

掺烧不同比例乙醚对船用柴油机燃烧 和排放性能的影响

杨晨曦¹, 才 正¹, 林 航², 王奇伟¹, 李品芳^{1,3}, 范金宇^{1,3}, 黄加亮^{1,3}

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 泉州海洋职业学院, 福建 泉州 362700;
3. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为研究掺烧不同比例的乙醚对柴油机燃烧及排放特性的影响, 以 4190Z_LC-2 型船用中速机为研究对象, 利用 AVL_FIRE 仿真软件构建燃烧室高压循环模型, 在全负荷工况下对比实测与仿真缸压和放热率曲线, 验证模型的准确性。在全负荷工况下, 通过仿真模拟实验, 在柴油中分别掺混体积分数为 0%、5%、10%、15% 的 4 种比例的乙醚, 研究其对柴油机燃烧和排放特性的影响。结果表明: 与燃烧纯柴油相比, 使用柴油-乙醚混合燃料, 缸内最大爆发压力和缸内最高温度均有所下降, 对应的曲轴转角也稍有延后。增加乙醚的掺混比例, CO 和 NO 的排放量均呈现降低趋势, 碳烟排放略有增加。在反应过程中, 乙醚加入延长了混合燃料的滞燃期, 油气混合更加充分, 放热过程稳定, 提升柴油机的稳定性。当乙醚掺混体积分数为 15% 时, NO 排放量较原机降低 12.7%, CO 排放量降低 7.8%, 碳烟排放量增大 10.7%。

[关键词] 船用中速柴油机; 柴油-乙醚混合燃料; 燃烧及排放特性; AVL_FIRE 仿真软件

[中图分类号] TK 421

Effect of Blending Different Proportions of Ether on the Performance of Combustion and Emission of Marine Diesel Engines

YANG Chenxi¹, CAI Zheng¹, LIN Hang², WANG Qiwei¹, LI Pinfang^{1,3}, FAN Jinyu^{1,3}, HUANG Jialiang^{1,3}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Quanzhou Ocean Institute, Quanzhou 362700, China;
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the effects of blending different proportions of ether on the combustion and emission characteristics of diesel engines, the AVL_FIRE simulation software was used to construct a high-pressure cycle model of the combustion chamber with the 4190Z_LC-2 medium-speed marine engine as the research object, and the cylinder pressure and exothermic rate curves of the measured and simulated models were compared under the full-load condition to validate the accuracy of the model. Under full load conditions, four proportions of ether with volume fractions of 0, 5%, 10% and 15% were blended in diesel fuel to study the effects on the combustion and emission characteristics of the diesel engine via simulation experiments. The results showed that, the use of diesel-ether blends resulted in a decrease in maximum in-cylinder burst pressure

[收稿日期] 2022-11-18

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2022J01812, 2021J01849); 福建省教育厅科技项目 (JAT210237); 集美大学国家自然科学基金基金培育项目 (ZP2021008)

[作者简介] 杨晨曦 (1999—), 男, 硕士生, 从事柴油机性能优化与排气测试分析研究。通信作者: 李品芳 (1965—), 男, 副教授, 硕士, 从事现代轮机管理工程研究。E-mail: alexlpf@163.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

and maximum in-cylinder temperature, and a slight delay in the corresponding crank angle compared to those from pure diesel fuel. By increasing the proportion of ether blending, the CO and NO emissions tend to decrease, while the carbon smoke emissions increase slightly. During the reaction process, ether addition prolongs the stagnation period of the mixed fuel, the oil and gas mixing is more adequate, the exothermic process is stable, and the stability of the diesel engine is enhanced. Results also show that, when the ether blending ratio was 15%, the NO emission decreases by 12.7%, the CO emission decreases by 7.8%, and the carbon smoke emission increases by 10.7% compared to the original engine.

Keywords: marine medium-speed engine; diesel-ether blend fuel; combustion and emission characteristics; AVL_FIRE simulation software

0 引言

柴油机作为目前世界上热工转换效率最高的机械装置,是船舶最主要的动力来源^[1]。柴油机的燃料柴油主要是从石油中提取,燃烧过程会造成严重的环境污染,这也使得世界各国以节能和减排作为柴油机当前研究的主要方向^[2-3]。柴油机废气中的主要成分有 NO_x 、CO、碳烟等,如何降低柴油机废气的排放一直是人们亟待解决的问题^[4]。乙醚在柴油机中的应用方式有2种:一种是乙醚作为柴油机冷启动液,可有效提升柴油机的低温冷启动性能^[5];另一种是以低体积比例乙醚掺混到柴油中,通过乙醚的高含氧量改善柴油机燃烧过程,降低污染物排放量。王永莲^[6]通过研究生物柴油中掺混不同比例乙醚对柴油机燃烧和排放特性的影响,发现掺混乙醚后放热更加集中,动力性基本不变,有效热效率增加,CO、 NO_x 排放量有所降低。宋俊良等^[7]在直喷式柴油机上使用乙醚-生物柴油-柴油进行燃烧实验,结果表明,混合燃料在燃烧过程中展现出更好的稳定性,并且可以在柴油发动机中直接使用。寇增亚等^[8]将乙醚以低体积比例掺混到柴油中形成混合燃料,燃烧后发现,油耗率降低,柴油机的经济性提高。Agarwal等^[9]在CI发动机中使用含氧燃料发现,将乙醚以不同体积分数掺混到柴油中,其燃烧有很好的效果,未来有巨大的应用潜力。

本文以济南柴油机股份有限公司生产的4190Z_LC-2型船用四缸中速柴油机为研究对象,通过AVL_FIRE软件对柴油机燃烧过程进行模拟计算,研究掺混不同比例乙醚对柴油机燃烧性能和排放性能的影响。

1 仿真模型的建立与验证

1.1 仿真模型的建立

本文将济南柴油机股份有限公司生产并经过电控改造后的直列、四缸、增压中冷4190Z_LC-2型船用中速柴油机作为研究对象,压缩比为14:1,燃烧室形状为直口 ω 型,标定功率为220 kW,标定转速为1 000 r/min,气缸直径 \times 行程为190 mm \times 210 mm,总排量为23.82 L。

参照柴油机相关参数,利用Auto-CAD绘图软件绘制柴油机燃烧室纵截面1/2的2D图形,如图1所示。然后将燃烧室的2D图形导入到AVL_FIRE自带的ESE-diesel模块中进行二维网格划分^[10]。由于燃烧室为中心对称结构,每个喷嘴的喷孔数目为8,同时喷孔均匀分布在气缸的中心。为了简化计算,将燃烧室等分为8份(见图2),仅对1/8进行仿真模拟计算。本文主模拟曲轴转角计算范围是从进气阀关闭(594°)到排气阀开放(841°)的缸内燃烧过程。

对于缸内燃烧情况,直接测量实机壁面温度

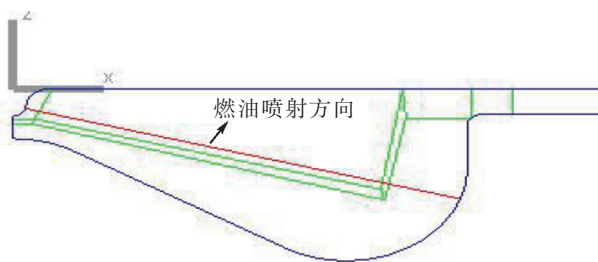


图1 燃烧室中心截面1/2示意图
Fig.1 Schematic diagram of the crosssection of 1/2 combustion chamber

较为困难,故选用 AVL-BOOST 软件建立整机一维工作模型,如图 3 所示。由一维整机模型确立边界条件为:缸内进气温度为 335.15 K;缸内初始压力为 0.193 MPa;缸盖底部的温度为 553.25 K;缸套壁面的温度为 403.25 K;活塞顶表面温度为 625.15 K。

当柴油乙醚混合燃料中乙醚体积比例过大时,会发生气阻断现象^[10],故本文选择乙醚的掺混体积分数比例分别为 0%、5%、10%、15%,分别记为 D0、D5、D10、D15。

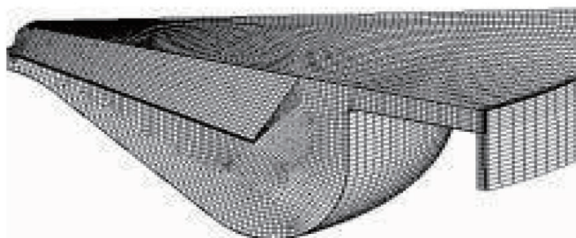


图 2 柴油机燃烧室 1/8 计算模型
Fig.2 Calculation model of 1/8 combustion chamber for diesel engine

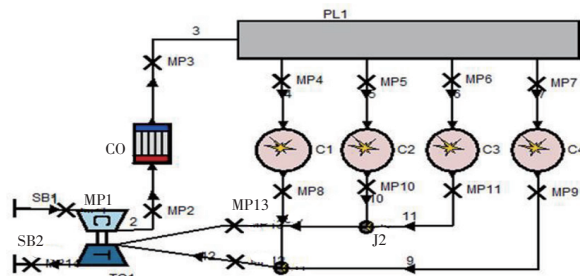


图 3 AVL-BOOST 示意图
Fig.3 Schematic diagram of AVL-BOOST

1.2 计算模型

本文研究内容涉及缸内燃烧包括扩散和对流燃烧。 κ - ε 双方程具有模拟流动现象完善、收敛精度高且计算迅速的优点,且模型含有扩散和对流运输,以及特征速度和长度^[11],符合本文的选择条件。喷雾模型包括气液两相模型和均相气态射流模型,燃油从喷油器喷出,形成的油束在高温高压、扰动气流作用下,经过多次破碎形成小液滴甚至更小的子液滴。喷雾模型主要包括 4 个子模型,分别作如下选择。

1) 选择 AVL_FIRE 中的 KH-RT 模型作为喷雾破碎模型。KH-RT 模型与 WAVE 模型思想相同,该模型的优势在于可以形成不稳定的扰动波;此外燃油进入燃烧室后,会发生初级破碎和次级破碎,次级破碎变化标准即为油滴直径和韦伯数^[12]。

2) 在模拟柴油-乙醚燃烧过程中,考虑到两种燃料对应的物理特性差异导致的蒸发速率不同,选择 Multi-component 作为蒸发模型。

3) 因在实际模拟中不考虑液滴涂展形成油膜损失的质量,故选用 Walljet 模型。由于 Walljet1 模型相较于其他两种模型具有喷射速度较快的特点,因此选用 Walljet1 模型。

4) 喷入缸内的混合燃料,由于其运动轨迹受到缸内不规则湍流旋涡的扰动下做无规则运动,因此要选择合适的湍流扩散模型对该絮乱湍流进行描述,故本文选取 AVL_FIRE 中的 Enable 模型^[13]。

不同燃料对应的燃烧机理同样会对反应的速度有重要的影响,着火模型选择适合柴油机等压燃烧的 shell 模型;选用 Zeldovich 模型作为生成 NO_x 、CO 等排放物计算质量分数的模型,该模型运用小火焰方法模拟排放物在湍流影响下的化学动力学表现^[14]。碳烟为柴油机主要的颗粒排放物之一,本文选用 Frolov Kinetic 模型作为排放模型。

1.3 实验台架及仿真模型的校验

为确保仿真模型的准确性,在全负荷的工况下其他条件不变时,设置乙醚的掺混比例为 0%,对比全负荷工况下模拟仿真柴油机的缸压曲线/放热率曲线与实测缸压曲线/放热率曲线(见图 4)。由图 4 可知,实验值与仿真值整体相差不大,曲线的吻合程度超过 95%,属于合理的范围^[15]。综上,4190Z_LC-2 型船用中速机的仿真模型建立较为准确,各项系数设定处在合理的范围内,准确度较高,可以用于后续缸内燃烧过程的模拟计算。本文采用的柴油机实验台架相关数据信号的测量及分析示意图如图 5 所示。

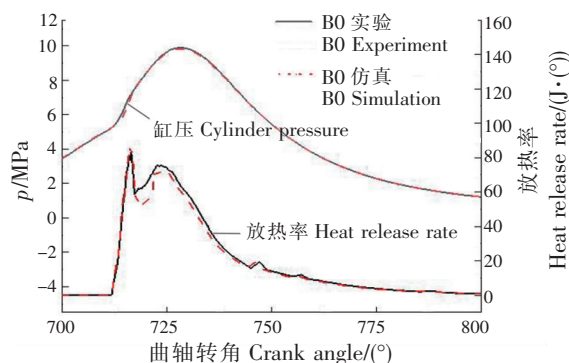


图 4 缸压/放热率曲线对比图
Fig.4 Comparison of the curves of cylinder pressure/heat release rate

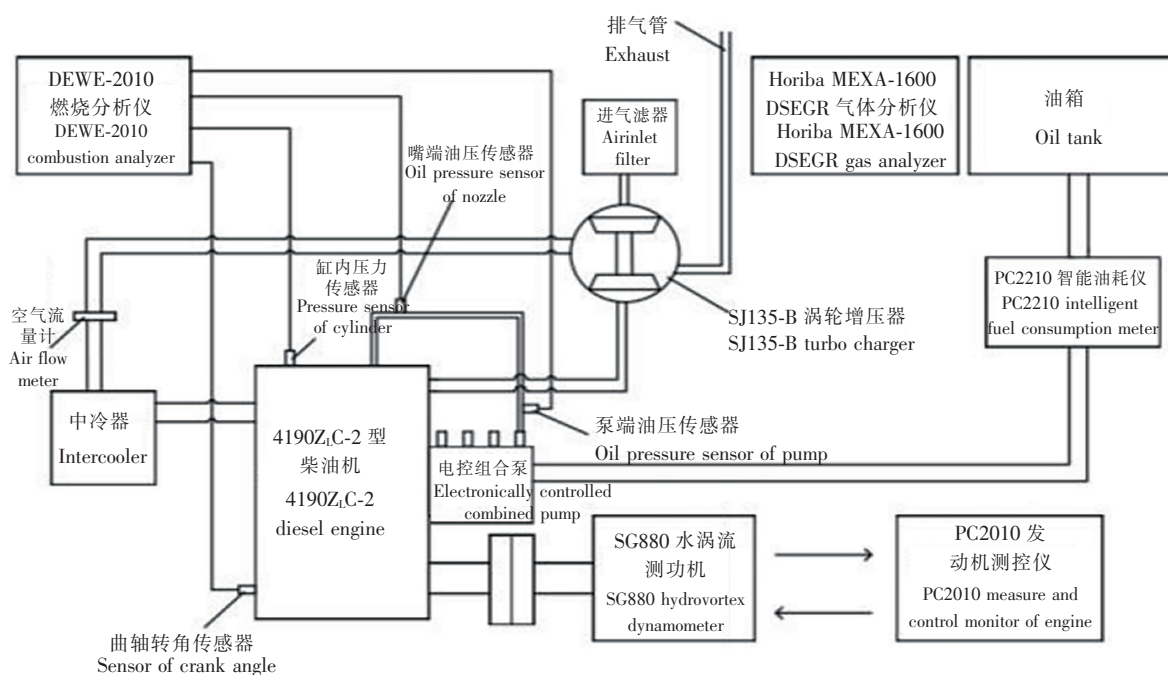


图5 台架实验示意图

Fig.5 Schematic diagram of bench test

2 实验结果与分析

2.1 对燃烧特性的影响

2.1.1 对缸内压力的影响

图6为不同乙醚掺混比下的双燃料柴油机缸内压力曲线图。由图6可知,随着乙醚掺混比的增加,缸内的最大爆发压力逐渐降低,滞燃期延长,最大爆发压力所对应的曲轴转角稍有延后,燃烧着火点时刻向后推移。即:全负荷工况下最大爆发压力从纯柴油的9.15 MPa降低到15%掺混比下的8.69 MPa,降幅约为5%,对应的曲轴转角从728.9°移动到729.5°。出现这一现象的原因是,由于乙醚的热值为36.8 MJ/kg,低于柴油热值的42.5 MJ/kg,随着掺混比的增大,乙醚含量增加,混合燃料燃烧所释放热量降低,缸内的压力降低。在掺混比为15%的条件下,缸内平均压力的下降幅度最大。

2.1.2 对缸内温度的影响

图7为不同乙醚掺混比下的双燃料柴油机缸内温度曲线。由图7可知,随着乙醚的掺混比不断增加,缸内温度逐渐降低,温度曲线峰值所对应的曲轴转角也略有延后,从全负荷工况纯柴油的1568 K下降到15%掺混比的1479 K,降幅约为5.6%,对应的曲轴转角从740.1°延后到742.1°。

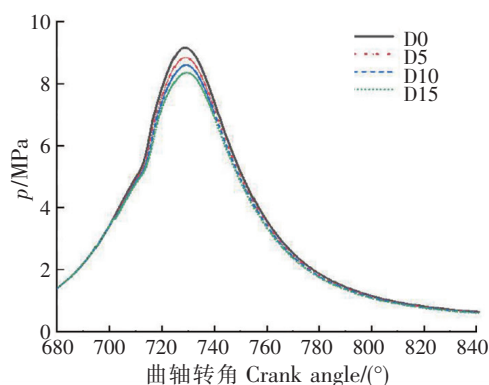


图6 不同掺混比缸内压力曲线图

Fig.6 Pressure curves within the cylinder at different blending ratios

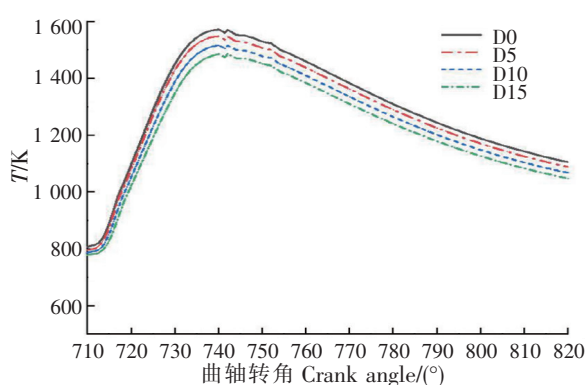


图7 不同掺混比缸内温度曲线

Fig.7 Temperature within the cylinder at different blending ratios

一方面, 乙醚的热值比柴油低, 在柴油中掺混乙醚后, 混合燃料燃烧后放出的热量少, 缸内温度有所下降。另一方面, 乙醚有很强的挥发性和低温流动性, 燃烧始点的延后使得在着火延迟期内形成的可燃混合气体数量增加, 在气缸内混合燃料与空气充分融合燃烧。由图 7 也可以发现, 反应的过程较为平稳, 放热持续时间较长, 放热过程变得更加稳定, 提升了双燃料发动机的稳定性。

图 8 为不同乙醚掺混比下缸内温度云图。横向分析, 相同乙醚掺混比下, 在柴油喷射进气缸初期 (710°) 燃油喷射轴线温度低于周围混合气温。随着曲轴转角增加, 油束撞击缸壁后由凹坑向两侧流动, 燃烧在缸内不断扩散, 在 730° 时凹坑及四周温度达到最高。纵向分析, 相同曲轴转角下, 随着乙醚掺混比的增大, 油束喷射贯穿距离缩短, 引燃柴油量减少, 缸内最高温度不断降低。

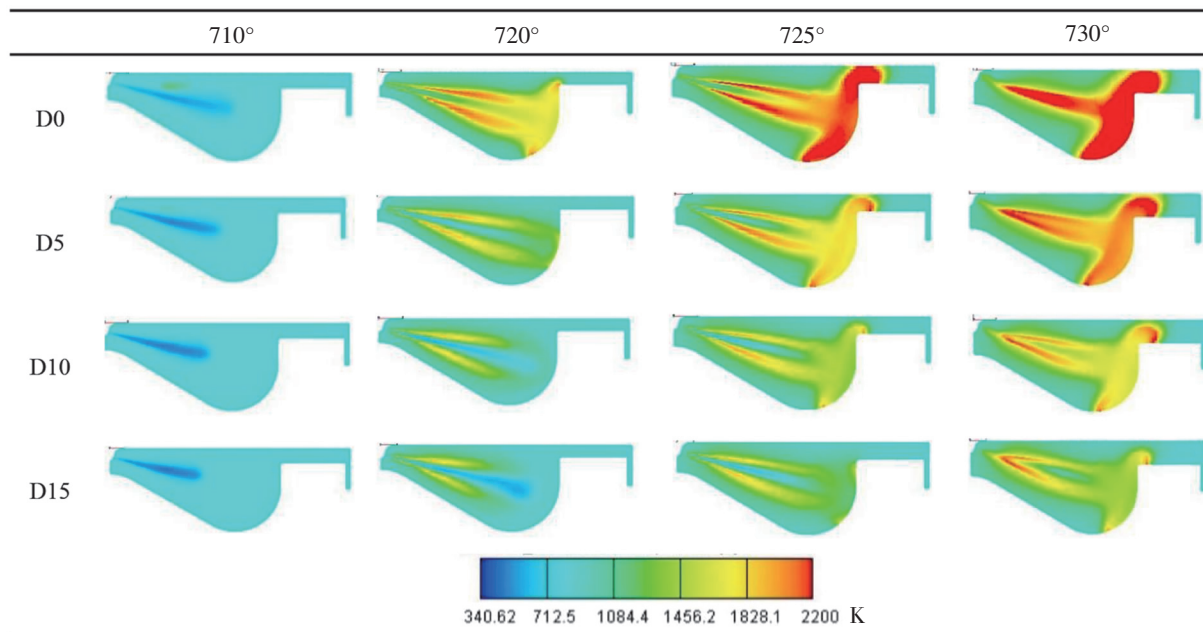


图 8 不同掺混比缸内温度云图

Fig.8 In-cylinder temperature clouds at different blending ratios

2.1.3 对放热率的影响

图 9 为不同乙醚掺混比下的双燃料柴油机放热率曲线图。由图 9 可以看出, 掺混乙醚后, 燃烧放热率规律与纯柴油趋势几乎相同, 第一峰值的放热率与其所对应的曲轴转角均无明显变化。到下一阶段燃油的扩散燃烧, 此时缸内燃烧剧烈, 温度显著升高。随着乙醚掺混放热率比的增加, 这一阶段对应的放热率峰值有所下降, 曲轴转角也略有延后, 即从纯柴油全负荷工况的 $65.7 \text{ J}/(^{\circ})$ 下降到乙醚掺混比为 15% 时的 $61.2 \text{ J}/(^{\circ})$, 下降幅度约为 6.8%, 对应的曲轴转角也由 723.9° 延后到 726.5° 。

出现这一现象的原因主要是因为, 随着乙醚掺混比不断增加, 缸内的平均压力降低, 滞燃期延长, 推迟了放热率峰值出现所对应的曲轴转角, 缩短了速燃期的反应放热时间^[16]。由于乙醚具有良好的挥发性, 使得气体在滞燃期内混合更加均匀, 燃烧更加完全, 第一峰值的放热率无明显下降趋势。同时乙醚本身的高含氧量也使得燃烧速度加快, 减少了燃烧过程的后燃烧, 导致第二峰值的放热率降低。

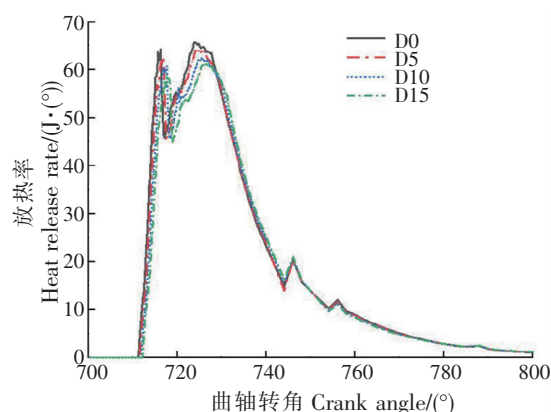


图 9 不同掺混比放热率曲线

Fig.9 Exothermic rate curves at different blending ratios

2.2 对排放特性的影响

2.2.1 对 NO 排放的影响

柴油机排放的 NO_x 主要包括 NO 、 NO_2 、 N_2O_5 等,其中 NO 的生成量占 NO_x 总量的 90% 左右,故本文主要研究 NO 的排放。 NO 的生成形式可分为高温型、激发型、燃料与空气之间发生反应的燃料型。由于后两种生成的 NO 所占比例较小,可忽略不计,因此仅分析在高温富氧条件下生成的高温型 NO 。

影响高温型 NO 生成量的主要因素有燃烧反应的温度、氧气浓度和反应时间,而且温度对高温型 NO 的生成影响最大。同时随着温度的上升,高温型 NO 生成量会迅速增加^[17]。图 10 为不同乙醚掺混比下的双燃料柴油机 NO 质量分数曲线图。由图 10 可知,随着乙醚掺混比的增加, NO 质量分数随之降低。当乙醚的掺混比为 15% 时, NO 最终排放的质量分数约为 0.011%,相对于原机的 0.0126%,降幅约为 12.7%。造成这一现象的原因主要是,随着乙醚的掺入,在燃烧时,缸内温度降低,破坏了 NO 生成的高温环境,抑制 NO 的生成。

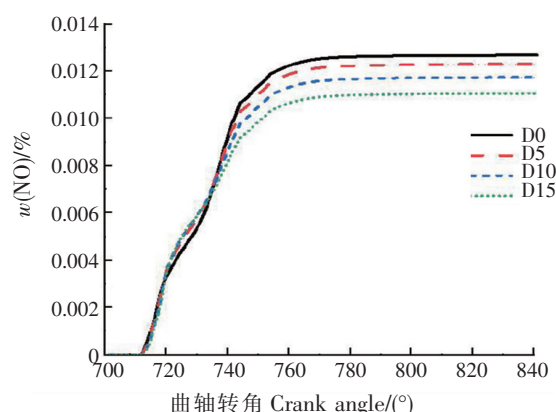


图 10 不同掺混比下 NO 质量分数曲线
Fig.10 NO mass fraction curves at different blending ratios

2.2.2 对 CO 排放的影响

图 11 为不同乙醚掺混比下排气阀开放时双燃料柴油机 CO 排放质量分数折线图。由图 11 可知,当乙醚掺混比增加时, CO 的最终排放量呈降低的趋势。当乙醚掺混比为 15% 时, CO 排放的质量分数降幅最大,为 7.8%。造成这种现象有以下几种原因:一方面,乙醚的含氧量较高,促进柴油-乙醚混合燃料更好地燃烧,同时乙醚的十六烷值低于柴油,汽化潜热值更高,导致燃烧滞燃期延长,混合燃料在缸内与空气充分混合,降低不完全燃烧产物 CO 的生成;另一方面,乙醚的热值低于柴油,掺烧乙醚后缸内燃烧温度下降,同时乙醚具有较好的挥发性,改善了缸内的雾化质量,使混合燃料的燃烧完全度提升,进而弱化 CO 在空气中被氧化的作用,使得 CO 生成量降低。

2.2.3 对碳烟排放的影响

图 12 为不同乙醚掺混比下排气阀开放时双燃料柴油机碳烟排放质量分数折线图。由图 12 可知,随着乙醚掺混比的增加,碳烟排放质量分数略有增加。在乙醚掺混比为 15% 的条件下,可以观察到碳烟排放质量分数增幅最大,与原机相比增幅约为 10.7%。造成这种现象的主要原因是,乙醚分子结构中存在具有较强结合力的 $\text{C}-\text{C}$ 键结构,增加了缸内混合燃烧过程中燃油中的烃出现分子的裂解,不断脱氢后聚合而成以碳为主、直径为 2 μm 左右的碳烟核心,混合气体中的烃不断在这个核心表面凝聚,形成直径为 20 ~ 30 μm 左右的碳烟基元,从而促进碳烟的生成和排放。

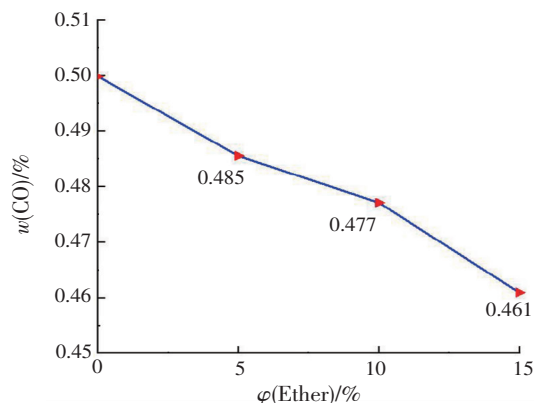


图 11 不同掺混比下 CO 质量分数曲线
Fig.11 CO mass fraction curves at different blending ratios

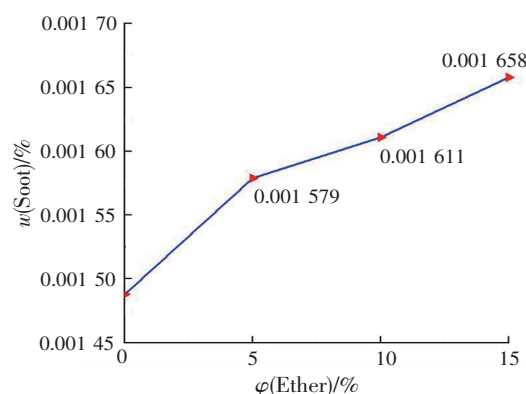


图 12 不同掺混比下碳烟质量分数曲线
Fig.12 Soot mass fraction curves at different blending ratios

3 结论

本文通过 AVL_FIRE 软件构建乙醚-柴油双燃料柴油机模型进行仿真计算,并对实验数据进行分析后发现:与燃烧纯柴油相比,燃用乙醚混合燃料可以降低 CO 和 NO 的排放,并且改善柴油机的燃烧特性,放热过程变得更加稳定,双燃料发动机的性能得到提升。根据以上分析,可以得出:

1) 随着乙醚掺混比的增加,乙醚-柴油双燃料发动机的缸内平均压力和温度均有小幅的降低,最大爆发压力和最高缸温对应的曲轴转角略有延后。放热率规律与纯柴油趋势大致相同,燃烧过程较为平缓,提升了双燃料发动机工作的稳定性。

2) 在全负荷工况下,与纯柴油燃烧相比,随着乙醚的掺混比增加,CO、NO 的排放均有明显下降的趋势,碳烟的排放呈现上升趋势。

3) 在反应过程中,乙醚加入延长了混合燃料的滞燃期,使得油气在缸内混合更加充分,放热过程稳定。当乙醚的掺烧比例为 15% 时,NO 排放较原机降低 12.7%,CO 排放降低 7.8%,碳烟排放提高 10.7%。

[参考文献]

- [1] 黄加亮,张飞飞,林航,等. 双卷流燃烧系统的双燃料发动机燃烧排放特性[J]. 集美大学学报(自然科学版),2022,27(6):531-538.
- [2] 王彬彬,高敬博,杨捷波,等. 掺烧生物柴油耦合进气道加湿对柴油机燃烧及排放性能的影响[J]. 船舶工程,2021,43(3):1-7.
- [3] 高占斌,张天野. 船舶柴油机[M]. 哈尔滨:哈尔滨大学出版社,2022.
- [4] 邓涛,范金宇,黄加亮,等. 掺烧不同比例二甲醚柴油机燃烧与排放特性的影响[J]. 船舶工程,2020,42(10):7-11.
- [5] 刘来,陈文,胥昌懋,等. 乙醚助燃对柴油机冷起动性能影响的试验研究[J]. 车用发动机,2020,247(2):23-28.
- [6] 王永莲. 乙醚生物柴油混合燃料发动机的燃烧和排放特性[D]. 西安:长安大学,2016.
- [7] 宋俊良,祝勇,贾超超. 添加乙醚和乙醇对发动机燃用生物柴油-柴油混合燃料燃烧性能的影响[J]. 内燃机与配件,2015(10):6-8.
- [8] 寇增亚,赵旭毅,刘红梅,等. 乙醚在柴油机上的应用研究[J]. 公路与汽运,2015(5):17-19.
- [9] AGARWAL A K, PRASHUMN H V, NIRENDRA N M. Di-ethyl ether-diesel blends fuelled off-road tractor engine(Part-II): unregulated and particulate emission characteristics[J]. Fuel,2022,308:121973.
- [10] 彭小红,杨璐,陈昊,等. 乙醚生物柴油混合燃料发动机的燃烧和排放特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2015,35(2):152-158.
- [11] 张敬贤. 喷射策略对天然气/柴油双燃料发动机燃烧和排放的影响[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
- [12] 潘业俊,刘灿旭,刘红,等. 船用低速柴油机喷嘴内流及初次破碎机理研究[J]. 内燃机学报,2022,40(5):412-419.
- [13] 韩宗英,何昌升,李井华,等. 钝体稳定射流火焰的火焰面模型数值研究[J]. 航空动力学报,2020,35(2):337-347.
- [14] 宣熔,张飞飞,陈坚,等. 喷油提前角对双燃料柴油机燃烧和排放的影响[J]. 集美大学学报(自然科学版),2021,26(3):240-245.
- [15] 叶子泉,李品芳,黄朝霞,等. 掺烧丁醇耦合米勒循环降低发动机 NO 和 PM 排放的仿真研究[J]. 中国航海,2021,44(2):114-119.
- [16] 胡登,黄加亮,邓涛,等. 双燃料发动机进气道加湿燃烧与排放性能仿真研究[J]. 中国造船,2020,61(3):163-175.
- [17] 牛梦达,宣熔,陈美谦,等. 双燃料发动机低温燃烧排放性能仿真[J]. 集美大学学报(自然科学版),2021,26(2):179-186.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)