

DOI:10.11784/tdxbz202305028

## 商用纯甲醇发动机的非常规排放特性研究

魏衍举, 石自航, 张亚杰, 刘圣华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

**摘要:** 甲醇作为一种清洁、来源广泛的碳中性燃料, 可有效助力我国“双碳”战略目标的实现。本文在一台由天然气机改造而来的进气道喷射火花点燃式纯甲醇商用发动机上研究了负荷、转速、废气再循环(EGR)率及喷油策略对非常规甲醇甲醛排放的影响。对不同工况下所采尾气由 GC-2010 气相色谱仪直接进行检测。检测过程组合使用非放射性脉冲放电氦离子化检测器(PDHID)和氢火焰离子化检测器(FID), 并使用 Gs-OxyPLOT 强极性毛细柱, 提高了出检速度和准确率。结果表明: 发动机非常规排放物主要为甲醇和甲醛, 其排放量最高分别可达  $5\ 000\times 10^{-6}$  和  $1\ 000\times 10^{-6}$ , 二者占污染物总量的 97%。喷射策略会直接影响甲醇/空气混合气的形成质量, 进一步影响到缸内的燃烧质量, 进而对非常规排放造成影响, 最佳喷射时刻(360 °CA)对应的热效率(BTE)比最低热效率提升了约 5%, 而对应的甲醇和甲醛排放可降低为原来的 50%。此外, 将甲醇直接向进气阀背面喷射可提升雾化质量, 从而使排放降低。此外甲醛来源于未燃甲醇的后氧化过程, 发动机转速、负荷以及 EGR 率本质上通过影响缸内及排气管中的温度以及尾气的停留时间来影响未燃甲醇和甲醛的排放。随着排气温度的升高, 未燃甲醇排放降低, 而甲醛排放先增加后降低。

**关键词:** 纯甲醇; 商用发动机; 非常规排放; 废气再循环

中图分类号: TK46

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)10-1022-08

## Unregulated Emission Characteristics of a Heavy-Duty Pure Methanol Engine

Wei Yanju, Shi Zihang, Zhang Yajie, Liu Shenghua

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Methanol is a clean and widely used alternative fuel for engines, which can effectively help in realizing “dual carbon” targets for China. In this study, an engine test was conducted on a heavy-duty intake jet spark ignition pure methanol engine with exhaust gas recirculation (EGR) to investigate the effects of engine load and speed, EGR ratio, and injection strategy on unregulated emissions. A GC-2010 gas chromatography analyzer, a nonradioactive pulsed discharge helium ionization detector (PDHID), and a hydrogen flame ionization detector (FID) were used to measure unregulated emissions. Moreover, Gs-OxyPLOT was used to improve the detection speed and accuracy. Results show that the highest emissions of methanol and formaldehyde can reach  $5\ 000\times 10^{-6}$  and  $1\ 000\times 10^{-6}$ , respectively, account for 97% of the total unregulated emissions. The injection strategy directly affects formation of a mixture of methanol and air, followed by the combustion in the cylinder and unregulated emissions. The optimal injection time is 360 °CA, where the brake thermal efficiency (BTE) increases by 5% of the lowest value, while the corresponding methanol and formaldehyde emissions are reduced to 50%. Additionally, spraying methanol directly into the back of the intake valve can improve the atomization quality, thereby reducing emissions. Formaldehyde is derived from the postoxidation of unburned methanol. The engine speed, load, and EGR rate essentially affect methanol and formaldehyde emissions by affecting the temperature in the cylinder and exhaust pipe and the residence

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-12-26.

作者简介: 魏衍举 (1982—), 男, 博士, 副教授.

通信作者: 魏衍举, weiyanju@xjtu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176128); 陕西省重点研发计划资助项目(2019ZDLGY15-10).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52176128), the Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (No. 2019ZDLGY15-10).

time of the exhaust. As the exhaust temperature rises, unburned methanol emissions decrease, whereas formaldehyde emissions first increase and then decrease.

**Keywords:** pure methanol; heavy-duty engine; unregulated emission; exhaust gas recirculation (EGR)

在“双碳”战略大背景下,一次化石能源被打上了“限用”标签,为石油燃料所设计的热工转换机械装置——内燃机面临被淘汰的危险.因此燃料的低碳化和无碳化成为内燃机重生的必然选择.作为二次能源,甲醇和氢、氨、电池一样,都是能量的载体,不同的是氢、氨为零碳燃料,而甲醇若通过风电、光电、地热等清洁能源电解制氢并与在大气中捕获二氧化碳(CO<sub>2</sub>)合成的方式制取,则为碳中性燃料.因此,甲醇也是符合“双碳”战略的未来燃料.而且甲醇常温下为液体,能量密度高,安全性好,易存储、运输,加油体系可与现有汽柴油体系完美融合.应用时对现有发动机改动小,排放水平低,可轻易满足未来排放法规要求,是最有前景的未来发动机燃料.

甲醇是一种出色的火花点火发动机燃料,它具有低碳高含氧量、高层流火焰速度和高汽化热等物理和化学特性.其中,高含氧量和缺乏 C—C 键可以减少常规排放,例如 CO、HC 和 PM<sup>[1]</sup>.此外,由于高汽化热,可以有效冷却缸内温度,提高充气效率,减少爆震<sup>[2]</sup>.此外,由于层流火焰速度高,可以加快燃烧速度,有助于提高热效率和燃烧稳定性<sup>[3]</sup>.

自 20 世纪 70 年代以来,国内外各研究机构针对低比例(如 M5、M10、M15、M20)和高比例(如 M85、M100)甲醇汽油混合燃料、甲醇柴油双燃料发动机进行了大量的研究.研究结果均表明掺混甲醇后发动机排放大量的醇醛类非常规排放物<sup>[4-11]</sup>,尤其是大量的甲醛排放,对环境以及人类健康会形成严重威胁.

通常,由喷射策略控制的混合物形成对进气道喷射(port fuel injection, PFI)和缸内直喷(direct injection, DI)式甲醇发动机的排放性能有明显影响<sup>[8,11-12]</sup>.Gong 等<sup>[12]</sup>的研究表明,当喷射和点火时间延迟时,甲醛和未燃甲醇排放量具有相反的趋势.天津大学

刘宗宽等<sup>[13]</sup>开展了预燃室结构对湍流射流点火甲醇发动机性能和燃烧特性的影响研究,发现斜三孔预燃室的使用可使发动机获得更好的燃烧和排放性能.然而,关于喷射策略对 PFI 纯甲醇发动机的非常规排放影响的研究,特别是在使用预混均质混合气和火花点火系统时,废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)的影响却鲜见报道<sup>[14]</sup>.EGR 与当量比燃烧相耦合,仅利用三元催化器(tree way catalytic converter, TWC)后处理即可达到满意的排放水平<sup>[15]</sup>.此外, EGR 可显著降低部分负荷下的泵气损失和传热损失,有助于提高热效率<sup>[16-18]</sup>.

以往的研究主要围绕 4 缸及以下的乘用车发动机展开,所用燃料也主要是掺混甲醇的混合燃料,对于纯甲醇燃料商用发动机的研究尚处于起步阶段,大量相关研究需要深入开展.对带有 EGR 系统的纯甲醇重型发动机的非常规排放特性研究具有十分重大的现实意义.因此,为了确定最佳 EGR 策略,需要 EGR 条件下的非常规排放特性进行研究.

本文在一台带有 EGR 系统的进气道喷射火花点火(spark ignition, SI)纯甲醇商用发动机上进行了台架实验,研究了喷射策略、EGR 率、发动机负荷和转速对其非常规排放特性的影响,该研究对控制重型纯甲醇火花点火发动机的非常规排放具有重要价值.

## 1 实验步骤与方法

### 1.1 实验台架

在本研究中,所用发动机为玉柴 K11N 天然气发动机改装的进气道喷射火花点火重型纯甲醇发动机,其主要参数如表 1 所示,图 1 为该发动机实验台架示意.

表 1 发动机规格参数

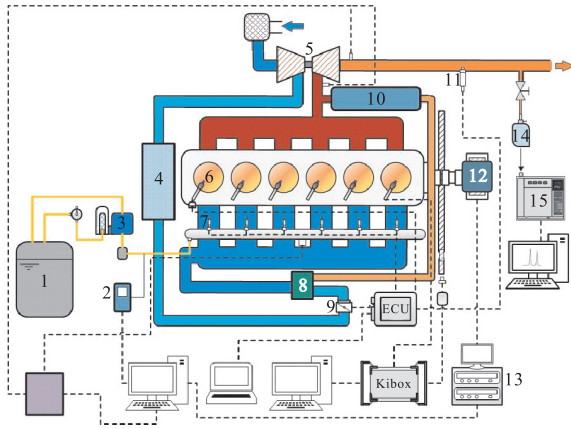
Tab.1 Engine specifications

缸径×行程/ (mm×mm)	排量/ L	压缩比	各缸气门数/ 个	进、排气提前角/ (°CA)	进、排气迟闭角/ (°CA)	额定转速/ (r/min)	最大扭矩/ (N·m@r/min)	最大功率/ (kW@r/min)
123×154	11	11.5	4	12.5(BTDC)/ 17.5(ABDC)	50.5(BBDC)/ 11.5(ATDC)	1 900	1 900@(1 000~1 400)	298@1 700

该甲醇发动机采用了结合高压 EGR 和三元催化转化的化学当量比燃烧的技术路径.氧传感器型号为 BOSCH 生产的 LSU4.9,测功机为湘仪 400 kW 电涡流式测功机(QW400).甲醇流量由西门子生产

的 Coriolis 质量流量计 FC300 控制.排气温度由 K 型热电偶测量,排气压力由压电式压力传感器检测.采用两个 Kistler 6052C 压力传感器分别测量 1 缸和 4 缸的缸内压力,缸压数据通过 Kibox 燃烧分析

仪采集并处理,每个工况均采集 100 个连续循环缸压数据.曲轴转角由 Kistler 2619A11 曲轴转角适配器测量,测量精度为 0.1°CA.



1—甲醇燃料箱; 2—油耗仪; 3—甲醇流量计; 4—增压中冷器; 5—涡轮增压器; 6—火花塞及缸压传感器; 7—喷油器; 8—EGR 阀; 9—节气门; 10—EGR 中冷器; 11—氧传感器; 12—涡流测功仪; 13—发动机控制系统; 14—FEP 采样袋; 15—GC-2010 气相色谱仪

图 1 发动机实验台架示意 Fig.1 Schematic of the experimental setup

1.2 关键参数的定义

本研究发动机转速范围为 1 000 ~ 1 700 r/min, 负荷为 40% ~ 80%. EGR 率通过节气门开度进行调节, 其计算公式为

r\_EGR = (c\_CO2,in - c\_CO2,atm) / (c\_CO2,ex - c\_CO2,atm) \* 100%

式中 c\_CO2,atm、c\_CO2,in 和 c\_CO2,ex 分别为环境、进气和排气中的二氧化碳浓度.

实验过程中,中冷器后的进气温度和冷却液温度分别控制在 (50 ± 1) °C 和 (85 ± 2) °C 范围内. 甲醇喷射压力为 500 kPa. 最佳点火正时定义为缸内压力振荡的最大振幅不超过 0.1 MPa 时的点火提前角. 爆震极限点火提前角定义为当 100 个连续循环中的超过两个爆燃循环数的点火提前角.

1.3 非法规污染物检测方法

甲醇甲醛等非法规污染物利用岛津 GC-2010 气相色谱仪进行检测,采用色谱仪非放射性脉冲放电氦离子化检测器(PDHID)和氢火焰离子化检测器(FID)双检测器联合检测[19]. 色谱柱为采用安捷伦 Gs-OxyPLOT (10 m × 0.53 mm × 10 μm) 强极性毛细柱. 色谱仪操作条件为:分流比 5 : 1、载气流速 100 cm/s (11.5 mL/min),柱温 90 °C (保留 1 min),以 20 °C/min 加热到 190 °C. 发动机排气用 FEP 采样袋收集后置于温度箱中加热至 80 °C 后进行检测. 色谱仪载气为

He(纯度 99.999%) 掺混 2% 氩气, FID 燃烧气为 99.999% 高纯氢气. 图 2 给出了 2 种检测器对发动机尾气检测响应的色谱图.

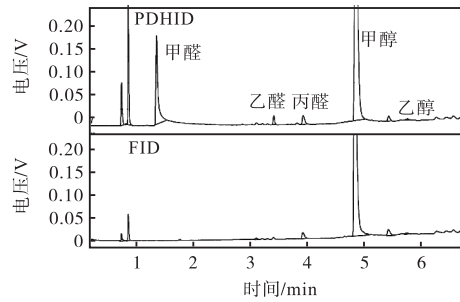


图 2 PDHID 和 FID 检测器分别对发动机排气的响应色谱图 Fig.2 Chromatograms of the PDHID and FID detectors on engine emissions

2 结果与讨论

2.1 非正规排放物成分

甲醇发动机未燃有机排放产物成分比较单一,理论上只有未燃甲醇、甲醛和甲酸,其中甲酸为低温氧化产物,冷起动时较多,正常发动机运行工况下检测不出. 图 3 给出了发动机 40% 负荷、1 000 r/min 和 EGR 率为 20% 工况下非正规排放物的组成成分. 其主要成分为甲醇和甲醛,占比分别为 77.8% 和 19.2%, 二者共占总排放约 97%. 此外还有少量乙醇、乙醛、丙醛和丙酮等低碳含氧有机物,一般情况下乙醇和乙醛考虑来自于燃料中乙醇杂质,而丙醛、丙酮甚至更高碳数含氧有机物来自润滑油蒸汽燃烧. 本研究重点关注甲醇与甲醛的排放特性.

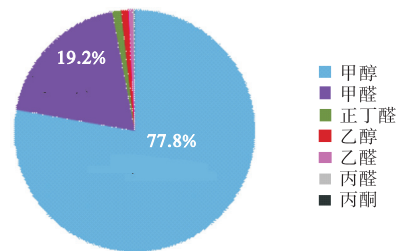


图 3 非正规排放物成分 Fig.3 Unregulated emission components

2.2 负荷与 EGR 的影响

2.2.1 甲醇排放

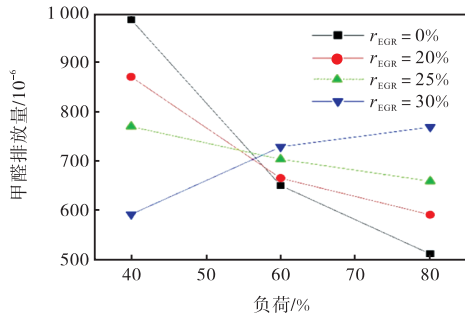
进气道喷射火花点火甲醇发动机工作原理与汽油机相同,为甲醇均质混合气燃烧,因而其甲醇、甲醛排放机理与汽油机的未燃碳氢排放相同. 但是,由于甲醇燃烧无烟及与润滑油互不溶解,排气中的未燃

甲醇可能只有两种产生途径,即是狭隙效应和壁面淬熄. 正常工况下,由于甲醇火焰传播速度快且着火范围宽,其淬熄层比汽油薄,而且火焰淬熄导致的未燃甲醇在膨胀和排气冲程中可以完全燃氧化<sup>[20]</sup>,甲醇发动机的未燃甲醇排放主要来自于狭隙效应. 但随着 EGR 率的增加,火焰温度与其传播速度均降低,火焰传播容易中断,壁面淬熄层厚度增加,未燃甲醇排放占比逐渐增加. 根据阿累尼乌斯公式,该甲醇排放量可以表示为

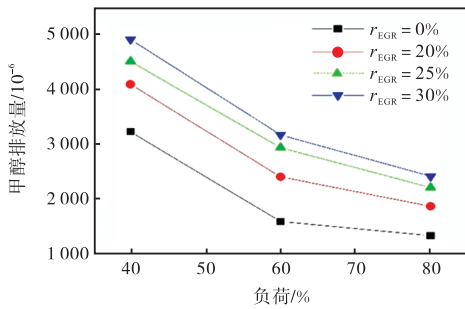
$$c_{ex} \propto (c_c + c_q) \left[ 1 - T^n e^{-\frac{E_0}{RT}} \cdot t \right] \quad (2)$$

式中:  $c_c$ 、 $c_q$  分别为狭隙效应(crevice effect)和壁面淬熄(quenching)导致的未燃甲醇浓度;  $T$  为气体当地温度;  $n$  为温度指数;  $E_0$  为甲醇氧化活化能;  $t$  为未燃甲醇在温度  $T$  下停留的时间.

图 4 给出了发动机在不同负荷和 EGR 率下甲醇和甲醛的排放特性. 在发动机检测工况范围内,甲醇排放量高达  $3000 \times 10^{-6}$ ,且随着 EGR 率的增加,  $c_q$  增加,  $T$  降低而氧化量减小,因而甲醇排放量增加至  $5000 \times 10^{-6}$ . 随着发动机负荷增加,  $c_q$  增加,但发动机缸内燃烧温度与排气温度  $T$  均增加,有利于未燃甲醇后氧化,因而其排放量降低,加之气体温度由缸内至排气管流动时逐渐降低,以上多因素综合结果表明,甲醇排放量随发动机排温增加基本呈现线性降低



(a) 甲醛排放



(b) 甲醇排放

图 4 发动机负荷和 EGR 率对甲醇及甲醛排放的影响

Fig.4 Effect of engine load and EGR rate on methanol and formaldehyde emissions

趋势,如图 5 所示.

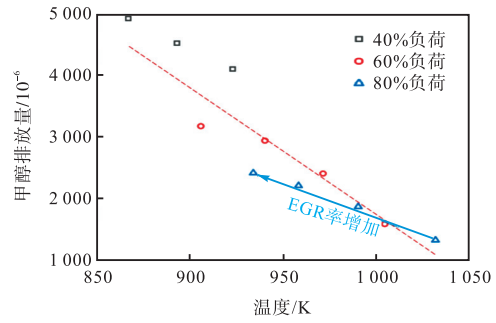


图 5 排气温度对甲醇排放的影响

Fig.5 Effect of exhaust temperature on methanol emission

### 2.2.2 甲醛排放

甲醛是甲醇的氧化中间产物,其排放规律比甲醇复杂. 如图 4 所示,甲醛排放量高达  $500 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ . 当发动机未引入 EGR 时,其排放量随负荷增加而降低,但随着 EGR 率的增加,其降低趋势放缓,并在 EGR 率为 30% 时转变为随负荷增加而增加的趋势.

由于甲醛无法穿越火焰面<sup>[11,20]</sup>,发动机甲醛排放来自于未燃甲醇,在膨胀和排气冲程期间,狭缝中的甲醇混入气流中并被氧化,进而形成甲醛. 膨胀行程,缸内温度较高,甲醇的氧化速率即甲醛的生成速率和甲醛的消耗速率都很高,除完全氧化阶段,不产生可排放甲醛;排气门打开后,排气温度突然降低,并且在排气管中进一步逐渐降低,此时甲醛的生成速率很高,但其消耗速率逐步降低,直至被冻结,生成量与消耗量之差即形成甲醛排放<sup>[4-6]</sup>. 当温度继续降低时,甲醇的氧化过程也逐渐被冻结,排气成分进入稳定状态.

总之,甲醛的生成先于其消耗,加之排气温度逐渐降低,加强了其生成而削弱了其消耗,因此造成甲醛排放随排气温度的升高呈现一种先增加后降低的现象,如图 6 所示. 其中低温端的低排放是由于生成

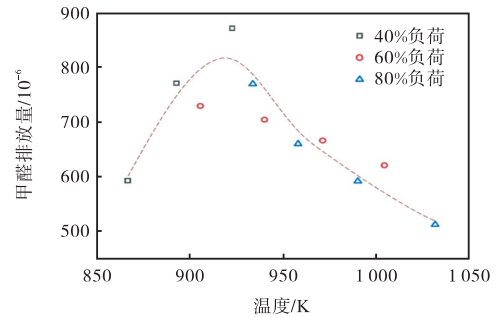


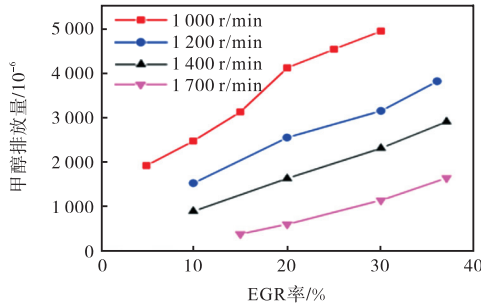
图 6 排气温度对甲醛排放的影响

Fig.6 Effect of exhaust temperature on formaldehyde emission

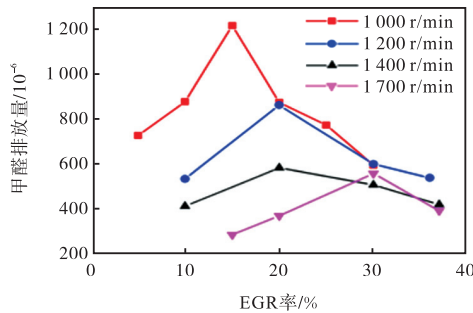
逐渐冻结,而高温端的低排放则是由于消耗量大的缘故.

### 2.3 转速与 EGR 的影响

EGR 率增加可导致发动机燃烧温度降低,而转速增加一方面减少冷却传热从而提高发动机缸内温度,另一方面增加燃烧废气流速从而减少其在燃烧室和排气管高温环境中的停留时间.因而,甲醇和甲醛均随转速的增加而降低.如图 7 所示,随 EGR 率升高,甲醇排放量增加,而甲醛排放则先增加后降低,呈现峰值现象.作为直接因素,温度在二者的排放过程中起到关键性作用,如图 8 所示,甲醇随着温度的升高而降低, $T=950\text{ K}$  为甲醛排放峰值温度.需要说明的是,该温度为指标温度,其值与检测位置有关.



(a) 甲醇排放



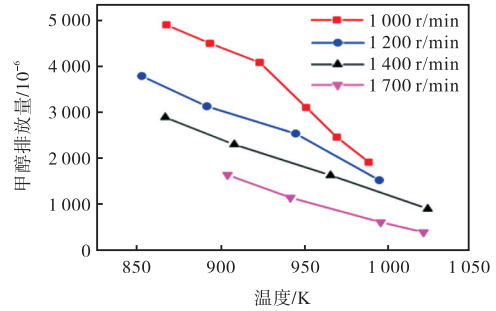
(b) 甲醛排放

图 7 发动机转速和 EGR 率对甲醇和甲醛排放的影响  
Fig.7 Effects of engine speed and EGR ratio on methanol and formaldehyde emissions

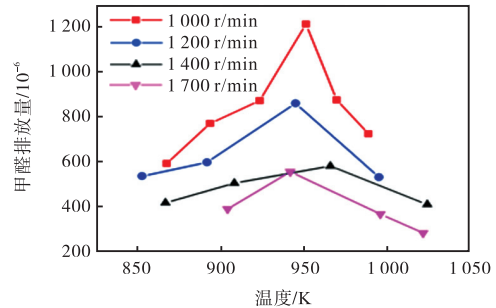
### 2.4 甲醇喷射策略的影响

#### 2.4.1 喷射时刻

甲醇气化潜热高,其喷射时刻对混合气的形成质量具有重要影响.本节考察了甲醇喷射时刻( $\alpha_{mi}$ )对未燃甲醇和甲醛排放的影响.发动机转速为 1400 r/min, EGR 率为 30% 和点火提前角设置为  $33^\circ\text{CA}$ ,此时热效率(BTE)最高.图 9 给出了进、排气门升程与甲醇喷射正时之间的关系.甲醇喷射脉宽为  $168^\circ\text{CA}$ ,以  $60^\circ\text{CA}$  为间隔,共考察了 12 个喷射时刻,其分布如各彩条所示.



(a) 甲醇排放



(b) 甲醛排放

图 8 排气温度对甲醇和甲醛排放的影响  
Fig.8 Effect of exhaust temperature on methanol and formaldehyde emissions

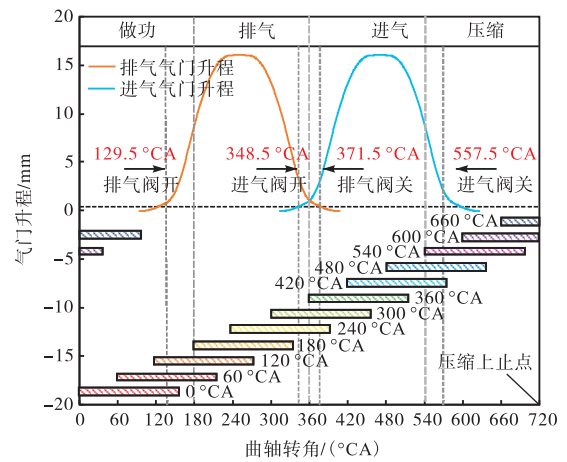


图 9 发动机气门升程随喷射正时的变化关系  
Fig.9 Schematic of valve lift versus injection timing

图 10 给出了不同喷射时刻对发动机有效热效率、甲醇和甲醛排放的影响.从图中可以看出,在换气上止点( $360^\circ\text{CA}$ )喷射甲醇发动机热效率最高,甲醇甲醛排放最低,是最佳喷射角度.此时所有喷射燃油恰好在进气门打开时进入气缸,此时液体甲醇经历的飞行距离最长,有利于充分蒸发,形成混合气. $420^\circ\text{CA}$  时喷射效果稍次之,喷射结束时刻气门也恰好关闭.继续推迟喷射,则甲醇喷射在进气门壁面上,经过后续 3 个冲程时间的加热,可以充分蒸发为气体,有利于混合气的形成与充分燃烧.极端情况出

现在 240 °CA 喷射,此时甲醇喷射完毕时恰好进气门打开,液体燃油未经充分加热即以液态方式流入气缸,这部分甲醇很难燃烧,从而造成热效率下降 0.5%,同时甲醇、甲醛排放分别增加 60%和 110%。在此基础上提前喷醇则有利于气门附壁甲醇进行蒸发,从而提高效率,降低排放。图 11 给出了不同喷射时刻对应的燃烧效率,可以看出,燃烧效率与非常规排放趋势几乎一致,未燃碳氢的增加降低了燃烧效率。

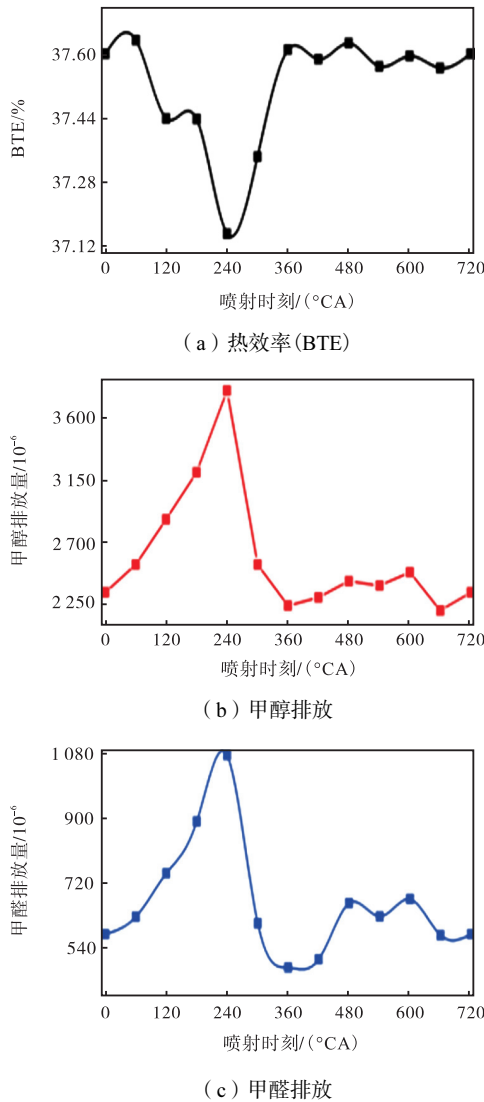


图 10 喷射时刻对热效率(BTE)、甲醇和甲醛排放的影响  
Fig.10 Effect of injection timing on BTE, methanol, and formaldehyde emissions

图 12 给出了不同喷射时刻对应的缸压曲线和放热率曲线。从图中可以看出,喷射时刻对燃烧的影响存在两种不同的效果:换气上止点前(120~240 °CA)喷射甲醇,其燃烧压力与放热率明显低于上止点后喷射(360~720 °CA)。这说明气门的充分加热或足够的飞行距离是甲醇发动机形成混合气的最重要的两个途径,对解决甲醇冷起动问题具有重要的启发意义。

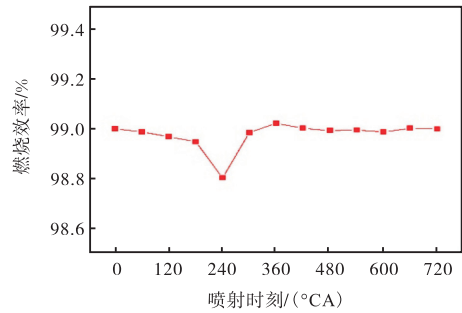


图 11 喷射时刻对燃烧效率的影响  
Fig.11 Effect of injection timing on combustion efficiency

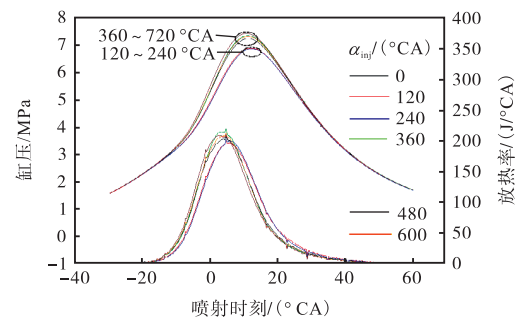


图 12 不同喷射时刻下的缸压和放热率  
Fig.12 In-cylinder pressure and heat release rates at various injection timings

2.4.2 喷射位置

正由于混合气的形成对甲醇喷雾的碰壁与加热状态及飞行路径具有高度敏感性,喷油器的安装位置同样对混合气的形成质量有重要影响。因此,本文将喷油时刻设置为 360 °CA,考察了喷油器安装在不同位置对发动机性能的影响,其安装位置如图 13 所示,原喷油器称为主喷油器,主喷油器下侧为副喷油器。副喷油器距离进气门更远,且将甲醇主要喷射在进气道壁面上而非进气门背面。

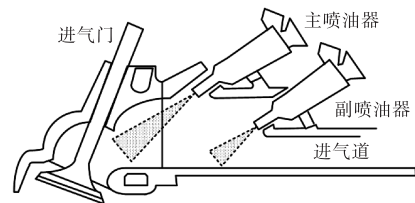
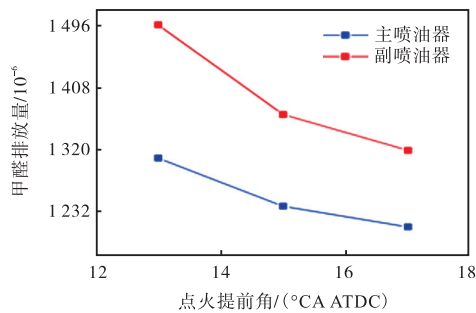


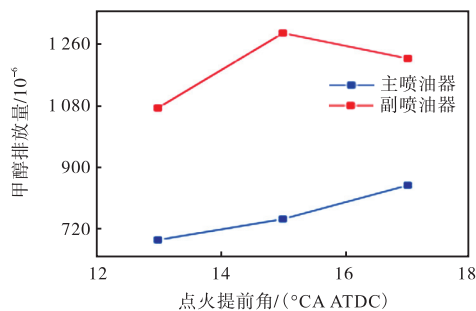
图 13 两个喷油器安装位置示意  
Fig.13 Diagrammatic sketch of the two mounting positions of injectors

图 14 给出了不同喷油器位置对尾气中甲醇、甲醛的排放的影响。从图中可以看出,副喷油器位置喷射时,发动机的甲醇和甲醛排放远高于主喷油器位置喷射。这主要是因为,较之于气门,进气道壁面温度较低,不利于甲醇蒸发,导致混合气形成质量较差,

缸内燃烧质量下降,排放升高。



(a) 甲醛排放



(b) 甲醇排放

图 14 喷射位置对甲醇和甲醛排放的影响

Fig.14 Effects of the injection positions on methanol and formaldehyde emissions

### 3 结 论

本文研究了一台进气道喷射点燃式纯甲醇商用发动机在不同 EGR 率和燃油喷射策略下的非常规排放特性,主要结论如下。

(1) 甲醇发动机非常规排放物主要为甲醇和甲醛,二者一共约占非常规排放物总体的 97%,并且甲醇的浓度可高达  $5\,000 \times 10^{-6}$ ,而甲醛可至  $1\,000 \times 10^{-6}$ 。

(2) 发动机转速、负荷以及 EGR 率本质上通过影响缸内及排气管中的温度以及尾气的停留时间来影响未燃甲醇和甲醛的排放。随着排气温度的升高,未燃甲醇排放降低,而甲醛排放先增加后降低。

(3) 甲醇空气混合气的制备质量取决于较好的壁面加热或者甲醇液滴在空气中的长距离飞行蒸发。喷射策略通过以上 2 个途径间接影响可燃混合气的形成质量。在换气上止点喷射甲醇最为理想,在此基础上推迟喷油效果次之,提前喷油则效果最差,可导致热效率下降 0.5%,甲醇甲醛排放量分别增加 60% 和 110%。此外,将甲醇直接喷向进气门背面可增加甲醇蒸发速率,提高混合气形成质量,从而促进燃烧,降低排放。

### 参考文献:

- [1] Wei J J, Fan C Y, Qiu L, et al. Impact of methanol alternative fuel on oxidation reactivity of soot emissions from a modern CI engine[J]. Fuel, 2020, 268: 117352.
- [2] Miganakallu N, Yang Z, Rogó z R, et al. Effect of water-methanol blends on engine performance at borderline knock conditions in gasoline direct injection engines[J]. Applied Energy, 2020, 264: 114750.
- [3] Chen Z M, Wang L, Zeng K. Comparative study of combustion process and cycle-by-cycle variations of spark-ignition engine fueled with pure methanol, ethanol, and n-butanol at various air-fuel ratios[J]. Fuel, 2019, 254: 115683.
- [4] 孙景震, 姚实聪, 宫宝利, 等. 燃空当量比对甲醇发动机燃烧及非法排放的影响[J]. 车用发动机, 2018(5): 43-48.  
Sun Jingzhen, Yao Shicong, Gong Baoli, et al. Combustion and non-legislation emission of methanol engine under different fuel-air equivalence ratios[J]. Vehicle Engine, 2018(5): 43-48(in Chinese).
- [5] Wei Y J, Liu S H, Liu F J, et al. Formaldehyde and methanol emissions from a methanol/gasoline-fueled spark-ignition(SI)engine[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(3): 3313-3318.
- [6] Geng P, Zhang H, Yang S C, et al. Comparative study on measurements of formaldehyde emission of methanol/gasoline fueled SI engine[J]. Fuel, 2015, 148(15): 9-15.
- [7] Zhu Z Q, Gu H M, Zhu Z, et al. Investigation on mixture formation and combustion characteristics of a heavy-duty SI methanol engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2021(5): 117258.
- [8] Gong C M, Peng L G, Chen Y L, et al. Computational study of intake temperature effects on mixture formation, combustion and unregulated emissions of a DISI methanol engine during cold start[J]. Fuel, 2018, 234(12): 1269-1277.
- [9] 李毅, 高广新, 刘圣华, 等. 环境温度对甲醇/汽油发动机冷启动排放影响的研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(11): 6-10.  
Li Yi, Gao Guangxin, Liu Shenghua, et al. Study on the effect of environmental temperature on the influence of cold starting emissions on methanol/gasoline engines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(11): 6-10(in Chinese).

- [10] 刘方杰, 刘圣华, 魏衍举, 等. 甲醇氧化生成甲醛排放的影响因素[J]. 内燃机学报, 2014, 32(2): 166-171.  
Liu Fangjie, Liu Shenghua, Wei Yanju, et al. Influencing factors of formaldehyde emissions during methanol oxidation[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(2): 166-171 (in Chinese).
- [11] Li Y P, Bai X S, Tunér M, et al. Investigation on a high-stratified direct injection spark ignition(DISI) engine fueled with methanol under a high compression ratio[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 148: 352-362.
- [12] Gong C M, Liu J J, Peng L G, et al. Numerical study of effect of injection and ignition timings on combustion and unregulated emissions of DISI methanol engine during cold start[J]. Renewable Energy, 2017, 112(11): 457-465.
- [13] 刘宗宽, 龚世华, 车胜楠, 等. 湍流射流点火预燃室射流孔对甲醇发动机性能及排放影响的研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(10): 1031-1042.  
Liu Zongkuan, Gong Shihua, Che Shengnan, et al. Study of the effects of the pre-chamber nozzle on the performance and emissions of the methanol engine by turbulent jet ignition[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(10): 1031-1042 (in Chinese).
- [14] Vancoillie J, Sileghem L, van de Ginste M, et al. Experimental evaluation of lean-burn and EGR as load control strategies for methanol engines[EB/OL]. SAE Technical Papers, <http://doi.org/10.4271/2012-01-1283>, 2012-01-08.
- [15] Wang S Q, Li Y Y, Fu J Q, et al. Quantitative investigation of the effects of EGR strategies on performance, cycle-to-cycle variations and emissions characteristics of a higher compression ratio and heavy-duty NGSI engine fueled with 99% methane content[J]. Fuel, 2020, 263(3): 16736.
- [16] Wei H Q, Zhu T X, Shu G Q, et al. Gasoline engine exhaust gas recirculation — A review[J]. Applied Energy, 2012, 99: 534-544.
- [17] Xie F X, Li X P, Su Y, et al. Influence of air and EGR dilutions on improving performance of a high compression ratio spark-ignition engine fueled with methanol at light load[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 94: 559-567.
- [18] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 213-215.  
Zhou Longbao. Internal Combustion Engine[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 213-215 (in Chinese).
- [19] 魏衍举, 刘杰, 朱赞, 等. 甲醇汽油发动机甲醛排放快速检测方法研究[J]. 内燃机学报, 2008, 26(6): 533-537.  
Wei Yanju, Liu Jie, Zhu Zan, et al. Fast measurement of formaldehyde emission from methanol/gasoline fueled SI engine[J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(6): 533-537 (in Chinese).
- [20] 刘方杰, 苗家轩, 刘圣华, 等. 醇类燃料发动机醛排放产生机理[J]. 内燃机学报, 2014, 32(3): 236-241.  
Liu Fangjie, Miao Jiaxuan, Liu Shenghua, et al. Formation mechanism of aldehyde emissions from gasohol fueled SI engine[J]. Transactions of CSICE, 2014, 32(3): 236-241 (in Chinese).

(责任编辑: 王晓燕)