

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0347-07

汽车尾气催化净化技术发展动向^①

肖益鸿, 蔡国辉, 詹瑛瑛, 魏可镁

(福州大学 化肥催化剂国家工程研究中心, 福州 350002)

摘 要: 汽车尾气是大气污染的主要来源之一。世界上发达国家的汽车尾气排放法规日趋严格, 未来汽车必须达到低排放、超低排放, 甚至零排放的要求。汽车尾气催化净化技术被证明是最有效的控制汽车排放污染的方法之一。新发展的尾气催化净化技术, 如密偶催化剂、HC 吸附催化剂以及稀薄燃烧条件下的 NO_x 吸附还原催化剂等的应用, 可满足国外未来更严格的排放法规的要求。同时概述了我国目前汽车尾气净化器行业的发展概况, 指出了我国汽车尾气净化器在产业化方面的不足以及努力方向。

关键词: 催化净化; 汽车排放; 密偶; HC 吸附催化剂; 稀薄燃烧; NO_x 吸附还原

Developments and trends in automobile exhaust catalysts

XIAO Yi-hong, CAI Guo-hui, ZHAN Ying-ying, WEI Ke-mei

(National Engineering Research Center of Chemical Fertilizer Catalyst,
Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Automobile exhaust is one of the main sources of the air pollution. All over the world the regulations of vehicle emission in the developed countries are getting strict increasingly. In the future, the vehicle should meet low emission, ultra low emission and even zero emission regulation. Catalytic removal technology has been proved to be one of the most effective ways to eliminate the automobile emission. The latest application and advances in the exhausts catalyst, such as closed-coupled catalyst, HC adsorbed catalyst, NO_x storage reduction catalyst under lean-burn condition can meet abroad future stricter emission regulation law. Current developments and deficiencies on the industrialization of the native catalytic converter trade were summarized and the directions of development were proposed.

Key words: catalytic removal; vehicle emission; closed-coupled; HC adsorbed catalyst; lean-burn; NO_x storage reduction

自 20 世纪 60 年代以来, 汽车排气污染物问题日益严重, 各工业发达国家纷纷对汽车污染物的排放提出了严格的限制要求。经过近 30 年的努力, 形成了一整套严格的汽车污染物排放法规和测试规范, 建立了完善的实施管理机构, 从而有效地控制了汽车污染物的总量排放, 改善了大气环境, 同时也极大地促进了汽车技术的发展, 推动汽车工业进入了一个崭新的环保时代。

1 汽车尾气排放法规的动向

1943 年美国洛杉矶的光化学烟雾污染事件, 促使人类进行反思, 意识到汽车尾气对地球环境的危害。1966 年第一个汽车尾气排放法规在美国加州颁布, 之后又逐步修订严格。1996 年美国开始实施更为严格的汽车尾气低排放计划, 而加州的法规比美国其它各州(49 州)的法规更严格, 是目前世界上最严格的排放法规(见表 1)。美国的最终目标是

① 基金项目: 福建省科技厅重点攻关项目

作者简介: 肖益鸿(1972-), 男, 助研, 博士研究生。

通讯作者: 魏可镁, 院士; 电话: 0591-3731234-8415; 传真: 0591-3773188; E-mail: wei@fzu.edu.cn

表 1 美国加利福尼亚州 LEV II 排放标准

生效日期 (年份)	车型	里程/mile	排放种类	CO/(g· mile ⁻¹)	NMOG/(g· mile ⁻¹)	NO _x /(g· mile ⁻¹)	循环测试
2004~2009	PC/LDT(总质量<3 855.6 kg)	50 000	LEV	3.4	0.075	0.05	US FTP
			ULEV	1.7	0.04	0.05	US FTP
		120 000	LEV	4.2	0.09	0.07	US FTP
			ULEV	2.1	0.055	0.07	US FTP
			SYLEV	1	0.01	0.02	US FTP
			LEV	4.2	0.09	0.07	US FTP
			ULEV	2.1	0.055	0.07	US FTP
			SULEV	1	0.01	0.02	US FTP
		150 000 (选择)	SULEV	1	0.01	0.02	US FTP

PC—乘用车; LDT—轻型载货车; LEV—低排放车辆; ULEV—超低排放车辆; SULEV—特超低排放车辆

要达到尾气零排放。

日本对汽车尾气污染物的控制虽较美国晚,但紧跟美国之后,排放标准及法规与美国水平大致相当。欧洲实施排放控制较美国、日本晚,但步伐很快,目前排放控制已接近美国低排放水平。

中国的汽车尾气排放控制较上述国家地区都晚(见图 1),我国的第一个汽车排气排放标准 GB3842~7-83,自 1984 年 4 月 1 日起实施。但该标准仅对汽车怠速污染物检测规定单一,简单工况排放值,并没有考虑汽车在道路上运行的复杂工况,也未控制 NO_x 的排放。可以说,该标准对汽车的污染物排放没有起到限制作用。此后我国在分析美、日、欧盟 3 个国家地区汽车尾气排放控制体系基础上,经过调查研究,认为欧盟标准相对适用于我国的实际情况,故 1993 年至 2000 年间出台了一系列排放标准,后经多次修订为 GB18352.1~2000 我国第一阶段实施的排放标准(相当于欧 1 标准),GB18352.2~2000(欧 2 标准)于 2004 年 1 月 1 日开始实施。为加快治理北京市城区大气污染,北京

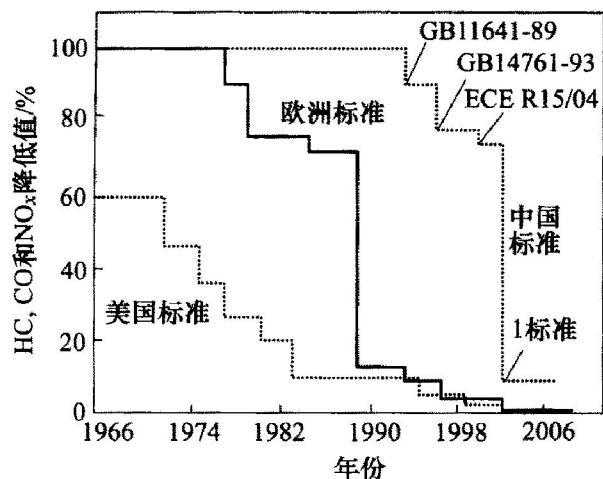
市于 2002 年 8 月 1 日提前对新车实施欧 2 标准。为创造良好环境,迎接 2008 年召开的奥运会,北京计划 2005 年实施欧 3 标准,到 2010 年逐步接近或与国际接轨(见表 2)。目前我国的排放限制水平整体上已达到欧洲 20 世纪 90 年代初期的水平。其中轻型汽车 2002 年执行的限值比未控制时期的 CO 的排放量减少了 94%,HC+NO_x 减少了 89%^[1]。

表 2 欧洲、中国小汽车尾气排放标准(g/km)

年份	欧洲		年份	中国	
	CO	HC+NO _x		CO	HC+NO _x
1992~1995(欧 1)	2.72	0.97	2000 年	2.72	0.97
1995~2000(欧 2)	2.2	0.5	2004 年前后	2.2	0.5
2000~2005(欧 3)	2.3	0.2+ 0.15	2005 年实施	2.3	0.35
2005~(欧 4)	1.0	0.1+ 0.08	2010 年 国际接轨	1.0	0.18

2 汽车尾气催化净化技术的最新发展动向

目前治理汽车尾气排放最主要手段和最有效的方式之一就是三元净化器加电喷系统,能削减 90% 以上有害排放物。治理汽车排气污染是一个系统工程,需要多种技术多种手段的综合利用。从一开始就考虑将机动车设计为低排放等的源头削减技术无疑是控制污染的最佳捷径,但是现阶段就以石油为燃料的内燃机车而言,机内控制排在降低排放物的同时会影响发动机的其它性能,而且无法做到从根本上解决现有的污染物排放问题。因此,在机内控制的基础上,辅之以末端治理为目的的机外控制措施,主要指催化净化措施,可以将机动车污染控制在极小的范围内。

图 1 中、美、欧轻型汽车排放历程^[2]

通过电喷系统能够让空燃比精确地控制在理论值的狭小“窗口”内, 使三元催化剂同时净化 CO 、 HC 和 NO_x (见图 2)。经过近 30 年的发展, 使用三元催化剂对汽车尾气进行净化的技术已相当成熟, 能满足目前欧 1、欧 2 的要求。

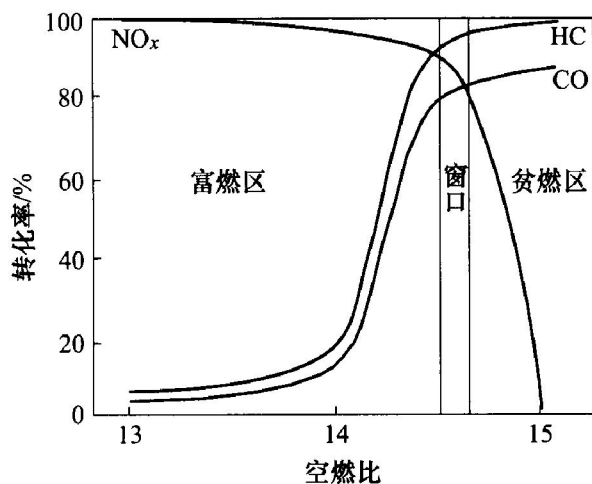


图 2 三元催化剂的空燃比特性曲线

随着排放法规的严格及进一步节能降耗的需求, 对汽车尾气的治理提出了许多新的高要求。传统三元催化剂由于起燃温度较高, 无法对汽车冷启动前几分钟的排放物进行有效净化, 故无法达到新法规的要求。当前尾气净化面临的问题就是新法规条件下汽车冷启动排放及稀薄燃烧条件下 NO_x 的净化消除问题, 这 2 个问题是目前国外汽车排放控制研究的热点问题。

2.1 冷启动排放技术

根据美国 FTP-75 联邦测试规程, 汽车在冷启动前 60 s 内排放后, HC 可占总排放量的 70%^[3], CO 的排放也有类似情况。欧 2 标准中对前 40s 怠速下的排放并不采集, 而欧 3 标准要求从汽车一起动便开始尾气采集, 计算总排放量。因此解决冷启动时期的排放量问题显然可显著减少发动机的总排放量, 易于达到新法规的要求。

目前传统三元催化净化器一般装在离发动机出口约 1.2 m 处, 在发动机开始工作的前 200 s 内, 催化剂的床层温度都低于 250 °C (见图 3)^[3], 而没有达到催化剂的起燃温度, 故无法对冷启动期间排放的污染物起到净化作用。解决冷启动排放问题, 最直观的思路是缩短净化器达到起燃的时间, 可采取以下措施:

1) 降低三元催化剂的起燃温度, 这一直是众多

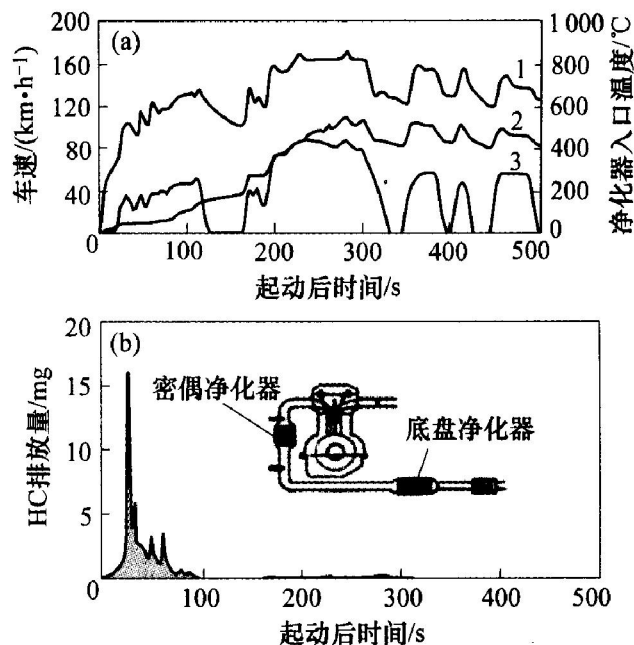


图 3 FTP 规程 HC 排放特性及净化器温度特性
1—密偶净化器; 2—底盘净化器; 3—车速

研究者的目标。要降低起燃温度必须要在现有的三元催化剂的基础上提高储氧能力, 加大贵金属的用量, 这无疑将加大净化器的成本且降低的温度幅度不大。

从图 3 可知, 在前 60 s 内, 三元催化剂床层温度还不到 100 °C, 必须开发低起燃的新活性组份和新催化材料。近年来兴起的活性载体 TiO_2 , Fe_2O_3 , CoO_3 等上负载的纳米金超微粒子^[4]是一种新催化剂, 该催化剂对 CO 氧化有极高的活性, 可以做到在 -70 °C 下完全将 CO 氧化成 CO_2 , 其对 $\text{CO} + \text{NO}$, $\text{HC} + \text{NO}$ 的催化反应也显示出较高的活性。但目前还无法做到在汽车排气气氛下大幅度削减尾气排放量, 纳米金催化剂的耐热性能也有待进一步提高。

2) 电加热转化器 (Electric heat converter)。采用电预热的方法, 使金属载体的催化剂在 5~10 s 内就达到催化剂的起燃温度, 从而减少冷启动开始几分钟内有害物质的排放量。使用该方案的不足在于: 成本较高, 需用到金属载体, 而且此加热系统要达到很好工作的目的则需要在线诊断 (On Board Diagnostics) 等复杂和昂贵的电路控制系统; 额外消耗能源, 汽车排放空速较大, 而要在大空速条件下, 使净化器短时间内 (5~10 s) 达到起燃温度, 需要大功率的加热设备, 目前使该类加热净化器的发挥作用的功率难以做到 1 kW 以下^[5], 因此如何从车上获得有效的电加热能量成为一个难题。

3) 密偶催化器 (close coupled catalyst)。从图 3

可看出, 发动机歧管排气口温度可以在瞬间达到 250 ℃ 以上, 三元催化剂可短时间起燃, 达到削减排放的目的。基于这一原理, 1995 年美国的 Engelhard 公司开发出一商标为 HiTemp 密偶催化剂, 该催化剂一经起燃, 将长期处于 600 ~ 800 ℃ 的条件下工作, 这对催化材料的热耐久性能将是一场挑战。由此, 如何防止高温条件下, 涂层材料 Al_2O_3 的相变, 贵金属颗粒的长大(烧结)以及储氧材料颗粒的长大等是密偶催化剂迫切需要解决的问题。通过在 Al_2O_3 涂层材料中添加 La 等稀土元素和 Sr、Ba 等碱土金属元素可控制 Al_2O_3 向 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 转变^[6], 同时也可防止贵金属的烧结。通过在 CeO_2 中添加 Zr 制成的 CeZr-O 固溶体, 不但其储氧性能有进一步提高, 而且耐热性得到改善^[7]。通过添加其它稀土材料, 有望进一步改善 CeZr-O 固溶体的稳定性能, 满足三元催化剂的高温使用。

4) 陶瓷基体的改良。催化剂能否尽快起燃, 还与净化器本身的热惯性有关(见图 4)。目前汽车尾气催化剂普遍采用堇青石蜂窝陶瓷及少量的金属蜂窝载体。金属载体由于壁薄、热容量小而易于达到起燃温度, 但其造价较高, 抗热冲击不如堇青石蜂窝陶瓷。堇青石蜂窝陶瓷热容量与其质量成正比, 因此通过增加单位截面积上的开孔数目, 降低单位体积载体质量, 可使净化器的升温特性得到改良。但增加开孔数会使得陶瓷的制备工艺变复杂, 且载体的力学性能变差, 这是载体制备工艺过程需要解决的问题。美国的 Corning 公司提供的商品中的薄壁载体, 其壁厚达 4 密耳(4 密耳= 0.102 mm), 开孔密度最高达 140 孔/ cm^2 , 甚至 186 孔/ cm^2 。

5) HC 吸附型三元催化剂的开发。该催化剂的工作原理是在汽车冷起动开始时的低温条件下吸附尾气中排放的 HC 化合物, 随着催化剂温度的提

高, 被吸附的 HC 逐渐脱附出来在催化床层上实现氧化(见图 5)。采用该项技术, 汽油机冷起动运转循环的 HC 可降低 50% ~ 70%, 是低排放汽车潜在的最佳技术之一。

汽车尾气中 HC 的成份组成复杂, 种类多达 100 种以上, 因此, HC 吸附型催化剂必须对众多的 HC 种类都具有吸附作用, 同时脱附的温度要和起燃温度同步或比起燃温度延迟才能获得较好的净化效果。目前一般采用的材料为热稳定性和吸附性能好的 $\text{Si/Al}=2$ 的中孔分子筛材料。同时通过适当地增加对烃类有良好氧化活性^[9] 的 Pd 在贵金属中的比例达到改良催化活性的目的。

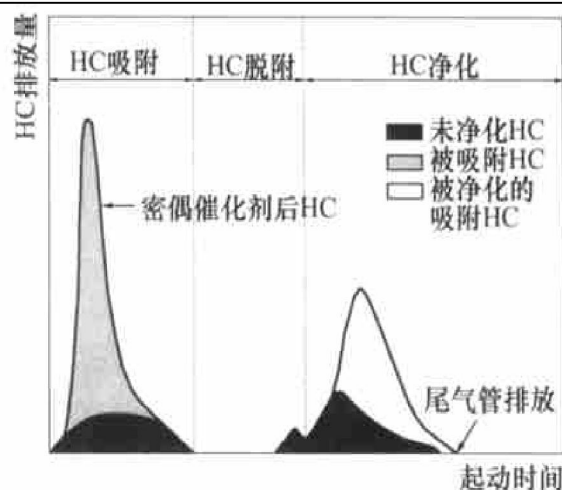


图 5 HC 吸附型催化剂的工作机理

提高现有三元催化剂的耐久性和储氧量, 同时将各具功能和特色的三元催化剂相互配合, 采用综合处理技术, 大大降低尾气中排放量, 可满足美国加州 ULEV 排放水平。最具代表性的是日本本田公司推出的 ZLEV 低排控制系统^[10], 通过对净化器、发动机燃烧过程和 EFI 控制系统的改进以及三者之间的良好匹配和精密控制, 即使经 10 万英里老化后也只有 ULEV 限值的 1/10(表 3^[9])。

表 3 美国加州 ULEV 限值与本田 ZLEV 排放水平

项目	NMOG ² 排放/ ($\text{g}\cdot\text{mile}^{-1}$)	CO 排放/ ($\text{g}\cdot\text{mile}^{-1}$)	NO_x 排放/ ($\text{g}\cdot\text{mile}^{-1}$)
加州 ULEV	0.04	1.7	0.2
本田 ZLEV ¹	0.004	0.17	0.02

1—经 10 万英里老化; 2—NMOG, 非甲烷有机气体

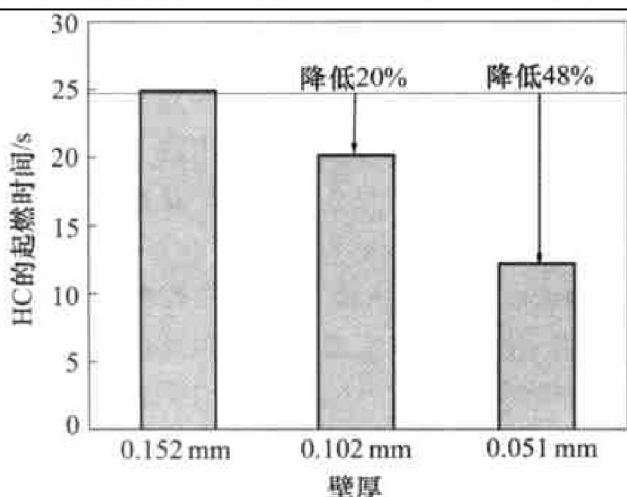


图 4 起燃时间的薄壁效应^[8]

2.2 稀薄燃烧条件下的三元催化剂技术

稀薄燃烧是指采用混合稀气(空燃比 ≥ 18), 大量的氧富余, 燃料可燃燃烧完全, 有害排放物 CO、HC 减少, 同时稀薄气体导致燃烧的最高温度下降, 降低了 NO_x 的排放量^[11]。稀薄燃烧另一显著的优

点是由于燃烧效率的大大提高, 可降低油耗约 15%, 减少温室效应气体 CO_2 的排放。因此稀薄燃烧技术被称为是将来汽油发动机车辆的主流技术。

稀薄燃烧尾气中含大量的 O_2 , 使得原有的三元催化剂对 NO_x 的净化效率大大降低, 几乎不起净化作用, 无法满足排放法规要求。日本和欧洲已进行了稀燃发动机排放处理催化剂的开发研究^[12]。富氧条件下, NO_x 的消除是一项具有相当难度的工作, 是当今世界环保最具挑战性的课题之一^[13]。

NO_x 的直接消除有 2 种途径: 一是选择性催化还原(Selective catalytic reduction); 二是直接催化分解(Decomposition of NO_x)。目前所使用的材料主要为日本广岛大学的 Wamoto 于 1990 年发现的 Cu 交换和过交换的 Cu-ZSM-5 的选择性和活性最好。此外通过采用贵金属与 Cu-MFI 复合催化剂, 可降低 HC 还原 NO_x 反应的温度, 通过将 HC 吸附在催化剂表面增加表面 HC 浓度, 提高 HC 的利用率; 此外加入某些 HC 重整催化剂, 也有利于提高对 NO_x 的净化效率^[14]。但由于 ZSM 分子筛催化剂对水蒸气的存在十分敏感, 其水热性还不能令人满意, 同时易中毒也限制了其进一步工业化应用。

为了能有效地净化稀燃烧汽车尾气中的 NO_x , 人们提出了所谓的 NO_x 吸附还原法, 其原理如图 6^[15]所示。当发动机在稀燃烧状态下工作时, 即在过量氧的情况下, 将 NO 与 O_2 在 Pt 作用下氧化生成 NO_2 , 在 M(NO_x 吸附材料) 上先将 NO_x 用吸附剂储存起来, 这时 CO 和 HC 生成 CO_2 和 H_2O 排出体外, 当发动机在富燃而贫氧条件下工作时, 硝酸盐分解释放出 NO_x , 在催化剂上与 CO、HC 和 H_2 反应生成 CO_2 、 H_2O 和 N_2 , 同时使得碱土金属得以再生。NSR 三元催化剂的活性成分主要是贵金属和碱土金属(稀土金属)。

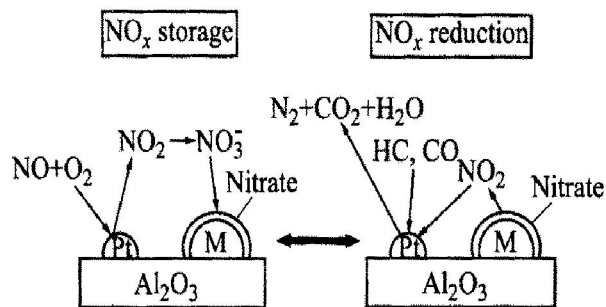


图 6 NO_x 吸附还原型催化剂的工作原理

利用 NSR 技术使对 NO_x 的净化效率达到 70%~90%, 是迄今为止最有效和最具吸引力的 Learr- NO_x 消除方法, 该技术已经率先在日本实现

了商业化。这方面有代表性的工作是 Toyota 的 Pt/BaO/ Al_2O_3 体系^[16], 发展的 NSR 催化剂已经能够达到 50 000 km 耐久性整车试验的目的($30 \times 10^{-6} \text{ SO}_2$)。

3 我国汽车尾气催化技术及产业化发展概况

我国汽车尾气催化技术起步于 20 世纪 70 年代初, 1973 年我国第一汽车厂开始对红旗轿车尾气进行净化。1975 年, 北京有色金属研究总院稀土冶金研究所接受国家下达的“汽车尾气净化稀土催化剂的研究”任务。此外, 还有昆明贵金属所、北京工业大学、中国科技大学、华东理工大学、清华大学等开展了这方面的研究。

20 世纪 80 年代到 90 年代初, 由于贵金属资源的缺乏, 国外开始考虑在催化剂中添加稀土以削减贵金属用量, 同时研究非贵金属催化剂以降低成本。受其影响, 国内大部分的研究将稀土催化剂作为开发的重点, 尤其是含稀土的钙钛矿结构的催化剂, 是当时我国净化催化剂的研究特色。但总体而言, 这一期间对催化剂的研究更倾向于实验室基础研究, 如催化剂的配方研究、性能测定、表征, 生产上表现为小试生产, 催化净化技术进展缓慢, 技术状况仅相当于美国 20 世纪 70 年代的水平, 整体水平与美国等发达国家相比落后 10~20 年。

20 世纪 90 年代中后期, 我国开始对汽车排放实施控制, 颁布了新的汽车排放法规, 规定新车必须安装净化器。当时市场上国产催化净化器产品, 无论是稀土金属氧化物净化器还是稀土贵金属复合氧化物净化器, 或是稀土过渡金属和贵金属复合氧化物净化器, 因技术含量偏低, 实际的使用效果很差。这些净化器寿命极短, 经短时间装车运行后, 净化效果普遍降低, 汽车安装后, 只在短时间内达标, 或根本不能达标。市场上销售的较成熟的产品主要是以同国外技术合作和组装国外的催化剂产品为主, 而整车厂使用的净化器产品大部分直接从国外进口, 市场上期待国产、性能优良、价格合理的净化器产品。

通过对国产稀土催化净化器的实际使用结果可知, 不含贵金属的催化剂在活性、耐久性、抗 S、P 中毒方面, 都远不及贵金属催化剂^[17], 无法满足新排放法规的要求。这时国内的研究机构将研究重点重新回到稀土贵金属三元催化剂上来, 开始较深入

地对涂层材料及工艺技术, 催化剂配方优化及制备技术, 净化器总成技术等进行应用研究和产品开发。在2000年前后, 国内众多的研究院所经过几年的技术研究积累, 在拥有自主知识产权的催化剂研究方面有所突破, 先后有一批科研成果形成, 并通过鉴定。三元催化剂的性能达到国外同类产品水平的主要有: 华东理工大学、昆明贵金属研究所、福州大学催化中心、北京工业大学、四川大学、中科院生态环境研究中心, 中国石化石油化工科学研究院等。目前国内开发的三元催化剂产品, 已完全能满足欧1、欧2排放法规的要求, 具备向工程化、产业转化的条件, 许多产品正准备或已经进入批量生产。国产催化剂产品在性能、寿命方面已与国外同类产品相当, 在性价比方面比国外产品有明显的优势。但总体而言, 国产净化器产品国内市场占有率偏低, 市场上仍是以进口和组装国外的催化剂产品为主。这主要有以下原因: 1) 国产三元催化剂的研究开发较国外晚, 净化器产业化刚刚起步, 净化器产品在性能稳定性和质量可靠性方面同进口产品尚有一定差距; 2) 我国汽车工业水平相对落后, 发动机或整车开发能力较落后, 例如国内主要轿车生产厂家如一汽大众、上海大众、上海通用在产的汽车基本上是从国外引进的成熟车型, 车型引进的同时, 净化器部分也一同引进, 使得进入整车厂的门槛变高; 3) 国外大厂家的产品开始进入中国, 市场竞争加剧。

4 加快我国净化器产业化发展的思路

预计今年我国的轿车产量将达到150~180万辆, 如果以每套净化器平均单价1200元人民币计算, 将是二十几亿元的大市场。目前我国的新车用催化剂基本上还是从国外进口, 如何改变这一状况, 尽快使我国的净化器行业得到良性发展, 并在国内占有一席之地呢? 作者提出如下思路:

1) 加强基础研究。开发具有高性能、低成本的三元净化器产品是应用的前提。研发新型高效催化材料, 进一步降低起燃温度, 提高热稳定性, 缩短起燃时间, 降低冷启动排放, 降低成本, 必须在基础研究方面进一步加强和深入。具体涉及催化剂载体材料及制造工艺研究、高储氧纳米复合材料、HC吸附并有效净化材料、能取代或部分取代贵金属材料的研究等方面, 从新材料研发上为达到欧3、欧4作准备。

2) 采用综合净化技术。汽车尾气净化技术是

一个系统工程, 除了提高发动机性能, 从源头上降低排放外, 还应采用综合净化技术。单纯采用传统的三元净化措施很难达到高排放标准的要求, 应当研发三元催化剂外加密偶催化剂, 吸附型三元催化剂和其他创新的有效净化措施的综合净化技术, 达到超低排放的要求。

3) 开展稀薄燃烧技术, 将降低油耗约15%。主要研发 NO_x 的高吸储释放催化材料和相应的电喷系统控制, 能够让空燃比A/F在18~22和14之间周期变化, 实现 NO_x 的高净化。

4) 加强产学研结合。从性能优良的催化剂产品到实际应用还涉及非常复杂的技术程序过程, 如净化器的外形设计, 净化器的匹配等。因此需要材料、化学、化工、机械、汽车、电子等领域科学工作者的共同努力和合作, 通过政府部门和汽车行业协会制定的相关政策及支持, 加大科技投入, 推动汽车产品零部件产品的国产化工作。不同的研发部门联合起来与汽车厂结合进行产品开发, 使产品的开发和调整具有针对性, 好产品能够被应用。

5 结语

我国汽车尾气排放标准的实施是一个强劲的挑战, 更是一个良好的发展机遇。我国已具备研究、开发和生产汽车催化转化器的能力, 新排放法规的加快实施, 必将是不断采用新产品、新技术, 淘汰落后产品的过程。净化器行业应紧紧抓住这一良好机遇, 提前做好能满足新排放标准的必要技术储备, 适时开发、试验和做好产品的产业化生产工作。同时通过技术创新, 大力降低生产成本, 及时将性价比高的产品推向市场, 以获得良好的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 中国汽车工程学会. 中国汽车工业科技十年发展[EB/OL]. http://www.pcauto.com.cn/price/csr/10211/3019_2.html. 2002.
- [2] 蔡凤田, 谢素华, 王建昕, 等. 汽车排放污染物控制实用技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999. 39-39.
- [3] Nisizawa K, Monoshima S, Koga M, et al. Development of new technologies targeting zero emissions for gasoline engines[EB/OL]. <http://www.elecpubs.sae.org/>, 2000.
- [4] Bond G C, Thompson D T. Catalysis by gold[J]. Catal Rev Sci Eng, 1999, 41(3-4): 319-388.

- [5] 王务林, 赵航, 王继先. 汽车催化转化器系统概论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999. 52 - 56.
- [6] 龚茂初, 文梅, 章洁, 等. 高温高表面氧化铝新材料的制备化学研究- La、Ba 共添加对氧化铝热稳定性的影响[J]. 无机化学学报, 2001, 17(1): 50 - 54.
- [7] Masui T, Ozaki T, Machida K, et al. Preparation of ceria/zirconia sub-catalysts for automotive exhaust cleaning [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 303 - 304: 49 - 55.
- [8] Nisizawa K, Monoshima S, Koga M, et al. Development of new technologies targeting zero emissions for gasoline engines[EB/OL]. <http://www.elecpubs.sae.org/>, 2000.
- [9] Yamada T, Kayano K, Funabiki M. The effectiveness of Pd for converting hydrocarbons in TWC catalysts[EB/OL]. <http://www.elecpubs.sae.org/>, 1993.
- [10] Kishi N, Kikuchi S, Suzuki N, et al. Technology for reducing exhaust gas emissions in zero-level emission vehicles(ZLEV) [EB/OL]. <http://www.elecpubs.sae.org/>, 1999.
- [11] 刘铮, 王建昕. 汽车发动机原理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001. 155 - 180.
- [12] Mahzoul H, Brillhac J F, Gilot P. Experimental and mechanistic study of NO_x adsorption over NO_x trap catalysts[J]. Applied Catalysis B, 1999, 20: 47 - 55.
- [13] Parvulescu V I, Grange P, Delmon B. Catalytic removal of NO [J]. Catalysis Today, 1998, 46: 233 - 316.
- [14] Akama H, Matsushia K. Recents lean NO_x catalyst technologies for automobile exhaust control[J]. Catalysis Surveys from Japan, 1999(3): 139 - 146.
- [15] Miyoshi N, Matsumoto S, Katoh K, et al. Development of new concept three-way catalyst for automotive leanburn engines[EB/OL]. <http://www.elecpubs.sae.org/>, 1995.
- [16] Matsumoto S, Ikeda Y, Suzuki H, et al. NO_x storage-reduction catalyst for automotive exhaust with improved tolerance against sulfur poisoning[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2000, 25(2 - 3): 115 - 124.
- [17] 曾佩兰, 黄可龙, 刘素琴, 等. 汽车尾气净化催化剂的研究现状及其进展[J]. 材料导报, 2003, 17(3): 48 - 51.

(编辑 李向群)