

DOI: 10.7652/xjtuxb201403008

甲醇对甲醇汽油混合燃料发动机 碳氢排放贡献率的定量研究

汪文瑞, 王坤, 王小荣, 魏衍举, 刘圣华

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在一台 JL368Q3 型汽油机上,通过考察发动机燃用体积分数分别为 10%、20%和 85%的甲醇汽油混合燃料时甲醇和碳氢(HC)的排放特性,研究了甲醇和汽油各自的排放率随发动机排气温度的变化规律和甲醇掺混比的影响,以及甲醇对发动机碳氢排放的贡献率。试验结果表明:甲醇掺混比对甲醇排放率的影响不大,在各掺混比下,甲醇排放率均不超过 8 g/kg,且随发动机排气温度的升高呈现指数降低的趋势;汽油的碳氢排放率比甲醇排放率高一个数量级,甲醇体积分数为 10%时发动机的碳氢排放率在中高负荷时最低,约为 40 g/kg;在各甲醇掺混比下,汽油均是发动机碳氢排放的主要来源,甲醇对发动机碳氢排放的贡献率不超过 8%。

关键词: 甲醇;汽油机;排放率;甲醇汽油混合燃料

中图分类号: TK462 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0039-05

Contribution Ratio of Methanol to HC Emission of a Gasohol Fueled Spark Ignition Engine

WANG Wenrui, WANG Kun, WANG Xiaorong, WEI Yanju, LIU Shenghua

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

Abstract: The emission rate characteristics of methanol and hydrocarbon (HC) were investigated on a JL368Q3 gasoline engine when fueled with methanol/gasoline blends with the methanol fraction of 10%, 20% and 85% in volume, respectively. The effects of exhaust temperature and methanol fraction on the emission rates, and the contribution ratio of methanol on HC emission were then quantitatively studied. Experimental results show that the blending ratio of methanol has little effect on its emission rate, and the rate is less than 8 g/kg for all the fuel blends and it decreases exponentially with the increasing engine speed and exhaust temperature. The emission rate of HC is one grade higher than that of methanol and is higher than 40 g/kg when the engine fueled with the M10 blend. For all the tested fuel blends, gasoline is the main source of HC emission, and methanol contributes less than 8% on HC emission.

Keywords: methanol; gasohol engine; hydrocarbon emission; methanol/gasoline blend

甲醇与汽油性质非常相似,某些性能甚至优于汽油,因而成为火花点火发动机最有潜力的代用燃

料之一。例如,甲醇具有优良的燃烧特性以及抗爆性^[1]。如果为发动机提供相同化学能的甲醇燃料,

收稿日期: 2013-06-26。 作者简介: 汪文瑞(1989—),男,博士生;魏衍举(通信作者),男,博士,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206130,51176151);国家“863 计划”资助项目(2012AA111721);国家质检总局科技计划资助项目(2012IK039)。

网络出版时间: 2014-01-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140110.1749.008.html>

发动机不仅能保持原动力特性和热效率,还可以降低发动机的常规排放物 HC、CO 和 NO_x [2]。然而,发动机在燃用甲醇汽油混合燃料时,会产生有毒的甲醇排放 [3],所以研究发动机燃烧甲醇汽油时的甲醇排放特性以及甲醇对于发动机碳氢排放的贡献非常重要。

发动机燃用甲醇汽油的研究已经非常广泛 [1-3],但现有研究往往仅局限于某一固定比例的甲醇汽油混合燃料 [4-5],或局限于某个、某几个特定转速和负荷 [6-7],研究的系统性较差。虽然现有文献一致认为发动机燃用甲醇汽油能够降低发动机的碳氢排放,但具体降低多少,各文献说法不一,而且不能定量地给出甲醇比例对碳氢排放的影响、发动机碳氢排放中甲醇及其他汽油来源性碳氢各自的含量以及它们随发动机负荷、转速和排气温度的变化规律。

本文以江铃汽车公司生产的 JL368Q3 型三缸电控火花点火发动机为对象,研究发动机燃用 3 种不同比例甲醇汽油混合燃料时的碳氢和甲醇排放特性,以及甲醇对发动机碳氢排放的贡献率。

1 试验台架

1.1 试验用发动机

试验用发动机型号为江铃汽车公司生产的 JL368Q3 型发动机,该发动机为三缸进气道喷射电控火花点火发动机,缸径为 68 mm,行程为 72 mm,总排量为 0.796 L,压缩比为 9.4,额定功率为 26.5 kW (转速 5 500 r/min),额定扭矩为 45 N·m (转速 3 000 r/min)。

试验工况点设置:选取 1 500 r/min 到 5 500 r/min 之间的 7 个不同转速,扭矩以 7 N·m 为间隔从最小值 7 N·m 增大至最大节气门开度处,这些工况点组成一个矩阵。试验中为保证发动机为稳态测试,除 5 500 r/min 转速外,试验前在其他待测工况点将发动机稳定运行 3 min。

1.2 试验用燃料

基础燃料选用辛烷值为 93 的商用标准汽油,并按体积分数 10%、20% 和 85% 掺混纯度(体积分数)为 99.9% 的分析纯甲醇(CH_3OH),得到 3 种混合燃料,分别命名为 M10、M20 和 M85。由于混合燃料极易吸收空气中的水分造成分层,所以每次试验前都重新配制混合燃料,并且通过观察燃料的透明度来了解燃料的混合情况,如果混合燃料清澈透明则说明混合彻底。在整个试验过程中不使用任何助溶剂。

1.3 发动机改造

因为甲醇的低热值只有汽油的 46% 左右,所以发动机燃用甲醇汽油时将导致发动机功率下降,尤其是燃用甲醇含量很高的 M85 燃料时,发动机功率下降非常明显。在试验中,当发动机燃用 M10 和 M20 时,发动机供油系统未经任何改造。当发动机燃用 M85 时,发动机功率下降较大,因此必须改变供油参数来恢复发动机的功率,具体变动包括调整燃油喷射压力(从 0.30 MPa 增大至 0.45 MPa);更换发动机喷油器,将原喷油器更换为东风雪铁龙所用的 1.6 L 汽油机上的喷油器。经上述改造后,发动机的喷油量增大至原机的 1.75 倍,可完全满足发动机燃用 M85 的需要。发动机的空燃比由氧传感器反馈控制。

1.4 排放物检测

采用 HORIBA MEXA-7100DEGR 气体分析仪检测排气中的碳氢排放物,检测精度为量程的 1%,检测到的碳氢排放物包含甲醇排放。采用日本岛津公司 GC-2010 气相色谱仪直接检测排气中的甲醇。色谱仪采用 Gs-OxyPLOT 极性毛细柱(长为 10 m,内径为 0.53 mm,膜厚为 10 μm ,安捷伦科技有限公司生产)和脉冲放电电离离子化检测器(型号为 D4-I-SH-17R)。检测时,先用氟聚乙丙烯(FEP)气体采样袋收集排气,并将其加热至 80 $^{\circ}\text{C}$ 以防止水和甲醇凝结,当甲醇浓度高于 20 $\mu\text{g/L}$ 时,此方法的检测误差小于 5% [7]。另外,为更准确地反映未燃碳氢排放的特性,所有废气的检测以及采样均在三元催化转化器前进行。发动机排气温度选用 K 型热电偶于排气口外 1.0 m 处进行测量。

文中甲醇及碳氢排放的浓度均以排放率表示,即每千克甲醇或汽油燃烧所排放的甲醇或碳氢的质量,单位为 g/kg,其中碳氢因成分复杂,故其质量以对应浓度的甲烷质量计算。由于气体分析仪显示的是体积浓度,要经过下述公式将其转换为排放率

$$R = \frac{CMD}{22.4m} \text{ (g/kg)}$$

式中: C 为甲醇或碳氢的体积分数, 10^{-6} ; M 为甲醇或甲烷的摩尔质量, g/mol; D 为发动机排量, L; m 为甲醇或汽油的循环供给量, g/cycle。

2 结果与讨论

虽然烃类的氧化过程中自由基 CH_3O 结合游离的 H 原子也会生成甲醇 [8-9],但是由于缸内的高温氧化,致使作为中间产物的 CH_3O 很快被氧消

耗,因此甲醇的浓度非常低,发动机燃用汽油时没有检测到甲醇排放。因此,发动机燃用甲醇汽油时,排气中检测到的甲醇排放均可视作未燃烧的燃料甲醇,其排放量由缸内主燃烧后的甲醇残留量和在缸内及排气管的高温环境中的氧化消耗量二者共同决定。

2.1 低比例甲醇汽油

图 1 所示是发动机燃用 M10 燃料时的甲醇排放特性图,从中可以看出,甲醇排放率随发动机的转速和扭矩的增大而减小。当扭矩一定时,随着发动机转速的升高,循环供油量增加,每工作循环错过主燃烧的未燃甲醇量增加,然而未燃甲醇排放率却反而降低,这说明:甲醇在缸内燃烧的完善程度对甲醇排放影响不大;转速增加导致排气温度升高对未燃甲醇氧化消耗的促进作用占主导地位,当转速一定、扭矩增加时亦是如此。

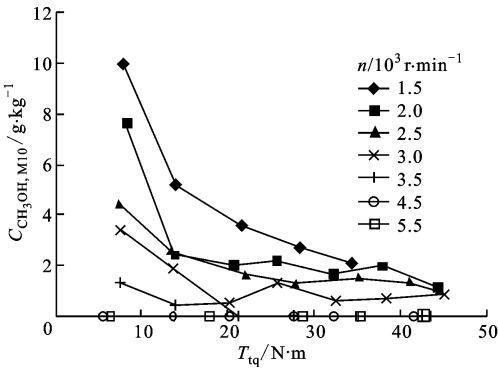


图 1 燃用 M10 时甲醇排放率随扭矩和转速的变化

将甲醇排放率对排气温度作图(见图 2),可以看出排气温度对甲醇排放率的影响更加明显,甲醇的排放率随着排气温度的增加总体呈现指数降低的趋势。对所有数据点统一进行拟合,可获得 M10 混合燃料的甲醇排放率的拟合公式

$$C_{CH_3OH, M10} = 348.4 \exp\left(-\frac{T_{ex}}{85.69}\right) + 0.1226 \quad (g \cdot kg^{-1}),$$
$$R^2 = 0.8847 \quad (1)$$

式中: R^2 是相关系数。

由图 1 和图 2 可以看出:甲醇的排放率与发动机的转速和扭矩关系不大,其值更多地取决于排气温度;甲醇的燃烧效率很高,即使在 1 500 r/min 低负荷处,其排放率也低于 10 g/kg,并且随转速和扭矩的增加而迅速下降。

碳氢排放率比甲醇排放率高一个数量级(如图 3 所示),在所有工况下均高于 35 g/kg,且随着扭矩和转速的增加总体呈现先降低而后略微增加的趋势。

势。排气温度升高可使碳氢排放率降低,而在最大负荷及最高转速处排放率有所增加是由于此时混合气过浓造成的。当发动机燃用化学计量空燃比的混合气时,排气温度仍是碳氢排放的主要影响因素。

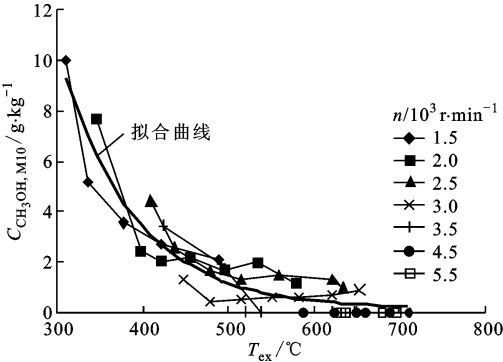


图 2 燃用 M10 时甲醇排放率随排气温度和转速的变化

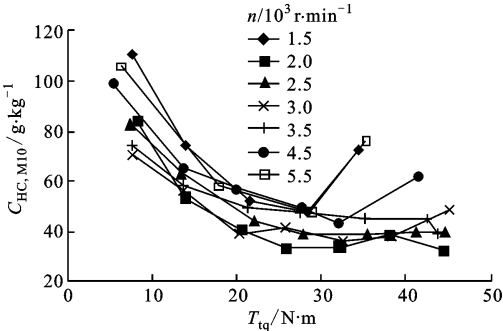


图 3 燃用 M10 时碳氢排放率随扭矩和转速的变化

从图 2 和图 3 可以看出,甲醇排放率远低于碳氢排放率。定义甲醇排放率与碳氢排放率之比为甲醇的排放比

$$r = \frac{(m/M)_{CH_3OH}}{(m/M)_{gasoline}} \quad (2)$$

式中: m 表示甲醇或碳氢排放的质量,g; M 是对应甲醇或汽油的消耗量,kg。

排放比可以直观地反映出甲醇对碳氢排放的贡献率。如图 4 所示,发动机燃用 M10 时的甲醇排放

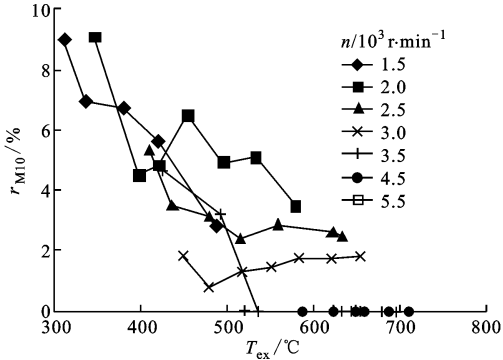


图 4 燃用 M10 时甲醇排放比随排气温度和转速的变化

比 r_{M10} 小于 10%，并且随着排气温度和转速的升高而迅速降低。

2.2 高比例甲醇汽油

发动机燃用高比例甲醇汽油混合燃料 M85 时，循环供氧量高于 M10，以体积浓度计的甲醇排放量明显高于燃用 M10 时的排放量，体积浓度值与循环供氧量呈现近似线性关系^[6]，但随着排气温度的提高，以质量分数计的甲醇排放量却变化不大。

如图 5 所示，除了在 2 000 r/min 时几个混合气过浓的离散点外，发动机燃用 M85 燃料时其甲醇排放率均不超过 10 g/kg，并且随排气温度的升高而呈指数趋势下降。将化学计量空燃比条件下的数据点统一进行拟合，可获得甲醇排放率与排气温度的拟合关系式

$$C_{CH_3OH, M85} = 53.0 \exp\left(-\frac{T_{ex}}{176.88}\right) - 0.540 \quad (g \cdot kg^{-1}),$$
$$R^2 = 0.90 \quad (3)$$

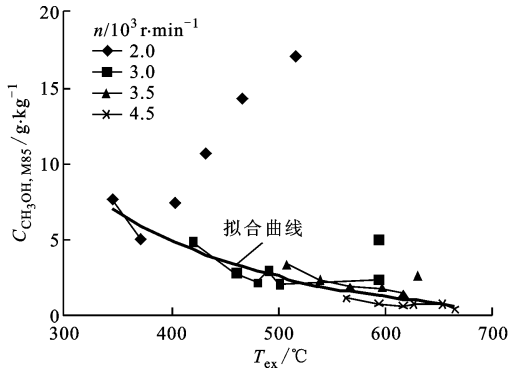


图 5 燃用 M85 时甲醇排放率与排气温度和转速的关系

由于甲醇的汽化潜热远高于汽油，发动机燃用 M85 时甲醇汽化所需的热量远高于燃用 M10 时，这将降低缸内温度，使碳氢的氧化受到抑制，因此发动机燃用 M85 时的碳氢排放率远高于燃用 M10 时的，如图 6 所示。虽然转速增加后发动机每工作循环所需的时间缩短，不利于缸内未燃碳氢的氧化，但转速的增加使缸内气流运动增强，促进了未燃汽油与热废气的混合，又促进了碳氢的氧化，从图 6 可以看出，这种促进作用占据主导地位，所以碳氢的排放率随发动机转速增加而降低。

发动机燃用 M85 与 M10 时的甲醇排放率相近，但燃用 M85 时碳氢排放率更高，这使得发动机燃用 M85 时的甲醇排放比 r_{M85} 较燃用 M10 时的甲醇排放比 r_{M10} 低，如图 7 所示，除 2 000 r/min 时后面 4 个工况点混合气偏浓外，其他检测工况下的

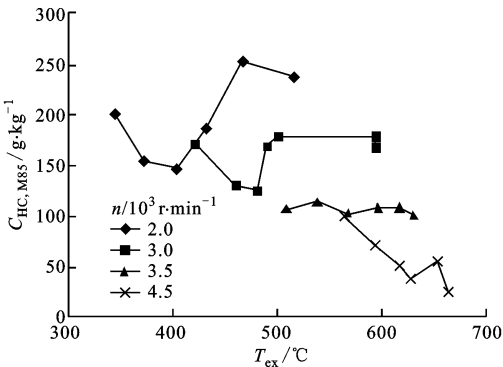


图 6 燃用 M85 时碳氢排放率与排气温度和转速的关系

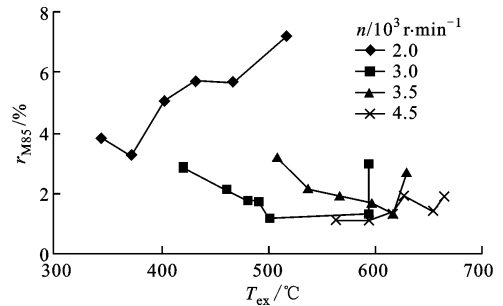


图 7 燃用 M85 时甲醇排放比与排气温度和转速的关系

r_{M85} 均小于 4%。这说明，M85 混合燃料中虽然只含有 15% 的汽油，但汽油仍是碳氢排放的主要来源。

2.3 甲醇对碳氢排放的贡献

甲醇排放主要来源于未燃烧的甲醇燃料，其排放量与燃料的甲醇掺混比成正比。Zervas 等在试验中发现，排气中甲醇的体积浓度与混合燃料中甲醇的体积分数成线性关系^[3]；本课题组之前的研究也得出类似的结论，即甲醇排放的体积浓度与每循环进入缸内的甲醇量近似成线性关系^[6,10]。虽然以体积浓度计的甲醇排放量随甲醇掺混比的增大而增加，但不同掺混比时的排放率却变化不大，然而将甲醇排放的体积浓度换算成甲醇的排放率时，它们之间则呈现出另外一种关系。如图 8 所示，发动机分别燃用 M10、M20 和 M85 时甲醇排放率的最大值相差不大，均未超过 8 g/kg，然而其排放率的最小

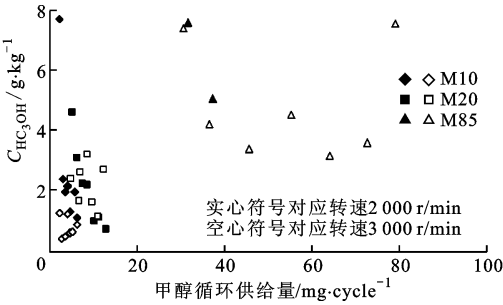


图 8 甲醇排放率随甲醇循环供给量的变化

值却随着燃料中甲醇比例的增大而增大,这是由于甲醇掺混比增加后排气温度降低不利于甲醇的氧化所致。

图 9 是碳氢排放率与汽油循环供给量的关系。从图中可知,碳氢排放率随负荷增加而迅速降低,到中等负荷以后基本保持不变,稳定在 40 g/kg 左右。当混合燃料中甲醇的体积分数低于 20% 时,进入缸内的甲醇对发动机的碳氢排放基本没有影响。当甲醇的体积分数增加至 85% 以后,排气中的碳氢排放率远高于低混合比甲醇汽油的碳氢排放率,这是由于甲醇的汽化潜热大,发动机排气温度降低,从而削弱了排气中碳氢的氧化作用,最终导致燃用 M85 时发动机排气中的碳氢排放率远高于 M10 的碳氢排放率。

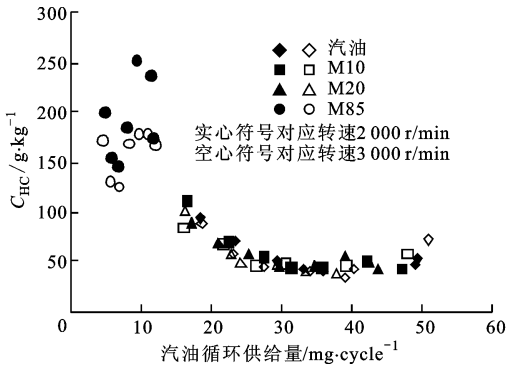


图 9 碳氢排放率随汽油循环供给量的变化

图 10 所示为发动机甲醇排放比与排气温度的关系。由图可以看出,在各种甲醇汽油混合燃料所产生的碳氢排放中,甲醇排放所占比例均未超过 8%,这说明碳氢主要是由汽油成分产生的,由此表明甲醇比汽油易于氧化,也可以说甲醇比汽油“清洁”。

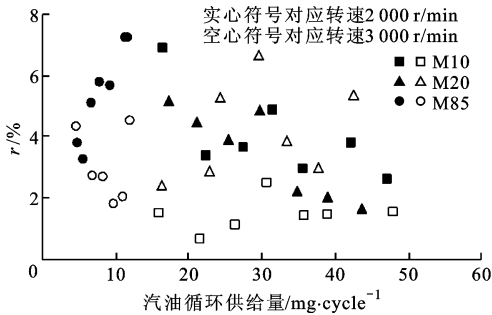


图 10 甲醇排放比随汽油循环供给量的变化

3 结 论

在一台 JL368Q3 型火花点火发动机上研究了分别燃用汽油及 3 种比例甲醇汽油混合燃料时发动机的甲醇和碳氢排放率特性,获得如下结论。

(1) 甲醇排放来源于未完全燃烧的甲醇,排气温度对甲醇排放率有决定性影响,排放率随排气温度的升高呈指数规律下降。甲醇掺混比对其排放率的最大值影响不大,各掺混比下的甲醇排放率均不超过 10 g/kg,而排放率最小值却随掺混比的增加而升高。

(2) 碳氢排放率比甲醇排放率高一个数量级。随着排气温度的升高,当混合燃料中甲醇的体积分数低于 20% 时,碳氢排放率呈现先降低后增加的趋势,在中高负荷时达到最低,约为 40 g/kg,而对于 M85 混合燃料,其碳氢排放率在各转速下均比相应的低掺混比甲醇汽油的碳氢排放率高。

(3) 甲醇对发动机碳氢排放的贡献率与甲醇的掺混比关系不大,在 3 种掺混比下,甲醇对碳氢排放的贡献率均未超过 8%,从燃料“清洁度”角度看,甲醇比汽油“清洁”。

参考文献:

[1] LIAO S Y, JIANG D M, CHENG Q, et al. Effect of methanol addition into gasoline on the combustion characteristics at relatively low temperatures [J]. Energy Fuels, 2006, 20(1): 84-90.

[2] 刘圣华, 李晖, 吕胜春, 等. 甲醇-汽油混合燃料对汽油机性能和排放的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 1-4.

LIU Shenghua, LI Hui, LÜ Shengchun, et al. Effects of methanol/gasoline blend on gasoline engine performance and emissions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(1): 1-4.

[3] ZERVAS E, MONTAGNE X, LAHAYE J. Emission of alcohols and carbonyl compounds from a spark ignition engine; influence of fuel and air/fuel equivalence ratio [J]. Environ Sci Tech, 2002, 36(11): 2414-2421.

[4] LI J, GONG C M, WANG E Y, et al. Emissions of formaldehyde and unburned methanol from a spark-ignition methanol engine during cold start [J]. Energy Fuels, 2010, 24(2): 863-870.

[5] ZHANG F, ZHANG X, SHUAI S J, et al. Unregulated emissions and combustion characteristics of low-content methanol-gasoline blended fuels [J]. Energy Fuels, 2010, 24(2): 1283-1292.

[6] WEI Yanju, LIU Shenghua, LIU Fangjie, et al. Formaldehyde and methanol emissions from methanol-gasoline fueled SI engine [J]. Energy Fuels, 2009, 23(5): 3313-3318.

(下转第 114 页)