

双卷流燃烧系统的双燃料发动机燃烧排放特性

黄加亮^{1,3}, 张飞飞¹, 林航¹, 王奇伟¹, 胡登⁴, 李品芳^{1,3}, 黄朝霞²

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学理学院, 福建 厦门 361021;

3. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021; 4. 哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

[摘要] 为解决因生物柴油粘度过大, 以及低温燃烧导致的燃油雾化、燃烧性能和排放恶化等问题, 利用 AMESim 软件和 AVL FIRE 软件对发动机燃烧室进行双卷流(DS)改造, 对喷油提前角、喷孔直径进行优化匹配。结果表明: 双卷流(DS)燃烧室燃油分布更加均匀, 在运行范围内燃烧速率和功率比浅盆型燃烧室具有更大的优势; 同时在加快燃油扩散速率和提高空气利用率方面具有显著的作用; 在提高发动机动力性和经济性方面具有明显的优势。采用 DS 燃烧室、喷油提前角 20.6°、喷孔直径 0.28 mm 组合结构形式的柴油机, 其 NO 排放比原机降低 81.83%, 指示功率比原机降低 7.73%。研究结果可为船用柴油机双燃料低温燃烧性能优化提供一定的指导依据。

[关键词] 柴油机; DS 型燃烧室; 柴油-生物柴油混合燃料; 喷油提前角; 喷孔直径; 排放特性

[中图分类号] U 677.2

Optimization of Dual Fuel Combustion Emission Characteristics Based on Dual Swirl Combustion System

HUANG Jialiang^{1,3}, ZHANG Feifei¹, LIN Hang¹, WANG Qiwei¹, HU Deng⁴, LI Pinfang^{1,3}, HUANG Zhaoxia²

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

2. School of Science, Jimei University, Xiamen 361021, China;

3. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China;

4. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to solve the problems of fuel atomization, combustion, performance and emission deterioration caused by the excessive viscosity of biodiesel at low temperature combustion, the engine combustion chamber was modified with double swirl (DS) by using AMESim and AVL FIRE software, and the injection advance angle and the diameter of orifice were optimized and matched. The results show that the DS combustion chamber has more uniform fuel distribution, greater combustion rate and power than the shallow basin combustor in the operating range, and has a significant role in accelerating the fuel diffusion rate and improving the air utilization rate, which bring about obvious advantages in improving the power and economy. The diesel engine with DS combustion chamber, injection advance angle of 20.6°, and nozzle diameter of 0.28 mm has a lower NO emission of 81.83% and indicated power of 7.73% than the original engine. The results can provide some guidance for the optimization of low temperature combustion performance of marine diesel engine.

[收稿日期] 2022-08-08

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2020J01690, 2021J01849); 集美大学国家自然科学基金培育项目(ZP2021008)

[作者简介] 黄加亮(1963—), 男, 教授, 博士, 从事船舶柴油机性能优化与排气测试分析研究。

Keywords: diesel engine; double swirl combustion chamber; diesel-biodiesel mixed fuel; injection advance angle; diameter of orifice; emission characteristics

0 引言

国内外排放法规日趋严格，船用发动机污染物排放问题日益突出，同时能源紧缺形势愈发严峻，节能减排成为当前研究热点^[1]。生物柴油作为可再生清洁能源，可以从原料上解决硫污染问题，同时，生物柴油的含氧量有助于降低碳烟和 CO 排放，而且生物柴油可以和柴油任意比例混合而不需要添加助溶剂。但生物柴油的添加会导致 NO_x 排放过高，南婧雯^[2]利用 GT-POWER 软件对不同比例生物柴油进行仿真，研究发现，随着生物柴油掺混比例的增加，NO_x 排放明显上升。为解决这一问题，文献 [3] 在掺烧生物柴油基础上结合废气再循环（EGR）实现低温燃烧效果，进而达到降低 NO_x 排放的目标。但生物柴油比柴油具有更大的粘度和表面张力，双燃料发动机在燃油雾化、油气混合、燃烧性能及排放等方面与普通柴油机存在较大差异。随着生物柴油掺混比的增加及低温燃烧环境的实现，使得滞燃期延长，燃油点火时刻滞后，在滞燃期累积的油气质量急剧增加，易造成爆燃现象，影响发动机正常工作^[4]。因此合理解决生物柴油粘度和 EGR 率增加带来的燃烧恶化问题尤为关键。陈晓瑜^[5]利用 CONVERGE 软件在 210 柴油机台架基础上重新设计了四种燃烧室，从而改善了柴油雾化，进而实现改善柴油机性能的目的。本文在生物柴油掺混 40%、EGR 率 12.5% 的基础上，对 4190 型船用柴油机进行 DS 型燃烧室改造，同时对喷油提前角和喷孔直径等参数进行优化，以解决生物柴油粘度过大和 EGR 率过高导致的燃烧恶化问题。

1 模型建立及验证

1.1 燃烧室模型建立

本文以 4190 型船用中速柴油机为研究对象，利用 CAD 软件绘制燃烧室上止点时刻 1/2 截面，如图 1 所示。在保证压缩终点燃烧室体积不变的基础上进行双卷流改造^[6]。图 2 为不同燃烧室活塞上止点 1/8 计算模型，DS（double swirl）型燃烧室模型网格数为 3391，比 ω 型燃烧室模型网格多 101 个，主要原因为侧燃烧室的增加导致网格划分更加密集，进而增加了网格的数量。为防止试验过程中进排气阀对燃烧室容积造成的影响，导致压缩比的变化，因此，在模型设置中仍然选择增加补偿容积，以保证压缩比不变。

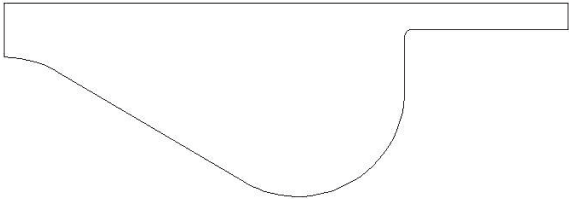
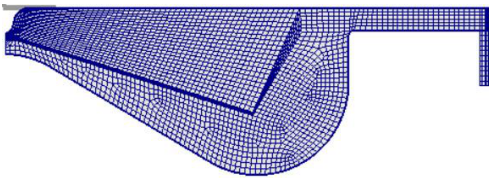
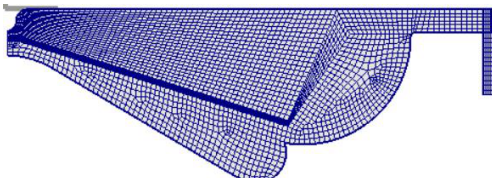


图1 燃烧室中心截面1/2示意图
Fig.1 Generation of non-orthogonal elliptic trajectory



a) ω 型燃烧室2D模型
2D model of ω combustion chamber



b) DS型燃烧室2D模型
2D model of DS combustion chamber

图2 不同燃烧室活塞上止点1/8计算模型
Fig.2 Calculation model of TDC 1/8 of piston in different combustion chambers

1.2 模型选择

湍流流动模型选择 κ - ε 双方程模型。喷雾模型主要包括四个子模型: 喷雾破碎模型选择 KH-RT 模型; 燃烧过程选择适应双燃料不同蒸发速率的 Multi-component 蒸发模型; 液滴碰壁模型选择 Walljet1 模型; 湍流扩散模型选用 Enable 模型。

燃烧及排放模型中, 着火模型选择适合柴油机等压缩燃烧的 Shell 自燃模型; NO_x 和 CO 选用扩展的 Zeldovich 模型; 碳烟选用 Frolov Kinetic 模型。

1.3 初始条件和关键参数

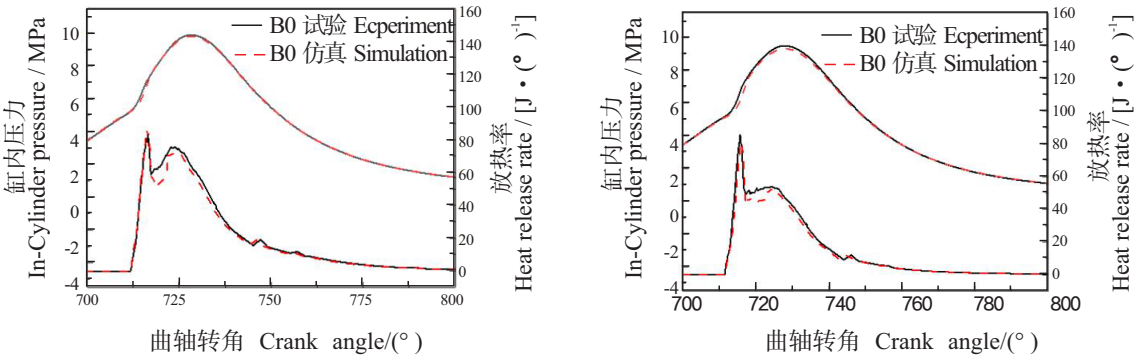
4190 型柴油机基本参数如表 1 所示。边界条件参数的设置参见文献 [7-8]。初始条件的设置中进气阀关闭时刻气体压力和温度由原机得到。

表 1 4190 型柴油机基本性能、参数指标
Tab.1 Basic performance and parameters of 4190 diesel engine

缸数 Number of cylinders	涡前排温 Front row temperature of turbocharger /℃	壁温 Wall temperature/ ℃	标定功率 Rated power/ kW	湍流长度 Turbulence length scale/m	总排量 Total displacement/L
4	≤600	403.15	220	0.006 24	23.82
缸盖温度 Cylinder head temperature/ ℃	标定转速 Rated speed/(r · min ⁻¹)	喷油持续期 Injection duration/(°)	缸径 × 行程 Cylinder diameter × stroke/(mm × mm)	燃烧室型式 Combustion chamber type	活塞温度 Piston temperature/℃
542.25	1000	29.4	190 × 210	半开式 ω 型 Semi-open ω type	631.25
气道形式 Airway form	1/8 喷油量 One eighth of fuel injection/g	平均有效压力 Mean effective pressure/ MPa	湍动 Turbulence/(m ² · s ⁻²)	发火顺序 Firing sequence	进气阀关闭角 Inlet valve closing angle/(°)
双气道 Double airway	0.049 35	1.147	18.375	1-3-4-2	593.5

1.4 模型验证

在求解器设置中将生物柴油掺混比分别设置为 0 和 20%, EGR 率设置为 0, 将仿真结果与台架实验进行对比, 如图 3 所示。由图 3 可知, 缸内平均压力实验值与仿真值曲线基本保持一致, 误差范围低于 5%, 可以进行后续的仿真研究。



a) 生物柴油掺混比为0时实验值与仿真值对比
Comparison between the results from experiments and simulation while the blending ratio of biodiesel is 0

b) 生物柴油掺混比为20%时实验值与仿真值对比
Comparison between the results from experiments and simulation while the blending ratio of biodiesel is 20%

图3 缸内压力与放热率曲线仿真值与实验值对比

Fig.3 Comparison between simulated values and experimental values of pressure and heat release rate curve within cylinder

2 仿真结果及分析

2.1 湍动能和速度场分析

喷油提前角分别为 720° 和 730° 时，不同燃烧室对应缸内湍动能分布如图 4 所示。由图 4 可知，在上 720° 和 730° 时刻， ω 型燃烧室对应湍动能范围和大小均小于 DS 型燃烧室对应湍动能，DS 型燃烧室形状更有利于涡流数的增加，燃油传播速度更快，油气混合能力增强，有助于提高生物柴油的雾化效果，降低因粘度增加而产生的不利影响。

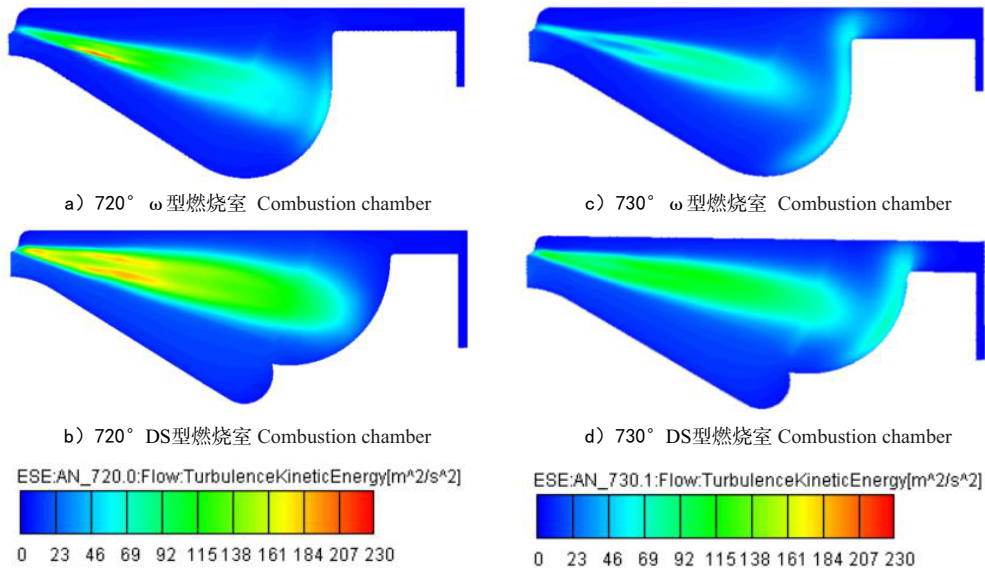


图4 不同燃烧室湍动能

Fig.4 Turbulent kinetic energies within different combustion chambers

不同燃烧室在喷油提前角为 720° 和 730° 的缸内速度场分布切片如图 5 所示。从图 5 可以看出，在上止点， ω 型燃烧室对应速度场分布范围仅局限于燃油喷射区域，燃油和空气分界线较为明显，而 DS 型燃烧室速度场向整个燃烧室范围扩展。随着曲轴的转动，喷油提前角为 730° 时， ω 型燃烧室对应速度场扩展范围仍然较小，主要向燃烧室凹坑及气缸盖狭窄区域延伸；而 DS 型燃烧室能产生较强的分流和逆挤流效果^[9]，速度场已延伸至整个燃烧室，从而改善燃油雾化和燃烧性能。

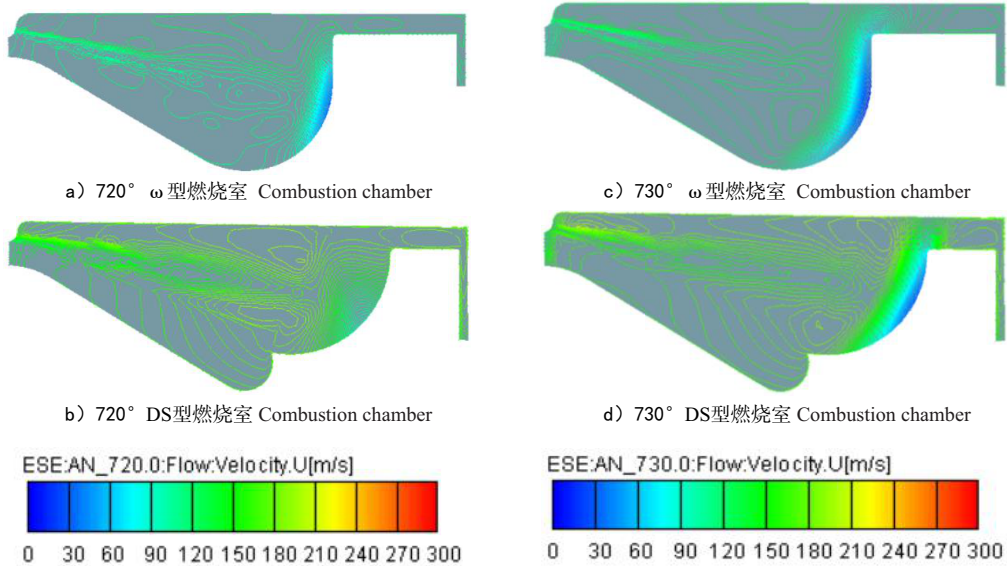


图5 不同燃烧室内的速度场分布

Fig.5 Velocity field distribution in different combustion chambers

2.2 燃烧性能分析

不同燃烧室形状对缸内压力和放热率的影响如图 6 所示。从图 6 可以发现, DS 燃烧室所对应的缸内整体压力和峰值大于 ω 型燃烧室, 峰值放热率相较于 ω 型燃烧室有所降低, 且点火时刻提前。在相同曲轴转角条件下, DS 型燃烧室对应的湍动能和速度场远远大于 ω 型燃烧室, 较大的油雾湍动能和速度场有助于打破因生物柴油粘度过大导致的吸附力的平衡, 提高油气混合程度, 减少滞燃期油气预混时间, 使得着火时刻提前, 滞燃期的缩短会减少着火前油气混合质量, 延缓放热速度, 降低放热率, 有助于缸内燃烧过程的平稳进行。

2.3 动力性和经济性分析

不同燃烧室形状对平均指示压力和指示功率的影响如图 7 所示。其中: A 代表原机; B 代表 ω 型燃烧室; C 代表 DS 型燃烧室。从图 7 可以看出, 燃烧室形状对平均指示压力和指示功率影响趋势相同, DS 型燃烧室对应平均指示压力比 ω 型燃烧室高 8.33%, 对应平均指示功率比 ω 型燃烧室增加 7.37%。DS 型燃烧室通过对油束的部分分流作用, 促进湍动能的增加, 提高油气预混合效果, 有助于燃料的充分燃烧, 提高平均指示压力, 有助于发动机做功能力的增强, 提高指示功率。不同燃烧室形状对指示燃油消耗率的影响如图 8 所示。随着燃烧室形状的改变, DS 型燃烧室对应的燃油消耗率比 ω 型燃烧室降低 2.01%, DS 型燃烧室在提高发动机动力性的同时, 降低了油耗, 经济性能获得增强。

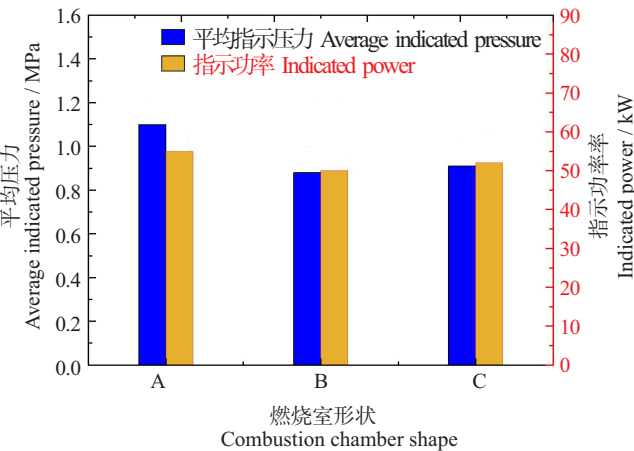


图7 燃烧室形状对平均指示压力和指示功率的影响
Fig.7 Influence of combustion chamber shape on mean indicated pressure and indicated power

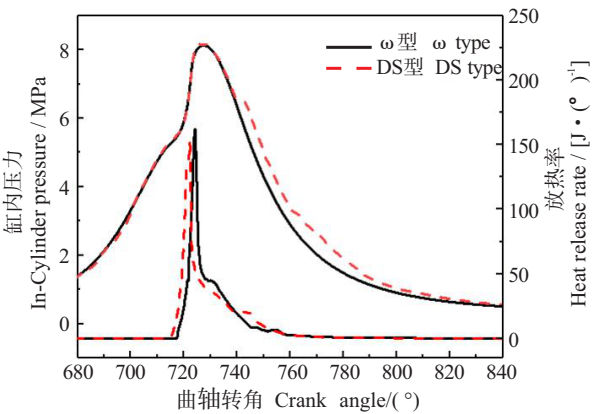


图6 燃烧室形状对缸内压力和放热率的影响曲线图
Fig.6 Influence curve of combustion chamber shape on cylinder pressure and heat release rate

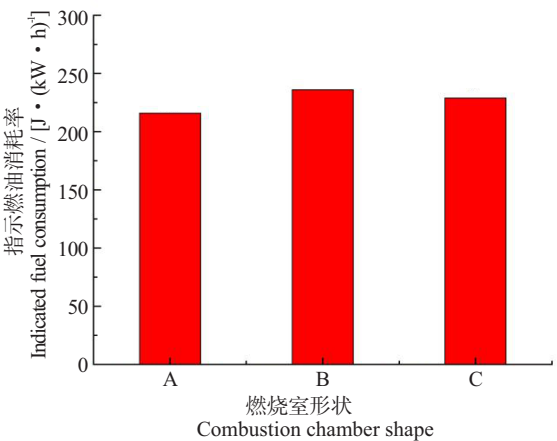


图8 燃烧室形状对指示燃油消耗率的影响
Fig.8 Influence of combustion chamber shape on indicated fuel consumption rate

2.4 排放性能分析

2.4.1 NO 排放

燃烧室形状对缸内 NO 质量分数影响曲线图如图 9 所示。喷油提前角为 730°时, 曲轴转角对应燃烧室切片图如图 10 所示。从图 9 可以看出, DS 型燃烧室对应 NO 排放质量分数比 ω 型燃烧室高 7.56%, 虽然明显大于 ω 型燃烧室, 但仅占原机 NO 排放的 18.57%。DS 型燃烧室加速了油气的充分混合, NO 生成浓度过高区域明显减少, 但质量分数仍然在增加, 生成区域与 ω 型燃烧室相似, 主要集中在油束附近, 究其原因: 喷油提前角为 730°时, 喷油仍未结束, 火焰尚未扩散到整个燃烧室,

此时油束附近温度最高，生成 NO 浓度最大，高温导致 DS 型燃烧室温度更高，造成 NO 生成质量分数整体高于 ω 型燃烧室。

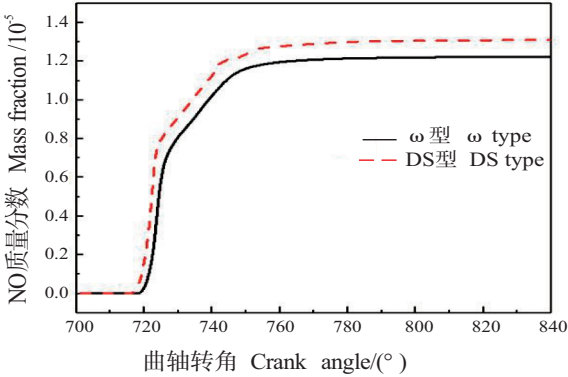


图9 燃烧室形状对缸内NO质量分数的影响
Fig.9 Influence of combustion chamber shape on NO mass fraction in cylinder

2.4.2 Soot 排放

燃烧室形状对缸内 Soot 质量分数的影响如图 11 所示。DS 型燃烧室对应的 Soot 生成峰值高于 ω 型燃烧室，但排放质量分数与 ω 型燃烧室相差不大。

从图 12 可以看出，与 NO 生成区域相似，Soot 主要在油束附近前段生成，在此区域油雾混合最早，燃烧起始时刻比其他区域提前，温度普遍较高，同时氧气浓度最低，有助于 Soot 的生成。而 DS 型燃烧室由于湍动能较大，Soot 生成区域平均氧浓度较大，Soot 生成区域也比较宽泛，因此生成质量分数略低于 ω 型燃烧室。

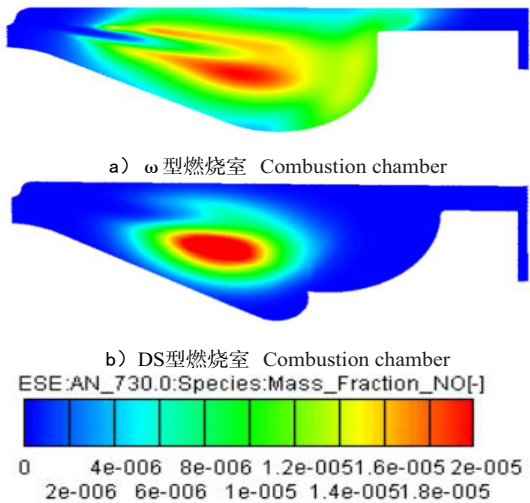


图10 不同燃烧室形状缸内NO生成质量分数切片图
Fig.10 Slice diagram of NO generation mass fraction within cylinders under different combustion chamber shapes

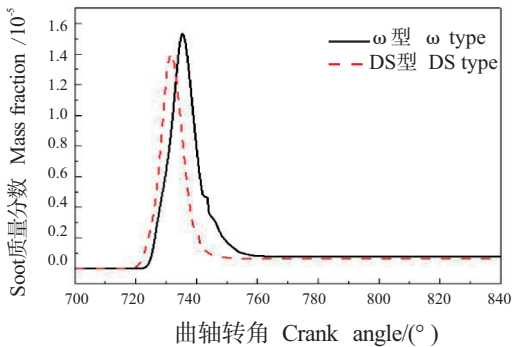


图11 燃烧室形状对缸内Soot质量分数影响曲线图
Fig.11 Curve of influence of combustion chamber shape on soot mass fraction within cylinder

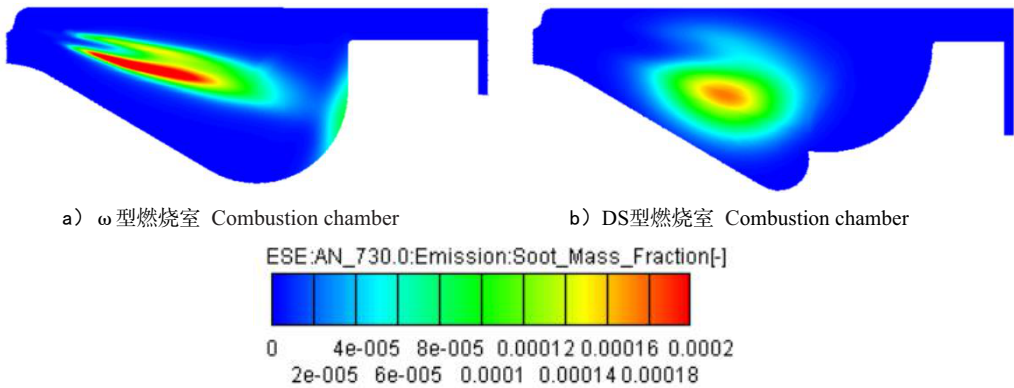


图12 燃烧室形状对Soot生成和排放影响切片图
Fig.12 Slice diagram of influence of combustion chamber shape on soot generation and emission

2.4.3 CO 排放

燃烧室形状对缸内 CO 质量分数的影响如图 13 所示。从图 13 可以看出，DS 型燃烧室 CO 排放质量分数与 ω 型燃烧室相比几乎不变。

从图 14 可以看出，DS 型燃烧室 CO 生成范围较 ω 型燃烧室更加广泛，但质量分数更低。DS 型

燃烧室 CO 生成区域主要集中在气缸盖下端、燃烧室底部及气缸套与气缸盖缝隙处, 在燃烧初期由于 DS 型燃烧室速度场范围增加, 在活塞边缘、气缸盖夹缝等温度较低, 以及氧气浓度较低区域, 有助于 CO 的生成; ω 型燃烧室由于湍动能较小, 整个燃烧室底部油雾较高, 氧气浓度极低, CO 浓度较大, 因此 DS 型燃烧室有助于降低 CO 生成。

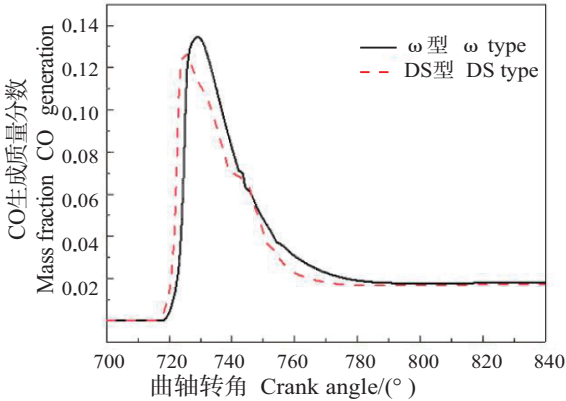


图13 燃烧室形状对缸内CO质量分数的影响
Fig.13 Influence of combustion chamber shape on CO mass fraction in cylinder

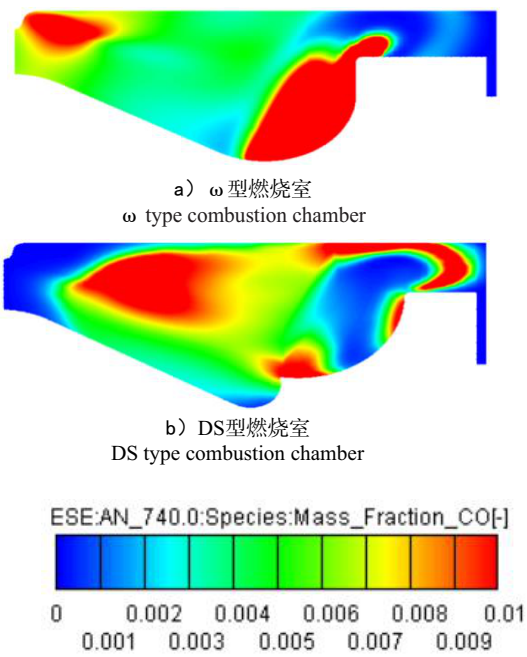


图14 燃烧室形状对CO排放量的影响
Fig.14 Influence of combustion chamber shape on CO emission

2.5 喷油提前角、喷孔直径优化

为保证研究的可靠性, 本文在生物柴油掺混比 40%、EGR 率 12.5%、DS 型燃烧室, 其他条件不变的条件下, 分别设置喷油提前角 (φ) 为 16.6°、18.6°、20.6°、22.6°, 以及喷孔直径 (D) 为 0.26、0.28、0.30、0.32 mm 四组变量, 以指示功率和 NO 排放为决策目标, 进行优化分析。柴油机在额定工况下动力性及其排放性能参数仿真计算结果如表 2 所示。

表 2 额定工况下不同喷油提前角及不同喷孔直径的计算结果

Tab.2 Calculation results of different injection advance angles and orifice diameter under rated conditions					
工况 Condition	编号 No.	喷孔直径 Orifice diameter /mm	喷油提前角 Injection advance angle/ (°)	指示功率 Indicated power /kW	NO 排放质量分数 Emission mass fraction / 10 ⁻⁵
D = 0.30 mm	1	0.30	16.6	46.9	1.04
	2	0.30	18.6	48.5	1.22
	3	0.30	20.6	50.2	1.29
	4	0.30	22.6	50.7	1.36
$\varphi = 18.6^\circ$	1	0.26	18.6	50.0	1.24
	2	0.28	18.6	49.5	1.23
	3	0.30	18.6	48.5	1.22
	4	0.32	18.6	47.7	1.20

由表 2 可知, 在喷孔直径不变的条件下, 随着喷油提前角的增大, 燃油着火时刻随即前移, 在上止点前期间喷油量增加, 缸内温度也逐渐增大, 动力性和经济性明显提高, 同时对应的 NO 排放也随之上升。这是因为喷油提前角增加, 油气预混合充分, 形成了更多高温富氧区域, 同时富氧环境持续时间更长, 放热率升高, 缸内温度曲线上升, 为 NO 生成提供了高温富氧环境, NO 生成质量分数增加, 但是喷油过早会引起燃烧粗暴, 所以喷油时刻的选取不超过 23°。在喷油提前角不变的条件下,

随着喷孔直径的减小,指示功率和 NO 排放质量分数逐渐增加,喷孔直径的减小增加了燃油的扩散直径,油雾直径减小,有助于燃油的雾化、扩散和燃烧,因此动力性能获得提高,随着喷孔直径的减小,缸内温度和平均压力逐渐升高,油束锥角增大,温度上升,高温环境有助于 NO 的生成,NO 生成质量分数增加。但在喷孔直径为 0.26 mm 时,指示功率增加趋势趋于平缓,为了维持喷油量的恒定,需要增加喷油压力,这样就会增加燃油系统的机械负荷,因此喷孔直径不宜设置过小。

综上可知,选取喷油前角 20.6°,喷孔直径 0.28 mm 时,DS 型燃烧室指示功率为 51.3 kW,比 ω 型燃烧室升高 5.78%,占原机指示功率的 93.27%;NO 排放质量分数比 ω 型燃烧室升高 7.38%,占原机 18.17%。

3 结论

本文构建了生物柴油-柴油双燃料高压循环仿真模型,在 B40、EGR12.5% 组合基础上,研究 DS 型燃烧室对双燃料燃烧、性能和排放的影响,并在双卷流模型基础上,通过调整喷油提前角和喷孔直径对 DS 型燃烧室进行优化匹配,结果如下。1) 通过对 ω 型燃烧室进行双卷流改造,燃烧室内湍动能和速度场的范围和强度得到有效增强,有利于油气的混合,着火时刻提前,燃烧过程更加均匀,同时动力性和经济性得到有效提高,DS 型燃烧室对应平均指示压力比 ω 型燃烧室升高 8.33%,对应平均指示功率比 ω 型燃烧室增加 7.37%,但温度的升高导致 NO 排放增加,Soot 和 CO 排放略有降低,DS 型燃烧室对应的燃油消耗率比 ω 型燃烧室降低 2.01%。2) 适当增加喷油提前角能有效改善生物柴油雾化,减少滞燃期油气质量,降低急燃期放热率,发动机的动力性和经济性获得提高,同时发动机 NO 排放明显升高。3) 适当减小喷孔直径,燃油喷雾锥角增大,有助于改善燃油雾化,油雾分子直径减小,油气混合更加充分,燃烧更加充分,动力性和经济性得到提升,同时温度的升高提高了 NO 生成质量分数。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 南婧雯. 米勒循环对生物柴油发动机排放的控制与优化 [D]. 成都:西南交通大学,2018.
- [3] 胡登. 电控柴油机掺烧生物低温燃烧性能仿真研究 [D]. 厦门:集美大学,2020.
- [4] RAMESHA D K, BANGARI, A S, RATHOD C P, et al. Experimental investigation of biogas-biodiesel dual fuel combustion in a diesel engine [J]. Journal of Middle European Construction and Design of Cars, 2015, 13 (1), 12-20.
- [5] 胡启坤,陈杰,黄加亮. DS 型燃烧室与燃油喷射系统匹配对柴油机排放的影响 [J]. 船舶工程, 2015, 37 (8): 21-24, 51.
- [6] 陈晓瑜. 210 船用柴油机新型燃烧室设计与优化 [D]. 大连:大连理工大学,2017.
- [7] 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.
- [8] 孙思远,徐虎,黄加亮,等. 电控柴油机燃油系统参数匹配对油耗率的影响 [J]. 中国航海, 2017, 40 (3): 14-19.
- [9] 杨城,陈丹,朱钰. 船用中速柴油机性能的优化研究 [J]. 内燃机工程, 2018, 39 (2): 81-86.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 宣熔,牛梦达,黄朝霞,等. EGR 及进气压力对双燃料发动机燃烧和排放的影响 [J]. 船舶工程, 2021, 43 (10): 76-81, 85.
- [13] 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. DOI:10.1016/j.fuel.2021.122753.

(责任编辑 陈敏 英文审校 郑青榕)