表现为真实烟气中催化剂对 NH₃ 的敏感度较低,氨氮比达到 0.9 以上时才可以获得理想的脱硝效率。

2.6 NO_x 初始浓度对脱硝效率的影响

在化学反应中,增大反应物的浓度可以促进反应向着正反应方向进行。在氧化还原反应中,氧化剂与还原剂的相对用量直接影响反应进行的程度。国内各燃煤电厂尾部烟气的 NO_x 含量因煤种以及锅炉运行负荷的不同存在较大差异。为研究本催化剂对 NO_x 初始浓度的适应性,在真实烟气的基础上通过稀释和投入 NO_x 工业标准气等方法测试催化剂在不同 NO_x 初始浓度情况下的脱硝效率。

由图 6 中可以看出,在试验所测工况下,催化剂对烟气中 NO_x 的初始浓度表现出较强的适应性。在试验测试范围内,催化剂的脱硝效率随着 NO_x 初始浓度的增加规律性降低。NO_x 初始浓度在

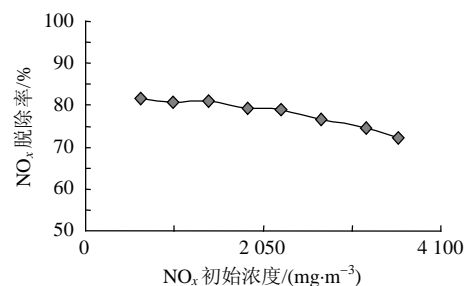


图 6 NO_x 初始浓度对脱硝效率的影响

Fig. 6 Effect of initial concentration of NO_x on NO_x removal efficiency

615~1 640 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内时, 催化剂的脱硝效率始终保持在 80% 以上。当 NO_x 初始浓度超过 2 665 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 后, 催化剂的脱硝效率低于 75%。所测试验范围内即 NO_x 初始浓度小于 3 485 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 催化剂的脱硝效率均高于 70%。

试验结果表明所测催化剂对 NO_x 初始浓度具有较强的适应性。与前期实验室模拟烟气中测试结果比较可知, 真实烟气中催化剂对 NO_x 浓度变化不敏感^[15-16]。这主要是由于模拟烟气中, 气流成分相对纯净, 烟气流经催化剂表面时扰动不剧烈, 在 NO_x 浓度较高时, NO_x 分子与催化剂表面的接触机会有限, 造成大量 NO_x 不能与催化剂发生反应而直接逸出, 表现为催化剂对 NO_x 浓度变化适应性不足。真实烟气中存在的烟尘在烟气流经催化剂表面时会与催化剂发生剧烈碰撞, 促使烟气发生剧烈扰动, 增大了烟气中 NO_x 分子与催化剂表面的接触机会, 从而有效促进了脱硝反应的进行, 表现为真实烟气中催化剂对 NO_x 浓度变化具有更好的适应性。

3 结论

从真实烟气的试验数据与前期实验室的试验结果比较可以看出, 在真实烟气环境下催化剂活性会发生一定程度的减弱, 且活性最佳工况点会发生偏移。说明复杂的烟气环境对催化剂的催化作用会起到一定的抑制和干扰作用。

1) 空速增大, 催化剂脱硝效率总体趋势是降低的, 但在一定空速范围内催化剂活性较高且较为稳定。在 2 000~6 500 h^{-1} 范围内, 催化剂的脱硝效率均高于 80%, 当空速为 5 000 h^{-1} 时, 催化剂的脱硝效率可达到 84%。当空速大于 6 500 h^{-1} 时, 催化剂的脱硝效率开始明显下降, 当空速达到 8 000 h^{-1} 时, 催化剂的脱硝效率下降为 68%。

2) SCR 脱硝系统中催化剂的用量应根据各燃煤电厂设计标准及排放要求布置, 寻求最佳脱硝效率与催化剂体积的比值, 避免单一追求脱硝效率导致其他资源的浪费。本文中当脱硝效率达到 80% 以上时, 其出口 NO_x 排放已经满足排放标准, 继续提高其活性效果不显著, 同时会导致脱硝成本较高。

3) 在真实烟气中脱硝效率对温度的变化更为敏感, 高温区间脱硝效率变化较为剧烈。温度低于 350 $^{\circ}\text{C}$ 时, 活性随温度的升高而增大且增长幅度较

大, 在 350~400 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 脱硝效率变化平缓, 在 380 $^{\circ}\text{C}$ 处脱硝效率达到峰值。当温度超过 400 $^{\circ}\text{C}$ 时, 脱硝效率开始下降。

4) 真实烟气中催化剂对 NH_3 的敏感度较低。由于 SO_2 的存在会与 NH_3 、 NO_x 在催化剂表面形成竞争吸附, 当氨氮比达到 0.85~0.9 时催化剂的脱硝效率才能满足脱硝要求。

5) 本文所测催化剂对 NO_x 初始浓度具有较强的适应性。在 615~1 640 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内时, 催化剂的脱硝效率始终保持在 80% 以上。当 NO_x 初始浓度超过 2 665 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 后, 催化剂的脱硝效率略低于 75%。所测试验范围内即 NO_x 初始浓度小于 3 485 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 催化剂的脱硝效率均高于 70%。

致 谢

本文中实验方案的制定和实验数据的测量记录工作是在山东鲁能节能设备开发有限公司王学栋、郝玉振等工作人员的大力支持下完成的, 在此向他(她)们表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 国华北京热电厂. 国华北京热电厂烟气脱硫工程竣工投产[J]. 洁净煤技术, 2000, 6(4): 56-57.
Guohua Beijing thermal power plant. The flue gas desulfurization system put into operation in Guohua Beijing thermal power plant[J]. Clean Coal Technology, 2000, 6(4): 56-57(in Chinese).
- [2] 祖兴利, 刘德光. 低 NO_x 燃烧技术在高井发电厂的应用[J]. 华北电力技术, 2001(10): 35-36.
Zu Xingli, Liu Deguang. Application of low NO_x combustion technology in Gaojing power plant[J]. North China Electric Power, 2001(10): 35-36(in Chinese).
- [3] 陈进生. 嵩屿电厂烟气 SCR 脱硝工艺及特点分析[J]. 电力环境保护, 2006, 6(22): 40-43.
Chen Jinsheng. The technology and character analysis for flue gas denitrification SCR system in Songyu power plant[J]. Electric Power Environmental Protection, 2006, 6(22): 40-43(in Chinese).
- [4] 崔建华, 汪风诞. 托普索 SCR 脱硝技术及其催化剂在中国燃煤电厂的应用[C]//第四届全国脱硫工程技术研讨会论文集, 北京, 2006: 192-196.
Cui Jianhua, Wang Fengyan. The application of Topsoc SCR denitration technology and catalyst in Chinese coal-fired power plants[C]//The Fourth National Desulfurization Project Technology Conference, Beijing, 2006: 192-196(in Chinese).

- [5] Vita A. Kondratenko, Manfred Baerns. Mechanistic insights into the formation of N_2O and N_2 in NO reduction by NH_3 over a polycrystalline platinum catalyst [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2007(70): 111-118.
- [6] 王智化, 周俊虎, 魏林生, 等. 用臭氧氧化技术同时去除锅炉烟气中 NO_x 及 SO_2 的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(11): 1-4.
Wang Zhihua, Zhou Junhu, Wei Linsheng, et al. Experimental research for the simultaneous removal of NO_x and SO_2 in flue gas by O_3 [J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27(11): 1-4(in Chinese).
- [7] Lietti L, Nova I, Forzatti P. Selective catalytic reduction (SCR) of NO by NH_3 over TiO_2 -supported $V_2O_5-WO_3$ and $V_2O_5-MoO_3$ catalysts[J]. Topics in Catalysis, 2000(11-12): 111-122.
- [8] 张润铎, 全燮, 杨凤林, 等. 制备蜂窝状筛网进行 NH_3 选择性催化还原 NO 的反应[J]. 催化学报, 2002, 23(1): 46-50.
Zhang Runduo, Quan Xie, Yang Fenglin, et al. Selective catalytic reduction of NO with NH_3 on wire mesh honeycomb[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2002, 23(1): 46-50(in Chinese).
- [9] 曲虹霞, 钟秦. NH_3 选择性催化还原 NO_x 的实验研究[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(1): 68-71.
Qu Hongxia, Zhong Qin. Investigation of selective catalytic reduction of NO_x with NH_3 [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2002, 26(1): 68-71(in Chinese).
- [10] 田柳青, 叶代启. 以堇青石蜂窝陶瓷为载体的新型钒氧化物脱氮催化剂研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 7-13.
Tian Liuqing, Ye Daiqi. Catalytic performance of a novel ceramic-supported vanadium oxide catalyst for NO reduction with NH_3 [J]. Environmental Science, 2004, 25(1): 7-13(in Chinese).
- [11] 朱崇兵, 金保升, 仲兆平, 等. 蜂窝状催化剂的制备及其性能评价[J]. 动力工程, 2008, 28(3): 459-464.
Zhu Chongbing, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Preparation and performance evaluation of honeycomb catalysts[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(3): 459-464(in Chinese).
- [12] 朱崇兵, 金保升, 仲兆平, 等. $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 烟气脱硝催化剂的载体选择[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11): 41-47.
Zhu Chongbing, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Selection of carrier for $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ De- NO_x catalyst[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11): 41-47(in Chinese).
- [13] 向军, 邱纪华, 熊友辉, 等. 锅炉氮氧化物排放特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 80-83.
Xiang Jun, Qiu Jihua, Xiong Youhui, et al. An experimental research on performance of nitrogen oxide emission from boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 80-83(in Chinese).
- [14] 方立军, 高正阳, 阎维平, 等. 低挥发分煤燃烧 NO_x 排放特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 211-214.
Fang Lijun, Gao Zhengyang, Yan Weiping, et al. Experimental study on performance of NO_x emission for low volatilization coals[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 211-214(in Chinese).
- [15] 郝玉振. 火力发电厂 SCR 脱硝技术用催化剂性能试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
Hao Yuzhen. Experimental study on performances of SCR catalyst used in coal-fired power plant[D]. Jinan: Shandong University, 2009(in Chinese).
- [16] 肖琨. SCR 脱硝技术用催化剂性能试验与成型研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
Xiao Kun. Performance test and molding study of SCR catalyst[D]. Jinan: Shandong University, 2008(in Chinese).
- [17] 蒋文举. 烟气脱硫脱硝技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Jiang Wenju. Flue gas desulfurization denitration technology handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007(in Chinese).
- [18] 朱崇兵, 金保升, 仲兆平, 等. 蜂窝状 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 催化剂脱硝性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 46-50.
Zhu Chongbing, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Study on de NO_x performance of honeycomb $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ catalysts[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 46-50(in Chinese).
- [19] 贝伦斯 M. 化学反应工程[M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 1994: 25-55.
Behrens M. Chemical reaction engineering[M]. second edition. Beijing: China Petrochemical Press, 1994: 25-55 (in Chinese).
- [20] 孙康. 宏观反应动力学及其解析方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 15-60.

Sun Kang. Macroscopic reaction kinetics and analytical method[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 15-60(in Chinese).

- [21] 国家环境保护局. GB13223—1996 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
National Environmental Protection Agency. GB13223—1996 Emission standard of air pollutants for thermal power plants[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1996(in Chinese).
- [22] 国家环境保护局. GB13223—2003 火电厂大气污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
National Environmental Protection Agency. GB13223—2003 Emission standard of air pollutants for thermal power plants[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003(in Chinese).
- [23] Bahanmonde A, Beretta A, Avila P, et al. An experiential

and theoretical investigation of the behavior of a monolithic Ti-V-W-sepiolite catalyst in the reduction of NO_x with NH_3 [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1996, 35(8): 2516-2521.



高岩

收稿日期: 2011-06-15.

作者简介:

高岩(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为 SCR 脱硝技术用蜂窝状催化剂反应机理, gaoyan.stu@gmail.com;

栾涛(1967), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为热能工程与环境工程, tluan@sdu.edu.cn.

(责任编辑 王庆霞)

中国电机工程学会 2011 年会在贵阳召开

11月27—29日, 中国电机工程学会2011年会在贵阳召开, 会议的主题是“电力安全与绿色发展”。来自国内外电力领域的800余位专家学者共聚一堂, 交流研讨智能电网技术、电力安全与绿色发展, 新能源、新技术与边缘学科、工程实践及应用等领域最新科研成果和最新动态。会议开幕式由中国电机工程学会秘书长李若梅主持; 中国科协副主席、中国电机工程学会理事长陆延昌、中国华电集团公司副总经理任书辉、中国南方电网贵州电网公司总经理唐斯庆分别在年会开幕式上致辞。

中国科协学会学术部副部长刘兴平、科技部高新技术发展及产业化司能源处处长郑方能、中国电机工程学会(台湾地区)理事长陈嗣涔、香港工程师学会会长陈福祥、国网电力科学研究院名誉院长薛禹胜院士、日本电气学会会长大久保仁、核安全专家委员会委员叶奇蓁院士、日本核能安全组织前主席、日本筑波大学名誉教授成合英树分别做了《科技社团与社会管理》、《中国能源现状及面临的挑战和能源科技发展战略》、《台湾地区的能源现状及解决方案》、《智能电网的展望》、《以风险观点来应对小概率的多米诺事件》、《日本电力系统现状及在东部大地震之后的恢复》、《后福岛时期我国核电的发展》、《福岛核电站事故真相及经验》的主旨报告。会议还开展了“智能、高效、可靠的绿色电网”、“清洁能源与分布式能源”等专题研讨。

中国电科院杂志社社长杨锐、《中国电机工程学报》编辑部副主任韩蕾、责任编辑王剑乔应邀参加了会议, 会议期间, 就当前电力行业的研究热点与专家学者进行交流, 听取专家学者对《学报》的建议, 并积极向院士、知名专家约稿, 使《学报》能够对国家973、863等重大项目快速做出反应, 刊登技术最前沿学术性、综述性论文, 努力将其打造成真正为电力行业专家、学者、一线工作者服务和交流的平台。

本次年会通过审查并收录论文887篇。其中, 优秀论文24篇, 将选登在《中国电机工程学报》增刊发表。