

双燃料发动机低温燃烧排放性能仿真

牛梦达¹, 宣熔¹, 陈美谦^{1,2}, 胡登¹, 范金宇^{1,2}, 黄加亮^{1,2}

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

[摘要] 为缓解船用发动机 NO_x 排放过高问题, 提出柴油掺烧丁醇并结合 EGR (exhaust gas recirculation) 技术的试验方案。在 4190ZLC-2 型柴油机台架基础上, 利用 AVL_FIRE 软件建立柴油-丁醇 CFD 模型。设置丁醇掺混比 0%、10%、20%、30% 4 组变量, EGR 利用率 0%、7.5%、10.0%、12.5%、15.0%、17.5% 6 组变量, 对发动机 NO、碳烟 (Soot) 和 CO 生成及排放质量分数进行分析。结果表明: 掺烧丁醇并结合 EGR 能够实现发动机的低温燃烧, 减少 CO 和碳烟的生成, 且显著降低 NO 排放。当丁醇掺混比为 B20、EGR 利用率 12.5% 组合时, NO 排放比原机降低 58.97%, Soot 生成质量峰值比原机降低 37.5%, CO 排放比原机降低 23.53%。研究结果可为船用柴油机采用柴油/丁醇/EGR 低温燃烧提供一定的指导依据。

[关键词] 双燃料发动机; 废气再循环; 柴油-丁醇混合燃料; 低温燃烧; 排放特性

[中图分类号] U 677.2

Simulation of Low-Temperature Combustion Emission Performance of Dual-Fuel Engine

NIU Mengda¹, XUAN Rong¹, CHEN Meiqian^{1,2}, HU Deng¹, FAN Jinyu^{1,2}, HUANG Jialiang^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to alleviate the problem of excessive NO_x emission from Marine engine, a test scheme of diesel mixed with butanol combined with EGR technology was put forward. On the basis of 4190ZLC-2 diesel engine bench, the CFD model of diesel-butanol was established by AVL_FIRE software. Four groups of variables of butanol mixing ratio 0%, 10%, 20% and 30% were set, and EGR utilization ratio 0%, 7.5%, 10.0%, 12.5%, 15.0% and 17.5% were set. The generation of NO, Soot and CO and emission mass fraction of engine were analyzed. The results show that the combination of butanol and EGR can achieve lower temperature combustion, reduce the generation of CO and Soot, and significantly reduce NO emission. When the butanol mixing ratio is B20 and EGR utilization ratio is 12.5%, the NO emission, peak quality of Soot and CO emission are 58.97%, 37.5% and 23.53% lower than the original. The research results can provide some guidance for lower temperature combustion of diesel/butanol/EGR for Marine diesel engines.

Keywords: dual-fuel engine; EGR; diesel-butanol mixed fuel; low temperature combustion; emission characteristics

[收稿日期] 2020-06-22

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (2020J01690)

[作者简介] 牛梦达 (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。

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

0 引言

目前国际海事组织 (IMO) 制定了更为严格的排放法规^[1], 促使柴油机朝着更加节能的方向发展^[2]。丁醇作为第二代新型生物燃料相较于传统石油更容易实现清洁燃烧。但单纯的掺烧丁醇无法满足 IMO Tier III 排放法规, 国内外许多专家学者在燃料-丁醇燃烧研究基础上, 通过改变柴油机运行参数进而达到改善排放的效果。Juan^[3]在恒定体积容器中研究不同初始温度和不同丁醇掺混比对燃烧和排放性能的影响; 研究表明, 柴油掺烧较高比例的正丁醇可以有效降低 NO_x 排放, 掺混比超过 50% 会降低燃烧温度, 适当提高初始温度可以有效改善燃烧状况, 但相应 NO_x 排放会出现不同程度的恶化, 而废气再循环 (exhaust gas recirculation, EGR) 能够有效实现缸内低温燃烧, 进而达到降低 NO_x 排放的效果。祖向欢^[4]在 TBD234V12 型相继增压柴油机上, 通过搭建高压废气再循环系统, 实现 EGR 对柴油机燃烧和排放性能分析; 研究表明, 在低负荷较小 EGR 利用率及高负荷高 EGR 利用率条件下, 能够在不影响柴油机运行基础上实现低温燃烧, 较高的 EGR 利用率可以实现 Tier III 排放标准, 但同时动力性能极大地降低。郑尊清^[5]在一台柴油机试验台架上掺混不同比例的汽油、柴油、丁醇混合燃料, 结合较高 EGR 利用率, 研究不同喷油正时和喷油压力对缸内燃烧和排放的影响; 研究表明, 丁醇有较好的挥发性, 能够有效改善油气混合, 同时能有效改善碳烟、CO 等的排放, 但因汽油和丁醇热值过低, 以及较高的 EGR 利用率会造成缸内燃烧恶化。由此得知, 单纯的改变丁醇掺混比或者 EGR 利用率, 在达到既定目标的同时, 伴随着燃烧性能的恶化。本文通过 AVL_FIRE 软件, 在 4190 Z_LC-2 型中速柴油机试验平台上, 构建仿真模型, 通过改变丁醇掺混比例, 结合低 EGR 利用率, 在保证缸内燃烧质量的同时, 实现柴油机 NO_x 、碳烟及 CO 排放优化。

1 研究对象和方法

1.1 研究对象和模型建立

本文以电控改造后的 4190 Z_LC-2 型柴油机为研究对象, 其试验台装置的主要设备及系统如图 1 所示。

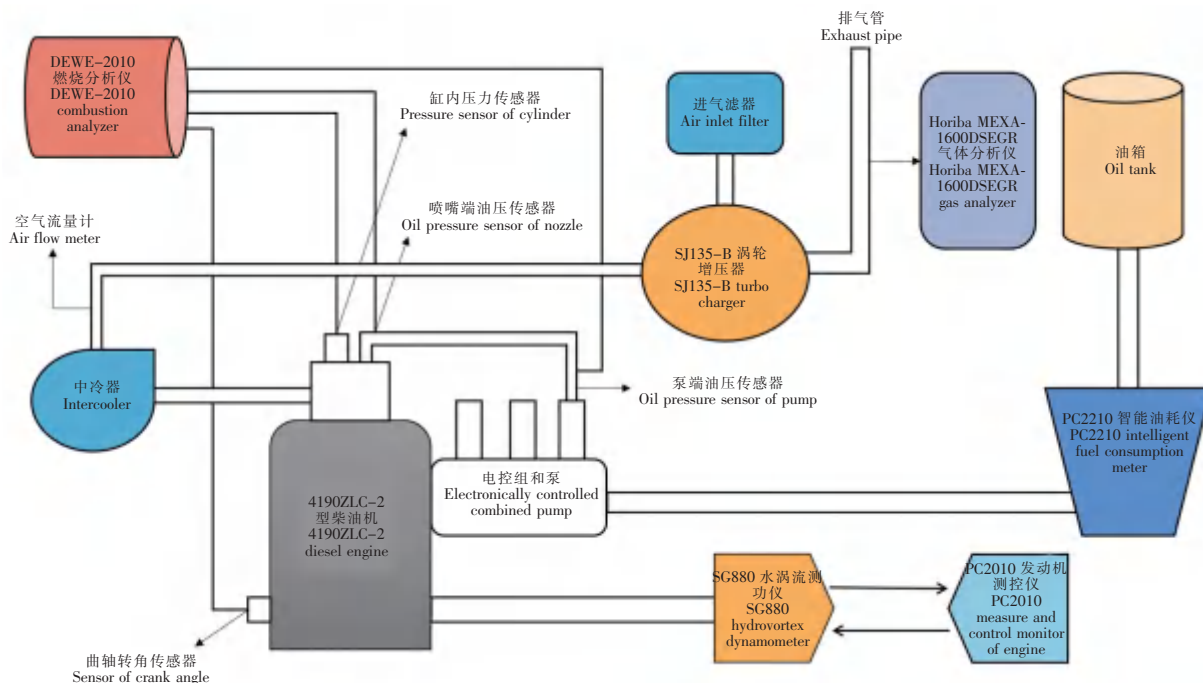


图 1 柴油机性能测试台架装置示意图

Fig.1 Diesel engine performance test bench device diagram

首先, 运用 CAD 绘制燃烧室纵剖 1/2 截面图, 如图 2 所示。导入 ESE DIESEL 模块, 进行网格划分。由于模型中忽略了进排气阀对燃烧室容积影响, 为确保压缩比保持不变, 以模型为参照对象, 增

加补偿容积, 使用 FIRE 软件进行网格划分, 生成三维模型如图 3 所示。选择合适的计算模型, 研究柴油机在不同 EGR 利用率条件下, 掺烧不同比例丁醇时, 柴油机的排放性能。

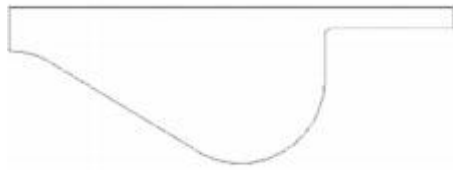


图 2 燃烧室中心 1/2 截面示意图

Fig.2 1/2 diagram of combustor center section

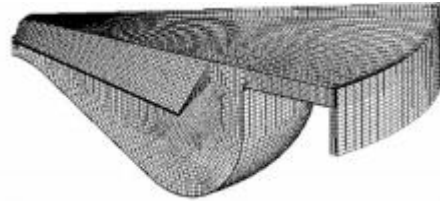


图 3 柴油机燃烧室 1/8 计算模型

Fig.3 One-eighth calculation model for the diesel combustion chamber

1.2 发动机主要技术参数

4190 Z_LC-2 型柴油机燃烧室为半开式 ω 型, 发火顺序为 1-3-4-2, 双气道, 其基本参数如表 1 所示。边界条件参数的设置主要取决于柴油机初始运行时模型各个部件的温度, 通过 AVL_ BOOST 构建整机一维模型, 并通过计算得到边界数据。

表 1 柴油机基本性能指标

Tab.1 Basic performance indexes of the diesel engine

缸数 Number of cylinders /个	涡前排温 Temperature front turbocharger discharge/℃	总排量 Total displacement /L	标定功率 Calibraten power /kW	标定转速 Calibraten speed/ (r · min ⁻¹)	壁温 Wall temperature /℃	缸盖温度 Temperature of cylinders head /℃	湍流长度 尺度 Turbulence length scale /m	喷油持续期 Fuel injection duration /(°)	缸径 × 行程 Bore diameter · stroke/ (mm × mm ⁻¹)
4 缸	≤600	23.82	220	1 000	403.15	542.25	0.006 24	29.4	190 × 210
标定扭矩 Calibraten torque/ (N · m ⁻¹)	压缩比 Compression rate	平均有效压力 Average effective pressure /(MPa)	活塞温度 Piston temperature /℃	湍动能 Turbulent energy /(m · s ⁻¹) ²	1/8 喷油量 One-eighth of fuel injection/g	进气阀关闭 角 Inlet valve closing angle/(°)			
2 100	14:1	1.147	631.25	18.375	0.049 35	593.5			

湍动能计算公式为: $e_{TKE} = 3u^2/2$; $u = 0.5 \cdot C_m$; $C_m = 2hn/60$ 。式中: n 为转速 (r/min); C_m 为活塞平均速度 (m/s); h 为行程 (m); u 为湍流脉动速度 (m/s)。

1/8 喷油量 $m = [b_e p_e / (120n_i)] \tau$ 。式中: b_e 为标定功率点燃油消耗率; p_e 为标定功率; τ 为柴油机冲程数; n 为标定转速; i 为柴油机气缸数。

1.3 选择计算子模型

在丁醇-柴油双燃料燃烧模型的基础上, 建立子模型, 具体如下: 选用 $k-\varepsilon$ 型湍流流动模型模拟流动现象; 在喷雾模型中, 液滴破碎模型选用多喷孔喷油器的 KH-RT 模型, 使计算结果更加可靠; 扩散模型选用 Enab-le 模型来解释气相脉冲速度; 选用射流 Walljet1 模型作为液滴碰壁模型; 蒸发模型选用软件推荐的 Multi-component 模型; 排放模型选用与化学反应动力学燃烧模型相对应的 Zeldovich 模型。

1.4 模型验证

在额定工况下, 基于 AVL_ FIRE 求解器成分中设置缸内的正丁醇 ($C_4H_{10}O$) 的质量分数为 0, 在全负荷工况下, 将柴油机仿真模型所测得的缸压曲线与原机实测得的缸压曲线进行对比, 不断调整相关参数, 直至两条曲线误差在 5% 以内, 如图 4 所示。试验和仿真的放热率曲线也基本重合, 可用于仿真计算。其中纯柴油原机试验值与仿真值误差较低, 但仿真值缸压峰值和放

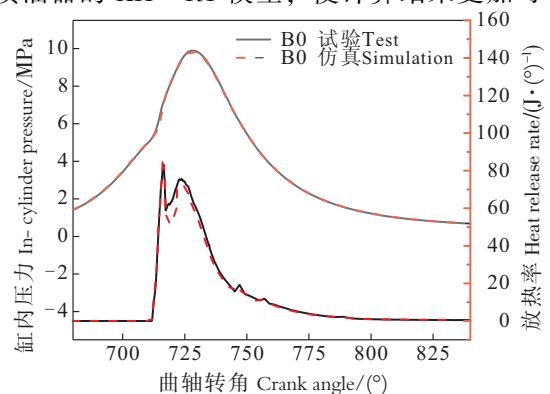


图 4 缸压曲线仿真值与试验值对比

Fig.4 The simulation value of cylinder pressure curve compare with the test value

热率峰值均低于试验值,放热率误差最高 2.16%。主要原因为:仿真模型中使用正庚烷反应机理代替柴油参与燃烧,而正庚烷热值略低于柴油,因此放热率和缸压均有略微降低。

2 对发动机排放的影响

设置丁醇质量掺混比为 0 (B_0)、10% (B_{10})、20% (B_{20})、30% (B_{30}) 4 组变量;EGR 利用率为柴油机进、排气中 CO_2 浓度的比值^[6],本文设置 0%, 7.5%, 10.0%, 12.5%, 15.0%, 17.5% 6 组变量。

2.1 NO 排放

图 5 为缸内平均燃烧温度曲线图。缸内燃烧温度对柴油机 NO_x 、Soot 和 CO 生成有着重要影响,尤其是 NO_x 生成过程中,高温对 N 元素的氧化起着决定作用,因此分析 EGR 利用率和丁醇掺混比对温度变化的影响具有十分重要的意义。从图 5 中可以看出,随着 EGR 利用率的增加,缸内平均温度下降,当 EGR 利用率为 12.5% 时缸内平均温度峰值从 1 800 K 降到 1 600 K,基本实现了低温燃烧。随着惰性气体的增加,比热容增大,氧气被稀释,滞燃期延长,导致混合燃料在低温、缺氧环境下燃烧不完全,因此缸内温度出现明显下降状况。但由于氧含量的增加促进了缸内燃烧,弥补了燃料热值的不足,因此丁醇掺混比的增加对温度整体影响较小。

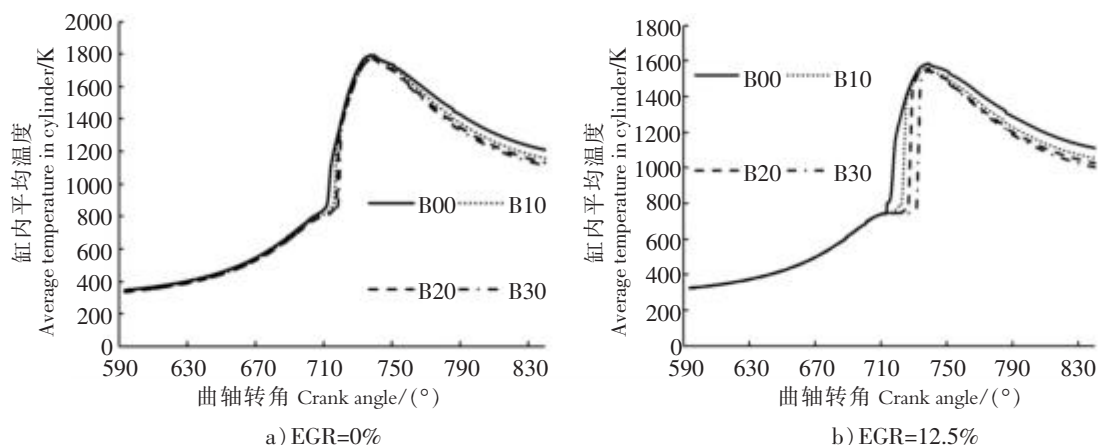


图 5 缸内平均燃烧温度

Fig.5 Average combustion temperature in the cylinder

图 6 为不同 EGR 利用率和丁醇掺混比下 NO 生成质量分数曲线图。从图 6 中可以看出,在 EGR 利用率较低时,NO 排放质量分数随着丁醇掺混比的增加而增大,但整体变化范围不明显。其中,在曲轴转角低于 738° 时,因掺混比增加导致的滞燃期延长,温度下降,造成 NO 排放降低。而在较高 EGR 利用率范围内,随着丁醇掺混比的增加,NO 排放质量分数整体呈先升高后降低趋势,且变化幅度有扩大趋势。在丁醇掺混比不变的条件下,随着 EGR 利用率的增加,NO 排放质量分数明显降低。其中: B_0 、EGR 利用率 17.5% 组合对应 NO 排放比原机组合下降 64.12%;在 EGR 利用率大于 12.5%、丁醇掺混比超过 20% 时,NO 排放质量分数下降幅度减小; B_{20} 、EGR 利用率为 12.5% 组合 NO 排放质量分数比原机减小 58.97%。由于丁醇汽化潜热远大于柴油,随着掺混比的增加,在 EGR 利用率为 15.0%、 B_{30} 以及 EGR 利用率为 17.5%、 B_{20} 和 EGR 利用率为 17.5%、 B_{30} 组合出现失火现象。

由图 7 可知,在较低 EGR 利用率范围内,由于缸内进气空气氧含量较为充足,以及丁醇氧元素含量较高,因而燃料能够实现充足燃烧,缸内温度仍然保持较高水平,满足 NO 高温富氧的生成环境;在较高 EGR 利用率范围内,由于缸内初始氧含量急剧下降,此时丁醇中含氧量成为影响缸内燃烧效果的决定因素,同时丁醇的汽化潜热远高于柴油,达到着火点时需要吸收更多的热量,因而使得滞燃期延长,NO 生成时刻滞后。

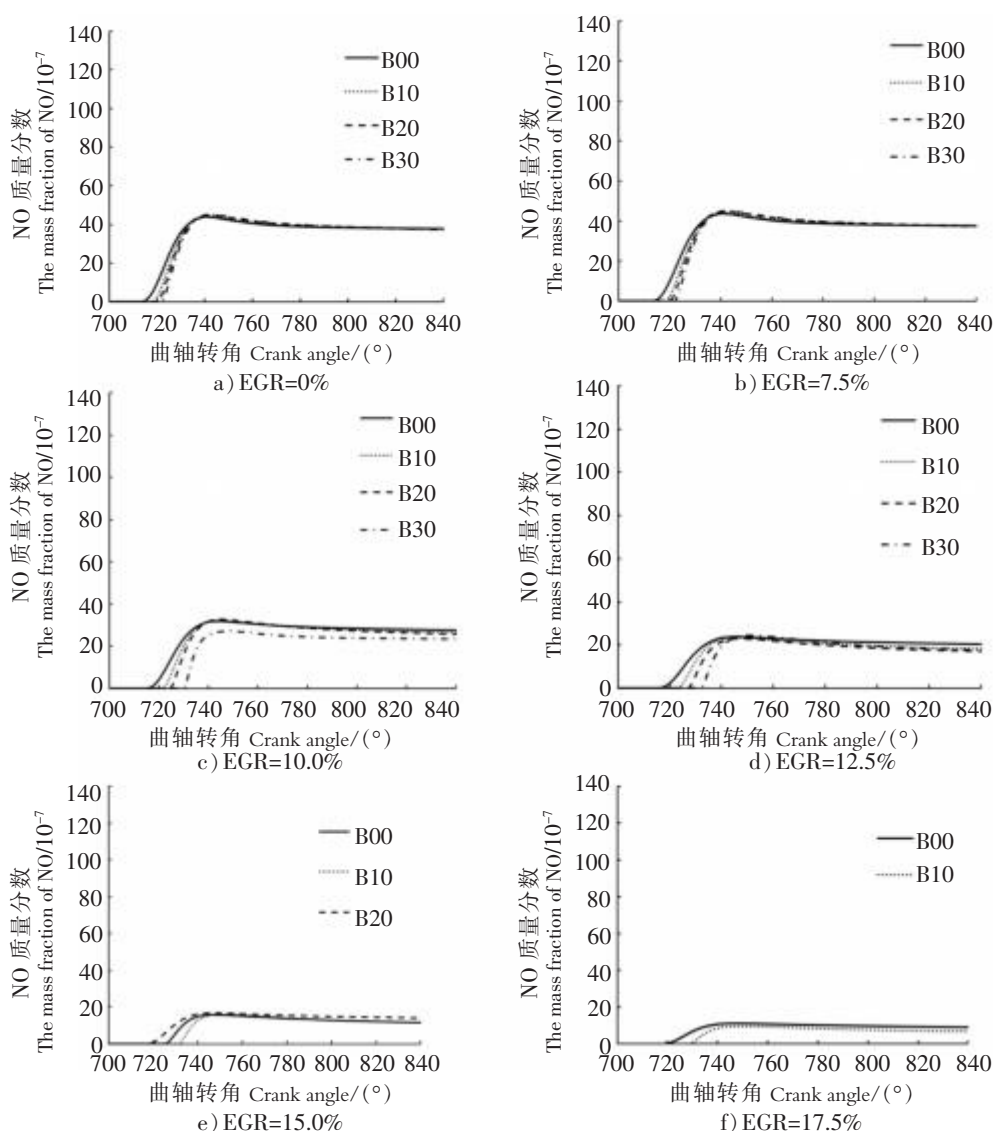


图6 丁醇掺混比例和 EGR 利用率对 NO 排放的影响

Fig.6 Effects of butanol mixing ratio and EGR ratio on NO emission

2.2 Soot 排放

碳烟 (Soot) 的排放是检验柴油机排放性能的标准之一。A4 消耗量是指碳烟前驱物 (A4) 转化为 Soot 所消耗的量, 由于 A4 占比较大, 起主要作用, 因此 Soot 排放变化趋势用碳烟前驱物 (A4) 表示^[7-8]。图 8 为不同 EGR 利用率和丁醇掺混比对应 A4 生成和消耗质量分数曲线图。由图 8 可知, 在 EGR 利用率不变的条件下, 碳烟前驱物 A4 的生成和消耗质量分数随着丁醇掺混比的增加而逐渐降低, 在掺混比超过 20% 时, 低 EGR 利用率对应 A4 下降趋势几乎保持不变, 而较高 EGR 利用率对应 A4 趋势仍持续下降。A4 主要在预混燃烧阶段生成, 丁醇掺混比例的增加会使滞燃期延长, 油气充分混合, 燃烧获得有效改善, 减少了 A4 的生成量。由图 5 可知, 缸内温度随丁醇掺混比变化不大, 但含氧

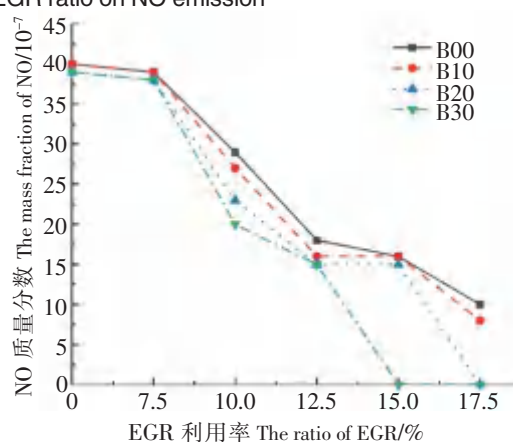


图7 EGR 利用率对不同丁醇掺混比例时 NO 生成量的影响

Fig.7 Effect of EGR on NO production at different butanol mixing ratio

量的增加提高了混合气体的氧含量,从而使 A4 消耗量增高,减少了 A4 的生成量。

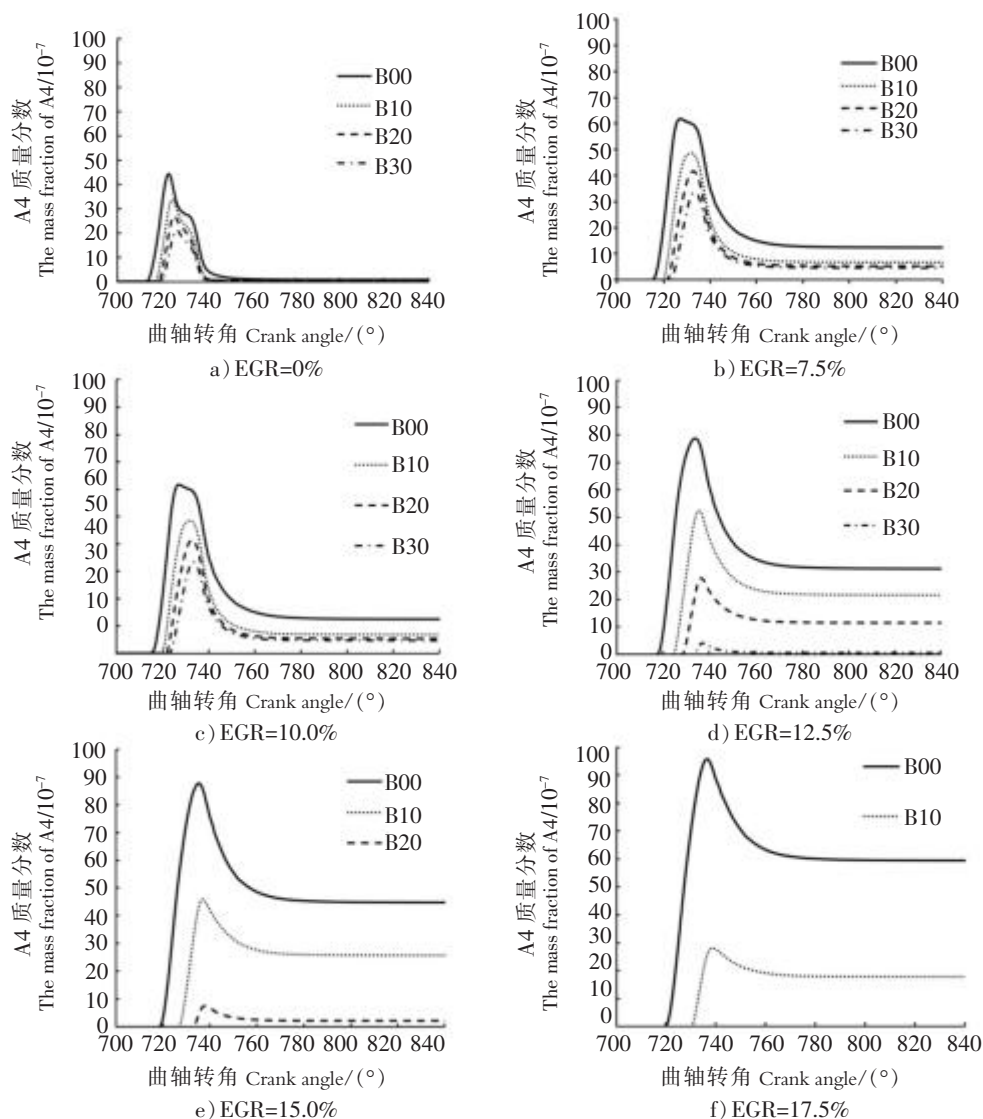


图 8 丁醇掺混比例和 EGR 利用率对 A4 生成质量分数的影响

Fig.8 The influence of butanol blending ratio and EGR ratio on A4 production mass fraction

由图 9 可知,在掺混比不变的条件下,随着 EGR 利用率的增加,A4 生成质量分数逐渐增大,在 EGR 利用率高于 12.5% 时,A4 质量分数有进一步上升趋势,与之相反,在 EGR 利用率大于 12.5% 时,A4 转化为 Soot 消耗量急剧下降。B20、EGR 利用率为 12.5% 时对应 A4 生成峰值质量分数比原机下降 37.5%。在较低丁醇掺混比下,随着 EGR 利用率的增加,缸内氧浓度逐步降低,燃烧恶化,A4 生成质量增加;在较高丁醇掺混比、高 EGR 利用率下,双燃料滞燃期延长,使燃料与空气能够较为充分混合,A4 生成量减少。另由图 9 可知,在低掺混比下,A4 消耗率下降趋势不明显,燃料的不充分燃烧有利于 Soot 的生成。在 EGR 利

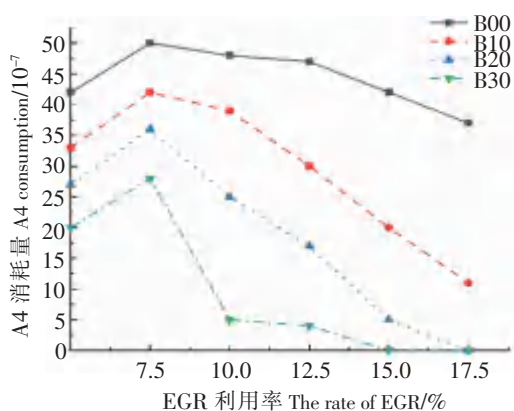


图 9 EGR 使用率对不同丁醇掺混比例时 A4 消耗质量分数的影响

Fig.9 Effect of EGR utilization rate on mass fraction of A4 consumed in different butanol blending ratio

用率为 0% ~ 12.5% 时, A4 消耗量先升高后降低, 整体变化趋势同温度变化相吻合; 在 EGR 利用率高于 12.5% 时, 图像呈下降趋势。主要原因为, 随着 EGR 利用率的增加, 缸内氧含量过低, 燃烧不充分, 导致温度过低^[9-10]。

2.3 CO 排放

图 10 为丁醇掺混比和 EGR 利用率对 CO 生成质量分数的影响曲线图。由图 10 可知, 在同一 EGR 利用率下, 随着丁醇掺混比的增加, CO 生成质量分数逐渐降低, 初始生成时刻向后延长, 在掺混比高于 20% 条件下, 下降幅度逐渐减缓; 正丁醇十六烷值含量远低于柴油, 同时丁醇的汽化潜热过高导致滞燃期延长, 有助于燃料与空气充分混合燃烧, 使得 CO 生成量降低。但丁醇热值较低, 随着丁醇掺混比的增加, 缸内最高温度呈下降趋势, 高温持续时间缩短, CO 生成量理应增加; 而从图 10 不难发现, 不同掺混比对应缸内平均温差很小, 随着掺混比的增加, 丁醇因为有其更高的氧含量, 有助于燃料更加充分地燃烧, CO 在富氧环境被氧化为 CO_2 。

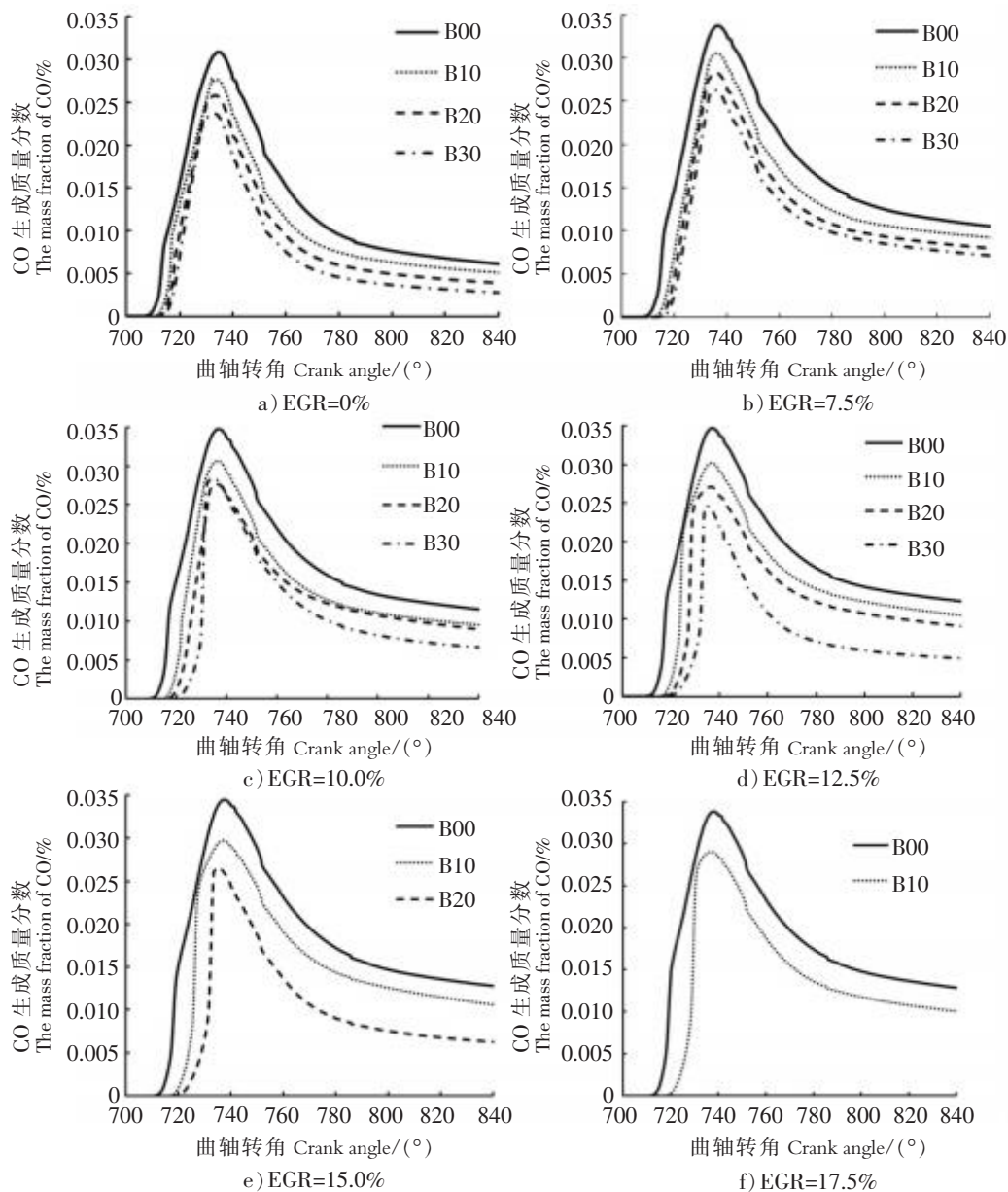


图 10 丁醇掺混比例和 EGR 利用率对 CO 生成质量分数的影响

Fig.10 Effects of butanol mixing ratio and EGR ratio on the Mass fraction of CO

由图 11 可知,在较低丁醇掺混比下,随着 EGR 利用率的增加,CO 生成质量分数呈先明显上升而后逐渐平稳趋势;在高丁醇掺混比下,随着 EGR 利用率的增加,CO 生成质量分数有明显下降趋势。B20、EGR 利用率 12.5% 组合对应 CO 排出质量分数比原机降低 23.53%。EGR 利用率的增加,导致缸内惰性气体增加,造成比热容增大,进气中的氧浓度进一步降低,为 CO 创造了良好的生成环境;同时,随着 EGR 利用率的增加,空燃比明显减小,缸内燃烧性能恶化,B0、EGR 利用率 17.5% 组合比 B0、EGR 利用率 0% 组合缸内温度降低 200 K 以上,低温环境下,燃料燃烧中间产物转化为碳粒,因此 CO 生成量出现下降趋势。

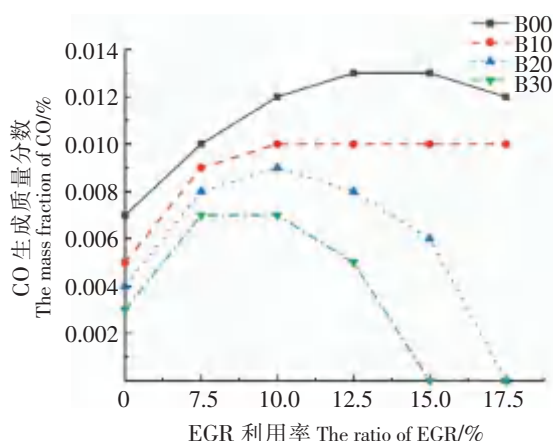


图 11 EGR 使用率对不同丁醇掺混比例时 CO 生成质量分数的影响

Fig.11 Effect of EGR utilization ratio on mass fraction of CO generated by different butanol mixing ratio

3 结论

本文利用 FIRE 软件建立柴油-丁醇混合燃料燃烧高压循环仿真模型,在此基础上进行仿真试验。在既定工况下,以 NO、Soot、CO 生成和排放综合优化为目标,选取最优掺混比和 EGR 利用率,结果如下。1) 改变丁醇掺混比对降低 NO 排放效果不明显,但对 A4 的生成和排放有着较大地影响,CO 排放也有明显改善。2) EGR 的引入能够实现低温燃烧,可以有效改善 NO 的排放,但 EGR 利用率过高,会导致燃烧不充分,进而造成碳烟和 CO 排放的升高,在 EGR 利用率 15%,B30 情况下出现熄火现象。3) 柴油掺烧丁醇,并与 EGR 技术结合能够较大程度降低 NO 排放,Soot 排放有升高但整体幅度可控,CO 排放质量分数低于原机,在保证燃烧质量条件下,实现了降低排放目标。

综合以上分析,丁醇掺混比为 B20,EGR 利用率 12.5% 组合下,NO 排放比原机降低 58.97%,Soot 生成质量分数峰值比原机降低 37.5%,而排放质量分数略有升高,CO 排放比原机降低 23.53%。在对柴油机的动力性能不产生较大影响的前提下,实现了降低 NO 排放,改善 Soot、CO 排放的目标。

[参 考 文 献]

- [1] 李清,李坤,王利朋,等. 严格排放法规背景下太阳能在船舶上的应用研究 [J]. 船舶工程,2016,38(1): 67-72.
- [2] 张天野. 船舶柴油机 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社,2017.
- [3] JUAN J H, MAGIN L A, ALEXIS C B. Autoignition reactivity of blends of diesel and biodiesel fuels with butanol isomers [J]. Journal of the Energy Institute, 2018, 7: 1-9.
- [4] 祖象欢,王银燕,杨传雷,等. 增压柴油机 EGR 性能评估研究与实现 [J]. 系统仿真学报,2017,29(12): 3075-3081.
- [5] 郑尊清,岳朗,刘海峰,等. 喷射参数对柴油掺混燃料低温燃烧影响的试验研究 [J]. 燃烧科学与技术,2015,21(2): 108-113.
- [6] 王乔,孙万臣,郭亮,等. 丁醇/柴油混合燃料对压燃式发动机燃烧及微粒排放特征的影响 [J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(6): 1920-1928.
- [7] 李博. HCCI 燃烧模式下汽油表征燃料氧化与碳烟生成机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学,2019.
- [8] 刘近平,魏明锐,肖合林. 基于矩方法的碳烟颗粒动力学演化过程 [J]. 内燃机学报,2014,32(2): 160-165.
- [9] 田兆波. 船用中速主柴油机降低 NO_x 排放试验分析 [J]. 船海工程,2012,41(1): 70-72, 76.
- [10] 吕林,陶汉国. 柴油机氮氧化物排放预测 [J]. 船海工程,2009,38(4): 46-49.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)