

供油提前角对柴油/PODE_n混合燃料排放特性影响的试验研究

赵玉伟^{1*}, 拉巴桑珠², 袁 华², 常超全², 张 星², 郑文秀¹

¹空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安

²中国人民解放军77618部队, 西藏 拉萨

收稿日期: 2021年11月5日; 录用日期: 2021年12月7日; 发布日期: 2021年12月15日

摘 要

在一台云内动力2102QB型柴油机上开展了燃用柴油/PODE_n混合燃料的台架试验研究, 并分析了供油提前角对PODE_n质量分数为30%时柴油机排放特性的影响规律。结果表明: PODE_n的掺入改善了柴油机的排放, 尤其是中低负荷工况下柴油机的CO排放和碳烟排放均处于较低水平。随着供油提前角的减小, HC排放呈现增加的趋势; CO排放也逐渐增加, 中低负荷下增加的幅度较小, 高负荷下增加的幅度较大; NO_x排放逐渐降低, 当供油提前角为18°CA BTDC时, NO_x排放降低的幅度较大; 中低负荷工况下, 碳烟排放没有明显变化, 高负荷工况下, 碳烟排放逐渐增多。

关键词

供油提前角, 聚甲氧基二甲醚(PODE_n), 排放特性, 柴油机

Experimental Study on the Effects of Fuel Supply Advance Angle on the Emission Characteristics of Diesel/PODE_n Blends

Yuwei Zhao^{1*}, Lhakpa Samdrup², Hua Yuan², Chaoquan Chang², Xing Zhang², Wenxiu Zheng¹

¹Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi

²Unit 77618 of the Chinese People's Liberation Army, Lhasa Tibet

Received: Nov. 5th, 2021; accepted: Dec. 7th, 2021; published: Dec. 15th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 赵玉伟, 拉巴桑珠, 袁华, 常超全, 张星, 郑文秀. 供油提前角对柴油/PODE_n混合燃料排放特性影响的试验研究[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(6): 1156-1163. DOI: 10.12677/aep.2021.116139

Abstract

Experimental study was conducted on a YUNNEI power 2102QB diesel engine fueled with diesel/PODE_n blends, and the effects of fuel supply advance angle on the emission characteristics of Diesel/PODE_n blends (PODE_n mass fraction of 30%) was studied in this paper. Results showed that the addition of PODE_n improved the emissions of diesel engine, especially the CO and soot emission were at a low level at medium and low load conditions. With the decrease of fuel supply advance angle, HC emission increased. CO emission also increased gradually, with a small increase at medium and low load and a large increase at high load. NO_x emission decreased greatly when the fuel supply advance angle is 18°CA before top dead center (BTDC). The soot emission did not change significantly at medium and low load conditions and increased gradually at high load condition.

Keywords

Fuel Supply Advance Angle, Polyoxymethylene Dimethyl Ethers (PODE_n), Emission Characteristics, Diesel Engine

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着世界范围内环境污染的日趋严重和能源危机的不断加剧,汽车发动机的尾气排放逐渐成为内燃机学者研究的重点[1] [2] [3] [4]。柴油机的动力性、经济性以及排放特性都优于汽油机,因此在汽车上得到越来越广泛的应用[5] [6] [7]。研究表明,在柴油中掺混一定比例的含氧燃料,混合燃料的含氧量和十六烷值等特性发生改变,进而影响柴油机的燃料喷雾特性、燃烧过程和污染物排放[8] [9] [10]。通过选择优质的含氧替代燃料并调整喷油和进气等关键参数,能够改善柴油机的性能,达到高效、清洁燃烧的目的。

聚甲氧基二甲醚(Polyoxymethylene Dimethyl Ethers, PODE_n)是一种理化特性与柴油相近的新型柴油含氧添加剂,其化学表达式为 CH₃O(CH₂O)_nCH₃ (聚合度 2 ≤ n ≤ 8) [11]。近年来,国内外内燃机研究人员广泛开展了柴油机燃用柴油/PODE_n 混合燃料的台架试验研究[12] [13] [14] [15]。结果表明,掺混 PODE_n 以后柴油的滞燃期略有缩短,扩散燃烧速度加快,有利于柴油机热效率的提高;同时,柴油机的排放特性得到有效改善,尤其是碳烟颗粒物排放,均有较大幅度的降低[16] [17]。

供油提前角对柴油机的燃烧与排放特性有重要的影响,供油提前角的变化会影响燃料与空气的混合时间、燃料的滞燃期、预混燃烧所占比例和缸内最高压力等参数,进而影响柴油机污染物的生成[18] [19] [20]。掺混 PODE_n 以后混合燃料的理化特性与柴油有所不同,柴油机的燃烧过程和污染物排放也会发生变化。为研究供油提前角对柴油/PODE_n 混合燃料排放特性的影响,本文对 PODE_n 掺混比例为 30% 的混合燃料进行了不同供油提前角下的台架试验,并对柴油机的排放特性进行了分析。

2. 试验台架及设备

本试验采用的发动机是昆明云内动力股份有限公司生产的 2102QB 型柴油机,该发动机为双缸、四冲程、自然吸气、水冷、直喷式柴油机,其主要技术参数如表 1 所示。

Table 1. Main specifications of 2102QB diesel engine
表 1. 2102QB 型柴油机主要技术参数

技术参数	类型或数值
燃烧室类型	ω 型
缸径/mm	102
行程/mm	115
压缩比	17.5
进气方式	自然吸气
额定功率(kW)/额定转速(r/min)	26.1/2700
最大功率(kW)/转速(r/min)	30.8/1400

本试验的发动机台架布置如图 1 所示。试验过程中利用缸压传感器、角标器、电荷放大器以及数据采集仪测量缸内压力；利用湘仪 FC2210Z 型智能油耗仪测量油耗；尾气排放测量是通过从排气总管中分流，并连接 HORIBA 公司的 MEXA 7100DEGR 型气体排放分析仪测量 HC、CO 和 NO_x 排放，利用 MEXA-600S 型烟度计测量碳烟排放。试验过程中，尾气分析仪和烟度计均持续测量 1 min，取测量值的平均值作为试验结果。发动机试验控制系统用来调节发动机的运行工况，根据需要改变发动机的运转参数；负载加载由湘仪公司的 CW-500 型电涡流测功机完成；循环水冷却系统可以监测冷却水温 and 机油温度等，当其超出预设范围时设备会自动报警，提醒操作人员调节冷却水流量。

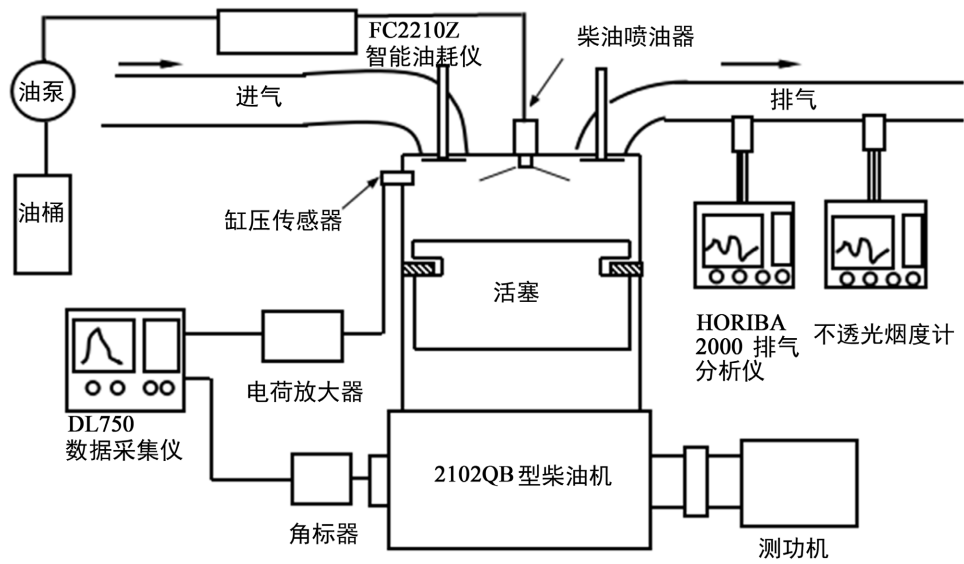


Figure 1. Schematic diagram of the experimental set-up
图 1. 发动机台架布置示意图

本试验所用的柴油为 0#商用柴油，所用的 PODE_n 为山东盛荣化工公司生产的纯度为 99.9%的工业用 PODE_n，试验所用燃料为 PODE_n 质量分数为 30%的柴油/PODE_n 混合燃料(标记为 P30D70)。选取 $n = 1500$ r/min、 $n = 2000$ r/min 两个转速，每种转速下最大负荷的 10%、25%、50%、75%和 100%在内的 5 种由低到高的负荷作为试验工况点，对应的平均有效压力(BMEP)分别为 0.06684 MPa、0.1671 MPa、0.3342 MPa、0.5013 MPa、0.6684 MPa。

3. 试验结果及分析

3.1. 供油提前角对 HC 排放的影响

图 2 所示为不同转速、不同工况下, 供油提前角对柴油机燃用 P30D70 时 HC 排放的影响。从图中可以看出, 随着供油提前角的减小, HC 排放呈现增加的趋势。如图 2(a)所示, 在 $n = 1500 \text{ r/min}$ 、 $\text{BMEP} = 0.3342 \text{ MPa}$ 工况下, 供油提前角为 18°CA BTDC 和 22°CA BTDC 时的 HC 排放比供油提前角为 25°CA BTDC 时分别增加了 25.4%和 14.9%。如图 2(b)所示, 在 $n = 2000 \text{ r/min}$ 、 $\text{BMEP} = 0.3342 \text{ MPa}$ 工况下, 供油提前角为 18°CA BTDC 和 22°CA BTDC 时的 HC 排放比供油提前角为 25°CA BTDC 时分别增加了 17.2%和 12.2%。

供油提前角的减小使得喷油时刻推后, 不利于燃料与新鲜空气的混合, 降低了可燃混合气均匀性, 过稀混合气区域增多, 因此 HC 排放增加。同时, 着火时刻推迟, 预混燃烧放热量减少, 使得缸内最高温度下降, 不利于 HC 的氧化, 导致 HC 排放进一步增加。从图中还可以看出, 同一负荷下, $n = 2000 \text{ r/min}$ 工况下的 HC 排放低于 $n = 1500 \text{ r/min}$ 工况。这是由于转速增加以后, 气缸内的湍流增强, 燃料与空气混合更加均匀, HC 排放降低, 而且缸内温度随着转速的增加而升高, 有利于 HC 的氧化。

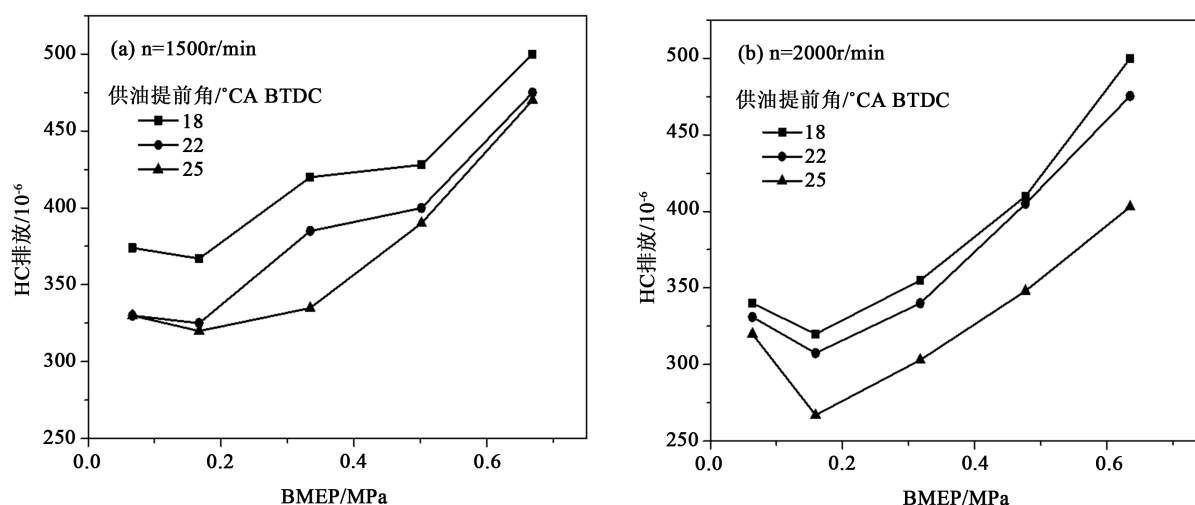


Figure 2. Effects of fuel supply advance angle on HC emission

图 2. 供油提前角对柴油机 HC 排放的影响

3.2. 供油提前角对 CO 排放的影响

图 3 所示为不同转速、不同工况下, 供油提前角对柴油机燃用 P30D70 时 CO 排放的影响。从图中可以看出, CO 排放随供油提前角的减小而增加, 而且在中低负荷下, CO 排放增加的幅度较小, 在高负荷下, 增加的幅度较大。如图 3(a)所示, 在 $\text{BMEP} = 0.1671 \text{ MPa}$ 和 $\text{BMEP} = 0.5013 \text{ MPa}$ 工况下, 供油提前角为 18°CA BTDC 时的 CO 排放分别比供油提前角为 25°CA BTDC 时增加了 0.006%和 0.024%, 但此时的 CO 排放依然很低; 而在 CO 排放较高的高负荷工况下, 如 $\text{BMEP} = 0.6684 \text{ MPa}$ 时, 供油提前角为 18°CA BTDC 时的 CO 排放比供油提前角为 25°CA BTDC 时增加了 0.038%。总体来说, 改变供油提前角导致的 CO 排放增加的幅度在可接受的范围内。

供油提前角减小后, 燃料与空气的混合时间缩短, 不利于燃料的燃烧以及 CO 的氧化, 导致 CO 排放的增加。在中低负荷下, 气缸内氧气充足, 过量空气系数较大, 且随着高含氧 PODE_n 的掺入, 缺氧区域进一步较少, 使得 CO 排放较低, 供油提前角的减小对 CO 排放的影响较小。而在高负荷下, 气缸内的氧气减少, 过量空气系数减小, CO 排放增多, 且随着供油提前角的减小导致 CO 排放进一步增多。从

图中还可以看出,同一负荷下, $n = 2000 \text{ r/min}$ 工况下的 CO 排放低于 $n = 1500 \text{ r/min}$ 工况。这是因为转速增加后,气缸内气流运动加强,燃料与新鲜空气的混合得到改善,从而有利于新鲜空气中氧气的利用,促进了 CO 的氧化。同时转速增加后,排温增加,也促进了 CO 的后氧化。

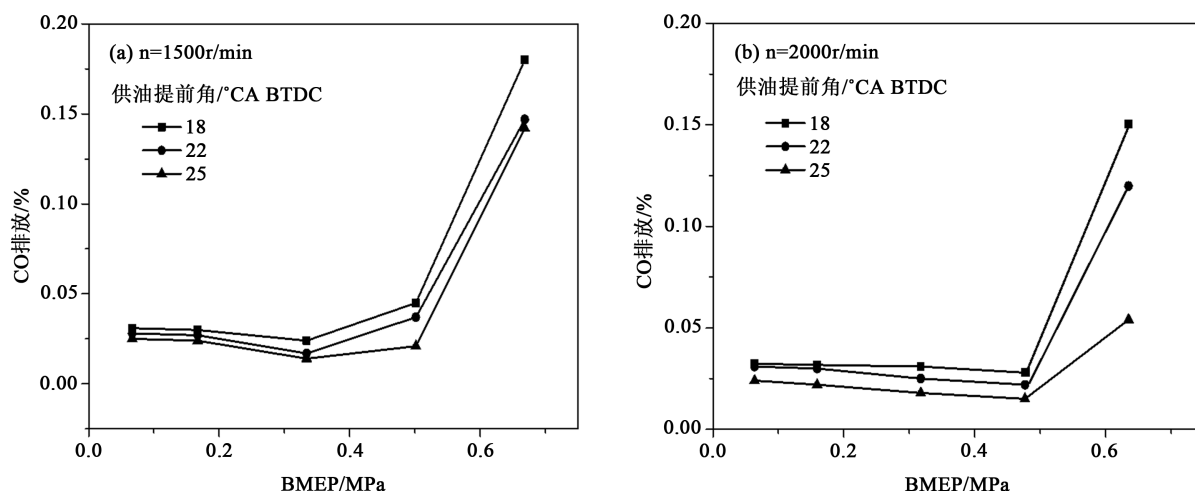


Figure 3. Effects of fuel supply advance angle on CO emission

图 3. 供油提前角对柴油机 CO 排放的影响

3.3. 供油提前角对 NO_x 排放的影响

图 4 所示为不同转速、不同工况下, 供油提前角对柴油机燃用 P30D70 时 NO_x 排放的影响。从图中可以看出, 随着供油提前角的减小, NO_x 排放逐渐降低, 而且当供油提前角由 22°CA BTDC 减小到 18°CA BTDC 时, NO_x 排放得到了显著的降低。如图 4(a) 所示, 在 $\text{BMEP} = 0.1671 \text{ MPa}$ 和 $\text{BMEP} = 0.6684 \text{ MPa}$ 工况下, 供油提前角为 22°CA BTDC 时的 NO_x 排放比供油提前角为 25°CA BTDC 时分别降低了 6.39% 和 8.3%, 供油提前角为 18°CA BTDC 时的 NO_x 排放比供油提前角为 25°CA BTDC 时分别降低了 39.4% 和 32.9%。可见, 减小供油提前角对降低柴油/PODE_n 混合燃料的 NO_x 排放有显著作用, 可以通过适当减小供油提前角来改善由于 PODE_n 的加入所导致的 NO_x 排放增加的情况。

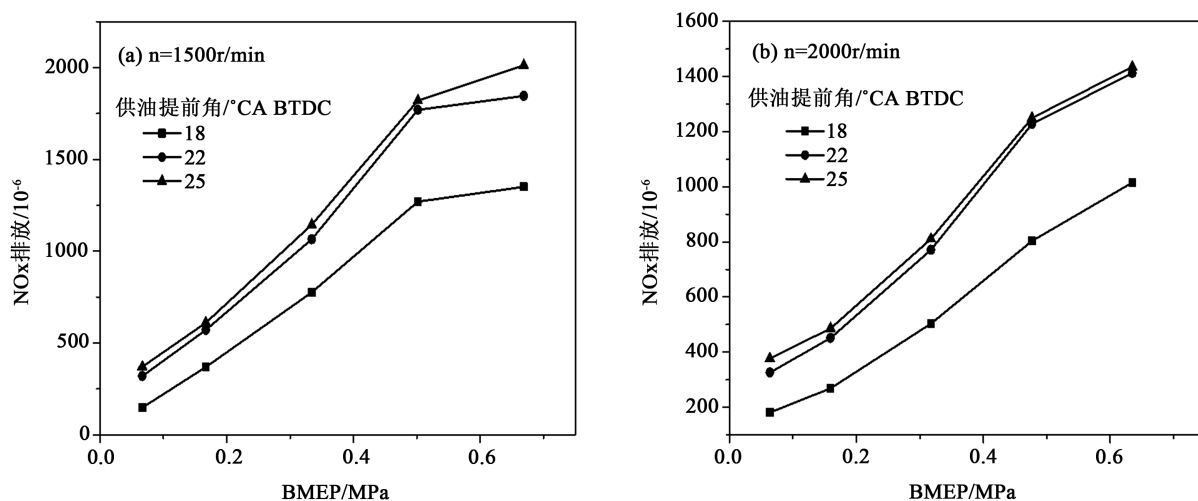


Figure 4. Effects of fuel supply advance angle on NO_x emission

图 4. 供油提前角对柴油机 NO_x 排放的影响

随着供油提前角的减小, 喷油时刻推迟, 燃料与新鲜空气的混合时间缩短, 从而降低了预混燃烧燃料的比例, 使得缸内最大压力和最高温度降低, 且高温持续时间缩短, 进而抑制了 NO_x 的生成。低负荷工况下, 缸内温度相对较低, NO_x 生成量较少, 而高负荷工况下, 缸内温度迅速升高, NO_x 排放显著增加, 因此随供油提前角的减小, 高负荷工况下 NO_x 排放的降低幅度更大。此外, 随着转速的升高, 燃料的燃烧时间缩短, 使得高温持续期逐渐缩短, 因此 NO_x 排放显著减少。

3.4. 供油提前角对碳烟排放的影响

本试验用不透光烟度计测量柴油机尾气的不透光度, 并用不透光度来定量表征碳烟排放。图 5 所示为不同转速、不同工况下, 供油提前角对柴油机燃用 P30D70 时不透光度的影响。从图中可以看出, 在中低负荷工况下, 不透光度较小, 只有在高负荷工况不透光度才突然增大, 而且随着供油提前角的减小, 不透光度进一步增大。如图 5(a) 所示, 在 $\text{BMEP} = 0.6684 \text{ MPa}$ 的高负荷工况下, 供油提前角为 22°CA BTDC 和 18°CA BTDC 时的不透光度比供油提前角为 25°CA BTDC 时分别增加了 50% 和 66.7%。如图 5(b) 所示, 在 $\text{BMEP} = 0.6684 \text{ MPa}$ 的高负荷工况下, 供油提前角为 22°CA BTDC 和 18°CA BTDC 时的不透光度比供油提前角为 25°CA BTDC 时分别增加了 40% 和 60%。

碳烟生成的主要条件是高温和缺氧[21], PODE_n 的掺入使得柴油/ PODE_n 混合燃料的汽化潜热增大, 燃料喷射进入气缸以后会蒸发并吸收部分热量, 导致缸内温度有所降低。同时, 由于 PODE_n 含氧量较高, 提高了气缸内氧气浓度, 从而抑制碳烟的生成。此外, 由于 PODE_n 分子中不含 C-C 键, 进一步减少了碳烟的生成量。因此, $n = 1500 \text{ r/min}$ 时, 中低负荷工况下, 碳烟排放几乎为 0, 且随供油提前角的减小没有明显变化。 $n = 2000 \text{ r/min}$ 时, 由于温度升高, 中低负荷下碳烟排放逐渐增多, 且随着供油提前角的减小进一步增多。这是由于供油提前角减小以后喷油时刻推迟, 缩短了燃油与空气的混合时间, 增加了扩散燃烧的比例, 而碳烟主要生成于扩散火焰中混合气较浓的区域, 因此减小供油提前角导致了碳烟排放的增加。从图中还可以看出, 在 $\text{BMEP} = 0.6684 \text{ MPa}$ 工况下, 两种转速下的碳烟排放显著增多, 且随供油提前角的减小而增多。这是因为大负荷工况下, 缸内温度升高, 同时氧浓度降低, 促进了碳烟的生成。

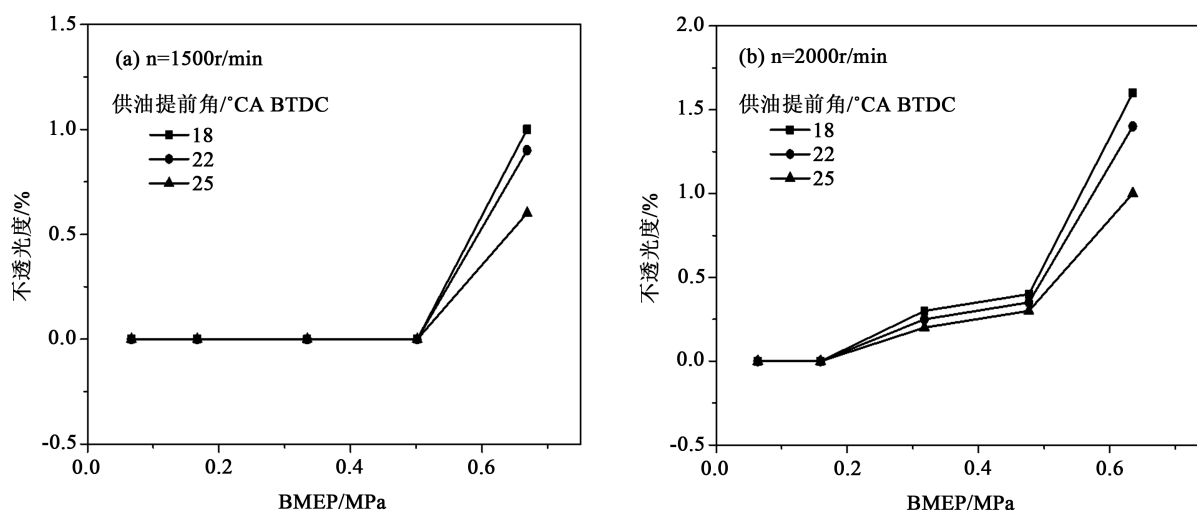


Figure 5. Effects of fuel supply advance angle on soot emission

图 5. 供油提前角对柴油机碳烟排放的影响

4. 结论

本文开展了柴油机燃用柴油/ PODE_n 混合燃料(PODE_n 质量分数为 30%)的台架试验研究, 并分析了供

油提前角对柴油机排放特性的影响, 得到以下结论:

1) 由于 PODE_n 的掺入, 中低负荷工况下柴油机的 CO 排放和碳烟排放均处于较低水平, 且随着供油提前角的改变而变化的幅度不大; 高负荷工况下 CO 排放和碳烟排放均迅速升高, 且随着供油提前角的减小进一步增多。

2) 随着供油提前角的减小, HC 排放逐渐增多, 但 NO_x 排放逐渐降低, 且当供油提前角为 18°CA BTDC 时降低幅度较大。随着转速的升高, 同一负荷下的 HC 排放、CO 排放和 NO_x 排放均显著减少。

基金项目

国家自然科学基金项目(52106191); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JQ-475)。

参考文献

- [1] Hoang, A.T. and Pham, V.V. (2019) A Study of Emission Characteristic, Deposits, and Lubrication Oil Degradation of a Diesel Engine Running on Preheated Vegetable Oil and Diesel Oil. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **41**, 611-625. <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1520344>
- [2] Mianzarasvand, F., Shirmeshan, A. and Afrand, M. (2017) Effect of Electrically Heated Catalytic Converter on Emission Characteristic of a Motorcycle Engine in Cold-Start Conditions: CFD Simulation and Kinetic Study. *Applied Thermal Engineering*, **127**, 453-464. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.180>
- [3] Liu, H., Wang, Z., Wang, J., et al. (2016) Improvement of Emission Characteristics and Thermal Efficiency in Diesel Engines by Fueling Gasoline/Diesel/PODE_n Blends. *Energy*, **97**, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.110>
- [4] Liu, J., Wang, H., Li, Y., et al. (2016) Effects of Diesel/PODE (Polyoxymethylene Dimethyl Ethers) Blends on Combustion and Emission Characteristics in a Heavy Duty Diesel Engine. *Fuel*, **177**, 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.019>
- [5] Duan, X., Xu, Z., Sun, X., et al. (2021) Effects of Injection Timing and EGR on Combustion and Emissions Characteristics of the Diesel Engine Fuelled with Acetone-Butanol-Ethanol/Diesel Blend Fuels. *Energy*, **231**, Article ID: 121069. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121069>
- [6] Abdollahi, M., Ghobadian, B., Najafi, G., et al. (2020) Impact of Water-Biodiesel-Diesel Nano-Emulsion Fuel on Performance Parameters and Diesel Engine Emission. *Fuel*, **280**, Article ID: 118576. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118576>
- [7] Uslu, S. (2020) Optimization of Diesel Engine Operating Parameters Fueled with Palm Oil-Diesel Blend: Comparative Evaluation between Response Surface Methodology (RSM) and Artificial Neural Network (ANN). *Fuel*, **276**, Article ID: 117990. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117990>
- [8] Karthikeyan, S., Periyasamy, M., Prathima, A., et al. (2020) Performance Analysis of Diesel Engine Fueled with S. marginatum Macro Algae Biofuel-Diesel Blends. *Materials Today: Proceedings*, **33**, 3464-3469. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.356>
- [9] Amid, S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., et al. (2020) Effects of Waste-Derived Ethylene Glycol Diacetate as a Novel Oxygenated Additive on Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Diesel/Biodiesel Blends. *Energy Conversion and Management*, **203**, Article ID: 112245. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.356>
- [10] Omari, A., Heuser, B., Pischinger, S., et al. (2019) Potential of Long-Chain Oxymethylene Ether and Oxymethylene Ether-Diesel Blends for Ultra-Low Emission Engines. *Applied energy*, **239**, 1242-1249. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.035>
- [11] 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.
- [12] 王志, 刘浩业, 张俊, 等. 聚甲氧基二甲醚与柴油混合燃料的燃烧与排放特性[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(2): 191-197.
- [13] Chen, H., Su, X., Li, J., et al. (2019) Effects of Gasoline and Polyoxymethylene Dimethyl Ethers Blending in Diesel on the Combustion and Emission of a Common Rail Diesel Engine. *Energy*, **171**, 981-999. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.089>
- [14] Liu, H.Y., Wang, Z., Zhang, J., et al. (2017) Study on Combustion and Emission Characteristics of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers/Diesel Blends in Light-Duty and Heavy-Duty Diesel Engines. *Applied Energy*, **185**, 1393-1402. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.183>
- [15] 杨皓, 李兴虎, 牟鸣飞, 等. 柴油/聚甲氧基二甲醚混合燃料的柴油机性能与排放试验[J]. 汽车安全与节能学报,

2015, 6(3): 280-285.

- [16] Liu, H., Wang, Z., Li, Y.F., *et al.* (2019) Recent Progress in the Application in Compression Ignition Engines and the Synthesis Technologies of Polyoxymethylene Dimethyl Ethers. *Applied Energy*, **233-234**, 599-611. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.064>
- [17] Li, B., Li, Y., Liu, H., *et al.* (2017) Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine Fueled with Biodiesel/PODE Blends. *Applied Energy*, **206**, 425-431. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.206>
- [18] 苏石川, 张多鹏, 曾伟. 不同喷油提前角对缸内碳烟生成影响的计算与分析[J]. 柴油机, 2007, 29(6): 11-14.
- [19] Chen, Z.B., He, J.G., Xiao, M.W., *et al.* (2011) Effect of Fuel Supply Advance Angle on Thermal Efficiency of Diesel Engines Filled with Dieselhol. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, **36**, 31-34.
- [20] Khandal, S.V., Banapurmath, N.R. and Gaitonde, V.N. (2017) Effect of Exhaust Gas Recirculation, Fuel Injection Pressure and Injection Timing on the Performance of Common Rail Direct Injection Engine Powered with Honge Biodiesel (BHO). *Energy*, **139**, 828-841. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.035>
- [21] Chen, L., Liang, Z., Liu, H., *et al.* (2017) Sensitivity Analysis of Fuel Types and Operational Parameters on the Particulate Matter Emissions from an Aviation Piston Engine Burning Heavy Fuels. *Fuel*, **202**, 520-528. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.052>