

贾明,张容硕,庞玉洁,等.汽油清净性快速检测方法与监管方案研究[J].环境工程技术学报,2023,13(3):949-954.

JIA M,ZHANG R S,PANG Y J,et al.A rapid detection method for gasoline detergency and the regulatory scheme[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(3):949-954.

汽油清净性快速检测方法与监管方案研究

贾明¹,张容硕²,庞玉洁²,刘嘉¹,刘鸣宇³,王博文¹,王鸣宇¹,马遥¹,朱仁成^{2*},鲍晓峰¹

1.中国环境科学研究院

2.郑州大学生态与环境学院

3.北京市机动车排放管理中心

摘要 车用汽油清净性与汽车尾气污染物排放水平、燃油经济性等密切相关。为提高汽油清净性检测效率、提升相关职能部门的监管能力,提出了一种车载移动式多通道汽油清净性快速模拟检测方法(简称多通道快速模拟检测法)。与我国法规推荐的汽油机进气阀沉积物模拟试验方法(简称快速模拟检测法)相比,多通道快速模拟检测法的单个油样检测总耗时降低77.8%,多个油样检测总耗时降低94.4%,检验用油量减少约80%,成本降低约90%;多通道快速模拟检测法与快速模拟检测法具有较好的相关性(皮尔逊相关系数为0.4~0.8),可用于汽油清净性的快速检测。最后,提出了汽油清净性的现场监管检测方案。

关键词 车用汽油;清净性;模拟检测法;油品监管;图像识别

中图分类号:X701 文章编号:1674-991X(2023)03-0949-06 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20220527

A rapid detection method for gasoline detergency and the regulatory scheme

JIA Ming¹, ZHANG Rongshuo², PANG Yujie², LIU Jia¹, LIU Mingyu³, WANG Bowen¹, WANG Mingyu¹,
MA Yao¹, ZHU Rencheng^{2*}, BAO Xiaofeng¹

1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.School of Ecology and Environment, Zhengzhou University

3.Beijing Vehicle Emission Management Center

Abstract The detergency of vehicle gasoline is closely related to vehicle exhaust emissions and fuel economy. In order to improve the detection efficiency of gasoline detergency and enhance the supervision ability of relevant functional departments, an on-board multi-channel rapid simulation detection (MCRSD) method of gasoline detergency was proposed. Compared with the rapid simulation detection (RSD) method of gasoline engine inlet valve deposits recommended by the regulations, the total test time for a single sample of the MCRSD method decreased by 77.8%, and the total test time for multiple samples of the method decreased by 94.4%, with 80% reduction in fuel consumption and 90% reduction in cost. The MCRSD method had a good correlation with the RSD method (Pearson correlation coefficient was 0.4-0.8), and could be used for the rapid detection of gasoline detergency. Finally, the on-site supervision and testing scheme of gasoline detergency was proposed.

Key words vehicle gasoline; detergency; simulation detection method; gasoline supervision; image recognition

清净性是车用汽油使用过程中减轻或防止发动机燃油管路、进气系统、燃烧室产生沉积物和保持发动机清洁的一种性能,也是反映车用汽油在使用过程中生成积炭倾向的一种重要环保属性^[1]。近年来,随着城镇化进程的持续推进,我国汽车保有量快速增加^[2]。据统计,2021年我国汽车保有量为3.02亿辆,位居世界第一^[3]。巨大的汽车保有量给居

民生活带来便利的同时,也给能源安全和环境质量带来巨大压力。例如,2020年全国汽车4项污染物排放总量为1486.3万t,其中汽油车是一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)的主要贡献者,分别占汽车排放总量的80.9%和77.6%^[4]。尾气污染物是汽油在发动机内不完全燃烧的产物,提高油品质量可以从源头上控制汽车污染物排放^[5-6]。

收稿日期:2022-05-27

基金项目:北京市机动车排放执法专项(HCZB-2018-ZB102-2);河南省科技攻关计划项目(212102310524)

作者简介:贾明(1970—),男,工程师,主要从事车用燃料及清净性研究,jiaming700611301@163.com

* 责任作者:朱仁成(1989—),男,副教授,博士,主要从事机动车污染控制研究,zhurc@zzu.edu.cn

与提高炼油工艺水平相比,使用清净剂是提高汽油品质的一种经济、有效措施^[7-8]。研究表明,在汽油中加入合格的汽油清净剂能够清洗发动机积炭、保持发动机性能,从而达到提高燃油经济性、降低汽车污染物排放的效果^[9-11]。如朱仁成等^[12]对 10 种市售清净剂的节能减排效果进行了评价,发现受试汽车添加性能良好的清净剂并行驶 1.2×10^4 km 后,发动机进气阀上的沉积物质量减少了 6.8%;清除缸内沉积物后,受试汽车尾气 HC、CO 和氮氧化物(NO_x)排放量分别下降 14.3%、13.6% 和 16.7%,燃油经济性提高了 3.5%。Jin 等^[13]对 14 种汽油清净剂进行了试验测试,结果显示合格的清净剂不仅能够减少汽车实际道路行驶工况下常规气态污染物排放,还可以有效降低挥发性有机化合物(VOCs)排放,其中烷烃、烯烃、芳香烃和卤代烃排放量分别降低了 79.4%、66.3%、81.7% 和 43.7%。Yue 等^[14]基于 6 辆轻型汽车考察了发动机积炭清除前后污染物排放变化情况,发现清除积炭后热运行工况下 HC 和 CO 排放量分别降低了 29.4% 和 35.5%,冷启动工况下 CO 排放量降低了 23.0%。也有研究表明,在不同牌号汽油中加入清净剂后,沉积物生成量、燃油消耗量和尾气污染物排放量均有明显降低^[15]。

为保证汽油清净性,北京市多年来一直强制要求在车用汽油中加入合格的清净剂,但我国其他大部分省(区、市)并未颁布相关法律法规,其中主要原因是尚未形成一套适用于汽油清净性监管的快速检测方法^[16]。如果汽油使用清净剂时以次充好、以少代多,不仅达不到节能减排效果,反而会加重汽车燃油系统积炭结垢现象,进而增加燃油消耗和污染物排放,甚至缩短一些汽车零部件的使用寿命^[17]。da Silva 等^[18]利用红外光谱和多元分类方法实现对汽油中是否有清净剂的检测,而 Rodrigues 等^[19]利用环炉和近红外高光谱成像法测定汽油中是否存在清净剂,但这些方法仅能够判定汽油中是否添加了清净剂,无法定量判定汽油清净性及是否达到标准要求。因此,为便于汽油清净性评价和监管,亟待开发一种便携式汽油清净性快速检测技术及检测方案。

1 国内外汽油清净性检测方法

GB/T 19230—2003《评价汽油清净剂使用效果的试验方法》规定了清净剂对汽油进气阀和燃烧室沉积物生成倾向的 2 种发动机台架评价方法,包括 Ford 2.3 L 法和 M111 法。其中, Ford 2.3 L 法参考了美国材料与试验协会(ASTM) 制定的 ASTM D6201 方法(standard test method for dynamometer

evaluation of unleaded spark-ignition engine fuel for intake valve deposit formation), 采用的是福特于 1994 年设计生产的 2.3 L 直列四缸轻型卡车发动机,且每缸 2 个阀门^[20]。ASTM D6201 是美国进行汽油清净性检测的主要方法,后被中石油兰州润滑油研究院引入国内。Ford 2.3 L 法规定 1 次完整的循环时间为 13 min, 包含 2 种工况且二者之间有 30 s 的过渡时间;通过多次重复循环后基于发动机进气阀与燃烧室沉积物增重来评价受试汽油清净性^[21]。一次完整的 Ford 2.3 L 试验过程需要发动机持续运转 100 h, 约消耗燃油 950 L, 消耗大量的人力物力, 且试验过程中发动机运转同样会造成一定的污染物排放。

M111 法为运输用燃料、润滑油及其他流体性能测试开发欧洲协调委员会(简称协调委员会)开发的汽油发动机进气阀沉积物测试方法,即 CEC F-20-98(deposit forming tendency on intake valves)^[22]。该方法由德国奔驰汽车公司开发,在欧洲使用多年后被中国环境科学研究院和中石化石油化工科学院引入国内。该方法采用戴姆勒-克莱斯勒生产的四缸四程、每缸四阀,配备电控点火和汽油喷射系统,排量为 2.0 L 的 M111 发动机,具体试验设备如图 1(a) 所示。试验前需按规程清洗有关零部件并进行系统检查,然后按规定的试验工况进行发动机循环试验,完成 800 个循环;试验后利用专用工具收集进气阀和燃烧室上沉积物,并于 16 h 内完成沉积物的评价工作^[23]。该方法为我国仲裁评定方法,与实际道路试验结果相关性较好^[24]。但其费用昂贵,每个试验约需 10 万元,检测周期长,约为 1 周。除 M111 法外,协调委员会还开发了 M102 法,即汽油发动机进气阀沉积物测试方法 CEC F-05-93(inlet valve cleanliness in the MB M 102 E engine)^[25],采用奔驰公司直列四缸发动机,持续运行约 60 h,大约消耗燃油 220 L。目前国内没有引进 M102 法。



(a) M111 发动机台架法

(b) 快速模拟检测法

图 1 汽油清净性检测装置

Fig.1 Detection device of gasoline detergency

GB/T 37322—2019《汽油清净性评价 汽油机进气阀沉积物模拟试验法》规定了一种汽油机进气阀沉积物模拟试验方法(简称快速模拟检测法)。具体

试验过程:首先,用容量瓶取 300 mL 待检油样倒入盛样杯中,并用 1 mL 微量进样器抽取适量的助剂加入待检油样中;然后,在通风橱内,试验汽油与恒压、恒流的空气一起由喷嘴喷向一个已称重并加热到特定试验温度的铝制沉积物收集器上,在收集器表面形成油膜并不断地加热、烘烤,经过一段时间,收集器表面逐步形成沉积物^[26];最后,通过称重试验前后的沉积板,确定沉积物增加量,并与发动机台架试验结果作参照,衡量汽油清净性。快速模拟检测法的沉积板增重和 M111 法有着较好的相关性,并且沉积物在沉积板上形态也能反映出与汽油清净性相关的信息。快速模拟检测法每次试验约需 0.5 万元,检测时长约为 1.5 h,其装置如图 1(b) 所示。

Ford 2.3 L 法和 M111 法均为国家标准中推荐的汽油清净性评价方法,能够较为真实地反映汽油进气阀和燃烧室内沉积物生成潜势,但试验费用较高,检测周期较长,难以满足对加油站大量样品的日常监管需求。相比 Ford 2.3 L 法和 M111 法,快速模拟检测法虽然能够大大降低用油量、时间、测试成本,但每次只能检测 1 个油样且需要配备高精度的称量天平,给其作为车载设备大范围开展汽油清净性监管工作带来很大挑战。在大量市售汽油清净性抽检工作和实验室模拟测试基础上,笔者提出了一种效率高、用油少、成本低的车载移动式多通道汽油清净性快速模拟检测方法(简称多通道快速模拟检测法),其性能与现有国家标准推荐测试方法进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 车用汽油清净性检测方法对比

Table 1 Comparison of vehicle gasoline detergency detection method

方法来源	检测方法	总耗时	用油量/L	测试成本/万元
GB/T 19230.5—2003	Ford 2.3 L	2周	950	30
GB/T 19230.6—2003	M111	1周	>300	10
GB/T 37322—2019	快速模拟检测法	1.5 h	0.3	0.5
本研究	多通道快速模拟检测法	20 min	0.06	0.05

2 多通道快速模拟检测法及其与快速模拟检测法相关性

2.1 快速模拟检测法沉积物图像特征

为降低测试成本,通常采用快速模拟检测法对汽油清净性进行评价。实践经验表明,采用快速模拟检测法测试汽油清净性的沉积板上图像特征和沉积物增重有较强相关性。如田高友等^[6]通过沉积

物形态特征来区分新鲜汽油和长期存放汽油以及不同类型清净剂的主剂。岳欣^[16]则认为只要清净剂主剂质量好且添加剂量充分,沉积板上沉积物的量就会很少,与清净剂种类没有直接关系。未按规定添加清净剂或主剂质量不佳时,沉积板中央位置会形成“唇印”状沉积物,而添加质量合格的清净剂时沉积物形态会扩散。沉积板上的沉积物形状特征有以下几类:1)图像扩散明显[图 2(a)],用正庚烷浸泡后,无残余物或残余物较少;2)图像有一定的扩散[图 2(b)],用正庚烷浸泡后,仍有一定的残余物;3)图像无明显扩散[图 2(c)],用正庚烷浸泡后,残余物较多。



(a) 图像扩散明显 (b) 图像有一定的扩散 (c) 图像无明显扩散

图 2 汽油沉积物图像特征

Fig.2 Image features of gasoline deposits

大量试验证明,清净剂能够影响沉积物的形态特征,如果汽油中加入了足量的汽油清净剂或者汽油本身清净性好,则沉积板上的图形是扩散的,结果也是合格的;如果汽油中未加入足量的汽油清净剂或者汽油本身清净性一般,则沉积板上的图形扩散不明显,结果可能不合格;如果汽油中未加入汽油清净剂或者汽油本身清净性差,则沉积板上的图形是不扩散的,结果一般不合格。上述图形特征在测试前几分钟就能完全表现出来,且保持不变。因此,为提高检测效率,可使用汽油清净性快速模拟检测所得图形结果作为汽油清净性检测结果筛查依据。对图形特征明显的油品做出直接判定,而仅对少数难以判定的样品再进行 M111 试验复核,既提高了检测效率,也能较好地保证检测质量。

2.2 多通道快速模拟检测法

2011—2018 年,为配合政府监管部门更好地完成北京市市售汽油清净性状况监管,中国环境科学研究院试制的多通道快速模拟检测法设备如图 3 所示,并开展了大量实测检验。该设备可在采样现场、约 20 min 内对采样汽油的清净性作出定性判断,为大范围汽油清净性监管提供了保障,且大幅度降低了试验费用。

多通道快速模拟检测设备主要由汽车、发电机、压缩机及 HK-3 型汽油清净性检测仪等组成(图 3),可同时测试 3 个油样^[27]。具体测试方法如下:首先,检测前先将沉积板进行抛光打磨至光洁无污,固定于检测罩内与加热设备夹紧,并将沉积板加热至

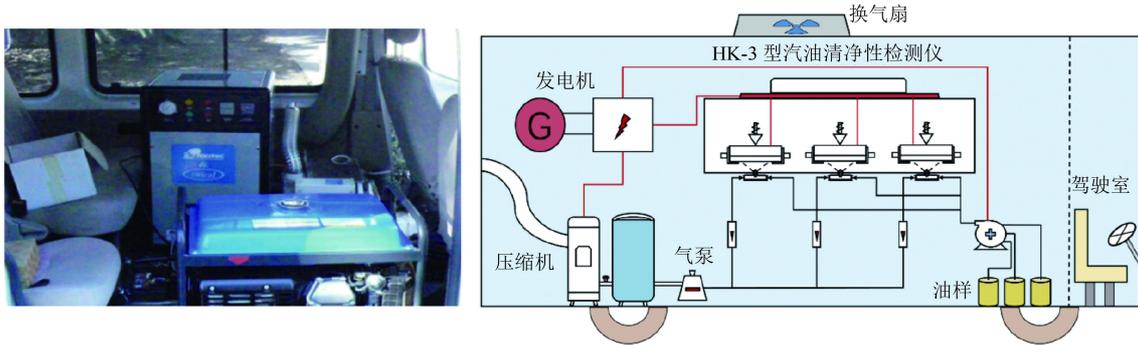


图 3 多通道快速模拟检测设备及技术原理

Fig.3 Multi-channel rapid simulation test equipment and the technical schematic diagram

180~190 ℃;其次,将压缩空气减压到 0.12 MPa,流量控制在 700 L/h,给 3 个喷嘴供气,同时计量泵以 4 mL/min 速度均匀为 3 个喷嘴供油,油气在喷嘴内充分混合后喷向达到试验温度的沉积板上;然后,在控制单元控制下持续喷油 10 min,后加热至 215~220 ℃ 烘烤 5 min,使收集器表面氧化形成漆膜,并在冷却后取下收集器;最后,基于沉积板增加重量或图形特征,判断汽油样品的清净程度是否合格。与快速模拟检测法相比,应用多通道快速模拟检测法可使单个样品制作检测总耗时降低 77.8%,多个样品制作检测总耗时降低 94.4%,耗油量减少约 80%,成本降低约 90%。

2.3 多通道快速模拟检测法与快速模拟检测法相关性

多通道快速模拟检测法已在实际汽油清净性抽检工作中应用多年,对检测结果的感性认识能够较好地评价受试汽油的清净性水平。为定量评价多通道快速模拟检测法与快速模拟检测法结果的相关性,共收集了 75 份北京市实际加油站的典型市售汽油样品,分别进行了多通道快速模拟检测法与快速模拟检测法检测,随机抽取其中第 28、48、68 号样品对比检测,结果如图 4 所示。

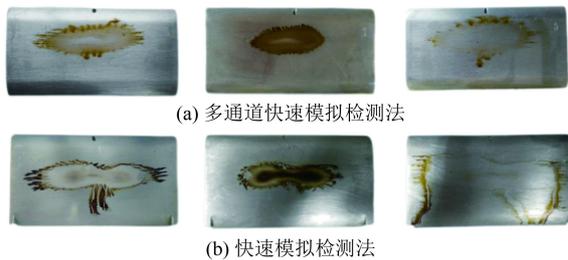


图 4 沉积物图像

Fig.4 Deposit images

本研究采用 python 中 Numpy 科学计算库对多通道快速模拟检测法与快速模拟检测法的沉积物图像特征做相关性分析。当 2 组数据成对出现且各组数据之间相互独立时,可以使用皮尔逊积矩阵相关

系数 (Pearson product-moment correlation coefficient, PCCs)度量 2 组数据之间的相关性,该系数称作皮尔逊相关系数 (r)^[28]。 r 介于-1~1,若 $r>0$ 表示 2 组数据呈正相关,反之则为负相关。本研究中 2 种检测方法所得沉积板图像呈正相关,故 $r>0$,其相关强度可基于表 2 中取值范围进行判断。

表 2 皮尔逊相关系数(r)取值与相关强度

strengths				
0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
极强相关	强相关	中等程度相关	弱相关	弱相关或无相关

2 个变量之间的 r 定义为 2 个变量之间的协方差和标准差的商,具体计算公式如下:

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sum_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中: $\text{cov}(X, Y)$ 为 2 组数据的总体协方差; σ_Y 为数据的标准差; X_i 、 Y_i 分别为 2 组数据中第 i 个数; \bar{X} 、 \bar{Y} 则分别为 2 组数据的均值。

运算中整体以矩阵形式运算,相关系数矩阵 R 与协方差矩阵 C 之间的关系如下:

$$R_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii}C_{jj}}} \quad (2)$$

式中: R_{ij} 与 C_{ij} 分别为相关系数矩阵与协方差矩阵中第 i 行 j 列的数值; C_{ii} 与 C_{jj} 则分别为协方差矩阵中第 i 行 i 列与第 j 行 j 列的数值。

为提高精确度与可信度,计算同一油样分别采用快速模拟检测法和多通道快速模拟检测法得到的沉积板图像 r 时,需要按照以下流程对图像进行预处理: 1)将所有拍摄的图像背景擦除,只保留沉积板图像区域; 2)将擦除背景后的图像大小统一调整为 300 px×300 px; 3)读取图像信息将图像信息转化为由像

素值组成的 300×300 矩阵; 4) 将像素值组成的 300×300 矩阵按行优先顺序打平成 $1 \times 90\,000$ 一维数组。预处理后, 将得到 2 个一维数组输入程序自动计算其 r , 计算后 r 被保存至 1 个 2×2 的系数矩阵中, 其中第 1 行、第 2 列元素即为 2 种方法所得沉积物图像的 r 。

将 75 组油样图像分别存于本地不同根目录下, 使用 python 自动获取图像列表, 经图像匹配、预处理、相关性分析后, 用 Excel 软件导出分析报告, 其 r 统计结果如图 5 所示。由图 5 可知, 绝大多数样本 r 集中在 $0.4 \sim 0.8$, 其均值为 0.48 ± 0.17 , 有 87% 的样品表现出中等及以上相关性。总体而言, 使用多通道快速模拟检测法可以很好地对汽油清净性作出判断, 且此方法评价结果与快速模拟检测法具有较好的相关性, 但实际应用中若使用称重法评估仍需进一步确定多通道快速模拟检测法的限值。

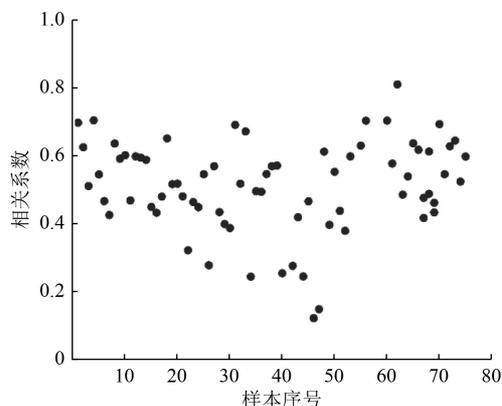


图 5 分别基于多通道快速模拟检测法与快速模拟检测法所得 75 组沉积板样品相关系数统计

Fig.5 Correlation coefficient statistics of 75 sets of deposit plate sample plot detected by MCRSD and RSD methods

第 46、47 号样品使用快速模拟检测法得到沉积板在使用正庚烷溶剂清洗后沉积物较少, 所以运算后得出的相关性较弱, 有可能是在沉积板在制作过程中人为操作不当导致。具体比较第 46、47 号样品发现沉积板表面光洁度不一样, 这 2 组样品的相关性差异可能由于沉积板打磨不一致造成。因此, 在试验前应做好沉积物收集器的准备工作, 即先将沉积板用水砂纸蘸水打磨后使用百洁布蘸水和清洗剂沿着板面的长度方向打磨, 直到板面光亮无污, 再用新的百洁布沿着板面长度方向在流动水中打磨并洗干净, 保证工作面光洁度一致。

根据多通道快速模拟检测法以及实际检测经验, 给出具体检测方案: 1) 测试前严格按照操作流程准备沉积板, 保证光洁度符合要求; 2) 在环保工作人员的监督下到加油站抽取 1 L 待检汽油样品(小样);

3) 采用多通道快速模拟检测法对汽油样品进行现场快速模拟检测; 4) 如现场模拟检测结果判断不合格, 则立刻在同一加油枪再抽取 350 L 汽油样品(大样), 并从中取出 60 mL 汽油样品, 再进行一次多通道快速模拟检测; 5) 对 2 次现场快速模拟检测结果进行比对, 如结果差异较大, 则应将样品带回实验室检测; 6) 样品回到实验室后, 先对抽取的汽油小样及大样进行快速模拟检测, 若同样判定大样不合格, 再对其进行 M111 发动机台架试验检测; 7) 出具实验室检测报告。

3 结论

(1) 多通道快速模拟检测法可以用来检测汽油清净性或评价汽油清净剂效果, 与快速模拟检测法相比, 其对单个油样检测总耗时降低 77.8%, 对多个油样检测总耗时降低 94.4%, 耗油量减少约 80%, 成本降低约 90%, 极大提升了监管部门对市售汽油清净性的检测效率。

(2) 多通道快速模拟检测法与快速模拟检测法有着较好的相关性, 对 75 个样品分别使用 2 种不同方法进行检测, 最终样本皮尔逊相关系数为 0.48 ± 0.17 。

参考文献

- [1] 化工名词审定委员会. 化工名词(一) 石油炼制·煤制油及天然气·生物质制油[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 吕玲玲, 胡京南, 何立强, 等. 汽油车技术发展对尾气排放影响研究进展[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 286-293.
LÜ L L, HU J N, HE L Q, et al. Research progress on impact of gasoline vehicles technology development on exhaust emission[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(2): 286-293.
- [3] 交通管理局. 2021年全国机动车保有量达3.95亿 新能源汽车同比增59.25%[EB/OL]. (2022-01-11)[2022-07-02]. <https://app.mps.gov.cn/gdnps/pc/content.jsp?id=8322369>.
- [4] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2021)[EB/OL]. (2021-09-10)[2022-07-02]. http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjl/202109/t20210910_920787.shtml.
- [5] 鲍晓峰. 强化机动车污染防治 促进大气灰霾治理[J]. 环境保护, 2014, 42(24): 20-22.
BAO X F. Enhancing vehicle emission control and promoting haze pollution mitigation[J]. Environmental Protection, 2014, 42(24): 20-22.
- [6] 田高友, 熊春华, 张德民. 进气阀沉积物模拟试验方法应用研究[J]. 车用发动机, 2007(2): 89-92.
TIAN G Y, XIONG C H, ZHANG D M. Study on application of intake valve deposits simulation tests[J]. Vehicle Engine, 2007(2): 89-92.

- [7] ZHANG W B, ZHANG Z, MA X, et al. Impact of injector tip deposits on gasoline direct injection engine combustion, fuel economy and emissions[J]. *Applied Energy*, 2020, 262: 114538.
- [8] AWAD O, XIAO M, KAMIL M, et al. A review of the effects of gasoline detergent additives on the formation of combustion chamber deposits of gasoline direct injection engines[J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2021, 14(1): 13-25.
- [9] ERSHOV M A, SAVELENKO V D, MAKHOVA U A, et al. New insights on introducing modern multifunctional additives into motor gasoline[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 152034.
- [10] 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.
- [11] MAGARIL E, MAGARIL R. Improving the environmental and performance characteristics of vehicles by introducing the surfactant additive into gasoline[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23(17): 17049-17057.
- [12] 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.
- [13] JIN B Q, WANG M L, ZHU R C, et al. Evaluation of additives used in gasoline vehicles in China: fuel economy, regulated gaseous pollutants and volatile organic compounds based on both chassis dynamometer and on-road tests[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, 23(7): 1967-1979.
- [14] YUE X, WU Y, HUANG X J, et al. Impact of gasoline engine deposits on light duty vehicle emissions: in-use case study in Beijing, China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, 6(5): 717-724.
- [15] 董红霞, 刘玉峰, 张春光. 汽油清净剂对发动机性能的影响[J]. *石油化工应用*, 2021, 40(11): 117-120.
DONG H X, LIU Y F, ZHANG C G. Influence of gasoline detergent on engine performance[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2021, 40(11): 117-120.
- [16] 岳欣. 汽油清净性检测技术开发与清净性改善的减排潜力研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [17] 张志颖. 汽油清净剂的研究与应用[J]. *交通节能与环保*, 2010, 6(1): 42-44.
- [18] da SILVA M P F, BRITO L R E, HONORATO F A, et al. Classification of gasoline as with or without dispersant and detergent additives using infrared spectroscopy and multivariate classification[J]. *Fuel*, 2014, 116: 151-157.
- [19] RODRIGUES E B L, da SILVA M P F, ROHWEDDER J J R, et al. Determination of detergent and dispersant additives in gasoline by ring-oven and near infrared hyperspectral imaging[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, 863: 9-19.
- [20] American Society for Testing and Materials. Standard test method for dynamometer evaluation of unleaded spark-ignition engine fuel for intake valve deposit formation: ASTM D6201[S]. American Society for Testing and Materials, 2003.
- [21] 交通部. 评价汽油清净剂使用效果的试验方法 第5部分: 汽油清净剂对汽油机进气阀和燃烧室沉积物生成倾向影响的发动机台架试验方法: GB/T 19230.5—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [22] The Coordinating European Council for the Development of Performance Tests for Fuels, Lubricants and Other Fluids. Deposit forming tendency on intake valves: CEC F-20-98[S]. The Coordinating European Council for the Development of Performance Tests for Fuels, Lubricants and Other Fluids, 1998.
- [23] 中国石油化工集团公司. 评价汽油清净剂使用效果的试验方法 第6部分: 汽油清净剂对汽油机进气阀和燃烧室沉积物生成倾向影响的发动机台架试验方法 (M111法): GB/T 19230.6—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [24] MARTIN D P, UNSWORTH J F. The M111 engine CCD and emissions test: is it relevant to real-world vehicle data[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2002.
- [25] The Coordinating European Council for the Development of Performance Tests for Fuels, Lubricants and Other Fluids. Inlet valve cleanliness in the MB M102 E engine: CEC F-05-93[S]. The Coordinating European Council for the Development of Performance Tests for Fuels, Lubricants and Other Fluids, 1993.
- [26] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 汽油清净性评价 汽油机进气阀沉积物模拟试验法: GB/T 37322—2019[S]. 北京: 中国质检出版社, 2019.
- [27] 鲍晓峰, 张德民, 李荣, 等. 汽油清净性快速检测方法和设备: CN101666759A[P]. 2010-03-10.
- [28] PRION S, HAERLING K A. Making sense of methods and measurement: Pearson product-moment correlation coefficient[J]. *Clinical Simulation in Nursing*, 2014, 10(11): 587-588. □