

DOI: 10.7652/xjtuxb202003004

掺混聚甲氧基二甲醚对中国第六阶段标准柴油机 燃烧与排放特性的影响

赵玉伟¹, 王小琛², 牛天林¹, 程培源¹, 刘圣华²

(1. 空军工程大学防空反导学院, 710051, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为研究高含氧、高十六烷值的新型替代燃料聚甲氧基二甲醚(PODE_n)掺混柴油对中国第六阶段标准柴油机燃烧与排放特性的影响,在一台增压中冷高压共轨的潍柴动力 WP12.460 柴油机上开展了不同 PODE_n 比例(体积分数分别为 10%、20%、30%)PODE_n/柴油混合燃料燃烧特性、燃油经济性及排放特性的试验研究。试验结果表明,随着 PODE_n 掺混比例的增大,缸内最大爆发压力、缸内温度峰值及瞬时放热率峰值均逐渐降低,且各峰值对应相位逐渐前移;燃烧持续期缩短 0.6°~2.1°(曲轴转角),放热更加集中,有效热效率最高可提升 2.43%;有效燃油消耗率逐渐增加,但当量有效燃油消耗率逐渐降低,最大降幅为 4.23%;NO_x 排放量略有升高,CO 排放量、HC 排放量和碳烟排放量均逐渐降低,其中 CO 排放量和碳烟排放量在高负荷工况下降低幅度较大,最高降幅分别为 64.5%和 75.8%。

关键词: 聚甲氧基二甲醚;中国第六阶段标准柴油机;高压共轨;燃烧与排放特性

中图分类号: TK464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)03-0028-07

Effects of PODE_n Addition on Combustion and Emission Characteristics of a China-Ⅵ Standard Diesel Engine

ZHAO Yuwei¹, WANG Xiaochen², NIU Tianlin¹, CHENG Peiyuan¹, LIU Shenghua²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the effects of PODE_n (a new alternative fuel with high oxygen content and cetane number) addition on fuel economy, combustion and emission characteristics of a China-Ⅵ emission standard diesel engine, experiments are conducted on a turbocharged intercooled high-pressure common-rail WP12.460 diesel engine fueled with PODE_n/diesel mixture in different PODE_n blending ratios (volume fractions of 10%, 20%, and 30%). The results show that with increasing PODE_n blending ratio, the peak values of in-cylinder pressure, in-cylinder temperature and transient heat release rate decrease and the corresponding combustion phases appear in advance. The combustion duration shortens by 0.6°-2.1° (crank angle), the brake thermal efficiency increases by 2.43%, and the equivalent fuel consumption decreases by 4.23%; NO_x emission increases while CO, HC and soot emissions decrease. Especially, under high load condition, CO and soot emissions decrease by 64.5% and 75.8%, respectively.

Keywords: polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE_n); China-Ⅵ standard diesel engine; high pressure common rail; combustion and emission characteristics

在环境污染和能源危机的背景下,我国计划于2020年实行中国第六阶段标准(国六)A排放标准,2023年实行国六B排放标准。深圳市于2018年底率先实施国六A排放标准,而上海、广州、天津等城市于2019年7月1日全面实施国六B排放标准。面对日益严格的排放法规及日趋严重的能源危机,柴油机的高效清洁燃烧是研究人员追求的目标,而通过掺混含氧燃料实现燃料特性的优化是达到这一目标的有效途径之一^[1-2]。含氧燃料掺混柴油后,混合燃料的十六烷值、含氧量及蒸发潜热等理化特性随之改变,进而改变了柴油机的喷雾特性、燃烧特性、动力性能与排放特性。目前,掺混柴油应用于柴油机的含氧燃料主要有醇类(例如乙醇、丁醇等)、醚类(例如二甲醚等)和酯类(例如生物柴油等)^[3-5]。

聚甲氧基二甲醚(PODE_n)是一种新型柴油含氧添加剂,其化学表达式为CH₃O(CH₂O)_nCH₃(聚合度 n 为整数且 $2 \leq n \leq 7$)。PODE_n具有高含氧量(45.2%~51%)、高十六烷值(63以上)特性,而且其分子结构中不存在C—C键,可有效降低柴油机燃烧过程中的碳烟排放^[6-7]。此外,PODE_n的理化特性与柴油非常接近,常温20℃下呈液态,能与柴油以任意比例互溶^[8],而且其生产成本与柴油接近,是一种性能优良、具有巨大潜力的柴油添加组分。清华大学的Wang等研究了掺混PODE对轻型和重型柴油机燃烧排放特性的影响,结果表明:掺混PODE会使滞燃期延长,主喷放热峰值增加;掺混20%的PODE,轻型柴油机大负荷工况下的碳烟和CO排放量降幅均能达到90%,但NO_x排放量略有升高,重型柴油机ESC循环的颗粒物(PM)排放量下降36.2%,有效热效率上升0.85%^[7,9]。天津大学的Liu等在一台多缸重型柴油机上研究了PODE掺混柴油并结合废气再循环(EGR)策略对发动机燃烧和排放特性的影响,结果表明:掺混PODE可提高扩散燃烧速率,缩短燃烧持续期,有利于热效率的提高,同时能够有效减少缸内的不均匀程度,降低污染物排放^[10]。上海交通大学的朱益佳等研究了掺混PODE对国四排放标准增压中冷柴油机燃烧和排放性能的影响,结果表明:PODE的掺入改善了主喷燃料的雾化性能,缩短了燃烧持续期,NO_x排放量明显上升,HC排放量略有下降,CO排放量变化不大,发动机的燃油经济性得到明显改善^[11]。江苏大学的刘军恒等研究了PODE掺混比对柴油机NO_x和烟度排放以及颗粒粒径分布的影响规律,结果表明:在柴油中掺混PODE能够降低烟度排放,

最高降幅可达82.4%,中高负荷时NO_x排放略有增加;随PODE掺混比的增大,颗粒总数量浓度下降,颗粒数量浓度峰值、表面积浓度峰值和质量浓度峰值均减小^[6]。太原理工大学的陈东东等在一台国四排放标准柴油机上研究了F-T柴油/PODE混合燃料的燃烧与排放特性,结果表明:混合燃料的缸内压力峰值、放热率峰值和缸内温度都有所降低,且峰值对应的相位均提前,掺混PODE后柴油机NO_x排放量略有升高,碳烟和CO排放量均显著降低,其中,碳烟排放最高降低90.1%^[12]。此外,为进一步完善燃料的理化特性,广西大学的Huang、长安大学的Chen等,还开展了柴油/PODE_n/高辛烷值燃料的三元混合燃料研究,结果表明:在柴油/高辛烷值燃料中掺混一定比例PODE能够同时降低NO_x和碳烟排放^[13-14]。综上所述,掺混PODE_n能够有效改善柴油机的燃烧与排放特性,特别是对PM的减排作用十分明显。

研究表明,同一燃料在不同型号柴油机上的燃烧与排放性能不尽相同^[15]。类似地,掺混同比例的PODE_n/柴油混合燃料对不同类型或型号发动机的燃烧影响,以及NO_x、碳烟和CO排放量的变化幅度等均存在一定差别^[7,11]。大量研究都证实了PODE_n在柴油机上的应用的可行性,然而PODE_n在国六柴油机上的实验研究尚未见报道。鉴于我国即将全面实施国六排放标准这一事实,有必要在满足最新排放标准的国六柴油机上展开PODE_n/柴油混合燃料的相关研究。为此,本文在陕西省重点产业链项目的支持下,基于国六排放标准的高压共轨柴油机,研究了PODE_n掺混比对发动机燃烧、排放特性及燃油经济性的影响。研究结果将为PODE_n作为柴油替代燃料在国六排放标准下的燃料特性和燃烧过程的优化及排放后处理控制策略的修订提供一定的理论参考和数据支撑。

1 实验台架设备及实验燃料

1.1 实验台架及设备

实验发动机为潍柴动力WP12.460型国六柴油机,其主要技术参数见表1。

实验台架主要由电涡流测功机、燃烧分析仪、质量流量计、冷却液和机油恒温系统、尾气分析仪等组成,其布置示意图如图1所示。利用Kistler6052C型缸压传感器采集缸内压力,经由KiBox燃烧分析仪内置Kistler5064型电荷放大器放大后导出。基于缸压曲线,根据热力学第二定律计算瞬时放热率。

表 1 实验柴油机主要技术参数

参数	类型或数值
发动机型式	直列 6 缸、4 冲程、 增压中冷、高压共轨
缸径/mm	126
行程/mm	155
压缩比	17
排量/L	11.596
额定功率/kW	338
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 900
燃油喷射系统	博世 CRSN2-16

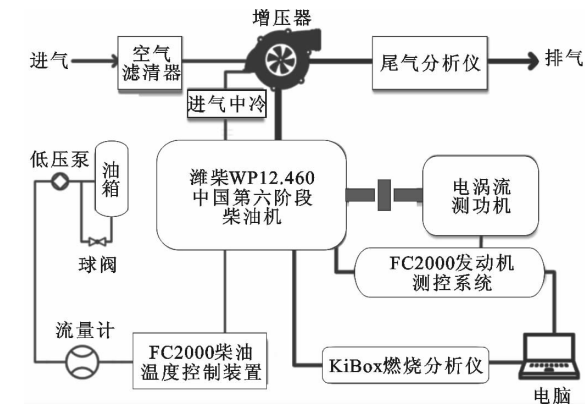


图 1 实验台架布置示意图

采用 Horiba MEXA-584L 型尾气分析仪测量 NO_x、CO、HC 等气体排放量,采用 AVL 415S 烟度计测量排气烟度。使用西门子 FC3000 型质量流量计测量柴油消耗量。

表 2 实验燃料的理化特性^[16-17]

燃料	十六烷值	低热值/(MJ·kg ⁻¹)	氧的质量分数 w(O)/%	密度 ρ(25℃)/(g·cm ⁻³)	运动黏度 ν(25℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	沸点/℃
P0	56.500	42.500	0.000	0.855	3.440	188.000
PODE _n	78.600	19.050	46.980	1.020	1.050	158.490
P10	58.710	39.760	5.490	0.872	3.160	184.550
P20	60.920	37.110	10.790	0.888	2.890	181.220
P30	63.130	34.570	15.890	0.905	2.630	178.020

的理化特性参见文献[16],P10、P20、P30 的理化特性根据文献[17]中的式(1)(2)计算得到。

2 实验结果及分析

2.1 掺混 PODE_n 对发动机燃烧特性的影响

图 2 给出了 p_{me} 为 0.64 MPa 时,PODE_n 掺混比对发动机缸内压力和瞬时代热率的影响。由于喷油采用两次喷射,放热过程分为预喷放热和主喷放

1.2 实验方案

选取柴油机额定转速 $n=1\,900\text{ r/min}$ 下 4 种不同负荷作为实验工况点,平均有效压力(p_{me})分别为 0.32、0.64、0.96 及 1.28 MPa。实验过程中,仅改变实验燃料,发动机喷油策略及其他控制参数未做任何改动,且废气再循环阀保持关闭状态。不同工况下的喷油策略均采用原机“预喷+主喷”的两段喷射,喷油时刻和喷油压力参考原机。冷却水温度和机油温度均控制在 80℃ 左右。实验环境温度为 (22±3)℃、大气湿度为 (10±3)%。

实验前,对所有仪器设备进行了标定和校准,以保证实验过程的可靠性和实验结果的准确性。实验过程中:每个工况点均进行重复测量,消除实验中的不确定性;在发动机运转工况稳定运行 5 min 后,测量 3 次油耗量,取其平均值作为实验结果;燃烧分析仪采集 200 个循环的燃烧特征数据,取其平均值进行分析;尾气分析仪和滤纸烟度计持续测量 1 min,去除无效值后取其平均值作为实验结果。

1.3 实验燃料

实验用 PODE_n 为山东玉皇化工集团生产的质量分数为 99.9% 的工业用 PODE_n,其主要组分为 PODE₂、PODE₃ 和 PODE₄,三者的质量分数分别为 2.553%、88.9%和 8.48%。实验用柴油为 0 号商用柴油。本实验配制了 3 种比例的 PODE_n/柴油混合燃料,PODE_n 体积分数分别为 10%、20% 和 30%,在文中分别标记为 P10、P20、P30,纯柴油标记为 P0。实验燃料的理化特性见表 2,其中 PODE_n

热两个阶段。其中,预喷持续时间较短,掺混 PODE_n 对预喷放热率峰值无明显影响;主喷阶段持续时间较长,主喷放热率峰值随 PODE_n 掺混比的增加而逐渐减小,且峰值对应相位逐渐前移。由于 PODE_n 的低热值比柴油低,在原机电子控制单元(ECU)控制的喷射条件下,混合燃料放出的热量较柴油少,放热率峰值降低。同时,PODE_n 具有较高的十六烷值,缩短了混合燃料的着火滞燃期,着火时

刻提前。

从图 2 中可以看出,随着 PODE_n 掺混比的增大,缸内最大爆发压力亦降低,且缸内压力峰值对应相位逐渐前移。由于 PODE_n 十六烷值较高、自燃性好,且具有良好的挥发性,因此混合燃料的滞燃期变短,缸内压力峰值对应相位前移。混合燃料的缸内压力峰值降低则是由于:一方面, PODE_n 的热值较低,降低了混合燃料的热值;另一方面,混合燃料滞燃期的缩短使得燃烧始点提前,缩短了燃油与空气的混合时间,降低了预混燃烧的比例。

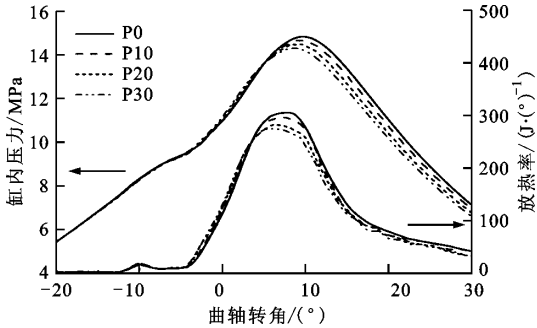


图 2 PODE_n 掺混比对缸内压力和瞬时放热率的影响

图 3 给出了 p_{me} 为 0.64 MPa 时, PODE_n 掺混比对发动机燃烧持续期的影响。本文中定义累积放热率达到 10% 时对应的曲轴转角为燃烧始点 (CA10), 累积放热率达到 90% 时对应的曲轴转角为燃烧终点 (CA90), 燃烧始点与燃烧终点之间的曲轴转角为燃烧持续期。相比于纯柴油工况, 燃用 P10、P20 和 P30 时, CA10 分别提前 0.4°、0.6° 和 0.7°, CA90 分别提前 1.0°、2.2° 和 2.8°, 燃烧持续期分别缩短 0.6°、1.6° 和 2.1°。这表明随 PODE_n 掺混比的增大, 燃烧持续期逐渐缩短, 放热更加集中。

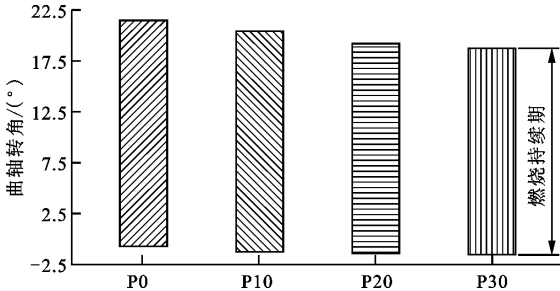


图 3 PODE_n 掺混比对发动机燃烧持续期的影响

图 4 给出了 p_{me} 为 0.64 MPa 时, PODE_n 掺混比对发动机缸内平均温度的影响。从图 4 可以看出, 随 PODE_n 掺混比的增大, 缸内温度峰值降低, 且缸内温度曲线前移。由于掺混 PODE_n 后混合燃料的汽化潜热增大, 燃料喷入气缸后蒸发会吸收部分热量, 产生较高的温降, 导致缸内温度峰值降低。

由于 PODE_n 十六烷值较高, 混合燃料燃烧放热提前, 使得缸内温度峰值出现的时刻前移。

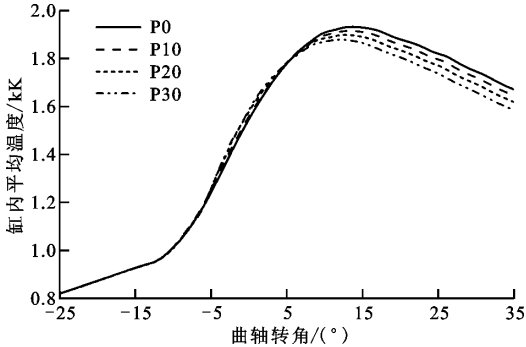


图 4 PODE_n 掺混比对缸内平均温度的影响

2.2 掺混 PODE_n 对发动机经济性的影响

有效燃油消耗率 b_e 和有效热效率 η_{et} 是表征发动机燃油经济性的两个重要参数, 也是衡量发动机性能的重要指标。由于 PODE_n 和柴油的低热值相差较大, 直接比较燃料的燃油消耗率并不能准确反映所消耗燃料的总热值。因此, 引入当量有效燃油消耗率 b_{eq} 的概念, 即把所消耗 PODE_n /柴油混合燃料的总热值转换为与柴油等热值时所对应的柴油消耗量。

图 5 给出了不同负荷工况下 PODE_n 掺混比对发动机有效燃油消耗率 b_e 的影响。从图 5 中可以看出, 在同一负荷下, 随 PODE_n 掺混比的增大, 有效燃油消耗率逐渐增加。由于 PODE_n 的低热值较低, 混合燃料 P10、P20 和 P30 的低热值为柴油低热值的 95.4%、89.2% 和 82.8%, 混合燃料单位质量内通过燃烧产生的热量减少。在未改变发动机 ECU 喷油策略的前提下, 同一平均有效压力对应的扭矩输出相同, 因此需要增大混合燃料的燃油喷射量, 导致有效燃油消耗率增加。

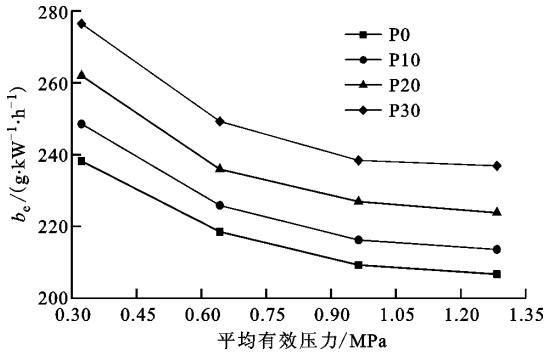


图 5 PODE_n 掺混比对发动机有效燃油消耗率的影响

图 6、7 分别给出了不同负荷下 PODE_n 掺混比对发动机的当量有效燃油消耗率 b_{eq} 和有效热效率 η_{et} 的影响。从图 6、7 可以看出: 在同一负荷下, 随

PODE_n 掺混比的增大,当量有效燃油消耗率逐渐降低,有效热效率明显升高;相对于纯柴油工况, p_{me} 为 0.96 MPa 时 P10、P20、P30 当量有效燃油消耗率分别降低了 2.15%、3.09%、4.23%,有效热效率分别升高了 0.57%、1.41%、2.43%。这是因为 PODE_n 十六烷值较高,掺混 PODE_n 后混合燃料的滞燃期缩短、燃烧提前,主喷阶段燃料的燃烧放热更加靠近上止点(如图 2 所示),同时掺混 PODE_n 后燃烧持续期缩短(如图 3 所示),放热更加集中,而且较低的缸内温度使得传热损失减小。另外,随 PODE_n 掺混比的增大,混合燃料中的含氧量增大,减少了燃烧缺氧区域,提高了燃烧反应速度。因此,掺混 PODE_n 能够有效提高发动机的有效热效率,降低当量有效燃油消耗率。

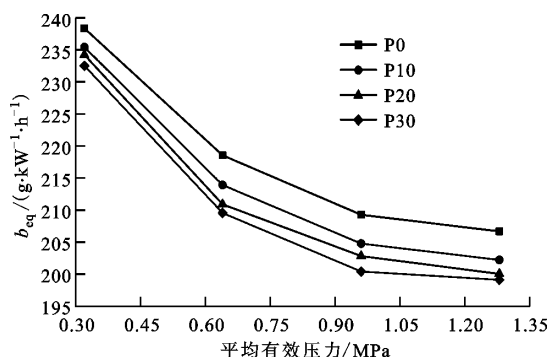


图 6 PODE_n 掺混比对发动机当量有效燃油消耗率的影响

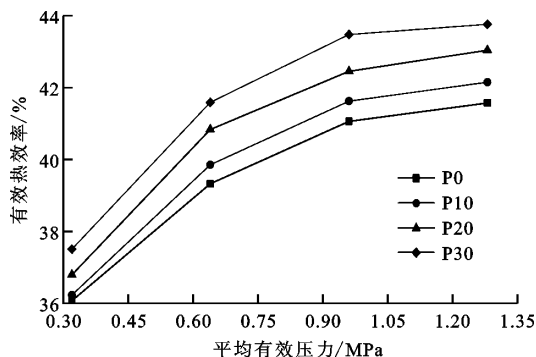


图 7 PODE_n 掺混比对发动机有效热效率的影响

2.3 掺混 PODE_n 对发动机排放特性的影响

图 8 给出了不同负荷工况下 PODE_n 掺混比对发动机 NO_x 排放量的影响。NO_x 生成的条件是高、富氧及较长的高温持续期^[18]。在低负荷工况下,缸内温度较低,随 PODE_n 掺混比的增大,缸内温度进一步降低,且燃烧持续期缩短,使得 NO_x 排放量降低。但是,掺混 PODE_n 后高温区域含氧量增多,引起 NO_x 排放量增加。两种影响共同作用,表现为低负荷工况下,燃用不同掺混比例混合燃料

时 NO_x 排放量相差不大。随着负荷的增加,缸内温度迅速升高,虽然掺混 PODE_n 使得缸内温度有所降低,但是缸内温度仍处于较高水平,此时 NO_x 对燃烧时气缸中的氧浓度较敏感,因此 PODE_n 的高含氧量导致 NO_x 排放量迅速升高。

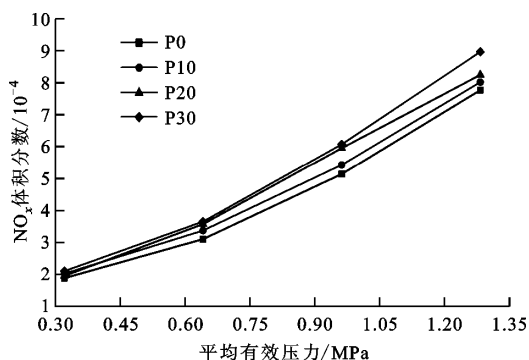


图 8 PODE_n 掺混比对发动机 NO_x 排放量的影响

图 9 给出了不同负荷工况下 PODE_n 掺混比对发动机 CO 排放量的影响。从图 9 可以看出,中低负荷时,CO 排放量随 PODE_n 掺混比的增加而降低的幅度较小,而高负荷时,CO 排放量随 PODE_n 掺混比的增加而显著降低。 p_{me} 为 1.28 MPa 时,P10、P20、P30 的 CO 排放量分别较 P0 降低了 37.5%、51.8%、64.5%。CO 主要生成于过量空气系数小于 1 的浓混合气区或低温区域。中低负荷下,柴油机基本上在过量空气系数大于 1 的稀混合气下工作,缸内低温、缺氧区域较少,PODE_n 对 CO 排放量的影响较小,CO 排放量较低;而在高负荷工况下,缸内存在局部缺氧的较浓混合气,导致 CO 排放量迅速增多。PODE_n 的高含氧特性使得空燃比和过量空气系数增大,改善了燃烧室中局部缺氧区域的燃烧状况,加快了 CO 的氧化速率,因此 CO 排放量显著降低。

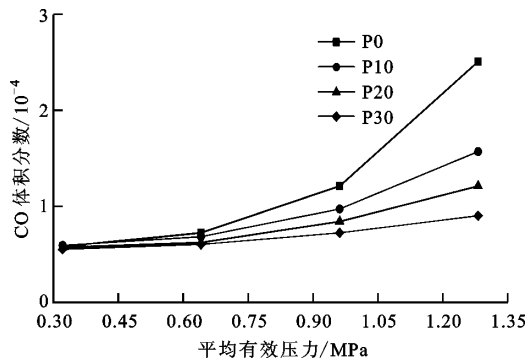


图 9 PODE_n 掺混比对发动机 CO 排放量的影响

图 10 给出了不同负荷工况下 PODE_n 掺混比对发动机 HC 排放量的影响。从图 10 可以看出,同一

负荷下,随 PODE_n 掺混比的增大,HC 排放量逐渐降低。这是因为 HC 主要生成于喷油束外围的过稀混合气及壁面淬熄层, PODE_n 的高十六烷值特性改善了混合燃料的着火性能,滞燃期缩短,过稀混合区及壁面淬熄层减少。同时,由于 PODE_n 沸点低、含氧量高,油气混合与燃烧速度得到改善,有利于 HC 的氧化。从图 10 中还可以看出,随负荷的增大,HC 排放量明显降低。这是由于低负荷时缸内温度较低,HC 排放量较高;随负荷的增大,缸内温度逐渐升高,更多的 HC 被氧化,HC 排放量逐渐降低。

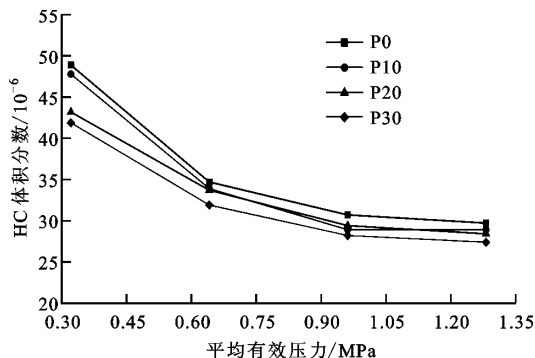


图 10 PODE_n 掺混比对发动机 HC 排放量的影响

图 11 给出了不同负荷工况下 PODE_n 掺混比对发动机碳烟排放的影响。从图 11 可以看出,掺混 PODE_n 能有效降低柴油机的碳烟排放,在大负荷时降低幅度更加明显。相对于 P0, p_{me} 为 1.28 MPa 时 P10、P20、P30 的排气烟度分别降低了 31.8%、62.1%、75.8%。相对于柴油, PODE_n 具有良好的挥发性和较低的黏度及沸点,掺混 PODE_n 有助于燃料的蒸发与雾化,能够改善混合气的均匀性,有效避免因混合气不均匀而导致的局部高温缺氧条件下的燃油裂解。此外,掺混 PODE_n 后可使混合燃料的含氧量增加,燃烧过程中能够起到自供氧作用,从而改善柴油机扩散燃烧过程中部分较浓区域的燃烧状况,并促进碳烟的后氧化过程。特别地, PODE_n 分子中不含有 C—C 键,在燃烧反应过程中可以明

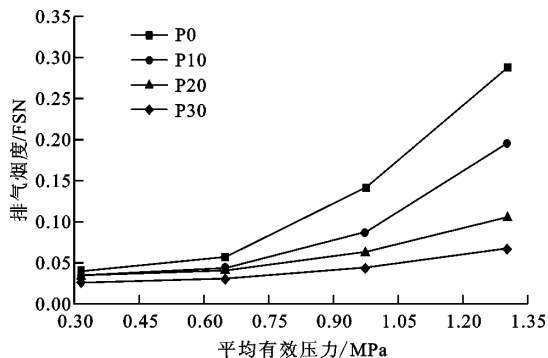


图 11 PODE_n 掺混比对发动机排气烟度的影响

显减少烯烃以及碳烟前驱物 (PAHs) 的生成量,进而减少碳烟生成量,以上因素使得掺混 PODE_n 后柴油机的碳烟排放得到极大改善。

3 结 论

本文在一台中国第六阶段排放标准柴油机上,研究了 PODE_n 掺混比对柴油机燃烧与排放特性及燃油经济性的影响,得到以下结论。

(1) PODE_n 的掺混显著影响发动机的燃烧特性。随 PODE_n 掺混比的增大:缸内压力与缸内温度峰值均逐渐降低,峰值对应相位逐渐前移;预喷放热率峰值变化不大,主喷放热率峰值逐渐降低,峰值对应相位逐渐前移。

(2) 随 PODE_n 掺混比的增大:燃烧始点前移,燃烧持续期缩短 $0.6^\circ \sim 2.1^\circ$ (曲轴转角),有效热效率最高可提升 2.43%;有效燃油消耗率有所增加,但当量有效燃油消耗率明显降低,最大降幅为 4.23%;

(3) 在柴油中掺混 PODE_n 能够有效改善柴油机的排放特性,尤其是在高负荷工况下,CO 和碳烟排放量均显著降低,最高降幅分别为 64.5% 和 75.8%;随 PODE_n 掺混比的增大, NO_x 排放量略有升高,HC 排放量逐渐降低。

参考文献:

- [1] HOSSEINIS H, ALISARAEIA T, GHOBADIAN B, et al. Performance and emission characteristics of a CI engine fueled with carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends [J]. Renewable Energy, 2017, 111: 201-213.
- [2] CHEN Zhifang, YAO Chunde, YAO Anren, et al. The impact of methanol injecting position on cylinder-to-cylinder variation in a diesel methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2017, 191: 150-163.
- [3] FANG Qiang, FANG Junhua, ZHUANG Jian, et al. Effects of ethanol-diesel-biodiesel blends on combustion and emissions in premixed low temperature combustion [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 54 (2): 541-548.
- [4] PARK S H, LEE C S. Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 848-863.
- [5] ZHUANG Yuan, HONG Guang. Effects of direct injection timing of ethanol fuel on engine knock and lean burn in a port injection gasoline engine [J]. Fuel, 2014, 135(11): 27-37.

- [6] 刘军恒, 孙平, 刘源, 等. PODE 掺混比对高压共轨柴油机颗粒物物理特性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 104-111.
- LIU Junheng, SUN Ping, LIU Yuan, et al. Effects of PODE blending ratio on the physical characteristics of particulate matters for high-pressure common-rail diesel engines [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 104-111.
- [7] LIU Haoye, WANG Zhi, ZHANG Jun, et al. Study on combustion and emission characteristics of polyoxymethylene dimethyl ethers/diesel blends in light-duty and heavy-duty diesel engines [J]. Applied Energy, 2017, 185: 1393-1402.
- [8] 肖潇, 郑轶, 王云芳, 等. 聚甲氧基二甲醚(PODE)与柴油的互溶性研究 [J]. 柴油机, 2015, 37(3): 24-28.
- XIAO Xiao, ZHENG Yi, WANG Yunfang, et al. Research on compatibility of PODE and diesel fuel [J]. Diesel Engine, 2015, 37(3): 24-28.
- [9] WANG Zhi, LIU Haoye, ZHANG Jun, et al. Performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE₃₋₄)/diesel blends [J]. Energy Procedia, 2015, 75: 2337-2344.
- [10] LIU Jialin, WANG Hu, LI Ying, et al. Effects of diesel/PODE (polyoxymethylene dimethyl ethers) blends on combustion and emission characteristics in a heavy duty diesel engine [J]. Fuel, 2016, 177: 206-216.
- [11] 朱益佳, 林达, 魏小栋, 等. 掺混 PODE 对增压中冷柴油机燃烧和排放性能的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(1): 33-39.
- ZHU Yijia, LIN Da, WEI Xiaodong, et al. Effect of PODE on combustion and emission characteristics of a turbo-charged intercooled diesel engine [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(1): 33-39.
- [12] 陈东东, 张翠平, 张瑞亮, 等. F-T 柴油/PODE 混合燃料的燃烧和排放特性研究 [J]. 可再生能源, 2018, 36(5): 644-649.
- CHEN Dongdong, ZHANG Cuiping, ZHANG Ruiliang, et al. Combustion and emission characteristics of F-T diesel/PODE blended fuel [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(5): 644-649.
- [13] HUANG Haozhong, LIU Qingsheng, TENG Wenwen, et al. Improvement of combustion performance and emissions in diesel engines by fueling *n*-butanol/diesel/PODE₃₋₄ mixtures [J]. Applied Energy, 2018, 227: 38-48.
- [14] CHEN Hao, SU Xin, LI Junhui, et al. Effects of gasoline and polyoxymethylene dimethyl ethers blending in diesel on the combustion and emission of a common rail diesel engine [J]. Energy, 2019, 171: 981-999.
- [15] CHEN Zhenbin, WANG Xiaochen, PEI Yiqiang, et al. Experimental investigation of the performance and emissions of diesel engines by a novel emulsified diesel fuel [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 95: 334-341.
- [16] 李强, 吴玉茵, 姚晨光, 等. 车用电控高压共轨柴油机掺烧聚甲氧基二甲醚排放特性研究 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2018, 47(5): 55-60.
- LI Qiang, WU Yuyin, YAO Chenguang, et al. Research on combustion characteristics of an automotive high-pressure common rail diesel engine fuelled with hybrid dimethoxymethane diesel [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2018, 47(5): 55-60.
- [17] WANG Jianxin, WU Fujia, XIAO Jianhua, et al. Oxygenated blend design and its effects on reducing diesel particulate emissions [J]. Fuel, 2009, 88(10): 2037-2045.
- [18] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1988: 586-592.

(编辑 武红江)