

船用低速机应用生物燃料油仿真

黄龙飞¹, 黄少鸿², 周昕毅^{1*}, 李铁¹, 武桑¹, 吴刚³

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 中石化中海船舶燃料供应有限公司, 广州 510700; 3. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要: [目的]为实现船舶脱碳目标,引入低零碳能源势在必行,而生物燃料作为碳中和燃料极具发展前景。然而,船舶低速机的缸径和功率变化范围较广,目前针对多种缸径船舶低速机应用生物燃料油的系统性研究仍较为缺乏。[方法]以1台缸径350 mm的船舶低速机为研究对象,通过台架试验,在不同掺混比例下验证仿真模型和化学反应机理的准确性,并开展不同缸径低速机应用生物燃料油的仿真研究。[结果]研究结果表明,随着生物燃料掺混比例的升高,氮氧化物(NO_x)排放和油耗呈上升趋势;随着发动机缸径的增大, NO_x 排放和发动机热效率有增加趋势。[结论]研究成果为航运业推广使用生物燃料油提供重要参考依据。

关键词: 船舶; 低速机; 生物燃料油; 燃烧; NO_x 排放

中图分类号: U671.99 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2025.09.08

Simulation of Bio-Fuel Oil Application in Marine Low-Speed Engines

HUANG Longfei¹, HUANG Shaohong², ZHOU Xinyi^{1*}, LI Tie¹, WU Shen¹, WU Gang³

(1. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Shipping&Sinopec Suppliers Co., Ltd., Guangzhou 510700, China; 3. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: [Purpose] To achieve the goal of decarbonizing ships, the introduction of low and zero-carbon energy sources is imperative, and biofuels, as carbon-neutral fuels, have great development prospects. However, the bore and power range of marine low-speed engines varies widely, and systematic research on the application of biofuel oil in low-speed engines with various bores is still relatively scarce. [Method] A marine low-speed engine with a bore of 350 mm is selected as the research object. Through bench tests, the accuracy of the simulation model and chemical reaction mechanism is verified under different blending ratios, and simulation studies on the application of biofuel oil in low-speed engines with different bores are conducted. [Result] The research results show that as the blending ratio of biofuel increases, the emissions of nitrogen oxides (NO_x) and fuel consumption tend to rise; as the engine bore increases, the NO_x emissions and engine thermal efficiency tend to increase. [Conclusion] The research findings provide an important reference basis for the promotion and application of biofuel oil in the shipping industry.

Key words: ship; low-speed engine; biofuel oil; combustion; NO_x emission

0 引言

当前, 气候变暖已是全球面临的最严峻问题之

一。面对航运业巨量的温室气体排放以及排放核算从末端转向全生命周期的更新趋势, 国际海事组织

收稿日期: 2024-11-29; 修回日期: 2025-01-31

基金项目: 中国远洋海运集团“船用生物燃料油应用标准及碳排放因子标定”计划; 国家自然科学基金重点国际合作研究项目(52020105009)。

作者简介: 黄龙飞(2000—), 男, 硕士。研究方向: 船舶动力装置。

通信作者: 周昕毅(1994—), 男, 博士。研究方向: 船舶动力装置节能减排。E-mail: zhou_xy@sjtu.edu.cn

(International Maritime Organization, IMO) 要求在2050年实现零温室气体排放。目前, 传统技术改造带来的减排效果非常有限, 因此源头脱碳成为实现IMO目标的必由之路。其中, 生物燃料是一种非常具有前景的碳中性燃料, 无须对船舶和发动机进行大规模改造, 使其在现阶段有助于实现脱碳目标。

关于船用发动机应用生物燃料的可行性, TAN等^[1]和SAGIN等^[2]研究了船用发动机使用生物柴油的经济效益、全生命周期排放及其对环境的影响。CHOUNTALAS等^[3]和WEI等^[4]分别研究了缸径为700 mm和520 mm船用低速机使用生物柴油B30 (70%柴油和30%生物燃料混合) 以及B100、B50和纯柴油等燃料组合的影响。SUN等^[5]研究了1台缸径为350 mm的船用低速机使用生物柴油时的碳黑 (Black Carbon, BC) 排放情况。研究发现, 与传统燃料相比, 使用生物柴油可降低全生命周期温室气体、硫氧化物 (Sulfur Oxides, SO_x) 和碳氢化物 (Hydrocarbon, HC) 排放量, 但也会导致发动机经济效率下降和氮氧化物 (Nitrogen Oxides, NO_x) 排放增加。由于船用低速机体积大、功率高, 开展试验难度大, 基于高精度数值仿真的研发可节省大量时间和能源等成本, 其中兼顾计算精度和成本的化学反应动力学机理至关重要。FISHER等^[6]较早开发出基于丁酸甲酯 (Methyl Butyrate, MB) 的生物柴油详细燃烧机理, 然而该机理无法准确描述反应特性^[7]。为解决此问题, HERBINET等^[8]开发了基于癸酸甲酯 (Methyl Decanoate, MD) 的燃烧机理, 但该机理无法体现不饱和键的影响。之后, HERBINET等^[9]再度构建了5-癸烯酸甲酯 (Methyl-5-Decenoate, MD5D) 和9-癸烯酸甲酯 (Methyl-9-Decenoate, MD9D) 的详细燃烧机理。为进一步提高精度, WESTBROOK等^[10]构建了更详细的燃烧机理。经过发展, 如今详细的化学反应机理已能涵盖大量的反应物和化学反应式。但对于强瞬态、强湍流的发动机燃烧过程, 复杂的机理仍须简化。目前, BRAKORA等^[11]和LIU等^[12]发展的简化生物柴油机理应用较为广泛: BRAKORA等^[11]推荐采用MD与

MD9D组合, 并掺混正庚烷^[13]; LIU等^[12]推荐使用MD、MD5D、亚油酸甲酯 (Methyl Linoleate, ML) 和正十烷组合的简化机理^[12]。然而, 这2种简化机理在富氧条件或点火阶段的仿真精度仍有提升空间^[14]。

此外, 当前关于生物柴油化学反应机理和仿真的研究大多基于小型车用高速柴油机, 其在船用低速机上的应用有待验证, 且生物燃料低速机燃烧系统优化方面的研究基本处于空白状态。本研究首先通过350 mm缸径低速机台架试验, 研究不同掺混比例的生物燃料油和船用燃料油对发动机燃烧与 NO_x 排放的影响。其次, 搭建三维仿真模型, 并基于试验数据对仿真模型和反应动力学机理进行标定。最后, 开展不同缸径低速机应用不同掺混比例生物柴油时燃烧过程及排放特性的研究, 以期为航运业应用生物燃料油提供参考。

1 试验与仿真设置

1.1 350 低速机试验设置

本文采用表1的MAN B&W 6S35ME-B9低速机开展台架试验。

表1 试验用 MAN B&W 6S35ME-B9 低速机基本参数

Tab. 1 Basic Parameters of MAN B&W 6S35ME-B9

Low-Speed Engine for Experimental Use

发动机型号	MAN 6S35ME-B9
气缸数	直列 6 缸
缸径/mm	350
冲程数	2
冲程/mm	1 550
发火顺序	1-5-3-4-2-6

本试验使用的燃料为脂肪酸甲酯 (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) 和船用燃料油的混合物, 包括15%船用生物燃料油 (B15)、24%船用生物燃料油 (B24)、30%船用生物燃料油 (B30)、50%船用生物燃料油 (B50) 以及船用燃料油 (180), 燃料的物理化学特性见表2。

表2 不同掺混比例燃料物理化学特性

Tab. 2 Physical and Chemical Properties of Fuels with Different Blending Ratios

种类	180 燃料油	B15 燃料油	B24 燃料油	B30 燃料油	B50 燃料油
密度 (20 °C) /(kg/m^3)	958.0	944.8	936.2	931.0	911.2
黏度 (50 °C) /(m^2/s)	0.000 168 6	0.000 060 12	0.000 047 4	0.000 026 48	0.000 013 51
闪点温度 (闭口杯法) /°C	>90.0	>90.0	>90.0	>90.0	>90.0
灰分/%	0.040	0.032	0.029	0.017	0.008
酸值/(mgKOH/g)	1.58	1.50	1.37	1.00	0.52
水质量分数/%	0.21	0.15	0.12	0.09	0.06
碳质量分数/%	86.50	84.90	84.60	83.80	82.00
硫质量分数/%	0.470	0.404	0.383	0.322	0.253

试验采用测功机 NCK 2000 测量功率, 采用传感器 Kistler 6613CQ13 监测发动机缸压, 采用分析仪 CAI 700HFID 测量排气成分, 并通过质量流量计 RHE 08 测量油耗。关于该低速机和试验方法更为详细的描述, 可参见参考文献[5]。试验过程中, 当船舶低速机使用 B15、B24 和 B30 等 3 种生物燃料油时, 要求发动机各稳定运行 94 h; 使用 B50 生物燃料油时, 则要求稳定运行 24 h。

1.2 350 低速机仿真模型设置

基于 CONVERGE 进行三维仿真模型构建, 湍流采用雷诺平均纳维-斯托克斯 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 模型^[15], 缸内壁面传热采用 Amsden 模型^[16], 喷雾破碎过程采用 KH-RT 模型^[17], 液滴碰撞过程采用 NTC 模型^[18], 液滴蒸发过程采用 Frossling 模型^[19], 燃烧模型采用 SAGE。此前基于定容燃烧弹模拟发动机工况, 并结合光学诊断测试柴油喷雾发展历程, 标定喷雾模型 KH-RT 等重要参数^[20], 本文继续沿用已标定的喷雾模型常数。本文基于威斯康星大学反应机理^[13], 使用 MD 代表生物柴油中饱和组分, MD9D 不饱和组分, 优化 NO 生成反应, 最终得到含有 4 种元素、70 种物质及 192 条基元反应的机理模型。

1.3 不同缸径低速机仿真模型设置

为探究不同缸径低速机应用生物燃料油的燃烧

和排放性能, 采用 MAN 2024 年产品手册中 7 台船用低速机^[21]的缸径与冲程参数, 且保持燃烧室几何形状与 350 低速机一致, 见图 1。仿真模型的基础网格尺寸设置为 4 mm, 对喷雾区域进行加密处理, 其网格尺寸设置为 2 mm, 仿真模型最大网格数为 201 万。

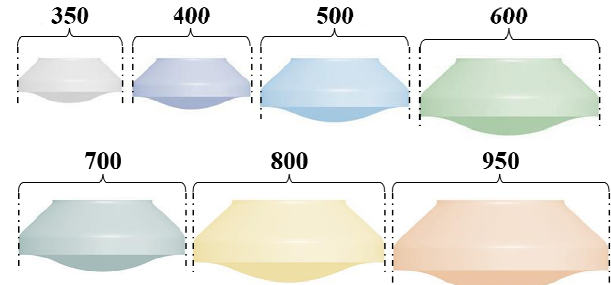


图 1 仿真中不同缸径低速机燃烧室尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Combustion Chamber Dimensions of Marine Low-Speed Engines with Different Bore Diameters in Simulation (Unit: mm)

除了本文试验中研究的 180、B24 和 B50 等燃料, 进一步仿真研究低速机应用 B100 的潜力。仿真研究掺混比例影响时, 对喷射压力、喷油正时、投入能量等重要参数进行统一控制, 见表 3。

表 3 不同缸径低速机发动机基本参数及仿真工况

Tab. 3 Basic Parameters and Simulation Operating Conditions of Low-Speed Engines with Different Cylinder Diameters

发动机型号	缸径/mm	冲程/mm	缸径冲程比	转速/(r/min)	燃料	平均指示有效压力/MPa	喷油正时/(°CA ATDC)
S35ME-B9	350	1 550	4.43	129.0	180, B24, B50, B100	~1.5(对应 350 机 75% 负荷)	-4, -2, 0, 2, 4
S40ME-C9.5	400	1 770	4.43	112.9			
S50ME-C10.7	500	2 214	4.43	90.3			
G60ME-C10.5	600	2 790	4.65	74.0			
G70ME-C10.7	700	3 256	4.65	63.5			
S80ME-C9.5	800	3 450	4.31	56.9			
G95ME-C10.6	950	3 460	3.64	56.8			

在不同缸径低速机的仿真研究中, 基于相似原理^[22]设定了转速, 仿真过程涵盖压缩、燃料喷射、油气混合、燃烧、膨胀、缸内传热以及排放物生成等环节。其中, 湍流过程模型、缸内壁面传热模型、喷雾破碎过程模型、液滴碰撞过程模型、液滴蒸发过程模型、燃烧模型和化学反应动力学机理, 均与 1.2 节保持一致。

2 结果与讨论

2.1 仿真模型标定与试验验证

首先, 在不同掺混比例下验证仿真对试验数据的预测精度。图 2 和图 3 分别为不同掺混比例下 350 低速机缸压发展历程和 NO_x 排放的仿真与试验结果对比, 发动机负荷均为 100%, 转速均为 142 r/min。可见在不同燃料掺混比例下, 仿真计算得到的缸压和 NO_x 排放数据与试验值吻合度较高, 表明本文构建的仿真模型具有较高的预测精度。

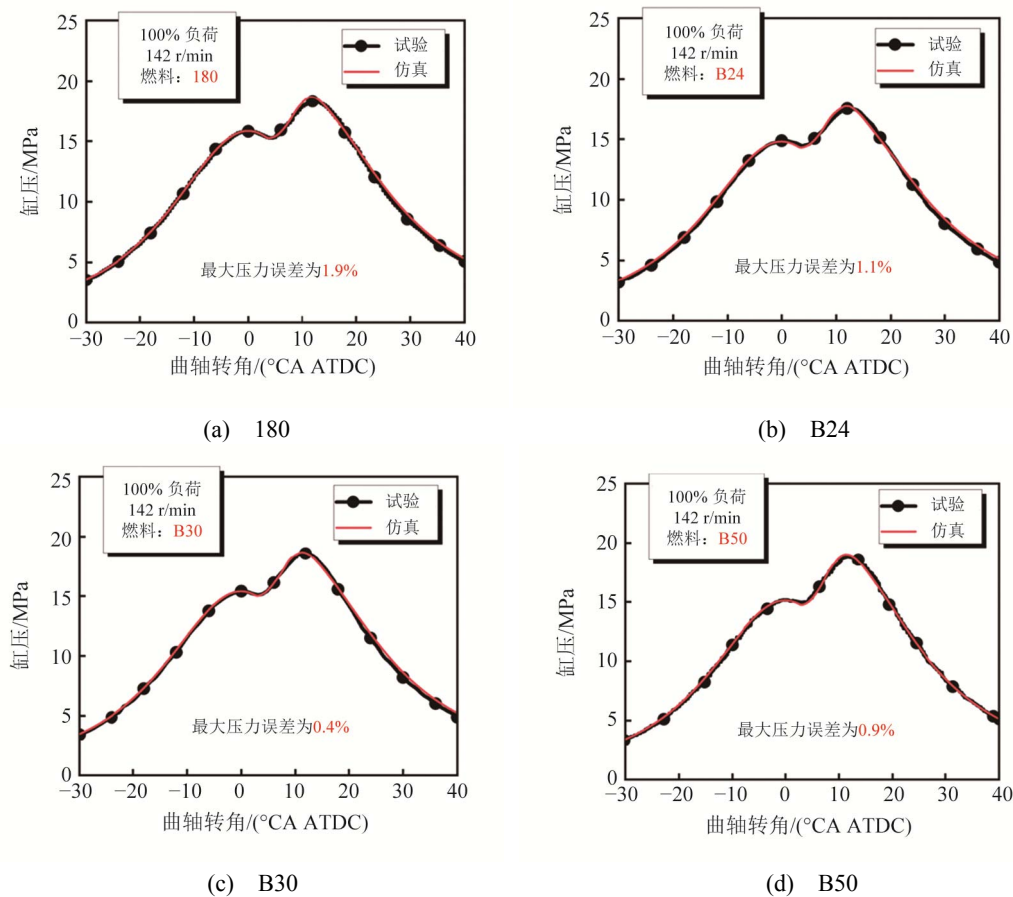
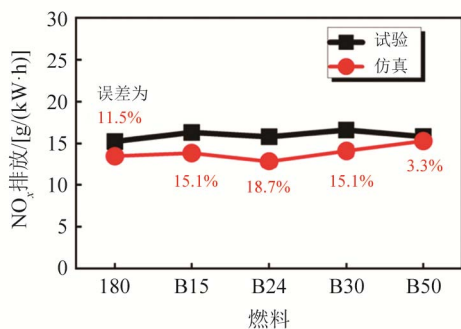


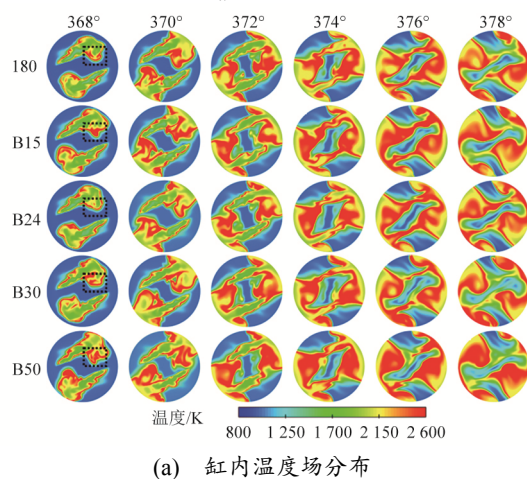
图2 不同掺混比例下仿真和试验缸压发展历程对比

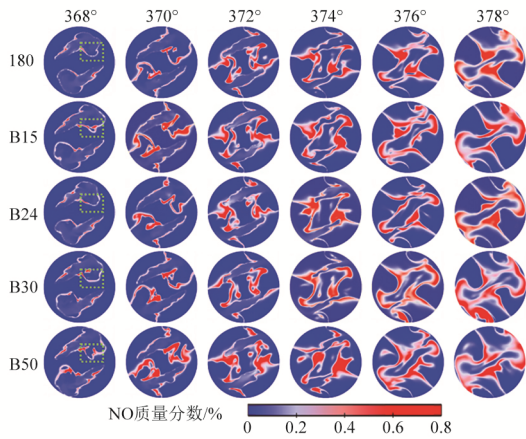
Fig. 2 Comparison of Simulated and Experimental Cylinder Pressure Development Under Different Blending Ratios

图3 不同掺混比例下仿真和试验 NO_x 排放对比Fig. 3 Comparison of Simulated and Experimental NO_x Emissions Under Different Blending Ratios

为阐释试验中不同掺混比例下 NO_x 的变化规律,图4给出不同掺混比例下缸内的温度场分布和 NO 分布,其中发动机负荷为100%,转速为142 r/min。如图4(a)所示,368°曲轴转角下,B15和B30的局部燃烧温度更高,这与图3中较高的 NO_x 排放结果相符。

由于试验中控制系统未更改,不同掺混比例下的喷油正时、喷油持续期等参数并未统一控制。因此,除燃料成分的差异,喷油参数等的不同也是导致不同掺混比例下 NO_x 排放存在差异的重要因素。

图4 不同掺混比例下缸内温度场分布和 NO 分布Fig. 4 Temperature Field Distribution and NO Distribution Inside the Cylinder with Different Blending Ratios



(b) 缸内 NO 分布

图 4 不同掺混比例下缸内温度场分布和 NO 分布 (续)
Fig. 4 Temperature Field Distribution and NO Distribution Inside the Cylinder with Different Blending Ratios (Continued)

2.2 不同缸径低速机性能及排放特性

图5为950 mm缸径低速机在喷油正时为 -4°CA ATDC时, 应用不同掺混比例生物燃料油的缸压发展历程和放热率曲线。结果显示, 同一低速机, 应用不同掺混比例燃油的缸压发展历程和放热过程较为相似: 缸压发展趋势、爆压特性和放热率峰值的差异相对较小, 且发动机使用B100和180燃料时的曲线变化也较为接近, 表明950 mm低速机具备应用生物柴油及纯生物燃料的潜力, 因不同缸径燃料掺混比例的影响具有相似性, 此处仅给出950 mm低速机的研究结果。

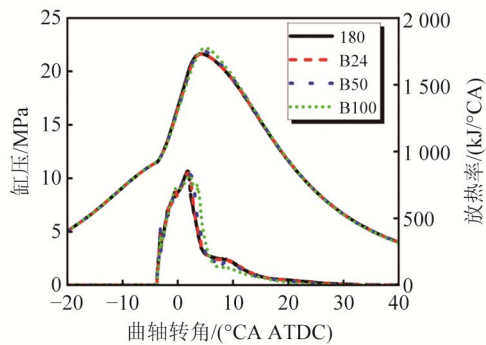


图 5 950 mm 缸径低速机应用不同掺混比例生物燃料油的缸压发展历程和放热率曲线

Fig. 5 Cylinder Pressure Development Process and Heat Release Rate Curve of 950 mm Bore Low-Speed Engine with Different Blending Ratios of Biodiesel

图6为400 mm缸径低速机应用不同掺混比例生物燃料油的指示热效率 (Indicated Thermal Efficiency, ITE) 曲线, 可见随着生物燃料掺混比例

的增高, 发动机热效率略有降低。这主要是由于生物柴油的热值偏低, 在相同喷射压力下, 若要实现相同的能量输入, 须增加喷油质量并延长喷油持续期。此时, 喷雾火焰撞壁现象增多, 由此引发的快速传热随之增加, 从而导致发动机的指示热效率有所下降。

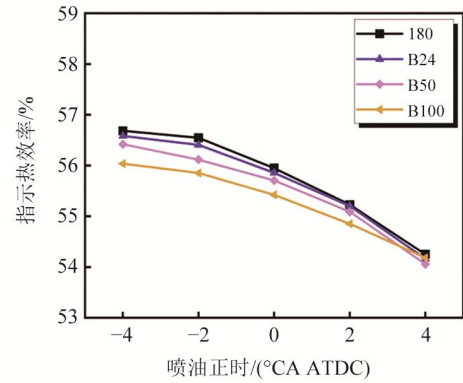


图 6 400 mm 缸径低速机应用不同掺混比例生物燃料油的发动机指示热效率

Fig. 6 Indicated Thermal Efficiency of 400 mm Bore Low-Speed Engine with Different Blending Ratios of Biodiesel

为探究不同缸径低速机的热效率随着生物燃料掺混比例升高的变化趋势, 将不同喷油正时对应的热效率数据进行汇总对比, 见图7。

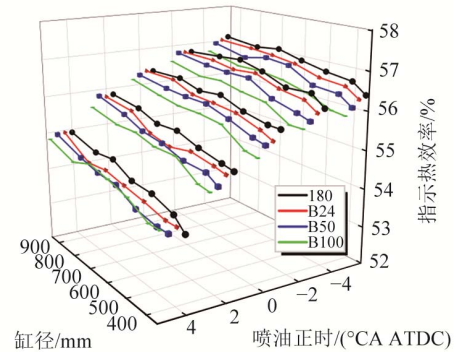


图 7 不同缸径低速机指示热效率数据汇总

Fig. 7 Summary of Indicated Thermal Efficiency Data for Low-Speed Engines with Different Bore Diameters

整体而言, 生物燃料掺混比例的升高对发动机热效率的影响较小, 所有机型中使用B100燃料相较于使用180燃料, 对发动机热效率的降低影响均小于1%, 表明在船用低速机宽谱系范围内, 生物柴油的使用不会显著影响发动机燃烧性能和热效率。此外, 由图7可知, 随着缸径的增大, 发动机热效率呈明显上升趋势。例如, 喷油正时为 -4°CA 时, 350 mm缸径低速机使用180和B100燃料的指示热效率分别约为56.4%和56.0%, 而950 mm缸径低速机使用180和

B100燃料的指示热效率均可达到56.8%和56.5%。这主要是由于随着低速机缸径的增大,其面容比(S/V ,即发动机燃烧室表面积与其体积之比)减少,从而有效减少缸内传热损失,以便提高发动机的热效率。同时,可以看到发动机的指示热效率随着喷油正时的延后而显著降低,这是由于燃烧相位延后偏离上止点,降低了燃烧放热的等容度。因此,发动机最佳喷油正时的选择需要综合考虑爆压、热效率以及 NO_x 排放等因素。

图8为不同缸径低速机 NO_x 排放数据汇总。当燃料掺混比例从180提高到B50时, NO_x 排放变化并不明显;但当掺混比例进一步从B50提高到B100时, NO_x 排放显著增加。这主要是由于生物柴油含氧量较高,有助于 NO_x 生成,尤其是从B50提升到B100时,这种促进作用更为明显。此外,随着发动机缸径的增大, NO_x 排放也相应增加。这是由于大缸径船用柴油机转速较低, NO_x 生成时间延长。

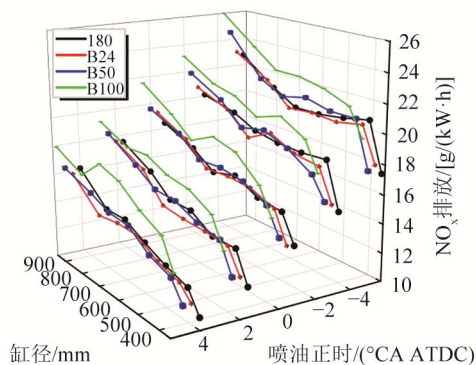


图8 不同缸径低速机 NO_x 排放数据汇总

Fig. 8 Summary of NO_x Emission Data for Low-Speed Engines with Different Bore Diameters

不同缸径船用低速机的油耗数据汇总见图9。相较于使用180燃料,虽然燃用B100时热效率降低幅度小于1%,但油耗明显升高。这主要是由于生物柴油的热值低于传统燃料油,为实现相同的功率输出,需要投入更多质量的燃料。因此,使用高掺混比例生物燃料油时,需要注意油耗增加不仅会进一步提高燃料成本,还会对船舶续航能力等造成一定影响。随着低速机缸径的增大,油耗呈现下降趋势。这是由于大缸径低速机面容比较小,缸内传热损失少,有助于提升热效率,降低油耗^[22]。此外,图9提前喷油正时可以明显降低发动机油耗。例如,使用B100燃料且喷油正时从4 °CA提前至-4 °CA时,油耗从约192 g/(kW·h)降至187 g/(kW·h)。这是由于提前喷油可以使更多放热集中在上止点附近,提高了燃烧放热的等容度。但图8提前喷油会导致发动机爆压升高和 NO_x 排放增加,对发动机的力学强度和后处理带来更大挑战。

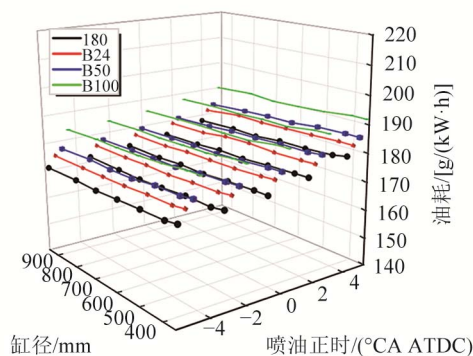


图9 不同缸径低速机油耗数据汇总

Fig. 9 Summary of Fuel Consumption Data for Low-Speed Engines with Different Bore Diameters

3 结论

本文基于MAN 6S35ME-B9(缸径350 mm)低速机的试验数据,验证了仿真模型的预测精度。在此基础上,进一步研究不同缸径船用低速机应用不同掺混比例生物燃料油的燃烧和排放性能,为未来航运业推广生物燃料油提供理论基础,主要研究结论如下。

1) 开发了兼顾预测精度和计算成本的生物燃料油化学反应动力学机理,其包含4种元素、70种物质及192条化学反应式。

2) 在不同燃料掺混比例下验证仿真模型的预测精度,结果表明仿真模型对缸压发展历程的预测结果与试验数据高度重合,对爆压和指示热效率等重要发动机性能参数也展现出较高的预测精度。

3) 基于验证准确的化学反应动力学机理和仿真子模型组合,进一步研究不同缸径低速机应用不同掺混比例生物燃料油的燃烧和排放性能。结果显示,随着掺混比例的升高,发动机热效率略有降低,但使用B100燃料相较于使用180燃料,热效率降低幅度小于1%。此外,高掺混比例生物燃料油的使用将增加发动机油耗,主要归因于生物柴油热值低于传统燃料油。

4) 不同缸径下,当掺混比例从180提高到B50时, NO_x 排放仅有小幅升高,这与350低速机的试验结果一致;但当掺混比例从B50提高到B100时, NO_x 排放显著增加。因此,未来推广高掺混比例生物燃料油时,需对发动机燃烧系统 and 控制策略进行优化,以降低选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, SCR)后处理装置的处理压力。

5) 随着低速机缸径的增大,发动机热效率提高,油耗降低。这主要是由于大缸径低速机较小的面容比,能够有效减少缸内传热损失。此外,随着低速机缸径的增大, NO_x 排放有所升高。这是由于大缸径低速机的转速较低,较长的化学反应时间尺度有

助于NO_x排放。

6) 不同机型和缸径条件下, 推迟喷油正时可显著降低NO_x排放, 但同时会导致热效率下降、油耗上升。因此, 船用低速机应用生物燃料油时应进行发动机燃烧系统 and 控制策略的优化, 综合考虑不同缸径、机型、发动机工况及燃料掺混比例, 确定最佳喷油正时、喷油压力等参数, 从而实现发动机性能和排放整体最优。

参考文献:

- [1] TAN E C D, HAWKINS T R, LEE U, et al. Biofuel Options for Marine Applications: Technoeconomic and Life-Cycle Analyses[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(11): 7561-7570.
- [2] SAGIN S, KARIANSKYI S, MADEY V, et al. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 120.
- [3] CHOUNTALAS T D, FOUNTI M, TSALAVOUTAS I. Evaluation of Biofuel Effect on Performance & Emissions of a 2-Stroke Marine Diesel Engine Using on-Board Measurements[J]. *Energy*, 2023, 278(1): 127845.
- [4] WEI C F, JIANG G H, CUI L, et al. Combustion Analysis of Low-Speed Marine Engine Fueled with Biofuel[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2023, 22(4): 861-869.
- [5] SUN Y, LYU L, WEN M M. Experimental Study on Reducing BC Emissions from a Low-Speed Marine Engine by Using Blended Biodiesel and a Nitro Additive[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 185: 1232-1249.
- [6] FISHER E M, PITZ W J, CURRAN H J, et al. Detailed Chemical Kinetic Mechanisms for Combustion of Oxygenated Fuels[C]//Combustion Institute. 2000.
- [7] DOOLEY S, CURRAN H J, SIMMIE J M. Autoignition Measurements and a Validated Kinetic Model for the Biodiesel Surrogate, Methyl Butanoate[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 153(1/2): 2-32.
- [8] HERBINET O, PITZ W J, WESTBROOK C K. Detailed Chemical Kinetic Oxidation Mechanism for a Biodiesel Surrogate[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 154(3): 507-528.
- [9] HERBINET O, PITZ W J, WESTBROOK C K. Detailed Chemical Kinetic Mechanism for the Oxidation of Biodiesel Fuels Blend Surrogate[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(5): 893-908.
- [10] WESTBROOK C K, NAIK C V, HERBINET O, et al. Detailed Chemical Kinetic Reaction Mechanisms for Soy and Rapeseed Biodiesel Fuels[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(4): 742-755.
- [11] BRAKORA J, REITZ R D. A Comprehensive Combustion Model for Biodiesel-Fueled Engine Simulations[C]//SAE World Congress and Exhibition. 2013.
- [12] LIU T, JIA Q E, YANG W M, et al. Development of a Skeletal Mechanism for Biodiesel Blend Surrogates with Varying Fatty Acid Methyl Esters Proportion[J]. *Applied Energy*, 2016, 162(15): 278-288.
- [13] WANG H, R Y, JIA M, REITZ R D. Development of a Reduced N-Dodecane-PAH Mechanism and its Application for N-Dodecane Soot Predictions[C]//Fuel. 2014.
- [14] JURIĆ F, KRAJCAR M, DUIĆ N, et al. Investigating the Pollutant Formation and Combustion Characteristics of Biofuels in Compression Ignition Engines: A Numerical Study[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 43: 101939.
- [15] HAN Z, REITZ R D. Turbulence Modeling of Internal Combustion Engines Using RNG κ - ϵ Models[J]. *Combustion Science and Technology*, 1995, 106(4/5/6): 267-295.
- [16] AMSDEN A A. KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves[R]. 1997.
- [17] REITZ R D, BRACCO F. Mechanisms of Breakup of Round Liquid Jets[J]. *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, 1986, 3: 233-249.
- [18] SCHMIDT D P, RUTLAND C J. A New Droplet Collision Algorithm[J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 164(1): 62-80.
- [19] AMSDEN A A, O'ROURKE P J, BUTLER T D. KIVA-2: A Computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays[R]. 1989.
- [20] ZHOU X Y, LI T, YI P, et al. On the Fuel Injection Rate Profile as Boundary Conditions for Diesel Spray Combustion Simulations[J]. *Fuel*, 2020, 276: 118026.
- [21] MAN Energy Solutions. Marine Engine Programme 2024[EB/OL]. [2025-02-11]. <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/man-energy-solutions-marine/marine-engine-programme-2024/21500-127462.html>.
- [22] ZHOU X Y, LI T, YI P. The Similarity Ratio Effects in Design of Scaled Model Experiments for Marine Diesel Engines[J]. *Energy*, 2021, 231: 121116.