

朱仁成,鲍晓峰,贾明,等.汽油清净剂对汽车尾气排放影响及其清净性研究[J].环境工程技术学报,2016,6(4):307-313.

ZHU R C, BAO X F, JIA M, et al. Study on impact of gasoline detergent on vehicle emissions and its detergency[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(4): 307-313.

# 汽油清净剂对汽车尾气排放影响及其清净性研究

朱仁成<sup>1,2</sup>, 鲍晓峰<sup>2,1\*</sup>, 贾明<sup>2</sup>, 岳欣<sup>2</sup>, 刘泽民<sup>2</sup>, 王博文<sup>2</sup>

1. 南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏 南京 210016

2. 中国环境科学研究院国家环境保护机动车污染控制与模拟重点实验室, 北京 100012

**摘要** 通过整车转鼓试验,对比研究了10种市售清净剂在分别加入93#汽油后,汽车尾气排放的变化情况;从中选取一种性能良好的物理清净剂,通过 $1.2 \times 10^4$  km道路行车试验和发动机拆解试验,进一步评价该清净剂的节能减排效果及对发动机沉积物的清洁作用。结果表明:整体来看,使用所选的10种汽油清净剂后,汽车尾气排放会有不同程度的下降;但有的清净剂可能会增加尾气中个别污染物的排放,尤其是HC和NO<sub>x</sub>。加入所选物理清净剂后,受试车辆的HC、CO及NO<sub>x</sub>排放量分别下降14.3%、13.6%和16.7%,油耗下降3.5%;与加剂前相比,发动机系统的进气阀和缸盖部位沉积物均有所减少,其中进气阀沉积物质量减少6.8%,但对活塞顶部沉积物无明显抑制或清洁作用。试验还证明了汽车发动机拆解重装后,磨合期内CO和NO<sub>x</sub>排放量及油耗会有所增加;但清除缸内沉积物后,受试车辆的尾气排放和油耗情况均有所改善。

**关键词** 汽油清净剂;尾气排放;油耗;清净性

中图分类号: X701 文章编号: 1674-991X(2016)04-0307-07 doi: 10.3969/j.issn.1674-991X.2016.04.046

## Study on Impact of Gasoline Detergent on Vehicle Emissions and Its Detergency

ZHU Rencheng<sup>1,2</sup>, BAO Xiaofeng<sup>2,1</sup>, JIA Ming<sup>2</sup>, YUE Xin<sup>2</sup>, LIU Zemin<sup>2</sup>, WANG Bowen<sup>2</sup>

1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Vehicle Emission Control and Simulation, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract** Through the dynamometer tests, variations of tailpipe emissions from a passenger car fueling with 93# gasoline adding 10 different gasoline detergents were tested, respectively. Furthermore, a qualified physical detergent was chosen from the 10 detergents. The effects of energy saving and emission reduction were tested, and the detergency of the physical detergents in the engine deposits was also evaluated by engine disassembly test before and after driving about  $12 \times 10^4$  km with the additive. The results showed that the tailpipe emissions from the test vehicle would have different decrease if using qualified detergents. However, some emissions, such as HC and NO<sub>x</sub>, might be increased after using unqualified detergents. The vehicle emissions of HC, CO, NO<sub>x</sub> decreased obviously after using the physical detergent, approximately 14.3%, 13.6% and 16.7%, respectively. At the same time, the fuel consumption had a slight decrease of approximately 3.5%. There were some improvements in the deposits on the intake valves and cylinder covers after using the physical detergent. For example, the intake valve deposits (IVDs) decreased by about 6.8%. However, there was no obvious clarifying effect on the deposits

收稿日期: 2016-01-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2014AA06A503); 国家科技合作专项(2012DFA91570); 国家环境保护公益性行业科研专项(201409021)

作者简介: 朱仁成(1989—),男,博士,主要从事机动车污染控制技术研究, zhurencheng2006@163.com

\* 责任作者: 鲍晓峰(1957—),男,首席研究员,博士,博士生导师,主要从事车用燃料及添加剂、机动车污染控制理论和控制方法、汽车和发动机性能研究, baoxf@craes.org.cn

on the piston crowns. The test also proved that major repair of the engine might result in the increase of fuel consumption and CO, NO<sub>x</sub> emissions, while the vehicle emissions and the fuel consumption would be improved after the deposits being cleaned.

**Key words** gasoline detergent; tailpipe emissions; fuel consumption; detergency

随着机动车保有量的持续增加和石化资源的不断减少,我国汽车尾气污染控制和燃油经济性压力越来越大,节能、减排仍是目前汽车行业研究的重要问题之一<sup>[1]</sup>。与欧盟、美国和日本相比,我国汽油以催化裂化为主,烯烃含量较高,低温下更易氧化形成沉积物,堵塞喷嘴。大量研究<sup>[2-5]</sup>表明,使用合适清净剂是提高汽油品质、实现节能减排的一种切实有效措施。《车用汽油清净剂》国家标准自2005年5月1日开始实施,极大促进了我国汽油清净剂行业的发展。目前,国内市场清净剂品牌多达数百种,为汽油车实际运行中的节能减排起了很大作用。但由于缺少有效的监管手段及终端管理缺位,我国市场上的汽油清净剂质量和作用效果很难得到保证。

车用汽油清净剂按照不同的生产工艺及其组成可以细分为化学清净剂、物理清净剂及生物清净剂。化学清净剂出现最早、应用最广,通过向汽油中添加某种化学物质来调节燃油的理化性质,从而达到节油、减排、抗暴等效果;物理清净剂是相对化学清净剂而言的,以汽油为基质,通过对汽油产生物理作用来改善其燃烧特性,例如通过共振波来清除已有沉积物,阻止新沉积物的生成;生物清净剂则是通过生物合成的一种清净剂,多以植物为原料,对发动机的燃油经济性具有一定的改善效果<sup>[6-7]</sup>。一般来说,车用汽油中加入质量合格的清净剂则可以有效减少发动机喷嘴、进气阀和燃烧室中沉积物的生成,并清除已有的沉积物,从而达到降低汽车油耗、减少尾气排放、延长发动机寿命的目的。国内外有关化学清净剂、生物清净剂对汽车节能、排放性能影响的研究较多<sup>[3,8-13]</sup>,而对物理清净剂的报道相对较少。物理清净剂具有添加灵活,不发生化学反应,且可以无损清除发动机沉积物等优点,是汽油清净剂研发的一个新方向,应加强研究<sup>[7]</sup>。

目前对汽油清净剂性能评价主要有欧、美、日三大体系,欧盟、日本均为发动机台架试验法;而美国既有 Ford 2.3 发动机台架法,也有 ASTM D6201 整车试验法,且以整车试验为主<sup>[14]</sup>。我国 GB/T 19230.6—2003《评价汽油清净剂使用效果的试验方法》规定了以 M111 发动机台架试验法对汽油清静

性进行检测,该方法具有测试参数固定、操作性强及可重复性高等优点,属于理想条件下的实验室模拟试验,并不能完全反映和涵盖所有道路工况,与实车在道路行驶情况相比仍有一定差别。因此,为更真实地反映汽油清净剂对汽车各方面性能的影响,应采用实车道路行驶法对其进行测试。

为了解我国汽油清净剂市场上产品的节能减排效果及对发动机系统沉积物的清洁性能,笔者从市场上选取10种具有代表性的清净剂,分别考察加剂前后受试车辆的尾气排放变化情况;并从中选取一种性能良好的物理清净剂,详细考察受试车辆加剂行驶约 $1.2 \times 10^4$  km后,其对汽车尾气排放、油耗等方面的影响,并通过发动机拆解试验评价其对进气阀及燃烧室等部位沉积物的清净效果。

## 1 装置及方法

### 1.1 受试车辆和测试设备

受试车辆为一辆符合国IV排放标准的郑州日产 PALADIN 轿车,试验前里程表数为40 610 km,车况良好。受试车辆的基本配置参数如表1所示。

表1 试验车部分基本参数

Table 1 Detailed information of the test vehicle

项目	参数
车辆品牌	Nissan
发动机型号	KA24
气缸数	4
压缩比	9.2:1
排量/L	2.4
供油方式	多点电子喷射
排放标准	国IV
整备质量/kg	1 675
长×宽×高/(mm×mm×mm)	4 550×1 840×1 880
型式年份	2010
产地	中国

尾气排放和油耗测试试验主要在中国环境科学研究院的汽车性能实验室内进行,发动机拆解是在

4S 店内由专业人员完成。试验所用测功机为日本 HORIBA 生产的 CTDY-1211 型直流电流底盘测功机;尾气中 CO、HC 和  $\text{NO}_x$  排放借助 CVS 9100 定容取样系统,由 MEXA 9400 型汽车排气分析系统分析;活塞顶沉积物厚度采用德国 PHYNIX 生产的 Surfix FN 电子测厚仪测量;沉积物质量采用瑞士 METTLER TOLEDO 生产的 AL204 电子天平测量。

### 1.2 试验用汽油及清净剂

试验选用符合国 IV 标准的市售 93# 车用汽油为基础汽油,按照所选择的 10 种汽油清净剂要求分别配制出 10 个加剂油样,并标记为 1~10 号。最后,从中选取的一种性能良好的物理清净剂,用于系统考察使用加剂行驶  $1.2 \times 10^4$  km 后,该受试车辆尾气排放、油耗及发动机系统沉积物变化情况。该物理清净剂部分参数如表 2 所示。

表 2 清净剂部分基本参数

Table 2 Basic parameters of the tested detergent

项目	技术指标	分析结果	测试依据
外观	清澈透明	清澈透明	GB 19592—2004
倾点/°C	≤15	<-48	GB 19592—2004、GB/T 3535—2008
闪点/°C	≥45	45	GB 19592—2004、GB/T 261—2008
氮含量/%	— <sup>1)</sup>	0.003	GB 19592—2004、SH/T 0704—2001

1) GB 19592—2004 未做专门要求。

### 1.3 试验方案

10 种市售清净剂的减排性能评价方案:依据 GB 18352.3—2005《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(国 III、IV 阶段)》规定的 I 型试验方法,按照 ECE(economic commission for Europe) + EUDC(extra urban driving cycle) 循环工况先对受试车辆使用基础汽油时进行常规气态污染物(CO、 $\text{NO}_x$  和 THC)排放测试。测试结束后,放空原有汽油,更换加剂汽油进行相同工况下的测试,比较 2 次试验结果,得出该清净剂的减排效果。虽然清净剂可以通过提高燃油品质改善燃烧特性,从而迅速实现某种作用;但其主要还是经过清除燃油管路、进气阀及燃烧室的表面油垢和积碳,并保持一定清洁度来达到节能减排的效果。所以使用含清净剂汽油应行驶一定距离(至少 100 km),基本清除进气阀等部件表面积碳后再进行测试。

对所选物理清净剂进行评价,具体方案:1) 加剂前,按照 GB 18352.3—2005 规定,对受试车辆使用基础汽油时进行尾气排放及百公里油耗测试,记

为 Test 1。2) Test 1 测试完成后,去 4S 店对该车辆发动机进行第 1 次拆解,测量活塞顶沉积物厚度、进气阀质量( $m_1$ , 含沉积物);在不清除发动机任何部位积碳情况下,复原发动机。3) 轿车复原后添加基础汽油,磨合 60 km,再对其尾气排放及百公里油耗进行测试,记为 Test 2。4) 受试车辆使用加剂汽油,道路行驶约  $1.2 \times 10^4$  km 后,再进行尾气排放及百公里油耗测试,记为 Test 3。5) Test 3 测试完成后,去 4S 店对车辆发动机进行第 2 次拆解,测量活塞顶积碳厚度、进气阀质量( $m_2$ , 含沉积物);清除各进气阀积碳后,称量各阀门的质量( $m$ );最后,清除缸内各部分沉积物,复原发动机。6) 试验车经第 2 次拆解并清除缸内各部分沉积物,添加基础汽油后再次进行污染物排放及油耗测试,记为 Test 4。

为消除受试车辆拆解对尾气排放的影响,分别以 Test 1、Test 3 测量结果作为基础汽油及使用加剂汽油行驶  $1.2 \times 10^4$  km 后尾气排放及油耗情况;并分别以  $m_1$ 、 $m_2$  与  $m$  的差值作为清净剂使用前后进气阀沉积物(IVD)的质量。Omata 等<sup>[15]</sup> 研究证明,在清除燃烧室沉积物(CCD)后,HC、CO 和  $\text{NO}_x$  排放几乎回归到新车水平。因此可以用 Test 4 测量结果代表新车尾气排放及油耗水平。

具体试验流程如图 1 所示。试验中对比 Test 1 和 Test 2,Test 1 和 Test 3,Test 1 和 Test 4 结果,认为分别是发动机拆解、使用物理清净剂、清除发动机内沉积物等因素对尾气排放和油耗的影响。

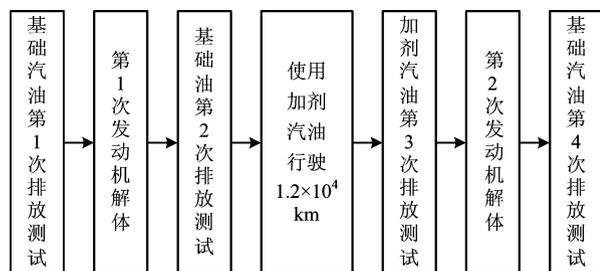


图 1 试验具体流程

Fig. 1 Process of the experiment

## 2 结果与讨论

### 2.1 市售清净剂对尾气排放影响

图 2 是受试车辆分别使用 10 种不同汽油清净剂前后 HC、CO 和  $\text{NO}_x$  排放的变化。

从图 2 可以看出,1 号、2 号、4 号和 10 号 4 种清净剂对 HC、CO 和  $\text{NO}_x$  均有一定减排效果,其中

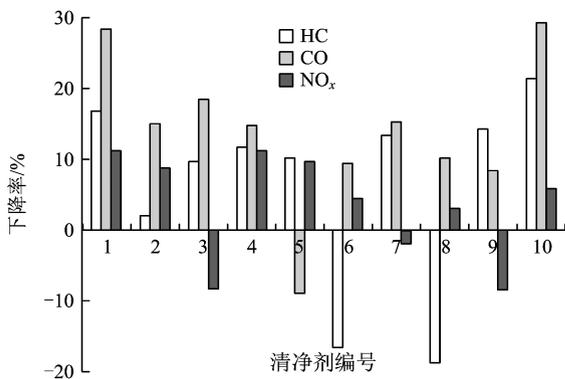


图2 10种清淨剂使用前后污染物排放变化

Fig. 2 Decrease rates of the gaseous emissions from the vehicle before and after the addition of 10 detergents

对CO的减排效果最明显,达14.7%~29.2%。然而3号、7号和9号清淨剂在降低HC和CO排放的同时,会不同程度地增加NO<sub>x</sub>的排放,这可能是由于这些清淨剂促进燃油燃烧的同时,增加了缸内热峰值,从而造成NO<sub>x</sub>排放增加。另外,6号和8号清淨剂会较大幅度地增加HC污染物的排放,分别增加了16.7%和18.8%。所测试的10种清淨剂中仅有5号会增加CO的排放,约8.9%。总体来看,受试车辆使用汽油清淨剂后,其尾气污染物排放会有不同程度的下降,但使用部分清淨剂后反而会增加个别污染物的排放,尤其是HC和NO<sub>x</sub>。这也反映了我国清淨剂市场上产品质量有待进一步提高。

## 2.2 物理清淨剂对尾气排放的影响

图3分别为受试车辆使用基础汽油(Test 1、Test 2)与加入物理清淨剂且道路行驶 $1.2 \times 10^4$  km后(Test 3、Test 4)尾气中HC、CO和NO<sub>x</sub>排放量对比。对比图3的Test 1和Test 2可以看出,发动机拆解对CO和NO<sub>x</sub>排放量具有较大影响,分别增加了9.9%和50.0%,但对HC排放量基本没影响。这是对发动机拆解过程中沉积物碎屑掉落或易挥发成分挥发等导致燃烧室体积改变、缝隙增大等多种因素综合作用的结果。对比第1次发动机拆解前后(Test 1、Test 2)和第2次发动机拆解前后(Test 3、Test 4)HC排放均无明显变化,可以推测HC排放受发动机拆解操作影响较小,但具体原因有待进一步研究证实。总之,拆装和更换发动机组件等操作后对发动机排放影响较大,一般需要一定时间的磨合期才能恢复其正常排放水平。

对比图3的Test 1和Test 3可知,加入物理清

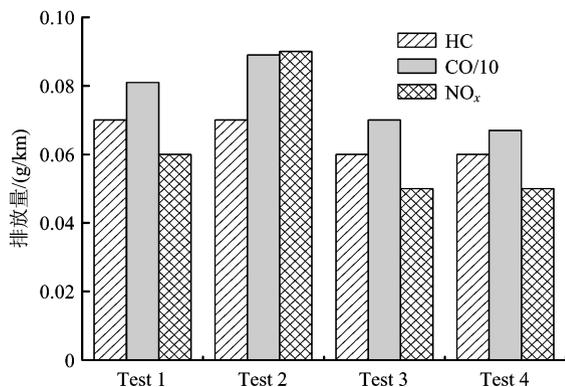


图3 加剂前后尾气排放量变化

Fig. 3 Variations of the tailpipe gaseous emissions before and after the addition of detergent

淨剂后,HC、CO和NO<sub>x</sub>排放量均有所减少,降幅分别为14.3%、13.6%和16.7%。说明受试车辆使用加剂汽油并行驶一定里程后,其尾气排放得到有效控制。一般化学清淨剂通过加快缸内混合气燃烧速度,增加了燃烧温度,在降低HC和CO排放的同时可能会恶化NO<sub>x</sub>排放<sup>[1,12]</sup>。而本试验使用物理清淨剂后,在改善HC和CO排放的同时,NO<sub>x</sub>排放量也有较大幅度下降,这与Omata等<sup>[15-17]</sup>添加物理清淨剂后得出NO<sub>x</sub>下降的试验结果相一致。加剂后尾气中NO<sub>x</sub>排放有所降低,一方面是由于清淨剂对IVD和CCD起到了清淨作用,增大了燃烧室容积,使压缩比有轻微的减小,由CCD造成的隔热效果也有所下降,从而降低了最高燃烧温度;另一方面如文献[6]所述,由于物理清淨剂与汽油分子产生共振,降低了分子间凝聚力,使汽油黏度、表面张力及实际胶质下降,改善喷雾效果、细化油滴,使其燃烧更迅速,缩短了燃烧持续时间,从而抑制NO<sub>x</sub>排放。

对比图3的Test 1和Test 4可知,清除发动机缸内沉积物后,发动机尾气HC、CO和NO<sub>x</sub>排放量均有大幅度削减,降幅与Test 3相当。这也说明使用清淨剂后(Test 3),尾气中除CO、HC和NO<sub>x</sub>排放几乎达到了新车水平(Test 4)。

## 2.3 物理清淨剂对油耗的影响

图4是受试车辆使用基础汽油(Test 1、Test 2)与加剂汽油且道路行驶 $1.2 \times 10^4$  km(Test 3、Test 4)后的百公里油耗。对比图4的Test 1与Test 2可知,整车经过拆解,在不清除发动机任何部位沉积物情况下再次复原,油耗量却增加了1.4%,与图2拆解后CO和NO<sub>x</sub>排放量增加相一致。这是由于各配

件间隙较紧,摩擦力增大造成的。说明车辆在实际运行中经大修后,油耗可能出现小幅度恶化,需要一定磨合期。

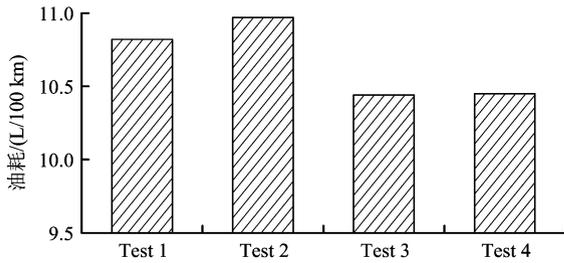


图4 实车燃用加剂汽油前后油耗变化

Fig.4 Variations of the fuel consumption before and after the addition of detergent

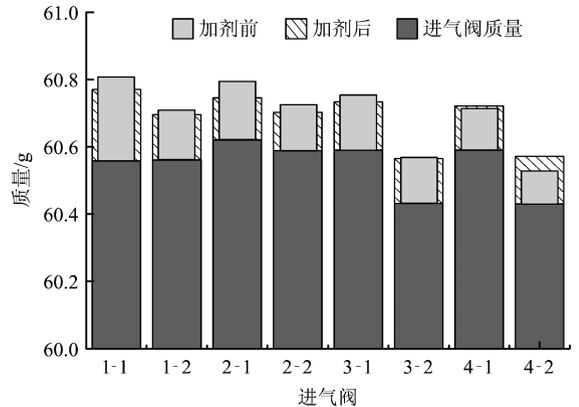
从图4可见,加剂后受试车辆百公里油耗(Test 3, 10.44 L/100 km)与加剂前(Test 1)相比显著降低,节油率约为3.5%,并且达到了新车油耗水平(Test 4, 10.45 L/100 km),说明该物理清净剂节油效果较为明显。清净剂的节油原理较为复杂,一般认为是改善喷油质量、提高燃烧效率、减少摩擦及促进燃烧等多种功能综合作用的结果。也有研究者认为,物理清净剂能扩大分子间距,增强其活性,提高油气混合质量,加快燃烧速率,使燃烧更充分,让更多燃料在上止点附近燃烧,提高了热、功转化效率,所以物理清净剂能降低汽油油耗<sup>[6]</sup>。与发动机台架试验加剂前后的节油率相比,本试验得到的实车油耗下降率可能较小,但与同样在实车上进行的3M添加剂得到的节油率(2%~4%)相当<sup>[18]</sup>。

对比图4的Test 1和Test 4可知,清除缸内沉

积物可以显著提高汽车的燃油经济性,达3.5%。

## 2.4 物理清净剂对进气阀沉积物的影响

图5为加入物理清净剂并行驶 $1.2 \times 10^4$  km后,进气阀上沉积物质量的变化。由图5可知,汽缸1、汽缸2、汽缸3进气阀上沉积物质量均有明显降低,其中对汽缸2的2个进气阀清洗效果最好,其沉积物降幅最大,分别为28%和16.2%;而汽缸4的2个进气阀积碳有所升高,沉积物量分别增加9.2%和44.2%;4个汽缸8个进气阀总的降幅为6.8%。



注:(1-1,1-2)、(2-1,2-2)、(3-1,3-2)、(4-1,4-2)分别为汽缸1、汽缸2、汽缸3和汽缸4各自对应的2个进气阀。

图5 进气阀沉积物质量变化

Fig.5 Variations of the IVD amount before and after the addition of detergent

图6是从每个汽缸选一个进气阀进行加剂前后积碳累积情况对比。由图6可以看出,物理清净剂对大多数进气阀会有一定清洗效果。其基本原理是

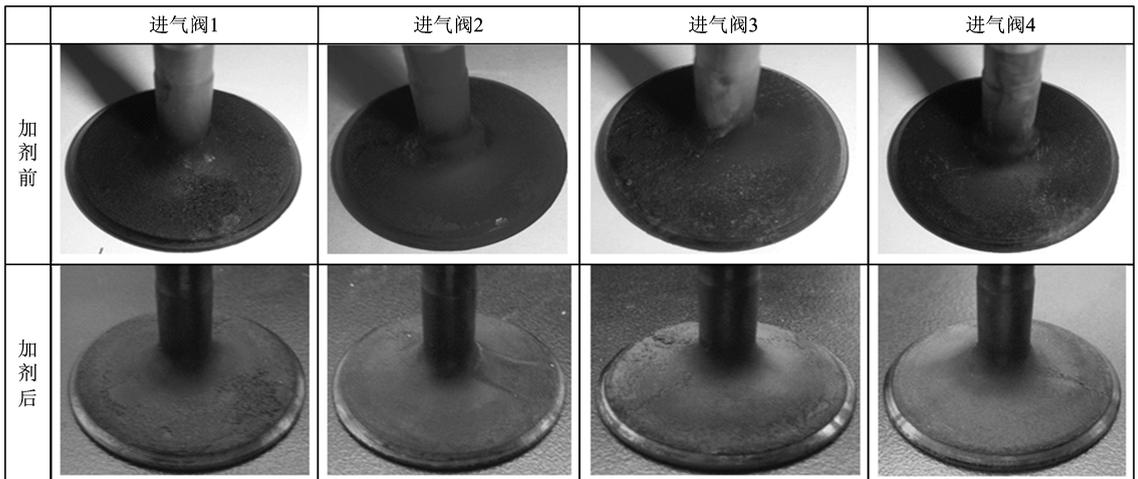


图6 发动机进气阀加剂前后积碳累积情况对比

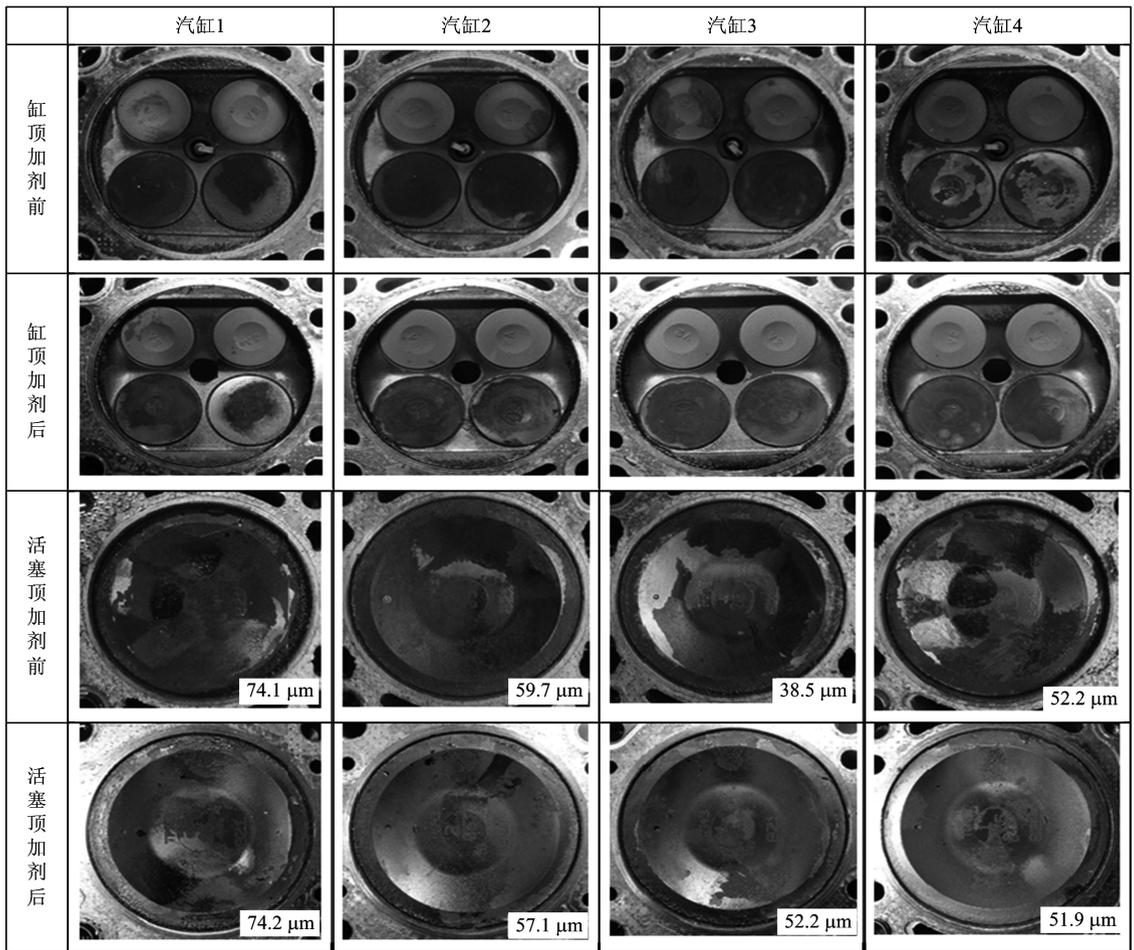
Fig.6 Comparison of the intake valve photos before and after the addition of detergent

清净剂加入燃油后,把自身的物理共振特性传递给汽油和发动机部件;汽油获得这一共振特性后,在高温高压的发动机内部环境下同步爆发,产生巨大共振波,击碎燃烧室内陈积的积碳,实现清洗功能。从图 6 还可看出,同一缸上 2 个 IVD 增减幅度虽略有差异,但有相同增减趋势。各汽缸之间 IVD 清净程度差别较大,这是由于各缸内燃烧特性略有不同造成的。

### 2.5 物理清净剂对燃烧室沉积物的影响

清净剂对缸内沉积物的清洗对象包括汽缸盖沉积物和活塞顶沉积物。图 7 是物理清净剂使用前后汽缸盖和活塞顶部分沉积物的对比情况。由图 7 可以看出,受试车辆使用物理清净剂后,对活塞顶和汽缸盖各部分的沉积物都有一定清洗效果,尤其是对活塞顶上沉积物清净作用较为明显,褐色的灰状物

已不存在,露出较为光滑的表面。虽然从图 7 可见,物理清净剂对各活塞顶也都有明显清洗效果,但经过厚度测试,汽缸 3 活塞顶上沉积物平均厚度反而有大幅度上升,且 4 个活塞顶上积碳平均厚度也上升了 1.5  $\mu\text{m}$ 。由于本试验车是在行驶 40 610 km 后添加的物理清净剂,可能是活塞顶部分积碳沉积过于牢固,汽油共振产生的冲击波不足以将其全部清洗掉,造成该清净剂对活塞顶上沉积物无明显抑制或清净作用。继续增加清净剂的使用时间是否会达到降低活塞顶积碳平均厚度的效果还需进一步试验研究。总体来说,该物理清净剂在清除进气阀沉积物的同时,几乎没有增加燃烧室沉积物,也没导致排放和油耗的恶化,符合第四代汽油清净剂功能特征。



注:图示中数值为活塞顶积碳平均厚度。

图 7 物理清净剂对燃烧室清净性试验结果

Fig. 7 Comparison of the combustion chamber crown and piston crown photos before and after the addition of detergent

### 3 结论

(1) 总体来看,使用所抽取的10种汽油清净剂产品后,汽车尾气排放会有不同程度下降;但使用部分产品后反而会增加个别污染物的排放,尤其是HC和NO<sub>x</sub>。我国清净剂的质量有待进一步提高。

(2) 通过1.2 × 10<sup>4</sup> km道路行车试验和发动机拆解试验,该受试车辆使用加入物理清净剂的汽油后,尾气中HC、CO和NO<sub>x</sub>排放有所改善,百公里油耗也略有下降。

(3) 总体来看,使用物理清净剂后,对受试车辆的进气阀沉积物、气缸顶沉积物均有一定清洁效果,但对活塞顶上沉积物无明显抑制或清净作用。

(4) 发动机拆装等操作,短期内对CO、NO<sub>x</sub>排放及油耗影响较大,但对HC排放几乎没影响;清除发动机缸内沉积物后,尾气排放改善及燃油经济性提高效果较为明显。

### 参考文献

- [1] 张攀,纪常伟,汪硕峰,等. 添加剂对汽油机油耗及排放影响的试验研究[J]. 内燃机工程,2010,3(4):49-53.  
ZHANG B,JI C W,WANG S F, et al. Experimental study on the effect of fuel additives on gasoline engine fuel consumption and emissions[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010,3(4):49-53.
- [2] 方泽军,纪常伟,汪硕峰,等. 添加剂DTBP对高辛烷值汽油燃烧及排放影响的试验研究[J]. 汽车工程,2008,30(7):577-581.  
FANG Z J,JI C W,WANG S F, et al. An experimental study on the influence of additive DTBP on the combustion and emissions of high-octane gasoline [J]. Automotive Engineering, 2008, 30(7):577-581.
- [3] 郭瑞莲,鲍晓峰,岳欣,等. 汽油清净剂对发动机排放影响的试验研究[J]. 车用发动机,2007(3):89-92.  
GUO R L,BAO X F,YUE X, et al. The experiment study on the influence of gasoline detergent on engine emission [J]. Vehicle Engine,2007(3):89-92.
- [4] GENG P, YAO C. Combustion and emission characteristics of a direct-injection gasoline engine using the MMT fuel additive gasoline[J]. Fuel,2015,144:377-380.
- [5] ZAND A D, GHOLAMREZA N B, ALIREZA M T, et al. The influence of deposit control additives on exhaust CO and HC emissions from gasoline engines[J]. Transportation Research Part D,2007,12:189-194.
- [6] 林琦. 物理添加剂在燃油的节能与排放中的作用[J]. 交通节能与环保,2008(2):26-28.
- [7] 孙先丽. 新型汽油添加剂研究进展[J]. 科技创新导报,2010(20):1.

- SUN X L. Developments of the researches on the new types of gasoline additives [J]. Science and Technology Innovation Herald,2010(20):1.
- [8] 王迎,郑朝蕾,何祖威,等. 添加剂对甲醇均质充量压燃燃烧的影响[J]. 内燃机工程,2010,32(2):57-72.  
WANG Y,ZHENG Z L, HE Z W, et al. Effect of additives on HCCI combustion of methanol[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2010,32(2):57-72.
- [9] 姚春德,张志辉,徐元利,等. 改善汽油机燃油经济性的生物基添加剂研究[J]. 中国科学E辑:技术科学,2009,39(4):648-654.
- [10] 刘风波. SJD燃油添加剂对捷达GIF轿车尾气排放影响的研究[J]. 装备制造技术,2013(3):13-15.  
LIU F B. Study on the effect of SJD fuel additive on exhaust emission of Jetta Sedan GIF [J]. Equipment Manufacturing Technology,2013(3):13-15.
- [11] 黄宪江,鲍晓峰,岳欣,等. 燃烧室沉积物对点燃式发动机不同工况下排放的影响[J]. 环境科学研究,2009,22(10):1113-1119.  
HUANG X J, BAO X F, YUE X, et al. Effects of combustion chamber deposits on emissions from a spark ignition engine under different test conditions[J]. Research of Environmental Sciences, 2009,22(10):1113-1119.
- [12] 郭瑞莲,周大森,鲍晓峰. 汽油清净剂对发动机沉积物生成影响的试验研究[J]. 小型内燃机与摩托车,2009,38(6):4-6.  
GUO R L, ZHOU D S, BAO X F. Study on the influence of gasoline detergent on intake system deposit of engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle,2009,38(6):4-6.
- [13] GHADIKOLAEI M A. Effect of alcohol blend and fumigation on regulated and unregulated emissions of IC engines: a review [J]. Enewable and Sustainable Energy Reviews,2016,57:1440-1495.
- [14] SERGIO M, OTTO A. A review of emission productions from bioethanol and its blends with gasoline: background for new guide-lines for emission control [J]. Fuel,2015,140:293-301.
- [15] OMATA T, HAMATANI K, KANEKO T, et al. Analytical studies of combustion chamber deposits and effects of CCDs on emissions [C]//SAE Technical Paper 971721,1997. doi:10.4271/971721.
- [16] PAPACHRISTOS M, WILLIAMS D, VINCENT M, et al. Deposit control additive effects on CCD formation engine performance and emissions [C]//SAE Technical Paper 952444, 1995. doi: 10.4271/952444.
- [17] 马其华,任洪娟,张春燕. 物理燃油添加剂对通用小型汽油机经济性及排放的影响[J]. 上海工程技术大学学报,2011,25(1):1-4.  
MA Q H, REN H J, ZHANG C Y. Influence of physical fuel additive on economy and emission of universal small gasoline engine [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science,2011,25(1):1-4.
- [18] 史志宇,霍鑫. 汽油添加剂清净性能和节油效果分析[J]. 汽车与配件,2014(16):48-50. ▷