

改善汽油机燃油经济性的生物基添加剂研究

姚春德*, 张志辉, 徐元利, 黄钰

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072

* E-mail: arcdyao@tju.edu.cn

收稿日期: 2008-03-11; 接受日期: 2008-05-23

国家自然科学基金资助项目(批准号: 50376045)

摘要 将棕榈油的提取物作为添加剂, 分别以 0.2%、0.4% 和 0.6% 的体积比例加入基础汽油(辛烷值 93 的市售汽油)、已知成分汽油、乙醇汽油和甲醇汽油中, 采用城市路况车用典型发动机转速 2000 r/min 负荷特性下的台架试验, 并对基础汽油中添加 0.6% 的添加剂油品进行道路试验, 对添加剂前后的汽油机燃油经济性和排放性进行了比较分析. 结果表明: 对于基础油和已知成分汽油, 分别添加 0.4% 和 0.2% 比例的添加剂, 其节油效果最大分别达到 8.1% 和 10.2%; 醇类汽油燃油消耗率高于纯汽油, E10 和 M10 汽油分别比基础油的质量燃油消耗率高出 3.1% 和 3.9%; 在 0.6% 的添加比例下, M10 和 M20 汽油燃油消耗率平均降低约为 3.7%; 道路试验平均节油约 7.0%. 同时通过定容燃烧弹、缸内燃烧过程分析、同步辐射以及高温摩擦试验等手段, 从燃烧特性和摩擦学的角度初步探讨了这种生物基添加剂的节油机理. 试验结果反映使用添加剂后可以提高最大缸内压力和增大燃烧放热率、改善排放, 并且能够大幅度的降低摩擦系数.

关键词

汽油机
醇类汽油
生物添加剂
燃油经济性
燃烧与排放

化石燃料支撑当今人类消耗的能源总量的 80%, 加之其不可再生和地区分布的不平衡性造成世界能源的短缺; 同时, 它的燃烧排放物引起大气污染、全球变暖等环境问题^[1], 因此节能与环保成为人类发展面临的重大问题. 以消耗石油能源为主的内燃机发展面临同样的技术挑战, 其中燃料技术的发展是与节能环保密切相关的重要环节之一. 这是因为, 燃料的优化设计既能够降低油耗、改善排放, 同时通过燃料配方的重组来达到减少由石油资源紧张所带来的压力. 燃料添加剂是燃料设计范畴的一部分, 在汽油中加入适当的添加剂不仅可以提高燃油品质、改善燃烧质量, 且无需增加设备或改造发动机, 是提高汽油机燃油经济性、降低物排放污染物的重要手段.

为了提高汽油的抗爆性和经济性, 曾采用添加四乙基铅(tetraethyl lead)作为添加剂, 其效果显著.

然而自 20 世纪 80 年代后含 Pb 汽油被逐步淘汰, 因为 Pb 伤害人体健康和导致尾气催化剂中毒失效. 我国 2000 年 7 月 1 日起停止了含 Pb 汽油的使用. 随后汽油添加剂的研究转到甲基叔丁基醚(MTBE). 一些研究表明, MTBE 可以大幅度提高汽油的辛烷值, 进而提高燃油经济性, 同时能降低 CO 和 THC 的排放, 因而, 全球开始大量使用 MTBE 作为汽油添加剂, 我国也广泛使用. 但是, 2000 年美国加州伯克利大学的研究结果发现, 虽然 MTBE/汽油混合燃料可以提高燃油经济性和改善排放, 但 MTBE 易于进入大气循环, 造成对空气和地下水源的污染^[2]. 饮用受污染的水后, 危害人体健康. 因此, 美国已经停止使用 MTBE 作为汽油添加剂. 尽管我国的汽油贮存方式与美国不同, 使用掺有 MTBE 汽油的危害作用没有美国的明显, 然而, 寻求更安全、更环保的添加剂仍成为当前重要的

研究课题. 目前, 改善汽油经济性的添加剂除 MTBE 外, 还有乙基叔丁基醚(ETBE)、甲醇和乙醇等含氧的醇醚类物质. 美国就大量采用乙醇作为汽油添加剂. 我国部分地区也将粮食制乙醇加入汽油成为 E10 燃料使用. 但是, 由于粮食制乙醇的产量有限, 大规模推广有难度. 采用甲醇作为添加剂使用, 存在如冷启动困难, 未燃醇类和醛类排放过高问题^[3~6], 现阶段大量应用还不成熟.

生物基添加剂属可再生植物油脂, 降解率高, 在整个生命周期内燃烧后并没有过多的增加 CO₂ 排放, 有利于减少温室气体量, 满足可持续发展的要求. 所以, 发展汽油用生物添加剂具有非常重大的现实意义. 国内外对生物质作为燃油添加剂的研究多集中在生物柴油上^[7~9]. 植物油在汽油机中, 已有少量作为掺合剂或助溶剂使用^[10], 但是把植物油作为一种绿色生物添加剂应用于汽油中的研究尚未见报道. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室将棕榈油中的提取物作为添加剂加入不同种类的汽油中, 分别进行台架、道路试验和定容燃烧弹试验, 并进行缸内燃烧分析, 利用同步辐射研究火焰燃烧特性及产物, 研究其摩擦特性^[11], 并考虑到可能的实际应用进行了改性试验, 较全面的评价了该种添加剂的性能. 这些研究为促进新一代绿色汽油添加剂的发展, 缓解我国能源紧张和环境污染双重压力奠定了试验基础和初步的理论依据.

1 添加剂及试验燃料

1.1 生物添加剂

生物添加剂来源于热带植物棕榈油中的提取物, 其主要组分为含 C₁₆ 和 C₁₈ 的脂肪酸, 添加剂的性质主要由所含脂肪酸的种类、性质和含量决定. 该生物添加剂在常温为无刺激性味道的黄色液体, 在环境中可以降解且与汽油相溶, 无分层. 但在较低温度下为膏状, 不具流动性, 溶解汽油的能力下降. 经过加入多碳醇等进行改性处理, 添加剂可以在 -15℃ 以上保持很好的流动性并与汽油互溶. 表 1 列出了经质谱仪分析得出的添加剂的元素含量和基本的物化性质.

1.2 燃油

为了评价生物添加剂对目前车用普通汽油的节

表 1 生物添加剂的主要成分和性质

成分	质量含量	物化特性	数值
饱和酸/%	49.0	密度(25℃)/g·ml ⁻¹	0.92~0.95
单不饱和酸/%	40.0	熔点/℃	27~30
多不饱和酸/%	10.4	凝固点/℃	31~41
其它/%	<1.0	60℃时折射率	1.45
含 C 量/%	75.9	皂化值/mg, KOH/g	196~210
含 O 量/%	12.1	碘值/韦氏法	52~58
含 H 量/%	12.0	脂肪酸中和值	208~210

油效果, 市售汽油为基础油, 分别将添加剂添加到基础油、已知成分汽油、10%工业乙醇的汽油和 10%, 20% 甲醇汽油等 5 种燃油中, 评价其性能. 考虑到甲醇的亲水性, 试验用分析纯级无水甲醇配制成 M10 和 M20 汽油. 试验环境温度为 25℃, 现场配制燃油, 保证甲醇、乙醇与汽油的不分层.

2 试验设备和方案

2.1 试验设备

排量为 1.6 L 的电控车用汽油机(HR16DE 直列 4 缸全铝, 日产公司)联结 WE32H 型水涡流测功机(杭州奕科机电技术有限公司), FCM-03 瞬态油耗仪测量燃油消耗. 排气成分由日本 HORIBA7100 型排放仪测量, 系统采用火焰离子化探测器(FID)测量排气污染物中的 HC 化合物, 采用化学发光法探测器(HCLD)测量排气污染物中的 NO_x, 采用不分光红外分析方法(NDIR)分析 CO 和 CO₂ 的浓度, K 型热电偶测量排气温度. 气缸内压力由 Kistler 公司生产的 6117A 型传感器, 信号经过 YE5850 型电荷放大器放大后, 由 LABVIEW 软件采集处理. 同步辐射试验在中国科学技术大学同步辐射国家试验室完成, 摩擦试验在清华大学摩擦学国家重点实验室的 SRV 高温摩擦磨损实验机上进行.

2.2 试验方案

在台架试验中分别采用基础油、已知成分汽油、E10 汽油以及 M10 和 M20 甲醇汽油添加 0.2%, 0.4% 和 0.6% 的添加剂, 并选择轿车发动机城市道路状况下的典型转速 2000 r/min 负荷特性进行试验, 主要研究不同油品和不同加剂比例对发动机燃油经济性和排放性(机外无催化器)的影响. 用装配了 1.8 L 电控喷射汽油机的桑塔纳轿车进行了道路试验.

为进一步理解添加剂对发动机性能的作用机理, 利用定容燃烧弹研究其着火和火焰传播特性, 通过气缸压力分析缸内放热过程, 利用同步辐射结合飞行质谱仪分析燃烧的中间产物, 采用高温摩擦磨损机检测了添加剂的摩擦系数.

3 试验结果与分析

3.1 经济性能

3.1.1 对基础汽油经济性的影响 图1为基础油分别加入3种不同比例的生物添加剂与未添加剂的基础油的燃油消耗率对比曲线. 由图1可见, 发动机转速在2000 r/min 时的整个负荷范围内, 添加剂汽油的燃油消耗率都明显低于基础油. 节油率随添加剂比例和发动机负荷的不同而不同, 添加剂 0.6%时燃油消耗率下降最多, 最多降低 8.1%, 平均降低幅度达到 5.11%, 随着负荷的增加节油效果总体上呈下降趋势, 在小负荷时添加剂作用效果最明显. 从图1上还可以看到, 添加剂 0.4%与添加剂 0.6%时的燃油消耗率曲线靠得很近, 从而可以认为再增加添加剂比例不能进一步提高燃油的经济性.

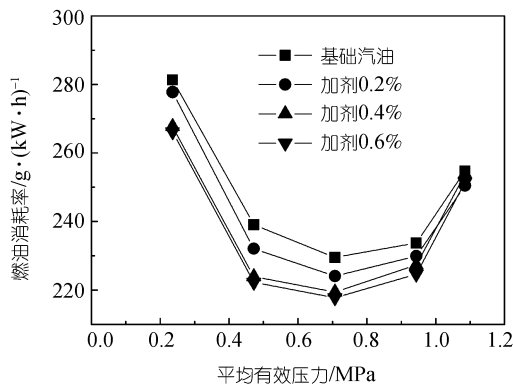


图1 基础油不同添加剂比例的燃油消耗率

3.1.2 对成分汽油经济性的影响 图2示出93号成分油加3种比例的添加剂后燃油消耗率的对比情况. 由图2可见: 对于0.2%和0.4%的添加剂比例, 在整个功率范围内, 添加剂后的燃油消耗率都比基础油节油; 对于0.6%的添加剂比例, 虽然节油的效果不如前2个比例明显, 但在整个功率范围内, 也是有效果的. 其中0.2%和0.4%的添加剂比例的最大节油率分别为10.2%

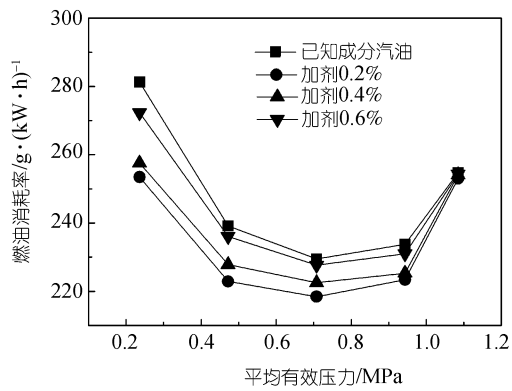


图2 已知成分汽油不同添加剂比例的燃油消耗率

和 8.4%, 平均节油率分别达到 5.4%和 3.8%. 试验发现添加添加剂后, 汽油的辛烷值大约增加 1.5, 这样提高了燃油的抗爆性, 从而提升燃油的经济性.

3.1.3 对乙醇汽油经济性的影响 图3是发动机燃用E10汽油及其加入生物添加剂后经济性能对比试验曲线. 由图3可知, 汽油机燃用E10后动力性能略有下降, 乙醇的热值只有汽油热值的 60%左右, 故在发动机大部分负荷工况范围内的燃油消耗率平均高于原机 3.1%, 但乙醇汽油的比能耗平均为原机的 98.4%.

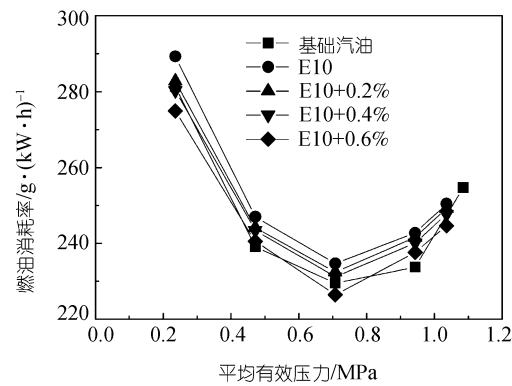


图3 E10汽油不同添加剂比例燃油消耗率

三种添加剂比例乙醇汽油的燃油消耗率与不添加剂相比均有所降低, 但添加剂 0.2%与 0.4%时的节油效果相差不大, 分别为 1.2%和 1.8%. 添加剂 0.6%经济性能为最佳, 节油率随负荷的增大而有所降低, 从小负荷时的 5.0%下降到大负荷时的 2.1%, 平均节油率为 3.3%. 乙醇汽油的燃油消耗率高于基础汽油, 但加入

0.6%的添加剂后乙醇汽油的质量燃油消耗率与基础汽油相当,说明添加剂能提高乙醇汽油的燃料经济性,一定程度上弥补了乙醇汽油在经济性方面的不足.

3.1.4 对甲醇汽油经济性的影响 图4和5示出M10,M20汽油分别加入3种不同比例的生物添加剂与未添加剂的基础油的燃油经济性对比结果.

由图4可见,甲醇与汽油热值上的差异造成发动机燃用M10汽油的燃油消耗率平均增加3.9%.加剂油的燃油消耗率随负荷的不同而改变,但是加剂后,甲醇汽油的混合油质量燃油消耗率得到大幅度改善.当添加剂比例达到0.6%时,M10的燃油消耗率甚至低于基础汽油.

综合来看,发动机燃用M10汽油,当加剂0.4%与加剂0.6%综合效果几乎相同,燃油消耗率平均降低约3.7%.

由图5可以看出,汽油机掺烧20%甲醇汽油在加剂前后的燃油消耗率均明显高于基础汽油,但加剂比例为0.4%和0.6%时,M20的燃油消耗率显著减少,此时2种加剂比例油的燃油消耗率平均分别降低2.3%和3.2%.对于20%甲醇汽油,添加剂的作用效果

以加剂0.6%的油耗下降最多,相对于同比比例的甲醇汽油平均节油3.8%.

3.1.5 添加剂添加到基础油中的道路试验经济性为全面了解添加剂对发动机性能的影响,在桑塔纳1.8 L 轿车上分别燃用基础油和加剂0.6%的基础油,进行了城市和郊区2种道路工况的燃油经济性能对比.为使对比结果具有一致可比性,试验过程中采取了环形行驶路段,同时保证各路段行驶速度、行驶状态完全相同.对比结果列于表2.

3.2 废气排放性能

经过发动机台架试验和实车道路试验证实,该种生物基添加剂确实能改善汽油机的燃油经济性,但是生物添加剂的加入对发动机污染物的影响是其应用的另一个重要性能指标.为了检测加入添加剂后油品的排放特性,选取发动机怠速时THC和CO的排放作为主要检测指标.以基础油为代表,分别从发动机试验和油品的同步辐射分析的角度进行研究.

3.2.1 负荷特性下的排放对比 图6示出基础油不同加剂比例排放参数的对比情况.由图6(a)可见,发

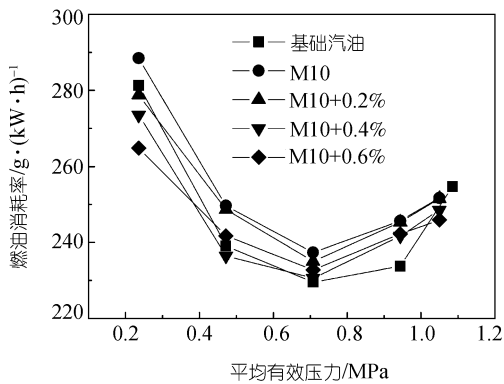


图4 M10汽油不同加剂比例燃油消耗率

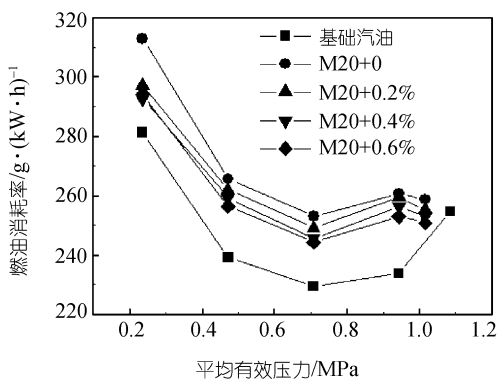


图5 M20汽油不同加剂比例油耗对比

表2 实车道路试验的燃油经济性对比

	市区		郊区	
	基础油	0.6%添加剂+基础油	基础油	0.6%添加剂+基础油
里程/km	54.6	54.6	54.6	54.6
时间/min	64	64	47	48
平均车速/km·h ⁻¹	51.0	51.0	70.0	68.3
总油耗/kg	2.575	2.345	2.730	2.590
质量节油率/%		8.93		5.13

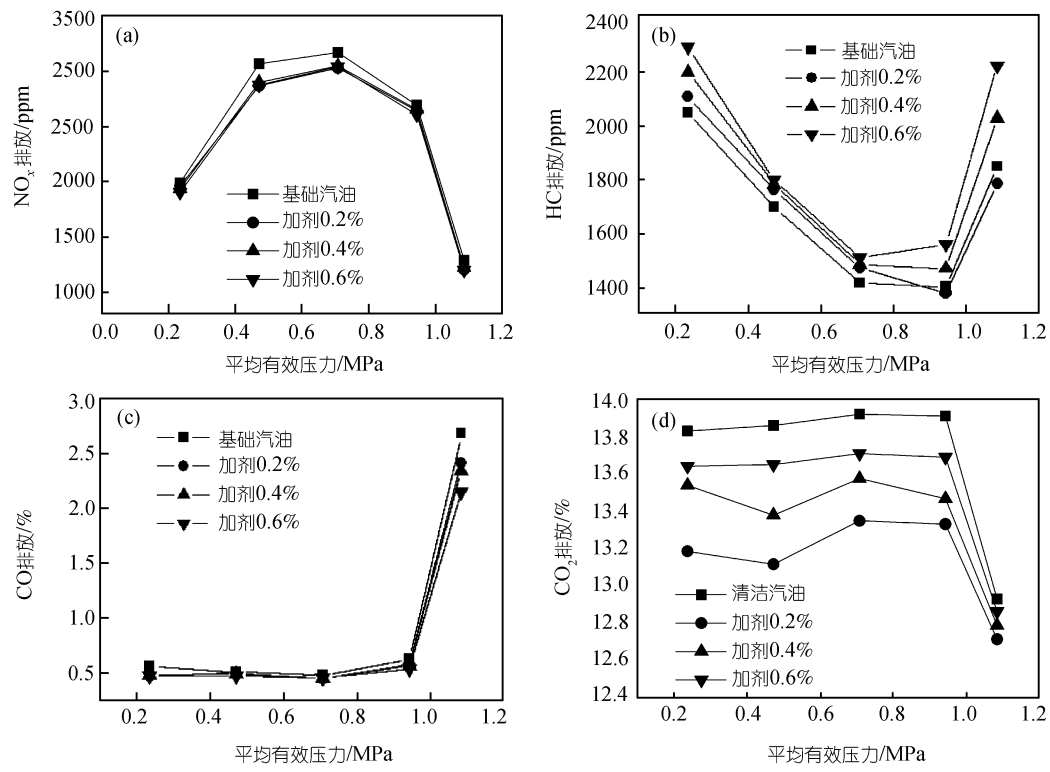


图 6 基础汽油不同添加剂比例排放对比

(a) 添加剂前后 NO_x 排放; (b) 添加剂前后 HC 排放; (c) 添加剂前后 CO 排放对比; (d) 添加剂前后 CO_2 排放对比

动机燃用添加剂后, NO_x 排放浓度有所减小, 尤其在大负荷时更是如此. 图 6(b) 示出燃用添加剂后, HC 排放要略高于基础油的水平. 由图 6(c) 可见, 添加剂的作用使得 CO 在整个功率范围内都明显减少. 添加剂对 CO_2 排放的作用如图 6(d) 所示, 与基础油相比, 尽管不同比例添加剂均对降低 CO_2 排放总量有一定作用, 但 0.2% 的下降幅度最大, 超过 7%, 其原因主要还是提高燃烧效率所致.

3.2.2 发动机怠速排放对比 根据国家标准和北京市标准分别进行了 900 r/min 怠速排放及 2000 和 3000 r/min (1/2 额定转速) 的快怠速排放试验. 从发动机怠速和快怠速排放对比数据可以看出, 加入添加剂后, 发动机的怠速和快怠速时的 HC 和 CO 排放都有明显

降低, 具体数据见表 3.

3.2.3 利用同步辐射测量燃烧产物的试验结果 同步辐射法具有在燃烧过程的成分测试中不干扰反应物和反应过程的特点^[12,13], 以基础油添加剂 0.2% 为研究对象, 通过测量燃烧产物浓度空间变化曲线分析了有害物质在燃烧过程中的生成情况.

在同步辐射试验过程中, 由于使用的是 O_2 代替空气进行燃烧, 生成的常规排放物中没有 NO_x . 在图 7 中给出了加入生物添加剂前后其常规产物 H_2O , CO, O_2 和 CO_2 的空间分布曲线.

从图 7 中可以看出, 加入添加剂后, CO_2 和水的生成增多, CO 的生成减少. 在反应物供应以及试验条件相同的情况下, 这种变化说明添加剂对燃烧起

表 3 发动机怠速与快怠速的 HC 和 CO 排放

转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	900		2000		3000	
	HC/ppm	CO/%	HC/ppm	CO/%	HC/ppm	CO/%
基础油	571	0.25	48	0.32	319	3.41
0.6% 添加剂 + 基础油	480	0.18	18	0.20	190	2.17
降低率/%	15.9	28.0	62.5	37.5	40.4	36.4

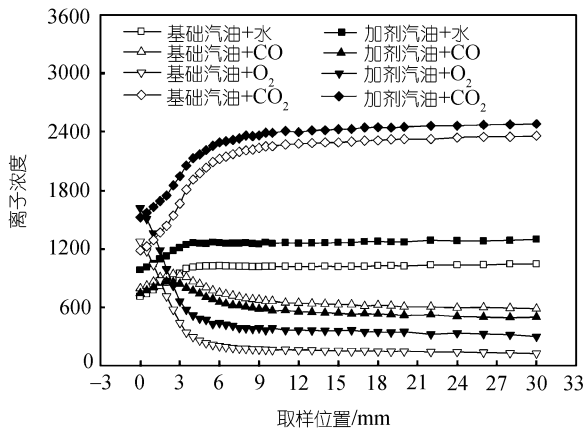


图 7 添加剂前后排放物的相对浓度图

到促进的作用,使得燃烧更充分,因此形成的最终产物增多,中间产物减少.另外,由于添加剂含氧约 12%,在燃烧过程中有自供氧作用,这种作用造成供应的 O_2 消耗减少,从而 O_2 的残留量增多.

4 节油机理试验分析

4.1 燃烧特性分析

4.1.1 定容弹试验 图 8 是容弹内混合气着火后的压力变化图.拍摄时的速率是每秒 2000 帧,即每 0.5 毫秒拍摄一帧图.压力采集频率为每毫秒 30 个点,根据时序电路控制的设计,采集压力后 20 ms,即第 600 个点开始点火,从点火到压力急剧上升的始点为滞燃期.从容弹内压力曲线可以看出,汽油和添加剂后汽油的预混气分别在 626 和 643 点处开始出现压力急剧上升的现象,这就说明添加剂后滞燃期延长.另外,从图 8 还可以看出添加剂之后压力上升得很快,这就说明生物

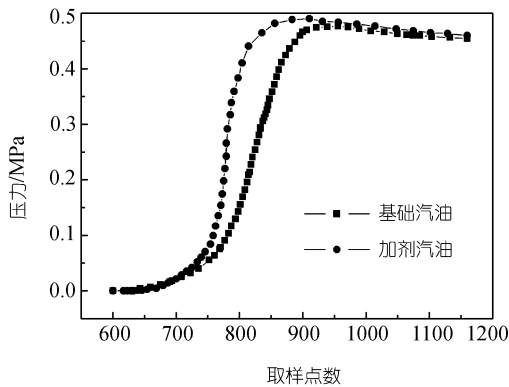


图 8 添加剂前后燃烧室内压力变化

添加剂可以促进燃烧,使得燃烧持续期缩短.

由表 4 添加剂前后火焰的滞燃期和传播速度对比可知,添加剂后燃烧持续期缩短 3.5 s. 所以添加剂后汽油混合气在低温过程中反应放出一定的热量并产生大量的中间产物和活性基,在着火后这些中间产物和自由基会加速和提高燃烧速度,从而使得火焰传播速度提高,燃烧持续时间缩短,改善了燃料的着火和排放特性.

表 4 添加剂前后火焰特性参数

油品	滞燃期/ms	燃烧持续期/ms	火焰传播速度/ $m \cdot s^{-1}$
汽油	1 (600~626)	10 (627~923)	35.3
添加剂	1.5 (600~643)	6.5 (644~835)	63.2

4.1.2 缸内燃烧过程 图 9 示出了中等负荷时,添加剂 0.2% 前后的放热率对比关系. 添加剂后燃烧持续期明显比原机的短,同时峰值和整体放热量与添加剂前相比有所增加,添加剂后的整体曲线要比原机的窄. 这进一步验证了添加剂后燃烧速率加快,热效率增大,因而有利于降低油耗,提高燃油经济性. 在发动机动力性不变的条件下,添加剂的作用使得燃烧速率加快,接近等容燃烧.

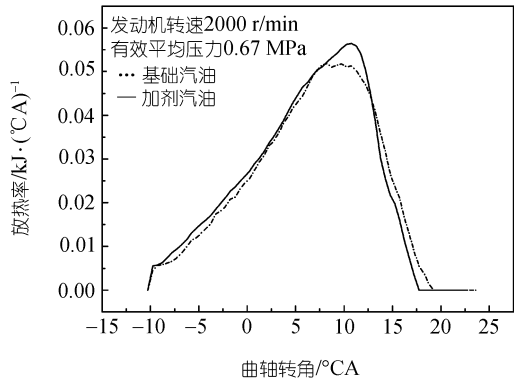


图 9 添加剂前后中等负荷放热率比较

4.2 摩擦试验分析

图 10 和表 5 分别列出添加剂原剂和改性后在常温和 280℃ 时的摩擦系数曲线和数值对比结果.

改性添加剂是通过原剂和多碳醇等物质组成的低沸点增溶剂按一定的比例混合而成的. 试验过程中,摩擦产生的热量会导致增溶剂的蒸发,残留下来的润滑剂量比原添加剂的要少. 所以从图 10 中的改性常温摩擦系数曲线可以看到,摩擦系数随着时间的推移有逐渐上升的趋势. 从图 10 中还可以看出原

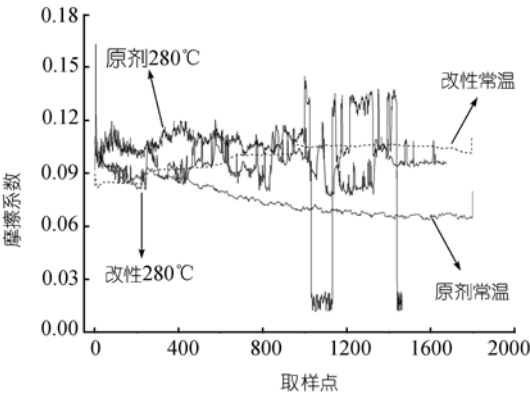


图 10 原剂以及改性添加剂的摩擦系数曲线

表 5 摩擦系数对比

温度/℃	无添加剂	原剂	改性添加剂
常温	-	0.085800	0.098859
280℃	0.5279	0.09414	0.107897

添加剂在 280℃ 的环境下, 摩擦系数的变化幅度比较大, 因为添加剂在金属表面形成的化学吸附膜在高温条件下会发生脱附, 使得原本起润滑作用的吸附膜失效, 从而导致摩擦系数的上升^[11]。但是吸附膜并不会完全脱附, 其中残存的吸附膜或长碳链脂肪酸在温度升高时发生分子链断裂产生的小分子吸附膜仍起到了一定的润滑作用。从表 5 可以看出: 对于改性添加剂在 280℃ 时, 其摩擦系数平均值比原剂在

280℃ 的要高出 14.6%。

5 结论

棕榈油中提炼出的一种生物质作为添加剂以不同比例(体积比 0.2%, 0.4%和 0.6%)加入到不同成分的油品(基础油、已知成分汽油、E10, M10 和 M20 汽油)中, 系统的研究了生物添加剂在台架和道路试验上的经济性、排放性并通过缸内燃烧、容弹燃烧、同步辐射、高温摩擦磨损等方法研究了生物添加剂的作用机理, 主要结论如下。

(1) 发动机保持在 2000 r/min 时的负荷特性以及市区和郊区路况下道路试验表明, 汽油生物添加剂可以有效提高燃油经济性并且降低尾气排放, 而且对我国现在使用的汽油油品具有普遍适应性。

(2) 燃烧过程中的放热率分析表明, 添加剂可以增大燃烧放热率, 添加剂具有促进燃烧的作用。

(3) 定容燃烧弹试验结果显示添加剂可以提高燃烧速度, 缩短燃烧持续期。

(4) 加入该种添加剂的汽油火焰中活性成分增多, 有增加氧含量的效果。

(5) 添加剂加入汽油后具有明显减少摩擦系数的效应, 和原添加剂相比, 改性添加剂的摩擦系数在温度高过 280℃ 时, 将会增大 14.6%。

参考文献

1 Olah G A, Goepfert A, Prakash G K S. Beyond oil and gas: The methanol economy. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. 1—10

2 Franklin P M, Koshland C P, Lucas D, et al. Evaluation of combustion by-products of MTBE as a component of reformulated gasoline. Chemosphere, 2001, 42(5-7): 861—872^[DOI]

3 Taljaard H C, Jaardaan C F P, Both J J. The effect of oxygen content in different oxygenates gasoline blends on performance and emission in a single cylinder, spark ignition engine. SAE paper 910379, 1991

4 Al-Hasan M. Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. Energy Conv Manage, 2003, 44(9): 1547—1561^[DOI]

5 Abu-Zaid M, Badram O, Yamin J. Effect of methanol addition on the performance of spark ignition engines. Energy Fuels, 2004, 18(2): 312—315^[DOI]

6 Liu S H, Clemente E R C, Hu T G, et al. Study of spark ignition engine fueled with methanol/gasoline fuel blends. Appl Therm Eng, 2007, 27(11-12): 1904—1910^[DOI]

7 Kegl B. Effect of biodiesel on emissions of a bus diesel engine. Bioresour Technol, 2008, 99(4): 863—873^[DOI]

8 Benjumea P, Agudelo J, Agudelo A. Basic properties of palm oil biodiesel-diesel blends. Fuel, 2007, 87(10-11): 2069—2075 ^[DOI]

9 Reijnders L, Huijbregts M A J. Palm oil and the emission of carbon-based greenhouse gases. J Clean Prod, 2008, 16(4): 477—482^[DOI]

10 Barton A F M, Tjandra J. Eucalyptus oil as a cosolvent in water-ethanol-gasoline mixtures. Fuel, 1989, 68(1): 11—17^[DOI]

11 姚春德, 黄钰, 周红秀, 等. 生物基汽油添加剂摩擦性能实验研究. 润滑与密封, 2006, 12: 143—145

12 Sandia National Laboratories. 25 milestones at the CRF. Combustion Research Facility News, 2004, 26(3): 2—5

13 Cool T A, Nakajima K, Taatjes C A, et al. Studies of a fuel-rich propane flame with photoionization mass spectrometry. Proc Combust Inst, 2005, 30(1): 1681—1688^[DOI]