

重型柴油机进气预混甲醇实现国IV排放标准研究*

魏立江¹ 马雁² 韩国鹏¹ 姜淑君² 李云强² 姚春德¹

(1. 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072;

2. 潍柴动力股份有限公司, 潍坊 261000)

摘要: 在一台6缸重型柴油机上,进行了进气预混甲醇/柴油双燃料(PMDDF)燃烧、结合氧化催化转换器(DOC)和微粒氧化催化转换器(POC)实现国IV排放标准的研究。同时还对进气预混甲醇对发动机燃烧过程以及燃油经济性的影响进行了研究。结果表明:在发动机动力性保持不变的情况下,按照排放法规的检测方法,采用PMDDF模式,仅使用DOC+POC可以使原机的排放从国III提升到国IV水平,且综合当量燃油消耗率相比原机基本不变。研究中还发现,随着甲醇替代率的增加,PMDDF模式的着火滞燃期延长,燃烧持续期缩短。在大负荷时,PMDDF模式的当量比油耗低于原机,而小负荷时略高于原机。

关键词: 重型柴油机 甲醇 双燃料 排放特性

中图分类号:TK421.5 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2015)06-0269-06

Realizing National Phase IV Emission Standard of Heavy-duty Diesel Engine by Using Premixed Methanol/Diesel Dual Fuel

Wei Lijiang¹ Ma Yan² Han Guopeng¹ Jiang Shujun² Li Yunqiang² Yao Chunde¹

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

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261000, China)

Abstract: Premixed methanol diesel dual fuel (PMDDF) is a combustion mode in which methanol is injected from the intake port and then ignited by the direct injected diesel in the cylinder. Many studies have shown that PMDDF mode has the potential to reduce NO_x and PM emissions simultaneously. In this study, investigation on realizing national phase IV emission standard by using PMDDF combustion mode coupling with diesel oxidation catalyst (DOC) and particulate oxidation catalyst (POC) was carried out on a 6-cylinder heavy-duty diesel engine. The effects of premixed methanol on engine combustion process and fuel economy were also investigated. The experimental results showed that with the engine power keeping unchanged, the emission level of the engine was improved from national phase III to IV by using PMDDF combustion mode and the simple aftertreatment DOC + POC. And the specific fuel consumption almost remained unchanged. This technology provided a new route for the realization of national phase IV emission standard. In addition, it was also found that the ignition delay of PMDDF combustion mode was prolonged and the combustion duration was shortened with the increase of premixed methanol ratio. At high engine load, the brake specific fuel consumption of PMDDF combustion mode was lower than that of baseline engine, but it was slightly higher at low engine load. Therefore, the premixed methanol ratio can be a little higher at high engine load but can not be very high at low engine load.

Key words: Heavy-duty diesel engine Methanol Dual fuel Emission characteristic

收稿日期:2014-07-22 修回日期:2014-08-22

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA111719)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120032130009)

作者简介:魏立江,博士生,主要从事内燃机醇类燃料燃烧及排放控制研究,E-mail:bullsky818@163.com

通讯作者:姚春德,教授,博士生导师,主要从事内燃机替代燃料基础燃烧理论及应用研究,E-mail:aredyao@tju.edu.cn

引言

传统的柴油机燃烧是受控于混合速率的扩散燃烧,由于浓混合区以及高温区域的存在导致了大量氮氧化物(NO_x)和微粒(PM)的生成。为了减少 NO_x 和PM排放,改善柴油与空气的混合气形成质量成为关键。基于此,HCCI、PCCI等燃烧概念被提出并取得了良好的效果,其中进气预混方式实现双燃料燃烧因可以借助另一种燃料的理化性质进一步对燃烧过程进行调节,成为实现HCCI以及PCCI等燃烧方式的重要技术手段。近年来,通过进气预混方式实现双燃料燃烧,例如预混汽油/柴油双燃料^[1-2]、预混醇/柴油双燃料^[3-6]、预混天然气/柴油双燃料^[7-8]等,逐渐成为研究的热点。

甲醇可以由煤、天然气以及生物质等大规模制取,且生产成本低,预混甲醇/柴油双燃料(PMDDF)具备大规模使用的条件。因此PMDDF近年来被更多关注并被广泛研究。课题组前期在一台自然吸气柴油机和一台增压柴油机上实现了PMDDF燃烧,取得了同时降低当量比油耗、烟度和 NO_x 排放的效果^[9-10]。Cheung等^[11]、Song等^[4]和Zhang等^[12]都通过PMDDF燃烧实现了 NO_x 和PM的同时降低。

PMDDF燃烧时,甲醇先于柴油进入气缸并与空气形成均质混合气,随后直喷的柴油与之混合并发生相互作用,然后两者一起着火燃烧,与传统柴油或柴油甲醇混合物喷入纯空气氛围中的扩散燃烧以及纯甲醇的火焰传播燃烧存在较大的区别,它是介于扩散燃烧和火焰传播燃烧之间的一种燃烧方式。虽然前期对PMDDF燃烧的排放特性开展了大量的研究,但都是基于特定转速和负荷进行的工作,对于该燃烧方式的综合排放特性目前还不明确。本文在不借助复杂后处理(SCR或DPF)的情况下,研究PMDDF燃烧对重型柴油机综合排放特性的优化程度,并研究进气预混甲醇对燃烧过程以及燃油经济性的影响。

1 试验装置和方法

试验所用发动机为一台6缸、增压中冷、载重车用共轨国Ⅲ柴油机,其主要性能参数如表1所示。为了实现PMDDF燃烧,在发动机的进气歧管处加装了一套甲醇喷射系统。这套系统主要包括16位电控单元、甲醇泵、耐醇管、滤清器、限压阀、低压醇轨和甲醇喷嘴,限压阀能够维持甲醇的喷射压力恒定在0.4 MPa。在每缸的进气歧管处安装了一只甲醇喷嘴,甲醇的喷射量和喷射时刻由自行开发的控制软件控制,而柴油喷射系统保持不变。试验发动

机实物图如图1所示,台架示意图如图2所示。

表1 发动机主要技术参数

Tab.1 Main technical specifications of test engine

参数	数值
型式	直列6缸
缸径×行程/mm×mm	126×130
排量/L	9.726
压缩比	17
最大扭矩(转速)/(N·m)(r·min ⁻¹)	1500(1200~1500)
标定功率(转速)/kW(r·min ⁻¹)	247(1900)
燃油系统	高压共轨
燃烧室形状	ω型

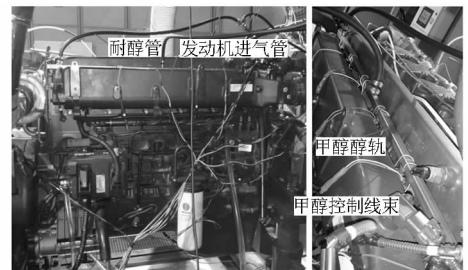


图1 试验发动机实物图

Fig.1 Photographic view of test engine

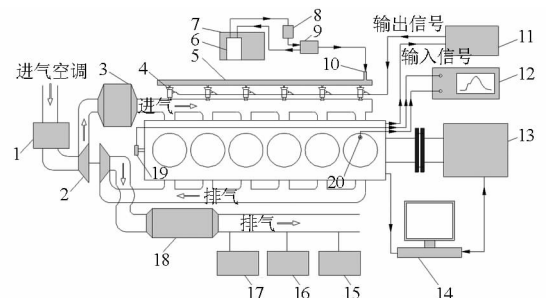


图2 发动机台架系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of engine setup

1. 空气流量计
2. 涡轮增压器
3. 中冷器
4. 甲醇喷嘴
5. 醇轨
6. 甲醇泵
7. 甲醇箱
8. 滤清器
9. 限压阀
10. 甲醇进口
11. 甲醇ECU
12. 燃烧分析仪
13. 测功机
14. 发动机控制系统
15. 颗粒分析仪
16. 排放分析仪
17. 烟度计
18. DOC+POC
19. 角标仪
20. 缸压传感器

试验过程中利用CAC-500型电力测功机及FC2000型发动机自动测控系统对发动机转速和扭矩进行控制。试验所用的燃料包括国Ⅳ柴油和纯度为99.9%的工业级甲醇,柴油和甲醇质量流量分别由AVL735S型瞬态油耗仪和FCM-05型智能油耗仪进行测量。试验时发动机的进气由进气空调供给,进气流量由Ricardo流量计测量。利用AVL415S型烟度计对排气烟度进行测量,PM由AVL472型颗粒采样分析仪测量,称量设备为瑞士梅特勒-托利多生产的AT20型电子天平,精度为0.01 mg。气体排放测试设备为AVL-CEB II型气体分析仪,用化学发光法(CLD)测量 NO_x ,不分光红外

线吸收法(NDIR)测量CO, 氢离子火焰法(FID)测量HC。采用Kistler 6052C型缸压传感器和AVL365C型角标仪对缸压进行测量和编码, 试验过程中待每个试验工况稳定后采集100个循环的缸内压力信号送至AVL IndiSmart 612型燃烧分析仪进行滤波和处理, 从而得到缸内压力和放热率等信息。

预混甲醇比 R_{PM} 为PMDDF模式时减少的柴油消耗量占同一工况下纯柴油模式时柴油消耗量的百分比, 即

$$R_{PM} = \frac{M_D - M_{DM}}{M_D} \times 100\% \quad (1)$$

式中 M_D ——纯柴油模式时的柴油消耗量
 M_{DM} ——PMDDF模式时的柴油消耗量
 折合当量比油耗为

$$b_{eq} = \frac{M_D H_d + M_M H_m}{H_d P_e} \quad (2)$$

式中 M_M ——PMDDF模式的甲醇消耗量
 H_d 、 H_m ——柴油和甲醇的低热值
 P_e ——有效功率

在进行双燃料排放标定之前首先对PMDDF模式的外特性进行标定, 标定完成后的外特性曲线如图3所示, 可见虽然PMDDF模式的排气温度略有下降, 但是双燃料发动机的外特性扭矩和功率与原机完全一致, 发动机的动力性没有发生改变。

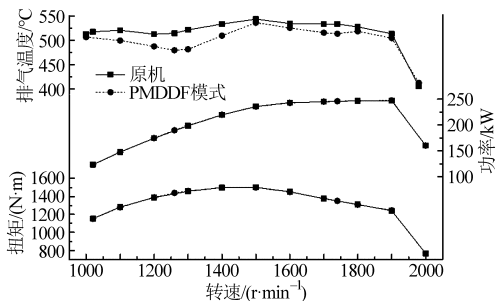


图3 不同模式下的外特性

Fig. 3 Engine external characteristic at different modes

为了进一步改善预混甲醇以后的排放特性, 在距离增压器出口端700 mm处安装了组合式氧化催化转换器(DOC)和微粒氧化催化转换器(POC)。试验选取中国III、IV、V阶段排放法规GB 17691—2005规定的ESC(欧洲稳态测试循环)十三点工况作为试验工况, 根据发动机的外特性确定A、B和C转速分别为1 260、1 500、1 740 r/min。在ESC十三点工况根据排放法规的要求, 对不同模式下的尾气成分进行测量和对比分析。PMDDF模式下, 怠速工况 R_{PM} 为0, 其余十二点的 R_{PM} 如表2所示。试验过程中发动机的油、水温度由恒温系统进行闭环控制。

表2 ESC工况点的预混甲醇比例

Tab. 2 Premixed methanol ratio of ESC

转速 $/(r \cdot \min^{-1})$	负荷率/%			
	25	50	75	100
1 260	0	28.6	36.9	42.6
1 500	4.6	31.1	41.3	34.6
1 740	7.7	25.5	32.5	34.4

2 试验结果

2.1 燃烧特性

图4为C100工况不同 R_{PM} 下的缸压和放热率图。由图可以看出原机为了达到国III排放法规的要求, 喷油时刻相对比较靠后, 缸内的最大爆发压力是由压缩冲程中活塞上行引起的。随着 R_{PM} 的增加, 缸内最大爆发压力逐渐降低, 这主要是由于甲醇高的汽化潜热降低了进气及压缩冲程时的缸内温度。从放热率曲线可以看出随着 R_{PM} 的增加, 缸内着火逐渐推后, 预混燃烧和扩散燃烧放热峰值逐渐增加。

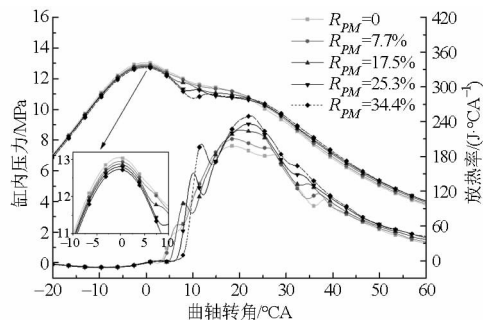


图4 不同 R_{PM} 时的缸内压力和放热率

Fig. 4 In-cylinder pressure and heat release rate at different R_{PM} s

图5所示为C100工况下 R_{PM} 对着火滞燃期和燃烧持续期的影响。可以看出随着 R_{PM} 的增大, 着火滞燃期逐渐延长, 而燃烧持续期则逐渐缩短, 这与之前的研究结果是一致的^[13]。在低温氧化阶段, 甲醇能够将活跃的OH转化为不活跃的 H_2O_2 ^[14], 从而降低反应系统的活性, 因此甲醇氛围对柴油的着

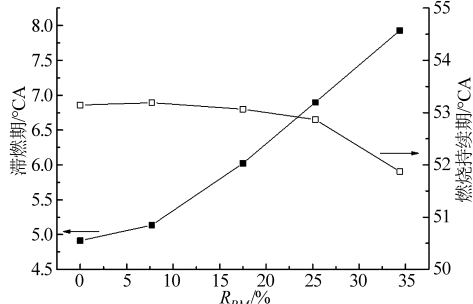


图5 R_{PM} 对滞燃期和燃烧持续期的影响
 Fig. 5 Effect of R_{PM} on ignition delay and combustion duration

火具有一定的抑制作用,所以着火滞燃期随着 R_{PM} 的增加而延长。滞燃期延长后,柴油与空气的混合时间和混合质量会得到改善,再加上预混甲醇量的增加,大量燃料在预混燃烧阶段燃烧,使得整个燃烧过程加快进行,因此燃烧持续期稍有缩短。

2.2 当量比油耗

原机与 PMDDF 模式下 A、B、C 转速的当量比油耗如图 6 所示。在低负荷时,发动机缸内燃烧温度较低,预混甲醇一方面延长了滞燃期,使得燃烧相位推后,另一方面进一步降低了缸内燃烧温度,使得燃烧恶化,因此在低负荷时 PMDDF 模式的当量比油耗略高于原机。而在大负荷时,发动机缸内燃烧温度较高,预混甲醇后较长的滞燃期使得预混柴油量增加,再加上预混甲醇的快速放热,使得大量的热量在更靠近上止点的地方被释放,传热面积小,燃烧等容度高,因此大负荷时 PMDDF 模式的当量比油耗低于原机。

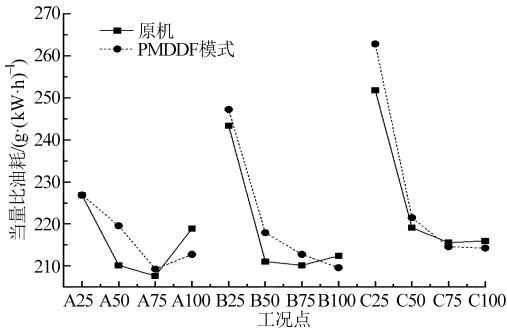


图 6 发动机当量比油耗对比

Fig. 6 Comparison of brake specific fuel consumption

在小负荷时,发动机排气温度低,预混甲醇后会使得排气温度进一步降低,采用较大的 R_{PM} 后有可能使排气温度降至后处理 DOC 的起活温度以下,影响后处理 DOC 的转化效率,因此小负荷时,从经济性和排放性的角度都不宜采用较大的 R_{PM} ,而在大负荷时采用较高的 R_{PM} 有利于降低发动机的比油耗,降低燃油成本。本研究中 ESC 十三点工况各点的 R_{PM} 就是在此原则下结合标定时排放数据选取的(表 2)。

根据 GB 17691—2005 排放法规的方法对各工况点的燃油消耗量进行加权处理,得出原机 ESC 十三点工况的综合燃油消耗率为 217.43 g/(kW·h), PMDDF 模式时为 217.95 g/(kW·h),可以看出 2 种模式时的综合燃油消耗率大致相当。

2.3 排放特性

2.3.1 NO_x 排放

图 7 给出了 ESC 十三点工况不同模式下的 NO_x 排放。考虑到双燃料发动机在纯柴油和 PMDDF 两种模式下都能正常工作,因此对双燃料发动机纯柴

油模式时的排放情况也进行了测量。图中原机表示原机的排放量,原机 + DOC + POC 表示双燃料发动机以纯柴油模式工作时的排放量,PMDDF + DOC + POC 表示双燃料发动机以 PMDDF 模式工作时的排放量,下文均如此表示。图中可以看出,在 A、B、C 转速下 NO_x 排放量均随着负荷的增加而增加,而在相同负荷下,转速越高, NO_x 排放量越低。原机与原机 + DOC + POC 对比可以看出,后处理 DOC 和 POC 对 NO_x 的影响不明显。这与 Mogi 等^[15]的测试结果是相符的, Mogi 等测试了 4 种不同贵金属含量的 DOC,发现 DOC 对 NO_x 的转化效率都在 4% 以下。与原机相比, PMDDF 模式的 NO_x 排放量除了 R_{PM} 为 0 的点外在其余各点均有所下降。

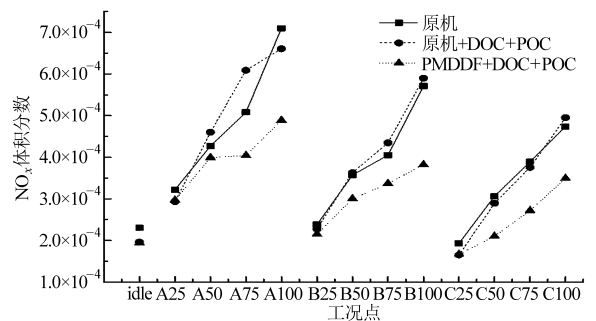


图 7 NO_x 排放

Fig. 7 NO_x emission

根据扩展的 Zeldovich 机理, NO_x 的生成条件为高温、富氧和高温持续时间。在火焰前锋面后的已燃气体中, N 和 O 原子或是分子之间快速进行反应,燃气温度越高, NO_x 的生成量越多,进入膨胀行程后, NO_x 在化学反应上被“冻结”,使得排出机外的 NO_x 浓度远远高于化学反应平衡值。进气预混甲醇对 NO_x 的生成有多方面的影响。首先,由于滞燃期的延长以及柴油喷射量的减少,柴油与空气的混合质量得到改善,再加上高汽化潜热的甲醇会降低进气温度,因此缸内局部高温过浓区域减少。其次,预混甲醇提高了混合气燃烧速度,缩短了高温持续时间。以上两个因素的影响会导致生成 NO_x 的正向反应速率下降,有利于减少 NO_x 的生成。然而由于甲醇含氧质量分数达 50%, 甲醇的加入会增加局部混合气的氧浓度,这又有利于 NO_x 的生成。因此预混甲醇以后 NO_x 的排放量是上述几个因素综合影响的结果,本研究中甲醇对缸内温度的降低以及对高温持续时间的缩短作用占据了主导作用,因此大幅降低了 NO_x 的生成量。

2.3.2 碳烟排放

ESC 十三点工况不同模式下的滤纸烟度如图 8 所示。可以看出经过 DOC 和 POC 后原机各点的烟度排放均有所下降,说明后处理 DOC 和 POC 对烟

度排放有一定的降低效果。柴油机尾气中的 PM 主要成分包括干碳烟、有机可溶性成分和硫酸盐, DOC 能够有效减少 PM 中的有机可溶性成分^[16-17], 而 POC 对干碳烟以及有机可溶性成分均有一定的降低作用。

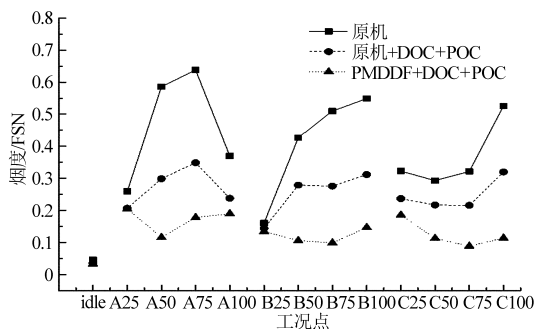


图 8 烟度排放

Fig. 8 Smoke emission

柴油的燃烧是以柴油和空气边混合边燃烧为主的扩散燃烧, 扩散燃烧中局部的高温缺氧使得柴油分子发生裂解, 从而导致了碳烟的生成。甲醇不含 C—C 键, 燃烧过程中不生成碳烟, 在 PMDDF 模式时, 甲醇以均质混合气的形式进入气缸, 一方面减少

了柴油的喷射量, 减少了碳烟生成的来源; 另一方面, 甲醇的含氧特性也减少了缸内的局部过浓区; 再者, 甲醇的加入延长了着火滞燃期, 也有利于改善柴油与空气的混合质量。上述因素的综合影响, 使得 PMDDF 模式时的烟度排放大幅度降低。Cheng 等^[18]、Zhang 等^[19] 和 Geng 等^[20] 在进行 DOC 对 PMDDF 燃烧烟度和 PM 排放的影响研究时都得到了类似的结果。

2.3.3 HC 和 CO 排放

图 9 给出了 ESC 十三点工况不同模式下的 HC 和 CO 排放。在原机各转速的低负荷下, 缸内燃烧温度低, 使得柴油燃烧不完全, 导致了 HC 和 CO 排放量相对较高, 随着负荷的增加, 缸内燃烧温度升高, 原机的 HC 和 CO 排放都维持在较低的水平。双燃料发动机以纯柴油模式工作时, 经过了 DOC 的催化氧化, HC 和 CO 排放进一步降低, 都降到了 5×10^{-6} 以下; 而以 PMDDF 模式工作时, HC 排放量最高也只有不到 2.5×10^{-5} , CO 排放量最高也只有不到 9×10^{-6} 。可见本研究所采用的 DOC 对 HC 和 CO 的净化效果十分显著。

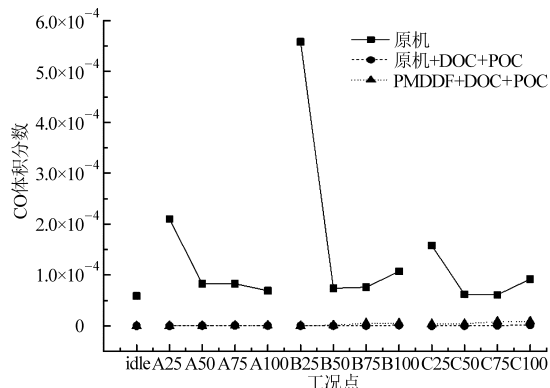
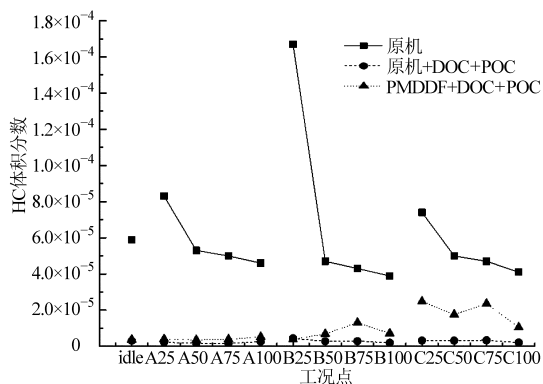


图 9 HC 和 CO 排放

Fig. 9 HC and CO emissions

2.3.4 ESC 十三点工况综合比排放

表 3 给出了不同模式时 ESC 排放测试结果。可以看出原机的各项排放指标均达到了国 III 排放标准。双燃料发动机以纯柴油模式工作时, 即原机经过 DOC 和 POC 的处理后, 虽然 HC 和 CO 都下降了 95% 以上, 但 NO_x 和 PM 仅分别下降了 2.82% 和

37.08%, 无法满足国 IV 排放法规的要求; 而 PMDDF 模式时, 相比原机, 各项排放指标均大幅度下降, HC 和 CO 排放量远低于国 IV 排放标准, NO_x 和 PM 排放量分别下降了 26.77% 和 74.61%, 都低于国 IV 排放法规限值。

表 3 ESC 十三工况排放试验结果

Tab.3 Emission test cycle results according to the thirteen state cycle standard

g/(kW·h)

试验模式	HC 排放量	CO 排放量	NO _x 排放量	PM 排放量
原机	0.195 (0.66 ^{III})	0.802 (2.1 ^{III})	4.715 (5.0 ^{III})	0.044 5 (0.10 ^{III})
原机 + DOC + POC	0.009 (0.66 ^{III})	0.004 (2.1 ^{III})	4.582 (5.0 ^{III})	0.028 0 (0.10 ^{III})
PMDDF + DOC + POC	0.034 (0.46 ^{IV})	0.024 (1.5 ^{IV})	3.453 (3.5 ^{IV})	0.011 3 (0.02 ^{IV})

注: III 和 IV 分别表示国 III 和国 IV 排放限值。

3 结论

(1) PMDDF 模式会改变缸内着火和燃烧特性。随着 R_{PM} 的增加,着火滞燃期延长,而燃烧持续期缩短。

(2) PMDDF 模式时发动机动力性和燃油经济

性保持不变。低负荷时,PMDDF 模式的当量比油耗略高于原机,大负荷时低于原机,而 2 种模式 ESC 十三点工况的综合燃油消耗率大致相当。

(3) 重型柴油机采用 PMDDF 模式可以在只使用 DOC + POC 的情况下,使排放从国 III 提升到国 IV 水平。

参 考 文 献

- Shi Y, Reitz R D. Optimization of a heavy-duty compression-ignition engine fueled with diesel and gasoline-like fuels[J]. *Fuel*, 2010,89(11):3416-3430.
- Yang B B, Yao M F, Cheng W K, et al. Experimental and numerical study on different dual-fuel combustion modes fuelled with gasoline and diesel[J]. *Applied Energy*, 2014,113:722-733.
- 夏琦,姚春德,魏立江,等.柴油/甲醇组合发动机燃烧压力特性研究[J].*农业机械学报*,2014,45(2):6-15.
Xia Qi, Yao Chunde, Wei Lijiang, et al. Investigation of combustion pressure characteristics from diesel engine with DMCC mode [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(2):6-15. (in Chinese)
- Song R Z, Liu J, Wang L J, et al. Performance and emissions of a diesel engine fuelled with methanol[J]. *Energy & Fuels*, 2008,22(6):3883-3888.
- 姚春德,耿鹏,魏立江,等.柴油/甲醇组合燃烧(DMCC)减少重载柴油机烟度排放的试验研究[J].*环境科学学报*,2013,33(11):3146-3152.
Yao Chunde, Geng Peng, Wei Lijiang, et al. Reduction of smoke emissions from heavy duty diesel engine with diesel/methanol compound combustion[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013,33(11):3146-3152. (in Chinese)
- Maurya R K, Agarwal A K. Experimental study of combustion and emission characteristics of ethanol fuelled port injected homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion engine[J]. *Applied Energy*, 2011,88(4):1169-1180.
- Cheenkachorn K, Poornpipatpong C, Ho C G. Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas) [J]. *Energy*, 2013,53(1):52-57.
- Papagiannakis R G, Hountalas D T. Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas[J]. *Energy Conversion and Management*, 2004,45(18-19):2971-2987.
- Yao C D, Cheung C S, Cheng C H, et al. Reduction of smoke and NO_x from diesel engines using a diesel/methanol compound combustion system[J]. *Energy & Fuels*, 2007,21(2):686-691.
- Yao C D, Cheung C S, Cheng C H, et al. Effect of diesel/methanol compound combustion on diesel engine combustion and emissions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008,49(6):1696-1704.
- Cheung C S, Zhang Z H, Chan T L, et al. Investigation on the effect of port-injected methanol on the performance and emissions of a diesel engine at different engine speeds[J]. *Energy & Fuels*, 2009,23(11):5684-5694.
- Zhang Z H, Cheung C S, Chan T L, et al. Experimental investigation of regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with Euro V diesel fuel and fumigation methanol[J]. *Atmospheric Environment*, 2010,44(8):1054-1061.
- 魏立江,姚春德,刘军恒,等.柴油/甲醇组合燃烧特性及道路试验研究[J].*工程热物理学报*,2012,33(5):877-882.
Wei Lijiang, Yao Chunde, Liu Junheng, et al. Combustion characteristics and road test of diesel/methanol compound combustion [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012,33(5):877-882. (in Chinese)
- Xu H J, Yao C D, Xu G L. Chemical kinetic mechanism and a skeletal model for oxidation of n-heptane/methanol fuel blends [J]. *Fuel*, 2012,93(1):625-631.
- Hironobu Mogi, Kazunao Tajima, Mitsuru Hosoya, et al. The reduction of diesel engine emissions by using the oxidation catalysts of Japan diesel 13 mode cycle[C]. *SAE Paper 1999-01-0471*,1999.
- Pataky G M, Baumgard K J, Gratz L D, et al. Effects of an oxidation catalytic converter on regulated and unregulated diesel emissions[C]. *SAE Paper 940243*,1994.
- Hosoya M, Shimoda M. The application of diesel oxidation catalysts to heavy duty diesel engines in Japan[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1996,10(1):83-97.
- Cheng C H, Cheung C S, Chan T L, et al. Experimental investigation on the performance, gaseous and particulate emissions of a methanol fumigated diesel engine[J]. *Science of the Total Environment*, 2008,389(1):115-124.
- Zhang Z H, Cheung C S, Chan T L, et al. Experimental study on particulate emissions of a methanol fumigated diesel engine equipped with diesel oxidation catalyst[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2011,45(2):262-271.
- Geng P, Yao C D, Wei L J, et al. Reduction of PM emissions from a heavy-duty diesel engine with diesel/methanol dual fuel [J]. *Fuel*, 2014,123:1-11.