

# “双碳”背景下船用新能源发展趋势及滑油性能要求

付代良<sup>1</sup>, 黄胜军<sup>1</sup>, 韩旭<sup>1</sup>, 陆海迪<sup>1</sup>, 邵腾飞<sup>1</sup>

(1. 中国石油大连润滑油研究开发中心, 辽宁 大连 116032)

## The Development Trend of Marine New Energy and the Performance Requirement of Lubricating Oil under the Background of Dual Carbon

Fu Dai-liang<sup>1</sup>, Huang Sheng-jun<sup>1</sup>, Han Xu<sup>1</sup>, Lu Hai-di<sup>1</sup>, Shao Teng-fei<sup>1</sup>

(1. PetroChina Dalian Lubricant R&D Institute, Dalian, Liaoning 116032, China)

**Abstract:** The International Maritime Organization has put forward the requirements for carbon reduction and emission reduction strategies, although the shipping industry has not reached a consensus on the low-carbon development path, a variety of new clean energy sources have been researched and practiced on ship applications. This paper introduces the characteristics and market conditions of several new clean energy sources such as natural gas, methanol, ammonia and hydrogen, as well as the design and operation characteristics of marine engines. Combined with engine operating conditions, the performance requirements of new marine low-carbon engine lubricating oils are sorted out.

**摘要:** 国际海事组织提出了降碳减排战略要求, 尽管业内尚未对低碳发展路径达成共识, 但是已有多种新型清洁能源开展了船舶应用的研究与实践。介绍了天然气、甲醇、氨、氢几种新型清洁能源特点及市场应用情况, 船舶发动机设计及运行特点。结合发动机运行工况, 对新型船用低碳发动机润滑油性能要求做了梳理。

**关键词:** 低碳; 液化天然气; 甲醇; 氨; 氢

**Key words:** Low carbon; liquified natural gas; methanol; ammonia; hydrogen

中图分类号: TK626.39

文献标识码: A

### 0 概述

2018年4月, 国际海事组织(IMO)通过了初步温室气体战略, 包括符合《巴黎协定》温度目标的减排途径<sup>[1]</sup>。与2008年相比, 到2030年将国际航运的碳强度降低至少40%, 到2050年至少降低70%, 同时努力在本世纪尽快逐步达到零排放的目标。到2050年, 年度温室气体排放总量比2008年减少至少50%。为实现降碳目的可以在航速及船舶设计方面进行优化<sup>[2]</sup>提高发动机燃烧效率和推进效率。增加风力推进系统、太阳能利用装置、余热回收系统等措施也可以起到节能降耗的作用, 但是只能作为辅助性措施。若实现国际海事组织降碳目

标, 主要降碳措施和途径是选择替代燃料。目前欧盟已经有法规要求船舶监测和报告其二氧化碳排放、燃料消耗、运输工作和平均能耗效率<sup>[3-5]</sup>。

### 1 船用新型清洁能源概述

船舶可以使用清洁能源有多种, 例如核能、电能、液化天然气((Liquefied Natural Gas, 简称LNG))、液化石油气(LPG)、甲醇、二甲醚、生物燃料、氢、氨等。核能能量密度大, 用于船舶上环保优势明显, 但受制于安全因素, 目前仅舰艇及少数特种船有应用。电能受制于储能技术及充电时间

收稿日期: 2023-8-31

作者简介: 付代良(1984年), 男, 硕士生, 主要研究方向为船用润滑油, E-mail: fudailiang\_rhy@petrochina.com.cn;

联系地址: 大连市甘井子区山中街1号。联系电话: 13591729043。

限制仅在少量班轮上有应用，难以大规模推广应用。针对船用新能源研究主要以内燃机动力为主。

船用燃料中的生物燃料，LPG、二甲醚难以大规模应用。主要原因如下：生物燃料的来源不稳定且价格易波动大。二甲醚主要由甲醇脱水而制取，在生产端与甲醇相比并无优势，碳减排效果方面，与甲醇基本相当。LPG 燃料动力系统所涉及的储存、供应和利用各环节的系统设备的研制和应用尚不完善。

综合低碳能源的船舶适应性，能源供应、经济性、技术成熟度、环境适应性、法规完备等诸多因素。于航运而言，具有大规模发展前景的清洁能源主要包括低碳能源 LNG、甲醇、零碳能源氢和氨，几种能源理化性质见表 1<sup>[6,7]</sup>。

表 1 船用低碳能源理化性质

项目	LNG	甲醇	氢	氨
化学式/主要成分	CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> OH	H <sup>2</sup>	NH <sup>3</sup>
热值 (MJ/kg)	50	19.9	120	18.6
沸点 (°C)	-162	65	-253	-33
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	450	796	70.8	682
液态能量密度 (MJ/L)	22.5	15.7	8.5	12.7
自燃点 (°C)	650	464	585	630
可燃极限 (%)	5-15	6-36	4-75	15-28
单位能量储存容积 (与传统燃料相比)	1.7	2.5	4.6	3.1

### 1.1 液化天然气

LNG 动力船已有 20 多年历史，技术已经非常成熟，LNG 的主要成分是甲烷，同传统燃料相比，在输出能量相同的前提下，天然气产生的污染物排放量最少，二氧化碳排放减少了近 20%，硫氧化物排放减少了近 100%，氮氧化物排放减少了 80%。随着基础设施、法规和技术的完善，LNG 船舶大幅增长，是“双碳”目标过渡期最佳替代燃料。但也有公司认为 LNG 作为化石类低碳能源，在航运脱碳中发挥的作用非常有限，如全球最大集运巨头马士基已经明确表示不会选择作为过渡燃料的 LNG 动力，并决定停止购买无零碳排放能力的船舶。

### 1.2 甲醇

甲醇不含氮氧化物和硫，无色、易燃、易储存。可以根据生产原料不同，分为生物来源甲醇、电制甲醇和矿物来源甲醇。与常规船用燃料相比，甲醇可减少 95% 以上硫氧化物和颗粒物及 60% 氮氧化物，且最多时可减少 25% 二氧化碳排放。它通常条件下为液体，储存容易，安全性比 LNG 高，而且比较易获得，由于甲醇燃料船应用实践时间还不长，在技术、基础设施配套和规范标准等方面仍存在不足，短期内还难以大范围铺开。更重要的是，甲醇目前主要以矿物来源为主，和 LNG 一样仍会排放二氧化碳，与零碳燃料相比处于劣势，无法达到真正意义上的碳中和。

### 1.3 氨燃料

氨的主要制取途径是氮气和氢气在高温高压和催化剂作用下合成制取。在已知的众多船用替代燃料中，氨和氢由于不含碳，在燃烧阶段没有碳排放，无疑是最理想的零碳燃料，而氨燃料又比氢燃料更具优势，例如能量密度高，更易于液化、贮运，产量和生产效率远高于液氢，生产成本更低，不易引起燃烧和爆炸事故，安全性更高。氨很早就应用于农业，获取渠道更成熟和便捷。正是这样，氨燃料备受业界青睐，被认为是“双碳”目标下未来极其重要的一种替代燃料。

但是，氨燃料同样存在一定缺陷，有一定毒性，对部分金属具有腐蚀性，燃料管路需要双壁管、氮气保护，而且燃烧时会产生氮氧化物排放。氨燃料发动机要实现船上应用，需针对氨燃料燃烧慢、腐蚀性、毒性及氮氧化物排放四个问题，解决运行工况及点火装置、发动机部件抗腐蚀、防泄漏以及后处理装置等关键技术<sup>[8]</sup>。要真正实现氨燃料船舶规模运营，除技术问题之外燃料生产供应、加注配套设施等在内的产业链畅通，以及标准规范完善同样重要，这些因素直接影响氨燃料的船用经济性和推广效果。目前，受制于氨燃料价格和船舶建造成本均比现有传统能源要高很多，氨燃料船短期内还难以成为航运主流，但作为零碳能源吸引了航运公司的投资热情，如希腊船东最近就率先订造了氨燃料船舶。

### 1.4 氢燃料

氢能是一种绿色、清洁、高效、来源广泛的二次能源，从全球氢能来源的结构看，化石能源(天然气和煤)制氢仍然占据较高比例，电解法制氢占比很

小, 主要因为电解制氢成本高昂, 是化石能源的五倍。风电制氢将是未来绿氢获得的重要途径, 多国已在开展海上风电制氢的相关探索性项目。

氢能量密度极低, 仅为传统燃料五分之一, 因此需要很大的燃料储存舱, 进一步压缩货物运输空间。液化氢的蒸发速度比液化天然气快, 长期储存目前不切实际。因此氢能源除了零碳排放之外有许多待解决问题, 特别是经济性差问题, 动力系统初装成本高, 燃料成本同样也高。此外储氢技术也是至关重要, 目前车辆高压储氢已经有应用。

### 1.5 小结

尽管航运业已就低碳发展开展诸多研究, 但目前尚未就能源低碳发展路径达成共识, 如世界银行建议各国政府不要支持液化天然气作为一种船用燃料。法国达飞海运在内的航运巨头明确支持 LNG 燃料。马士基订造碳中和甲醇燃料集装箱船, 预计 2023 年投入使用, 使用碳中和燃料 e-甲醇或可持续的生物甲醇运营该船舶。

未来哪种能源能占据更大比例仍难以确定, 包括燃料来源、生产供应、加注配套设施以及标准规范完善非常重要。这些因素直接影响低碳燃料的船用经济性和推广效果<sup>[6]</sup>。

## 2 船用低碳发动机技术发展趋势

燃料解决方案将基于 OEM 成熟的船燃发动机和双燃料发动机开发, 在原机型基础上增加燃料供应系统, 包括燃料泵单元、低压泵模块、燃料阀组等, 经过改装和系统集成。目前新能源发动机主要以双燃料发动机为主, 单一能源仅 LNG 有纯气体机, 并且占有很小比例。

### 2.1 LNG 发动机

天然气的着火点和点火能都远高于汽、柴油, 因此天然气并不能像柴油一样被压燃, 而是通过火花塞点燃或一定量的柴油引燃, 对于大缸径船机, 所需点火能量密度高, 只能通过柴油引燃方式。依据燃气喷射方式不同可分为低压和高压喷射两种模式。世界两大低速机船机巨头 MAN 和 WinGD 为代表的 OEM 分别采用不同技术技术路线。

高压喷射模式采用狄塞尔循环, 例如曼恩 ME-GI 柴油-天然气双燃料发动机就是采用缸内高压直喷式, 即在发动机压缩冲程末期, 活塞到上止点附

近时从喷油器喷入少量且油量固定的点火油作为点火燃料, 随后向缸内高压喷入天然气, 使天然气依靠微量点火油着火释放的能量进行燃烧, 燃烧过程主要是扩散燃烧。ME-GI 双燃料发动机的工作循环压缩行程只压缩新鲜空气, 燃气不参与压缩过程, 点火油压燃后, 天然气高压喷入直接燃烧, 因此无需空燃比控制, 消除失火和爆燃问题, 可采用与柴油机相当的压缩比。由于 ME-GI 双燃料发动机消除爆燃问题, 因此对燃气没有抗爆性能的要求, 发动机对燃气的适应性好, 可以使用低甲烷值的燃气, 甚至可以使用液态石油气(LPG)作为燃料。

低压喷射模式采用奥托循环, 例如 WinGD 的 DF 柴油-天然气双燃料发动机采用缸内低压喷射式, 是在活塞压缩行程中, 即在活塞将扫气口关闭之后, 以较低压力由气缸两侧喷入天然气, 使天然气和空气混合。当活塞运动到上止点附近时向缸内喷射少量点火油, 利用点火油的着火能量将缸内天然气和空气的混合气点燃, 从而进行燃料的燃烧并完成做功过程, 天然气燃烧过程主要是预混燃烧。与高压喷射相比, 低压喷射模式燃烧峰值温度较低且高温持续期较短<sup>[9]</sup>, 因而氮氧化物排放远低于国际海事组织规定的 Tier III 法规, 并且无需配备复杂的高压燃气喷射系统<sup>[10]</sup>。此外, 甲烷辛烷值高、层流火焰速度低及自燃着火较困难, 因而通常采用微引燃(预燃室系统)提高初期火焰能量以提高点火稳定性, 加快燃烧速率<sup>[11]</sup>, 可以在少量的引燃柴油下保证足够的着火稳定性和初期火焰能量, 提高燃烧反应速率。

两种模式各有优劣, 高压喷射动力性好, 热效率高, 功率高, 安全性高, 不存在爆燃问题。发动机设计成本高, 需要增加额外的高压 LNG 供气系统。缸内温度高导致 NO<sub>x</sub> 排放不能满足国际海事组织标准。

低压喷射受到爆燃限制, 压缩比低, 热效率和功率都有损失。发动机设计成本低, 排放好, 但是因为进排气阀重叠角的存在, 不可避免的存在一定程度甲烷逃逸, 这从另外角度增加了温室气体排放。

### 2.2 甲醇发动机

甲醇发动机同样基于原有双燃料发动机设计基础上, 额外增加一套甲醇燃料供应系统。在大缸径甲醇发动机中, 采用微量喷射柴油进行缸内多点点火,

增加了点火能量,也缩短了火焰传播距离,可以实现稳定的燃烧<sup>[12]</sup>。如姚春德<sup>[13]</sup>提出的柴油甲醇二元燃烧系统,在进气道喷射甲醇形成均质稀薄混合气,由缸内直喷少量柴油点燃,这种燃烧方式获得了良好的经济性与排放性。

曼恩公司的 ME-LGI 发动机<sup>[14]</sup>,也是利用微喷柴油引燃缸内高压直喷的甲醇燃料。LGIM-M 是基于 MAN 成熟的甲醇双燃料发动机技术<sup>[15]</sup>,在甲醇中加入水后混合喷入缸内,其原理就是利用甲醇燃烧和乳化燃料的低氮氧化物排放效果叠加达到 TierIII 标准,受热件温度、放热率和性能参数等发动机主要性能指标均可保持在现有设计范围内,缸套、活塞环等未发现异常磨损。

### 2.3 氨燃料发动机

从船舶主要动力装置柴油机的工作机理来看,无论是狄塞尔循环还是奥托循环,都是可以以氨作为燃料的,但氨的燃烧温度范围比较窄,需要较高比例的引导油或助燃剂。而且,与其他燃料相比,氨燃料除燃烧性较差外,还存在氮氧化物排放较高、腐蚀性较强、有毒等问题。同时  $\text{NH}_3$  层流火焰速度较小、最小点火能较大、可燃范围较窄,燃料型  $\text{NO}_x$  排放较高<sup>[16]</sup>。MAN 正在基于现有 LGIP 来开展氨燃料低速机的开发<sup>[17]</sup>,将针对现有 LGIP 燃料系统进行改造,主要考虑氨对铜、塑料等材料的腐蚀性,替换为其他耐腐蚀的材料。同时考虑使用 SCR 或 EGR 来解决氮氧化物的排放,MAN 正在开发的氨发动机计划于 2024 年正式交付使用。看似零碳燃料低速机即将实现,但实际上仍有多个问题需要解决<sup>[18]</sup>,其热效率、减排效果有待验证,距离真正实现零碳的氨燃料低速机还需经历一个漫长的过程。

### 2.4 氢燃料发动机

从氢燃料发动机在几种新能源船机中技术成熟度最低,由于氢气的密度很小,需要很高的储氢压力才能达到一定的体积能量密度,储氢效率很低,由于氢气的体积能量密度小,氢内燃机的动力性较传统内燃机差而且其当量氧化物排放更高,此外,氢内燃机还存在早燃、回火、功率下降等问题这对氢内燃机的控制提出了巨大的挑战<sup>[19]</sup>。MAN 和 WinGD 正在研发氢

燃料发动机,第一批氢气运输船将在 2024 投入使用。受限于储氢技术限制,目前仅应用于短距离航行,且船型受限,主要用于船舶辅助发电装置。

## 3 船用新能源发动机油

### 3.1 LNG 双燃料发动机油

双燃料发动机在工作时温度比较高,氮氧化物生产量与温度相关,因此双燃料发动机产生氮氧化物量较多,油品在使用过程中容易氧化硝化,因此需要双燃料发动机油具有良好的抗氧化硝化性能。另外双燃料发动机油主要成分是天然气,火焰传递速度较慢,导致排气温度高。同时为了高温下保持发动机清洁,防止活塞产生大量沉积物,要求滑油具有良好的高温清净性<sup>[20,21]</sup>。

船用双燃料发动机油较车用发动机油对灰分适应性强,主要因为船舶发动机排气阀安装有旋阀器,在发动机运转过程中起到有研磨气阀的作用,灰分高不会对阀门处产生大量沉积物。同时船用双燃料发动机油要兼顾船燃特性,双燃料发动机油碱值与使用低硫船燃时油品碱值相同。

天然气的辛烷值较高,着火所需的反应活化能高导致其着火特性差,尤其在稀燃工况下着火更加困难,天然气的层流火焰速度低,低压喷射发动机由于压缩冲程有可燃气,因此在压缩末端气体容易发生自燃引起爆燃<sup>[22]</sup>。

因此低压喷射双燃料还需考虑滑油中可能影响早燃的因素,添加剂中的钙元素含量提高会使早燃发生频次提高<sup>[23]</sup>,机油中钙清净剂的清净剂成分能够促进早燃<sup>[24,25]</sup>。提高机油中的 ZDDP 含量,能降低早燃发生频次<sup>[23]</sup>。杨友文等人<sup>[26]</sup>在试验中发现,采用硫酸盐灰分含量越高的机油,越容易出现在早燃。

### 3.2 甲醇发动机油

甲醇作为新型的清洁替代燃料,在排放性方面具有显著优势。但是在使用过程中有一系列润滑:甲醇具有一定腐蚀性,会对发动机的金属供油管路、排气门等有腐蚀作用,而且会加速发动机油变质,缩短发动机寿命;甲醇氧化后会生成甲酸等酸性物质,消耗掉发动机油的碱值,使发动机油的碱值下降,还会腐蚀发动机部件;甲醇等还会与发动机油中的 ZDDP(二烷基二硫代磷酸锌)发生反应,使 ZDDP 失效,需要引入新的抗磨剂解决抗磨问题<sup>[27]</sup>;甲醇具有粘度低和汽化潜热高的特

点,在发动机刚刚启动时,未充分燃烧甲醇极易流入油底壳而稀释乳化润滑油,造成润滑油性能衰败,对内燃机关键零部件的润滑性能和耐腐蚀性能产生不良影响<sup>[28]</sup>,导致活塞与气缸壁的磨损增大、酸性产物增多、锈蚀严重、抗磨性能下降,在使用机油不当时还会引起沉积物增多、早燃频发。

因此需要解决在水、甲醇、甲酸等污染物破坏添加剂功效的情况下甲醇机油抗磨抗腐蚀能力下降难题;解决船用甲醇机油油品乳化、酸值增加以及甲醇稀释等难题,延长甲醇船用发动机油使用寿命、提升发动机油抗氧化性、分散性、酸中和能力、分水性和抗磨性。

### 3.3 氨燃料发动机油

氨燃料发动机燃烧温度高和层流火焰速度较小<sup>[29]</sup>等将推动发动机运行环境更加恶劣,从而需要进一步提升氧化稳定性和抗磨损性能。氮氧化物排放较高需要提升油品抗氧化硝化性能。氨燃料腐蚀性造成发动机部件腐蚀、磨损等问题也要通过提升油品的防腐、抗磨性能来解决。

### 3.4 氢燃料发动机油

传统燃料对发动机具有一定的润滑性,而氢发动机燃烧的氢气没有这个特性,故氢燃料发动机的润滑条件变差,润滑油需要适宜的硫酸盐灰分在不造成沉积物增多的情况下起到润滑气门及座圈的作用。氢气进入燃烧室后不同于液体燃料有气化吸热的过程,再加上氢气热值高,使氢发动机的操作温度较高,要求机油具有优异的抗氧化抗硝化性能,抑制机油在高温环境下的氧化衰败。氢气燃烧的主要产物是水,极易导致发动机油乳化,进而引起发动机部件腐蚀、锈蚀、磨损等严重后果,需要机油具有优异的分水防锈性能,最大程度地降低水及乳化液对发动机的影响。因此氢燃料发动机油开发重点解决氢燃料发动机在更高温度下油品氧化、衰败难题,解决水污染带来的乳化、腐蚀、磨损和添加剂有效组分失效的难题。

## 5 结论

在国家“双碳”战略目标指引以及在船舶航运“绿色低碳”转型的大趋势下,越来越多新型清洁能源应用到船舶发动机,发动机使用新型清洁能源与传统燃料比燃烧工况差异较大,包括燃烧温度、层流火焰速度等,并带来一系列问题,诸如腐蚀、乳化、磨损加剧等,因此发动机油性能也要随之变

化,以适应新型清洁能源发动机润滑需求。

### 参考文献:

- [1] International Maritime Organization (IMO). The international maritime organization's initial greenhouse gas strategy [R]. London: IMO's Marine Environment Protection Committee (MEPC), 2018.
- [2] 陈俊军,汪传旭. 低碳背景下空箱调运与船舶航速决策[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2015, 39(4):828-832.  
CHEN Junjun WANG Chuanxu. Empty Containers Repositioning and Sailing Speed Decision Under the Background of Low Carbon[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science&Engineering, [2]2015, 39(4):828-832.
- [3] 曾维武,严治军,董景明等. 船舶主机余热回收 ORC 低碳工质选择研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(6):1214-1219.  
ZENG Wei-Wu, YAN Zhi-Jun, DONG Jing-Ming. Research on Selection of Low Carbon Working Medium for ORC of Ship Main Engine Waste Heat Recovery[J]. JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS, 2018, 39(6):1214-1219.
- [4] Richard Karslen, George Papachristos, Nishatabbas Rehmatulla. An agent-based model of climate-energy policies to promote wind propulsion technology in shipping [J]. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2019, 31:33-53.
- [5] 樊志远,江文成. 船舶低碳技术未来发展重点方向[J]. 中国船检, 2019年07期:70-73.
- [6] 罗肖锋,吴顺平,雷伟,涂环,秦傲寒. 船舶能源低碳发展趋势及路径[J]. 中国远洋海运, 2021,(03):46-51.
- [7] 涂环. 清洁能源船用适应性综合分析[J]. 中国船检, 2022(01): 58-62.
- [8] 吕龙,德熊莹. 船舶动力路径从常规燃料到低碳零碳排放[J]. 广东造船, 2021,40(06):4-11.
- [9] Christoforos M, Theotokatos G. Numerical investigation of a premixed combustion large marine two-stroke dual fuel engine for optimising engine settings via parametric runs[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 160: 48-59.
- [10] 马义平,王忠诚,时继东. 曼恩和瓦锡兰船用二冲程双燃料发动机之比较[J]. 船舶, 2015, 26(5): 94-99.

- MA Yi-ping, WANG Zhong-cheng, SHI Ji-dong. Comparison of two-stroke dual-fuel marine engine between MAN and WARTSILA[J]. Ship&Boat, 2015, 26(5):94-99
- [11] 邵长胜, 王谦, 陈广平等. 天然气/柴油双燃料射流喷射及其相互作用试验[J]. 内燃机学报, 2018, 36(3): 214-221.
- Shao Changsheng, Wang Qian, Chen Guangping. Experiment on Diesel/Natural Gas Dual-Fuel Jet and Their Interaction[J]. Transactions of CSICE, 2018, 36(3): 214-221.
- [12] 冷先银, 何东泽, 何志霞, 王谦, 隆武强, 曹波. 点燃型预燃室在大缸径甲醇发动机上的应用[J]. 内燃机工程, 2021, 42(5): 60-69.
- LENG Xianyin, HE Dongze, He Zhixia, Wang Qian, LONG Wuqiang, Cao Bo. Application of Ignition Pre-Chamber in a Large-Bore Methanol Engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2021, 42(5): 60-69.
- [13] 姚春德, 余海涛, 王全刚, 等. 机车中柴油机应用柴油/甲醇二元燃料的燃烧特性研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(3): 38-43.
- Yao Chun-de, YU Hai-Tao, WANG Quan-gang. Combustion Characteristics of Locomotive Medium-Speed Diesel Engine Using Diesel/Methanol Compound Combustion Mode[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(3): 38-43.
- [14] 黄超伟, 聂志斌, 秦炳甲等. 国内外双燃料发动机发展现状[J]. 内燃机与配件, 2018(17): 67-70.
- HUANG Chao-wei, NIE Zhi-bin, QIN Bing-jia. Current Development Situation of Dual-fuel Engines Both at Home and Abroad[J]. Internal Combustion Engine&Parts, [14]2018(17): 67-70.
- [15] Stefan M., Johan S. Performance and Emission Results from the MAN B&W LGI Low-Speed Engine Operating on Methanol [C]. Helsinki: CIMAC Congress, 2016
- [16] Kobayashi H, Hayakawa A, Somarathne K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1): 109-133.
- [17] Pavlos D., Rahat J. A Review of Ammonia as a Compression Ignition Engine Fuel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45:7098-7118.
- [18] MAN Energy Solutions. Engineering the Future Twostroke Green-Ammonia Engine [EB/OL]. https://marine.man-es.com/two-stroke/technical-papers, 2019-09-17.
- [19] Nag, S., Sharma, P., Gupta, A., et al. Combustion, Vibration and Noise Analysis of Hydrogen-Diesel Dual Fuelled Engine. Fuel, 2019, 241, 488-494.
- [20] 赵正华, 汤仲平, 金鹏, 张勤, 焦军平. 国内固定式燃气发动机油发展现状及其性能特点[J]. 润滑油, 2011, 26(6): 2-15.
- ZHAO Zheng-hua, TANG Zhong-ping, JIN Peng, Zhang Qin, Jiao Jun-ping. The Development Status and Performance Features of Fixed Gas Engine Oil in China[J]. LUBRICATING OIL, 2011, 26(6): 2-15.
- [21] 余海波, 曹聪蕊, 刘功德, 董占春. 双燃料发动机专用油的开发及应用[J]. 润滑油, 2013, 28(4): 10-18.
- SHE Hai-Bo, CAO Cong-Rui, LIU Gong-De, DONG Zhan-Chun. The Development and Application of Dual-Fuel Engine Oil[J]
- [22] 郑尊清, 毛一玲, 刘腾等. 预燃室式柴油天然气双燃料船用发动机热效率优化燃烧控制策略仿真研究[J]. 内燃机工程, 2020, 41(6): 19-27.
- ZHENG Zunqing, MAO Yiling, LIU Teng. Simulation Study on Improving Thermal Efficiency of Diesel/Natural Gas Dual Fuel Marine Engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, [22]2020, 41(6): 19-27.
- [23] Takeuchi K, Fujimoto K, Hirano S, et al. Investigation of engine oil effect on abnormal combustion in turbocharged direct injection - spark ignition engines[J]. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, 2012, 5(3): 1017-1024.
- [24] Morikawa K, Moriyoshi Y, Kuboyama T, et al. Investigation and Improvement of LSPI Phenomena and Study of Combustion Strategy in Highly Boosted SI Combustion in Low Speed Range[J]. SAE Technical Paper 2015-01-0756, 2015.
- [25] 龙岩. 机油诱发早燃和超级爆震的燃烧基础研究[硕士学位论文]. 北京: 清华大学汽车工程系, 2016.
- [26] 杨友文, 周舟, 刘红美等. 发动机机油对增压直喷汽油机低速随机早燃的影响[J]. 内燃机工程, 2015, 36(4): 58-61.
- YANG You-wen, ZHOU Zhou, LIU Hong-mei. Effect of Engine Oil on Low-Speed Stochastic Pre-Ignition from Turbocharged DI Gasoline Engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering.
- [27] 徐瑞峰, 金理力, 金志良, 汪利平, 陈鲜伟. 甲醇发动机油中抗磨剂的考察[J]. 合成润滑材料, 2021, 48(4): 5-8.

---

Xu Ruifeng, Jin Lili, Jin Zhiliang, Wang Liping, Chen Xianwei. Investigation on Antiwear Additives in Methanol Engine Oils[J]. SYNTHETIC LUBRICANTS, [27]2021,48(4);5-8.

[28] 姜宇昊. 甲醇发动机机构化关键摩擦副润滑摩擦性能影响研究[硕士学位论文].江苏: 江苏大学动力工程系, 2021.

[29] 毛晨林,王平,Prashant Shrotriya,何宏凯,Antonio Ferrante, 含氨燃料预混火焰的层流火焰速度及 NO 排放特性 [J] .化工学报,2021,72(10):5330-5343.

MAO Chenlin, WANG Ping, Prashant Shrotriya, HE Hongkai, Antonio Ferrante, Laminar flame speed and NO emission characteristics of premixed flames with different ammonia-containing fuels[J]. CIESC Journal,[29]2021,72(10):5330-5343.