

燃料添加剂对甲醇发动机燃烧及排放的影响

常伟德¹, 徐林勋², 舒赞樵¹, 鞠澄源¹, 高志斌², 祝伟², 刘海峰¹

(1. 天津大学先进内燃动力全国重点实验室, 天津 300072;

2. 山东京博新能源控股发展有限公司, 滨州 256500)

摘要: 在甲醇燃料中使用添加剂是保证发动机稳定可靠运行的必要条件, 目前发动机上燃用的甲醇燃料均使用了添加剂. 本文在一台 6 缸进气道喷射点燃式甲醇燃料发动机上开展了两种甲醇添加剂与甲醇混合燃料对发动机燃烧和排放影响的研究, 所用燃料为质量分数 500×10^{-6} 和 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的两种甲醇添加剂和甲醇混合燃料. 两种添加剂成分上的区别体现在含有不同类型的润滑剂分子, 高频往复试验机和模拟进气阀测试对两种添加剂的测试表明, 1#添加剂具有比 2#添加剂更好的润滑和清净性能. 发动机试验的结果表明: 添加 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的 1#甲醇添加剂可以在中低转速提高发动机缸内燃烧温度, 提高燃烧定容度, 使放热更集中; 添加 1#甲醇添加剂可以在中低转速(转速 $\leq 1\,400$ r/min)有效降低发动机甲醇消耗量, 其中添加 $1\,000 \times 10^{-6}$ 比添加 500×10^{-6} 降低甲醇消耗量的效果更好, 与纯甲醇相比降低比例平均可达 3%以上. 添加 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的 1#甲醇添加剂还可以在发动机中低负荷、较高转速时降低发动机 NO_x 排放, 最高可降低 21%. 综合来看, 1#甲醇添加剂不仅具有更好的抗磨、清净功能, 还能降低部分负荷下的甲醇消耗, 改善发动机燃油经济性.

关键词: 甲醇发动机; 燃料添加剂; 燃烧; 燃油经济性; 排放

中图分类号: TK401

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2026)03-0249-13

Effects of Fuel Additives on Combustion and Emissions in Methanol Engines

Chang Weide¹, Xu Linxun², Shu Zanzhao¹, Ju Chengyuan¹, Gao Zhibin², Zhu Wei², Liu Haifeng¹

(1. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Shandong Tokyo Bo New Energy Holding Development Co., Ltd., Binzhou 256500, China)

Abstract: The use of additives in methanol fuels is necessary to ensure stable and reliable engine operation, and all methanol fuels currently burned in engines use additives. In this paper, the effects of two methanol additives and methanol blends on engine combustion and emissions were investigated in a 6-cylinder intake-airway-injected ignition methanol-fueled engine. The mass fractions of two methanol additives and methanol blends used are 500×10^{-6} and $1\,000 \times 10^{-6}$, respectively. The difference in the composition of the two additives is reflected in the presence of different types of lubricant molecules. Tests of the two additives in a high-frequency reciprocating tester and through a simulated intake valve showed that additive #1 has better lubrication and cleaning properties than additive #2. The results of the engine test show that: adding $1\,000 \times 10^{-6}$ of 1# methanol additive can increase the combustion temperature in the engine cylinder at low and medium speeds, improve the combustion capacity, and make the exothermic heat more concentrated; adding 1# methanol additive can effectively reduce the consumption of metha-

收稿日期: 2025-08-07.

基金项目: 广西科技重大专项资助项目(桂科 AA24206030).

作者简介: 常伟德(1999—), 男, 博士研究生, wadechang12@163.com.

通信作者: 刘海峰, 男, 博士, 教授, haifengliu@tju.edu.cn.

nol in the engine at low and medium speeds ($\text{speeds} \leq 1\,400\text{ r/min}$). The effect of adding $1\,000 \times 10^{-6}$ is better than adding 500×10^{-6} in reducing the consumption of methanol, and the reduction ratio can be more than 3% on average compared with pure methanol. Adding $1\,000 \times 10^{-6}$ of 1# methanol additive can also reduce engine NO_x emission at low load and high speed of the engine, which can be reduced by up to 21%. Taken together, 1# methanol additive not only has better anti-wear and cleaning properties, but also reduces methanol consumption at partial loads and improves engine fuel economy.

Keywords: methanol engine; fuel additives; combustion; fuel economy; emissions

减碳问题在世界上很受关注,我国也主动担当负责人的大国的义务,于 2020 年提出了“碳达峰与碳中和”,对以交通行业为代表的各行业提出了更加严格的减碳要求^[1]. 目前世界上最主要的交通运输燃料是石油燃料,但是石油燃料燃烧产生的经济与环境问题越发严重. 考虑到我国缺油富煤的能源结构以及甲醇能源的来源广阔和成本低廉,甲醇被认为是最有潜力的替代燃料. 甲醇的制取方式多样,其制备工艺中的原料主要包括煤、天然气、焦炉气和生物质等. 由于我国的能源结构的“富煤贫油少气”特征,国内甲醇的主要制备原料是煤^[2];国际上的甲醇制备原料以天然气为主,占比可达 95% 以上. 另外,二氧化碳加氢制甲醇的方法发展非常迅速,包括一步法制甲醇、电催化还原法、光催化还原法、生物催化还原法等,且其中的一步法制甲醇技术最为成熟,目前已进入到商业化阶段^[3]. 根据生产方式和碳排放量,目前将甲醇划分为绿醇、蓝醇、灰醇和棕醇. 当甲醇的生产原料氢气(H_2)和二氧化碳(CO_2)来源均为可再生属性时才属于绿色甲醇. 可再生 H_2 是指利用可再生电力电解水制取 H_2 ,可再生 CO_2 是指生物质来源 CO_2 或空气中捕集得的 CO_2 ^[4]. 未来甲醇的发展将逐步实现向绿色甲醇的转型,加快绿色甲醇行业的技术革新,实现更低的碳排放目标.

发动机使用甲醇替代燃料有以下优点:在满足原机动力性的基础上对发动机结构的改动较小^[5];甲醇燃料属于清洁的替代燃料,燃烧时对大气环境污染较小;由于甲醇常温常压下是液体^[6],因此运输成本较低^[7]. 然而,甲醇的十六烷值低(仅为 3 左右),自燃温度高达 $465\text{ }^\circ\text{C}$,使得甲醇压燃着火比较困难;除此之外,甲醇的气化潜热大($1\,109\text{ kJ/kg}$),比汽油与柴油都高很多,因此甲醇气化困难,着火滞燃期延长,面临冷启动困难等挑战^[8-11]. 这些问题是制约甲醇燃料发动机普及的关键挑战.

我国甲醇燃料发动机技术始于 20 世纪 70 年代,截至 2023 年,工信部分多批发布 9 家甲醇汽车生产

企业和 47 款甲醇汽车产品,主要应用于山西、陕西、贵州、甘肃、新疆、内蒙古等地区,乘用车总量约 3 万辆,商用车总量约 3 000 辆^[12]. 目前国内企业推出多款高性能甲醇重卡,如吉利远程星瀚 H,陕汽德龙 X5000S 等^[13],可节省燃料成本 18% ~ 32%^[14]. 在船用甲醇发动机领域,MAN ES、Wartsila、STX 等公司都在进行纯甲醇或甲醇双燃料发动机的研发工作. Wartsila 推出的 Wartsila 32 甲醇发动机在 2022 年获得首批订单,并于 2023 年推出 4 款能够使用甲醇燃料的发动机^[15].

甲醇添加剂作为提升甲醇燃料实用性的关键改性技术,通过优化燃烧特性、增强化学稳定性和抑制材料腐蚀等多重作用机制,可以有效克服甲醇燃料蒸发潜热高、热值低及腐蚀性强等固有缺陷. 其协同改性效果不仅显著提升了甲醇燃料的冷启动性能与热效率,还通过降低污染物排放和延长发动机寿命强化了环保效益与经济性. GB/T 42416-2023《M100 车用甲醇燃料》^[16]和 GB/T 42436-2023《M100 车用甲醇燃料添加剂》^[17]中明确规定 M100 甲醇燃料由甲醇($\geq 99.5\%$)和添加剂($\leq 0.5\%$)组成,这一标准限制要求添加剂必须高效且用量极低. 标准中还要求添加剂须控制模拟进气阀测试沉积物质量不大于 2 mg ,铝片防锈性试验中铝片不大于轻度腐蚀等.

王鑫等^[18]在一台点燃式 M100 甲醇发动机上研究了不同种类和比例烃类添加剂对甲醇发动机冷启动性能的影响,添加剂中包含不同比例的短链烃类、酮类、二甲醚和短链醇类. 设置添加剂的加注体积百分比分别为 10%、12% 和 15%. 研究结论表明,烃类添加剂 C4 ~ C8 烃成分比例对甲醇发动机的启动性能影响最大,该类成分的 10% 馏出温度比甲醇低得多,且烃类燃料是非极性物质,甲醇是极性物质,两者混合后会形成共沸混合物,可以改善甲醇的蒸发性能. 李竞克^[19]和陈天翔^[20]分别研究了添加不同比例苯胺对一台缸内直喷点燃式甲醇发动机非常规排放和颗粒物排放的影响. 研究发现,甲醇中添加甲苯

后,发动机的动力性(转矩)和燃烧(最高燃烧压力)影响很小,着火延迟期明显缩短,排气温度降低,对甲醇的急燃期没有影响,从而使甲醇发动机的未燃甲醇和甲醛排放降低. 由于添加苯胺后着火延迟期缩短,排气温度降低,因此核态微粒有所减少,积聚态微粒有所增多,微粒总的数量浓度降低,变化趋势不随苯胺的添加比例有规律性地变化,并且与发动机的运行参数和工况也没有明显的关系. 郭宝圣等^[21]在汽油机上对比了添加 5% 某种甲醇汽油添加剂的甲醇汽油燃料与市售 93 号汽油的低速负荷特性曲线和怠速排放数据. 他们发现,添加了该甲醇汽油添加剂的甲醇汽油与 93 号汽油相比,油耗量和油耗率非但没有升高,反而稍有降低,可见该添加剂可以在低负荷时提高燃油经济性;除此之外,添加了该添加剂的甲醇汽油燃料燃烧性能和低负荷工况下的排放性能等都与 93 号汽油相差不大. Makoto 等^[22]开发了一款替代传统汽油的由特定酚类组成的甲醇添加剂,该添加剂可以防止甲醇燃料系统中产生沉淀物,并且还可以将已产生的沉淀物清洗和去除. 胡红等^[23]提出了一种甲醇燃料添加剂,该添加剂包含乙二醇单丁醚、不饱和脂肪酸及其衍生物、有机抗氧剂、聚醚类等. 进行试验发现,该添加剂可以有效起到抗磨、润滑作用,且可以大大抑制锌等金属的腐蚀. 以上甲醇添加剂大多是基于点燃式甲醇发动机,对于压燃式甲醇发动机也有相应开发多种多样的添加剂,如十六烷值改进剂、润滑性改进剂、清净与稳定改进剂等^[24-29]. 本文研究内容聚焦于点燃式甲醇发动机,因此不对压燃式甲醇发动机的甲醇添加剂进行过多赘述.

基于以上文献综述可以发现,甲醇燃料具有非常广阔的应用前景,但是其自身理化特性有一定局限导

致目前其推广普及具有一定困难. 甲醇添加剂可以有效改善甲醇的理化特性,改善甲醇的燃烧及排放. 本文将主要分析两种甲醇添加剂与纯甲醇的燃烧和排放特性,开展不同燃料在 K15m 进气道喷射点燃式甲醇燃料发动机上的燃烧排放研究. 此研究可为甲醇添加剂的开发和在甲醇发动机上的应用与推广提供参考.

1 试验方案

1.1 试验台架

试验在一台 6 缸四冲程、增压中冷重型点燃式甲醇燃料发动机上进行,发动机采用当量燃烧的技术路线,发动机参数如表 1 所示.

表 1 发动机技术参数
Tab.1 Engine specifications

参数	数值
发动机类型	直列 6 缸,每缸四气门,水冷增压中冷
缸径/mm	138
活塞行程/mm	165
排量/L	14.82
压缩比	13.5
标定功率/kW	390
标定功率转速/(r/min)	1 700
最大扭矩/(N·m)	2 600
最大扭矩转速/(r/min)	950 ~ 1 450

图 1 所示为发动机台架的布置示意. 试验中通过压力传感器、电荷放大器和燃烧数据采集系统对缸内压力进行测量. Horiba MEXA-7100DEGR 用于分析发动机气体排放,测量包括 CO、THC、NO_x、CO₂ 等组分,可实时监测并记录数据.

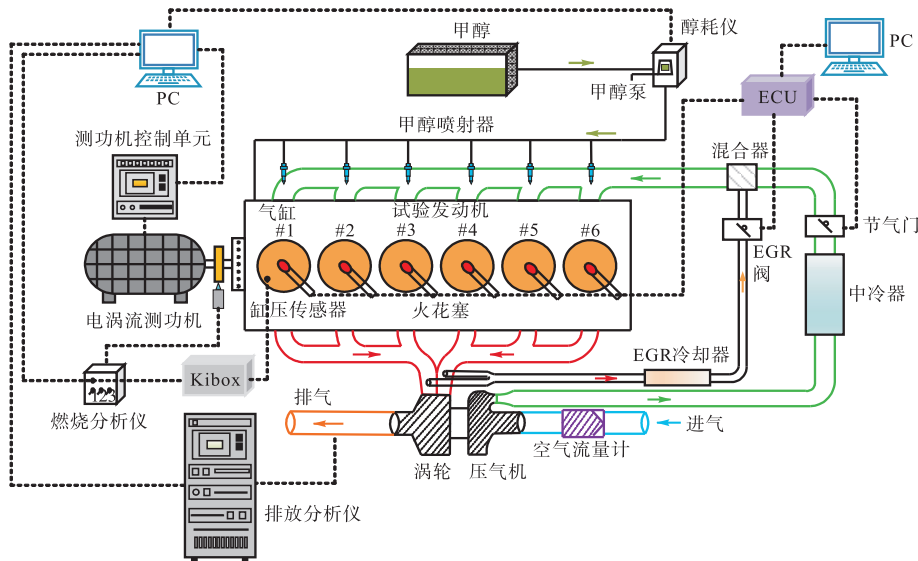


图 1 发动机台架示意
Fig.1 Schematic diagram of engine stand

1.2 试验燃料

试验对 2 种添加剂及纯度达 99.98% 的纯甲醇展开研究, 2 种添加剂分别命名为 1#甲醇添加剂和 2#甲醇添加剂. 其中, 1#添加剂中含有酯型润滑剂、聚醚胺类清净剂; 2#添加剂中含有胺型润滑剂、聚醚胺类清净剂, 其余成分, 如抗氧化剂、助溶剂等二者相同. 根据 GB/T 42416—2023《M100 车用甲醇燃料》^[16]中的要求, 除甲醇外, 所有外加组分总量不得使甲醇燃料质量分数低于 99.5%, 同时考虑到成本等要求, 两种甲醇添加剂添加的质量分数分别为 500×10^{-6} 和 $1\,000 \times 10^{-6}$, 共 5 种燃料, 燃料命名及组成如表 2 所示.

表 2 燃料组成
Tab.2 Fuel composition

燃料	燃料组成
纯甲醇	纯甲醇
1#, 500×10^{-6}	甲醇+ 500×10^{-6} 1#添加剂
1#, $1\,000 \times 10^{-6}$	甲醇+ $1\,000 \times 10^{-6}$ 1#添加剂
2#, 500×10^{-6}	甲醇+ 500×10^{-6} 2#添加剂
2#, $1\,000 \times 10^{-6}$	甲醇+ $1\,000 \times 10^{-6}$ 2#添加剂

1.3 试验方案

首先在高频往复试验机 (HFRR) 上测试两种添加剂润滑性, 测试方法按 GB/T 35137-2017《柴油润滑性评定用高频往复试验机》^[30]进行. 其次, 通过模拟进气阀设备, 测试了两种添加剂的清净性水平.

为了全方位分析甲醇添加剂对点燃式甲醇发动机燃烧及排放的影响, 试验选定表 3 中的转速以及 100%、80%、40%、10% 共 4 种负荷点. 此试验工况包含全负荷和高、中、低负荷, 基本能够代表发动机的全部工作状态, 具有较高且全面的代表性. 试验中保持发动机转速、转矩等输入参数不变, 通过改变添加剂种类及浓度研究其对点燃式甲醇发动机的燃烧及排放特性影响规律. 每次更换测试燃料时, 保证发动机在使用新燃料运行至少 30 min 后再进行测试, 以避免上一轮燃料残余的影响.

表 3 发动机试验转速及该转速下最大转矩

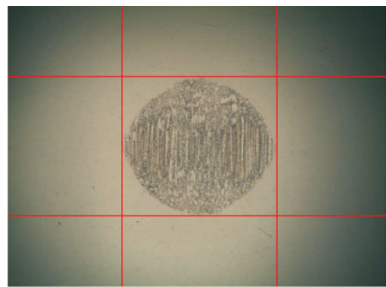
Tab.3 Engine test speed and maximum torque at that speed

序号	转速/(r/min)	最大转矩/(N·m)
1	800	1 989
2	1 000	2 626
3	1 200	2 620
4	1 300	2 686
5	1 400	2 541
6	1 500	2 508
7	1 600	2 316
8	1 700	2 215
9	1 800	2 034

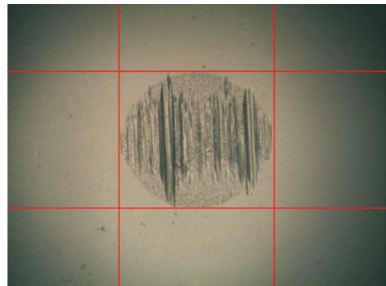
2 试验结果与分析

2.1 润滑性和清净性差异

如图 2 所示, 两种添加剂的润滑性能差异显著. 经 HFRR 测试表征, 添加 1#添加剂的试样钢片表面磨斑直径 (D_{WS}) 为 $390\,\mu\text{m}$, 较 2#添加剂 ($D_{WS} = 410\,\mu\text{m}$) 降低 4.9%, 表明 1#添加剂在金属表面形成的润滑膜具有更优的抗磨性能. 从分子作用机制分析, 1#添加剂中酯类化合物的极性官能团 (如酯基) 可通过化学吸附在金属表面形成定向排列的致密保护膜, 其吸附能显著高于胺型润滑剂的物理吸附. 这种强吸附特性使酯基润滑膜在剪切应力下仍能维持结构完整性, 从而有效降低摩擦副间的黏着磨损, 有效改善了甲醇燃料低黏度导致的发动机零部件磨损, 其标准检测获得的磨斑直径已经满足了国标对柴油小于 $460\,\mu\text{m}$ 的要求^[31].



(a) 1#添加剂



(b) 2#添加剂

图 2 两种添加剂润滑性差异

Fig. 2 Difference in lubricity of two additives

图 3 的模拟进气阀沉积物生成过程的试验数据显示, 1#添加剂的沉积物生成量 ($0.1\,\text{mg}$) 仅为 2#添加剂 ($0.5\,\text{mg}$) 的 20%, 证实其具备更优的清净分散性能. 机理研究表明^[32], 酯类分子中的氧原子可通过配位作用与金属表面形成共价键合, 在高温工况下 ($>150\,^{\circ}\text{C}$) 仍能维持连续油膜覆盖, 抑制氧化副产物的沉积 (活化能提升). 而且, 1#添加剂中的酯型润滑剂与聚醚胺类清净剂存在协同优化作用^[33], 可以实现更好的清净效果.

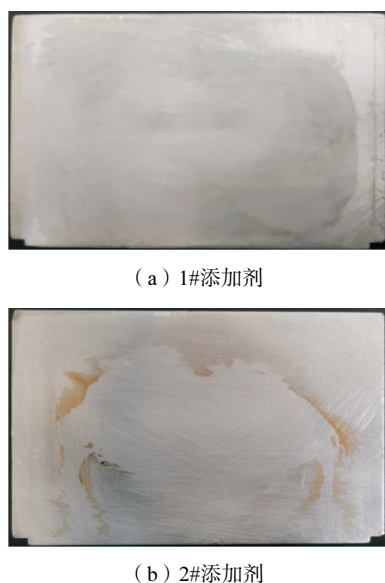


图3 两种添加剂清净性差异

Fig.3 Difference in cleanliness of two additives

2.2 对燃烧性能的影响

以 1 200 r/min、1 400 r/min 和 1 700 r/min 为发动机高中低转速的代表转速,分析在不同的转速下燃烧性能的差异.图 4~图 6 为 5 种不同燃料在 3 个转速满负荷工况的燃烧特性,具体分析了缸内压力、温度、放热率、CA10、CA50 和 CA90.图 7 展示了 3 个转速下 5 种燃料的缸内最高温度变化.

从图 4 和图 7 中可以看出,在 1 200 r/min 时,4

种含有添加剂的燃料的缸压和放热率峰值均高于纯甲醇,且 4 种燃料的 CA10 和 CA50 均比纯甲醇更短,燃烧相位靠前,放热更集中,因此从缸内平均温度曲线上可以看出,纯甲醇的缸内温度较低,1#1 000 × 10⁻⁶ 燃料的缸内温度最高,比纯甲醇高 61 K.由于两种甲醇添加剂中均含有添加剂组分,对燃料的分子组成产生了影响,在一定程度上改善了燃油的挥发性、表面张力等物理特性,改善了缸内可燃混合气的质量.且两种添加剂减少了发动机内部的摩擦和磨损,减少了内部的摩擦阻力.从图 5 和图 7 中可以看出,在 1 400 r/min 时,从缸压、放热率和缸内温度三方面看,1#1 000 × 10⁻⁶ 燃料的曲线峰值均为最高,而纯甲醇都处于较低的位置.除此之外,1#1 000 × 10⁻⁶ 燃料的 CA10 和 CA50 都最短,燃烧相位更靠近上止点,燃烧定容度更高,放热更集中.从图 6 和图 7 中可以看出,在 1 700 r/min 时,纯甲醇的缸压和放热率较另外两个转速处于 5 种燃料中的较高位置,缸内温度在 5 种燃料中最高,比缸内温度最低的 2#500 × 10⁻⁶ 燃料高近 60 K.这表明在高转速下,添加剂不能对甲醇的燃烧起到正向的促进作用,此时纯甲醇燃烧相较于含添加剂的燃料更加完全.由于添加剂添加量很少,在高转速时润滑膜容易因缸内温度高和机械剪切力过大等因素而破裂,导致摩擦系数升高,从而出现与中低转速不同的结果.

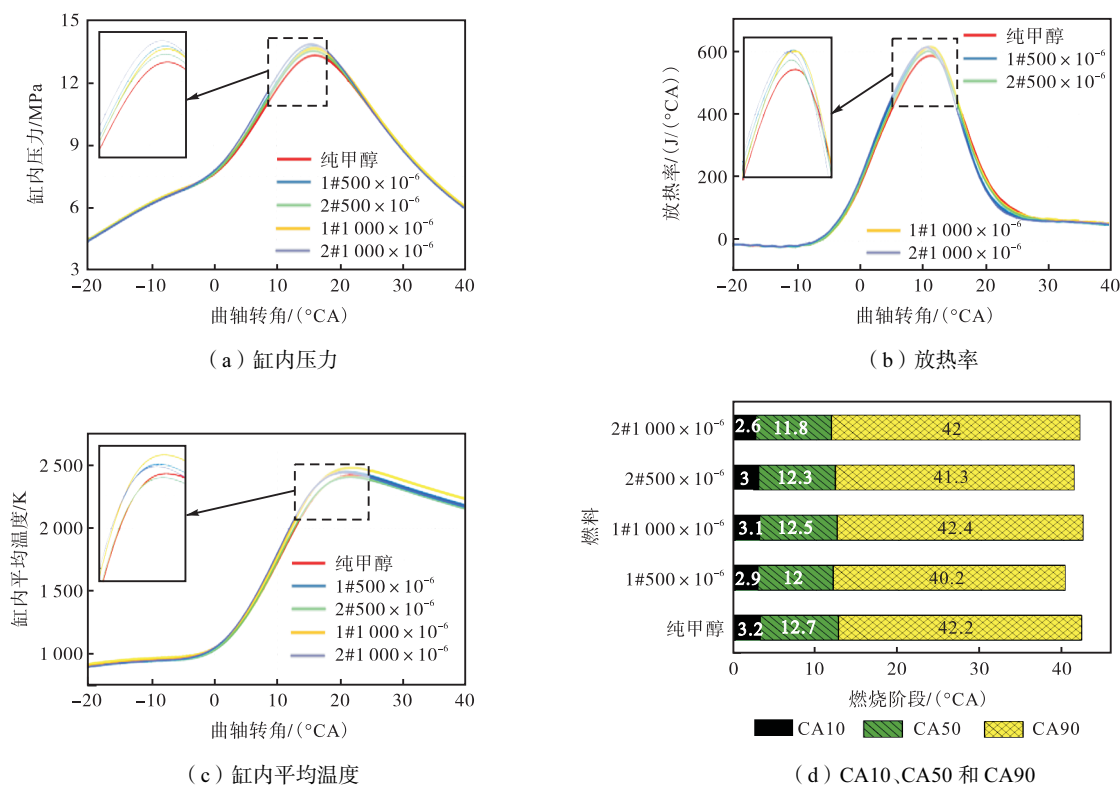
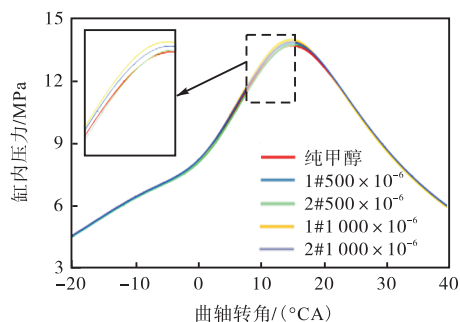
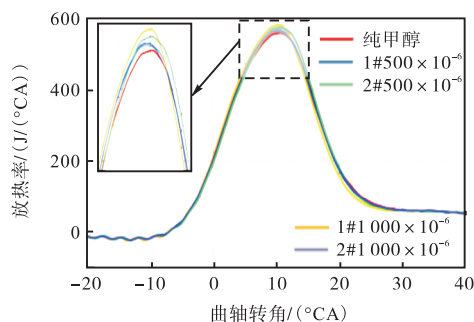


图4 不同燃料转速 1 200 r/min、满负荷工况燃烧特性

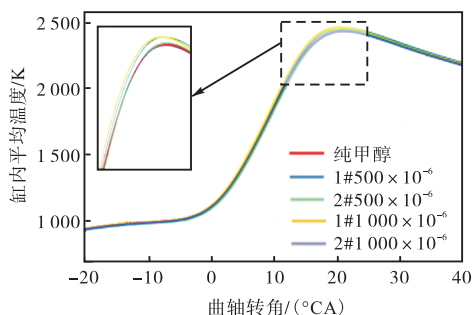
Fig.4 Combustion characteristics of different fuels at 1 200 r/min and full load condition



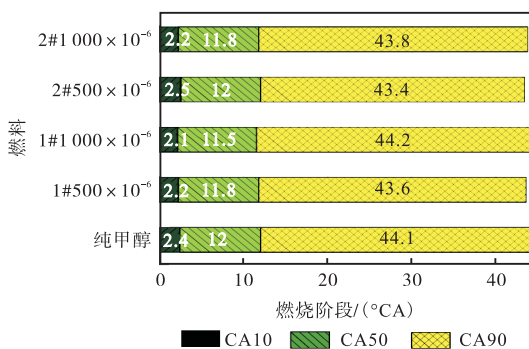
(a) 缸内压力



(b) 放热率



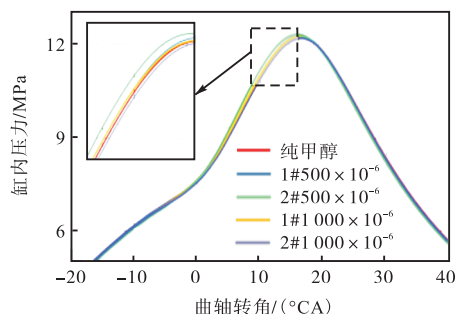
(c) 缸内平均温度



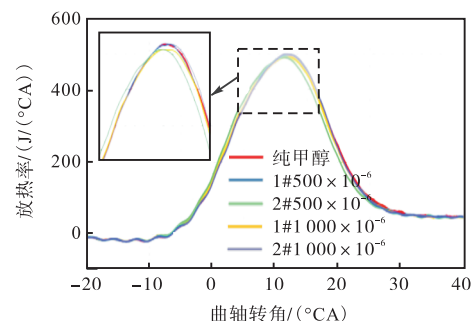
(d) CA10、CA50 和 CA90

图 5 不同燃料转速 1400 r/min、满负荷工况燃烧特性

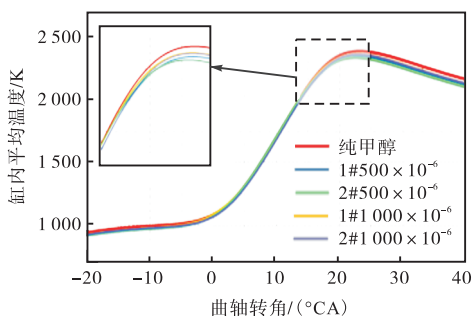
Fig.5 Combustion characteristics of different fuels at 1400 r/min and full load condition



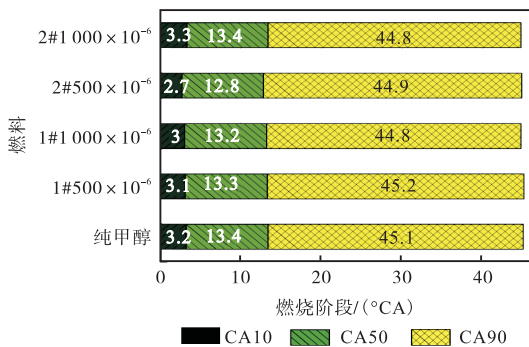
(a) 缸内压力



(b) 放热率



(c) 缸内平均温度



(d) CA10、CA50 和 CA90

图 6 不同燃料转速 1700 r/min、满负荷工况燃烧特性

Fig.6 Combustion characteristics of different fuels at 1700 r/min and full load condition

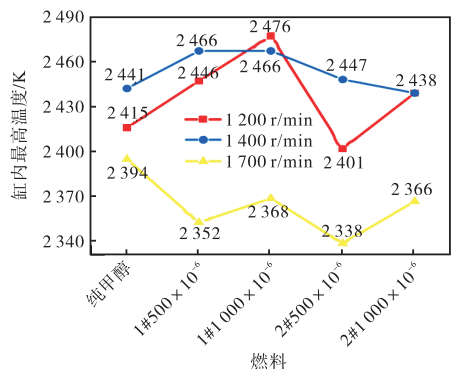
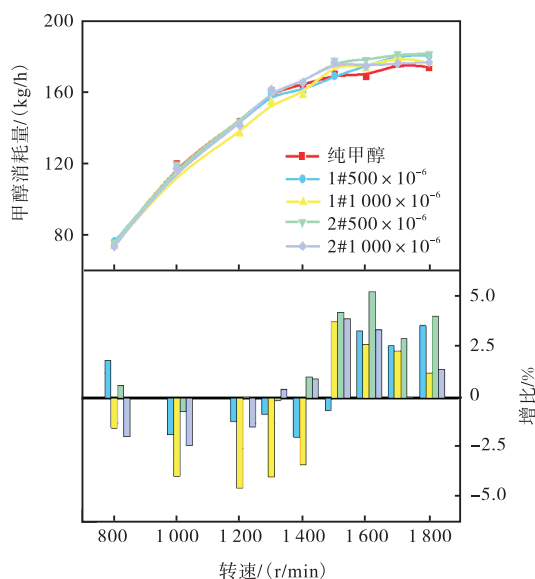
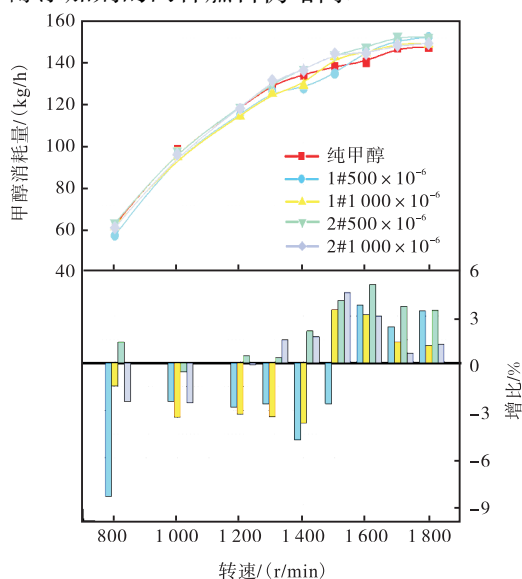


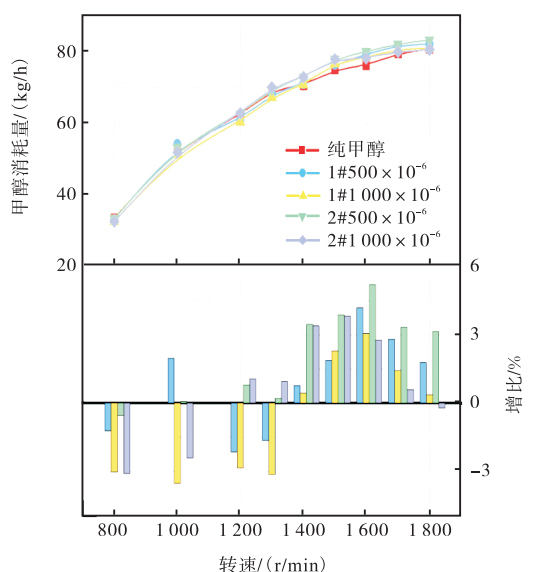
图7 不同燃料不同转速满负荷工况缸内最高燃烧温度
Fig.7 Maximum combustion temperatures in the cylinder at full load conditions for different fuels and different speeds



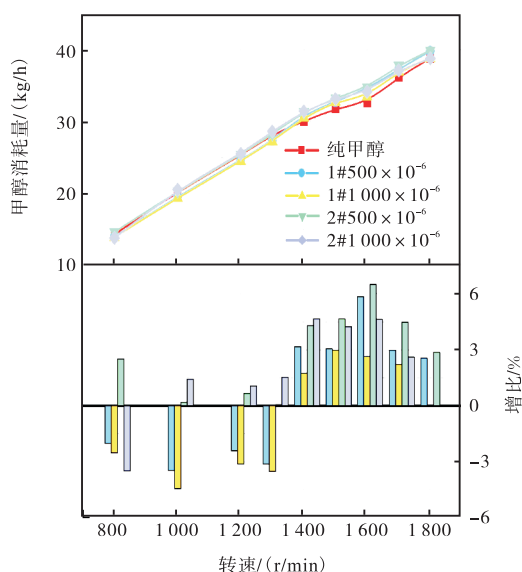
(a) 100% 负荷



(b) 80% 负荷



(c) 40% 负荷



(d) 10% 负荷

图8 不同燃料在不同负荷下质量醇耗量与转速的关系

Fig.8 Mass alcohol consumption versus speed for different fuels at different loads

2.3 对经济性的影响

图8为添加不同比例不同种类甲醇添加剂的燃料在100%、80%、40%及10%这4种负荷的甲醇消耗量随发动机转速变化情况。图中表明,4种负荷下质量醇耗量都随着转速的增大而升高,且5种燃料的质量醇耗量相差较小。在4种负荷的中低转速,1#甲醇添加剂的两种燃料的质量醇耗量相较于纯甲醇都有所降低,其中添加 1000×10^{-6} 的1#甲醇添加剂可降低质量醇耗量3%以上;2#甲醇添加剂的两种燃料的质量醇耗量相较于纯甲醇都略有升高。在高转速时,4种添加剂燃料的质量醇耗量均较高,其中添加2#甲醇添加剂的两种燃料的质量醇耗量相较于添加1#甲醇添加剂的两种燃料仍略高。

结合 2.2 节的内容分析, $1\#500 \times 10^{-6}$ 和 $1\#1\,000 \times 10^{-6}$ 两种燃料在中低转速 ($n \leq 1\,400$ r/min) 醇耗有所改善原因如下: 1#添加剂中添加的酯型润滑剂, 在 HFRR 测试结果显示该添加剂的润滑性明显优于 2#添加剂, 能更好地改善润滑性能, 减少发动机内部的摩擦和阻力。而在发动机中低转速时, 活塞环-缸套摩擦副处于混合润滑状态^[34], 1#添加剂形成的低剪切强度润滑膜可以降低摩擦系数, 减少摩擦损失^[35], 进而使得甲醇消耗量降低。而胺型润滑剂主要通过范德华力形成物理吸附膜^[36], 其润滑膜容易因高温或机械剪切等因素而破裂, 导致摩擦系数升高。从而对降低甲醇消耗量无法起到改善作用。添加 1#添加剂的

燃料燃烧温度更高, CA10 和 CA50 更短, 燃烧相位更接近上止点, 燃烧定容度更高, 放热更集中, 使燃料燃烧更加完全, 从而降低了发动机的醇耗。

2.4 对排放性能的影响

图 9 为 5 种燃料在 4 种不同负荷下 CO 排放与发动机转速的变化关系。图中表明, 在中高负荷 CO 排放量较少, 10% 负荷时 CO 排放量最高。在 4 种负荷情况下, 4 种含甲醇添加剂燃料的 CO 排放整体上均高于纯甲醇。

两种添加剂中含有的酯型润滑剂和胺型润滑剂都属于含氧/含氮大分子有机物, C—O 键和 C—N 键断开都需要很高的活化能, 这会导致其在缸内不能发

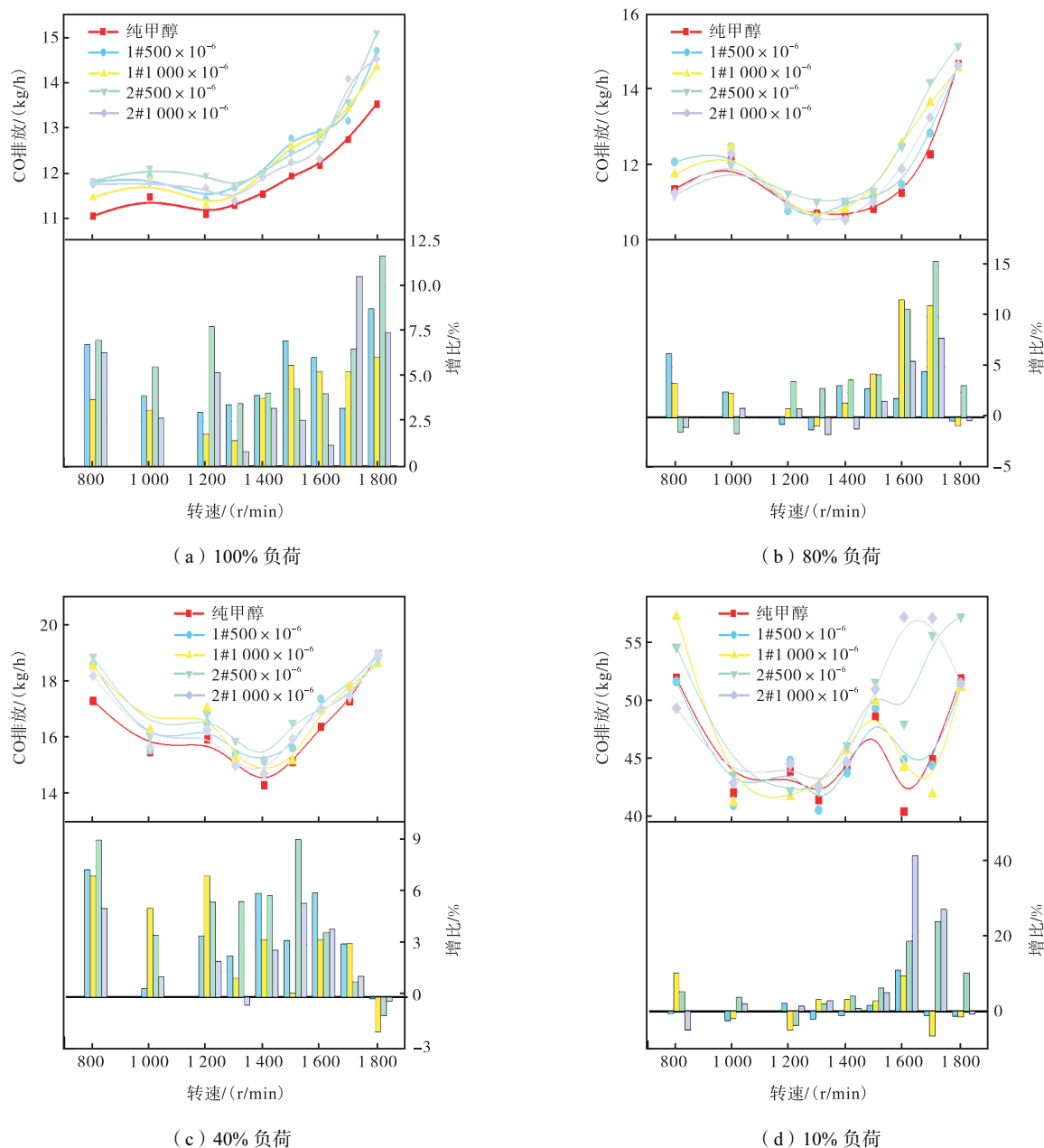


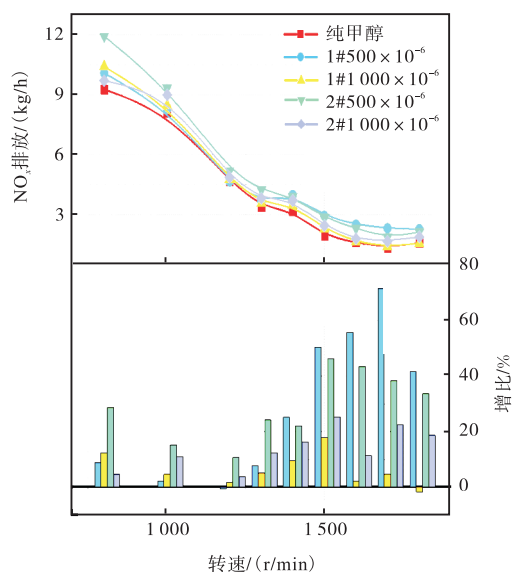
图 9 不同燃料在不同负荷下 CO 排放与转速的关系

Fig.9 CO emission versus rotational speed for different fuels at different loads

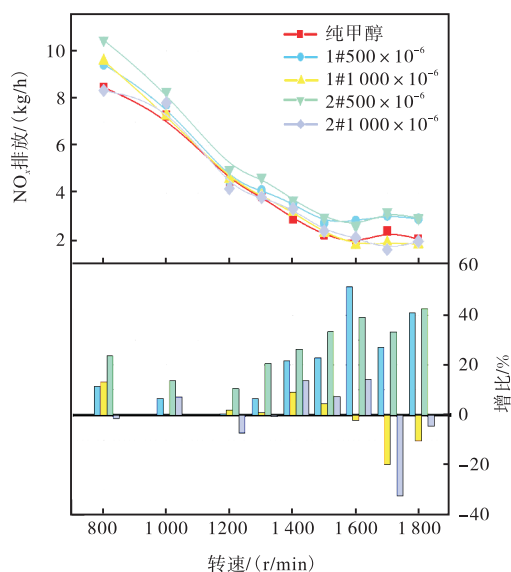
生完全裂解,产生的产物是 CO 而非完全氧化为 CO_2 ^[19]. 另外,由于两种添加剂均含有大量大分子成分,这些大分子成分在燃烧后期扩散速率较低,从而可能导致在排气阶段仍有部分大分子碎片在排气管中与残余的 O_2 氧化生成 CO.

图 10 为不同负荷下 5 种燃料的 NO_x 排放与转速变化的关系. 中高负荷时,几种燃料的 NO_x 排放都随着转速升高而降低;10% 负荷时, NO_x 排放随着转速升高而有较大波动, NO_x 排放先升高再降低再升高. 从图 10(b)、(c)、(d)中可以看到,添加 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的 1#甲醇添加剂的燃料在中低负荷、转速较高时

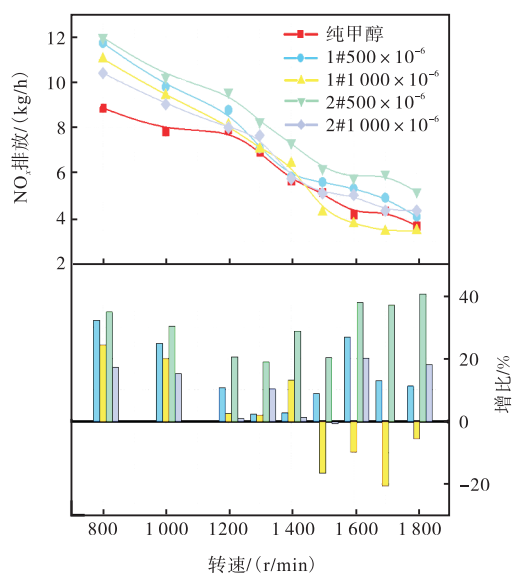
NO_x 排放最低, NO_x 排放比纯甲醇最高可降低 20.9%,但转速较低时其 NO_x 排放仍高于纯甲醇. 但除添加 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的 1#甲醇添加剂的燃料之外的其他 3 种甲醇添加剂燃料的 NO_x 排放均高于纯甲醇. 高温、富氧及反应持续时间是影响 NO_x 排放的主要因素,转速较低时由于含添加剂的 4 种燃料的缸内燃烧温度比纯甲醇高,反应持续时间也比甲醇更长,因此其 NO_x 排放更高;高转速时由于添加 $1\,000 \times 10^{-6}$ 1#添加剂的燃料缸内温度比纯甲醇更低,且反应持续时间也较短,有效地抑制了热力型 NO_x 的生成路径^[37],因此其 NO_x 排放较低.



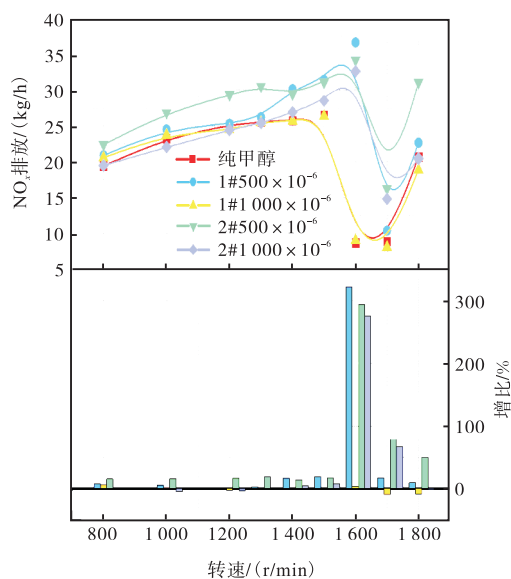
(a) 100% 负荷



(b) 80% 负荷



(c) 40% 负荷



(d) 10% 负荷

图 10 不同燃料在不同负荷下 NO_x 排放与转速的关系Fig.10 NO_x emission versus rotational speed for different fuels at different loads

图 11 为 5 种燃料的 THC 排放在不同负荷下与转速的变化关系. 图中表明, 100% 负荷时, THC 排放趋势变化呈现为随转速升高先较为平缓后下降; 中等负荷时, THC 排放随转速升高先降低后升高再降低; 低负荷时, THC 排放整体呈下降的趋势. 从图 11 (b)、(c) 中也可以看出, 在中低负荷的中低转速时, 添加 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的 1# 甲醇添加剂的燃料的 THC 排放最低, 最低可以比纯甲醇降低 5%~7%, 但在高转速时, 其 THC 排放仍较高; 另外 3 种甲醇添加剂燃料的 THC 排放均比纯甲醇高.

中低负荷的中低转速工况下, 1# 添加剂中的酯型润滑剂和聚醚胺类清净剂发挥协同作用^[33], 在金属表面形成稳定的吸附膜, 使活塞与缸套的配合更紧密, 减少了未燃的燃料的窜漏量, 同时清净剂防止积碳生成, 使燃料在燃烧室内燃烧更充分, 减少了 THC 排放^[35]. 在高转速下, 由于发动机热负荷和机械负荷增加, 添加剂生成的膜受到破坏, 导致 THC 排放升高. 而 2# 添加剂的胺型润滑剂形成的膜更容易被破坏^[36], 因此 THC 排放较高.

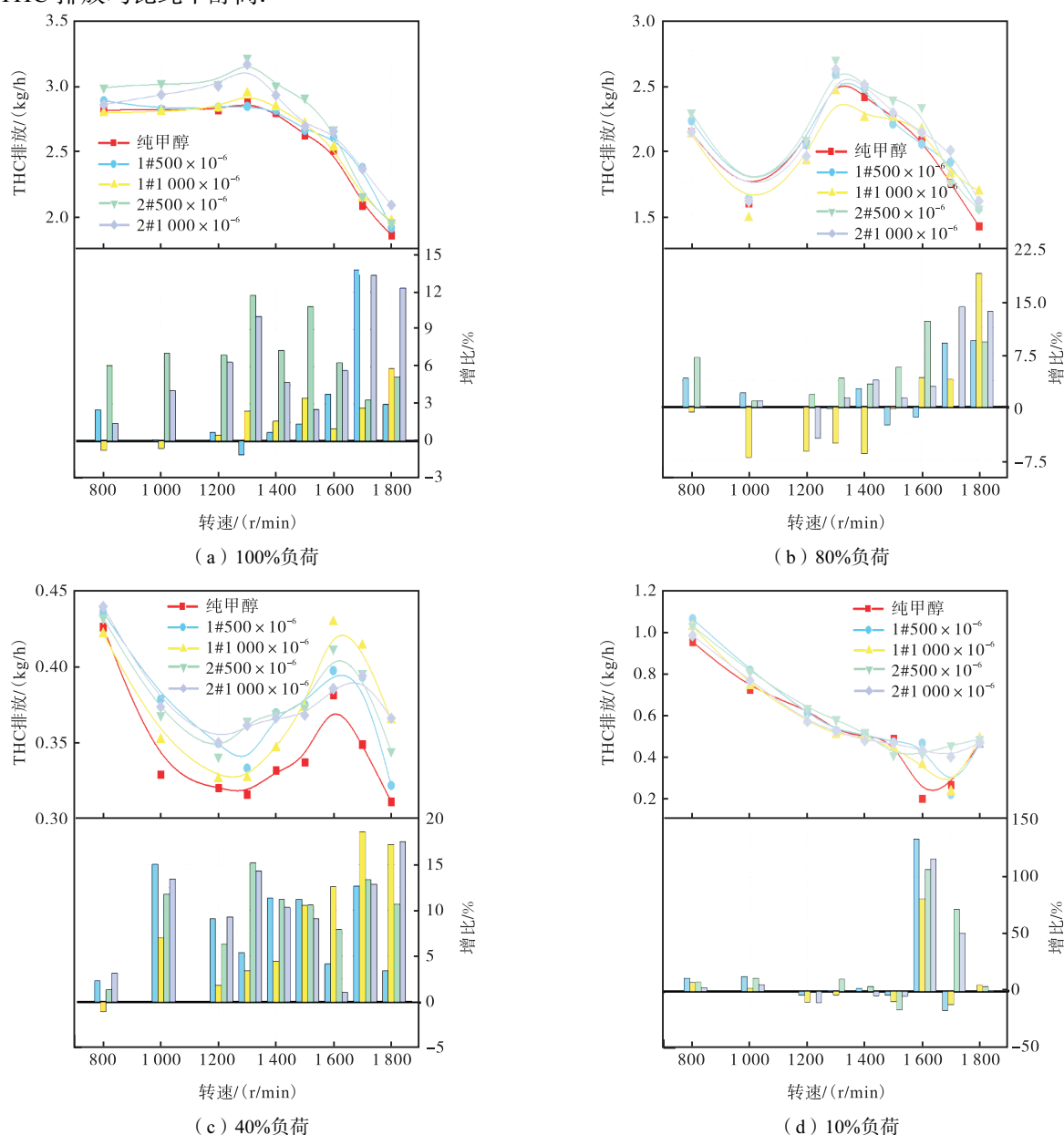


图 11 不同燃料在不同负荷下 THC 排放与转速的关系

Fig.11 THC emission versus speed for different fuels at different loads

3 结论

(1) HFRR 测试和模拟进气阀沉积物生成过程测

试的结果显示, 由于 1# 添加剂成分中含有的酯型润滑剂较 2# 添加剂含有的胺型润滑剂具有更好的抗磨性能, 导致 1# 添加剂测试的钢片表面磨斑直径比 2#

添加剂测试的磨斑直径降低 4.9%；由于酯型润滑剂与聚醚胺类清净剂之间的沉积物控制协同作用，使 1# 添加剂的清净作用更好，其沉积物生成量仅为 2# 添加剂的 20%。

(2) 从燃烧性能方面看，在转速为 1 200 r/min 和 1 400 r/min 时，纯甲醇的缸压、放热率和缸内温度与其他 4 种含添加剂的燃料相比偏低，其中 1# 1 000 × 10⁻⁶ 燃料的缸内温度最高，且其 CA10 和 CA50 都较短，燃烧相位比较靠前，放热较集中；在转速为 1 700 r/min 时，纯甲醇的缸压、放热率和缸内温度较中低转速与其他 4 种燃料相比有了明显提高，此时纯甲醇燃烧的缸内温度最高。

(3) 从经济性方面看，与纯甲醇相比，1# 甲醇添加剂对发动机的醇耗量具有较好的降低作用，其中添加质量分数为 1 000 × 10⁻⁶ 的 1# 甲醇添加剂降低醇耗的效果最好，平均可达 3% 以上；2# 甲醇添加剂对发动机的醇耗量并没有改善作用。

(4) 从排放性能方面看，与纯甲醇相比，两种不同浓度甲醇添加剂的加入对发动机 CO 排放并没有改善作用；添加质量分数 1 000 × 10⁻⁶ 的 1# 甲醇添加剂在发动机中低负荷、高转速时对 NO_x 排放具有一定改善作用，降低 NO_x 排放比例最高可达到 20.9%；添加质量分数 1 000 × 10⁻⁶ 的 1# 甲醇添加剂在发动机中低负荷、中低转速时使 THC 排放有少量降低，可达 5% ~ 7%。

随着发动机应用场景的精细化分层，未来燃油添加剂需针对不同动力平台的运行特征进行定制化设计：对于发电机组、船舶辅机等长期运行于低转速、稳态负荷工况的发动机，添加剂开发应聚焦低转速燃烧优化，从而在保持 NO_x 排放的前提下提升燃油经济性；而面向工程机械、混动系统增程器等高频变工况应用场景，需开发高转速适配型添加剂，重点提升高温抗爆震性能与动态喷射控制能力。此外，针对氢甲醇双燃料、氨/柴油掺混等新型燃烧模式，需突破极性燃料兼容性的技术瓶颈。

参考文献：

- [1] 张璇, 刘海峰, 尧命发. 自燃着火与火焰传播的判别方法研究综述[J]. 燃烧科学与技术, 2025, 31(2): 188-196.
Zhang Xuan, Liu Haifeng, Yao Mingfa. Review of identification methods for spontaneous ignition and deflagration[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2025, 31(2): 188-196 (in Chinese).
- [2] 毕翔云. 内燃机的代用燃料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
Bi Xiangyun. *Alternative Fuels for Internal Combustion Engines* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1990 (in Chinese).
- [3] 云亮, 徐建玲. 二氧化碳加氢制甲醇在氯碱行业的可行性探讨[J]. 中国氯碱, 2023(10): 58-62.
Yun Liang, Xu Jianling. Feasibility study of carbon dioxide hydrogenation to methanol in chlor-alkali industry[J]. *China Chlor-Alkali*, 2023(10): 58-62 (in Chinese).
- [4] Irena. Innovation Outlook: Renewable Methanol[R]. Bonn: International Renewable Energy Agency, 2021.
- [5] 徐一森, 尧命发, 王许, 等. 重型甲醇直喷点燃发动机燃烧系统开发数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2025, 31(3): 322-330.
Xu Yisen, Yao Mingfa, Wang Hu, et al. Numerical simulation of combustion system development for heavy duty methanol direct spark ignition engine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2025, 31(3): 322-330 (in Chinese).
- [6] 刘海峰, 王冠月, 文铭升, 等. 喷油压力和进气温度对氨/正十二烷双燃料发动机燃烧稳定性影响研究[J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(1): 1-8.
Liu Haifeng, Wang Guanyue, Wen Mingsheng, et al. Influence of injection pressure and intake temperature on combustion stability of ammonia/n-dodecane dual-fuel engine[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(1): 1-8 (in Chinese).
- [7] 周芳芳. 465Q 甲醇发动机的性能与排放研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
Zhou Fangfang. Research on the Performance and Emission of 465Q Methanol Engine [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007 (in Chinese).
- [8] Sayin C, Kilicaslan I, Canakci M, et al. An experimental study of the effect of octane number higher than engine requirement on the engine performance and emissions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(8/9): 1315-1324.
- [9] 程传辉. 甲醇在压燃式发动机上的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
Cheng Chuanhui. Research on the Application of Methanol in Compression-Ignition Engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009 (in Chinese).
- [10] Gamino B, Aguilon J. Numerical simulation of syngas combustion with a multi-spark ignition system in a diesel engine adapted to work at the Otto cycle[J]. *Fuel*, 2010, 89(3): 581-591.

- [11] Pourkhesalian A M, Shamekhi A H, Salimi F. Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comparative study of performance and emissions characteristics[J]. *Fuel*, 2010, 89(5): 1056-1063.
- [12] 祁志敏, 石红, 祝月艳. 中国甲醇汽车产业发展现状分析及推广建议[J]. 时代汽车, 2023(21): 4-6.
Qi Zhimin, Shi Hong, Zhu Yueyan. Analysis of the development status quo of methanol vehicle industry in China and suggestions for its promotion[J]. *Times Automobile*, 2023(21): 4-6(in Chinese).
- [13] 王娜, 国建胜, 胡坚南, 等. 甲醇在重型卡车的应用现状及未来发展趋势[J]. 专用汽车, 2025(6): 1-4.
Wang Na, Guo Jiansheng, Hu Jiannan, et al. Current status and future development trend of methanol application in heavy-duty trucks[J]. *Specialized Vehicles*, 2025(6): 1-4(in Chinese).
- [14] 李书福. 绿色甲醇汽车发展路径[J]. 中国能源报, 2023(5): 6-16.
Li Shufu. Green methanol vehicle development path[J]. *China Energy News*, 2023(5): 6-16(in Chinese).
- [15] 李智, 魏同, 王馨铁, 等. 船用甲醇燃料的应用与分析[J]. 绿色科技, 2025, 27(6): 269-274, 280.
Li Zhi, Wei Tong, Wang Xintie, et al. Application and analysis of marine methanol fuel[J]. *Green Technology*, 2025, 27(6): 269-274, 280(in Chinese).
- [16] 全国醇醚燃料标准化技术委员会(SAC/TC 414). M100 车用甲醇燃料: GB/T 42416—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
National Technical Committee for Standardization of Alcohol Ether Fuels(SAC/TC 414). M100 Automotive Methanol Fuel: GB/T 42416—2023[S]. Beijing: China Standard Press, 2023(in Chinese).
- [17] 全国醇醚燃料标准化技术委员会(SAC/TC 414). M100 车用甲醇燃料添加剂: GB/T 42436—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
National Technical Committee for Standardization of Alcohol Ether Fuel(SAC/TC 414). M100 Methanol Fuel Additives for Vehicles: GB/T 42436—2023[S]. Beijing: China Standard Press, 2023(in Chinese).
- [18] 王鑫, 程浩楠, 朱启兴. 烃类添加剂对 M100 甲醇发动机冷起动性能影响研究[J]. 测试技术学报, 2021, 35(4): 323-326, 357.
Wang Xin, Cheng Haonan, Zhu Qixing. Study on the effect of hydrocarbon additives on the cold starting performance of M100 methanol engine[J]. *Journal of Testing Technology*, 2021, 35(4): 323-326, 357(in Chinese).
- [19] 李竞克. 燃料添加剂对缸内直喷甲醇发动机非常规排放的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
Li Jingke. Effects of Fuel Additives on Unconventional Emissions of Direct Injection Methanol Engines[D]. Changchun: Jilin University, 2011(in Chinese).
- [20] 陈天翔. 添加苯胺对缸内直喷甲醇发动机颗粒物排放的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Chen Tianxiang. Effect of Adding Aniline on Particulate Emissions of In-Cylinder Direct Injection Methanol Engine[D]. Changchun: Jilin University, 2015(in Chinese).
- [21] 郭宝圣, 任长合, 徐进, 等. 甲醇汽油添加剂对汽油机性能的影响[J]. 内燃机, 2015(3): 17-19.
Guo Baosheng, Ren Changhe, Xu Jin, et al. Effects of methanol gasoline additives on gasoline engine performance[J]. *Internal Combustion Engine*, 2015(3): 17-19(in Chinese).
- [22] Makoto Kato, Kouzou S. Additive for Methanol Fuel Oil: JPH02194090A[P]. 1990-07-31.
- [23] 胡红, 姚斐, 谢振华. 一种 M100 车用甲醇燃料添加剂及其应用: CN101747958A[P]. 2010-06-23.
Hu Hong, Yao Fei, Xie Zhenhua. An M100 Automotive Methanol Fuel Additive and Its Application: CN101747958A[P]. 2010-06-23(in Chinese).
- [24] Chang W, Wang C, Wu Y, et al. Study on the mechanism of influence of cetane improver on methanol ignition[J]. *Fuel*, 2023, 354: 129383.
- [25] Liu H, Li M, Wei H, et al. Effects of Injection Parameters and EHN Mixing on the Combustion Characteristics of Fueling Pure Methanol in a Compression Ignition Engine[J]. *Processes*, 2024, 12(1): 48.
- [26] Liu H, Zhang X, Zhang Z, et al. Effects of 2-ethylhexyl nitrate(EHN) on combustion and emissions on a compression ignition engine fueling high-pressure direct-injection pure methanol fuel[J]. *Fuel*, 2023, 341: 127684.
- [27] Wang C, Liu H, Zhang M, et al. Experimental and kinetic modeling studies on oxidation of methanol and di-tert-butyl peroxide in a jet-stirred reactor[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 258: 113093.
- [28] 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, 2011, 32(2): 57-62.
Wang Ying, Zheng ZhaoLei, He Zuwei, et al. Effects of additives on the combustion of methanol in homogeneous charge compression ignition[J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2011, 32(2): 57-62(in Chinese).

- nese).
- [29] 朱自强, 毛顺德, 王建忠. 柴油机用甲醇燃料添加剂及含有该添加剂的柴油机用甲醇燃料: CN101486940B [P]. 2012-08-08.
- Zhu Ziqiang, Mao Shunde, Wang Jianzhong. Methanol Fuel Additive for Diesel Engine and Methanol Fuel Containing the Same for Diesel Engine: CN101486940B [P]. 2012-08-08 (in Chinese).
- [30] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会 (SAC/TC 124). 柴油润滑性评定用高频往复试验机: GB/T 35137—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Technical Committee for Standardization of Industrial Process Measurement Control and Automation (SAC/TC 124). High-Frequency Reciprocating Tester for Diesel Fuel Lubricity Evaluation: GB/T 35137—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017 (in Chinese).
- [31] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会石油燃料和润滑剂分技术委员会 (SAC/TC 280/SC 1). 车用柴油: GB 19147—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Technical Committee for Standardization of Petroleum Products and Lubricants Sub-Technical Committee on Petroleum Fuels and Lubricants (SAC/TC 280/SC 1). Automotive Diesel Fuel: GB 19147—2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016 (in Chinese).
- [32] 胡颖, 尹雪峰, 常和, 等. 化学链燃烧中载氧体磨损和产生积碳的机制及抑制方法[J]. 过程工程学报, 2020, 20(5): 493-502.
- Hu Ying, Yin Xuefeng, Chang He, et al. Mechanisms and inhibition methods of oxygen carrier wear and carbon generation in chemical chain combustion[J]. *Journal of Process Engineering*, 2020, 20(5): 493-502 (in Chinese).
- [33] 张恒通, 牛松, 林树东. 不同分子结构分散剂的研究进展[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(1): 9-23.
- Zhang Hengtong, Niu Song, Lin Shudong. Research progress of dispersants with different molecular structures[J]. *Materials Research and Application*, 2023, 17(1): 9-23 (in Chinese).
- [34] 姜宇昊. 甲醇发动机结构化关键摩擦副润滑摩擦性能影响研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- Jiang Yuhao. Study on the Influence of Lubrication and Friction Performance of Key Friction Substitutes in Methanol Engine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021 (in Chinese).
- [35] 赵燕, 李维民, 王晓波, 等. 合成酯型摩擦改进剂的制备及摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 610-617.
- Zhao Yan, Li Weimin, Wang Xiaobo, et al. Preparation and tribological properties of synthetic ester-type friction modifiers[J]. *Journal of Tribology*, 2017, 37(5): 610-617 (in Chinese).
- [36] 李秀峰. 含氮长链烷基苯硼酸胺盐衍生物润滑油添加剂的合成及其摩擦学性能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- Li Xiufeng. Synthesis of Nitrogen-Containing Long-Chain Alkyl Phenylboronic Acid Amine Salt Derivatives as Lubricant Additives and Study of Their Tribological Properties[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2014 (in Chinese).
- [37] Wang Z, Yang X. NO_x formation mechanism and emission prediction in turbulent combustion: A review[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(14): 6104.