

姚春德, 朱晶宇, 夏琦, 等. 2010 柴油甲醇组合燃烧发动机的甲醛排放特性[J]. 环境科学学报, 30(2): 287– 293

Yao C D, Zhu J Y, Xia Q, *et al.* 2010 The characteristics of formaldehyde emissions in the diesel/methanol compound combustion system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(2): 287– 293

柴油甲醇组合燃烧发动机的甲醛排放特性

姚春德^{*}, 朱晶宇, 夏琦, 李旭聪, 韩伟强

内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津大学, 天津 300072

收稿日期: 2009-04-29 修回日期: 2009-08-30 录用日期: 2009-11-19

摘要: 在一台加装独立的甲醇供给系统的自然吸气柴油机上, 采用柴油甲醇组合燃烧模式 (DMCC) 进行台架试验. 利用气相色谱仪分析技术, 全面研究并总结了甲醛在不同的发动机工况如转速、负荷、排气温度 (改变柴油氧化催化转化器 DOC 位置) 和不同甲醇替代率的情况下的排放规律以及甲醛和未燃碳氢 (HC) 之间的相互关系. 研究结果显示, DMCC 模式下的甲醛排放主要受到负荷、甲醇替代率、排气温度 3 方面的共同影响. 在中等负荷排温在 240~ 380℃ 之间时, DOC 促进甲醛的生成; 在高负荷排温在 400℃ 以上时, DOC 减少甲醛排放. 在同样工况下将 DOC 位置移近排气歧管对减少甲醛排放有显著的作用. 在此情况下, 当排气温度超过 400℃, DOC 后的甲醛排放体积分数降低到 $(10 \sim 15) \times 10^{-6}$ 左右, 与燃用纯柴油的甲醛浓度相近. 另外, 未燃碳氢和甲醛的转化效率的规律有一定的关联. 当排温高于 320℃ 以后, 尽管 HC 迅速下降到比原机还低的水平, 但甲醛排放浓度却比较高. 当排气温度超过 380℃ 并将 DOC 位置移近排气歧管, 此时, HC 与甲醛的排放将同步减少直至接近零排放水平.

关键词: 柴油甲醇组合燃烧; 甲醛排放; 柴油机; 氧化催化转化器

文章编号: 0253-2468(2010)02-287-07 中图分类号: X 701 文献标识码: A

The characteristics of formaldehyde emissions in the diesel/methanol compound combustion system

YAO Chunde^{*}, ZHU Jingyu, XIA Q, LIXucong, HAN Weiqiang

State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072

Received 29 April 2009 received in revised form 30 August 2009; accepted 19 November 2009

Abstract A naturally aspirated diesel engine equipped with an independent methanol supply system is operated to investigate the effect of the oxidation catalyst on formaldehyde emission from the engine running in Diesel/Methanol Compound Combustion mode. The influence of speed load the position of the DOC (diesel oxidation catalyst) from the exhaust manifold, as well as the proportion of methanol in the fuel on the formaldehyde emission is studied. The relationship of formaldehyde and hydrocarbon (HC) emissions is also analyzed. Gas chromatography is applied to measure the concentration of formaldehyde. The test results showed that the formaldehyde emission is mainly influenced by the load exhaust temperature and proportion of methanol. The DOC increased the formaldehyde emission at medium load in which the exhaust temperature ranges from 240℃ to 380℃, while at heavy load the DOC reduced formaldehyde emission and even eliminated it completely when the exhaust temperature exceeded 400℃. Changing the position of the DOC to the exhaust manifold of the engine has a significant impact on formaldehyde emissions because of the exhaust temperature. If the DOC is placed close to the exhaust manifold, where the temperature is up to 400℃ the concentration of formaldehyde can be reduced to as low as $(10 \sim 15) \times 10^{-6}$, which is comparable with those from the basic diesel engine $(5 \sim 10) \times 10^{-6}$. In addition, there is some relationship between formaldehyde and HC emissions. At temperatures up to 320℃, HC emission is remarkably reduced even lower than the diesel engine but formaldehyde remained almost the same. The HC and formaldehyde emission can be reduced together only if the DOC is positioned close to exhaust manifold and the temperature is higher than 380℃.

Keywords diesel/methanol compound combustion mode; formaldehyde emission; diesel engine; diesel oxidation catalyst

1 引言 (Introduction)

在石油危机日益显现的今天, 考虑到中国缺油富煤的能源结构特点以及煤基液体燃料甲醇与汽柴油相近的燃烧特性, 甲醇成为最有发展前景的替

代燃料之一. 大量有关甲醇在柴油机上的应用研究表明, 由于甲醇较高的汽化潜热, 有利于降低最高燃烧温度, 从而降低柴油机 NO_x 排放 (Ryan *et al.*, 1994); 同时由于甲醇分子的含氧、高的氢碳比并且无碳链, 因此, 对减少柴油机的炭烟排放很有利.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50876075)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50876075)

作者简介: 姚春德 (1955—), 男, 教授 (博士), E-mail: arcnya@tju.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)

Biography: YAO Chunde (1955—), male professor (Ph. D.), E-mail: arcnya@tju.edu.cn * Corresponding author

本研究提出的柴油甲醇组合燃烧模式在柴油机进气歧管上加装独立的甲醇供给系统,采用精确的进气道电控喷射,在缸内形成均质混合气,由柴油引燃(姚春德等, 2008). 该燃烧模式利用甲醇的特性同时减少 NO_x 和 PM 排放. 然而由于甲醇以均质混合气进入气缸,在低负荷下混合气浓度稀,加之扫气过程的存在,未燃甲醇导致 HC 和 CO 排放有所升高. 甲醇不完全燃烧有可能产生甲醛这样对人体极为有害的非常规排放物,彭红梅、Song等已发现在 DMCC 燃烧模式下同样存在甲醛的排放问题(彭红梅等, 2008; Song *et al.*, 2008). 为了深入了解甲醇柴油组合燃烧的甲醛排放特性以及消除的方法,本工作在前期台架实验的基础上,进一步研究发动

机在不同的工况如转速、负荷,排气温度(改变 DOC 位置)和不同甲醇替代率的情况下对甲醛排放规律以及甲醛和未燃 HC 之间相互关系的影响,包括氧化催化转化器对甲醛排放的作用.

2 试验设备与方法 (Equipment and method)

2.1 试验设备与测试仪器

试验是基于一台 490QDI 立式、直喷、水冷、四冲程柴油机进行改造,在柴油机的进气歧管处加装独立的甲醇供给系统,使用 4 个汽油机用低压喷油器用来喷射甲醇. 甲醇喷射控制使用独立研制的 ECU 以进行精确调节. 原柴油机主要技术参数如表 1 所示.

表 1 490QDI 柴油机主要技术参数
Table 1 Specifications of 490QDI diesel

型号	缸径 / mm	行程 / mm	排量 / L	压缩比	标定功率 (kW) / 转速 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	最大转矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$) / 转速 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	最低燃油耗 / ($\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	烟度 / BSU
490QDI	90	100	2.54	18:1	45.6/3200	156.8/2240	228	≤ 4.0

试验所用主要测试设备有: CW 160 电涡流测控机及发动机参数控制柜,控制发动机扭矩和转速;利用进气温度、排气温度和机油温度传感器来检测发动机的状态参数;2 台 FCM-05 瞬态自动油耗仪分别测量柴油和甲醇消耗量;采用镇江恒驰科技有限公司生产的汽车级专用 ECU 控制甲醇喷射量. 试验

中的 HC 排放物用 HORIBA MEXA 7100 气体分析仪测量,用氢火焰离子法 (FID) 测量 HC 的排放. 甲醛用气相色谱仪 (SP3420) 分析;催化转化器为专制的氧化性催化转化器,催化剂主要成分为贵金属铂 (Pt)、铑 (Rh) 和钯 (Pd),基体为堇青石蜂窝陶瓷. 图 1 所示为经改装的试验装置系统图.

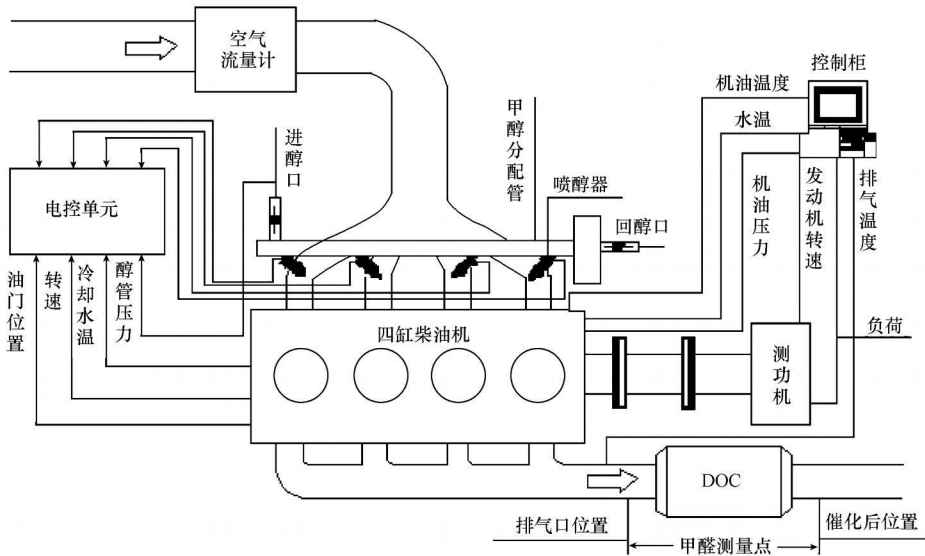


图 1 试验装置系统图
Fig 1 Schematic of the experimental system

2.2 试验方法

试验工况选定在分别为 1800 和 2200 $\text{r} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 在 4Q 6Q 8Q 10Q 12Q 13Q 14Q $\text{N} \cdot \text{m}$ 这 7 个典型负荷条件下通过调节甲醇喷射量以获得 20%、30%、40% 3 种甲醇替代率, 测定各点催化前后的 HC 和甲醛排放。然后在保持高负荷工况不变的前提下改变 DOC 位置以获得更高的排气温度, 然后对比排放结果。

为了在相同发动机工况条件下, 研究比较 DOC 位置移近排气歧管对甲醛排放的影响, 设计了不同

长度的排气管, 如图 1 所示, “催化后 L”指 DOC 距离排气口位置 75cm, “催化后 S”指 DOC 距离排气口位置 30cm 左右。

尾气排放甲醛排放的检测方法为: 用微型泵抽取尾气, 使其通过两个装有 2,4-DNPH 酸饱和溶液的吸收器。吸收液吸收尾气中的甲醛后, 生成较为稳定的衍生物甲醛腙, 然后用二硫化碳萃取吸收液, 用气相色谱仪分析萃取的样品以最终得到甲醛含量。图 2 所示为甲醛测试采样系统图。

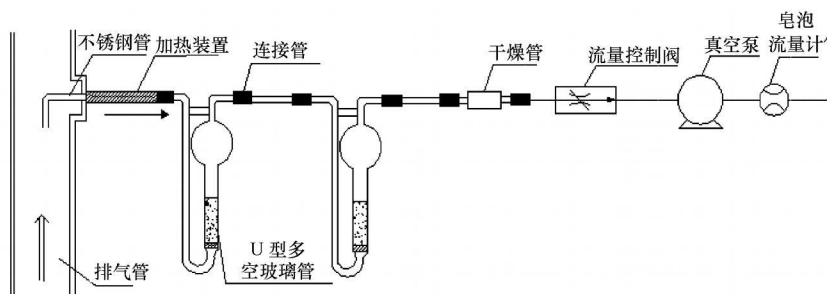


图 2 尾气甲醛的测试采样系统

Fig 2 Schematic of the formaldehyde sampling process

Chao(Chao *et al*, 2000)采用 HPLC 液相色谱法以检测重型柴油甲醇混合燃料发动机中的羰基化合物。张仲荣、宋崇林等 (2006)在火花点火式发动机上采用气相色谱法直接测量甲醇与甲醛排放的关系。日本国家石油能源中心 (petroleum energy center)在多个使用甲醇燃料的城市公交车上采用二阶导数分光光度法分析仪 (second order derivative spectrophotometry analyzer) 对甲醛排放进行测试 (Kanae Niwa *et al*, 1995)。中国的国家标准是采用乙酰丙酮分光光度法对甲醛进行测量。本试验利用 DNPH 的酸性饱和溶液吸收尾气中的羰基化合物, 然后萃取、利用气相色谱仪分析结果。该方法是在 Savant(Savant *et al*, 2007)、陈恭府(陈恭府等, 2005)和 Leong(Leong *et al*, 2002)等的试验方法的基础上改进而来。该方法的优点是避免了尾气中其他非羰基化合物的干扰, 具有高度的选择性, 而且可以在气相色谱仪上进行。该方法的测量准确度和精密度已经在彭红梅等(彭红梅等, 2008)的相关研究中得到了充分证明。

3 试验结果 (Results)

3.1 负荷对甲醛排放的影响

试验中, 为了比较发动机在采用甲醇柴油组合燃烧前后的甲醛排放特性, 对该柴油机的原机甲醛

排放也进行了检测。结果表明, 原机在燃用纯柴油条件下, 尾气中也存在甲醛排放, 其体积分数在催化前为 $(10 \sim 12) \times 10^{-6}$, 催化后可降至 $(5 \sim 10) \times 10^{-6}$ 左右。图 3 显示了在 1800 $\text{r} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 2200 $\text{r} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的不同工况下甲醛排放与替代率的关系。其中 DOC 位置离排气歧管 30cm 可以看出在 1800 $\text{r} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 的 4Q 6Q $\text{N} \cdot \text{m}$ 低负荷区域, 对应排气温度在 180~220℃ 之间, 40 $\text{N} \cdot \text{m}$ 时各替代率条件下排气中的甲醛体积分数为 $(50 \sim 100) \times 10^{-6}$, 而 60 $\text{N} \cdot \text{m}$ 时达到 $(100 \sim 250) \times 10^{-6}$ 。经过柴油氧化催化转化器 (DOC) 后各替代率条件下排气中甲醛体积分数均有不同程度的降低, 其幅度在 30%~55% 之间。在 1800 $\text{r} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下增加负荷达 8Q 10Q $\text{N} \cdot \text{m}$ 的中高区间, 对应排气温度在 260~300℃ 之间, 尾气中甲醛在经过 DOC 催化作用后, 体积分数均有不同程度的升高。100 $\text{N} \cdot \text{m}$ 时更为明显, 在 40% 的替代率时, 升高了近 160%。

升高发动机转速至 2200 $\text{r} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, 图中所示为 2200 $\text{r} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 中低负荷时的甲醛排放特性。由于转速的上升, 燃烧温度升高, 缸内气体流动加强导致可燃混合气更好的混合, 中等负荷 6Q 8Q $\text{N} \cdot \text{m}$ 时 DOC 前的甲醛排放体积分数与 1800 $\text{r} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ 工况相比总体有所下降。

在 40 $\text{N} \cdot \text{m}$ 低负荷区域, 排气温度在 210℃ 左

右,催化后甲醛仍有少量的降低.而在 60~ 100 N•m 中负荷工况下,排气温度在 240~ 320℃,这一温度

范围内,甲醛排放基本随着负荷和替代率的升高而升高.经过 DOC后也随之增加.

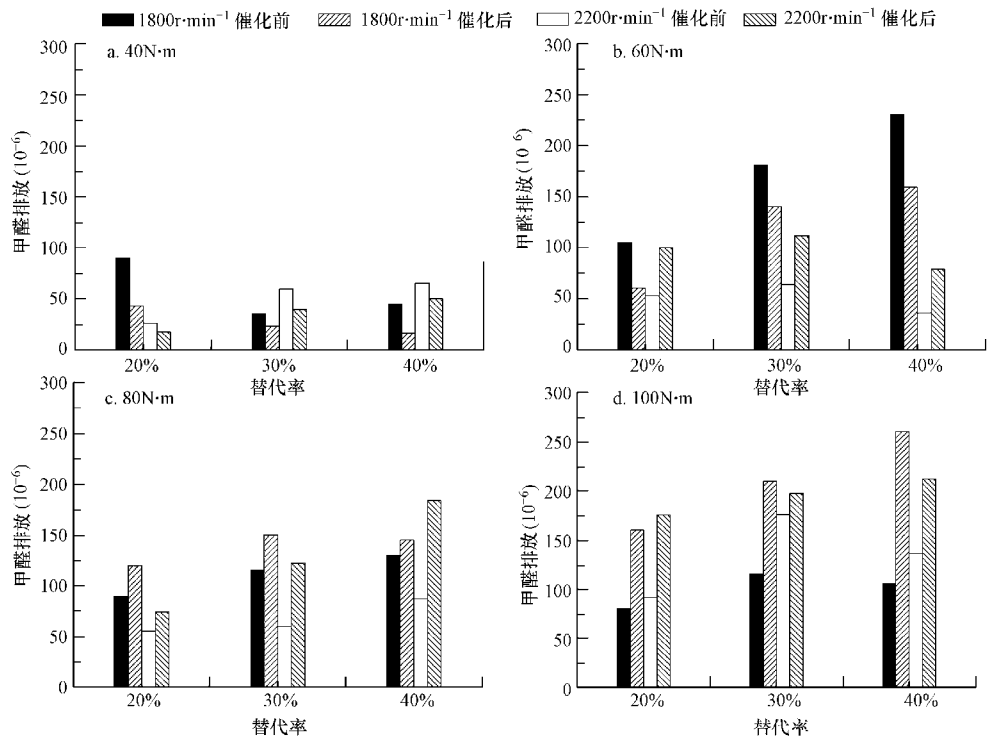


图 3 1800 r·min⁻¹和 2200 r·min⁻¹中低负荷时的甲醛排放对比

Fig 3 HCHO emissions versus methanol proportion in low-medium loads at speeds of 1800 r·min⁻¹ and 2200 r·min⁻¹

3.2 DOC位置对甲醛排放的影响

在 2200 r·min⁻¹的高负荷区域改变排气管长度

使 DOC 更接近排气歧管,同样工况下排温平均上升 10℃左右.如图 4所示,扭矩 100N·m时,催化后甲

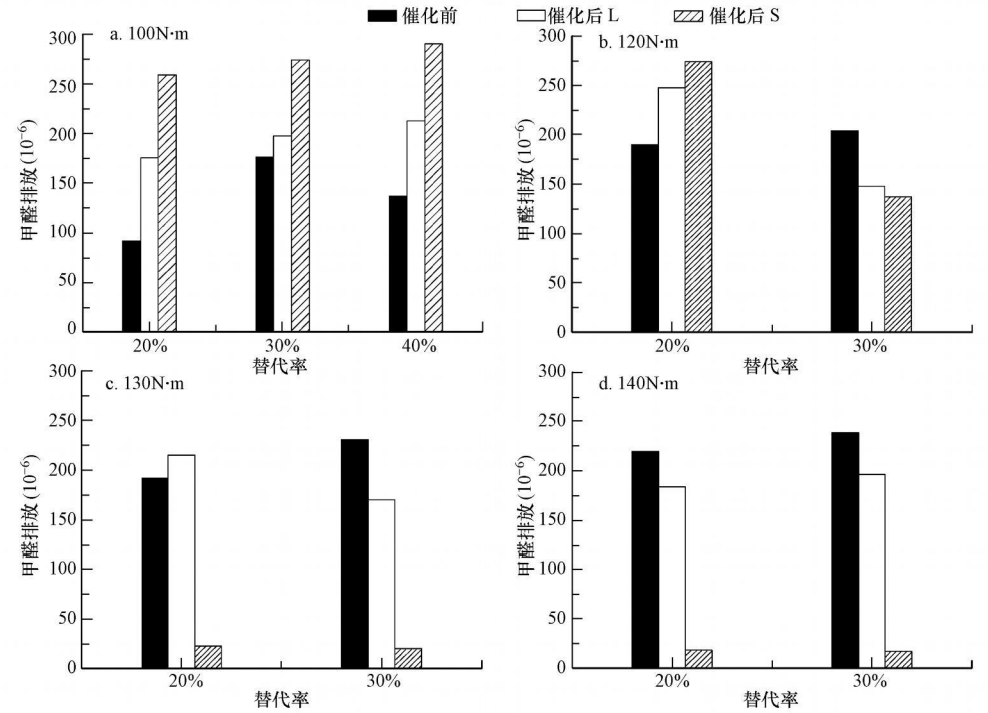


图 4 2200 r·min⁻¹高负荷时的甲醛排放对比

Fig 4 HCHO emissions versus methanol proportion in high loads at speeds of 2200 r·min⁻¹

醛排放进一步上升, 说明在这一温度范围对甲醛生成有利. 而在高负荷区域, 开始出现拐点. 其中 120 N•m 时排温在 380℃ 左右, 130N•m 时排温在 410℃ 左右, 均体现出 20% 替代率时催化后甲醛比催化前升高, 而 30% 替代率时催化后甲醛降低的特点. 这说明在中高负荷工况时较高的替代率会导致较多的 HC 在 DOC 中氧化, 提高了转化器中的反应温度, 使 DOC 的转化效率更高. 同时较高的替代率更容易在缸内形成均质混合气, 提高燃烧速率, 从而提高燃烧热效率.

提前 DOC 位置之后, 可以看到 130N•m 时无论替代率如何甲醛体积分数均大幅降低至 $(15 \sim 25) \times 10^{-6}$. 而在最大负荷 140N•m 区域, 排温在 430℃, 尽管 DOC 未提前, 甲醛体积分数已有所下降. DOC 提前之后则可以降低至 $(10 \sim 15) \times 10^{-6}$, 与柴油的甲醛排放基本相近. 可见排气温度对甲醛排放影响极为重要.

3 3 排温对甲醛排放的影响

图 5 给出了在 2200 r/min 时排气温度与甲醛排放的对应关系. 可以看出甲醛排放总体上均随着排温的升高而增加. 这与所消耗的甲醇的绝对量上升有关. DOC 的作用可以根据温度分为 3 个区间: 220℃ 以下, DOC 可少量降低甲醛排放; 240~380℃ 之间, DOC 有利于甲醛的生成; 到 400℃ 以上, DOC 有降低甲醛含量的趋势. 温度越高这种趋势越明显. 同时可以看到, 甲醇的替代率也是明显的影响因素, 实验中发现, 30% 替代率时甲醛开始降低的温

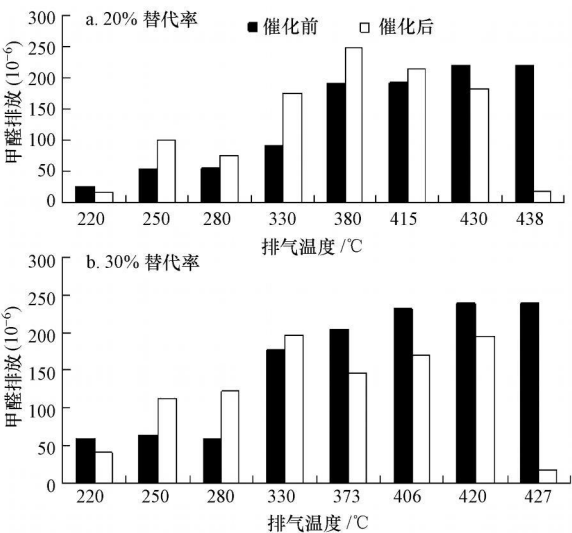


图 5 排气温度与甲醛排放的关系

Fig 5 The total relationship of exhaust temperature and HCHO emission

度要比 20% 替代率时低 40℃ 左右.

3 4 HC 排放特性的分析

图 6 显示了 1800 和 2200 r/min 时各替代率的 HC 排放关系. 可以看出各替代率下 HC 均随着负荷的升高而降低. 然而在 1800 r/min 时, DOC 对 HC 的催化效果并不明显, 直到高负荷阶段才开始起效. 而 2200 r/min 时, 催化前的 HC 就有所下降, 经催化后, 尤其是排温高于 320℃ 以后, HC 迅速下降到比原机还低的水平. 另外, 值得关注的是, HC 排放同样表现出催化后 30% 替代率比 20% 替代率时要低的现象, 可见中高负荷时, 较高的替代率对提高 DOC 反应温度和转化效率有利. 试验中发现, 高于 40% 替代率会导致滞燃期延长, 增加爆震的可能性. 考虑到上述因素, 高负荷下主要做了 30% 替代率.

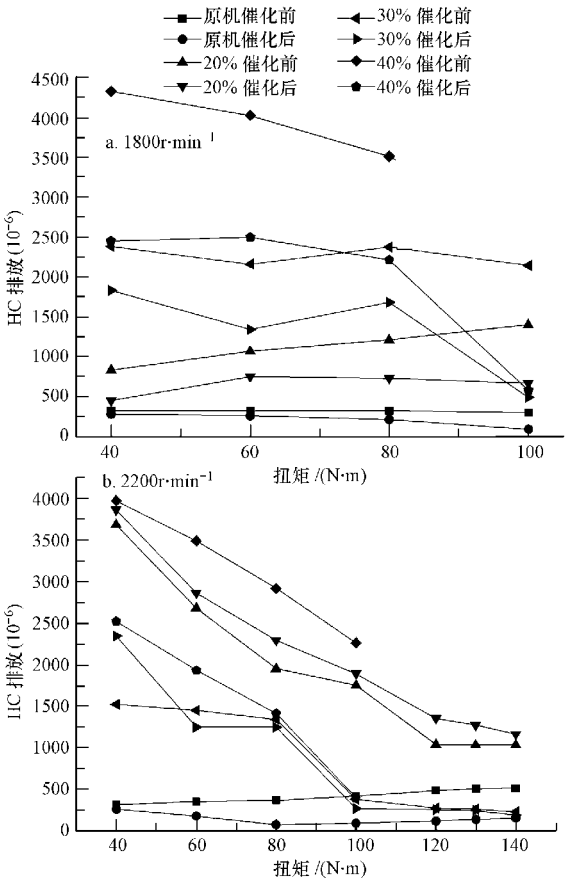


图 6 各转速 HC 排放的对比
Fig 6 Characteristics of HC emissions

另外, 在 2200 r/min 时对改变 DOC 位置前后的 HC 排放的对比, 如图 7 所示. 可以看出由于提前 DOC 位置得到更高的排温, HC 排放有了明显的下降. 在 120N•m 即温度在 380℃ 以上时, HC 排放只

有 $(40 \sim 60) \times 10^{-6}$ 左右, 这与甲醛在这一温度范围也开始下降的特点相一致. DOC 的起效温度范围为今后找到 DOC 分别对 HC 和甲醛降低起效的温度关系提供了依据.

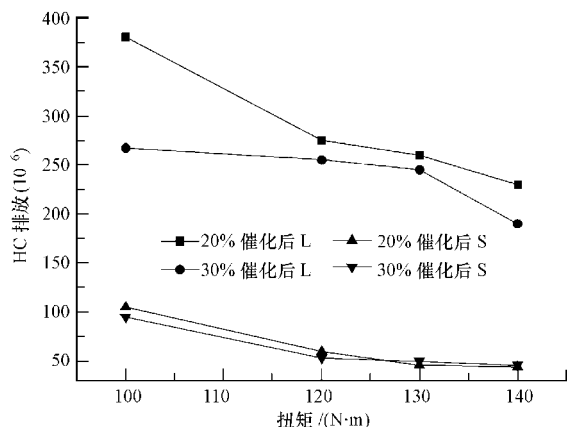


图 7 改变 DOC 位置对 HC 排放的影响

Fig 7 Comparison of HC emissions

3.5 DOC 的总体转化效率规律

综合 DOC 在不同温度下对 HC、HCHO 排放的转化效率, 可得如图 8 所示的总体转化效率示意图. 可见在中间区域有一段适于甲醛生成的温度范围, 而在较高温度范围内, DOC 对 HC 和 HCHO 的转化趋势趋于一致, 并且转化率明显提高.

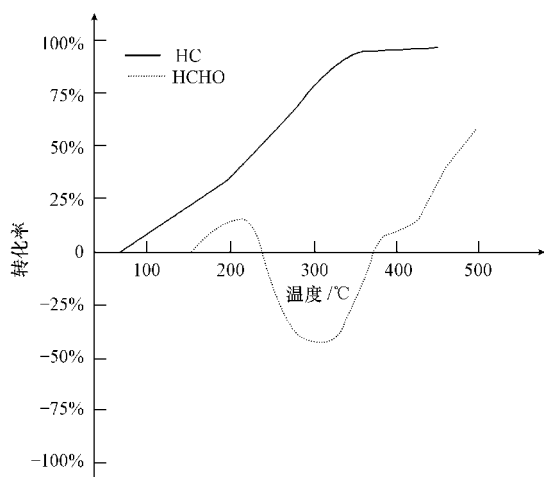


图 8 DOC 的总体转化效率

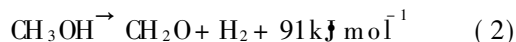
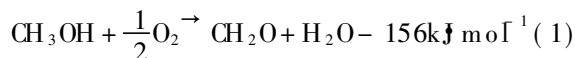
Fig 8 Total conversion efficiency of DOC

4 讨论 (Discussion)

柴油甲醇组合燃烧尾气中的甲醛主要来自气缸内的不完全燃烧以及未燃甲醇在 DOC 中的部分氧化. 在低负荷时, 由于甲醇预混合气较稀且壁面

温度较低, 存在壁面淬熄效应和缝隙效应, 火焰不能传播到整个燃烧室, 导致部分甲醇燃烧不佳; 在高负荷情况下, 由于柴油机本身的气门叠开角存在, 高替代率的甲醇有一部分直接以未燃 HC 的方式进入排气管内.

工业上生产甲醛有两种途径: ①甲醇空气氧化法, 反应方程式见式 (1), 主要催化剂有 Ag 催化剂, 催化温度在 $580 \sim 740^\circ\text{C}$; 还有 Fe-Mo 催化剂, 在常压和 $280 \sim 350^\circ\text{C}$ 时就能进行 (乔晓辉等, 2007), 这一温度范围和 DOC 中产生甲醛的温度范围很接近. ②甲醇脱氢法, 反应方程式见式 (2), 催化剂有 CuO/SiO_2 、 ZnO/SiO_2 以及碱金属盐催化剂, 但是反应温度要求较高 (李速延等, 2008).



由于组合燃烧中甲醇以均质混合气进入气缸, 必然有部分未燃甲醇随扫气过程而进入排气管. 在低负荷运行时, 空气过量系数较大, 排气中有充足的氧, 排气温度在 $220 \sim 230^\circ\text{C}$, 尾气中的甲醇生成甲醛的反应不易进行, 在催化剂 (Pt) 的作用下甲醛会还原或被吸附在催化转化器内, 故尾气中甲醛会减少.

在中等负荷的情况下, 未燃甲醇量增加, 排气温度在 $240 \sim 380^\circ\text{C}$ 之间, 刚好适合反应 (1) 的进行, 导致催化后的甲醛量反而大量增加.

在高负荷的情况下, 排气温度高于 400°C , 而柴油机总是在空气过量系数较大的条件下运行, 排气中氧气仍然比较充足. 因此, 大部分未燃 HC 都能够完全氧化, 减少了甲醛排放.

较高的甲醇对柴油的替代率, 造成排气中未燃甲醇量增加. 这些甲醇在催化器内反应提高催化器内温度, 从中也造成甲醛参加氧化, 致使催化后甲醛排放浓度下降.

5 结论 (Conclusions)

1) DMCC 模式下的甲醛排放主要受到负荷、甲醇替代率、排气温度 3 方面的共同影响. 在中等负荷、排温在 $240 \sim 380^\circ\text{C}$ 时, DOC 促进甲醛的生成; 在高负荷、排温在 400°C 以上时, DOC 开始对降低甲醛排放起效. 同时在该机上中高负荷时较高的替代率不仅有利于热效率的提高, 而且使 DOC 在较低的温度下就开始起效.

2) 在同样工况下将 DOC 位置靠近排气歧管对

甲醛排放有明显的影 响. 在 400℃以上时, 催化后可以将甲醛降低到与纯柴油甲醛排放一样的水平.

3) DOC 对 HC 和甲醛的转化效率的规律有一定的关联. 当排气温度超过 380℃并将 DOC 位置移近排气歧管, 此时, HC 迅速降低到 $(40\sim 60)\times 10^{-6}$ 左右, 而甲醛在这一温度范围也开始下降.

责任作者简介: 姚春德 (1955—), 男, 博士, 教授, 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室副主任, 研究方向为内燃机燃烧过程和排放控制. 1988年毕业于天津大学并获博士学位. 1993~1994年在德国亚琛工业大学学习内燃机排放控制, 1995年在美国工作1年. 通讯地址: 天津市卫津路92号, 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室. 联系电话: 022-27406649 传真: 022-27383362 E-mail: aocdyao@tju.edu.cn

参考文献 (References):

- Chao H R, Lin T C. 2000. Effect of methanol-containing additive on the emission of carbonyl compounds from a heavy-duty diesel engine [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 73: 39—54
- 陈恭府. 2005 超低柴油掺配生质柴油之油品特性及污染排放分析 [D]. 台湾: 国立中山大学
- Chen G F. 2005. Analysis of oil character and exhaust emission of blend fuel of diesel and biodiesel [D]. Taiwan: Zhongshan University (in Chinese)
- Leong S T, Muttanara S, Laortanakul P, *et al*. 2002. Applicability of gasoline containing ethanol as Thailand's alternative fuel to curb toxic VOC pollutants from automobile emission [J]. *Atmospheric Environment*, 36: 3495—3503
- 李速延, 吴祖明, 周晓奇. 2008 甲醇脱氢制无水甲醛的研究进展 [J]. *工业催化*, 16(7): 7—11
- Li S Y, Wu Z M, Zhou X Q. 2008. Researches in synthesis of anhydrous formaldehyde via methanol dehydrogenation [J]. *Industrial Catalysis*, 16(7): 7—11 (in Chinese)
- Kanae N, Iwa Shigeru, Inoue 1995. Advance of technology on methanol fuels and methanol vehicles in Japan [C]. SAE Session Alternative Fuels Conference & Exposition San Diego, CA, USA SAE, 952753
- 彭红梅. 2008 掺醇燃料发动机尾气中甲醛检测方法及其排放特性的研究 [D]. 天津: 天津大学. 40—62
- Peng H M. 2008 The measurement and characteristic of formaldehyde emission from engine burning fuel blended with methanol [D]. Tianjin: Tianjin University. 40—62 (in Chinese)
- 乔晓辉, 方奕文, 黄晓昌. 2007 甲醛合成催化剂的研究进展 [J]. *石油化工*, 36(8): 846—852
- Qiao X H, Fang Y W, Huang X C. 2007. Advances in research of catalysts used in formaldehyde synthesis [J]. *Petrochemical Technology*, 36(8): 846—852 (in Chinese)
- Savant A A, Shah S D, Zhu X N, *et al*. 2007. Real-world emissions of carbonyl compounds from in-use heavy-duty diesel trucks and diesel Back-Up Generators (BUGs) [J]. *Atmospheric Environment*, 41(21): 4535—4547
- Ryan III T W, Maysar M. 1994. Combustion and emissions characteristics of minimally processed methanol in a diesel engine without ignition assist [C]. SAE Session International Congress & Exposition, Detroit, MI, USA, SAE, 940326
- Song R, Liu J, Wang L, *et al*. 2008. Performance and emissions of a diesel engine fuelled with methanol [J]. *Energy Fuels*, 22(6): 3883—3888
- 姚春德, 黄钰, 李帅, 等. 2008 甲醇不同替代比率对 DMCC 排放影响的试验研究 [J]. *内燃机学报*, 26(2): 134—139
- Yao C D, Huang Y, Li S, *et al*. 2008. Effect of methanol percentage on DMCC exhaust emission [J]. *Transactions of CSICE*, 26(2): 134—139 (in Chinese)
- 姚春德, 彭红梅, 刘义亨, 等. 2008. 氧化催化转化器对甲醇压燃尾气中甲醛排放的影响 [J]. *环境科学学报*, 28(6): 1046—1051
- Yao C D, Peng H M, Liu Y T, *et al*. 2008. Effect of oxidation catalyst on formaldehyde emission from methanol compression ignition [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28(6): 1046—1051 (in Chinese)
- 张仲荣, 范国梁, 宋崇林, 等. 2006. 火花点火式电控甲醇发动机非常规污染物的排放特性 [J]. *燃烧科学与技术*, 12(1): 86—89
- Zhang Z R, Fan G L, Song C L, *et al*. 2006. Unregulated emissions characteristics from SI electronic control methanol engine [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 12(1): 86—89 (in Chinese)
- 中华人民共和国国家环境保护局. 2005. GB-T 15516-1995 空气质量 甲醛的测定 乙酰丙酮分光光度法 [S]. 北京: 中国标准出版社
- Bureau of Environmental Protection of China. 2005. GB-T 15516-1995 Air quality-Determination of formaldehyde-Acetylacetone Spectrophotometric method [S]. Beijing: China Standard Publisher (in Chinese)