

机型与综述

从 29th CIMAC 大会看船用发动机燃烧技术发展趋势郑 亮^{1,2}, 冯明志², 黄 立², 谭晓星², 蔡秉坤², 李 华², 李先南²

(1. 上海交通大学 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 基于第 29 届 CIMAC 大会论文, 分析了船用中高速发动机燃烧技术相关领域的发展现状及趋势。指出: 围绕节能减排需求, 研究主要集中于气体机、双燃料机的燃烧优化以及低碳燃料的工程应用。研究发现: 通过燃烧系统优化可实现气体及双燃料发动机的高可靠性, 并同时达到减排和高效的设计目标。基础研究方面, 智能化技术与燃烧 CFD 过程耦合, 采用机器学习模型可有效提高 CFD 效率。在产品开发中引入瞬态温度等先进测量手段能准确分析缸内热负荷分布规律, 并与燃烧过程建立联系。关注气体和双燃料机燃烧技术的多为日韩企业, 而欧美企业则将研究重点转为生物燃料等低碳燃料的基础试验和应用, 以及智能化与船用发动机相关技术的结合。

关键词: 船舶发动机; 燃烧技术; 低碳燃料; 智能化

中图分类号: TK421⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)06-0001-06

The Development Tendency of Combustion Technology for Marine Engines From the 29th CIMAC Congress Point of View

Zheng Liang^{1,2}, Feng Mingzhi², Huang Li², Tan Xiaoxing², Cai Bingkun², Li Hua², Li Xiannan²

(1. Key Laboratory for Power Machinery & Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Based on the papers of the 29th CIMAC congress, the development tendency of combustion technology for marine medium and high speed engines is analyzed. It is pointed out that with the focus on energy saving and emission reduction, most papers focus on the combustion optimization of gas engines and dual fuel engines, and the application of low-carbon fuels. Research shows that combustion optimization can help to realize high reliability of gas and dual fuel engines, and emission reduction and high efficiency as well. With regard to fundamental research, the intelligent technology is applied to the combustion CFD process, in which the CFD simulation efficiency is enhanced substantially. The thermal load distribution principle can be analyzed accurately by introducing advanced measurements, such as transient temperature transducers, and connected with the combustion process. Most of the research on the combustion technology in gas and dual fuel engines were made by Japanese or Korean companies while the European and American companies pay more attention to the fundamental experiments and application in marine engines of low-carbon fuels, such as bio-fuels, and the intelligent technology.

Key words: marine engine; combustion technology; low-carbon fuel; intelligent technology

0 引言

2019 年 6 月 10 日~14 日, 第 29 届 CIMAC 大会在加拿大温哥华召开, 参会代表来自全球发动机

研究机构、制造商、零部件供应商、用户及政府机构等。大会讨论的内容主要有 4 方面: 智能动力系统、近零排放、用户的声音及现有技术提升, 具体又可细分为 11 个主题。

收稿日期: 2020-04-12; 修回日期: 2020-10-13

作者简介: 郑亮(1987—), 高级工程师, 主要研究方向为发动机性能及燃烧设计, zhengliang@csic711.com。

本文主要关注船用发动机燃烧及相关基础技术研究的进展及趋势,对本届大会有关这方面的论文进行分析及综述。

本届大会有关燃烧技术研究的论文约有 28 篇,主要分布在 11 个主题中的 5 个(表 1)。研究内容可归纳为以下 3 个方面:(1)围绕减排目标的机内优化、替代燃料燃烧研究;(2)围绕新机开发的燃烧研究;(3)燃烧系统开发、燃烧技术研究的新方法与新结论。

表 1 燃烧技术相关论文分布

主题分布	论文数量
主题 4: 减排技术——面向未来的技术储备	3
主题 5: 低碳燃烧——可替代燃料	3
主题 6: 低硫燃料	1
主题 9: 新发动机开发	9
主题 11: 集成研究和先进工程技术	12

1 机内减排及替代燃料燃烧研究

近零排放是船用发动机发展的重要趋势之一,围绕减排需求,主要的技术路径有:(1)在传统柴油机上采用各种机内、机外减排措施;(2)采用替代燃料。尤其是,针对低碳排放要求,生物柴油(碳中性燃料)、氢燃料成为研究热点。但无论是传统柴油机的减排升级技术还是替代燃料技术,都须要合理组织燃烧过程。

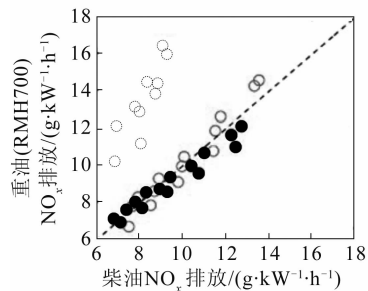
1.1 燃烧优化

罗斯托克大学在一台 150 缸径的高速单缸机上开展了柴油、重油多次喷射以改善 NO_x 、Soot 排放的研究^[1]。结果表明:不同负荷下采用重油(HFO, RMH700)时,柴油机的 NO_x 、Soot 排放均会恶化,燃烧始点滞后于柴油。其中,25%负荷时的恶化程度最大,如图 1 所示。25%负荷时,采用重油的 NO_x 排放量比采用柴油的增加 2 倍,因着火延迟加大导致预混燃烧比例增大,而 25% 等低负荷时柴油机燃烧基本以预混燃烧为主。

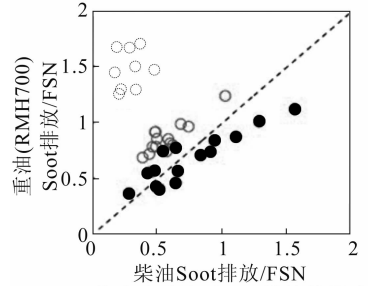
该研究针对 25% 负荷下 NO_x 排放恶化严重的现象,开展了早预喷(上电时刻: $-70^\circ \sim -62^\circ$)、晚预喷($-36^\circ \sim -26^\circ$)、后喷($6^\circ \sim 20^\circ$)三种喷射策略(不同喷射正时与喷射量)对柴油、重油发动机 NO_x 、Soot 排放及油耗的影响规律研究。如表 2 所示:预喷能够降低 NO_x 排放。这是由于采用预喷策略后,缸内压力、温度上升,主燃滞燃期明显缩短,最高燃烧温度下降,但与此同时, Soot 及油耗会略有上升。比较特别的是:采用晚预喷时,匹配合适的预喷油量,重油条件下,可以实现 NO_x 、Soot

及油耗的同时下降。由此可见,多次喷射对于改善柴油机排放性能有积极作用。

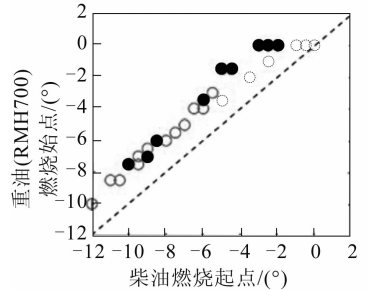
○ 25% 负荷 ● 50% 负荷 ○ 75% 负荷



a) 柴油及重油对 NO_x 排放的影响



b) 柴油及重油对 Soot 排放的影响



c) 柴油及重油对燃烧始点的影响

图 1 柴油及重油对排放性能及燃烧特性的影响

表 2 早、晚预喷对柴油、重油燃烧性能参数的影响规律

燃油	参数	早预喷	晚预喷
柴油	NO_x	↓↓	↓
	Soot	↑	↑↑
	油耗	↑	↓
重油	NO_x	↓↓	↓↓
	Soot	↑↑	↓
	油耗	↑↑	↓

1.2 替代燃料燃烧研究

瓦萨大学对 4 组共计 9 种替代性燃料(碳中性、商用替代燃料等类型)开展了燃烧基础性研究^[2]。4 组、9 种燃料特性参数如表 2 所示。第 1 组:低硫轻质燃油和基准燃油;第 2 组:4 种商业替代燃油(第 6 种是航煤);第 3 组:2 种可再生替代燃油;第 4 组:含可再生燃料的混合燃油。

这个研究项目受到了欧盟“地平线 2020 研究与创新计划”的支持,该基础研究结果将支撑碳

中性燃料发动机的燃烧开发。

采用商业化 CID510 装置测试不同燃料的燃烧特性，结果如图 2 所示。从中可以看出：航煤燃烧速度快、滞燃期短，这与其碳链比柴油的短有关；其他可替代燃料与传统柴油的燃烧特性差异并不大。

瓦萨大学开展这些燃料的研究，不禁让人想起 2017 年，瓦锡兰和芬兰四所大学（阿尔托大学、坦佩雷技术大学、阿博阿卡德米大学和瓦萨大学）签署的联合开展内燃机可持续应用研究备忘录，这项研究很可能是这份研究备忘录中的一个合作内容。

表 3 替代燃料特性参数

特性参数		运动黏度（40 ℃）/ （mm ² · s ⁻¹ ）	低热值/ （MJ · kg ⁻¹ ）	密度（15 ℃）/ （kg · m ⁻³ ）	含硫量/ （mg · kg ⁻¹ ）	润滑性/ （mm · 60 ℃ ⁻¹ ）
参考基准		ENISO3104	ASTMD240	EN12185	EN20846	ENISO12156 - 1
组 1	燃料 1	3.1	43	836	6	350
	燃料 2	2.9	43	833		
组 2	燃料 3	7.7	43	843	<100	491
	燃料 4	3.7	43	838	30	484
	燃料 5	3.9	42	886		
	燃料 6	1.0	44	787	900	447 *
组 3	燃料 7	4.5	38	883	<5	196
	燃料 8	3.5	44	813	<5	
组 4	燃料 9	1.8	43	810	<5	335

注：* 为含添加剂的值。

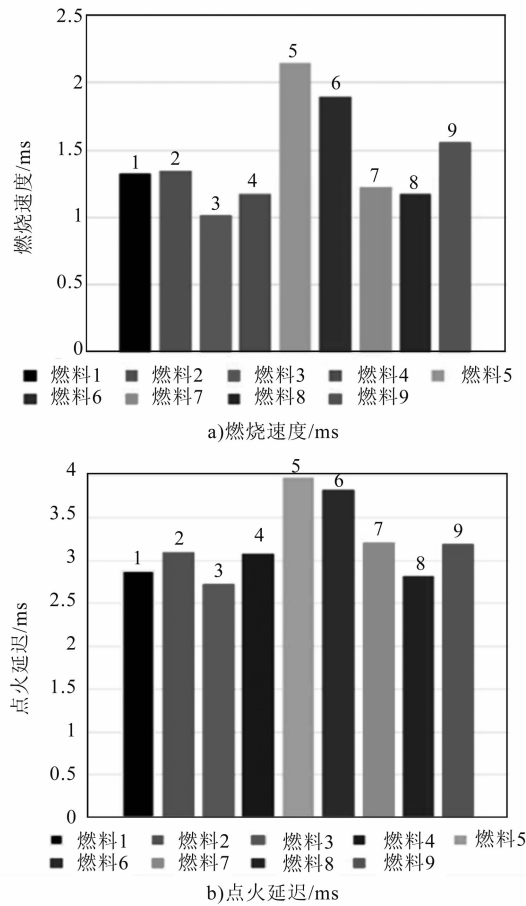


图 2 不同燃料的燃烧性能对比

2 围绕新机开发的燃烧研究

本次大会关于气体机/双燃料机燃烧系统设计

优化，如参数优化、策略匹配等的论文较多，具体如表 4 所示。

表 4 新机燃烧系统开发相关论文

论文序号	论文题目	作者单位
258	商用柴油微喷引燃式双燃料发动机燃烧过程优化	卡特
173	用于世界最大缸径气体发动机的稳定燃烧技术研究	川崎
204	天然气和柴油喷孔位置对船用双燃料发动机燃烧和排放影响的仿真研究	江苏大学
317	适用于灵活燃料发动机不同负荷下的多阶段可控燃烧策略	伍德沃德
364	不同预喷喷油器位置下双燃料燃烧过程的研究	罗斯托克大学
262	中速双燃料发动机先进燃烧策略	洋马

川崎重工在世界最大缸径的气体发动机上开展了燃烧稳定性技术研究。其目标机型缸数 18 缸，缸径 560 mm，单缸功率 1 500 kW^[3]。采用的主要技术手段如下：

- (1) 通过优化冷却实现燃烧室表面温度分布控制，抑制敲缸、爆震，降低热负荷。
- (2) 通过优化油气室匹配实现加速燃烧，抑制敲缸、爆震，提高效率。
- (3) 通过优化预燃室形状提高点火稳定性，减少循环波动。优化前后预燃室内燃气当量分布比较如图 3 所示。
- (4) 通过优化进气道内的燃气进气管以及气道

形状,优化进气量以及最终缸内混合气的均匀性。优化前后缸内燃空当量场分布比较如图4所示。

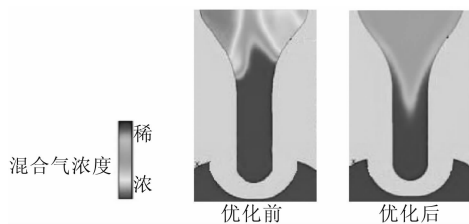


图3 预燃室形状优化前后燃气当量场分布比较

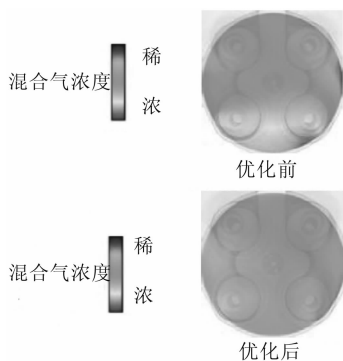


图4 气道优化前后缸内燃空当量场分布比较(气缸盖俯视图)

洋马在一台 260 缸径的中速双燃料机上探索了双燃料-预混合压燃 (DF-PCCI) 策略^[4]。一方面,稀燃燃烧速率降低、等容度下降、温度低,导致未燃甲烷排放恶化;另一方面,PCCI 是公认的能够实现高热效率、低排放的燃烧模式。如此,“预混+稀燃”有可能在提高效率的同时降低排放。研究结果表明:与传统的微喷引燃模式相比,采用两阶段预喷 DF-PCCI 燃烧模式,热效率提高 2%、未燃碳氢下降 49.4%。不同工况下,洋马的双燃料机的燃烧策略如图 5 所示。

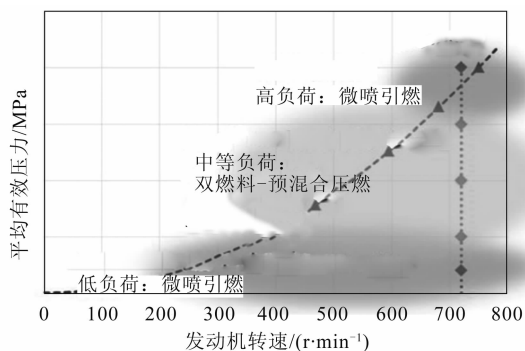


图5 不同工况下的燃烧策略

3 燃烧系统开发、燃烧技术研究的新方法

大会交流的与燃烧相关的基础研究及先进技术

研究的内容也较多,基本围绕仿真模拟及先进测试技术应用展开,研究对象几乎都是双燃料或气体机。

3.1 先进仿真模拟技术

比较典型的与燃烧技术研究相关的先进仿真模拟技术方面的论文汇总如表 5 所示。

表5 燃烧先进仿真模拟技术相关论文

论文序号	论文题目	作者单位
312	基于机器学习的活塞顶设计技术	GE
19	基于双韦伯函数的某中速双燃料发动机燃烧模拟	现代
241	简化的自动点火动力学模型——用于气体发动机的循环仿真	西南研究院
356	不同气体燃料的自动点火特性研究和气体发动机点火延迟预测模型	IHI、新泻

GE 公司为提高喷射参数和燃烧室结构的设计效率,采用机器学习的方法构建了一套快速油气室匹配设计工具^[5],采用大量多参数燃烧室型线作为素材,训练机器学习模型。其工作流程如图 6 所示。GE 公司对燃烧室的参数化包含 10 个独立参数,2 个关联参数。采用机器学习与 CFD 预测的结果对比如图 7 所示。从中可以看出:采用机器学习模型的温度场预测结果与 CFD 方法预测的结果已经很接近。而据论文披露,开展一次该 CFD 计算大约耗时 24 h,而采用机器学习耗时少于 2 s。

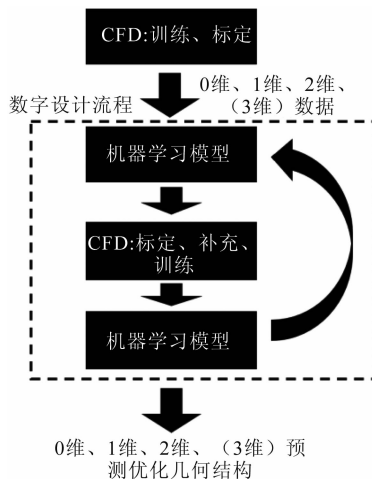


图6 基于机器学习的发动机燃烧仿真流程

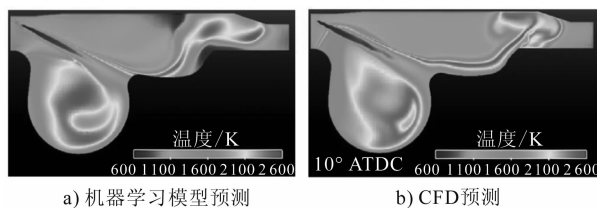


图7 采用机器学习模型预测缸内温度场分布与 CFD 方法的对比

现代重工构建了采用双韦伯函数表征双燃料发动机燃烧过程的模型，同时经过多参数，包括：微预喷正时、微预喷持续期、微预喷压力、燃烧室及压缩比的试验验证^[6]。西南研究院基于天然气化学反应机理开发了简化的天然气燃烧准维模型，并将其内嵌到 GT-Power 中，构建仿真预测能力，并通过参数标定提高精度^[7]。IHI 采用快速压缩机 (Rapid Compression Machine, RCM) 得到页岩气着火及燃烧特征，开发现象学模型，用于开发预测模型，并与试验对比，从而指导参数调整，实现预测精度的提高^[8]。

3.2 光学、先进测试技术应用

比较典型的燃烧技术相关先进测试技术论文如表 6 所示。

表 6 燃烧先进测试技术相关论文

论文序号	论文题目	作者单位
166	采用三维 CFD 工具解释全光学高压双燃料发动机的点火与燃烧过程	慕尼黑工业大学
133	气体燃料发动机预燃室内燃烧和污染物形成的试验和模拟研究	卡特
187	含预燃室的气体燃料发动机燃烧室壁面热损失直接测量	洋马
255	预燃室天然气预混燃料着火和燃烧的可视化研究	大连理工
439	天然气发动机异常燃烧的识别与定量研究	西南研究院

洋马通过在活塞、缸盖、缸套上布置同轴型热电偶，测量燃烧过程中三个壁面不同位置的瞬时温度，然后再通过求解非稳态热传导方程得到瞬态热流分布，从而得到发动机燃烧室壁面不同时刻的热通量。也即基于测量结果计算燃烧室壁面总热损失，进而确定热损失主要部位，为零部件热负荷优化提供更加精确的边界^[9]。主要瞬态温度测试点布置如图 8 所示。

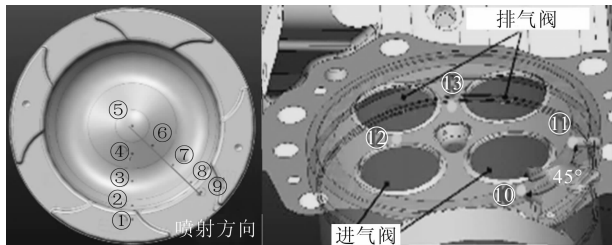


图 8 活塞顶及缸盖温度场测点布置情况

如图 9 所示，基于瞬态温度测量可以精确地计算出通过活塞顶、缸套及缸盖传出的热量比例。基于活塞不同测点的温度，可以计算出活塞从中心到边沿的传热差异；通过对比活塞顶部从活塞碗底到活塞边沿热流密度与放热率的相位差异，可以清晰地分析出燃烧火焰从碗底扩散到边沿的过程，这些对于要考虑热负荷控制的燃烧系统设计十分重要，提供了最有力的分析及验证工具。

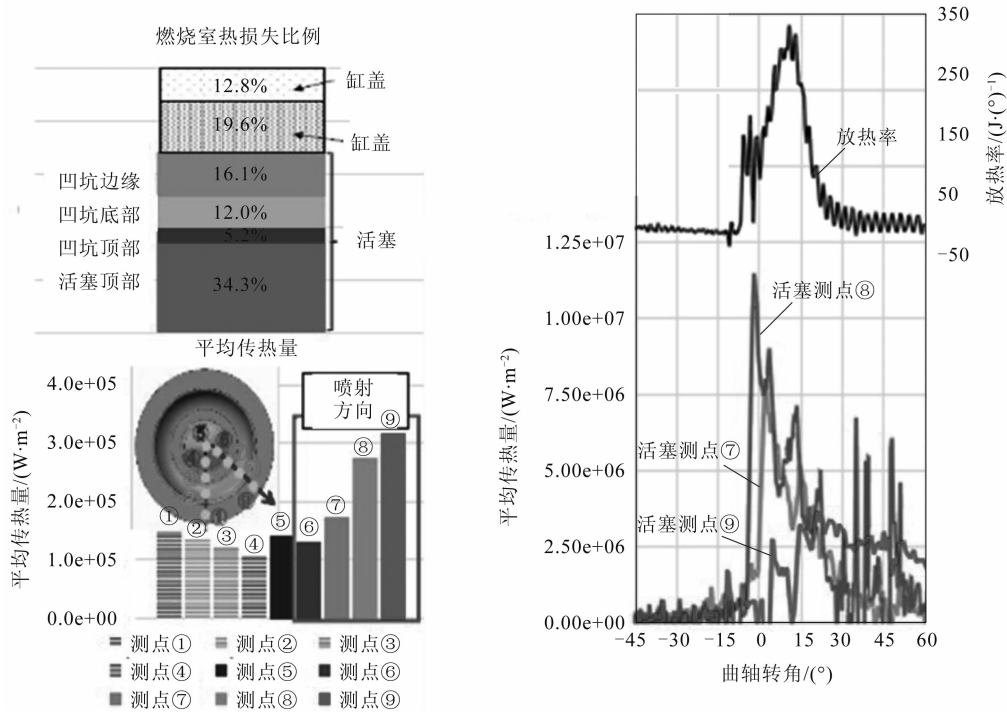


图 9 瞬时温度场测试结果分析

4 结 论

从第 29 届 CIMAC 交流论文来看, 燃烧技术的研究现状及趋势大致可分三个方面:

(1) 以减排为目标, 开展柴油机燃烧优化及替代燃料研究, 关注由于燃料特性差异所引起的燃烧性能变化。由此可看出: 国外特别是欧美企业正积极布局低碳、零碳等替代燃料发动机的开发, 并先从燃料的基础特性研究着手。

(2) 以日韩企业为主, 通过开展预燃室优化、点火能量控制, 实现稳定的燃烧, 提高全工况效率、抑制爆震。但对比近几届的 CIMAC 论文, 可以发现日韩这方面的研究滞后于欧美, 说明欧美相关技术已较为成熟, 而日韩正处于快速发展期。

(3) 机器学习、光学测试及瞬态物理量测试在船用发动机中的应用越来越广泛。船用柴油机基础研究随着先进测试手段的发展也在不断深入。在燃烧与可靠性协同设计方面, 瞬态热流的测量无疑为技术研究提供了更先进、直观的工具。

基于以上分析, 并结合笔者的从业经验, 认为: 本次 CIMAC 大会对国内船舶柴油机燃烧技术领域的发展有以下启示, 供大家探讨。

(1) 随着减排法规日趋严格, 尤其是碳减排法规的落地及逐步趋严, 低碳、零碳燃料的研究将成为热点。国内, 结合能源结构的国情, 正在大力发展甲醇燃料发动机, 未来很长一段时期内船用发动机替代燃料的研究将是热点之一; 在氨、氢等燃料方面, 有必要开展一些基础性研究及发动机预研, 为未来产品开发奠定基础。

(2) 双燃料、气体发动机由于其绿色、低燃料成本的优势, 一直是研究的热点。国内产品在热效率、排放、功率密度及安全性等方面与国外产品相比还有较大差距, 无法竞争, 市场占有率低; 同时, 较大缸径的双燃料机国内鲜有推出。因此, 围绕气体、双燃料发动机的性能优化提升以及大缸径双燃料机的开发也是燃烧技术所要关注的热点。

(3) 国内船舶柴油机正逐渐走上自主研发的道路, 但一开始研制就必须是高指标, 否则无法赶上国外同期产品。为提升各项指标同时解决所带来的诸多技术难题, 国内越来越重视燃烧、摩擦等基础研究。其中: 围绕指标提升的燃烧与零部件可靠性协同设计; 船用发动机喷雾燃烧机理及不同燃料

燃烧机理等研究将成为热点。本届 CIMAC 大会中提到的很多先进测试技术应用对我们很有启发, 在研究中应充分利用先进测试技术。

(4) 在本届 CIMAC 大会中, 我们看到欧美企业在智能化技术上有很多成果, 不少已经在发动机中得到应用。其中, 与燃烧过程相关的有燃烧闭环控制技术、基于模型的虚拟传感器技术等, 这些技术中都有一个核心的数据或物理模型, 一般是灰盒模型。随着国内智能化技术在船舶发动机上的应用, 用于智能化的实时控制模型也将是燃烧领域研究的热点。

参考文献

- [1] STENGEL B, NAJAR I, PINKERT F, et al. Potential of pilot- and post-injection strategies in large diesel engines using maritime fuels [C]. CIM AC, 2019, Paper NO. 296.
- [2] HISSA M, NIEMI S, SIRVI Ö K. Ignition studies of liquid marine fuels with different ignition analyzers [C]. CIMAC, 2019, Paper NO. 121.
- [3] KIZUKA T, KUBO D, NAKAI M, et al. Development of stable combustion technology for the world's largest bore diameter gas engine [C]. CIMAC, 2019, Paper NO. 173.
- [4] TOSHINAGA K, KURIBAYASHI M, HONDA Y, et al. Advanced combustion strategy for medium-speed dual-fuel engine [C]. CIMAC, 2019, Paper NO. 262.
- [5] KLINGBEIL A, MAGINA N, PRIMUS R, et al. Evaluation of machine learning for piston bowl design [C]. CIMAC, 2019, Paper NO. 312.
- [6] PARK H, KYRTATOS P, BOLLA M, et al. Combustion modeling of a medium-speed dual-fuel engine using double vibe function [C]. CIMAC, 2019, Paper NO. 19.
- [7] HOAG K, ABIDIN Z, FRENCH A, et al. A simplified kinetic auto-ignition model for cycle simulation of gas engines [C]. CIMAC, 2019, Paper NO. 241.
- [8] MIYAUCHI K, MASUDA Y, AOYAGI T, et al. Auto-ignition characteristics of various gaseous fuels and prediction model of ignition delay for gas engines [C]. CIMAC, 2019, Paper NO. 356.
- [9] KODA K, KURIBAYASHI M, Hagiwara R. Direct measurement of heat loss on combustion chamber wall in gas engine with pre-chamber [C]. CIMAC, 2019, Paper NO. 187.