

# 喷油提前角对双燃料柴油机燃烧和排放的影响

宣 熔<sup>1</sup>, 张飞飞<sup>1</sup>, 陈 坚<sup>1,2</sup>, 林 航<sup>1</sup>, 牛梦达<sup>1</sup>, 冯超然<sup>1</sup>, 黄加亮<sup>1,2</sup>

(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]** 为研究喷油提前角对双燃料发动机燃烧和排放特性的影响, 以 4190Z<sub>LC</sub>-2 型船用中速柴油机为研究对象, 运用 AVL\_FIRE 软件构建柴油-甲醇双燃料燃烧室模型。通过仿真实验的方法, 研究当甲醇掺混比为 20%, 喷油提前角分别为 16.6°、18.6°、20.6°、22.6°时, 对柴油机燃烧、排放、动力特性的影响。研究表明: 随着喷油提前角的逐渐增大, 缸内混合气质量得到改善, 从而优化混合燃料在缸内燃烧的质量, 同时还可观察到放热率曲线逐渐前移且峰值增加。分析数据可知, 在甲醇掺混比为 20%, 喷油提前角 20.6°时, NO 排放较原机排放增加 29.83%, Soot 排放量降低 30.5%, CO 排放量降低 5.6%, 指示功率增为 58.75 kW。

**[关键词]** 船用柴油机; 喷油提前角; 甲醇; 排放及燃烧特性

**[中图分类号]** U 677.2

## Effect of Fuel Injection Advance Angle on Combustions and Emissions of Methanol Dual Powered Fuel Diesel Engines

XUAN Rong<sup>1</sup>, ZHANG Feifei<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>1,2</sup>, LIN Hang<sup>1</sup>, NIU Mengda<sup>1</sup>, FENG Chaoran<sup>1</sup>, HUANG Jialiang<sup>1,2</sup>

(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 study the influence of the fuel injection advance angle on the combustion and emission characteristics of dual-fuel engines, the 4190Z<sub>LC</sub>-2 marine medium-speed engine was used as the research object, and the diesel-methanol dual-fuel combustion chamber model was constructed using AVL\_FIRE software. Simulation experiments were conducted under the methanol blending ratio 20%, characteristics of combustion and emission from diesel engines were respectively studied at the fuel injection advance angle 16.6°, 18.6°, 20.6° and 22.6°. Results show that with the gradual increase of the fuel injection advance angle, the quality of the mixture within the cylinder is improved, and the heat releasing rate curve gradually moves forward accompanying with a larger peak value. It also reveals that, when the methanol blending ratio is 20% and the fuel injection advance angle is 20.6°, in comparing with those from the original engine, the NO emissions and the indicated powers have increments respectively about 29.83% and 58.75 kW, which are in correspondence with 30.5% and 5.6% decrement in the soot and the CO emissions.

**Keywords:** marine diesel engine; fuel injection advance angle; methanol; emission and combustion characteristics

**[收稿日期]** 2021-01-15

**[基金项目]** 福建省自然科学基金项目(2020J01690); 集美大学国家自然科学基金培育项目(ZP2021008)

**[作者简介]** 宣熔(1996—), 男, 硕士生, 研究方向为柴油机性能优化与排气测试分析。通信作者: 陈坚(1966—), 男, 副教授, 硕士, 从事船舶动力装置故障诊断、节能技术和仿真技术研究。

## 0 引言

随着人们对环境安全意识的逐渐增强,针对内燃机相关的排放法规愈来愈严格,因此着眼于国家发展及环境保护问题,寻求合适替代能源,降低燃油排放已成为众多学者及研究机构关注的焦点<sup>[1-2]</sup>。胡登等<sup>[3]</sup>研究表明喷油提前角增大,缸内平均压力、平均指示压力升高,滞燃期延长,在上止点接近等容燃烧,燃烧质量得到提高。谭泽飞等<sup>[4]</sup>研究表明,高压共轨柴油机燃用不同混比的生物柴油燃料在喷油提前角提前或推迟 $2^{\circ}$ 后,发动机的燃油消耗率均增加,扭矩均降低;邓涛等<sup>[5]</sup>研究表明,喷油提前角增加过大会导致柴油机工作粗暴的现象,适当增大提前角可以改善双燃料柴油机的动力性;苏祥文等<sup>[6]</sup>对天然气-柴油双燃料柴油机展开研究,研究表明在天然气掺混率为60%时,随着喷油提前角的滞后, $\text{NO}_x$ 排放量减小。

以4190Z<sub>L</sub>C-2型船用四缸中速柴油机为原型,利用AVL\_FIRE软件构建柴油-甲醇双燃料发动机燃烧室模型,研究原机在额定工况、甲醇掺混比为20%时,不同喷油提前角对燃烧、排放以及动力性能的影响。

## 1 仿真模型的建立与验证

### 1.1 计算模型

本文选取 $k-\varepsilon$ 双方程模型作为湍流流动模型;适用于混合燃料的KH-RT模型作为液滴破碎模型<sup>[7-8]</sup>;液滴蒸发模型选择Multi-component模型;O-Rourke模型作为液滴相互碰撞模型;Enable模型作为扩散模型;Walljet1模型作为液滴碰壁模型;Zwldovich模型作为 $\text{NO}_x$ 质量分数排放物生成模型;Frolov Kinetic模型作为Soot生成模型。双燃料化学反应机理参照文献[9]。

### 1.2 模型的建立与验证

实验平台为直列四缸船用柴油机,额定转速为1000 r/min,气缸直径 $\times$ 行程=190 mm $\times$ 210 mm;压缩比为14:1;标定转矩为2100 N $\cdot$ m;喷油量为每循环0.194 88 g。

对1/8燃烧室模型进行网格划分,进而设置5种不同尺寸网格,网格数目分别为12 331、14 254、15 805、17 318、18 272,以平均有效压力为评价指标进行网格无关性验证。得到数据如表1所示。从表1可知,平均有效压力随网格数的增加有所波动,在网格数目大于15 805后,波动较小,相对误差稳定在1.8%左右,因此认为网格数目达到15 805后,网格数目对仿真结果无影响。为减少仿真计算时间,本文划分网格数为15 805。

运用AUTO CAD软件,依照4190Z<sub>L</sub>C-2型柴油机燃烧室结构进行二维建模,再导入AVL\_FIRE中的ESE模块自

动生成三维图形,并完成网格的划分与检查。由于4190Z<sub>L</sub>C-2型柴油机缸内有8个喷嘴,为了简化计算,将燃烧室分为8等分,并取其1/8进行仿真研究,模型计算范围为柴油机进气门关闭时刻( $594^{\circ}$ )至排气门开启时刻( $841^{\circ}$ )<sup>[10]</sup>。为验证建立仿真模型的准确性,在全负荷工况下,将模型仿真的缸内压力曲线、放热率曲线与原机实际值进行对比,如图1所示。从图1可看出,仿真数值略高于原机值,且误差均小于3%,具有一定准确性,可用于下一步仿真模拟研究。

## 2 喷油提前角对柴油-甲醇柴油机性能影响分析

以柴油-甲醇双燃料发动机燃烧室模型为基础,在额定工况下燃用甲醇掺混比为20%的混合燃料时,分析喷油提前角分别为 $16.6^{\circ}$ 、 $18.6^{\circ}$ 、 $20.6^{\circ}$ 、 $22.6^{\circ}$ 时对柴油机燃烧、排放以及动力特性的影响。其中, $18.6^{\circ}$ 喷油提前角为原机数据。

表1 网格数量无关性验证表

Tab.1 Verification table for grid number independence

网格数量 Grid numbers	平均有效压力 Mean effective pressure/MPa	相对误差 Relative error/%
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

## 2.1 燃烧影响

图 2 为不同喷油提前角下缸内压力曲线图。从图 2 可以看出,随着喷油提前角的不断增大,缸内压力曲线整体前移,最高压力不断增大,对应的曲轴转角有所提前,着火始点提前,滞燃期延长。出现这种现象原因是:随着喷油提前角的不断增大,柴油喷入气缸内的时刻提前,滞燃期延长<sup>[11-12]</sup>,燃油与空气混合更充分,形成的可燃混合气质量高,焰前反应增强,导致较早达到柴油燃烧点,缸内燃烧提前,同时缸内燃烧时最高爆发压力增大。但过早的喷油提前角会带来缸内燃烧剧烈,不利于缸内混合燃料均匀燃烧。

图 3 为不同喷油提前角下缸内放热率曲线。从图 3 可知,随着喷油提前角的逐渐增大,放热率曲线整体提前,放热率峰值增大,且喷油提前角越大,峰值增加幅度越大。产生这种情况是因为:在较小喷油提前角时,缸内滞燃期短,混合气质量差,缸内燃烧不充分,由于燃烧后期温度增加、压力减小,使得放热率峰值下降。随着喷油提前角的增大,滞燃期延长,混合气质量提高,改善了缸内燃烧环境,放热效果好,导致放热率峰值提高。

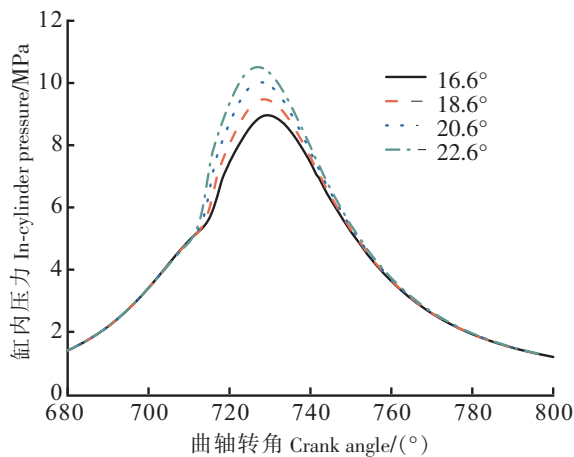


图 2 不同喷油提前角下的缸内压力曲线

Fig.2 In-cylinder pressure curve under different fuel injection advance angles

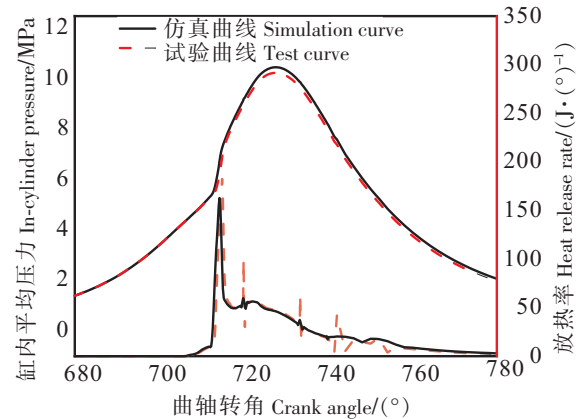


图 1 缸压曲线仿真值与试验值对比

Fig.1 Comparison of the cylinder pressures resulted from simulation and experiments

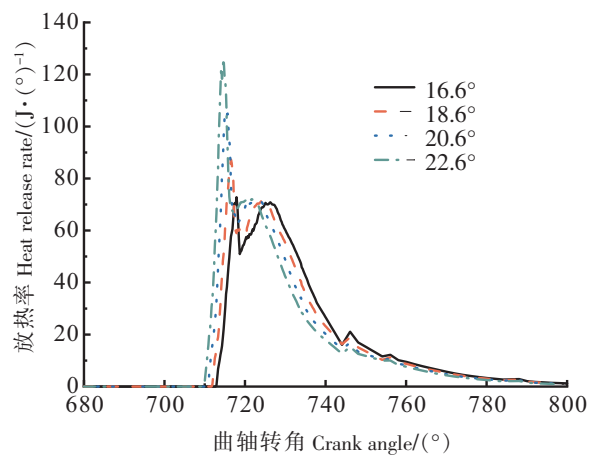


图 3 不同喷油提前角下的放热率曲线

Fig.3 Curves of heat releasing rate under different fuel injection advance angles

图 4 为不同喷油提前角下的缸内温度场切片图。纵向来看,在 710°时,缸内油束喷嘴处的温度均低于周围区域,且随着喷油提前角的增大,二者温度差有上升趋势;在 720°时,油束喷嘴处的温度均高于周围环境,随着喷油提前角的增大,在相同曲轴转角,缸内相同位置处,高温聚集区面积均增大。这主要是因为,喷油提前角的增大,滞燃期延长,燃料与空气混合更加充分、均匀,形成的混合气质量更高。从横向来看,随着活塞在缸内的不断运动,缸内高温区域逐渐扩散,从油束区域至缸内各处。形成这种情况主要有如下两方面原因:1) 油束喷入气缸内,在凹坑处碰撞,发生黏附、反弹等现象,油滴得到扩散,随之瞬间发生燃烧;2) 由于活塞的运动,带动燃油液滴在缸内扩散,缸内最高温度对应的曲轴转角以及燃烧始点均有明显提前,温度峰值从喷油提前角 18.6°的 1 934 K 升高到喷油提前角 22.6°的 2 100 K,增幅达到 8.58%,对应的曲轴转角从 738.7°提前到 736.3°。

## 2.2 喷油提前角对排放特性、动力性的影响

图 5 为不同喷油提前角下柴油机 CO 排放质量分数曲线图。从图 5 可知,随着喷油提前角的逐渐增

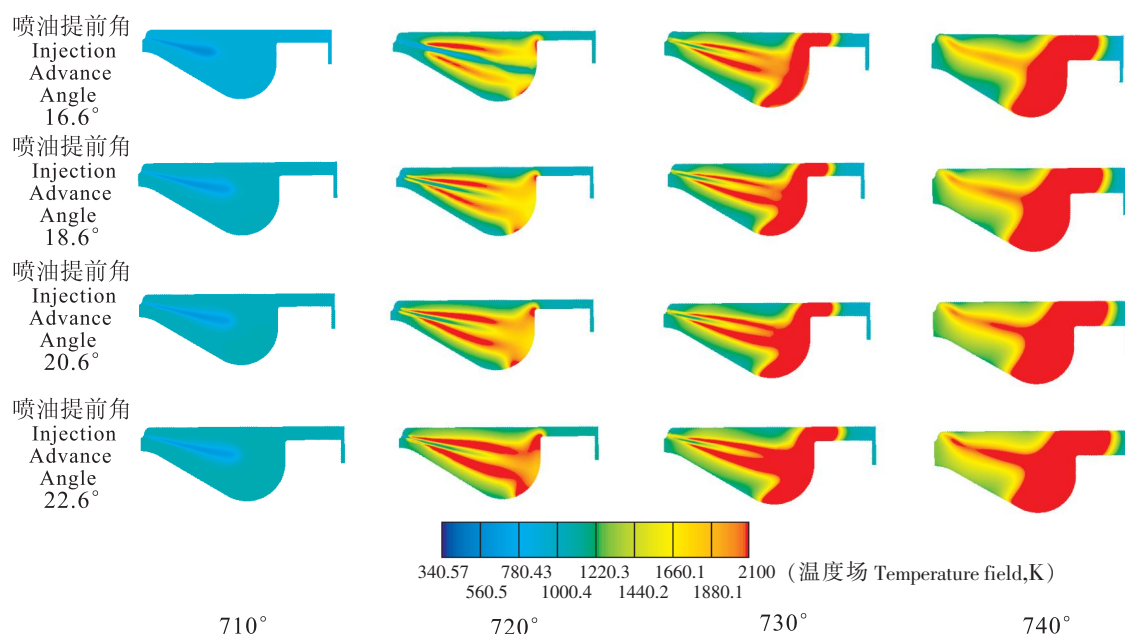


图4 不同喷油提前角下的不同曲轴转角缸内温度场

Fig.4 In-cylinder temperature field at different crankshaft angles under different fuel injection advance angles

大, CO 排放质量分数曲线整体前移, 峰值增大且对应的曲轴转角不断提前, 但最终的 CO 排放质量分数却逐渐降低。产生这种现象主要是因为, 喷油提前角增大, 滞燃期长, 混合气质量高, 优化缸内燃烧, 缸内压力, 温度均得到增加。燃烧伊始, 消耗缸内氧含量, 形成缺氧环境, 促进 CO 生成。而在 730°处, 曲线发生变化。大喷油提前角生成 CO 质量分数下降, 逐渐低于小喷油提前角。这主要是因为小喷油提前角对应燃烧始点滞后, 此时正处于 CO 主要生成的反应初期, 而大喷油提前角已度过该阶段。由于大喷油提前角缸内燃烧充分、完全, 因此 CO 最终生成质量分数低于小喷油提前角。

图6 为不同喷油提前角对应 NO 生成质量分数图。从图6 可看出, NO 生成质量分数随着喷油提前角的增大而逐渐升高, 且生成始点提前。这主要是因为, 喷油提前角增大, 滞燃期延长, 优化了缸内燃料与空气混合效果, 燃烧效果更好, 温度、压力均增大, 且喷油提前角越大, 缸内温度、压力增加幅度越大。喷油提前角为 18.6°时, NO 生成质量分数为  $7.14 \times 10^{-5}$ ; 喷油提前角为 20.6°时, NO 生成质量分数为  $9.27 \times 10^{-5}$ , 增幅约为 29.83%。

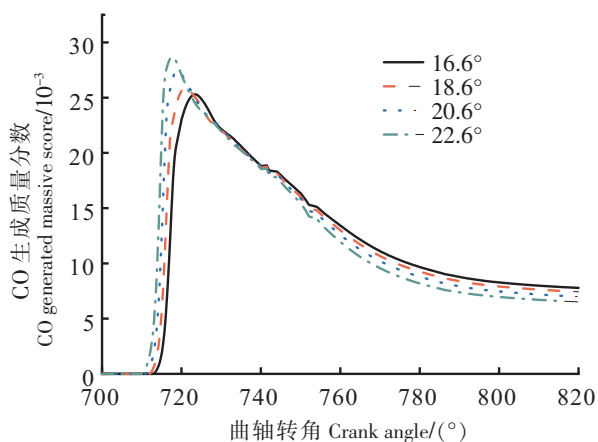


图5 不同喷油提前角下的 CO 生成质量分数曲线

Fig.5 The mass fraction curve of CO produced under different fuel injection advance angles

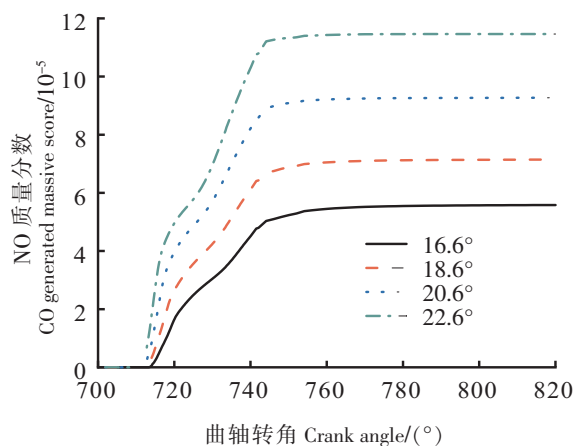


图6 不同喷油提前角下的 NO 生成质量分数曲线

Fig.6 NO formation mass fraction curve under different fuel injection advance angles

图7 为不同喷油提前角下的碳烟 Soot 生成质量分数曲线图。从图7 可看出, 随着喷油提前角的增

大, 柴油机生成 Soot 含量逐渐降低, 且生成始点对应曲轴转角不断前移, 存在明显 Trad-off 效应。这主要是因为: 喷油提前角的增大, 延长了滞燃期, 空气与雾化后的柴油液滴混合质量提高, 可以较早地达到柴油的燃点<sup>[13]</sup>。其次, 缸内燃烧充分, 导致 Soot 含量大幅降低。喷油提前角为  $20.6^\circ$  时, Soot 生成质量分数为  $3.01 \times 10^{-5}$ , 与原机相比降幅达到 30.5%。

图 8 是不同喷油提前角下的指示功率曲线图。从图 8 中可看出, 指示功率随着喷油提前角增大而逐渐升高。这是因为, 喷油时刻的不断提前, 油气混合质量得到优化, 大量的油气在滞燃期混合, 同时混合燃料在更靠近活塞的上止点附近燃烧, 放出大量热量, 推动活塞快速运转, 转化率提高, 动力性能得到提升。与原机相比, 喷油提前角为  $20.6^\circ$  时, 指示功率提高至 58.75 kW。

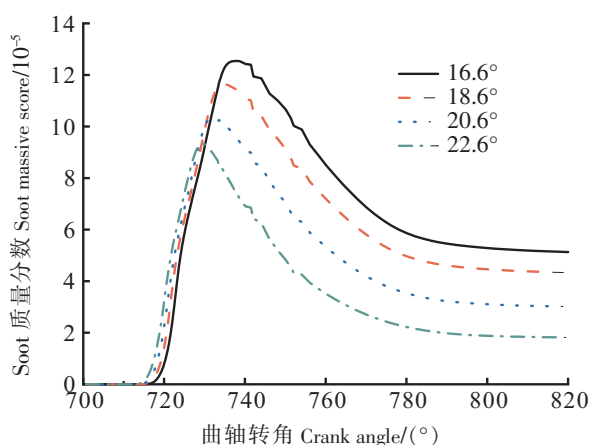


图 7 不同喷油提前角下的 Soot 生成质量分数曲线

Fig.7 The mass fraction curve of soot produced under different fuel injection advance angles

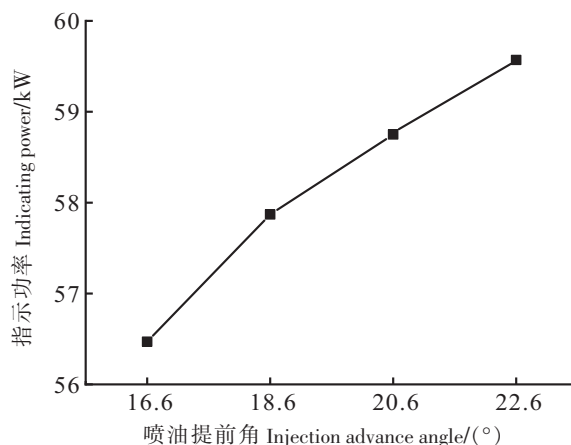


图 8 不同喷油提前角下的指示功率曲线

Fig.8 Indicated power curve under different fuel injection advance angles

图 9 为不同喷油提前角下缸内 NO 浓度场图。

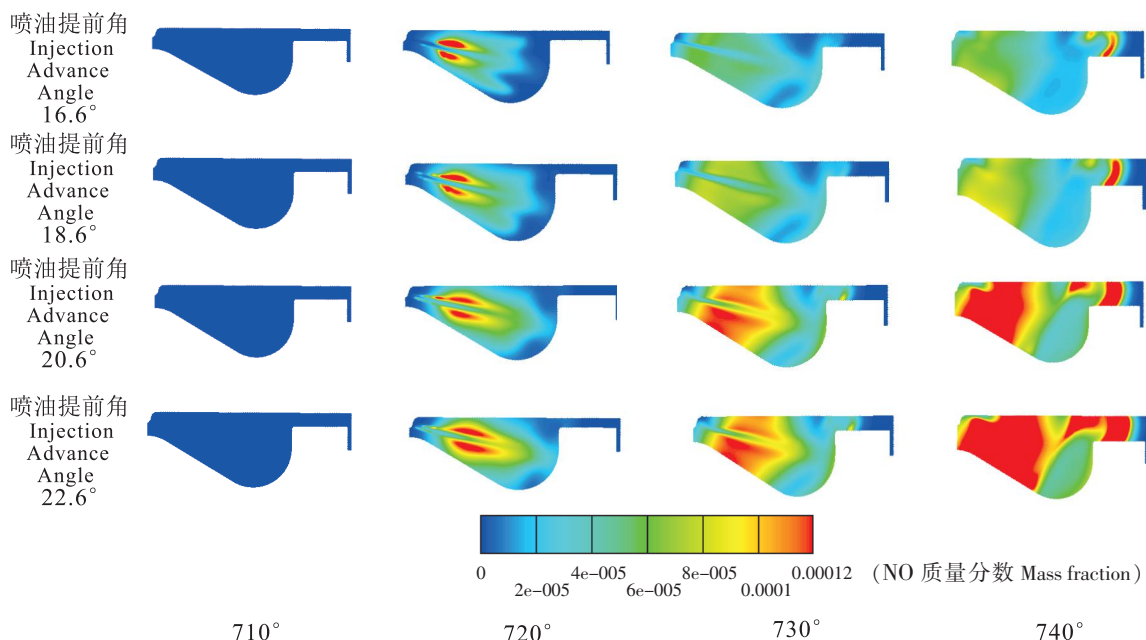


图 9 不同喷油提前角下的不同曲轴转角缸内 NO 浓度场

Fig.9 NO concentration field within cylinders at different crankshaft angles under different injection advance angles

从图 9 可看出, 在喷油提前角为  $20.6^\circ$  时, 缸内 NO 浓度突然增加。NO 最初在油束周围处生成, 随着活塞的不断运动, 缸内 NO 浓度范围扩大, 逐渐由油束边缘向四周扩散, 最终分布在燃烧室各处, 在

740°时, NO 集中在燃烧室中上部以及燃烧室顶隙处。

### 3 结论

本文以 4190Z<sub>L</sub>C-2 型船用中速柴油机为研究对象, 运用 AVL\_FIRE 软件构建柴油-甲醇双燃料燃烧室模型, 探究喷油提前角对双燃料柴油机的燃烧、排放以及动力特性的影响, 结论如下。

1) 当甲醇掺混比为 20%, 喷油提前角分别为 16.6°、20.6°、22.6°时, 缸内压力峰值分别为 8.95, 10.02, 10.53 MPa。由此可知, 随着喷油提前角的不断增大, 缸内压力峰值呈现增大趋势, 同时燃烧始点前移, 放热率曲线由双峰向单峰变化且峰值增大, 对应曲轴转角明显前移。

2) 在额定工况下, 喷油提前角增大, 使 CO、Soot 排放降低, 对 Soot 抑制效果明显, 但 NO 排放呈现增大的趋势。喷油提前角为 20.6°时, NO 排放较原机增加 29.83%, Soot 排放量降低 30.5%, CO 排放量降低 5.6%, 指示功率增至 58.75 kW。

### [ 参考文献 ]

- [1] 张宗喜, 张营华, 李昊. 柴油甲醇正丁醇混合燃料对柴油机排放性能的影响 [J]. 内燃机工程, 2020, 41(3): 35-41, 48.
- [2] 姚春德, 王辉, 姚安仁, 等. 柴油多次喷射对船舶 DMCC 发动机的影响 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2020, 53(1): 96-104.
- [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] 谭泽飞, 申立中, 李达, 等. 喷油提前角对高压共轨生物柴油发动机性能的影响 [J]. 昆明理工大学学报 (自然科学版), 2014, 39(2): 58-62.
- [5] 邓涛, 胡登, 黄加亮, 等. 运行参数对双燃料船用柴油机燃烧和排放性能的影响 [J]. 船舶工程, 2019, 41(12): 8-13, 112.
- [6] 苏祥文, 刘晓宇, 王忠诚, 等. 不同喷油正时对双燃料发动机燃烧性能的影响 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(1): 111-115.
- [7] 徐虎. 电控柴油机掺烧丁醇低温燃烧性能仿真研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2018.
- [8] XUDONG ZHEN, YANG WANG. Numerical analysis on original emissions for a spark ignition methanol engine based on detailed chemical kinetics [J]. Renewable Energy, 2015, 81: 43-51. DOI:10.1016/j.renene.2015.03.027 <https://www.cnki.net/>.
- [9] CHANG Y, JIA M, LI Y, et al. Application of the optimized decoupling methodology for the construction of a skeletal primary reference fuel mechanism focusing on engine-relevant conditions [J]. Front Mech Eng, 2015; 1. DOI:10.3389/fmech.2015.00011 <https://www.cnki.net/>.
- [10] 黄加亮, 乔英志, 王丹. 4190Z<sub>L</sub>C-2 船用柴油机工作过程仿真与整机性能优化研究 [J]. 中国造船, 2012, 53(3): 199-207.
- [11] 刘颖. 喷油参数对燃用 F-T 柴油高压共轨柴油机排放的影响试验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [12] 王正江, 申立中, 姚国仲, 等. 柴油机多次喷射干扰的喷油脉宽评估方法及抑制策略 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 43-50.
- [13] 焦宇飞, 刘瑞林, 张众杰, 等. 高原环境条件下柴油机增压与喷油参数协同优化 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 66-73.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)