

# 环境温度对甲醇/汽油发动机冷起动排放影响的研究

李毅, 高广新, 刘圣华, 魏衍举, 李广乐, 迟磊

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 在一台4缸进气道喷射汽油机上,研究了环境温度在从15℃下降到-25℃的过程中,4种甲醇汽油混合燃料低温冷起动的排放特性.结果表明:在试验环境温度下添加甲醇均能显著减少冷起动阶段HC和CO的排放.在冷起动过程中,HC的平均排放随着环境温度的降低而呈指数增加;随着甲醇添加比的增大,HC排放的增加量逐渐减小,当甲醇的体积分数超过30%时,HC排放减少得并不明显.CO平均排放随环境温度的变化趋势与HC有所不同,当环境温度从5℃下降到-7℃时,CO排放增加了约10倍,随着温度的继续下降,CO排放变化不大.甲醛和甲醇非常规排放随着甲醇添加比的增大而增加,随着环境温度的降低而增加.

**关键词:** 冷起动;甲醇汽油;排放;甲醛

**中图分类号:** TK42 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)11-0006-05

## Effects of Ambient Temperatures on Regulated and Unregulated Emissions from Methanol/Gasoline Engine During Cold Start

LI Yi, GAO Guangxin, LIU Shenghua, WEI Yanju, LI Guangle, CHI Lei

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

**Abstract:** A 4-cylinder port fuel injection (PFI) engine fueled with four methanol-gasoline blends was used to study the emission characteristics during the cold start process at different ambient temperatures (-25℃, -15℃, -7℃, 5℃, and 15℃). The results show that the regulated emissions (HC, CO) were greatly reduced by methanol addition at all the test ambient temperatures. The average HC emission of the engine increased exponentially with the decrease in the ambient temperature, however, its change would gradually turn to be linear with the increase in the methanol fraction. When the methanol fraction in volume was over 30%, the reduction of HC emission would not be obvious. The variation of the average CO emission with the ambient temperature was different from that of the average HC emission. When the ambient temperature decreased from 5℃ to -7℃, the CO emission increased dramatically for the four fuels, however, the average CO emission did not change significantly with the further decrease in the temperature. In addition, the unregulated emissions (HCHO, CH<sub>3</sub>OH) would increase with the decrease in ambient temperature and with the increase in the methanol fraction.

**Keywords:** cold start; methanol gasoline; emissions; HCHO

甲醇作为汽油机最有前途的清洁代用燃料早已引起广泛关注,目前在点燃式发动机上应用甲醇的研究主要集中在发动机稳定工况下的动力性、经济

性和排放性<sup>[1-4]</sup>,很少涉及到排放的生成阶段——冷起动阶段,特别是不同环境温度下的冷起动过程.常温下,发动机在起动的初始阶段,CO和HC排放占

收稿日期: 2011-06-08. 作者简介: 李毅(1982-),男,博士生;刘圣华(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50876088).

网络出版时间: 2011-08-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110810.0130.003.html>

测试循环的 60%~80%<sup>[5]</sup>; 0℃以下,发动机在冷起动初期产生的 HC 和 CO 是常温下的几倍甚至十几倍. 因此,需要重点研究发动机低温冷起动的排放特性.

本文在一台 PFI 电控汽油机上分别燃用了 93#汽油和 M10、M30、M85 (甲醇体积分数分别为 10%、30%和 85%) 等 4 种燃料,且在 -25、-15、-7、5、15℃等 5 种环境温度下,对冷起动及怠速暖机过程中的常规及非常规排放特性进行了研究.

1 试验装置及方法

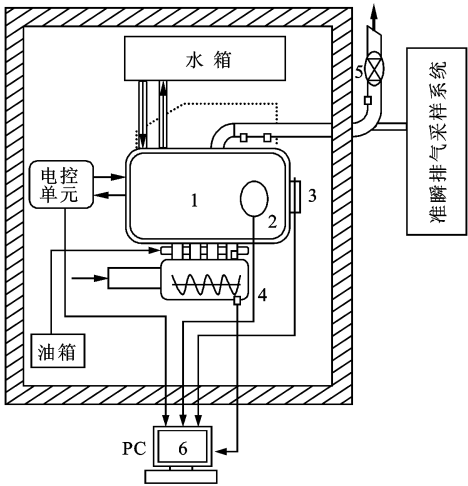
试验用发动机为三菱 4G18 型电喷汽油机,缸径 76 mm,行程 87.3 mm,排气总量 1.584 L,压缩比为 9.5. 发动机台架布置如图 1 所示. 为了模拟不同的环境温度,试验将发动机、汽油油箱、ECU 等置于环境模拟舱内. 试验前将发动机在目标环境中冷浸 12 h 以上,以保证发动机能够充分冷却. 试验中采用了一套准瞬态排气采样测量系统,整个采样过程按照冷起动排气浓度的变化分为 3 个阶段(0~10 s、10~30 s、30~200 s),采样周期分别为 1 s、2 s 和 8 s,共计 40 个采样点. 采样后的样气袋先放在一个 80℃恒温箱内进行 15 min 加热、保温,再放入 120℃恒温箱内进行 15 min 加热、保温,以保证测量的未燃成分气化. 每个气袋中的甲醇和甲醛的浓度由 GC-2010 色谱仪测量,气袋中的 HC 和 CO 浓度用 Horbia 公司的 7100D-EGR 排放分析仪测量. 在每一次的冷起动试验结束后,还需将发动机热机到大循环工作状态,以减小进气道壁面及进气门背后在冷起动阶段生成的油膜对下一组试验的影响.

2 发动机冷起动的常规排放特性

2.1 喷油策略及空燃比

图 2 给出了不同温度下冷起动过程中的喷油策略. 从图 2 看出,在开始的几个循环中,发动机喷入了大量的燃油,以保证形成足够的混合气,随着发动机转速的提高,喷油脉宽迅速减小. 在不同的环境温度下,喷油的趋势基本一致,但随着环境温度的降低,喷油脉宽增大,喷油量增大. 例如,200 s 时,环境温度为 -25℃的喷油脉宽是环境温度为 5℃时的 1.57 倍.

图 3 给出了环境温度为 -7℃时,冷起动和暖机过程中空燃比随时间的变化. 为使发动机在冷机状态下能够顺利起动,通常需供给过量的燃油,此时混合气较浓,空燃比较小. 随着机体温度的逐渐升



1:PFI 发动机; 2:缸压传感器; 3:角标器; 4:热电偶; 5:节流阀; 6:数据采集仪

图 1 发动机台架布置图

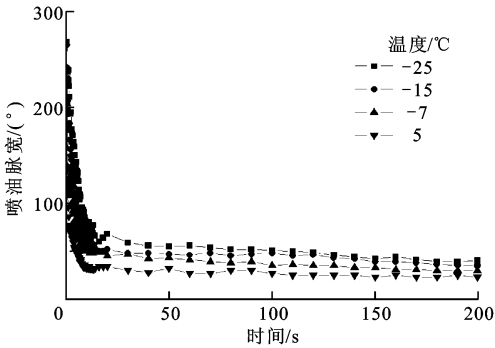


图 2 环境温度对喷油脉宽的影响

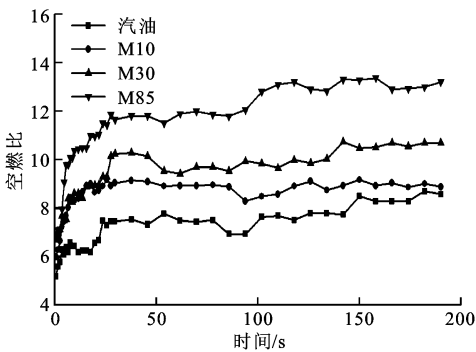


图 3 冷起动和暖机过程中空燃比随时间的变化

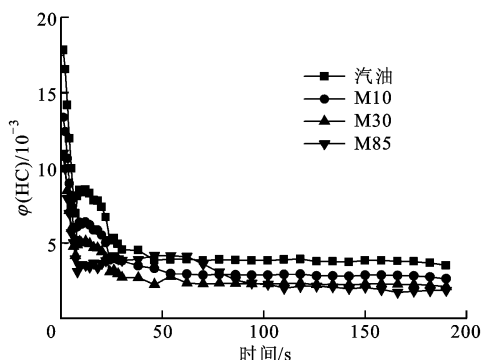
高,进气道内燃油蒸发效果不断改善,冷却液和润滑油的温度随之升高,电控系统开始调整喷油策略(相应地减少了每次循环的喷油量),空燃比随着时间的推移逐渐增大. 由于甲醇中氧的质量分数高达 50%,因此汽油中掺入甲醇后,混合燃料的含氧量随着甲醇添加比的增大而迅速升高(见图 3),相同时

刻的空燃比随着甲醇添加比的增大显著增大。当发动机燃用 M85(空燃比在 12 左右)时,混合气基本为稀混合气。

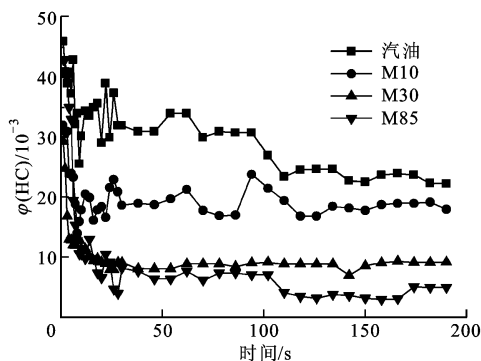
## 2.2 HC 排放

汽油机在冷起动过程中需喷入较多的燃油,以保证可燃混合气形成,这样便导致燃油不能完全燃烧,使 HC 排放急剧增加。冷起动过程中发动机的混合气难以形成,加之残余废气的稀释等,使得燃烧速度减缓或燃烧不稳定性增强,受膨胀因素的影响,缸内气体温度和压力下降,从而造成可燃混合气大容积淬熄,HC 排放增加。此外,激冷效应、油膜及沉积物吸附也是 HC 排放增加的原因<sup>[6-9]</sup>。

图 4 给出了环境温度为 5℃、-7℃时,冷起动和暖机过程中 HC 的排放特性。



(a) 环境温度为 5℃



(b) 环境温度为 -7℃

图 4 冷起动和暖机过程中 HC 的排放特性

从图 4a 可看出,环境温度为 5℃时,在起动的开始阶段,HC 排放非常高,在 30 s 左右达到稳定;从图 4a 还可以看出,随着甲醇添加比的增大,HC 排放逐渐降低。例如:燃用汽油时,HC 排在 30 s 后维持在  $\varphi(\text{HC}) = 3\ 600 \times 10^{-6}$  左右,燃用 M10、M30 和 M85 时,相应的 HC 排放分别降低了 25%、40% 和 47%。甲醇的燃烧速度较汽油更快,所以随

着汽油中甲醇添加比的增大,火焰发展期和快速燃烧期缩短,缸内混合气的蒸发、混合和燃烧性能比汽油更好,由容积淬熄形成的 HC 排放和不完全燃烧导致的 HC 排放相应减少。所以,添加甲醇能减少出现混合气过浓的现象,也有利于降低 HC 排放。从图 4b 可看出,当环境温度下降到 -7℃时,HC 排在增大的同时,排放的波动性加强。在起动阶段的前几秒,M85 的 HC 排放非常高,甚至大于汽油,这是由于甲醇的汽化潜热很大,在低温环境中制备混合气很困难,因此拖动时间延长,导致更多的未燃 HC 排出。发动机起动后,甲醇的添加改善了缸内燃烧,HC 排放由此降低。

试验中对瞬时排放进行了采集,它只能反映冷起动过程中排放的变化,不能反映总体排放的情况,因而不能较全面地评价排放对环境的影响。按照欧 III 标准对冷起动排放的要求,根据已知的瞬时排放情况,本文引入某物质的平均排放浓度(质量分数)作为试验排放的评价指标。该指标是指,在规定的时间内,发动机冷起动时排放物的平均浓度,即

$$\varphi = \left( \int_0^t f(t) dt \right) / t \quad (1)$$

式中:  $f(t)$  为物质的瞬时排放量。

环境温度对 HC 平均排放的影响如图 5 所示。从图 5 中可看出,  $\varphi(\text{HC})$  随着环境温度的降低呈指数增加,随着甲醇添加比的增大逐渐减小。当环境温度降低到 -15℃时,汽油、M10、M30 和 M85 的  $\varphi(\text{HC})$  分别是 15℃时的 10.8 倍、9.3 倍、4.4 倍和 3.6 倍;从图 5 还可看出,当甲醇的体积分数大于 30%时,  $\varphi(\text{HC})$  的降低不太明显。

冷起动和暖机过程中 CO 的排放特性如图 6 所示。从图 6a 可看出,当环境温度为 5℃时,随着甲醇添加比的增大,  $\varphi(\text{CO})$  显著降低。50 s 内燃用 M10、M30 和 M85 比燃用汽油时的  $\varphi(\text{CO})$  降低了 19%、52%、61%。当环境温度降低到 -7℃时,起动过程中发动机喷入了更多的燃油,从而导致混合气更浓,  $\varphi(\text{CO})$  明显大于 5℃时的起动工况且伴随有较大的波动,而 50 s 后,  $\varphi(\text{CO})$  趋于稳定,但  $\varphi(\text{CO})$  依然随甲醇添加比的增大有所降低。

CO 平均排放的计算结果与 HC 相同。各种环境温度和燃料下的 CO 平均排放如图 7 所示。从图 7 可看出,在不同的环境温度下,  $\varphi(\text{CO})$  随着甲醇添加比的增大而减小,随温度的变化趋势与 HC 排放有所不同。当环境温度降低到 -7℃时,汽油、M10、M30 和 M85 的  $\varphi(\text{CO})$  分别是 15℃时的 5.66 倍、

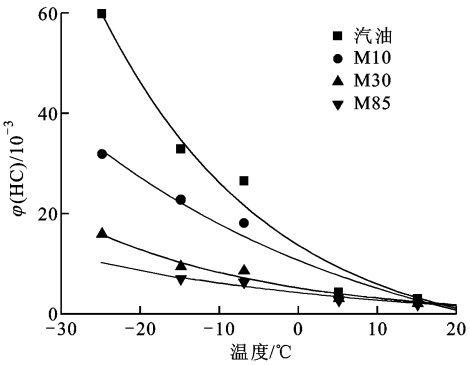
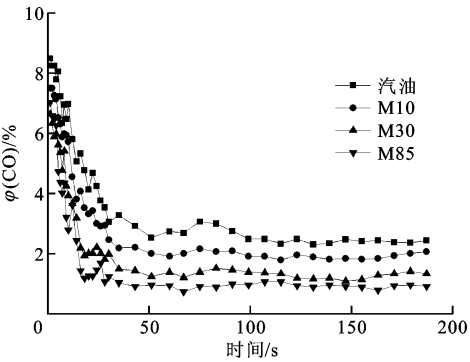
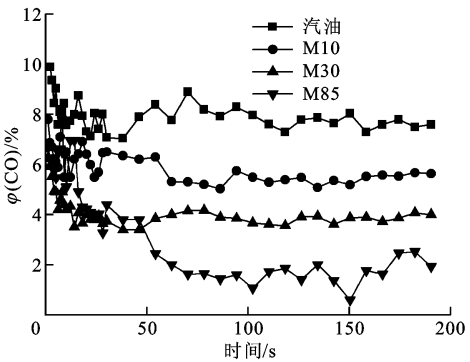


图 5 环境温度对 HC 平均排放的影响



(a)环境温度为 5 °C



(b)环境温度为 -7 °C

图 6 冷起动和暖机过程中 CO 的排放特性

5.39 倍、4.62 倍和 3.88 倍;当环境温度进一步下降时,汽油和 M10 的  $\varphi(\text{CO})$  基本保持不变,而 M30 的  $\varphi(\text{CO})$  略有增加。

### 3 发动机冷起动的非常规排放特性

#### 3.1 甲醇排放

甲醇汽油发动机的甲醇排放有两种机理,其一来自多碳碳氢化合物氧化过程中的中间产物,其二是来自未燃烧的甲醇燃料。对于燃用汽油的排气,试验过程中未检测到甲醇成分,所以第一种机理的甲醇

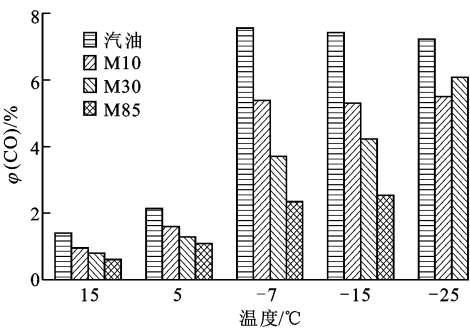
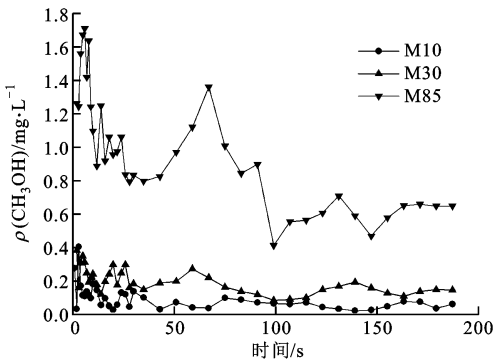
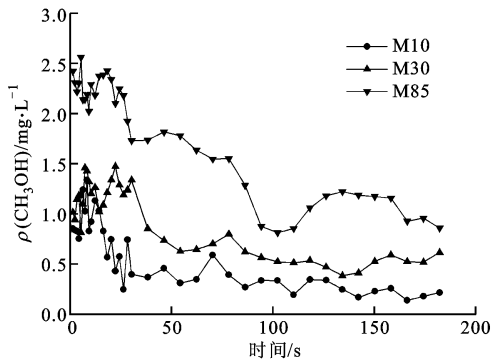


图 7 各种环境温度和燃料下的 CO 平均排放特性

排放可以忽略,同时可以认为甲醇排放主要来自未燃烧的甲醇燃料。冷起动和暖机过程中甲醇的排放特性如图 8 所示。从图 8 可看出,环境温度为 -7 °C、冷起动 100 s 时,M85 中的  $\text{CH}_3\text{OH}$  的质量浓度  $\rho(\text{CH}_3\text{OH})$  达到了 0.65 mg/L,分别是 M10、M30 的 10 倍和 4.4 倍。随着环境温度的进一步下降,3 种燃料中的  $\rho(\text{CH}_3\text{OH})$  显著增加,且随甲醇添加比的增大而增加。



(a)环境温度为 -7 °C



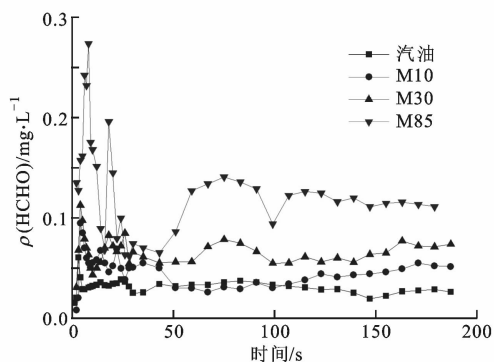
(b)环境温度为 -15 °C

图 8 冷起动和暖机过程中甲醇的排放特性

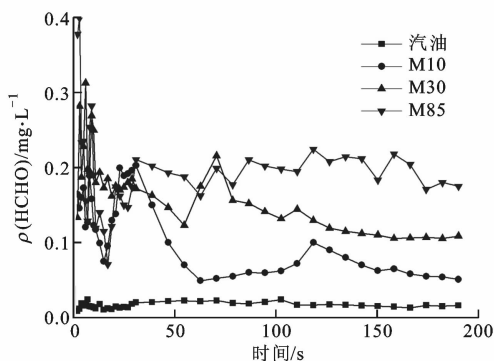
#### 3.2 甲醛排放

甲醛( $\text{HCHO}$ )是发动机燃用汽油时掺混甲醇汽油后产生的有害排放物之一。在发动机燃用汽油时,因不完全燃烧也会排放少量的甲醛。不同温度下

冷起动的 HCHO 排放特性如图 9 所示。从图 9 可看出, HCHO 的排放特性与  $\text{CH}_3\text{OH}$  很相似,  $\varphi(\text{HCHO})$  随着甲醇添加比的增大而增加。在环境温度为  $-7\text{ }^\circ\text{C}$  下, 冷启动 100 s 时 M85 中的  $\rho(\text{HCHO})$  达到了  $0.12\text{ mg/L}$ , 是汽油的 6 倍。由于发动机燃用汽油时的甲醛排放全部由未燃碳氢氧化生成, 而燃用 M85 时未燃碳氢中大部分为甲醇, 不论从氧化生成甲醛的简便性, 还是从数量上, 甲醇排放均占据了绝对的优势。当环境温度降低到  $-15\text{ }^\circ\text{C}$  时, M10、M30 和 M85 中的  $\rho(\text{HCHO})$  显著增加, 汽油中的  $\rho(\text{HCHO})$  却变化不大。



(a) 环境温度为  $-7\text{ }^\circ\text{C}$



(b) 环境温度为  $-15\text{ }^\circ\text{C}$

图 9 冷启动和暖机过程中甲醛的排放特性

## 4 结 论

(1) 在本文测试环境温度下, 添加甲醇均显著减少了冷启动阶段 HC 和 CO 的排放。  $\varphi(\text{HC})$  随着环境温度的降低呈指数增加, 随着甲醇添加比的增大而逐渐减小。当甲醇的体积分数大于 30% 时,  $\varphi(\text{HC})$  减少并不明显。

(2)  $\varphi(\text{CO})$  随环境温度的变化与  $\varphi(\text{HC})$  有所不同, 当环境温度从  $15\text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $-7\text{ }^\circ\text{C}$  时, 4 种燃料的  $\varphi(\text{CO})$  显著增加, 而当环境温度进一步下降时,

$\varphi(\text{CO})$  未见明显变化。

(3) 添加甲醇会影响冷启动阶段的醇醛非常规排放, 环境温度越低,  $\rho(\text{CH}_3\text{OH})$  越高。甲醇排放来源于未燃的甲醇燃料, 其排放量与燃料中甲醇浓度成正比关系。稳定后的甲醛排放与甲醇排放十分类似, 这也说明甲醛的生成主要来自于甲醇的氧化。

## 参考文献:

- [1] ABU-ZAID M, BADRAN O, YAMIN J. Effect of methanol addition on the performance of spark ignition engines [J]. *Energy & Fuels*, 2004, 18: 312-315.
- [2] 魏衍举, 刘圣华, 刘方杰, 等. 甲醇汽油发动机醇醛排放特性及其影响因素研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(1): 59-63.
- WEI Yanju, LIU Shenghua, LIU Fangjie, et al. Influencing factors and characteristics of methanol and formaldehyde emissions from a methanol/gasoline fueled SI engine [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(1): 59-63.
- [3] WEI Yanju, LIU Shenghua, LIU Fangjie, et al. Formaldehyde and methanol emissions from a methanol/gasoline-fueled spark-ignition (SI) engine [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23: 3313-3318.
- [4] WEI Yanju, LIU Shenghua, LIU Fangjie, et al. Aldehydes and methanol emission mechanisms and characteristics from a methanol gasoline-fueled spark-ignition (SI) engine [J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23: 6222-6230.
- [5] CHENG W K, HAMRIN D, HEYWOOD J B, et al. An overview of hydrocarbon emissions mechanisms in spark-ignition engines, SAE 932708 [R]. Warrendale, USA: SAE, 1993.
- [6] BRUNO B A, SANTAVICCA D A, ZELLO H V. LIF characterization of intake valve fuel films during cold start in a PFI engine, SAE 2002-01-2751 [R]. Warrendale, USA: SAE, 2002.
- [7] SAMPSON M J, HEYWOOD J B. Analysis of fuel behavior in the spark-ignition engine start-up process, SAE 950678 [R]. Warrendale, USA: SAE, 1995.
- [8] SHIN Y, CHENG W K, HEYWOOD J B. Liquid gasoline behavior in the engine cylinder of a SI engine, SAE 941872 [R]. Warrendale, USA: SAE, 1994.
- [9] HENEINA N A, TAGOMORIB M K. Cold-start hydrocarbon emissions in port-injected gasoline engines [J]. *Prog Energy Combust Sci*, 1999, 25: 563-593.

(编辑 苗凌)