

[Article]

www.whxb.pku.edu.cn

Mn/Ba/Al₂O₃ 催化剂的 NO_x 氧化-储存和耐硫性能

肖建华 李雪辉* 邓莎 徐建昌 王乐夫

(华南理工大学化工与能源学院, 广东省绿色化学产品技术重点实验室, 广州 510640)

摘要 采用分步等体积浸渍法制备了 Mn/Ba/Al₂O₃ 催化剂, 并用 XRD 和 TPD 等方法进行表征. 考察了催化剂在不同温度下 NO_x 氧化-储存特性和 NO_x 脱附行为. 结果表明, Mn/Ba/Al₂O₃ 催化剂具有较高的催化 NO 氧化活性和较大的 NO_x 储存容量. BaMnO₃ 是主要的活性组分; Mn 能够催化 NO 的氧化反应, 且具有一定的 NO_x 储存能力; Ba 是主要的储存组分, 将 NO_x 以硝酸盐的形式储存; 硝酸盐在 300~600 °C 分解, 释放出 NO_x. Mn/Ba/Al₂O₃ 催化剂在 800 °C 老化 6 h 后, NO 氧化活性和 NO_x 储存能力稍有下降. 低含量的 SO₂ 对催化剂的 NO 氧化活性和 NO_x 储存能力没有明显影响; 高含量的 SO₂ 使催化剂的 NO 氧化活性降低, NO_x 储存量减小, 最终导致催化剂失活.

关键词: 氮氧化物, 氧化-储存, 热稳定性, 耐硫性能, Mn/Ba/Al₂O₃

中图分类号: O643

The NO_x Oxidation-Storage and Tolerance of SO₂ Poison of Mn/Ba/Al₂O₃ Catalyst

XIAO, Jian-Hua LI, Xue-Hui* DENG, Sha XU, Jian-Chang WANG, Le-Fu

(The Guangdong Provincial Laboratory of Green Chemical Technology, School of Chemical and Energy Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract The performance of NO_x oxidation-storage and desorption over Mn/Ba/Al₂O₃ catalyst were investigated at different temperatures. The catalysts were prepared by equal volume impregnation method and characterized by XRD and TPD. The results showed that Mn/Ba/Al₂O₃ catalyst had high catalytic activity for NO oxidation and large NO_x storage capacity. BaMnO₃ was the major active component. Mn could catalyze the oxidation of NO, having certain NO_x storage capacity. Ba was the major storage component, NO_x were stored with the formation of the nitrate that can be decomposed between 300~600 °C to release NO_x. When Mn/Ba/Al₂O₃ was aged at 800 °C for 6 h, both the catalytic activity for NO oxidation and the NO_x storage capacity were slightly decreased. The catalytic activity for NO oxidation and the NO_x storage capacity were hardly affected by low concentration SO₂. However, higher concentration SO₂ decreased the catalytic activity for NO oxidation and the NO_x storage capacity, leading to deactivation of the catalyst.

Keywords: Nitrogen oxide, Oxidation-storage, Thermal stability, Sulfur tolerance, Mn/Ba/Al₂O₃

随着能源资源日益减少, 人们环保意识增强, 贫燃发动机(柴油机和贫燃汽油机)因其较高的燃油经济性和较少的污染排放, 逐渐得到推广应用. 但是, 传统的三效催化剂对贫燃条件下的 NO_x 脱除效率低, 根本无法满足严格的排放标准. NO_x 储存-还原(NO_x storage-reduction, NSR)催化净化技术是有效

解决贫燃条件下机动车尾气污染的新方法, 受到国内外研究工作者极大关注^[1-2]. 在贫燃(富氧)条件下, 催化剂中的活性组分先将 NO 捕获并将其氧化成 NO₂, 然后转移到碱性的储存组分中以硝酸盐的形式储存起来. 此硝酸盐在化学计量气氛或富燃(贫氧)气氛下是热力学不稳定的, 容易分解并释放出 NO_x,

Received: December 29, 2005; Revised: March 3, 2006. *Correspondent, E-mail: cexhli@scut.edu.cn; Tel: 020-87114707.

国家自然科学基金(20476032)及广东省自然科学基金(030951)资助项目

在此气氛下, CO、HC 和 NO_x 可以在催化剂上被催化转化, 同时, 催化剂得到再生^[3-6].

当前, NSR 催化剂主要以贵金属 Pt、Rh 为 NO_x 的氧化和还原活性组分^[7-10], 以碱土或碱金属氧化物为储存组分. NO 氧化和 NO_x 储存是 NSR 催化反应的关键步骤, 催化剂的 NO 氧化活性和 NO_x 储存能力是影响 NO_x 去除效率的重要因素^[2]. *p* 型半导体过渡金属氧化物对 NO 完全氧化反应有催化作用, 其中 Mn、Cr、Co 活性较强^[11]. 如利用这些过渡金属氧化物替代贵金属, 在贫燃条件下将 NO 氧化成 NO₂ 并储存于储存组分上, 然后在富燃条件下释放并被贵金属还原, 将大幅度降低贵金属用量, 对降低 NSR 催化剂的制备成本具有重要意义. 关于取代贵金属 NSR 催化剂的研究尚未见报道. 本文研制出 Mn/Ba/Al₂O₃ 催化剂, 系统考察了催化剂的 NO_x 氧化-储存活性, NO_x 释放特性, 热稳定性和耐硫性能.

1 实验部分

1.1 催化剂制备

采用分步等体积浸渍法制备催化剂. 载体为 γ -Al₂O₃ (60~80 目, 比表面积 191 m²·g⁻¹, 大连艺秀分子筛催化剂有限公司).

5Mn/15Ba/Al₂O₃ 催化剂(5、15 分别表示 Mn 和 Ba 的质量分数(%), 下同)按以下方法制备. 先将载体浸渍一定含量的乙酸钡溶液, 静置 24 h, 120 °C 恒温干燥 4 h, 600 °C 下焙烧 5 h, 然后浸渍于一定含量的硝酸锰溶液中, 相同条件下静置、干燥、焙烧. 同样方法制得 5Mn/Al₂O₃ 催化剂. 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 在 800 °C 下焙烧 6 h, 得到老化样品, 记作 5Mn/15Ba/Al₂O₃(800).

将载体浸渍一定含量的乙酸钡溶液, 静置 24 h, 120 °C 恒温干燥 4 h, 600 °C 下焙烧 5 h, 然后浸渍于一定含量的氯铂酸溶液中, 经相同条件下静置、干燥、焙烧制得 1Pt/15Ba/Al₂O₃ 催化剂.

1.2 NO_x 的氧化-储存性能测试

测试在常压固定床流动反应器中进行. 反应器材质为石英玻璃, 内径 $\phi=12$ mm×300 mm, 催化剂用量 1.0 g, 空速 45000 h⁻¹. 催化剂床层温度由 AI-708PB 型温度控制器程序控制. 1Pt/15Ba/Al₂O₃ 催化剂在 6% H₂/N₂ (6% H₂ 表示 H₂ 的体积分数为 6%, 下同)气氛中 500 °C 下预还原 1 h, 然后在 8.5% O₂/N₂ 气氛中预氧化 1 h. 催化剂在 500 °C 用 300 mL·min⁻¹ 高纯 N₂ 吹扫 0.5 h 后, 降温至反应温度, 通入反应气体. 反应气体组成: 0.051% NO/8.5% O₂/N₂ 平衡气和

不同含量的 SO₂, 总流量 900 mL·min⁻¹.

使用德国 MRU 公司的 SWG 300 烟气分析仪在线记录出口 NO、NO₂、NO_x 和 SO₂ 含量. 用积分法计算 NO_x 储存量, 如式(1). 式中 NSC 表示 NO_x 储存量, [NO_x]_{in}、[NO_x]_{out} 分别表示进口和出口 NO_x 体积, *t*₁、*t*₂ 分别表示储存开始和结束时间, *V* 表示气体总流量, *m*_{cat} 为催化剂质量.

$$NSC = \frac{[NO_x]_{in} \times (t_2 - t_1) - \int_{t_1}^{t_2} [NO_x]_{out} dt \times V}{22.4 \times m_{cat}} \quad (1)$$

1.3 程序升温脱附(NO_x-TPD)

将 1.2 节中储存 NO_x 的催化剂在 50 °C 下, 以 300 mL·min⁻¹ N₂ 吹扫 0.5 h. 以 10 °C·min⁻¹ 的升温速率程序升温至 800 °C, 高纯 N₂ 850 mL·min⁻¹ 吹扫. 用式(2)计算 NO_x 脱附量 *D*, *t*'₁、*t*'₂ 分别表示脱附开始和结束时间, 其它参数同式(1).

$$D = \frac{\int_{t'_1}^{t'_2} [NO_x]_{out} dt \times V}{22.4 \times m_{cat}} \quad (2)$$

1.4 催化剂表征

XRD 测试采用日本理学 D/MAX-3A 型 X 射线衍射仪. 测试条件为, Cu K_α 射线, Ni 滤波, 射线波长 0.15418 nm, 电压 30 kV, 管电流 30 mA, 步长 0.02°, 扫描范围为 2 $\theta=5^\circ$ ~80°.

2 结果与讨论

2.1 XRD 测试结果

图 1(a)为 5Mn/Al₂O₃ 600 °C 焙烧样品的 XRD 图谱. 23°、32.9°、55°、66°为 Mn₂O₃ 的特征衍射峰, 无其它晶态锰的衍射峰; 37.2°、45.8°、67.2°为 γ -Al₂O₃ 的特征衍射峰. 图 1(b)为 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 的 XRD 图谱. 19.5°、37.5°、46.2°、66.7°出现 γ -Al₂O₃ 的衍射峰; 只在 25.8°、31.4°、41.2°出现 BaMnO₃ 的特征衍射峰, 无其它晶态锰的衍射峰, 表明 Mn₂O₃ 与 BaO 作用形成了 BaMnO₃; 没有发现 BaO、BaCO₃ 晶态衍射峰. 图 1(c)为 5Mn/15Ba/Al₂O₃(800)的 XRD 图谱. 36.8°、45.9°、66.8°归属于 γ -Al₂O₃ 的特征衍射峰; 26.1°、31.6°、41.2°为 BaMnO₃ 的特征衍射峰; 19.7°、28.5°、34.2°归属于 BaAl₂O₄ 的特征衍射峰, 表明高温作用下形成了尖晶石型 BaAl₂O₄.

2.2 NO_x 的氧化-储存性能

350 °C 下不同催化剂的 NO_x 储存量、穿透时间(出口 NO_x 含量为进口 NO_x 含量的 10% 的时间)、出

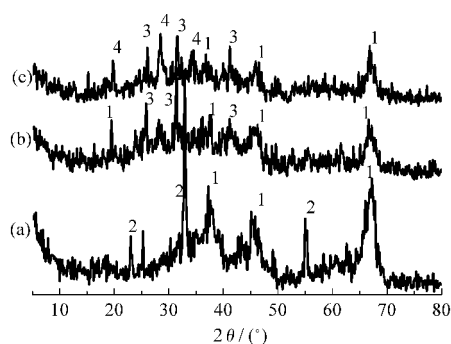


图1 催化剂的 XRD 谱

Fig.1 XRD patterns of catalysts

1: γ -Al₂O₃, 2: Mn₂O₃, 3: BaMnO₃, 4: BaAl₂O₄; (a) 5Mn/Al₂O₃, (b) 5Mn/15Ba/Al₂O₃, (c) 5Mn/15Ba/Al₂O₃(800); 5Mn and 15Ba represent the mass ratios of Mn and Ba in the catalysts are 5% and 15%, respectively; 800 means the aged temperature(°C)

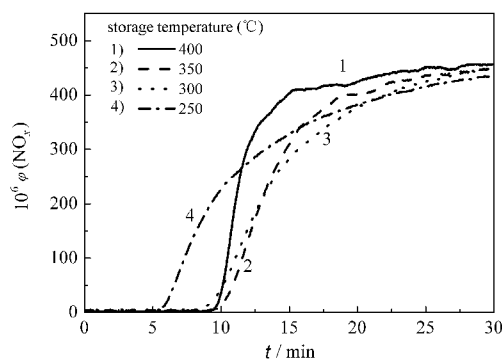
口 NO₂/NO_x 摩尔比, 如表 1 所示. 5Mn/Al₂O₃ 的 NO_x 储存量小, 穿透时间短; 添加 Ba 后, 储存量显著增加, 穿透时间明显延长, 出口 NO₂/NO_x 摩尔比增加. 因此, 可以认为 Ba 起着主要的储存作用. 结合 XRD 测试结果可知: Ba 与 Mn 在高温下相互作用, 形成的 BaMnO₃ 是主要的活性组分, 使 Mn 氧化 NO 的能力显著增强. 与 1Pt/15Ba/Al₂O₃ 比较可以看出, 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 的 NO_x 储存量大, 穿透时间长, 氧化 NO 的能力强.

图 2 为不同温度下 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 氧化-储存尾气中 NO_x 含量随时间的变化曲线, 表 2 为 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 在不同温度下的 NO_x 储存量、穿透时间、出口 NO₂/NO_x 摩尔比和 NO_x 脱附量. 10 min 之前, 300 °C 和 350 °C 下, 出口没有检测到 NO_x. 在 250 °C 下, 5 min 后就有大量的 NO_x 穿透催化剂, 80 min 出口 NO₂/NO_x 摩尔比仅为 29%, 可见该温度下催化剂氧化 NO 的活性低, 大量的 NO 没有被氧化为 NO₂.

表 1 350 °C 下不同催化剂的 NO_x 储存量、穿透时间、出口 NO₂ 与 NO_x 摩尔比Table 1 NO_x storage capacity, breakthrough time, and molar ratio of NO₂ and NO_x over different catalysts at 350 °C

Catalyst	NSC(NO _x) ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	t_{BT} / s	$n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ (%)
5Mn/Al ₂ O ₃	117.2	80	52
5Mn/15Ba/Al ₂ O ₃	397.9	651	70
5Mn/15Ba/Al ₂ O ₃ (800)	236.1	275	54
1Pt/15Ba/Al ₂ O ₃	309.3	297	32

NSC: NO_x storage capacity; t_{BT} : breakthrough time, defined as the time when $\varphi_0(\text{NO}_x)/\varphi_{\text{F}}(\text{NO}_x)=10\%$, where φ_0 and φ_{F} are volume fractions in outlet gas and in feed gas; storing for 80 min.

图 2 不同温度下出口 NO_x 含量随时间的变化Fig.2 Change of NO_x concentration with time in outlet gas at different temperatures

gas: 0.051% NO and 8.5% O₂ in N₂;
total flow rate: 900 mL·min⁻¹

储存温度为 400 °C 时, 10 min 后, 出口 NO_x 含量迅速升高, 储存反应达到平衡, 因而 NO_x 储存量相对较小. 350 °C 以上, NO 氧化转化率受平衡限制而降低^[1], 导致催化剂的 NO_x 储存能力下降. 350 °C 时, 催化剂具有很好的氧化 NO 活性, 将氧化生成的 NO₂ 以硝酸盐的形式储存起来; 既有足够长的穿透时间, 又有较大的 NO_x 储存容量.

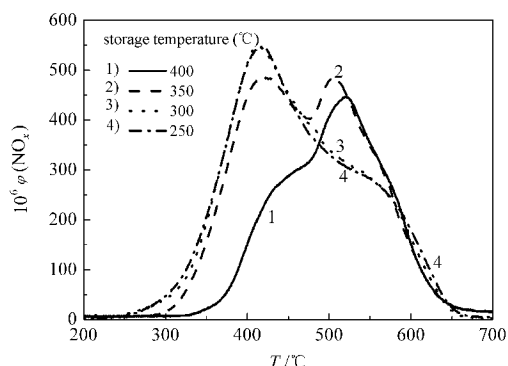
2.3 NO_x 脱附性能

图 3 是 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 催化剂不同温度储存 NO_x 后的 NO_x-TPD 谱图, 可以看到随着储存温度降低, 脱附峰也相应向低温方向移动. 250 °C 和 300 °C 储存样品同在 415 °C 有最大 NO_x 脱附量, 脱附谱图相似, 脱附量相近. 350 °C 储存样品在 430 °C 和 503 °C 有两个脱附峰, 而 400 °C 的储存样品在 520 °C 出现脱附峰, 430 °C 附近有一肩峰. 从脱附行为可以推断 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 催化剂在 250~400 °C 储存时, 可能有两个储存活性位, 低温活性位应归于 Mn 位, 高温活性位归于 Ba 位, Mn 位储存的 NO_x 更容易脱附. 低于 350 °C 时, Mn 位的储存活性较高; 高于 350 °C 时, Mn 位的储存活性受到抑制, 主要由 Ba 位发挥储存

表 2 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 在不同温度下的 NO_x 储存量、穿透时间、出口 NO₂ 与 NO_x 摩尔比和 NO_x 脱附量Table 2 NO_x storage capacity, breakthrough time, molar ratio of NO₂ and NO_x, and desorption amount over 5Mn/15Ba/Al₂O₃ at different temperatures

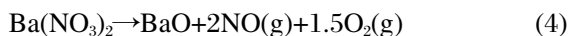
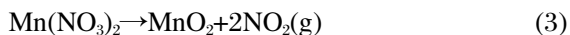
$T / ^\circ\text{C}$	NSC(NO _x) ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	t_{BT} / s	$n(\text{NO}_2)/n(\text{NO}_x)$ (%)	$D(\text{NO}_x)$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)
250	367.2	393	29	368.1
300	404.9	659	55	385.5
350	397.9	651	70	398.8
400	346.0	611	54	289.5

D: desorption amount, storing for 80 min

图3 5Mn/15Ba/Al₂O₃的NO_x-TPD谱图Fig.3 NO_x-TPD profiles of 5Mn/15Ba/Al₂O₃ in N₂flow rate: 850 mL·min⁻¹

作用. 储存和脱附实验数据表明, 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 催化剂在 350 °C 下进行 NO_x 的氧化-储存时, Mn 既有较高的氧化 NO 活性, 又能和 Ba 共同将氧化生成的 NO₂ 储存起来.

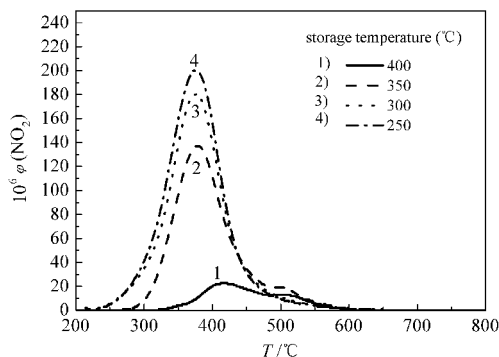
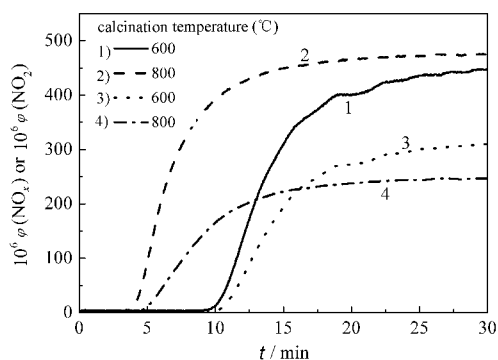
TPD 测试中检测到释放的 NO_x 大部分为 NO, 还有少量 NO₂(图 4). 随着储存温度降低, 释放的 NO₂ 增加, 400 °C 储存样品脱附尾气中 NO₂ 含量不到 NO_x 总量的 5%, 250 °C 储存样品脱附尾气中 NO₂ 含量为 NO_x 总量的 20%. NO₂ 主要由硝酸锰分解产生. 硝酸锰和硝酸钡的分解反应式分别为



也有少量的 NO₂ 是由硝酸钡分解产生的 NO 和 O₂ 在催化剂上再次发生氧化反应生成的^[2]. 脱附产物也证明 Mn 具有氧化和储存功能, 而且都受温度影响.

2.4 耐热稳定性

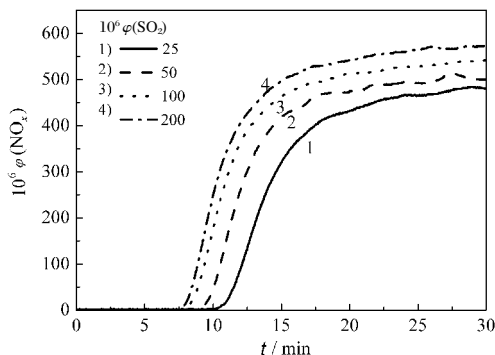
如前所述, 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 催化剂在 600 °C 焙烧活化后具有优良的 NO_x 氧化-储存性能. 800 °C 下老化 6 h 后, 4.5 min 时出口气体中检测到 NO_x, NO_x

图4 5Mn/15Ba/Al₂O₃的NO₂-TPD谱图Fig.4 NO₂-TPD profiles of 5Mn/15Ba/Al₂O₃ in N₂flow rate: 850 mL·min⁻¹图5 350 °C 下出口 NO_x(1,2)和 NO₂(3,4)含量随时间的变化Fig.5 Change of NO_x(1,2) and NO₂(3,4) concentration with time in outlet gas at 350 °Cgas: 0.051% NO and 8.5% O₂ in N₂;total flow rate: 900 mL·min⁻¹

含量升高速度明显加快, 80 min 时达到进口含量; 同时 NO₂ 呈相似的上升趋势. 80 min 储存量为 236.1 μmol·g⁻¹, n(NO₂)/n(NO_x) 为 54%. 老化样品较新鲜样品的 NO_x 储存性能和 NO 氧化活性均有一定程度下降, 见图 5 和表 1. XRD 结果表明, 老化后生成了尖晶石型的 BaAl₂O₄, 可能使 NO_x 储存活性位减少; 也可能高温烧结, 导致催化剂 NO_x 储存能力降低.

2.5 耐硫性能

不同含量的 SO₂ 对 5Mn/15Ba/Al₂O₃ 催化剂 NO_x 储存性能的影响如图 6 所示. 低含量的 SO₂ 对催化剂的 NO_x 储存性能没有明显影响, 而 SO₂ 的体积分数超过 100×10⁻⁶ 时, 穿透时间缩短, 储存 15 min 后, 由于储存的 NO_x 释放出来, 导致出口 NO_x 含量超过进口含量, NO_x 储存量降低. 进口 SO₂ 的体积分数为 0、25×10⁻⁶、50×10⁻⁶、100×10⁻⁶、200×10⁻⁶ 时, 穿透时间

图6 含 SO₂ 时 350 °C 下出口 NO_x 含量随时间的变化Fig.6 Change of NO_x concentration with time in outlet gas at 350 °Cgas: 0.051% NO and 8.5% O₂ in N₂; total flow rate: 900 mL·min⁻¹

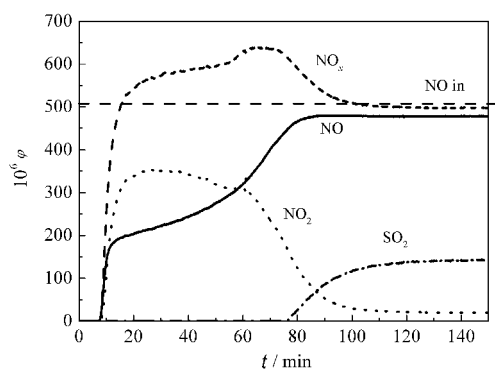


图7 含 200×10^{-6} SO₂ 时 350 °C 下出口 NO_x 和 SO₂ 含量随时间的变化

Fig.7 Change of NO_x and SO₂ concentration with time in outlet gas at 350 °C

gas: 0.051% NO, 8.5% O₂ and 200×10^{-6} SO₂ in N₂;
total flow rate: 900 mL·min⁻¹

分别为 651 s、690 s、610 s、534 s、506 s、30 min, NO_x 储存量分别为 332.5、320.0、268.1、224.4、191.1 μmol·g⁻¹, NO_x 储存量分别降低 3.8%、19.4%、32.5%、42.5%。值得探讨的是 25×10^{-6} 的 SO₂ 使穿透时间延长 40 s, 可能反应初期 SO₂ 将 NO 氧化为 NO₂, 促进了 NO_x 储存^[13]。

图7为 200×10^{-6} SO₂ 对 5Mn15Ba/Al₂O₃ 催化剂 NO_x 储存性能的影响过程。8 min 之内出口没有 NO_x; 随后 NO 和 NO₂ 含量快速升高; 15 min 时 NO_x 超过进口含量, NO 和 NO₂ 含量升高速度减慢; 30 min 左右 NO₂ 含量缓慢下降, NO 和 NO_x 含量缓慢上升; 60 min 时出现较宽的 NO_x 脱附峰, NO 含量升高速度加快, NO₂ 含量快速降低; 80 min 时, 出口检测到 SO₂, NO_x 和 NO 均接近进口含量; 随后, NO、NO₂ 和 NO_x 含量趋于恒定, SO₂ 缓慢升高; 150 min 时, 出口气体中 NO、NO₂、NO_x 和 SO₂ 含量分别为 478×10^{-6} 、 498×10^{-6} 、 20×10^{-6} 、 143×10^{-6} , 催化剂失活。

反应初期, 催化剂将 NO 氧化为 NO₂, 以硝酸盐形式储存起来, 同时将 SO₂ 氧化为 SO₃, 以硫酸盐的形式储存起来。NO 和 SO₂ 在 Mn 位竞争氧化反应, 最后 SO₂ 占优势; NO₂ 和 SO₃ 在 Ba 位竞争成盐反应, SO₃ 的亲合势大^[14], SO₃ 竞争占优势, 促进硝酸盐分解, 释放出 NO_x。最终 Mn 位和 Ba 位硫酸盐化, 催化剂失去氧化和储存活性, SO₂ 大部分穿透催化剂^[15-17]。

3 结论

综上所述, Mn/Ba/Al₂O₃ 催化剂既具有优异的氧化 NO 活性, 又有较好的 NO_x 储存能力。BaMnO₃ 是主要的活性组分; Mn 能够催化 NO 的氧化反应, 且

有一定的 NO_x 储存能力; Ba 是主要的储存组分, 将 NO_x 以硝酸盐的形式储存; 硝酸盐在 300~600 °C 分解, 释放出 NO_x。Mn/Ba/Al₂O₃ 催化剂在 800 °C 老化 6 h 后, NO 氧化活性和 NO_x 储存能力稍有下降。低含量的 SO₂ 对催化剂的 NO 氧化活性和 NO_x 储存能力没有明显影响; 高含量的 SO₂ 使催化剂的 NO 氧化活性降低, NO_x 储存量减小, 最终导致催化剂失活。

References

- Xiao, J. H.; Li, X. H.; Xu, J. C.; Zhu, P.; Deng, S.; Wang, L. F. *Chinese Modern Chemical Industry*, **2005**, *25*(8): 15 [肖建华, 李雪辉, 徐建昌, 朱鹏, 邓莎, 王乐夫. 现代化工(*Xiandai Huagong*), **2005**, *25*(8): 15]
- Epling, W. S.; Campbell, L. E.; Yezerets, A.; Currier, N. W.; Parks, J. E. *Catalysis Reviews*, **2004**, *46*(2): 163
- Takahashi, N.; Shinjoh, H.; Iijima, T.; Suzuki, T.; Yamazaki, K.; Yokota, K.; Suzuki, H.; Miyoshi, N.; Matsumoto, S.; Tanizawa, T.; Tanaka, T.; Tataishi, S.; Kasahara, K. *Catalysis Today*, **1996**, *27*(1-2): 63
- Su, Y.; Amiridis, M. D. *Catalysis Today*, **2004**, *96*(1-2): 31
- Fridell, E.; Skoglundh, M.; Westerberg, B.; Johansson, S.; Smedler, G. *Journal of Catalysis*, **1999**, *183*(2): 196
- Mahzoul, H.; Brilhac, J. F.; Gilot, P. *Applied Catalysis B*, **1999**, *20*(1): 47
- Koo, K.; Andersen, P. J. Lean NO_x trap/conversion catalyst. WO Patent, 03/024571A1. 2003
- Huang, H. Y.; Long, R. Q.; Yang, R. T. *Energy & Fuels*, **2001**, *15*(1): 205
- Anderson, J. A.; Bachiller-Baeza, B.; Fernández-García, M. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2003**, *5*(20): 4418
- Amberntsson, A.; Fridell, E.; Skoglundh, M. *Applied Catalysis B*, **2003**, *46*(3): 429
- Lu, W. Z.; Zhao, X. G.; Wang, H.; Xiao, W. D. *Chinese Journal of Catalysis*, **2000**, *21*(5): 423 [鲁文质, 赵秀阁, 王辉, 肖文德. 催化学报(*Cuixue Xuebao*), **2000**, *21*(5): 423]
- Kang, S. F.; Jiang, Z.; Hao, Z. P. *Acta Phys.-Chim. Sin.*, **2005**, *21*(3): 278 [康守方, 蒋政, 郝郑平. 物理化学学报(*Wuli Huaxue Xuebao*), **2005**, *21*(3): 278]
- Gao, A. M.; Lin, P. Y.; Tu, J.; Meng, M.; Li, Q. X. *Chinese Journal of Chemical Physics*, **2004**, *17*(4): 485 [高爱梅, 林培琰, 屠兢, 孟明, 李全新. 化学物理学报(*Huaxue Wuli Xuebao*), **2004**, *17*(4): 485]
- Karlsen, E. J.; Nygren, M. A. *Journal of Physical Chemistry B*, **2003**, *107*(31): 7795
- Engström, P.; Amberntsson, A.; Skoglundh, M.; Fridell, E.; Smedler, G. *Applied Catalysis B*, **1999**, *22*(4): 241
- Sedlmair, C.; Seshan, K.; Jentys, A.; Lercher, J. A. *Catalysis Today*, **2002**, *75*(1-4): 413
- Li, L.; King, D. L. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **2005**, *44*(1): 168