

Numerical Simulation Investigation on the Combustion Processes of a Diesel Engine Fueled with PODE/Diesel Blends

Yuwei Zhao^{1*}, Renzhi Liang², Yijing Xie¹, Yuemeng Cheng¹, Shenghua Liu²

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

²School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

Email: *ervrn@126.com

Received: Dec. 21st, 2019; accepted: Jan. 3rd, 2020; published: Jan. 10th, 2020

Abstract

In order to investigate the in-cylinder combustion process and pollutants formation process of Polyoxymethylene dimethyl ethers (PODE_n)/diesel blends, a numerical model of WP12.460 China VI emission standards diesel engine was established and the three-dimensional numerical simulation was studied by FIRE software. The results showed that the calculation in-cylinder pressure curves were in good agreement with the experimental values. The start of combustion was advanced due to the high cetane number of PODE. With an increase in PODE blending ratio, the peak values of in-cylinder pressure, mean charge temperature and heat release rate decreased, and the accumulated heat release decreased. The addition of PODE led to a higher NO emission. The formation of soot emission was inhibited with the addition of PODE because the in-cylinder oil-gas mixture was improved and the oxygen concentration was increased.

Keywords

Polyoxymethylene Dimethyl Ethers, Combustion Processes, Numerical Simulation

聚甲氧基二甲醚/柴油混合燃料柴油机缸内燃烧过程的数值模拟研究

赵玉伟^{1*}, 梁人之², 谢一静¹, 程月蒙¹, 刘圣华²

¹空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安

²西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安

Email: *ervrn@126.com

收稿日期: 2019年12月21日; 录用日期: 2020年1月3日; 发布日期: 2020年1月10日

*通讯作者。

文章引用: 赵玉伟, 梁人之, 谢一静, 程月蒙, 刘圣华. 聚甲氧基二甲醚/柴油混合燃料柴油机缸内燃烧过程的数值模拟研究[J]. 动力系统与控制, 2020, 9(1): 72-79. DOI: 10.12677/dsc.2020.91007

摘要

为研究聚甲氧基二甲醚/柴油混合燃料柴油机的缸内燃烧过程和污染物生成过程,建立了WP12.460型国VI柴油机的数值计算模型,采用三维CFD软件FIRE进行了数值模拟计算。结果表明,模拟得到的缸内压力曲线与试验值吻合良好;PODE的高十六烷值特性使得燃烧始点提前;随着PODE掺混比的增大,缸内压力峰值、缸内平均温度峰值和瞬时放热率峰值均逐渐降低,累积放热量逐渐减少;掺混PODE后,柴油机的NO排放增多;掺混PODE提高了可燃混合气的均匀性,同时PODE的高含氧量特性提高了缸内氧浓度,有效抑制了碳烟的生成。

关键词

聚甲氧基二甲醚, 缸内燃烧过程, 数值模拟

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

在世界各国日趋严厉的环保法规和世界范围内能源危机的背景下,内燃机清洁替代燃料成为车用发动机的研究热点。含氧燃料在燃烧过程中能起到自供氧作用,在柴油中加入一定比例的含氧燃料能够有效改善柴油机的燃烧与排放特性,在降低排气烟度和颗粒物排放上效果尤为显著[1] [2]。相关研究表明,柴油机的颗粒物排放随醇类、醚类和生物柴油等含氧燃料掺混比例的增加而显著下降[3] [4]。然而,由于以上典型含氧燃料的物化特性与柴油差别较大,难以在不改造柴油机的情况下直接应用。

聚甲氧基二甲醚(PODE)是一种新型柴油替代燃料,其分子式为 $\text{CH}_3\text{O}(\text{CH}_2\text{O})_n\text{CH}_3$,可由我国产能过剩且易于采购的甲醇制取,目前生产工艺已接近成熟。PODE具有较高的含氧量和十六烷值,且分子中没有C-C键,可有效改善燃料的燃烧状况与碳烟排放,并促进HC、CO的氧化过程[5] [6]。另外,PODE在常温下能够与柴油以任意比例互溶,且稳定性较好[7]。

以上物化特性表明PODE是一种具有较好应用前景的可再生清洁替代燃料。目前PODE在柴油机上的应用研究以台架试验为主[5] [6] [8],关于PODE/柴油混合燃料燃烧过程的数值模拟研究鲜见报道。通过数值模拟能够预测缸内燃烧过程和污染物生成过程,并可通过改变工况、改变参数计算,得到内燃机工作过程的最优参数。本文针对潍柴动力WP12-460型柴油机进行了试验和数值模拟研究,为PODE在柴油机上的应用提供了一定的依据。

2. 数值及试验方法

2.1. 试验台架及设备

本文试验发动机为潍柴动力WP12.460型国VI车用柴油机,试验未改装发动机零部件,所有控制参数保持原机水平不变,发动机主要技术参数见表1。

利用Kibox燃烧分析仪采集缸内燃烧特征数据,利用GW400型电涡流测功机测量内燃机转速和扭矩,利用FC3000型科里奥式质量流量计测量燃油消耗量,利用584L型Horiba尾气分析仪测量HC、CO等

排放, 利用潍柴 WP13 电子机油压力温度传感器监测机油压力温度, 利用 Pt100 型热电阻测量冷却水温度。试验台架布置如图 1 所示。

Table 1. Main specifications of WP12.460 diesel engine

表 1. WP12.460 型柴油机主要技术参数

技术参数	数值
发动机形式	直列四冲程, 6 缸, 增压中冷, 高压共轨
缸径 × 行程(mm)	125 × 155
压缩比	17
排量(L)	11.596
最大功率/转速(kW/r·min ⁻¹)	340.7/1900
最大扭矩/转速(N·m/r·min ⁻¹)	2200/1000
燃油喷射系统	博世 CRSN2-16
进气门关闭(°CA ABTC)	34
排气门开启(°CA ATDC)	131

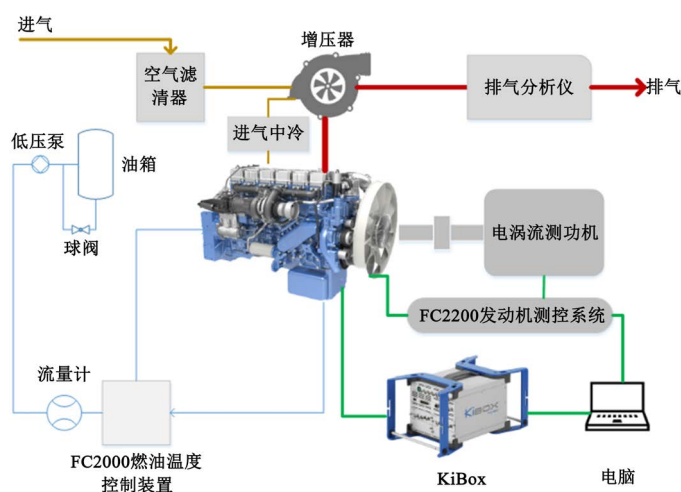


Figure 1. Schematic diagram of the experimental set-up

图 1. 试验台架布置图

试验所用 PODE_n 为山东玉皇化工集团生产的纯度为 99.9% 工业用 PODE_n , 其主要组分为 PODE_2 、 PODE_3 和 PODE_4 , 三者的质量分数分别为 2.553%、88.9% 和 8.48%, 试验用柴油为 0# 商用柴油。本试验配制了 3 种比例的 PODE_n /柴油混合燃料, PODE_n 所占体积分数分别为 10%、20% 和 30%, 在文中分别命名为 P10、P20、P30, 纯柴油命名为 P0。选取转速 $n = 1200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下 25% 负荷和 50% 负荷作为试验工况点。

2.2. 数值模型的建立

本论文采用 AVL-FIRE 软件进行内燃机燃烧过程的数值模拟分析, 缸内湍流模型采用 $k-\zeta-f$ 模型, 液滴破碎模型采用 WAVE 模型, 液滴湍流扩散模型采用 Enable 模型, 液滴碰壁模型采用 Walljet1/Walljet2 模型, 缸内燃烧模型采用 ECFM-3Z 模型, NO_x 排放模型采用 Extended Zeldovich 模型, SOOT 排放模型采用 Kinetic Soot Model 模型。 PODE 不属于 FIRE 自带燃料, 借助 USER FUNCTION, 通过 cyusepr.f 以及 cyusede.f 两个燃料物性文件定义 PODE 的摩尔质量、摩尔体积、临界温度、熔点、沸点、蒸气压等参

数。燃料定义完成后，在喷雾模块中，按照对应燃料的质量分数定义掺混燃料，将掺混燃料的各组分质量分数输入喷雾模型。

本研究选取缸内系统作为研究对象，按照厂家给定的燃烧室尺寸，利用 FIRE ESE-Diesel 模块完成了燃烧室的建模工作，生成了与发动机燃烧室相近，压缩比为 17 的燃烧室动网格模型。柴油机喷油器为 8 孔喷油器，取燃烧室的 1/8 作为计算域，最终生成的燃烧室动网格模型在上止点处体网格数为 122,415 个，在下止点处体网格数为 274,620 个，所建立的三维计算网格如图 2 所示。

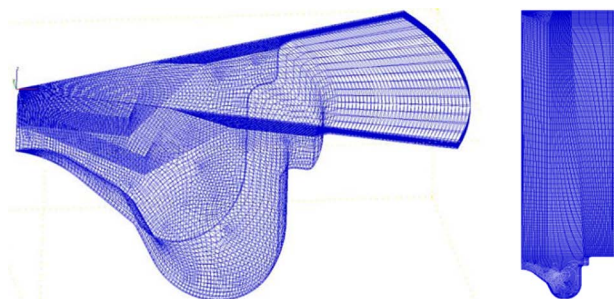


Figure 2. Three-dimensional computational mesh
图 2. 三维计算网格

FIRE 对 ESE-Diesel 生成的网格进行计算时，默认上止点曲轴转角为 720°CA ，为缩短计算时间，忽略了柴油机进排气过程对缸内工作过程的影响，只选择进气门关闭时刻到排气门开启时刻之间的曲轴转角为计算区间，根据 WP12 发动机进气门关闭和排气门开启角度，数值模拟的曲轴转角计算范围为 $574^{\circ}\text{CA}\sim 851^{\circ}\text{CA}$ 。稳态工况 $n = 1200 \text{ r/min}$ ，不同负荷下的初始条件和边界条件如表 2 所示，其中，初始条件按照试验测量值给定，边界条件为固定温度壁面条件。

Table 2. Initial and boundary conditions of different loads at $n = 1200 \text{ r/min}$

表 2. 转速 $n = 1200 \text{ r/min}$ ，不同负荷下的初始条件和边界条件

参数	25% 负荷	50% 负荷
活塞表面温度(K)	575.15	575.15
缸套表面温度(K)	475.15	475.15
缸盖温度(K)	550.15	550.15
喷孔直径(mm)	0.198	0.198
进气门关闭时缸内温度(K)	380	380
进气门关闭时缸内压力(bar)	1.36	2.17
单孔燃油喷射量(mg)	6.48727	16.84606
喷射开始曲轴转角($^{\circ}\text{CA}$)	-23.2	-16.17
喷射结束曲轴转角($^{\circ}\text{CA}$)	-7	4.9
喷射持续期($^{\circ}\text{CA}$)	16.2	21.07

3. 结果与分析

3.1. 数值模型的验证

经过模型选定、试验取值、燃烧室建模、初始条件和边界条件确定、燃料的自定义后，需要对数值

模型进行验证。选取转速 $n = 1200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、25% 负荷工况对数值模型计算值与台架试验的缸压曲线进行比较, 如图 3 所示。由图可见, 模拟缸内压力变化趋势与试验值相符, 但模拟值与试验值的缸内压力峰值及压力峰值对应相位存在一定偏差: 对于 P0, 模拟值与试验值的缸内压力峰值相差 3.15 bar (误差为 3.46%), 压力峰值对应相位相差 5°CA ; 对于 P10, 模拟值与试验值的缸内压力峰值相差 3.76 bar (误差为 4.26%), 压力峰值对应相位相差 5.1°CA ; 对于 P20, 模拟值与试验值的缸内压力峰值相差 5.59 bar (误差为 6.56%), 压力峰值对应相位相差 4.6°CA ; 对于 P30, 模拟值与试验值的缸内压力峰值相差 7.55 bar (误差为 9.24%), 压力峰值对应相位相差 4.7°CA 。

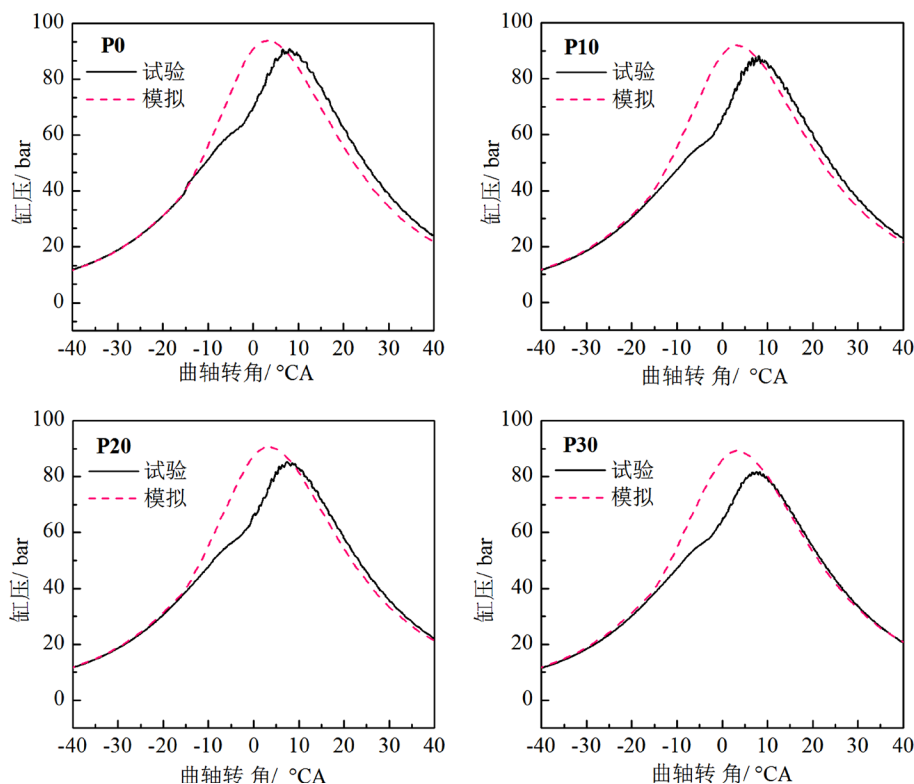


Figure 3. Comparison of in-cylinder pressure curves between calculation and experimental values
图 3. 数值模型计算值与台架试验值的缸内压力曲线对比

数值模拟值与试验值在缸内压力峰值与压力峰值对应相位上均存在一定误差, 且误差随 PODE 掺混比的增加而增大。存在误差的主要原因有: (1) 模型中燃烧室的壁面设置为绝热边界, 模型在计算过程中没有与外界的热交换存在, 忽略了气缸内的漏气和传热损失, 使得缸压峰值大于试验值; (2) 随 PODE 掺混比的增大, 燃料的雾化性能得到改善, 能更好吸收缸内热量, 而数值模型没有考虑此点, 导致缸内压力峰值的误差随掺混比增加而增大; (3) FIRE 自带燃烧模型中将正庚烷的着火机理以表格形式设置在求解器中以替代柴油的着火机理, 使计算结果有一定误差。总体来说, 本文建立的数值模型误差控制在允许范围之内, 数值模型和试验曲线趋势一致, 能较好地描述 PODE/柴油混合燃料的燃烧特性, 可用于后续计算。

3.2. 燃烧特性分析

图 4 所示为 $n = 1200 \text{ r}/\text{min}$ 、50% 负荷工况下燃用不同燃料时的燃烧特性对比, 包括缸内压力、缸内平均温度、瞬时放热率和累计放热量等。

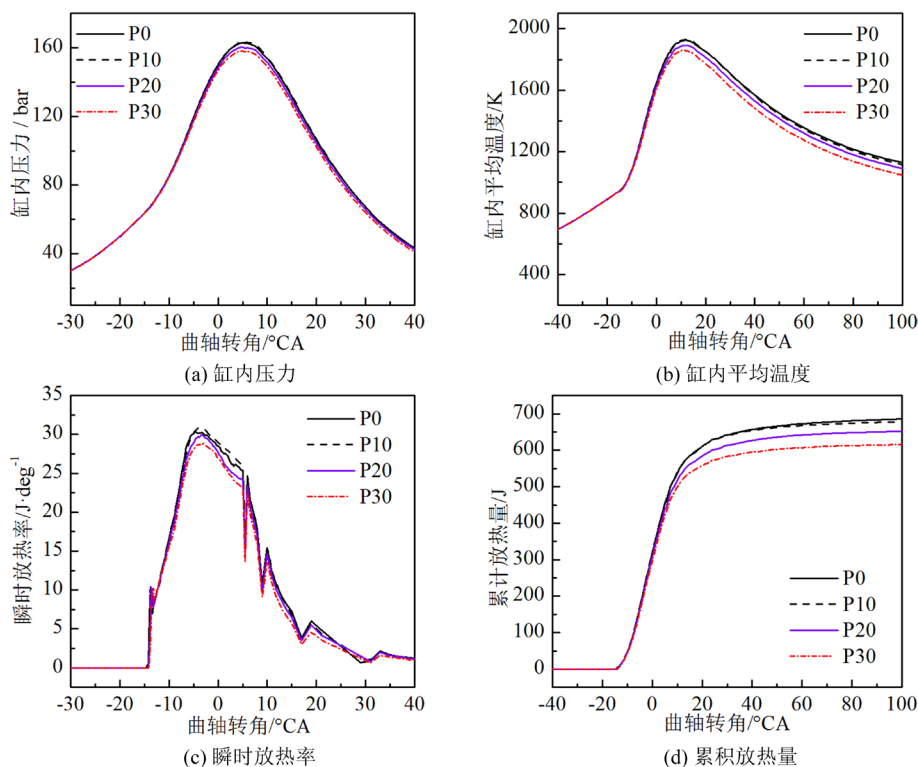


Figure 4. Comparison of combustion characteristics between different fuels at the condition of $n = 1200$ r/min and 50% load
图 4. $n = 1200$ r/min、50% 负荷工况下燃用不同燃料时的燃烧特性对比

图 4(a)所示为缸内压力随 PODE 掺混比的变化曲线,从图中可以看出,燃用 P0、P10、P20、P30 四种燃料时的缸内压力峰值分别为 162.96 bar、162.54 bar、160.46 bar、158.33 bar,与纯柴油相比,燃用 P10、P20、P30 时缸内压力峰值分别下降 0.4%、1.53%、2.84%。由于 PODE 的热值较低,使得 PODE/柴油混合燃料的热值降低,同时由于 PODE 的十六烷值较高,掺混 PODE 后混合燃料的滞燃期缩短,使得燃烧始点提前,燃油与空气的混合时间缩短,因此预混燃烧比例减小,导致缸内压力峰值降低。

图 4(b)所示为缸内平均温度随 PODE 掺混比的变化曲线,从图中可以看出,燃用 P0、P10、P20、P30 四种燃料时的缸内平均温度峰值分别为 1924.89 K、1920.92 K、1892.41 K、1860.07 K,与纯柴油相比,燃用 P10、P20、P30 时缸内平均温度峰值分别下降 0.21%、1.69%、3.37%。由于 PODE 的汽化潜热较高,掺混 PODE 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,导致缸内温度峰值逐渐降低。

图 4(c)所示为瞬时放热率随 PODE 掺混比的变化曲线,从图中可以看出,燃用 P0、P10、P20、P30 四种燃料时的燃烧放热率峰值分别为 30.3 J/°CA, 30.1 J/°CA, 29.9 J/°CA, 28.8 J/°CA, P10 与纯柴油放热率峰值相差不大, P20, P30 混合燃料放热率峰值分别下降 1.32%, 4.95%。由于 PODE 的热值较低(仅为柴油一半左右),掺混 PODE 后混合燃料的热值降低,导致相同喷射条件下放热率峰值降低。因此,随 PODE 掺混比的增大,瞬时放热率峰值逐渐降低。

图 4(d)所示为累积放热量随 PODE 掺混比的变化曲线,从图中可以看出,燃用 P0、P10、P20、P30 四种燃料时的累积放热量分别为 690.2 J、678.5 J、654.1 J、616.7 J,与纯柴油相比,燃用 P10、P20、P30 时累积放热量分别下降 1.69%、5.23%、10.65%。在相同转速、相同负荷工况下,累积放热量越低,说明发动机的热效率越高,这表明掺混 PODE 有助于改善有效热效率。

3.3. 排放特性分析

图 5 所示为 $n = 1200$ r/min、50% 负荷工况下燃用不同燃料时的 NO 排放与碳烟排放变化曲线。

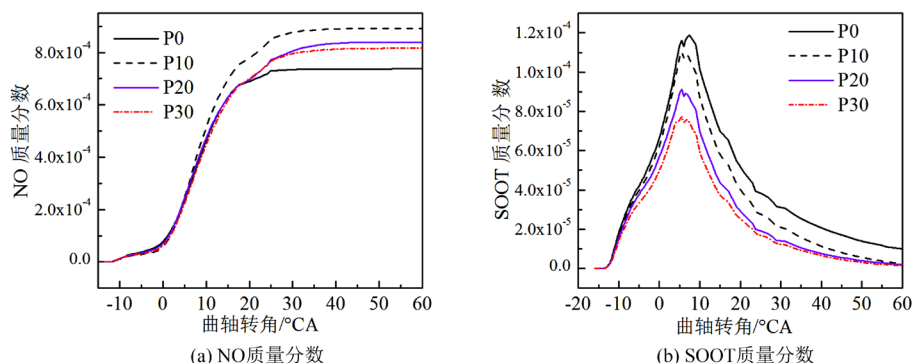


Figure 5. Comparison of emission characteristics between different fuels at the condition of $n = 1200$ r/min and 50% load
图 5. $n = 1200$ r/min、50% 负荷工况下燃用不同燃料时的排放特性对比

图 5(a)所示为 NO 质量分数随 PODE 掺混比的变化曲线,从图中可以看出,NO 主要在 $0^{\circ}\text{CA} \sim 30^{\circ}\text{CA}$ 间生成,燃用 P0、P10、P20、P30 四种燃料的 NO 质量分数峰值分别为 0.074%, 0.089%, 0.084%, 0.081%, 与纯柴油相比,燃用 P10、P20、P30 时 NO 质量分数峰值分别增加 20.2%, 13.5%, 9.46%。NO 生成的条件是高温、富氧、高温持续期长。对于 P10,缸内平均温度与纯柴油相差不大(见图 4(b)),而掺混 PODE 后含氧量增大,导致 NO 排放明显增多。而对于 P20、P30,虽然含氧量进一步增多,但是缸内平均温度明显降低,因此 NO 排放低于 P10。

图 5(b)所示为 SOOT 质量分数随 PODE 掺混比的变化曲线,从图中可以看出,SOOT 主要在 $-10^{\circ}\text{CA} \sim 10^{\circ}\text{CA}$ 间生成,燃用 P0、P10、P20、P30 四种燃料的碳烟质量分数峰值分别为 1.19×10^{-4} , 1.07×10^{-4} , 9.12×10^{-5} , 7.73×10^{-5} ,与纯柴油相比,燃用 P10、P20、P30 时碳烟质量分数分别下降 10.08%, 23.36%, 35.04%。碳烟的生成条件是高温、缺氧环境,掺混 PODE 后,由于 PODE 具有良好的挥发性和较低的黏度及沸点,有助于混合燃料的蒸发与雾化,改善了混合气的均匀性,避免了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。同时掺混 PODE 后混合燃料的含氧量增加,燃烧过程中能够起到自供氧作用,从而改善了扩散燃烧过程中部分较浓区域的燃烧状况,促进了碳烟的氧化过程。以上因素使得碳烟排放随 PODE 掺混比的增大而明显降低。

4. 结论

1) 建立了 WP12.460 型国 VI 柴油机的数值计算模型,模拟值和试验值的缸内压力曲线变化趋势一致,缸内压力峰值及压力峰值对应相位的误差在允许范围内,可以用来预测 PODE/柴油掺混燃料柴油机的燃烧过程。

2) 随着 PODE 掺混比的增大,燃烧始点提前,缸内压力峰值、缸内平均温度峰值和瞬时放热率峰值均逐渐降低,累积放热量逐渐减少。

3) 掺混 PODE 后,柴油机的 NO 排放增多,但 PODE 的高含氧量、高十六烷值特性能够有效降低 SOOT 排放。

基金项目

陕西省重点研发计划(2018ZDCXL-GY-05-06)。

参考文献

- [1] Hosseinis, H., Alisaraeia, T., Ghobadian, B., *et al.* (2017) Performance and Emission Characteristics of a CI Engine Fueled with Carbon Nanotubes and Diesel-Biodiesel Blends. *Renewable Energy*, **111**, 201-213. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.013>
- [2] Park, S.H. and Lee, C.S. (2014) Applicability of Dimethyl Ether (DME) in a Compression Ignition Engine as an Alternative Fuel. *Energy Conversion and Management*, **86**, 848-863. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.051>
- [3] Fang, Q., Fang, J., zhuang, J., *et al.* (2013) Effects of Ethanol-Diesel-Biodiesel Blends on Combustion and Emissions in Premixed Low Temperature Combustion. *Applied Thermal Engineering*, **54**, 541-548. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.042>
- [4] Zhuang, Y. and Hong, G. (2014) Effects of Direct Injection Timing of Ethanol Fuel on Engine Knock and Lean Burn in a Port Injection Gasoline Engine. *Fuel*, **135**, 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.028>
- [5] 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.
- [6] Liu, H., Wang, Z., Wang, J., *et al.* (2016) Improvement of Emission Characteristics and Thermal Efficiency in Diesel Engines by Fueling Gasoline/Diesel/PODEn Blends. *Energy*, **97**, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.110>
- [7] 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.
- [8] 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>