

# NO<sub>x</sub> 储存-还原催化净化技术研究进展

肖建华,李雪辉,徐建昌,朱 鹏,邓 莎,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,广东 广州 510640)

**摘要:**从 NO<sub>x</sub> 储存-还原催化剂活性组分、NO<sub>x</sub> 吸附储存材料、载体及助剂、反应机理以及催化剂失活等方面评述了 NO<sub>x</sub> 储存-还原催化净化技术近年来的研究进展。指出硫中毒和热劣化是催化剂失活的主要原因,添加少量过渡金属或稀土金属是改善催化剂的热稳定性和抗硫能力,延长催化剂使用寿命,降低催化剂成本的有效途径;原位傅里叶变换红外光谱技术成为研究 NO<sub>x</sub> 储存-还原反应及硫中毒失活机理的有效手段。

**关键词:**NO<sub>x</sub>; 储存-还原; 催化净化

中图分类号:TQ426.96

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2005)08-0015-05

## Advances in catalytic removal of NO<sub>x</sub> by storage-reduction

XIAO Jian-hua, LI Xue-hui, XU Jian-chang, ZHU Peng, DENG Sha, WANG Le-fu

(School of Chemical and Energy Engineering, South China University of Technology,  
Guandong Provincial Laboratory of Green Chemical Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The recent advances in the catalytic removal technology, including the aspects of the compositions of NO<sub>x</sub> storage-reduction catalysts, reaction mechanisms and catalyst deactivation, are reviewed. The catalyst deactivation is mainly due to the poisoning by sulfur compounds and the thermal degradation. Addition of a small amount of transition metals and rare earth metals can promote the thermal stability and the ability to resist deactivation by sulfur compounds, prolong the operating life and reduce the cost of NO<sub>x</sub> storage-reduction catalysts. In situ Fourier transform infrared spectroscopy becomes an effective way to study the mechanisms of the storage-reduction reaction and the deactivation by sulfur compounds.

**Key words:** NO<sub>x</sub>; storage-reduction; catalytic removal

随着汽车数量的急剧增加,汽车尾气排放带来的环境污染日益严重,各国政府纷纷采取措施限制汽车尾气中 CO、碳氢化合物(HC)和 NO<sub>x</sub> 3 类污染气体的排放,它们不仅危害人类健康,还导致酸雨和城市光化学烟雾,影响生态环境。目前,我国城市大气中的 CO、HC 和 NO<sub>x</sub> 主要由汽车排放。以北京市为例,大气中 63.4% 的 CO、73.5% 的 HC、46% 的 NO<sub>x</sub> 由汽车尾气排放所致,约为发达国家的 3~5 倍<sup>[1]</sup>。大量排放的 CO<sub>2</sub>(机动车辆是主要排放源之一)是导致温室效应的主要原因。为了减少 CO<sub>2</sub> 排放,184 个国家和地区于 2000 年签署了《京都议定书》<sup>[2]</sup>。NO<sub>x</sub> 储存-还原(NO<sub>x</sub> 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。笔者从技术背景、研究现状、存在的问题及对策等方面介绍了 NO<sub>x</sub> 储存-还原催化净化技术近年来的研究进展。

## 1 技术背景

### 1.1 贫燃条件下汽车尾气净化技术

贫燃是汽车尾气净化的重要技术之一,它是指发动机在大于理论空燃比 14.7 条件下进行的燃烧。贫燃技术有以下优点:氧富余,燃料燃烧完全,CO、HC 等有害排放物减少,燃烧最高温度下降;燃烧效率大大提高,可降低油耗 15%~30%,减少 CO<sub>2</sub> 的排放。因而研究者普遍认为:贫燃技术是未来汽油发动机车辆的主流技术。

但是,燃油燃烧会产生 NO<sub>x</sub>(主要是 NO),由于过量氧的存在,使传统三效催化剂对净化 NO<sub>x</sub> 几乎不起作用,无法满足排放法规的要求。三效催化剂的污染物净化效率受空燃比影响,随着空燃比增大,它对 NO<sub>x</sub> 的净化效率急剧降低。贫燃条件下 NO<sub>x</sub> 的净化是当今世界环保领域极具挑战性的课题,日本、美国和欧洲已经广泛开展了贫燃发动机尾气催

收稿日期:2005-04-18;修回日期:2005-06-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20076017,20476032);广东省自然科学基金资助项目(030951)

作者简介:肖建华(1974-),男,博士生;李雪辉(1970-),男,博士,副教授,主要从事催化及绿色化学方面的研究,通讯联系人,020-87114707, cexhli@scut.edu.cn。

化净化技术的研究,且主要集中在选择催化还原、储存-还原、直接催化分解和多元多功能催化等净化技术方面,并取得了显著进展<sup>[2-4]</sup>。其中 NO<sub>x</sub> 储存-还原技术具有净化效率高、温度窗口宽、操作费用低等诸多优点,被认为是消除贫燃发动机尾气污染极有前途的方法。

## 1.2 NSR 催化净化技术

日本丰田(Toyota)汽车公司的研究人员于 20 世纪 90 年代初提出 NO<sub>x</sub> 储存-还原新催化概念,开发出第一代 NSR 催化剂,并投入商业应用<sup>[5]</sup>。该 NSR 催化剂的 NO<sub>x</sub> 储存-还原原理是:在贫燃(富氧)条件下,NO<sub>x</sub> 不能被有效消除,催化剂中的活性组分先将 NO 捕获并将其氧化成 NO<sub>2</sub>,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<sub>x</sub>,在此气氛下,CO、HC 和 NO<sub>x</sub> 可以在催化剂上同时被催化消除,并使催化剂再生。

## 2 国内外研究现状

目前,日本丰田汽车公司和美国福特(Ford)汽车公司在 NSR 催化技术领域的研究成果显著,前者占据了日本国内市场,正在开拓欧美市场;后者正向工业化迈进。瑞典、德国、意大利和英国的科研机构在催化剂性能、反应机理等方面做了许多卓有成效的工作。中国科技大学及中国科学院大连化学物理研究所等科研机构在催化剂性能和结构方面作了初步研究。

### 2.1 活性组分研究

贵金属 Pt、Pd、Rh 在贫燃气氛下对 NO<sub>x</sub> 的氧化

(上接第 14 页)

术,也将在“油改气”结构调整中发挥重要的作用,并在大型化和低能耗方面将会取得重大的进展和实质性的突破。

③联产和再加工技术。联产氢气和多种 C<sub>1</sub> 化工产品以及尿素的再加工技术亦将得到高度重视,并在与合成氨、尿素装置的系统集成、能量优化方面取得进展。

(3)实施与环境友好的清洁生产是未来合成氨装置的必然和唯一的选择。

生产过程中不生成或很少生成副产物、废物,实现或接近“零排放”的清洁生产技术将日趋成熟和不

和还原具有独特活性,而且能同时氧化脱除 HC 和 CO 等污染物,因此,广泛应用于 NSR 催化剂中<sup>[6-7]</sup>。Huang 等<sup>[8]</sup>对贵金属-CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为 NO<sub>x</sub> 储存-还原催化剂的研究发现,贵金属对 NO<sub>x</sub> 储存-还原催化活性顺序为: Pd < Pt < Rh。Pt 在贫燃条件下对 NO<sub>x</sub> 的氧化活性最好;Rh 在富燃条件下则表现出更高的 NO<sub>x</sub> 还原活性<sup>[9]</sup>。Amberntsson 等<sup>[10]</sup>比较研究了 Pt-Rh/Ba/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Pt/Ba/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂的 NO<sub>x</sub> 储存-还原性能及耐硫性能,结果表明:虽然 Pt-Rh 双贵金属催化剂的 NO<sub>x</sub> 储存量比 Pt 催化剂少,但整体催化性能更优,且更容易脱硫再生。使用 Rh 作为活性组分,对 NO<sub>x</sub> 的氧化和还原活性都较高。由于 Rh 以伴生矿形式存在,含量极其稀少,价格远高于 Pt,因而其应用受到限制;Pd 的价格相对低廉,NO<sub>x</sub> 的氧化活性稍低;更多的研究用 Pt 或 Pt-Rh 作为活性组分。

### 2.2 NO<sub>x</sub> 吸附储存材料的研究

NSR 催化剂中的 NO<sub>x</sub> 吸附储存组分多为碱性较强的碱土金属及碱金属。在含 Ba 的 NSR 催化剂中,添加一定量的 Li、Na、K 或 Cs,350℃ 以上 NO<sub>x</sub> 的转化率明显提高;但催化剂低温活性降低,因此,碱金属可作为高温下的 NO<sub>x</sub> 吸附组分。丰田汽车公司的 NSR 催化剂中,NO<sub>x</sub> 吸附储存组分为分散在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 上的 BaO 相,NO<sub>x</sub> 储存于 BaO 上,再利用贵金属 Pt 或 Rh 还原<sup>[11]</sup>;而德国 Daimler-Chrysler 公司开发的 NO<sub>x</sub> 选择性循环(selective NO<sub>x</sub> recirculation, SNR)技术中<sup>[12]</sup>,如果 Ba 以纳米晶相的钡铝酸盐或者 ABO<sub>3</sub> 钙钛矿结构的 BaSnO<sub>3</sub> 形式存在,就会满足作为吸附剂的几个必要条件。

断完善。

(4)提高生产运转的可靠性,延长运行周期是未来合成氨装置“改善经济性、增强竞争力”的必要保证。

有利于“提高装置生产运转率、延长运行周期”的技术,包括工艺优化技术、先进控制技术等将越来越受到重视。

### 参考文献

- [1] 蒋德军.[J].大氮肥,1997,(5):297-300.
- [2] 亢万忠,蒋德军.[J].大氮肥,1997,(6):372-376.
- [3] 蒋德军.[J].现代化工,2002,22(6):39-48.
- [4] 王庭富.[J].化工进展,2001,20(8):6-8. ■

程昊等<sup>[13]</sup>用共沉淀-浸渍法制备了具有不同 Mg/Al 比的 Pt/Mg-Al-O 催化剂,并用 X 射线衍射和程序升温脱附等方法进行了表征。考察了不同反应气氛对载体和催化剂上 NO<sub>x</sub> 储存性能的影响,结果表明:在 Pt/Mg-Al-O 催化剂中, MgO 是主要储存物质,它与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 形成的 Mg-Al 复合氧化物结构更有利于 NO<sub>x</sub> 的储存; MgO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 之间存在协同作用,低温下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的促进作用更为明显; NO<sub>2</sub> 比 NO 更容易与 MgO 生成盐, Pt 可以催化 NO 的氧化反应生成更多的 NO<sub>2</sub>,从而大大促进 NO<sub>x</sub> 储存。Machida 等<sup>[14]</sup>用二元氧化物(Sr<sub>2</sub>CuO<sub>3</sub>, SrCuO<sub>2</sub>)制备了斜方晶型铜酸盐,将它作为 NO<sub>x</sub> 储存材料,考察了它对 NO 的吸附、脱附特性。结果表明:在 250℃,随着 Sr 取代增加,NO 累积吸附量增加; SrCuO<sub>2</sub> 对促进 NO 氧化和发生气-固反应起重要作用。傅里叶变换红外光谱(FT-IR)研究结果显示有硝酸盐和亚硝酸盐生成;通过升降温度可循环吸附-脱附 NO。他们对新型 NO<sub>x</sub> 吸附储存材料的研究成果推动了新型 NSR 催化剂的发展。

### 2.3 载体及助剂的研究

活性氧化铝(γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)被广泛用作 NSR 催化剂载体或整体式 NSR 催化剂的活性涂层<sup>[6-7]</sup>。有些复合氧化物固溶体能改善催化剂的耐硫中毒能力,也是常用的载体。文献<sup>[15]</sup>以 Ce-Zr-Al 的复合氧化物为载体,在 800℃ 老化 4 h 后,NO<sub>x</sub> 的储存量较典型的 Pt/Ba/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有所提高。萤石结构的 MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub><sup>[16]</sup>既可以作为 NO<sub>x</sub> 吸附材料,又可以负载 Pd 催化净化过量氧中的 NO<sub>x</sub>。SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub><sup>[17]</sup> 和 H<sub>3</sub>PW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>·6H<sub>2</sub>O(HPW)<sup>[18]</sup>作为载体的 NSR 催化剂也有研究。Mg-Al-O 类水滑石作为载体是近年 NSR 催化剂研究的热点<sup>[13,19-20]</sup>,较 BaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有低温转化性能好、抗硫中毒能力强等优点。

由于 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在高温下容易发生相变,或与 NO<sub>x</sub> 吸附组分 Ba 反应,生成尖晶石结构的 BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,导致 NO<sub>x</sub> 的储存活性位损失,且其抗硫性有待提高,基于此,需添加一些助剂以提高催化剂的热稳定性和抗硫性,表 1 归纳了部分文献中所用的助剂及其功能。

### 2.4 反应机理研究

原位 FT-IR 技术是研究 NSR 催化剂的储存-还原机理的有效手段,如: Su 等<sup>[21]</sup>用原位 FT-IR 研究了 NO<sub>x</sub> 在 Pt/Ba/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂上的储存-还原机理。结果表明:在 350℃,NO<sub>x</sub> 以亚硝酸盐和硝酸盐

表 1 NSR 催化剂中助剂及功能

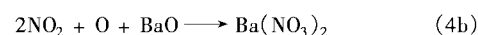
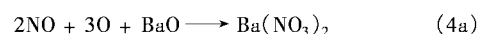
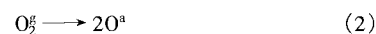
催化剂组成	助剂组分	助剂功能	文献
Pt/Rh/Ba/TiO <sub>2</sub> /	TiO <sub>2</sub>	抑制硫酸盐的吸附,再生容易	[11]
ZrO <sub>2</sub> /γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rh/ZrO <sub>2</sub>	促进 H <sub>2</sub> 生成,以除去硫酸盐	
Pt/Cu/HT	CuO	形成 Pt-Cu 合金,使 HT 改性,提高催化剂的水热稳定性,抵抗 SO <sub>2</sub> 中毒失活	[20]
CeO-ZrO <sub>2</sub> /	CeO <sub>2</sub>	储存 NO <sub>x</sub> ,促进 NO <sub>x</sub> 还原	[15]
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -BaO	ZrO <sub>2</sub>	促进水煤气变换反应,原位产生氢气促进硫酸盐分解	
	CeO-ZrO <sub>2</sub>	具有良好的耐硫性能	
Pt/Ba/Fe/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	阻止硫酸盐沉积,抑制硫酸钡颗粒长大,加速硫酸钡分解并脱附	[22]
K/Cu/Zr/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	低分散性有助于吸附 NO <sub>x</sub>	[23]
	ZrS	提高耐硫性能	

注: HT 指水滑石。

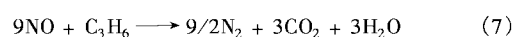
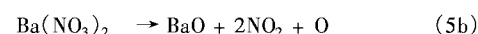
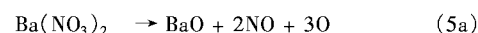
形式储存于钡位,后者的生成速度较慢且需要 Pt 催化。添加氧气和升高温度会加快氧化及储存过程。铝位也生成了类似的亚硝酸盐和硝酸盐物种,只是含量和稳定性较低。在 Pt 催化作用下,亚硝酸钡和硝酸钡都能被丙烯完全还原;硝酸钡存在于体相中,受内扩散限制,所以亚硝酸钡还原速率较硝酸钡快。

Fridell 等<sup>[24]</sup>利用程序升温脱附和原位 FT-IR 技术考察了 NO<sub>x</sub> 在 Pt/BaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Pt-Rh/BaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂上的储存-还原过程,认为储存-还原过程由以下几步反应组成。

在贫燃条件下:



在贫氧条件下:

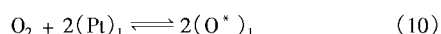
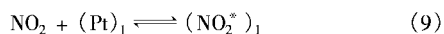
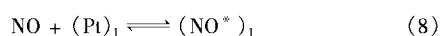


式中上标 g 表示气态, a 表示活化态。

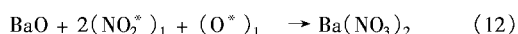
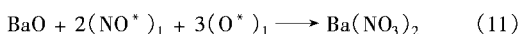
Mahzoul 等<sup>[25]</sup>用原位漫反射红外光谱技术研究了 NO<sub>x</sub> 吸附机理,认为 NO<sub>x</sub> 的储存-还原反应机理如下。

(1) Pt 存在 2 个活性位,分别记作 (Pt)<sub>1</sub> 和 (Pt)<sub>2</sub>,

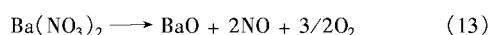
其中(Pt)<sub>1</sub>靠近BaO,(Pt)<sub>2</sub>远离BaO。NO、NO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>在(Pt)<sub>1</sub>上吸附:



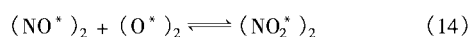
(2)在(Pt)<sub>1</sub>吸附的NO、NO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>与BaO反应生成Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>:



(3)Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>分解:

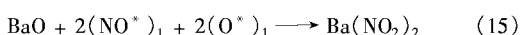


(4)(Pt)<sub>2</sub>远离BaO,所以吸附的NO、NO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>不能与BaO反应,而是NO和O<sub>2</sub>反应生成NO<sub>2</sub><sup>\*</sup>:



(5)(Pt)<sub>1</sub>的数目较(Pt)<sub>2</sub>的数目少得多,所以在(Pt)<sub>1</sub>上不考虑反应(14),仅和Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>的形成有关。

(6)没有氧气时以亚硝酸盐的形式储存NO<sub>x</sub>:



## 2.5 催化剂失活研究

NSR催化剂在应用中面临着多种失活因素,其中包括硫化物中毒、热劣化、表面炭沉积和润滑油组分中毒,前2种尤为严重,已经受到高度关注。

### (1)硫中毒失活

燃料油和润滑油是汽车尾气中硫化物的主要来源,贫燃尾气中主要以SO<sub>2</sub>的形式存在,因此SO<sub>2</sub>是使NSR催化剂中毒的主要物质。当前,许多研究集中在SO<sub>2</sub>对催化性能的影响和消除方法<sup>[3,26-27]</sup>,有些研究试图改变催化剂组成以提高催化剂的抗硫性能及再生性能<sup>[11,20-22]</sup>。

众所周知,NSR催化剂本身就是极佳的硫吸附剂,吸附的硫化物与催化剂的NO<sub>x</sub>储存组分形成稳定的硫酸盐,使NSR催化剂的NO<sub>x</sub>储存能力急剧降低以至完全丧失;硫化物直接毒害贵金属,使其氧化和还原活性降低以至失活;SO<sub>2</sub>还会毒害NSR催化剂的载体及助剂,导致催化性能降低。

### (2)热失活

典型的Ba基催化剂脱硫温度超过650℃,热劣化必须考虑。在富燃期,NO<sub>x</sub>还原和催化剂再生都可能造成催化剂劣化,因为,此时有HC、CO和H<sub>2</sub>的氧化反应,放出大量的热导致催化剂局部过热。许多学者用X射线衍射、热重分析、光电子能谱等手段对催化剂热劣化进行了研究<sup>[3,28-29]</sup>,主要原因归结为:贵金属烧结,表面分散性降低,NO氧化活性降

低;NO<sub>x</sub>储存组分Ba与载体γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>发生反应,生成尖晶石结构的BaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,导致NO<sub>x</sub>吸附活性位损失;碱金属(如K)作为吸附组分,在高温作用下发生表面迁移,与氧化铝载体发生反应,致使催化剂性能退化。

## 3 目前存在的问题及对策

### (1)硫中毒

硫中毒失活是困扰NSR催化剂的一大难题,要想催化剂达到与整车同级数的使用寿命,催化剂的硫中毒问题必须得到解决,可以考虑通过以下几条途径解决:①开发同时具有将NO氧化为NO<sub>2</sub>的高活性、高选择性,将SO<sub>2</sub>氧化为SO<sub>3</sub>的低活性和低选择性的催化材料,且NO<sub>x</sub>储存容量大,在高温或还原气氛下容易分解;②加入抗硫助剂,加快硫酸盐分解,保护贵金属等活性组分免受或减轻SO<sub>2</sub>毒害,延长催化剂的使用寿命;③添加促进水煤气变换和重整反应的助剂,原位生成H<sub>2</sub>并将生成的硫酸盐还原,使催化剂保持较高的NO<sub>x</sub>储存能力;④对载体表面进行改性,达到适宜的酸度和特殊的表面,促进硫酸盐分解和硫化物脱附;⑤采用密耦技术,在上游安装脱硫剂。

### (2)热劣化

长期高温或局部过热使NSR催化剂性能退化是亟待解决的另一问题。解决办法概括为:①通过加入多种助催化剂,对催化剂进行结构改性,提高贵金属抗高温烧结能力,保持长期稳定的活性;②调节催化剂载体组分,避免载体发生高温相变,提高其高温稳定性;③开发新的耐高温载体和NO<sub>x</sub>储存材料。

### (3)适应性差

NSR催化剂要适应汽车操作条件改变带来的系列问题。当汽车冷启动时,催化剂还没有达到工作温度,大量的HC排放出来,尤其是开始的几分钟。因此要同时考虑提高催化剂的低温活性,降低起燃温度。汽车长时间运行、超负荷运行、路面颠簸等都会改变尾气的成分、温度和空速,对这种不可控制的操作条件改变,要求催化剂具有较高的自适应能力,使污染排放物始终保持在排放限值以内。总之,新型NSR催化剂应具有如下特性:低温活性高,高温活性稳定,保持对不同运行状况下的贫燃汽车尾气具有较高的净化率。

### (4)成本高

由于采用贵金属作为活性组分,且贵金属资源

紧缺,价格高,因此,NSR 催化剂的制造成本高,限制了 NSR 催化剂的应用。利用新的催化剂制备工艺使贵金属高度分散,减少贵金属的用量;利用某些稀有金属的特有性质可以部分代替贵金属,且不降低催化剂的净化效果。

#### (5) 机理不明晰

长期以来,NO<sub>x</sub> 储存-还原反应的机理研究是国内研究的热点课题之一,目前还没有一个完全令人信服的完整反应机理。NSR 催化体系的反应复杂,催化剂组成、反应条件、表征手段等改变都可能导致不同的研究结果。因此,对于特定的催化体系,更应该对反应机理进行多方面探索,利用原位技术跟踪反应的每一细节,得到可信的中间物种,推测合理的反应历程。

## 4 结语

NSR 催化净化技术是世界环保催化领域最具挑战性的课题之一,在催化剂性能、应用及反应机理等方面,需要更深入的研究。我国在这方面的研究才刚刚起步,要想取得拥有自主知识产权的 NSR 催化技术,我国政府和环保科技工作者必须加大投入,进行卓有成效的研究。将组合催化技术应用到新型 NSR 催化剂的开发过程中,会极大地提高催化剂的开发应用周期;利用我国丰富的稀土资源,将使催化剂性能和成本更具市场竞争力。

### 参考文献

- [1] 孙锦宜,林西平. 环保催化材料与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2002. 79 - 100
- [2] Burch R. [J]. Catalysis Reviews, 2004, 46(3 - 4): 271 - 335.
- [3] Epling W S, Campbell L E, Yezerets A, et al. [J]. Catalysis Reviews, 2004, 46(2): 163 - 245.
- [4] Matsumoto S. [J]. Catalysis Today, 2004, 90(3 - 4): 183 - 190.
- [5] Takahashi N, Shinjoh H, Iijima T, et al. [J]. Catalysis Today, 1996, 27(1 - 2): 63 - 69.
- [6] Engelhard Corp. Close coupled catalyst with a SO<sub>x</sub> trap and methods of making and using the same[P]. WO 03/018178 A1, 2003 - 03 - 06.
- [7] Johnson Matthey Public Limited Company. Lean NO<sub>x</sub> trap/conversion catalyst[P]. WO 03/024571 A1, 2003 - 03 - 27.
- [8] Huang H Y, Long R Q, Yang R T. [J]. Energy and Fuels, 2001, 15(1): 205 - 213.
- [9] Anderson J A, Bachiller-Baeza B, Fernández-García M. [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2003, 5(20): 4418 - 4427.
- [10] Amberntsson A, Fridell E, Skoglundh M. [J]. Applied Catalysis B, 2003, 46(3): 429 - 439.
- [11] Kanazawa T. [J]. Catalysis Today, 2004, 96(3): 171 - 177.
- [12] Hodjati S, Vaezzadeh K, Petit C, et al. [J]. Applied Catalysis B, 2000, 26(1): 5 - 16.
- [13] 程昊, 陈光文, 王树东, 等. [J]. 催化学报, 2004, 25(4): 272 - 276.
- [14] Machida M, Masuda N, Kijima T. [J]. Journal of Materials Chemistry, 1999, 9(6): 1369 - 1374.
- [15] Liotta L F, Macaluso A, Arena G E, et al. [J]. Catalysis Today, 2002, 75(1 - 4): 439 - 449.
- [16] Machida M, Kurogi D, Kijima T. [J]. Catalysis Today, 2003, 84(3 - 4): 201 - 207.
- [17] Despres J, Koebel M, Kröcher O, et al. [J]. Applied Catalysis B, 2003, 43(4): 389 - 395.
- [18] Vaezzadeh K, Petit C, Pitehon V. [J]. Catalysis Today, 2002, 73(3 - 4): 297 - 305.
- [19] Fornasari G, Trifirò F, Vaccari A, et al. [J]. Catalysis Today, 2002, 75(1 - 4): 421 - 429.
- [20] Centi G, Fornasari G, Gobbi C, et al. [J]. Catalysis Today, 2002, 73(3 - 4): 287 - 296.
- [21] Su Yu, Amiridis M D. [J]. Catalysis Today, 2004, 96(1 - 2): 31 - 41.
- [22] Yamazaki K, Suzuki T, Takahashi N, et al. [J]. Applied Catalysis B, 2001, 30(3 - 4): 459 - 468.
- [23] Clacens J M, Montiel R, Kochkar H, et al. [J]. Applied Catalysis B, 2004, 53(1): 21 - 27.
- [24] Fridell E, Skoglundh M, Westerberg B, et al. [J]. Journal of Catalysis, 1999, 183(2): 196 - 209.
- [25] Mahzoul H, Brillhac J F, Gilot P. [J]. Applied Catalysis B, 1999, 20(1): 47 - 55.
- [26] Amberntsson A, Skoglundh M, Jonsson M, et al. [J]. Catalysis Today, 2002, 73(3 - 4): 279 - 286.
- [27] Fanson P T, Horton M R, Delgass W N, et al. [J]. Applied Catalysis B, 2003, 46(2): 393 - 413.
- [28] Li J, Theis J, Chun W, et al. Sulfur Poisoning and Desulfation of the Lean Nox Trap[R]. SAE Technical Paper Series, 2001 - 01 - 2503. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2001.
- [29] Theis J, Li J, Ura J, et al. The Desulfation Characteristics of Lean NoDx Traps[R]. SAE Technical Paper Series, 2002 - 01 - 0733. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 2002. ■

您想了解粉体加工技术及相关行业信息吗?

请浏览 中国粉体工业信息网 [www.chinapowder.cn](http://www.chinapowder.cn)

粉碎 分级 纳米颗粒制备 混合 分散 改性 造粒 干燥 烧结 散料输送 储存 粉体检测 粉尘爆炸控制等

010 - 62772725 62772135(Fax)

清华大学材料系逸夫技术科学楼 2713 室