

掺烧不同比例的异戊醇对船舶柴油机性能的影响

林 航^{1,2}, 王奇伟¹, 陈美谦^{1,3}, 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] 为了研究不同比例的异戊醇/柴油混合燃料在4190Z_LC-2型船用中速柴油机中的燃烧和排放特性, 运用AVL_FIRE仿真软件建立柴油机燃烧室模型, 并通过台架实验验证其仿真模型的准确性。在仿真软件中通过调整异戊醇在柴油中的掺混比来研究混合燃料对柴油机燃烧和排放性能的影响。结果表明: 掺混异戊醇有助于改变NO的生成规律, 使NO在速燃期的生成量上升, 在缓燃期与后燃期的生成量减少, 并且总体生成的NO质量分数降低; 随着异戊醇掺混比的上升, CO最终生成质量分数下降, Soot最终生成质量分数上升, 同时生成的Soot质量分数峰值降低, 在缓燃期的氧化速率增快, 并因为较快的耗氧量使得最终生成的Soot质量分数比纯柴油的高。

[关键词] 船舶柴油机; 异戊醇; 燃烧性能; 排放性能; AVL_FIRE仿真软件

[中图分类号] TK 421

Effect of Blending Different Proportion of Isoamyl Alcohol on the Performance of Marine Diesel Engine

LIN Hang^{1,2}, WANG Qiwei¹, CHEN Meiqian^{1,3}, 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 combustion and emission characteristics of different proportions of isoamyl alcohol-diesel mixed fuel in 4190Z_LC-2 marine medium speed diesel engine, the software of AVL_FIRE was used to establish a diesel engine combustion chamber model, and the accuracy of the simulation model was verified by the bench test. In the simulation software, the effect of mixed fuel on the combustion and emission performance of diesel engine was evaluated by adjusting the mixing ratio of isoamyl alcohol in diesel. The results show that mixing isoamyl alcohol is beneficial to altering the generation mechanism of NO, resulting in an increase in the amount of NO generated during the fast burning period and a decrease during the slow burning and post-burning processes. The overall amount of NO generated decreases. As the blending ratio of isoamyl alcohol increases, the final mass fraction of CO generation decreases, while the final mass fraction of Soot generation increases. The peak mass fraction of Soot generated at the same time decreases, and the oxidation rate increases during the slow burning period. Due to the faster oxygen consumption, the final generated Soot mass fraction is higher than that of pure diesel.

Keywords: marine diesel engine; isoamyl alcohol; combustion performance; emission performance; AVL_

[收稿日期] 2022-09-13

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2021J01849, 2022J01812); 福建省教育厅科技项目 (JAT210237)

[作者简介] 林航 (1995—), 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: 陈美谦 (1971—), 女, 副教授, 硕士, 从事船舶电气自动化及机电一体化研究。E-mail: 1395009265@163.com

0 引言

随着我国对一次能源需求的增长，煤炭的消费量下降，其他可再生能源呈现增长趋势^[1]。我国航运业的迅猛发展对石油资源的需求进一步增加，但自 2019 年起我国开始实施更为严格的沿海排放法规，这使得船用柴油机节能与减排逐步成为当前的热门研究方向^[2]。醇类作为燃料添加剂一直备受关注，不少研究都将其作为研究对象。如：胡登等^[3]通过丁醇和废气再循环（exhaust gas recirculation, EGR）率实现低温燃烧，将 EGR 率过高导致的燃烧不充分用丁醇进行弥补，实现醇类燃料与边界条件的多参数协调；宣熔等^[4]在柴油机燃料中掺烧甲醇，并与纯柴油进行对比发现，在燃烧特性上，缸内压力和温度均降低，在排放特性上，NO_x、Soot 含量降低，CO 含量上升；李莉^[5]研究发现，与柴油相比，含氧燃料可有效降低碳烟的生成，不同含氧燃料降低碳烟的效果不同，同时还发现，添加戊醇可降低燃料的密度、黏度、表面张力及沸点，提高其挥发性；Vinod 等^[6]研究发现，生物柴油掺混丁醇可以改善其黏度和蒸馏特性，从而达到改善混合燃烧的效果。

异戊醇作为醇类燃料具有良好的研究前景。鞍山市佳良能源技术开发有限公司发明清洁柴油技术和清洁柴油添加剂专利，该专利添加了异戊醇，其性能可以达到轻质柴油的各项指标，在柴油机、燃油锅炉等设备中能大幅降低排放中的各项指标^[7]。刘召震^[8]发现异戊醇和正庚烷在理化性质上互补，将正庚烷和异戊醇作为混合燃料研究其对 HCCI 燃烧与排放特性的影响，结果发现，在燃烧性能上，缸内峰值压力、压力升高率峰值、缸内峰值温度和瞬时放热率峰值均逐渐减小，峰值对应的相位逐渐向后移动，着火时刻和主燃烧时刻不断向后推迟，燃烧持续期不断变大，缸内峰值压力循环变动系数逐渐变大，燃烧稳定性变差；在排放性能上，NO_x 排放下降，CO 和 HC 排放先降后升。美国 Sandia 国家实验室^[9]发现，异戊醇作为压燃式燃料有良好的应用潜力，异戊醇在宽范围发动机速度下能保持较低的吸入温度或者较高的 EGR，并且异戊醇的中间温度热量释放量与汽油相似。

综上，在异戊醇作为柴油机燃料方面，大部分研究为异戊醇化学反应机理的仿真^[10-11]，没有运用相关软件进行柴油机燃烧室内的仿真模拟^[12]。因此，本文在仿真模拟柴油机燃烧室中掺烧异戊醇，得出燃烧与排放特性曲线，研究其变化规律，为改善柴油机燃烧、减少污染物排放提供模拟数据。

1 燃烧室仿真模型的建立与验证

本文以电控改造后的济南柴油机有限公司 4190Z₄C-2 型船舶中速柴油机为研究对象，其实验平台如图 1 所示。

1.1 燃烧室模型的建立

首先运用 CAD 软件绘制燃烧室中心界面二分之一的二维图像，如图 2 所示。将图 2 中的图像导入 AVL_FIRE 中的 ESE 模块进行网格划分，生成三维模型，如图 3 所示。为验证网格无关性，本文设置 5 种网格数目，分别为 12 331, 14 254, 15 805, 17 318, 18 272, 通过缸内平均有效压力进行比较，如表 1 所示。由表 1 可见，缸内平均有效压力随着网格数增加产生变化，在网格数大于 15 805 时，相对误差稳定在 1.8% 左右，故认为在网格数大于 15 805 时，网格数增加不影响仿真结果^[13]。为减少仿真计算时间，本文划分网格数为 15 805 进行仿真模拟。

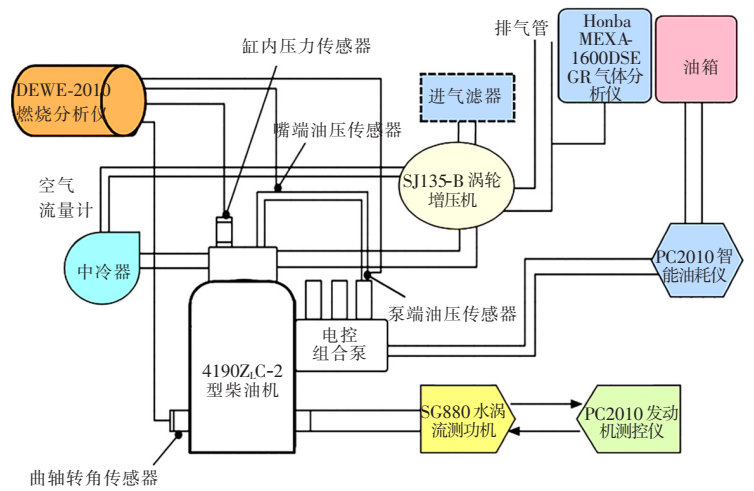


图 1 柴油机能测试台架装置的主要设备及系统
Fig.1 Main equipment and system of diesel engine performance test bench device

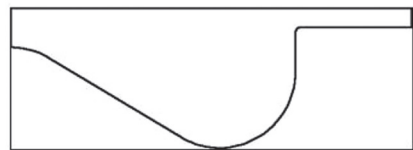


图2 燃烧室中心截面二分之一示意图
Fig.2 Half of the central section of the combustion chamber

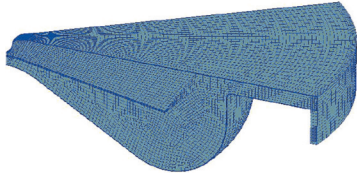


图3 柴油机燃烧室八分之一网络模型
Fig.3 One-eighth network model of diesel combustion chamber

表1 网格数量无关性验证表 Tab.1 Gridnumber independence verification table			
网格数量 (1/8 燃烧室)	平均有效 压力/MPa	相对 误差/%	
12 331	1.132	—	
14 254	1.174	3.58	
15 805	1.196	1.83	
17 318	1.218	1.81	
18 272	1.234	1.78	

进气阀关闭时刻和排气阀打开时刻的曲轴转角分别为 593.5°和上止点后 121°。在初始条件中,进气阀关闭时刻气体的压力和温度由整体模型仿真得到,分别为 0.193 MPa 和 335.15 K。湍动能和湍动能尺度分别为 18.375 m²/s²、0.006 15 m^[14]。本文选取的计算子模型包括:湍流流动模型选用 *k-ε* 模型,它具有模拟流动现象完善、收敛精度高且计算迅速的优点;液滴破碎模型选用 KH-RT 模型,它能形成不稳定的扰动波,相较于 WAVE 模型具有更加良好的破碎效果;因为柴油与异戊醇的蒸发速率不同,蒸发模型选用 Multi-component 模型;液滴碰壁模型选用 Walljet1 模型,该模型相较于其他模型具有喷射速度较高的优点;湍流扩散模型选用 Enable 模型,该模型湍流效果较优;燃烧模型选用 ECFM-3Z 模型,该模型是 GSM 联盟(集团科学动力公司)专门为柴油燃烧而开发的;NO_x排放模型选用 Extended Zeldovich 模型;碳烟排放模型选用 Frolov Kinetic 模型^[15]。

本文选取 Sarathy 等^[16]提出的由 187 种物质和 1 237 个反应组成的骨架机制作为异戊醇简化的化学反应的动力学机理,用于模拟异戊醇燃烧。

异戊醇掺混比部分为体积掺混比,其中:“I”代表异戊醇;“00”表示异戊醇掺混比为 0,即纯柴油;“25”表示 25% 异戊醇 + 75% 柴油,以此类推。

1.2 燃烧室模型的验证

在全负荷工况和纯柴油条件下进行台架实验测试并记录缸内平均压力曲线,同时将异戊醇机理中的异戊醇含量设置为 0 进行仿真实验,将测得的实际数据与仿真的结果进行对比,结果如图 4 所示。由图 4 可见,仿真值与实验值拟合较好,在缸压曲线方面,仿真值在最大爆发压力上与实验值偏差最大,偏差为 0.15 MPa,误差为 1.64%;在放热率曲线方面,仿真值在第一峰值上与实验值偏差最大,偏差为 0.503 1 J/(°),误差为 0.77%。两条曲线误差在 5% 以内,模型可靠有效,可以用于后续的掺烧异戊醇仿真研究^[17]。

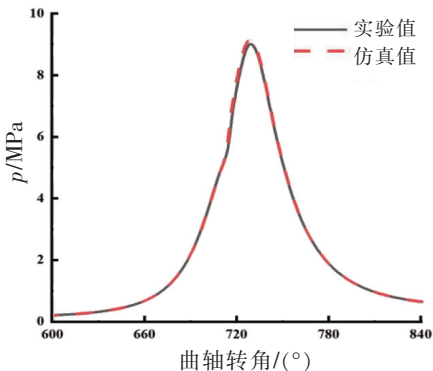


图4 缸压曲线实验值与仿真值对比
Fig.4 Comparison between experimental and simulated values of cylinder pressure curve

2 异戊醇不同掺混比对柴油机燃烧和排放特性的影响

2.1 对柴油机燃烧特性的影响

2.1.1 对缸内压力的影响

如图 5 所示,随着异戊醇掺混比的增加,缸内平均压力随之降低,着火点延迟,最大爆发压力对应的相位略有后移,从上止点后 9.5°延后到上止点后 10.7°。这是因为异戊醇的低热值为 35.37 MJ/kg,与柴油的 42.5 MJ/kg 相比较低,同时异戊醇的十六烷值比柴油的低,点火延时比纯柴油的长,随着异戊醇在燃油中的成分增加,混合燃料的热值也逐渐降低,燃烧过程中释放的热量也比纯柴油燃烧的有所下降,从而导致缸内平均压力下降,滞燃期延长,最大爆发压力下降,同时对应相位后移。

2.1.2 对缸内温度的影响

如图 6 所示，随着异戊醇掺混比的增加，缸内平均温度峰值由纯柴油的 1 598 K 下降到掺混比最大 40% 时的 1 463 K，降幅达到 8%。同时峰值对应的曲轴转角也由上止点后 20.1°推迟至上止点后 26.1°，这是由于异戊醇的热值低、汽化潜热高，造成了缸内平均温度的降低。

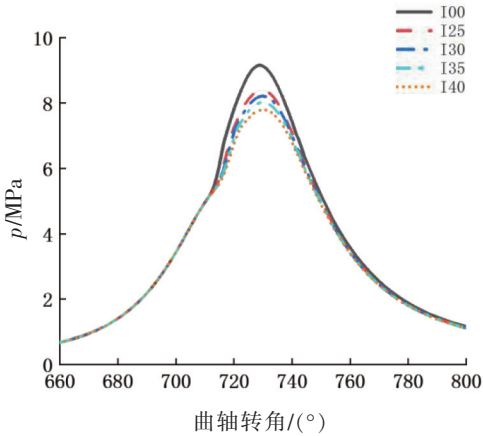


图 5 不同异戊醇掺混比下的缸内平均压力曲线
Fig.5 Average pressure curve of cylinder under different mixing ratio of isoamyl alcohol

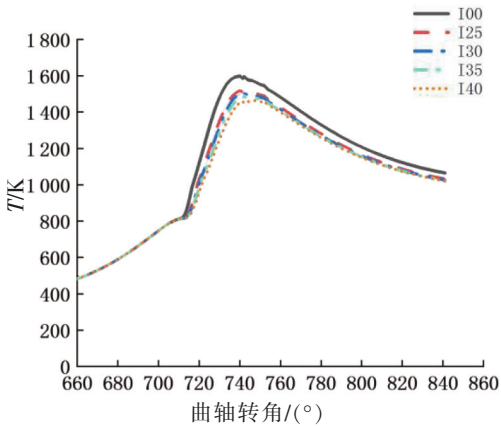


图 6 不同异戊醇掺混比下的缸内温度曲线
Fig.6 Temperature curve of cylinder under different mixing ratio of isoamyl alcohol

2.1.3 对放热率曲线的影响

如图 7 所示，随着异戊醇掺混比的增加，放热率曲线的第一峰值大大降低。同时异戊醇作为含氧燃料具有更高的层流火焰速度，这使得中期扩散燃烧部分增强，燃烧速度加快，并在 740°附近出现了小幅波动。

2.2 对柴油机排放特性的影响

2.2.1 对 NO 排放的影响

柴油机排放的氮氧化物主要是 NO，柴油机燃烧过程中燃烧压力高、温度高、燃烧速度慢、燃气中氧元素高是 NO 排放量高的原因。如图 8 所示，随着混合燃料中异戊醇掺混比的增加，NO 质量分数逐渐下降，相比于纯柴油燃烧时生成的 NO 质量分数，在 25%、30%、35%、40% 异戊醇掺混比下生成的 NO 质量分数分别降低了 21.9%、27%、30.4%、34.9%。NO 质量分数降低的主要原因是缸内温度的降低。由不同异戊醇掺混比下的缸内温度曲线可知，随着异戊醇的加入，它的低热值和较高的汽化潜热导致气缸内的温度逐渐降低，同时异戊醇的传播火焰速度快，可以加快燃烧速度，减少 NO 的排放。

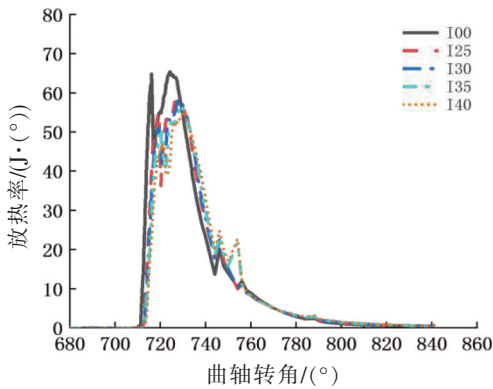


图 7 不同异戊醇掺混比下的放热率曲线
Fig.7 Heat release rate curve under different isoamyl alcohol mixing ratio

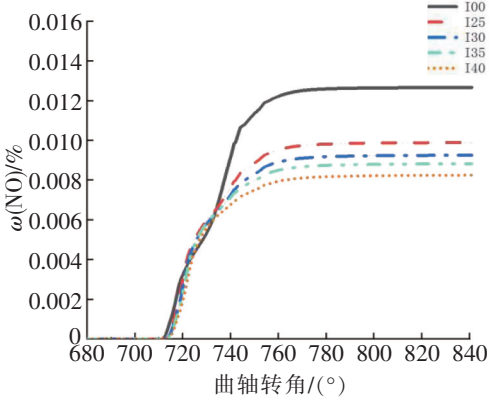


图 8 不同异戊醇掺混比下的 NO 质量分数曲线
Fig.8 Curve of NO mass fraction under different mixing ratio of isoamyl alcohol

2.2.2 对 CO 排放的影响

CO 是烃基燃料不完全燃烧的产物,形成的条件是缺氧或温度过低。如图 9 所示,随着异戊醇掺混比的逐渐增加,CO 生成质量分数曲线整体后移,峰值增大且对应的曲轴转角不断延后,但最终的 CO 生成质量分数却逐渐降低。结合放热率曲线可以发现,相比于纯柴油,掺入异戊醇以后,着火延时增加,生成 CO 时间延迟;缸内平均温度降低,CO 生成质量分数的峰值上升;燃料掺混异戊醇后,中期扩散燃烧加强,燃烧充分,降低了最后的 CO 生成质量分数。掺混异戊醇前后的后期燃烧放热率曲线一致,故对于生成 CO 没有太大影响。

2.2.3 对 Soot 排放的影响

Soot 主要是在扩散火焰中和烃类燃料燃烧过程中因为局部高温、缺氧而生成的。如图 10 所示,Soot 生成质量分数峰值随着异戊醇掺混比增加而下降,但最终的 Soot 生成量随着掺混比的增加而升高。对比图 7 可知,Soot 生成的峰值出现在扩散燃烧阶段,随着掺混比的增加,滞燃期延长,扩散燃烧过程缩短,温度的降低能有效缓解 Soot 的生成,从而在 720°左右,随着掺混比的增加,Soot 生成量减少。掺混比的增加导致滞燃期延长,大量油气在急燃期燃烧,进而在 780°时反应区域油气质量减小,机尾燃烧反应不充分致使温度下降,从而降低了 Soot 氧化速率,使得 Soot 质量分数升高。

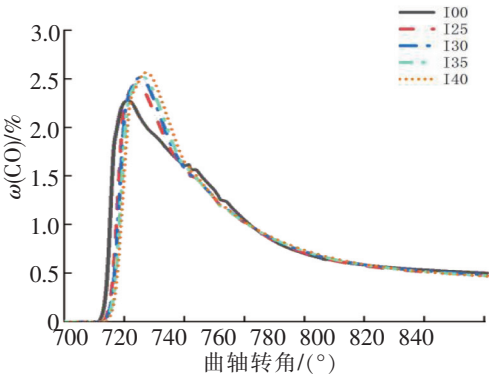


图 9 不同异戊醇掺混比下的 CO 质量分数曲线
Fig.9 Curve of CO mass fraction under different mixing ratio of isoamyl alcohol

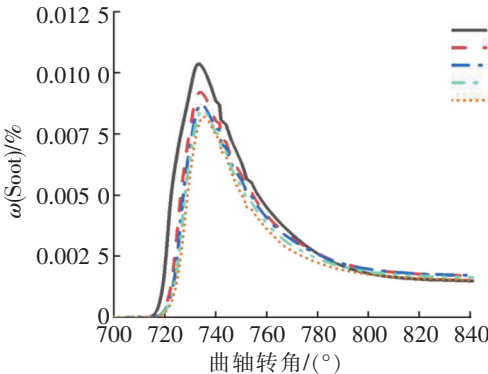


图 10 不同异戊醇掺混比下的 Soot 质量分数曲线
Fig.10 Curve of Soot mass fraction under different mixing ratio of isoamyl alcohol

2.2.4 NO 的生成规律

图 11~12 中,点 1 到点 2 为第 I 阶段,对应滞燃期,是柴油机喷油始点至累积放热率曲线始点;点 2 到点 3 为第 II 阶段,对应速燃期,是柴油机累积放热率曲线始点至缸内最大爆发压力点;点 3 到点 4 为第 III 阶段,对应缓燃期,是柴油机的缸内最大爆发压力点至缸内温度曲线峰值对应的曲轴转角处;点 4 之后为第 IV 阶段,对应后燃期,点 4 位置燃料燃烧达到 78%。

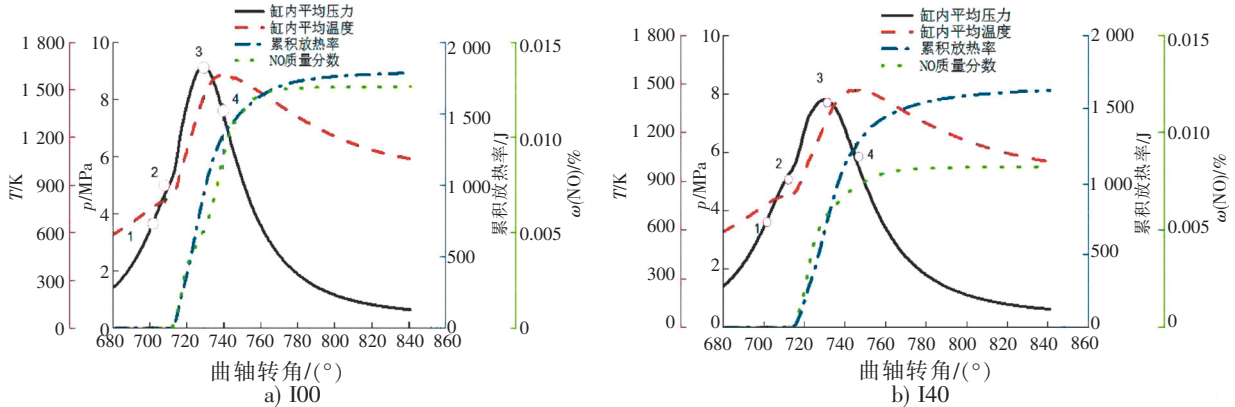


图 11 不同掺混比下的缸内平均压力、温度、累积放热率和 NO 质量分数的变化
Fig.11 Changes of the average pressure, temperatue, commulative heat release rate and NO mass fraction of cylinder under different mixing ratio

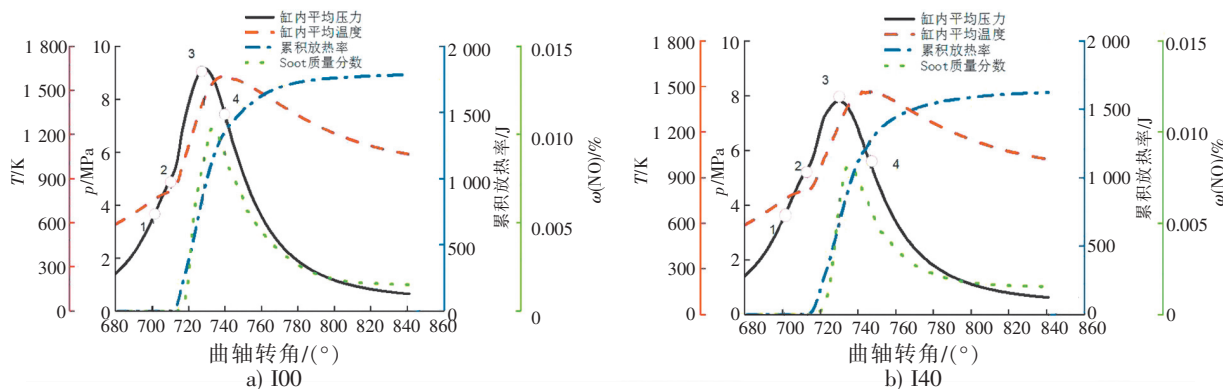


图 12 不同掺混比下的缸内平均压力、温度、累积放热率和 Soot 质量分数的变化

Fig.12 Changes of the average pressure, temperature, cumulative heat release rate and Soot mass fraction of cylinder under different mixing ratio

由图 11 中直线之间的间隔可以看出,掺混异戊醇燃烧后,滞燃期增大,速燃期略微减小,缓燃期增大,后燃期减小。以点 3 位置直线为切线,纯柴油下,缸内压力为 9.15 MPa,缸内温度为 1 449.9 K,生成的 NO 质量分数为 0.005 09%,占最终生成的 NO 的 40.19%;I40 条件下,缸内压力为 7.79 MPa,缸内温度为 1 250.46 K,生成的 NO 质量分数为 0.005 6%,占最终生成的 NO 的 67.88%。NO 在生成的量上略微增加,这是因为掺混异戊醇后,点 3 对应的曲轴转角延迟了 1.2°,故生成 NO 的时间延长,对应的生成量增加。从占比上来看,纯柴油掺混异戊醇后会增加在速燃期生成 NO 质量分数占比。以点 4 位置直线作为切线,纯柴油下,缸内压力为 7.41 MPa,缸内温度为 1 597.78 K,生成的 NO 质量分数比点 3 增加了 0.004 07%,占最终生成的 NO 的 32.14%;I40 条件下,缸内压力为 5.6 MPa,缸内温度为 1 463.57 K,生成的 NO 质量分数比点 3 增加了 0.001 67%,占最终生成的 NO 的 20.24%。从生成量上来看,缓燃期生成的 NO 质量分数比速燃期少,同时,掺混异戊醇后能有效抑制缓燃期生成的 NO 质量分数。点 4 之后的部分,纯柴油下,生成的 NO 质量分数占比为 27.67%,而 I40 条件下生成的 NO 质量分数占比为 11.88%。

综上,掺混异戊醇有助于改变 NO 的生成规律,使 NO 在速燃期的生成量上升,在缓燃期与后燃期的生成量减少。同时,总体生成的 NO 质量分数降低。

2.2.5 Soot 的生成规律

由图 12 可知,以点 3 位置为切线,纯柴油下,生成的 Soot 质量分数为 0.008 75%,占其峰值的 84.36%;I40 条件下,生成的 Soot 质量分数为 0.005 96%,占其峰值的 72.68%。纯柴油掺混异戊醇后,在速燃期 Soot 生成的量减少,从占比上来看,掺混异戊醇后会减少在速燃期生成 Soot 质量分数占比。以点 4 位置为切线,纯柴油下,生成的 Soot 质量分数为 0.008 84%,占其峰值的 85.23%;I40 条件下,生成的 Soot 质量分数为 0.005 94%,占其峰值的 72.44%。从生成量上来看,缓燃期生成的 Soot 质量分数先上升到峰值而后氧化减少了,对比纯柴油与 I40 可以发现,柴油掺混异戊醇后可以在缓燃期更快地氧化 Soot,降低其质量分数。点 4 之后的部分,纯柴油下,最终生成的 Soot 质量分数为 0.001 49%,而 I40 条件下最终生成的 Soot 质量分数为 0.001 53%。

综上,掺混异戊醇后,生成的 Soot 质量分数峰值降低,在缓燃期的氧化速率增快,并因为较快的耗氧量使得最终生成的 Soot 质量分数比纯柴油的高。

3 结论

与燃用纯柴油相比,在柴油机燃料中掺混异戊醇形成混合燃料,能改善柴油机燃烧和污染物排放情况。根据以上分析,可以得到:

1) 柴油机混合燃料中添加异戊醇会降低缸内平均压力,随着掺混比的上升,缸内最大爆发压力

逐渐降低,同时缸内平均温度降低。

2) 掺混异戊醇后,NO 排放量随着掺混比上升而下降,与纯柴油相比,在 40% 掺混比下,NO 生成质量分数降低了 34.9%。同时,掺混异戊醇有助于改变 NO 的生成规律,使 NO 在速燃期的生成量上升,在缓燃期与后燃期的生成量减少,并且总体生成的 NO 质量分数降低。

3) 随着异戊醇掺混比上升,CO 最终生成质量分数下降,Soot 最终生成质量分数上升。同时生成的 Soot 质量分数峰值降低,在缓燃期的氧化速率增快,并因为较快的耗氧量使得最终生成的 Soot 质量分数比纯柴油的高。

[参 考 文 献]

- [1] 碧辟(中国)投资有限公司. BP 世界能源展望(2021 版)[EB/OL]. (2021-07-08)[2022-08-01]. https://www.bp.com/zh_cn/china/home/news/reports/statistical-review-2021.html.
- [2] 高占斌,张天野. 船舶柴油机[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2022.
- [3] 胡登,邓涛,黄加亮,等. 4190 型柴油机掺烧丁醇低温燃烧特性[J]. 集美大学学报(自然科学版),2019,24(6):449-456.
- [4] 宣熔,牛梦达,李品芳,等. 掺烧甲醇对船舶柴油机性能的影响[J]. 舰船科学技术,2020,42(21):101-104.
- [5] 李莉. 基于生物柴油和戊醇的燃料设计及其燃烧和排放特性研究[D]. 北京:清华大学,2016.
- [6] VINOD B M,MADHU M K,AMBA P R G. Butanol and pentanol:the promising biofuels for CI engines;a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,78:1068-1088.
- [7] 鞍山市佳良能源技术开发有限公司. 清洁柴油添加剂;200710158709.4[P]. 2008-05-14.
- [8] 刘召震. 正庚烷/异戊醇混合燃料 HCCI 燃烧与排放特性研究[D]. 西安:长安大学,2018.
- [9] 《精细石油化工进展》编辑部. 美国 Sandia 实验室发现异戊醇用作压燃式燃料具有很好潜力[J]. 精细石油化工进展,2011,12(4):52.
- [10] 李倩倩. 戊醇同分异构体燃料层流燃烧特性及化学反应动力学研究[D]. 西安:西安交通大学,2017.
- [11] 曹创创. 异戊醇热解动力学及戊醇燃料同分异构体效应研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2018.
- [12] HUANG Z X,HUANG J L,LUO J B,et al. Performance enhancement and emission reduction of a diesel engine fueled with different biodiesel-diesel blending fuel based on the multi-parameter optimization theory[J]. Fuel,2022(314):122753.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] SARATHY S M,PARK S W,WEBER B W,et al. A comprehensive experimental and modeling study of iso-pentanol combustion[J]. Combust Flame,2013,160(12):2712-2728.
- [17] 杨晨曦,才正,林航,等. 掺烧不同比例乙醚对船用柴油机燃烧和排放性能的影响[J]. 集美大学学报(自然科学版),2023,28(6):534-540.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)