

清洁剂选型与复配对喷油器积碳影响的试验研究

黄镠,程莹东,王金龙,肖进*

上海交通大学 新能源动力研究所,上海 200240

摘要:为研究不同清洁剂对积碳生成的影响规律,选取市场上常见的聚醚胺、聚异丁烯胺各3种清洁剂试样在金属片积碳试验台架上进行试验,研究清洁剂种类及其质量分数和温度对汽油积碳的影响,并在喷油器积碳生成台架上测试喷油量。结果表明:聚醚胺在温度为120~150℃时,清洁效果良好,在160~200℃时没有清洁效果;聚异丁烯胺在120~200℃具有一定的清洁效果,在120~150℃清洁效果不如聚醚胺;汽油中聚醚胺的质量分数对积碳的清洁效果影响较大,其质量分数为0.02%时清洁效果最佳;汽油中聚异丁烯胺的质量分数对清洁效果的影响相对较小,其质量分数为0.01%时清洁效果最佳;按照聚醚胺与聚异丁烯胺质量比为1:2进行复配的清洁剂具有良好的清洁效果。汽油中复配清洁剂的质量分数为0.02%、温度为160℃时喷油器积碳生成试验结果表明:复配清洁剂汽油积碳生成后喷油量比积碳生成之前下降5.86%,聚醚胺汽油、聚异丁烯胺汽油、基础油对应的下降率分别是6.45%、5.13%、8.76%。

关键词:积碳;聚醚胺;聚异丁烯胺;复配

中图分类号:TE624.8

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)02-0061-06

引用格式:黄镠,程莹东,王金龙,等.清洁剂选型与复配对喷油器积碳影响的试验研究[J].内燃机与动力装置,2022,39(2):61-66.

HUANG Tan, CHENG Yingdong, WANG Jinlong, et al. Experimental study on the influence of selection and combination of cleaning agent on the carbon deposit of the fuel injector[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(2): 61-66.

0 引言

在能源、环境问题日益凸显及双碳战略目标的背景下,解决尾气排放和降低能耗是当务之急,汽油缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)发动机凭借其经济性、动力性、排放性等优势受到了众多汽车制造商的青睐^[1]。由于GDI发动机的喷油器直接暴露在燃烧室内,工作环境恶劣,喷油器喷嘴处极易产生大量积碳,喷孔处积碳厚度为6 μm时喷油量降低26%^[2]。积碳能够降低喷油器流量、改变喷雾锥角、缩短喷油持续期,从而导致燃烧恶化,排放性能变差,严重影响GDI发动机的性能^[3-4]。

发动机喷油器积碳的生成过程是复杂的物理化学过程,与多种因素有关^[5]。目前国内外对喷油器积碳的研究主要集中在燃油组分以及积碳形成机理方面,对于抑制积碳生成的有效途径研究较少。研究表明,添加汽油清洁剂能够有效抑制发动机喷油器内部积碳生成,同时也是维持发动机动力性、经济性以及排放性的有效方法^[6-7]。国内除北京地区之外的其他地方没有强制要求添加汽油清洁剂,因此国内对汽油清洁剂的研究起步较晚。由于对市场上各种清洁剂认识不足,对于使用方法和添加浓度也是众说纷纭^[8]。

收稿日期:2021-11-21

基金项目:上海市科技创新计划项目(19511108500)

第一作者简介:黄镠(1994—),男,江西宜春人,硕士研究生,主要研究方向为缸内直喷发动机积碳,E-mail:huangtan@sjtu.edu.cn。

* **通信作者简介:**肖进(1973—),男,湖南安化人,工学博士,副教授,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制、自由活塞式内燃机直线发电混合动力系统、无人机动力系统,E-mail:xiaojin@sjtu.edu.cn。

目前大多数的清洁剂测试试验都是在发动机台架上进行^[9],积碳生成是长期缓慢的过程,需要花费大量的时间;而且影响积碳生成的因素很多,难以准确判断某个具体因素的影响。本文中搭建金属片积碳试验台架研究3家公司生产的聚醚胺和3家公司生产的聚异丁烯胺的质量分数、温度对积碳生成的影响,并且将不同清洁剂进行复配,在喷油器台架上测试喷油量,研究不同清洁剂对积碳生成的影响规律。

1 试验装置及方案

1.1 金属片积碳试验台架

金属片积碳试验台架主要由高温炉、比例积分微分(proportional integral derivative, PID)温度控制系统以及注射系统3部分组成,如图1所示。高温炉采用镍铬合金电热丝,最大加热功率为2 kW,最高使用温度为600 ℃。为使高温炉的加热丝尽可能中心对称分布,本试验选用方型炉盘结构。温度控制系统由温度传感器、继电器以及温度控制器组成。注射系统由注射泵、注射器以及长针管等组成。为了保证滴落在金属片的汽油及时流向最低位置,减少积液产生,试验设计高温炉盘与水平位置的倾角为10°。考虑到汽油在高温情况下的球型蒸发模式^[10],汽油会滚落在高温金属表面的四周,为了防止汽油飞溅到金属片外部影响试验结果,此次试验设计的金属片为圆形浅碗结构。

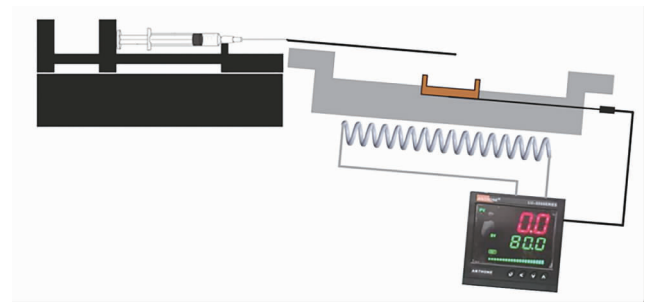


图1 金属片积碳试验台架示意图

1.2 喷油器积碳生成台架

喷油器积碳生成台架主要由喷油系统、氮气供压系统以及温度控制系统等组成。喷油系统包括某公司G10六孔非均匀GDI喷油器、NI9751型喷油器驱模块。氮气供压系统包括高压氮气瓶、储能器以及压力表。温度控制系统主要由12片正温度系数陶瓷加热片、PID控制器以及K型热电偶组成。喷油器积碳生成试验台架如图2所示。

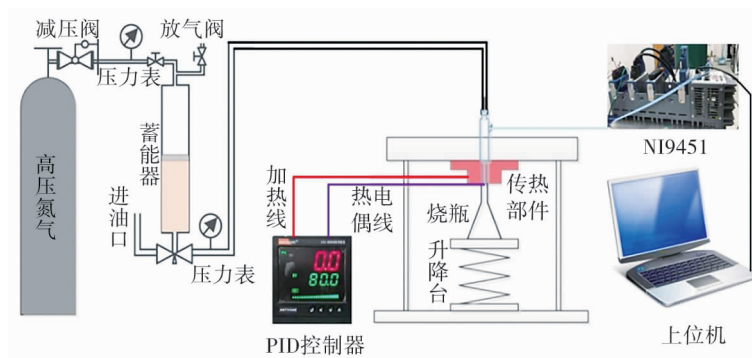


图2 喷油器积碳生成试验台架示意图

1.3 试验方案

市场采购了3种常见的聚醚胺原液,分别记为E1、E2、E3,3种常见的聚异丁烯胺原液,分别记为E4、E5、E6,各清洁剂的主要成分、纯度及外观如表1所示。

采用正交法进行试验,测试清洁剂质量分数分别为0.01%、0.02%、0.05%的汽油在120~200 ℃(每间隔10 ℃)^[11]时的积碳生成情况;最后选取1种聚醚胺和1种聚异丁烯胺按不同比例复配进行对比试验。为保证试验的可靠性,尽量保持在恒温、恒湿环境中进行试验,本次试验环境温度为26~30 ℃,相对湿度为40%~60%,最后对复配好的清洁剂在积碳生成台架上进行喷油量测试。积碳生成程序参考文献[12-13],由44个循环组成,每个循环的时间为1 h。设定喷嘴温度为160 ℃,喷油周期为150 ms,每次

喷射 100 次,喷射完毕之后保温至下一次喷射。积碳生成前、后使用正庚烷进行流量测试^[14]。

表 1 清洁剂的主要成分、纯度及外观

清洁剂	主要成分	纯度/%	外观	清洁剂	主要成分	纯度/%	外观
E1	聚醚胺	—	黄色粘稠液体	E4	聚异丁烯胺	—	红色透明液体
E2	聚醚胺	99.99	无色透明液体	E5	聚异丁烯胺	99.99	深褐色粘稠液体
E3	聚醚胺	98.60	棕色粘稠液体	E6	聚异丁烯胺	—	无色透明液体

注:—表示未知。

2 试验结果分析

2.1 金属片积碳试验

在金属片积碳试验台架上开展清洁剂类型、质量分数以及温度对积碳的影响测试,结果如图 3 所示。

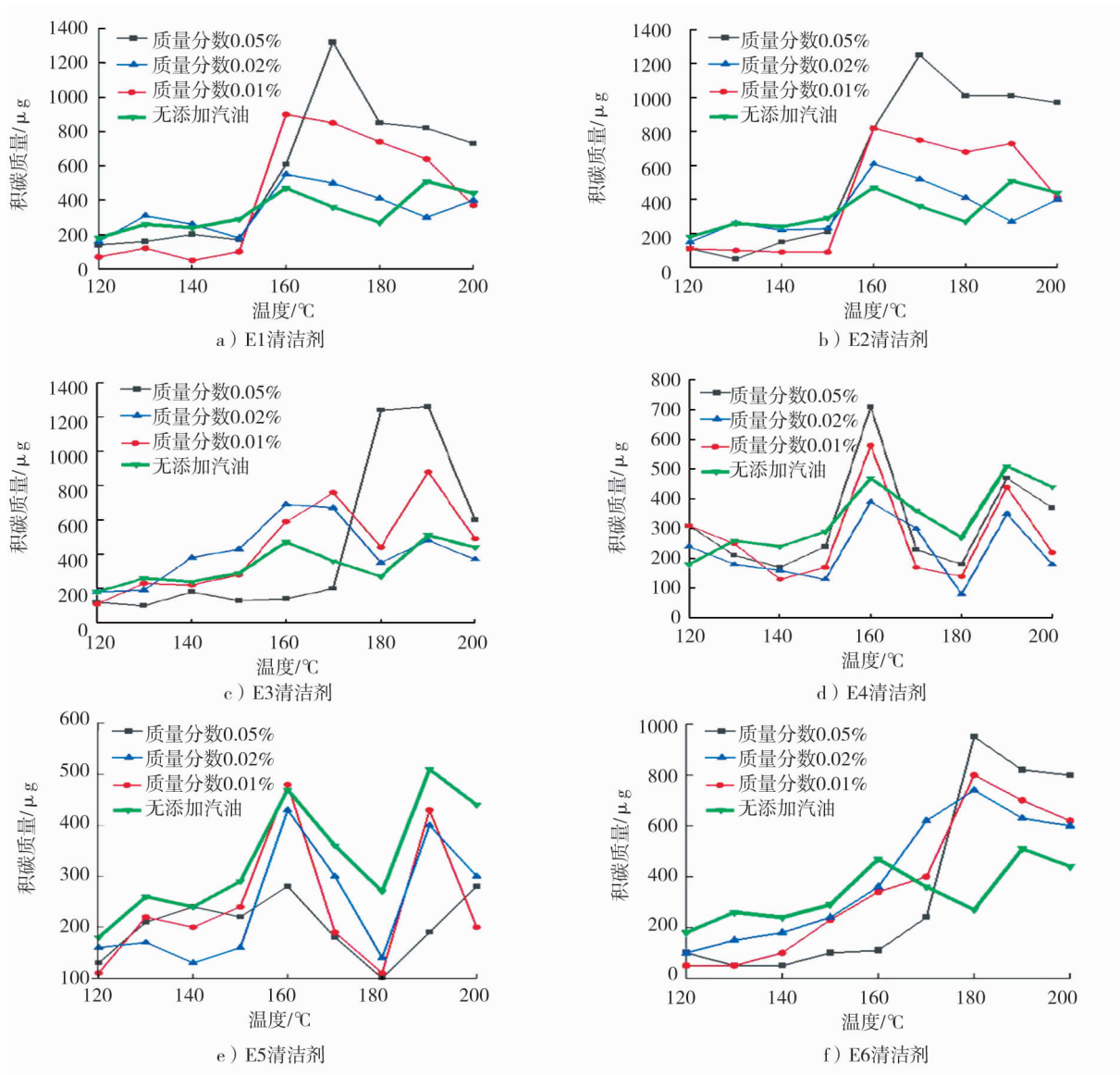


图 3 清洁剂类型、质量分数以及温度对积碳的影响

由图 3a)可知:温度为 120~150 °C 时,E1 均有一定的清洁效果,且 E1 的质量分数为 0.02%时清洁效

果最佳;当温度由 150 °C 升高到 160 °C,积碳质量开始急剧增加,随着温度的进一步升高,积碳质量开始减少;E1 汽油(清洁剂为 E1 的汽油,下同)的平均积碳质量大于无添加汽油,且汽油中 E1 质量分数越大,积碳质量越大,清洁效果越差。综上结果分析,汽油中 E1 的质量分数为 0.02%、温度为 120~150 °C 时,清洁效果较好。

由图 3b)可知:E2 的清洁效果整体与 E1 类似,当温度为 120~150 °C 时,E2 清洁效果均较好,E2 质量分数为 0.02% 时清洁效果最好;当温度为 160 °C 时,积碳质量显著增加,且 E2 质量分数不同的汽油积碳都明显高于无添加汽油;随着温度进一步升高,积碳质量先上升后下降,且汽油中 E2 质量分数越大产生的积碳越多。综上,E2 整体清洁效果不佳,建议在 E2 质量分数为 0.02%、低温(120~150 °C)时使用。

由图 3c)可知:E3 的清洁效果受质量分数影响比较大,汽油中 E3 的质量分数为 0.01%、0.02% 时基本没有清洁效果,温度为 160~200 °C 时,E3 汽油的积碳质量明显高于无添加汽油;E3 质量分数为 0.05%、温度为 120~170 °C 时具有一定的清洁效果,温度继续升高时 E3 汽油的积碳质量显著增加,且 E3 的质量分数越大积碳量越多。综上,E3 质量分数为 0.05%、温度为 120~170 °C 时的清洁效果较好。

由图 3d)可知:E4 的总体清洁效果不佳,温度为 130~150 °C 时 E4 清洁效果较明显,当温度为 160 °C 时,E4 汽油的积碳质量显著增加且达到峰值;当温度为 170~200 °C 时,E4 能够减少积碳产生;E4 质量分数对积碳的影响总体呈现出汽油中 E4 的质量分数越高积碳越多的趋势;E4 质量分数为 0.01% 时清洁效果较好。综上,使用时,应适当降低汽油中 E4 的质量分数。

由图 3e)可知:不同质量分数的 E5 均有一定的清洁效果,温度较高时 E5 的清洁效果更明显;温度为 120~160 °C 时,不同质量分数的 E5 清洁效果差异明显且变化幅度比较大,汽油中 E5 质量分数为 0.01% 时清洁效果最佳;当温度超过 160 °C,E5 都有明显的清洁效果。综上,在温度较低(120~160 °C)时应适当减小汽油中 E5 的质量分数,温度较高(170~200 °C)时可以适当增大汽油中 E5 的质量分数。

由图 3f)可知:E6 为 120~160 °C 时具有明显的清洁效果,当温度超过 170 °C,E6 质量分数为 0.01%、0.02% 的汽油积碳比无添加汽油多,而 E6 质量分数为 0.05% 的汽油延迟了这一表现,在 180 °C 之后才呈现出此结果;120~170 °C 时,汽油中 E6 的质量分数越高,E6 的清洁效果越好,180~200 °C 效果越差,E6 清洁效果和聚醚胺非常类似。综上,当使用温度为 120~170 °C 时,可以适当增加汽油中 E6 的质量分数。

根据以上分析,聚醚胺表现出 2 阶段特点,温度为 120~150 °C 具有良好的清洁效果,且聚醚胺质量分数越高的汽油产生的积碳越少,清洁效果越好;温度为 160~200 °C 时,聚醚胺汽油的积碳显著增加,聚醚胺不具备清洁效果,且汽油中聚醚胺的质量分数越高积碳越多;3 个不同厂家的聚醚胺中,E2 汽油的平均积碳量最低,汽油中 E2 的质量分数为 0.02% 时的清洁效果相对更佳。聚异丁烯胺在 120~200 °C 具有一定的清洁效果;温度较低时,其清洁效果不如聚醚胺,但是温度较高时,其清洁性能高于聚醚胺,两者表现出互补的特点;3 种聚异丁烯胺的清洁效果差异较大,E5 的清洁效果较好,且汽油中 E5 质量分数为 0.01% 时清洁性能相对最优。

2.2 聚醚胺、聚异丁烯胺复配试验

根据上述试验结果,E2 和 E5 清洁性能相对最优,由于聚醚胺和聚异丁烯胺有互补特点,因此对 E2 和 E5 按照质量比分别为 2:1、1:1、1:2 进行复配,3 种清洁剂分别记为 E7、E8、E9。对各复合清洁剂质量分数均为 0.02% 的汽油进行试验,结果如图 4 所示。

由图 4 可知:E7 含有的聚醚胺质量最多,表现出聚醚胺的特点,但是其积碳峰值相对于 E2 汽油有较大降低;

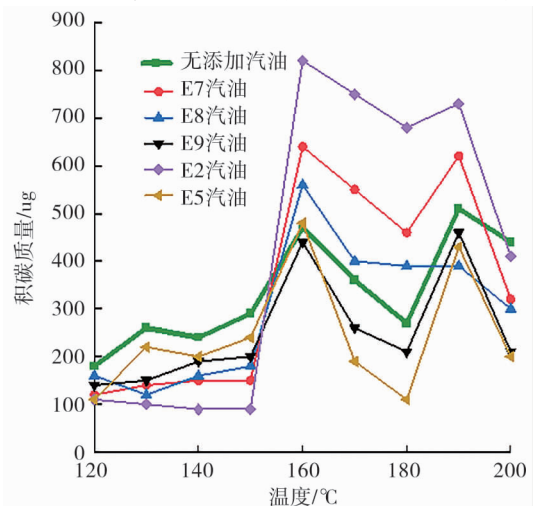


图 4 复配添加剂和温度对积碳的影响

E9 含有的聚异丁烯胺较多,120~200 ℃时清洁效果较好,120~150 ℃时 E9 汽油积碳质量少于 E5 汽油,在全部温度范围内平均积碳质量也低于 E5 汽油;E8 的清洁效果基本介于聚醚胺和聚异丁烯胺之间,但是聚醚胺的作用效果更明显,温度较高时依然产生较多积碳。

2.3 喷油器积碳生成试验

为了进一步研究各种清洁剂对喷油器积碳的影响,选取无添加汽油和清洁剂分别为 E2、E5、E9 的汽油进行喷油器积碳模拟生成试验,喷嘴温度为 160 ℃。喷油器内部积碳显著影响燃油喷射量,二者呈现负相关关系,本试验前、后用正庚烷进行喷油器流量测试,以此计量喷油器内部积碳的质量,结果如表 2 所示。

表 2 不同清洁剂对喷油量的影响

清洁剂	清洁剂质量分数/%	试验前平均喷油量/g	试验后平均喷油量/g	下降率/%
无	0	1.186 98	1.083 00	8.76
E2	0.02	1.264 62	1.183 05	6.45
E5	0.02	1.230 10	1.167 00	5.13
E9	0.02	1.224 35	1.152 61	5.86

由表 2 可知:3 种清洁剂都有一定的清洁效果,且三者之间的相对关系和金属片积碳试验结果保持一致,即在清洁剂质量分数为 0.02%、温度为 160 ℃时 E5 清洁效果最好,E2 效果最差。值得注意的是,该结果与金属片积碳试验不完全一致,质量分数为 0.02%的 E2 汽油在金属片积碳试验台架上产生的积碳比无添加汽油多,但是在喷油器积碳生成台架上其积碳量较少,分析认为可能是喷油器的高压喷射对积碳起冲刷作用,减少了汽油与喷油器的接触时间,改变了积碳生成形式。

3 结论

1)3 种聚醚胺总体上具有一致性,120~150 ℃时清洁效果良好,且汽油中清洁剂质量分数越大清洁效果越好;温度为 160~200 ℃时积碳质量显著增加,此温度下聚醚胺不具备清洁效果,且汽油中清洁剂质量分数越高,积碳质量越多,清洁效果越差;汽油中聚醚胺的质量分数对清洁效果影响较大,推荐使用聚醚胺质量分数为 0.02%的汽油。

2)3 种聚异丁烯胺的清洁效果差别较大,温度为 120~200 ℃时均有一定的清洁效果,在 120~150 ℃时其清洁性能不如聚醚胺,160~200 ℃时清洁性能优于聚醚胺,与聚醚胺形成互补;聚异丁烯胺受质量分数的影响相对较小,推荐使用聚异丁烯胺质量分数为 0.01%的汽油。

3)汽油中清洁剂质量分数为 0.02%时,E2 和 E5 按照质量比为 1:2 进行复配形成的清洁剂在 120~200 ℃均具有较好的清洁效果。

4)喷嘴温度为 160 ℃时,E5、E9、E2 的清洁效果依次降低,E5、E9、E2 的质量分数为 0.02%的汽油和无添加汽油在积碳形成后喷嘴流量的下降率分别为 5.13%、5.86%、6.45%、8.76%。

参考文献:

- [1] SHUAI S J, MA X, LI Y F, et al. Recent progress in automotive gasoline direct injection engine technology[J]. Automotive Innovation, 2018(1):95-113.
- [2] 裴毅强,陈皓,秦静,等.发动机喷油器积碳形成模拟装置及系统:CN103225581 A[P]. 2013-07-31.
- [3] 裴毅强,王志东,周建伟,等.GDI 喷油器积碳对尾喷现象的影响[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(10):1633-1639.
- [4] WANG B,JIANG Y Z,HUTCHINS P,et al. Numerical analysis of deposit effect on nozzle flow and spray characteristics of GDI injectors[J]. Applied Energy,2017,204:1215-1224.
- [5] GUTHRIE P W. A review of fuel, intake and combustion system deposit issues relevant to 4-stroke gasoline direct fuel injection

- engines[C]//SAE 2001 World Congress. Detroit, USA;SAE International, 2001.
- [6]徐玲,任成龙,温佛钱,等. 中红外光谱法快速鉴别车用汽油清净剂的清净性能[J]. 广东化工,2017,44(13):106-107.
- [7]XU H M, WANG C M, MA X, et al. Fuel injector deposits in direct-injection spark-ignition engines[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2015, 50:63-80.
- [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 Int. J. Fuels Lubr,2021,14(1):13-25.
- [9]张浩,岳珊珊,宋应金,等. 清净剂对缸内直喷发动机积碳的影响[J]. 化学与粘合,2019,41(6):443-446.
- [10]SONG H Y, XIAO J, YANG X P, et al. The effects of surface temperature on the deposit behaviors of gasoline on a hot surface[J]. Fuel,2018,215:111-122.
- [11]KATASHIBA H, HONDA T, KAWAMOTO M, et al. Improvement of center injection spray guided DISI performance[C]//SAE World Congress & Exhibition. Detroit, USA;SAE International, 2006.
- [12]American Society of Testing Materials. Standard test method for evaluating unleaded automotive spark-ignition engine fuel for electronic port fuel injector fouling: ASTM D6421—99a(2014)[S]. West Conshohocken, USA; ASTM International, 2014.
- [13]SONG H Y, XIAO J, CHEN Y Y, et al. The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector[J]. Fuel, 2016,180:506-513.
- [14]周子涵,王金龙,程莹东,等. 基于金属片积碳试验的汽油清洁剂性能测试[J]. 内燃机与动力装置,2021,38(1):49-56.

Experimental study the influence of selection and combination of cleaning agent on the carbon deposit of the fuel injector

HUANG Tan, CHENG Yingdong, WANG Jinlong, XIAO Jin *

Institute of Advanced Energy and Powertrain Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: In order to study the influence of different detergents on the formation of carbon deposits, three common detergent samples of polyether amine and polyisobutylene amine on the market are selected to test on the metal sheet carbon deposit test bench, and the types and the influence of mass fraction and temperature on gasoline carbon deposit are studied. The fuel injection flow rate is tested on the injector carbon deposit generation bench. The results show that polyether amine has a good cleaning effect at 120~150 °C, but does not have a cleaning effect at 160~200 °C; polyisobutylene amine has a certain cleaning effect at 120~200 °C, the cleaning effect is not as good as polyether amine at 120~150 °C. The mass fraction of polyether amine in gasoline has a great influence on the cleaning effect of carbon deposition, the best mass fraction is 0.02%. The mass fraction of polyisobutylene amine in gasoline is relatively less affected by the mass fraction, and the best fraction is 0.01%. According to the mass ratio of polyether amine and polyisobutylene amine of 1:2, the compounded cleaner can produce good cleaning effect; the compounded cleaner is tested at 0.02% by mass and 160 °C. After the formation of carbon deposits, the fuel injection volume decreases by 5.86% compared with that before the formation of carbon deposits. The corresponding reduction rates of polyether amine, polyisobutylene amine, and base oil are 6.45%, 5.13%, and 8.76%, respectively.

Keywords: carbon deposition; polyether amine; polyisobutylene amine; compound

(责任编辑:刘丽君)