

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为载体的催化剂净化贫燃汽车尾气研究

朱天乐<sup>1</sup>, 郝吉明<sup>2</sup>, 傅立新<sup>2</sup>, 王建昕<sup>3</sup>, 李俊华<sup>2</sup>, 刘志明<sup>2</sup>, 崔翔宇<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学环境工程系, 北京 100083; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 3. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084, E-mail: zhutl@buaa.edu.cn)

**摘要:**在富氧条件下, 考察了 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 在 Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组合催化剂上选择性还原 NO 的性能。结果表明, Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有最高的 NO 还原活性。在负载型过渡金属氧化物催化剂上, 会生成显著量的 CO, 其 HC 和 CO 氧化转化温度也远远高于 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂。串联组合 Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂可显著拓宽活性温度范围, 促进 HC 和 CO 氧化, 降低 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>3</sub>CHO 生成量。

**关键词:** 贫燃; 汽车尾气; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 催化还原; C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>; C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH

中图分类号: X71 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)03-0026-04

## Alumina supported Catalysts for the Catalytic Purification of Lean burn Automobile Exhaust

ZHU Tian-le<sup>1</sup>, HAO Ji-ming<sup>2</sup>, FU Li-xin<sup>2</sup>, WANG Jian-xin<sup>3</sup>, LI Jun-hua<sup>2</sup>, LIU Zhi-ming<sup>2</sup>, CUI Xiang-yu<sup>2</sup>

(1. Department of Environmental Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: zhutl@buaa.edu.cn)

**Abstract:** Catalytic properties of Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and a two-stage catalyst composed of Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were investigated for the selective reduction of NO by C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> or C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH in excess oxygen. The Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> showed the highest NO reduction activity among the catalysts studied. A substantial amount of CO was formed over alumina-based transient metal oxides. HC and CO oxidations over Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> occurred in relatively low temperatures, compared with the other catalysts. The sequential use of Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was effective to broaden the temperature window for the reduction of NO, to improve oxidation of HC and CO and to inhibit the formation of N<sub>2</sub>O and CH<sub>3</sub>CHO.

**Key words:** lean burn; automobile exhaust; catalytic reduction; C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>; C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH

最近 10 多年来, 学术界和产业界对贫燃汽车尾气 NO 的选择性催化还原作了大量研究。总地来说, 研究过的催化剂可以分为金属离子交换的沸石、负载型贵金属和负载型过渡金属氧化物 3 大类<sup>[1~4]</sup>。在金属离子交换的沸石催化剂水热稳定性差, 以及负载型贵金属催化剂的选择性差, 因而难以实际应用被认识以后, 近年来的研究主要集中在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 负载的过渡金属氧化物上。负载型过渡金属氧化物催化剂具有良好的 NO 还原活性, 但无论是 NO 还原, 还是 HC、CO 氧化的活性温度均较高, 这与汽车发动机运行工况多变, 排气温度范围宽, 以及冷启动时排气 HC 和 CO 浓度高等实际条件不相适应。有鉴于此, 本研究首先对具有实际应用潜力的负载型催化剂的 NO 还原和 HC、CO 氧化性能进行了比较。然后, 研究了协同利用 Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂净化 NO、HC 和 CO 的性能, 以及抑制 N<sub>2</sub>O、CH<sub>3</sub>CHO 等副产物生成的情况。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 催化剂制备

本研究用到的催化剂皆采用溶胶-凝胶混合法制备<sup>[5]</sup>, 即在搅拌和 85 °C 温度条件下, 先水解异丙醇铝 (AIP) (H<sub>2</sub>O/AIP = 100, mol 比), 并滴加硝酸胶溶至形成透明溶胶 (HNO<sub>3</sub>/AIP = 0.2, mol 比)。然后, 加入定量的硝酸银、硝酸钼、四氯化锡、硝酸钴或氯铂酸的水溶液, 混合均匀后, 减压加热蒸发有机溶剂, 并在室温下放置 24h, 得到凝胶。最后, 在 110 °C 下空气气氛中干燥 24h, 在 600 °C 下空气气氛中焙烧 8h, 即得到所需催化剂, 分别用 Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表示。对于 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂, 还需在 350 °C 5% H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> 气氛中还原 4 h。各催化剂活性组分的含量如表 1 所示。

收稿日期: 2003-08-26; 修订日期: 2003-11-18

基金项目: 国家 863 计划课题 (2001 AA643030)

作者简介: 朱天乐 (1963 -), 男, 博士, 副教授, 主要从事大气污染控制研究。

表 1 催化剂活性组分含量

Table 1 The composition of the catalysts

催化剂	活性元素	含量 (wt) <sup>1)</sup>	比表面
		/ %	/ m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>
Ag/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ag	5	171
In/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	In	5	180
Sn/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sn	5	178
Co/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Co	5	167
Pt/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pt	2	173

1) 活性元素在催化剂中所占的重量百分含量。

## 1.2 催化剂表征

催化剂 BET 比表面采用 -196 °C 下, 标准 N<sub>2</sub> 吸附法测定, 在 QUANTASORB (Quantachrome Corporation) 吸附分析仪上实现, 测定结果见表 1。催化剂 X 射线衍射 (XRD) 分析用日本理学 D/max-RB 型 X 光衍射仪, 采用 CuK $\alpha$  射线, 加速电压 40 kV, 电流 100 mA。结果表明, 所有样品的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 均以  $\gamma$  相存在, 未检测到与其它组分相对应的峰。

## 1.3 催化剂性能考察

催化剂性能考察在连续流动固定床反应装置上进行, 催化剂粒度为 0.154 mm ~ 0.280 mm。除特别说明外, 反应气组成为 0.1 % NO, 0.33 % C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 或 0.1 % C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, 8 % O<sub>2</sub>, 1 % H<sub>2</sub>O 和 0.01 % SO<sub>2</sub>, 其余为 He, 总气量 180 mL/min, 催化剂量 0.22 g。通过调整 He 流量, 维持总气量不变。C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 和 H<sub>2</sub>O 通过控温鼓泡塔由 He 带入系统。

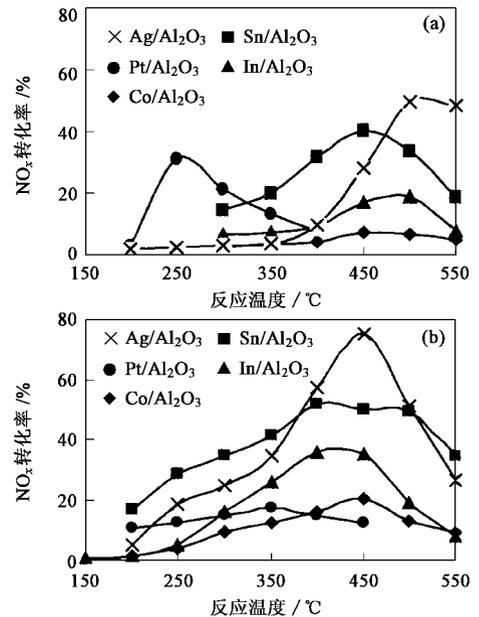
NO 和 NO<sub>x</sub> 浓度的定量分析在化学发光 NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> 分析仪 (Thermo Electron Model 42C) 上实现。使用气体过滤相关法 CO 分析仪测定 CO 浓度 (Thermo Electron Model 48), 其他成分检测在配有 Porapak Q 和 5A 分子筛柱的气相色谱仪上实现 (Shimadzu GC-17A)。鉴于反应过程中, 部分 NO 会转化为 NO<sub>2</sub>, 故催化剂活性用 NO<sub>x</sub> 转化率表示, 且 NO<sub>x</sub> 转化率 = (入口 NO<sub>x</sub> 浓度 - 出口 NO<sub>x</sub> 浓度) / 入口 NO<sub>x</sub> 浓度 × 100 %。类似地, 基于入口和出口 HC (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 或 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, 下同) 浓度, 可计算 HC 转化率。催化床出口 CO 浓度 = 入口 CO 浓度 + 反应生成 CO 浓度 - 反应转化 CO 浓度。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 单一催化剂性能考察

考虑到汽车尾气含有多种 C 数为 2 ~ 5 的不饱和和碳氢化合物<sup>[6]</sup>, 通常把 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 作为代表性还原组分。另一方面, 贫燃汽车尾气中 HC 含量相对较低, 外加碳氢化合物作还原剂被认为是改进 NO 还原措

施之一<sup>[1]</sup>。因此, 本研究中, 分别采用 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 作还原剂。在相同条件下, 比较了在 Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂上, NO 还原和 HC、CO 氧化性能。图 1 给出了 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 还原 NO 的活性。可以看出, 不论采用 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, 还是 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 作还原剂, Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 都具有最高的 NO 还原活性, 其次是 Sn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的活性较差。在 Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 上, 2 种还原剂表现出不同的 NO 还原活性, 当 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 作还原剂时, 活性较高, 介于 Sn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 In/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 之间, 但是, 当 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 为还原剂时, 活性较差。从 NO 还原活性峰值温度 (与最大 NO<sub>x</sub> 转化率相对应的温度, 下同) 来看, 当 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 为还原剂时, Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 250 °C 左右, 大大低于其它催化剂, 后者为 450 °C ~ 500 °C。当 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 作还原剂时, Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等催化剂的活性峰值温度约为 450 °C, 这比 Miyadera<sup>[7,8]</sup> 报道值高 50 °C ~ 100 °C 左右。其原因可能是后者所用反应气不含 SO<sub>2</sub>。本研究证实, 反应气不含 SO<sub>2</sub> 的 NO 还原活性峰值温度比含有 SO<sub>2</sub> 低 100 °C。



(a) C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 为还原剂 (b) C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 为还原剂

图 1 在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 负载的催化剂上 NO<sub>x</sub> 转化率与反应温度的关系

Fig. 1 NO<sub>x</sub> conversion vs. reaction temperature over alumina-supported catalysts

研究考察 HC 氧化表明, 不论采用 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, 还是 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 作还原剂, 随着反应温度提高, HC 转化率皆增大。当反应温度达到 NO 还原活性峰值温度时, HC 转化率接近 100 %。进一步提高反应温度, HC 转化更趋完全。显然, 这是由于 O<sub>2</sub> 直接与 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 或

$C_2H_5OH$  作用的能力增强所致. 需要强调的是, 在  $Pt/Al_2O_3$  上,  $HC$  完全转化温度远低于其它催化剂. 除  $NO$  还原和  $HC$  氧化外, 还考察了  $CO$  生成以及添加  $CO$  到反应气对  $NO$  还原的影响. 图 2 为反应气不含  $CO$  情况下反应器出口  $CO$  浓度与反应温度的

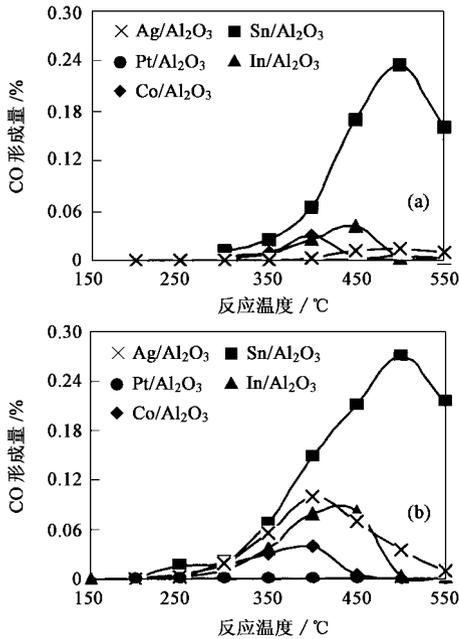
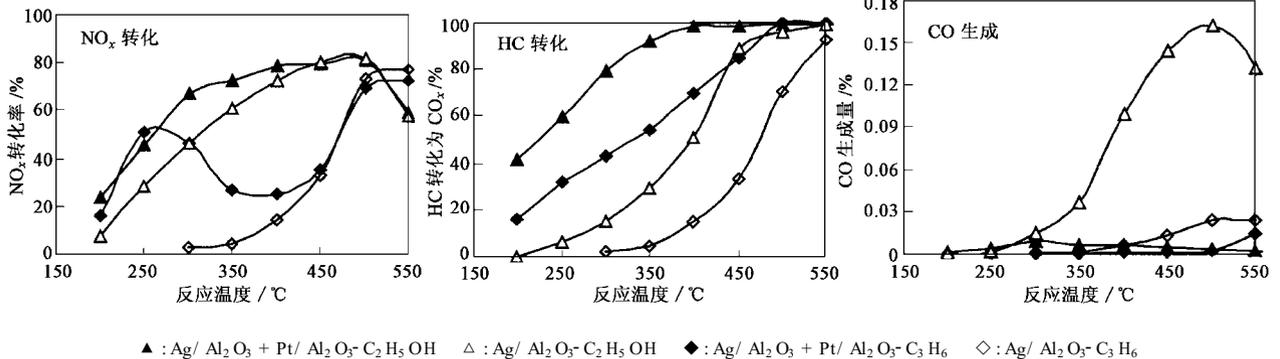


图 2 在  $Al_2O_3$  负载的催化剂上  $CO$  生成与反应温度的关系  
Fig. 2 CO formation vs. reaction temperature over alumina-supported catalysts



▲ :  $Ag/Al_2O_3 + Pt/Al_2O_3 - C_2H_5OH$     △ :  $Ag/Al_2O_3 - C_2H_5OH$     ◆ :  $Ag/Al_2O_3 + Pt/Al_2O_3 - C_3H_6$     ◇ :  $Ag/Al_2O_3 - C_3H_6$

图 3  $Ag/Al_2O_3 + Pt/Al_2O_3$  组合催化剂的性能

Fig. 3 Catalytic properties of a two-stage catalyst of  $Ag/Al_2O_3$  and  $Pt/Al_2O_3$

从图 3 (a) 可看出, 在  $Ag/Al_2O_3$  后, 串联装填  $Pt/Al_2O_3$  能够显著提高低温区的  $NO_x$  转化率, 拓宽活性温度范围. 当  $C_3H_6$  为还原剂时, 在  $250^\circ C$  和  $500^\circ C$  出现 2 个  $NO_x$  转化峰. 显然, 这 2 个峰分别与  $Ag/Al_2O_3$  和  $Pt/Al_2O_3$  的最大  $NO$  还原活性相对应. 从图 3 (b) 可以看出, 与单独使用  $Ag/Al_2O_3$  相比, 在  $Ag/Al_2O_3$  后串联  $Pt/Al_2O_3$  显著改进了  $HC$  氧化性能, 使  $HC$  转化温度降低, 其参数如表 2 所示.

关系, 反映了催化反应过程生成  $CO$  量. 可见, 在负载型过渡金属氧化物催化剂上, 皆会生成  $CO$ , 尤其是在  $Sn/Al_2O_3$  催化剂上, 生成的  $CO$  量高达 0.25% 左右. 不过, 在  $Pt/Al_2O_3$  催化剂上, 未检测到  $CO$ .

添加 0.5%  $CO$  到反应气, 考察其对  $NO$  转化及出口  $CO$  浓度的影响. 结果表明,  $C_3H_6$  和  $C_2H_5OH$  还原  $NO$  的活性基本不受影响. 负载型过渡金属氧化物催化剂, 催化床出口  $CO$  浓度先随反应温度提高而增大 (高于入口浓度), 显然, 这是由于反应生成了  $CO$ . 当反应温度高于  $NO$  还原活性峰值温度时, 出口  $CO$  浓度开始下降. 负载型贵金属催化剂, 随着反应温度提高, 出口  $CO$  浓度单调下降, 当反应温度大于  $250^\circ C$  左右时, 催化床出口  $CO$  浓度降为 0.

## 2.2 协同利用 $Ag/Al_2O_3$ 和 $Pt/Al_2O_3$ 的性能考察

上述研究表明,  $Ag/Al_2O_3$  的  $NO$  还原性能良好, 但其活性温度高, 而且在约  $500^\circ C$  以上, 才能完全氧化  $HC$  和  $CO$ .  $Pt/Al_2O_3$  催化剂尽管  $NO$  还原性能一般, 但其具有优异的  $HC$  和  $CO$  氧化性能. 基于利用 2 种催化剂的优点, 克服各自不足的出发点, 本研究设计了  $Ag/Al_2O_3$  和  $Pt/Al_2O_3$  分段组合催化剂体系, 即让气流先通过 0.22g  $Ag/Al_2O_3$ , 再通过 0.11g  $Pt/Al_2O_3$ . 同样地, 以  $C_3H_6$  和  $C_2H_5OH$  为还原剂, 其浓度分别为 0.2% 和 0.475%, 考察  $NO$  还原、 $HC$  氧化和  $CO$  生成情况, 结果如图 3 所示. 为便于比较, 图中还给出了单一  $Ag/Al_2O_3$  催化剂的性能.

表 2  $HC$  氧化性能参数

Table 2 Performance parameters for $HC$ oxidation over catalysts			
催化剂	还原剂	$HC$ 转化温度 <sup>1)</sup> / $^\circ C$	
		$T_{50}$	$T_{90}$
$Ag/Al_2O_3$	$C_3H_6$	470	550
	$C_2H_5OH$	400	450
$Ag/Al_2O_3 + Pt/Al_2O_3$	$C_3H_6$	320	470
$Pt/Al_2O_3$	$C_2H_5OH$	230	350

1)  $T_{50}$  和  $T_{90}$  分别对应  $HC$  转化率为 50% 和 90% 的温度.

从图 3(c) 可以看出,在  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  后串联  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  可大大降低催化床出口  $\text{CO}$  浓度,这是由于后段  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  对前段  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  生成的  $\text{CO}$  起到了催化氧化作用.对图 2 和图 3 进行比较,可以看出,由于反应气所含还原剂浓度增大,在  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂上反应生成的  $\text{CO}$  浓度提高,这表明  $\text{CO}$  生成量与反应气还原剂浓度具有正比例关系.

### 2.3 副产物考察

(1)  $\text{N}_2\text{O}$  生成  $\text{N}_2\text{O}$  是一种温室气体,对地球辐射平衡的影响约为  $\text{CO}_2$  的 10% ~ 15%<sup>[9]</sup>. Bamwenda 等人的研究表明,当  $\text{C}_3\text{H}_6$  为还原剂时,在  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂上, $\text{NO}$  主要还原为  $\text{N}_2\text{O}$ , $\text{N}_2$  生成选择性仅为 32% 左右<sup>[10]</sup>.本研究对 0.2%  $\text{C}_3\text{H}_6$  为还原剂时,0.33 g  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂与 0.22 g  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  + 0.11 g  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  组合催化剂上的  $\text{N}_2\text{O}$  生成量进行了比较,结果如图 4 所示.图中, $\text{N}_2\text{O}$  选择性 =  $2 \times$  出口  $\text{N}_2\text{O}$  浓度 / (入口  $\text{NO}_x$  浓度  $\times$   $\text{NO}_x$  转化率)  $\times 100\%$ .可以看出, $\text{N}_2\text{O}$  主要在 250 °C 左右生成,尽管在该温度区域 2 种催化剂体系的  $\text{N}_2\text{O}$  生成选择性相当,然而,由于在  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂上, $\text{NO}_x$  转化与  $\text{N}_2\text{O}$  生成温度区域相对应,而在  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  组合催化剂上, $\text{NO}_x$  转化主要发生在 500 °C 左右,与之对应的  $\text{N}_2\text{O}$  生成量很低.因此,就整个  $\text{NO}$  还原活性温度区域而言,在  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  组合催化剂上  $\text{N}_2\text{O}$  生成量比  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  低得多.实验还考察了在  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂上的  $\text{N}_2\text{O}$  生成情况,结果表明,其  $\text{N}_2\text{O}$  生成可忽略.

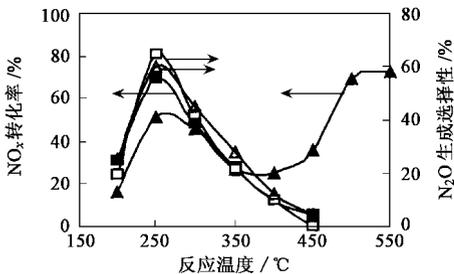


图 4  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  上的  $\text{N}_2\text{O}$  生成选择性  
Fig. 4  $\text{N}_2\text{O}$  selectivity over  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$

(2)  $\text{CH}_3\text{CHO}$  生成 图 5 给出了采用 0.475%  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  作还原剂时,在 0.33 g  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和 0.22 g  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  + 0.11 g  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂体系上,反应器出口  $\text{CH}_3\text{CHO}$  浓度与反应温度之间的关系.

可以看出,在  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂上, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  还原  $\text{NO}$  会导致少量  $\text{CH}_3\text{CHO}$  生成,在其后串联  $\text{Pt}/$

$\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂层,出口  $\text{CH}_3\text{CHO}$  浓度大大降低,这表明富氧条件下, $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂具有良好的催化氧化  $\text{CH}_3\text{CHO}$  效果,可防止其逸出,造成二次污染.

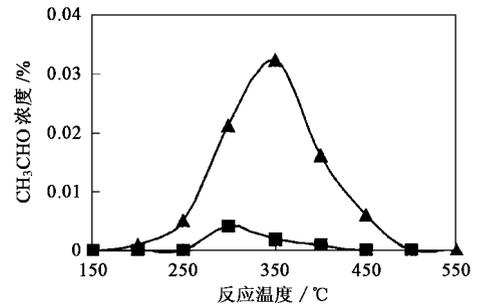


图 5  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  上的  $\text{CH}_3\text{CHO}$  生成量  
Fig. 5  $\text{CH}_3\text{CHO}$  formation over  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$

### 3 结论

- (1) 与  $\text{In}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Sn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  相比, $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  的  $\text{NO}$  还原活性更高.
- (2) 在负载型过渡金属氧化物催化剂上,会生成显著量的  $\text{CO}$ ,尤其是  $\text{Sn}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂.
- (3) 与单独使用  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  作催化剂相比,组合使用  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂可显著拓宽活性温度范围,促进  $\text{HC}$ 、 $\text{CO}$  氧化.
- (4) 与单独使用  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂相比,组合使用  $\text{Ag}/\text{Al}_2\text{O}_3$  +  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂可抑制  $\text{N}_2\text{O}$  生成,降低  $\text{CH}_3\text{CHO}$  排放.

#### 参考文献:

- [1] Amiridis M D, Zhang T J, Farrauto R J. Selective catalytic reduction of nitric oxide by hydrocarbons [J]. Appl. Catal. B, 1996, 10(1): 203 ~ 227.
- [2] Fritz A, Pitchon V. The current state of research on automotive lean  $\text{NO}_x$  catalysis [J]. Appl. Catal. B, 1997, 13(1): 1 ~ 25.
- [3] PaArvulescu V I, Grangeb P, Delmonb B. Catalytic removal of  $\text{NO}$  [J]. Catal. Today, 1998, 46(1 ~ 2): 233 ~ 316.
- [4] Burch R, Breen J P, Meunier F C. A review of the selective reduction of  $\text{NO}_x$  with hydrocarbons under lean-burn conditions with non-zeolitic oxide and platinum group metal catalysts [J]. Appl. Catal. B, 2002, 39(2): 283 ~ 03.
- [5] Lin Y S, Chang C H, Gopalan R. Improve ment of thermal stability of porous nanostructured ceramic membranes [J]. Industry Eng. Cera. Res., 1994, 33(4): 860 ~ 870.
- [6] Akama H, Matsushita K. Recent lean  $\text{NO}_x$  catalyst technologies for automobile exhaust control [J]. Catal. Surveys from Japan, 1999, 3(1): 139 ~ 146.
- [7] Miyadera T. Alumina-supported silver catalysts for the selective reduction of nitric oxide with propene and oxygen-containing organic compounds [J]. Appl. Catal. B, 1993, 2(2 ~ 3): 199 ~ 205.
- [8] Miyadera T. Selective reduction of nitric oxide with ethanol over an alumina-supported silver catalyst [J]. Appl. Catal. B, 13(1): 157 ~ 165.
- [9] 联合国环境规划署,柳重业等译.世界环境数据手册[M].北京:中国科学技术出版社,1990.19.
- [10] Bamwenda G R, Ogata A, Obuchi A. Selective reduction of nitric oxide with propene over platinum [J]. Appl. Catal. B, 1995, 6(4): 311 ~ 323.