

汽油添加剂对发动机燃烧和排放特性的影响

霍金禄¹, 李晓华², 张 铎², 秦英强², 张 猛², 韩 东^{1,*}

(1. 上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 山东海科控股有限公司, 山东 东营 257061)

摘要:随着汽车排放法规的逐渐严格, 高效和清洁成为了发动机燃烧技术和燃料技术的发展目标。汽油添加剂可以增强燃油的使用性能, 有助于提升发动机的燃烧效率和控制排放。本文以汽油添加剂中的清净剂、减摩剂、助燃剂为关注点, 围绕上述汽油添加剂对发动机燃烧和排放的影响进行了综述。研究表明, 汽油清净剂通过清除和抑制发动机积碳, 减少了一氧化碳(CO)、碳氢(HC)和颗粒物(PM)的排放, 改善了燃油经济性; 清净剂的添加浓度存在最佳值, 过低或者过高的添加浓度并不能有效控制发动机积碳。助燃剂促使汽油燃烧更迅速、更完全, 使得污染物排放降低, 发动机动力性提升; 汽油减摩剂会在活塞环与气缸之间形成液膜, 减小发动机运动部件之间的摩擦损失, 使得发动机的燃油经济性得到小幅提升。

关键词:汽油添加剂; 排放特性; 发动机沉积物; 燃油经济性

中图分类号: X701

文献标识码: A

Effects of gasoline additives on engine combustion and emissions characteristics

HUO Jinlu¹, LI Xiaohua², ZHANG Duo², QIN Yingqiang², ZHANG Meng², HAN Dong^{1,*}

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shandong Haike Holding Ltd., Dongying 257061, China)

Abstract: With stringent vehicle emissions regulations, high efficiency and cleanliness have become the development target of engine combustion and fuel technology. The gasoline additives could enhance fuel performance and thus contribute to engine combustion efficiency improvement and emissions control. In this study, the influences of gasoline detergent, friction modifier, and combustion improver on engine combustion and emissions are reviewed. Literature studies have shown that the gasoline detergent reduces carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), and particulate matter (PM) emissions, and improves fuel economy by removing engine deposits and inhibiting their formation. There is an optimal concentration of gasoline detergent, which means that gasoline detergent with too low or too high concentration cannot effectively remove engine deposits. Combustion improvers contribute to faster and more complete fuel combustion, resulting in reduced pollutant emissions and increased engine power output. With the addition of friction modifiers, a liquid film is formed between the piston and the cylinder, which reduces friction losses between the engine moving parts, resulting in a small improvement in engine fuel economy.

Keywords: Gasoline additives; Emission characteristics; Engine deposits; Fuel economy

0 引 言

汽车大规模应用导致的环境问题得到了越来越

越多的关注, 满足当下以及未来的排放法规要求成为推动汽车发动机和燃料技术不断发展的动力之一。以往的研究表明^[1-4], 燃油品质和特性对汽

收稿日期: 2022-11-06

基金项目: 上海市科技创新行动计划国际合作项目(19160745400)

第一作者: 霍金禄(1999—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为发动机燃烧与排放控制技术。E-mail: jlhujlu@sjtu.edu.cn

通讯作者: 韩东(1982—), 男, 浙江东阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为燃料与发动机的相互作用。E-mail: dong_han@sjtu.edu.cn

车发动机的燃烧和排放表现有着重要影响。因此,除了对发动机结构和运行策略的优化以外,改善燃油品质也是实现发动机节能减排的重要途径。使用添加剂是改善汽油性能的有效手段,小剂量的汽油添加剂可以使基础燃料无法通过精炼获得的性能得到改善,从而提高车辆的燃油经济性,减少污染物排放。

最早被大规模使用的汽油添加剂是四乙基铅,四乙基铅通过提高汽油的辛烷值,使得汽油的抗爆性能得到提升,在早期解决了发动机的爆震问题。随着四乙基铅对人体的危害逐渐为人们所了解,四乙基铅逐渐被无铅抗爆剂,如甲基环戊二烯三羰基锰、甲基叔丁基醚、乙基叔丁基醚等所取代。先进的发动机燃烧策略和严格的排放法规对燃油品质提出了更高的要求,包括减少燃油中硫、芳烃等组分的含量,提高燃油的辛烷值、氧化稳定性、储存稳定性,以及减少燃料在发动机中的沉积物生成。因此,越来越多种类的汽油添加剂被考虑使用。目前,常用的汽油添加剂按照功能分类,可以分为抗爆剂、助燃剂、清净剂、减摩剂、金属钝化剂、抗静电剂、抗氧化剂等。本文对汽油添加剂中的清净剂、助燃剂和减摩剂在发动机中的应用研究进行了综述,对上述添加剂在发动机中的作用机制和应用效果进行了分析和讨论。

1 发动机沉积物及其控制

1.1 沉积物的形成

由于燃料燃烧不完全,燃料会在发动机内形成沉积物,即发动机积碳。根据积碳生成部位的不同,发动机积碳主要分为喷油器积碳、燃烧室积碳、进气门积碳。发动机积碳的形成受到基础燃料的组成、发动机设计及其运行条件、燃料系统的类型和设计、发动机润滑油的作用等多种因素综合作用的影响。在发动机积碳形成机理方面,一般认为沉积物在发动机内经历了燃油液滴的雾化、蒸发、燃油内胶质迁移、黏附、氧化、聚合、热分解等一系列复杂的物理和化学变化过程。发动机沉积物的生成分为引发和生长两个阶段。当燃油从喷油嘴中喷出后,会与空气混合形成可燃混合气,而混合气中的高沸点组分遇到温度较低的金属表面时会冷凝形成一种液状油膜。液状油膜具有一定的黏着力,会黏附油膜附近的颗粒状胶质,同时距离油膜较远的胶质也会在温度梯度的作用下向金属表面迁移,这个过程称为沉积物形成的

引发阶段。当颗粒状胶质附着在金属表面后,就会发生高温氧化、聚合、热分解等一系列的变化过程,并由小颗粒变成大颗粒,这被称为沉积物形成的生长阶段^[1-3]。

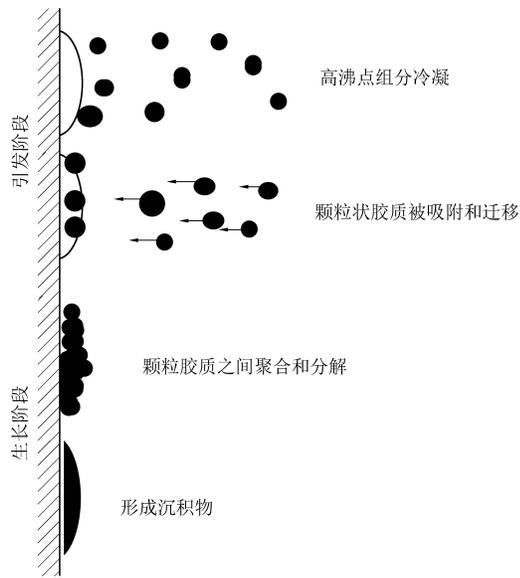


图1 沉积物在金属表面的形成过程^[2]

Fig. 1 The formation of carbon deposits on metal surfaces^[2]

1.2 汽油清净剂作用机制

汽油清净添加剂是一种复合型添加剂,具有清净、分散、抗氧、防锈等功能,属于表面活性物质,一般由主剂、溶剂和载体油组成,起主导作用的是其中的主剂。如图2所示,汽油清净剂的分子结构通常由极性基、油性基和连接部分构成。极性基团一般为羟基、羧基、酯基、氨基等含氧或含氮基团,油性基团一般为长链烷基或聚合物链^[1]。

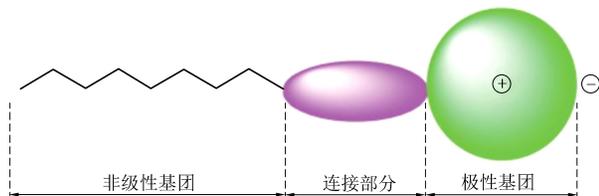


图2 典型的汽油清净剂分子结构示意图^[1]

Fig. 2 Schematic diagram of molecular structure of gasoline detergent^[1]

汽油清净剂的作用机制如图3所示。极性基团的主要作用一是防止燃料生成胶质;二是极性基团较沉积物会优先吸附在金属表面,形成一层分子保护膜,起到保持清洁的作用;三是极性基团通过氢键、范德华力、酸碱中和等作用紧密地结合在沉积物表面,阻止沉积物在金属表面生成和堆积,使沉积物逐渐疏松并形成小颗粒被清洗下来,

形成油溶性胶束,分散到汽油中一起燃烧,达到清洗的目的。油性基团解决了汽油清净剂在汽油中的溶解性问题,另外也通过长烷基链的空间位阻

效应或电荷相斥作用对沉积物颗粒的分散起稳定作用,抑制非油性胶质的进一步氧化和聚合,从而减少沉积物的生成^[1]。

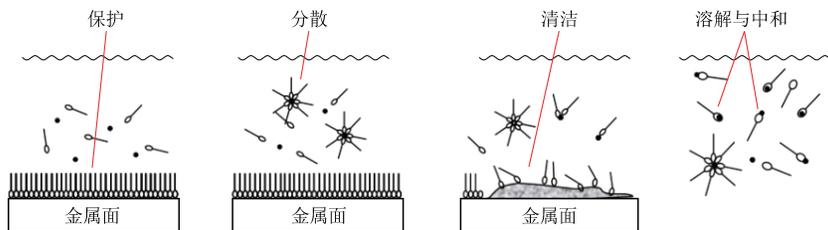


图3 汽油清净剂的作用机制^[3]

Fig. 3 The function mechanism of gasoline detergent^[3]

1.3 喷油器积碳与控制

目前,汽油发动机燃料喷射方式包括进气道喷射 (Port fuel injection; PFI) 和缸内直接喷射 (Gasoline direct injection; GDI)。GDI 发动机通常具有更高的压缩比,并且可以更加灵活地控制汽油与空气的混合,相比于 PFI 发动机有着更高的燃油经济性^[4]。然而,GDI 发动机的喷油器直接暴露在燃烧室的高温燃烧气体中,比进气道喷射方式更容易形成积碳。喷油器内的积碳不仅会限制燃油的流量,而且也会对燃料的雾化产生不利影响^[5]。与未积碳的喷油器相比,积碳喷油器会使燃油穿透速度增大、液滴平均直径提高。同时,喷油器积碳使燃料与空气混合变差,导致燃烧室出现局部富燃区,使发动机排放恶化,燃油经济性下降^[6]。因此,GDI 发动机的排放物水平对喷油器积碳十分敏感,即使少量的喷油器积碳也会使发动机颗粒物排放显著增加^[4]。

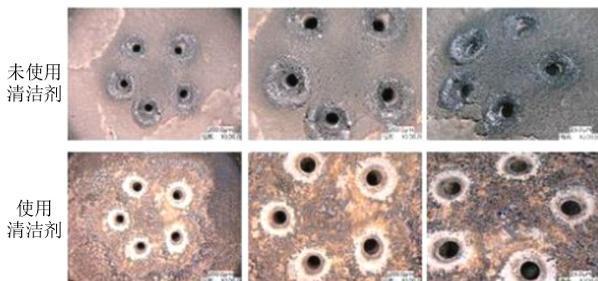


图4 结垢实验后喷油嘴图像^[6]

Fig. 4 Image of injector nozzle after fouling test^[6]

颗粒物排放增加的相关性。

值得注意的是,合适的燃油清净剂添加水平也是抑制喷油器积碳的重要影响因素^[9]。过低的燃油清净剂水平并不能有效清除喷油器积碳,反而有可能会加速积碳的形成。因为当清净剂浓度过低时,无法形成保护胶束将沉积物分解成更小更容易燃烧的颗粒。此外,由于清净剂的大分子特性,汽油清净剂本身就会成为积碳生成的来源之一。因此,高浓度的汽油清净剂未必会带来更好的积碳控制效果,说明汽油清净剂的添加水平存在最佳值。

向汽油燃料中添加燃油清净剂被认为是抑制喷油器积碳的有效方法。Zhang 等^[6-7]研究了燃油清净剂添加对 GDI 喷油器积碳的形成和颗粒物排放的影响,通过与未使用清净剂的情况相比,汽油清净剂能有效地抑制喷油器积碳的形成,特别是在喷油器出口位置,如图 4 所示。同时,颗粒排放物的数量和 NO_x 水平也随着汽油燃油清净剂的使用而显著降低。

GDI 发动机的颗粒物排放受到发动机积碳和汽油清净剂综合作用的影响。Monroe 等^[10]在没有发动机积碳影响的情况下,探究了三种不同汽油清净剂对发动机颗粒物排放的影响(图 5)。实验在一台积碳倾向非常低的发动机上进行,以尽量减小积碳对于实验结果的影响。结果表明,过低或过高的汽油清净剂添加浓度都会使发动机颗粒物排放增加。在 200~600 ppm 范围内的添加量对于减少颗粒物排放是最有利的。从图 5 中还可以看出,汽油清净剂的最佳添加量因清净剂的成分而异,应综合考虑清净剂浓度对于积碳清除和颗粒物排放的影响。

Henkel 等^[8]也开展过与 Zhang 等相似的研究,发现在发动机中使用未添加清净剂的汽油,其颗粒物的排放水平会随着发动机运行时间增加而显著增加。而当在汽油中重新添加燃油清净剂后,发动机的颗粒物排放又回到了初始水平。若在实验开始时就使用含有清净剂的燃油,则可以避免颗粒物排放的显著增加。同时,喷油器在显微镜下的观察结果证实了喷油器积碳与发动机颗

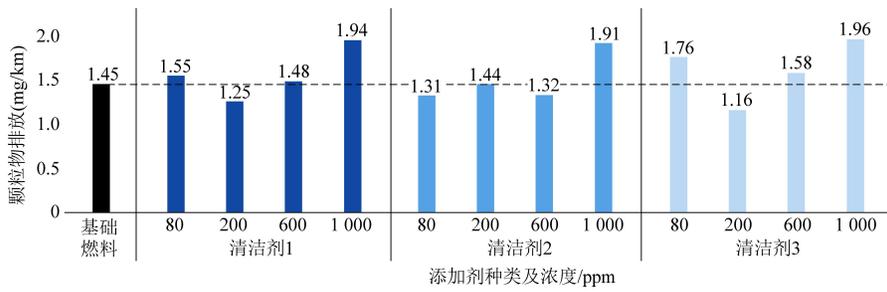


图5 燃料清净剂种类及浓度对颗粒物排放的影响^[10]

Fig. 5 Influences of fuel detergent type and concentration on particulate matter emissions^[10]

燃油清净剂的成分不同,则在处理喷油器积碳的效果上也会有较大差异。Aradi 等^[11]比较了四种聚醚胺和五种曼尼奇碱燃油清净剂在清除喷油器积碳效果上的差异。结果表明,曼尼奇碱燃油清净剂表现出了优越的清洁性能,添加曼尼奇碱清净剂将 GDI 喷油器的流动损失降低了 8% 左右。此外,燃料清净剂的效果对于不同的发动机类型也表现出了一定的差异性。针对 GDI 发动机开发的燃料清净剂可以有效控制 GDI 发动机喷油器积碳的形成。然而,针对 PFI 发动机喷油器积碳控制开发的燃油清净剂却无法有效抑制 GDI 发动机的喷油器积碳^[12]。

1.4 进气门与燃烧室积碳及其控制

进气门积碳(Intake valve deposits: IVD)会对空气与燃料的混合气进入发动机气缸形成阻碍,严重的进气门积碳会影响进气门关闭,导致压缩损失,燃烧效率降低,并进一步促进燃烧积碳的形成。从来源上看,发动机进气门积碳来自发动机机油、发动机磨损元件、未燃烧的燃料和废气污染物^[13]。

由于部分氧化和热解的燃料以及润滑油在燃烧室内沉积,所有的汽油发动机都会形成燃烧室积碳(Combustion chamber deposits: CCD)。燃烧室积碳主要分布在活塞顶部、气缸盖、火花塞和排气门上。发动机内的积碳使燃烧室体积变小,发动机压缩比增大,导致对燃料的辛烷值需求增加。燃烧室积碳还会带来发动机工作效率的降低和爆震倾向的增加^[13]。

一般来说,汽油清净剂可以减少 PFI 发动机进气门沉积物,但会在一定程度上促进燃烧室积碳形成^[14]。因为汽油清净剂含有高分子量的表面活性剂及较高沸点的载体油,在高温条件下大分子量物质可转变为沥青质,导致燃烧室积碳增加。

Ramadhas 等^[14]研究了四种不同成分的汽油清净剂对发动机进气门、燃烧室积碳和排放物水平的影响。如图 6 所示,相比于基础汽油,含有清净剂的汽油使进气门积碳减少了 80%~98%,燃烧室积碳增加 6%~22%。由于清净剂成分以及最佳添加量的不同,四种汽油清净剂在进气门积碳控制的效果上略有差异。图 7 展示了进气门积碳和燃烧室积碳对发动机 CO 和 HC 排放的影响。尽管使用清净剂 4 时发动机进气门积碳处于最低水平,但因其燃烧室积碳较高,故 CO 和 HC 排放较清净剂 3 更高。因此,汽油清净剂在减少进气门积碳的同时,不要过多地增加燃烧室积碳,对于降低发动机污染物的排放是十分重要的。此外,Zand 等^[15]也指出汽油清净剂使得汽车发动机的 CO 排放降低 30% 左右,HC 排放降低 18% 左右。Jin 等^[16]评估了 14 种市售汽油清净剂对燃油消耗和污染物排放的影响。结果表明,大多数清净剂可以实现 CO、HC、NO_x 排放的降低(图 8),并节省 0.9%~3.5% 燃油消耗。

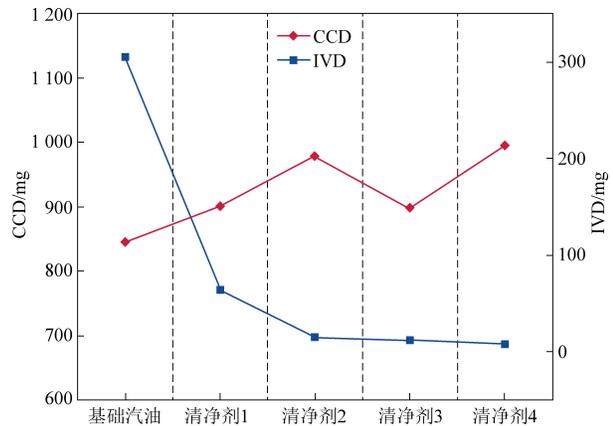


图6 不同清净剂对燃烧室和进气门积碳的影响^[14]

Fig. 6 Influences of detergent on CCD and IVD^[14]

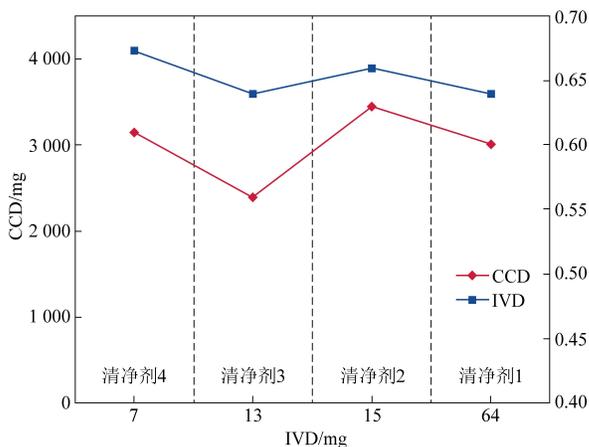


图7 使用不同清洁剂条件下进气门积碳和燃烧室积碳对CO和HC排放的影响^[14]

Fig. 7 Comparison of CO and HC emission among the detergent with respect to IVD and CCD^[14]

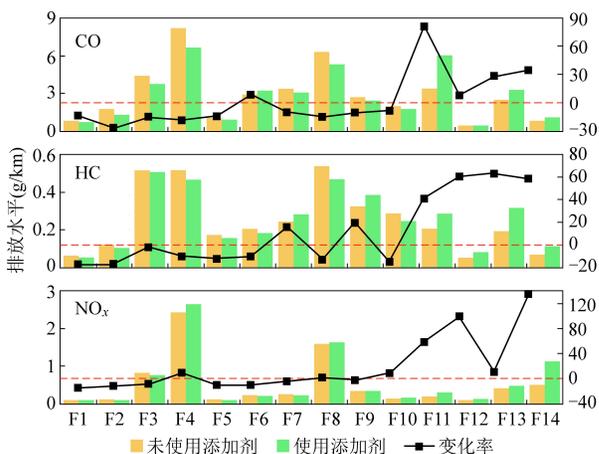
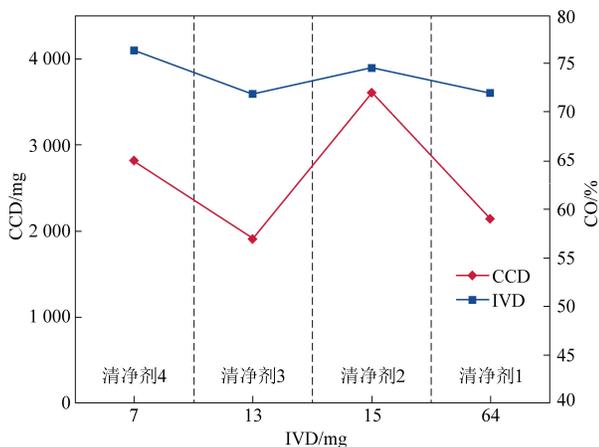


图8 14种汽油清净剂对发动机污染物排放的影响^[15]

Fig. 8 Influences of 14 gasoline detergents on engine emissions^[15]

如前所述,燃料成分会影响发动机积碳的形成。DuMont等^[17]研究了常规无铅汽油(E0)和乙醇汽油(乙醇占比85%,E85)在进气门上的积碳趋势。结果表明,E85燃料的进气门积碳水平明显高于E0燃料,以聚异丁烯胺和聚醚胺为主要成分的燃料清净剂可以清除和抑制E85燃料进气门积碳的生成。然而,燃料中乙醇含量的增加会给高浓度清净剂的溶解带来麻烦,导致传统汽油清净剂在乙醇汽油中的清洁效率并不高。为此,Stepień等^[18]针对乙醇燃料开发了专用的燃油清净剂,在没有发动机积碳存在的前提下,乙醇汽油清净剂的使用对CO、HC和颗粒物的排放没有明显影响。

1.5 汽油清净剂对发动机异常燃烧的影响

低速早燃是增压直喷汽油发动机中一种反常的燃烧现象,由燃料自燃引起。因此,燃料成分以及清净剂的使用会对这一异常燃烧过程产生影

响。汽油清净剂通过其清洁作用消除发动机喷油器积碳,减少异常热点,可以抑制早燃现象的发生。然而,清净剂作为一种重分子物质,过量的添加会促进异常热点的形成,进而可能会导致早燃的发生,这被称为清净剂的燃料效应^[19]。

Zahaeh等^[20]研究了汽油清净剂的添加对发动机低速早燃的影响。由于清净剂中包含高沸点的煤油型溶剂,添加了清净剂的汽油发生低速早燃的频率较未添加清净剂的参考汽油增加了两倍以上。Colliou等^[21]和Chapman等^[22]的实验结果也表明,在高添加浓度下,清净剂的燃料效应会使得发动机低速早燃频率趋向增加。但Colliou等^[21]也指出在实际发动机使用过程中,汽油清净剂的清洁效应可能会强于燃料效应,即燃料清净剂通过去除积碳可以在一定程度上抑制低速早燃。

2 助燃剂

在发动机工作过程中燃料难以实现完全燃烧,还有一部分的燃料能量储存在未完全燃烧产物中。燃油助燃剂可以降低壁面淬熄层的厚度,以及处于发动机缝隙内的未燃混合气量,使燃烧进行得更加完全^[23]。根据燃烧后产物的不同,一般将助燃剂分为含有金属或固体非金属氧化物的有灰型助燃剂和含有纯有机物的无灰型助燃剂两类。

MAZ助燃添加剂的主要成分是硝基甲烷等烃类硝基化合物,属于无灰型助燃剂。其90%以上组分的分子结构由R和NO₂两个官能团组成,化学反应活性较高,在燃烧过程中易产生自由基,促进链式反应,提高化学反应速率和火焰传播速度,增加每一循环中的燃烧放热量,使汽油中的化学

能释放得更完全^[23]。

华南理工大学的蔡锐彬等^[24-26]研究了 MAZ 添加剂对汽油机的燃烧和排放特性影响。结果表明,燃油添加剂 MAZ 能减少燃烧室内的未燃混合气量,同时使预混合气的燃烧更为迅速,排气中 HC、CO 排放量减少,发动机功率提高,油耗减少。北京理工大学的钟科等^[27]指出,MAZ 添加剂有着高反应活性和氧化性,可以帮助汽油快速氧化燃烧,并降低 HC 和 CO 排放水平。助燃剂的氧化助燃作用使 HC 在更高的燃烧温度下燃烧,同时也使发动机气缸的淬熄层和结焦层变薄,未燃混合气减少,从而使 HC 排放相应减少。减少的 CO 排放与汽油燃烧滞燃期缩短,燃烧温度提高,燃烧更

加充分有关。

近些年来,一些研究将纳米颗粒作为添加剂加入燃料中来促进燃料的完全燃烧和降低污染物的排放。纳米颗粒具有较高的比表面积和表面反应性,燃料在与纳米颗粒混合改性后在高温下会发生微爆,形成燃料的二次雾化,促进燃料与空气的混合^[28]。图 9 展示了 CeO₂ 纳米颗粒与燃油混合发生微爆的过程。如图 10 所示,一些金属氧化物纳米颗粒如 CeO₂ 等还具有储氧和释氧作用,在燃料氧化过程中起着氧气缓冲器的角色,为 CO 和 HC 转化为 CO₂ 提供充足的氧气,这一独特性质有助于减少污染物的排放^[29]。CeO_{2-x} 与 NO_x 发生反应,在实现 CeO₂ 再生的同时,也降低了 NO_x 的排放。

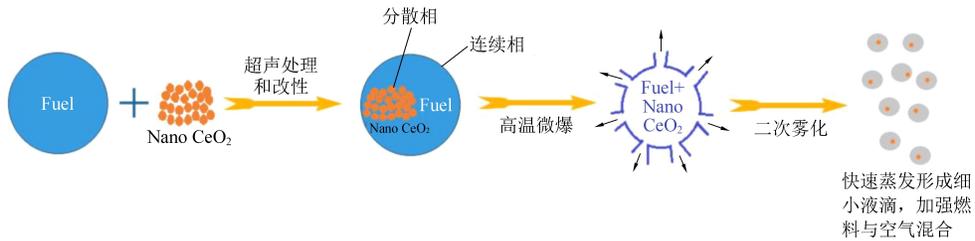


图 9 氧化铈纳米颗粒与燃油混合微爆的分步过程^[28]

Fig. 9 Micro-explosion process when cerium oxide nanoparticle blends with fuel^[28]

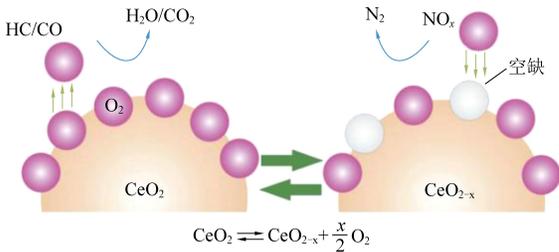


图 10 CeO₂ 颗粒促进氧化和还原反应示意图^[29]

Fig. 10 Schematic of oxidation and reduction reaction facilitated by a CeO₂ particle^[29]

Zamankhan 等^[30]研究了两种金属氧化物纳米颗粒添加剂 MgO 和 CeO₂ 对汽油发动机性能和排放的影响。在上述纳米颗粒的添加下,燃料燃烧更加完全,CO 和 HC 排放降低,发动机功率也得到了提升。Valihesari 等^[31]研究了 Fe₂O₃ 和 TiO₂ 的添加对甲醇汽油发动机动力性和排放特性的影响。纳米颗粒的添加使得汽油的粘度下降 16.7%,汽油辛烷值增加了 10% 左右,发动机的扭矩和功率也得到提升。Amirabedi 等^[32]研究了乙醇汽油中 Mn₂O₃ 的添加浓度 (0, 10 ppm, 20 ppm) 对发动机动力性的影响。结果表明,随着纳米颗粒添加浓度的增加,发动机功率增加,燃油消耗也得到降低。同时,Mn₂O₃ 也改善了乙醇添加带来的 NO_x 排

放增加问题,如图 11 所示。Manigandan 等^[33]研究了在不同废气再循环 (Exhaust gas recirculation: EGR) 率下氢气和 TiO₂ 的添加对发动机性能和排放的影响。汽油中掺氢使得火焰速度和燃烧温度提升,导致 NO_x 的排放急剧增加,而在 20% EGR 率和 TiO₂ 纳米颗粒的综合作用下,NO_x 排放降低了 62%。

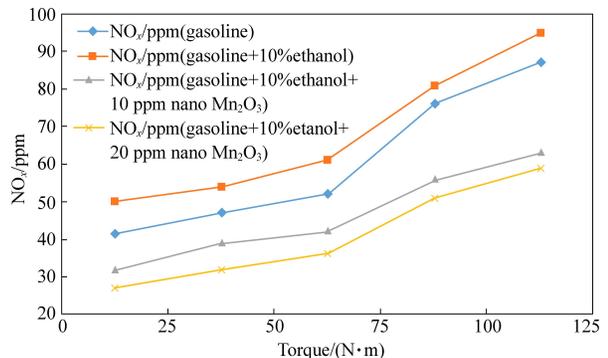


图 11 乙醇和 Mn₂O₃ 对 NO_x 排放的影响^[32]

Fig. 11 Effect of ethanol and Mn₂O₃ on NO_x emissions^[32]

3 减摩剂

发动机中的摩擦损失大部分发生在活塞环、活塞裙部与气缸之间^[34]。汽油减摩剂通过减少发动机活塞与气缸之间的摩擦损失,提升燃油经

济性,其作用机制如图 12 所示。汽油减摩剂一般是由带有极性基团的长链碳氢化合物组成,随燃油喷雾或者可燃混合气到达发动机气缸,通过头部的极性基团吸附在发动机金属表面,形成吸附层保护膜。在活塞运动时,吸附层会随着金属面滑移,从而减弱金属表面之间的直接接触并保持较低的摩擦系数^[35]。

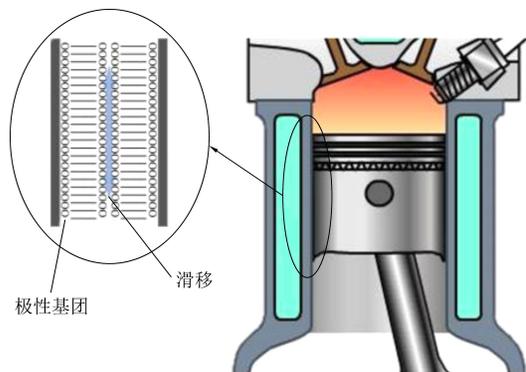


图 12 汽油减摩剂的作用机制^[32]

Fig. 12 The function mechanism of friction modifiers^[32]

Remmert 等^[35]采用车队试验的方法,量化了乘用车在新欧洲驾驶循环(New European Driving Cycle; NEDC)下的燃油消耗,如图 13 所示。

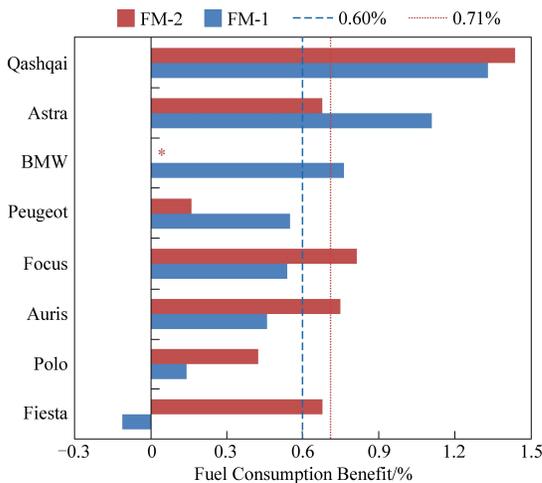


图 13 NEDC 测试循环下两种减摩剂带来的燃油经济性收益^[35]

Fig. 13 Fuel economy benefits of two friction modifiers under NEDC^[35]

结果表明,两种不同减摩剂的使用使得不同车型的平均燃油经济性分别提高了 0.60% 和 0.71%。同时,他们也证实了汽油中的减摩剂最终转移到了油底壳中。Pilla 等人^[36]采用激光诱导荧光法,在高温高压的定容喷雾装置中表征壁面上减摩剂的存在。结果表明,当减摩剂的浓度超过 100 ppm 时,减摩剂随燃油喷雾到达气缸壁面

并形成液体膜,证明了汽油减摩剂使用的有效性。Yow 等^[37]在底盘测功机上开发了一套高精度的测试方法,去评估汽油减摩剂使用前后的燃油经济性。测试结果表明汽油减摩剂可以使车辆燃油经济性提高不到 1%。

4 发展与展望

汽油清净剂可以改善汽油的燃烧性能,提高燃油经济性,减少污染物排放。清净剂可以抑制喷油器和进气门上积碳的形成,从而减少 PM、CO 和 HC 的排放。汽油清净剂会在一定程度上增加燃烧室积碳,汽油清净剂与燃烧室积碳形成之间的关系,以及这种关系对发动机污染物排放的影响仍值得更加深入的研究。汽油清净剂的作用效果除了受到添加浓度的影响外,还受到燃料成分的影响,关于燃料成分对汽油清净剂积碳控制的影响需进一步研究。燃料中的重分子组分是影响增压直喷汽油机低速早燃的一个重要因素。过去的许多研究主要关注燃料本身的大分子碳氢化合物对发动机低速早燃的影响,而较少研究汽油清净剂的影响。因此,有必要开展汽油清净剂的类型和添加浓度对发动机低速早燃的影响研究。

纳米颗粒助燃剂在提升发动机动力性、降低污染物排放方面有着巨大的潜力。今后仍需深入研究去探索不同纳米颗粒的最佳添加浓度,了解纳米颗粒助燃剂在燃烧室内的微爆行为。汽油减摩剂可以对活塞等运动部位进行润滑减摩,使发动机燃油经济性得到提升。然而,对于减摩剂的最佳添加浓度,以及作为一种大分子物质对发动机污染排放和积碳形成的影响研究较少。此外,汽油减摩剂在发动机中的迁移机制和对机油的影响仍需深入探究。

参考文献 (References):

- [1] 郑伟平,赵杰,陶志平,等. 汽油清净剂的发展历程与展望[J]. 石油化工, 2021, 50(11):1214-1221.
ZHEGN Weiping, ZHAO Jie, TAO Zhiping, et al. Development process and prospect of gasoline detergent [J]. Petrochemical Technology, 2021, 50(11):1214-1221.
- [2] 卢翔,司徒粤,谢德龙,等. 汽油发动机积炭的形成、清除机理及汽油清净剂的研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(5):1018-1022.
LU Xiang, SITU Yue, XIE Delong, et al. Mechanisms of carbon deposit formation and removing in internal gasoline engines and research progress of gasoline detergent additives [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(5):1018-1022.

- [3] Wang C, Xu H, Herreros JM, et al. Impact of fuel and injection system on particle emissions from a GDI engine [J]. *Applied Energy*, 2014, 132:178–191.
- [4] 帅石金,董哲林,郑荣,等.车用汽油机颗粒物生成机理及排放特性研究进展[J]. *内燃机学报*, 2016, 34(2):105–116. SHUAI Shijin, DONG Zhelin, ZHENG Rong, et al. Review of formation mechanism and emission characteristics of particulate matter from automotive gasoline engines [J]. *Transactions of Csice*, 2016, 34(2):105–116.
- [5] Song H, Xiao J, Chen Y, et al. The effects of deposits on spray behaviors of a gasoline direct injector [J]. *Fuel*, 2016, 180:506–513.
- [6] Zhang W, Ma X, Xinhui L, et al. Impact of fuel properties on GDI injector deposit formation and particulate matter emissions [J]. *SAE Technical Paper*, 2020:2020-01-0388.
- [7] Zhang W, Shuai S, Zheng B, et al. Effect of fuel detergent on injector deposit formation and engine emissions in a gasoline direct injection (GDI) engine [J]. *SAE Technical Paper*, 2017:2017-01-2247.
- [8] Henkel S, Hardalupas Y, Taylor A, et al. Injector fouling and its impact on engine emissions and spray characteristics in gasoline direct injection engines [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2017, 10(2):287–295.
- [9] Miura Y, Miyahara K, Sasaki S, et al. Development of a gasoline direct injector fouling test and its application to study of keep-clean performance at different additive treat rates [J]. *SAE Technical Paper*, 2016:2016-01-2248.
- [10] Monroe R, Studzinski W, Parsons JL, et al. Engine particulate emissions as a function of gasoline deposit control additive [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2021, 14(1):3–11.
- [11] Aradi AA, Colucci WJ, Scull HM, et al. A study of fuel additives for direct injection gasoline (DIG) injector deposit control [J]. *SAE Technical Paper*, 2000:2000-01-2020.
- [12] Smith SS, Imoehl W. Measurement and control of fuel injector deposits in direct injection gasoline vehicles [J]. *SAE Technical Paper*, 2013:2013-01-2616.
- [13] Guinther G, Smith S. Formation of intake valve deposits in gasoline direct injection engines [J]. *SAE International journal of fuels and lubricants*, 2016, 9(3):558–566.
- [14] Ramadhas A, Singh V, Subramanian M, et al. Impact of fuel additives on intake valve deposits, combustion chamber deposits and emissions [J]. *SAE Technical Paper*, 2011:2011-01-1980.
- [15] Zand AD, Mikaeili A, Pezeshk H. The influence of deposit control additives on exhaust CO and HC emissions from gasoline engines (case study: Tehran) [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2007, 12(3):189–194.
- [16] Jin B, Wang M, Zhu R, 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.
- [17] DuMont RJ, Cunningham LJ, Oliver MK, et al. Controlling induction system deposits in flexible fuel vehicles operating on E85 [J]. *SAE Transactions*, 2007, 116:978–988.
- [18] Stepień Z, Żak G, Markowski J, et al. Investigation into the impact of the composition of ethanol fuel deposit control additives on their effectiveness [J]. *Energies*, 2021, 14(3):604.
- [19] Joedicke A, Krueger-Venus J, Bohr P, et al. Understanding the effect of DISI injector deposits on vehicle performance [J]. *SAE Technical Paper*, 2012:2012-01-0391.
- [20] Zahdeh A, Rothenberger P, Nguyen W, et al. Fundamental approach to investigate pre-ignition in boosted SI engines [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2011, 4(1):246–273.
- [21] Colliou T, Giarracca L, Lahaussais D, et al. Impact of diesel and detergent contamination on gasoline low-speed pre-ignition and their characterization using unwashed gums [J]. *Fuel*, 2022, 318:122754.
- [22] Chapman E, Davis R, Studzinski W, et al. Fuel octane and volatility effects on the stochastic pre-ignition behavior of a 2.0 L gasoline turbocharged DI engine [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2014, 7(2):379–389.
- [23] 程金东,蔡志华,林妙山.汽油添加剂 MAZ 的节油和排放效果分析[J]. *内燃机与动力装置*, 2008(6):47–50. CHENG Jindong, CAI Zhihua, LIN Miaoshan. Effects of gasoline additive concentration on fuel economy and emissions [J]. *Internal Combustion Engine & PowerPlant*, 2008(6):47–50.
- [24] 蔡锐彬,陈子键,林慧斌.新型燃油添加剂对汽油机燃烧与排放的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(7):84–87. CAI Ruibin, CHEN Zijian, LIN Huibin. Influence of a novel fuel additive on combustion and exhaust of gasoline engine [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2005, 33(7):84–87.
- [25] 蔡锐彬,蒋稳保.新型多效燃油添加剂的技术经济分析[J]. *润滑与密封*, 2005(2):183–185. CAI Ruibin, JIANG Wenbao. Technologic and economic analysis of new type multi-effect oil additive [J]. *Lubrication Engineering*, 2005(2):183–185.
- [26] 蔡锐彬,张洪娟,高志文.汽油添加剂含量对其节油和排气净化效果的影响[J]. *润滑与密封*, 2006(11):81–83. CAI Ruibin, ZHANG Hongjuan, GAO Zhiwen. Influence of gasoline additive concentration on fuel economy and exhaust purification [J]. *Lubrication Engineering*, 2006(11):81–83.
- [27] 钟科,韩秀坤,张学敏,等.车用乙醇汽油加 MAZ 添加剂的应用研究[J]. *车辆与动力技术*, 2005(4):19–21+38. ZHONG Ke, HAN Kunxiu, ZHANG Xuemin, et al. Study on the application of the MAZ additive for vehicle-use ethanol gasoline [J]. *Vehicle & Power Technology*, 2005(4):19–21+38.
- [28] Nanthagopal K, Kishna RS, Atabani A, et al. A compressive review on the effects of alcohols and nanoparticles as an oxy-

- generated enhancer in compression ignition engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 203:112244.
- [29] Khan S, Dewang Y, Raghuwanshi J, et al. Nanoparticles as fuel additive for improving performance and reducing exhaust emissions of internal combustion engines [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2022, 102(2): 319–341.
- [30] Zamankhan F, Pirouzfard V, Ommi F, et al. Investigating the effect of MgO and CeO₂ metal nanoparticle on the gasoline fuel properties: Empirical modeling and process optimization by surface methodology [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(23):22889–22902.
- [31] Valihesari M, Pirouzfard V, Ommi F, et al. Investigating the effect of Fe₂O₃ and TiO₂ nanoparticle and engine variables on the gasoline engine performance through statistical analysis [J]. *Fuel*, 2019, 254:115618.
- [32] Amirabedi M, Jafarmadar S, Khalilarya S. Experimental investigation the effect of Mn₂O₃ nanoparticle on the performance and emission of SI gasoline fueled with mixture of ethanol and gasoline [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 149:512–519.
- [33] Manigandan S, Gunasekar P, Poorchilamban S, et al. Effect of addition of hydrogen and TiO₂ in gasoline engine in various exhaust gas recirculation ratio [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(21):11205–11218.
- [34] Chong W, Ng J-H, Rajoo S, et al. Passenger transportation sector gasoline consumption due to friction in Southeast Asian countries [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 158: 346–358.
- [35] Rimmert SM, Felix-Moore A, Natrass SR, et al. Demonstration of fuel economy benefit of friction modifier additives via fuel-to-lubricant transfer in Euro-5 gasoline fleet [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2013, 6(3): 677–690.
- [36] Pilla GL, Sanson J. Detection of additives during a direct injection wall interaction [J]. *Combustion Science and Technology*, 2021:1–19.
- [37] Yow S, Ziman P, Smith SJ, et al. An efficient, high-precision vehicle testing procedure to evaluate the efficacy of fuel-borne friction modifier additives [J]. *SAE Technical Paper*, 2019: 2019-01-2353.