

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2023.01.002

船用中高速机低碳零碳技术发展现状及展望

王 洋, 曹 群, 刘 龙

(哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150009)

摘 要: 介绍国内外船舶排放法规, 指出作为传统船舶动力的中高速柴油机须进行技术优化以逐步实现碳减排, 满足排放法规以及能源政策的要求。分别以天然气和甲醇为例介绍低碳燃料在船用中高速机中的应用, 以氢气和氨气为例介绍零碳燃料在船用中高速机中的应用。在此基础上预测未来船用中高速机用燃料的发展。

关键词: 中高速机; 排放; 低碳; 零碳; 燃料

中图分类号: TK428.9; TK438.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2023)01-0008-08

Development Status and Prospect of Low and Zero Carbon Technologies Used on Marine Medium and High Speed Engines

WANG Yang, CAO Qun, LIU Long

(Harbin Engineering University, Harbin 150009, China)

Abstract: The domestic and foreign ship emission regulations are introduced. It is pointed out that the medium and high speed diesel engines, as traditional ship power, should be optimized to gradually realize carbon emission reduction and meet the requirements of emission regulations and energy policies. Taking natural gas and methanol as examples, the application of low carbon fuel in marine medium and high speed engines are introduced. Hydrogen and ammonia are taken as examples to introduce the application of zero carbon fuel in marine medium and high speed engines. On this basis, the development of fuel for medium and high speed marine engines in the future is predicted.

Key words: medium and high speed engine; emission; low carbon; zero carbon; fuel

0 引言

海洋占全球总面积的 71% 左右。海上运输占全球运输的 80% 以上, 是贸易货物的主要运输方式, 具有成本低、运输量大的优点。目前全球 100 t 以上船舶已达 10 万艘, 总运力升至 21 亿 t, 是海上航运的主要载体。作为船舶主要动力源, 柴油机能够为船舶的安全运行提供充足的动力, 具有良好的动力性和经济性。根据发动机转速的不同, 船用柴油机可以分为低速机、中速机以及高速机。

低速机是指转速低于 300 r/min 的发动机, 燃油消耗率非常低, 主要应用于国际海运领域的大型船舶。中速机和高速机 (统称中高速机) 是指转速高于 300 r/min 的发动机, 多以四冲程为主, 体积相对较小, 主要应用于内河航路的中小型货船、客船、快艇等体积较小的船舶, 也可以作为远洋大型船舶的辅助动力设备^[1]。中高速机适用的船舶类型较为广泛, 并且具有较高的输出功率, 因此在船用发动机总量中的占比较高, 是目前船用发动机研究的重点。

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-12-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52130605); 天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金项目(K2022-03)

1 船舶减排要求

目前大多数船舶采用柴油或含硫量较高的化石燃料发动机，而化石燃料的过度使用造成了每年船舶 CO₂ 的排放量占全球排放总量的 6% 左右，并且由于船舶排放的标准低于机动车，船舶排放污染物中 NO_x 与硫化物的排放占全球排放总量的 20% 以上。船舶运行排放的污染物已经对海洋河流以及大气环境造成严重的污染，各个国家及地

区先后出台各种法律对船舶排放进行限制^[2]。表 1 展示了国内外船舶废气排放的法规，各个国家区域对于 PM、NO_x、HC 和 CO 分别进行了不同的排放限制。我国拥有天然河流 5 800 多条，河流总长 43 万 km，水路运输资源比较丰富，船舶废气的排放法规较为宽松，但是对于不同排量的船舶进行了更为详细的划分。因此，作为传统船舶动力的中高速柴油机须进行技术优化以逐步实现碳减排，满足排放法规以及能源政策的要求。

表 1 国内外船舶废气排放法规^[2]

排放法规	单缸排量/L	额定净功率 P/kW	CO 排放/ $(\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	HC 排放/ $(\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	NO _x 排放/ $(\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	年份
EPA Tier 4	—	$P\geq 600$	—	0.19	1.8	2017
EU Stage V	—	$19\leq P<75$	5.0	4.70	4.7	2019
	—	$75\leq P<130$	5.0	5.40	5.4	
	—	$130\leq P<300$	3.5	1.00	2.1	
	—	$P\geq 300$	3.5	0.19	1.8	2020
GB 15097—2016 (第二阶段)	$5\leq\text{单缸排量}<15$	$P<2\,000$	5.0	6.20	6.2	2021
		$2\,000\leq P<3\,700$	5.0	7.80	7.8	
		$P\geq 3\,700$	5.0	7.80	7.8	
	$15\leq\text{单缸排量}<20$	$P<2\,000$	5.0	7.00	7.0	
		$2\,000\leq P<3\,700$	5.0	8.70	8.7	
		$P\geq 3\,700$	5.0	9.80	9.8	
	$20\leq\text{单缸排量}<25$	$P<2\,000$	5.0	9.80	9.8	
		$P\geq 2\,000$	5.0	9.80	9.8	
	$25\leq\text{单缸排量}<30$	$P<2\,000$	5.0	11.00	11.0	
		$P\geq 2\,000$	5.0	11.00	11.0	
		$P\geq 2\,000$	5.0	11.00	11.0	
		$P\geq 2\,000$	5.0	11.00	11.0	

注：“—”代表法规中无相关描述。

2 低碳燃料在船用中高速机中的应用

船用发动机燃烧柴油会造成大量的碳排放，对生态环境造成不可逆转的破坏，故研究人员考虑使用其他燃料代替这种化石燃料。其中，天然气、甲醇等燃料由于具有较高的氢碳比，碳排放强度较低，并且燃料中基本不含硫、氮等物质，因此受到业界的青睐。

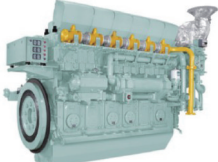
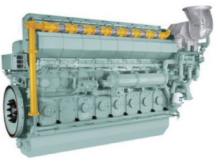
2.1 天然气

天然气的主要成分是 CH₄，由 C 和 H 两种元素组成，作为船用燃料可以产生很高的能量，满足船舶运行的动力需求。天然气燃烧后的产物多为水和 CO₂，对环境污染较小。天然气发动机最早使用于车辆上，如今在船用发动机上也得到了广泛的应用。Wärtsilä 是最早对船用双燃料发动机开展研究的公司，在 20 世纪 90 年代推出的 20DF 发动

机目前仍在使用。表 2 为几种常见的中高速天然气双燃料发动机及其技术参数。目前，国内对天然气发动机的研发工作主要集中在汽车发动机领域，在船用发动机领域的研究与国外存在一定的差距。

船用天然气发动机多以天然气-柴油双燃料发动机为主。天然气双燃料发动机在柴油机的基础上增加了一套天然气供给系统，可以实现天然气和柴油燃料之间的切换使用。根据天然气的进气方式不同，天然气双燃料发动机可以分为缸外进气发动机和缸内进气发动机，其中缸内进气发动机还分为高压直喷发动机和低压预混发动机两种^[3]。天然气高压直喷发动机能在缸内实现油气分层燃烧，可有效改善双燃料发动机的燃烧过程，降低发动机爆震概率，被认为是最理想的船用天然气发动机^[4]。然而高压天然气喷射到缸壁上时，温度会降低，促进 HC 的生成。由于压缩比与燃烧效率较高，缸内 NO_x 的生成量也会增加^[5]。

表 2 中高速天然气双燃料发动机

项目	34DF (Wärtsilä)	6EY26DF (Yanmar)	6EY22ALDF (Yanmar)	20DF (Wärtsilä)
缸径/mm	340	260	220	200
冲程/mm	400	385	320	280
发动机转速/ (r·min ⁻¹)	750	750	900	1 200
每循环单缸输出功率/kW	500.0	255.5	183.0	185.0
平均有效压力/MPa	2.20	2.00	2.01	2.10
发动机实机				

研究人员对天然气双燃料发动机进行了一系列的技术优化,改善了天然气双燃料发动机的性能^[6-7]。纯天然气在发动机中难以压燃,并且燃烧效果较差,因此通常采用柴油引燃天然气。林煜^[8]利用 Converge 软件对燃料替代率为 30%、50%、70% 时发动机的性能进行了仿真模拟。结果表明,70% 的燃料替代率可以获得较低的缸内燃烧压力与温度,提高输出功率,并可有效降低燃料消耗率。龙焱祥等^[9]在不同负荷工况下进行天然气替代率试验,寻求不同负荷时实现低污染排放的最佳替代率。试验结果表明,在中高负荷下采取高替代率具有较好的经济性与排放性,但在满负荷下过高的替代率会造成 NO_x 的过量排放。除此之外,研究人员还针对高压直喷天然气发动机的喷射策略进行了大量优化研究。针对引燃柴油喷射, YOUSEFI 等^[10]进行了 Ricardo E6 双燃料发动机柴油喷射正时影响试验,结果表明提高柴油的喷射正时可明显提高发动机的热效率,减少排气排放物。MOUSAVI 等^[11]利用 KIVA-3V 软件模拟仿真双燃料发动机的燃烧过程,试验发现柴油喷射角由上止点前 17° 变为上止点前 70° 时, HC 和 CO 的排放分别下降 98% 和 99%, NO_x 排放上升 339%。虽然引燃柴油的提前喷射可以提高双燃料发动机的燃烧效率并减少温室气体排放,但在高负荷工况下会因缸内剧烈燃烧引发严重的发动机爆震倾向。针对这一现象, YOUSEFI 等^[12]通过试验证明对引燃柴油进行分段喷射不但可以有效降低爆震的发生,而且可在一定程度上提升双燃料发动机的燃烧热效率。

针对天然气发动机废气排放问题的废气再循环技术不仅可以降低 NO_x 排放,还可以循环利用废

气中的热能,有效改善天然气发动机的燃烧和排放。天然气不完全燃烧会造成未燃 CH₄ 的排放,并且在实际运行中天然气发动机存在 CH₄ 泄漏的问题,对温室效应的影响远高于 CO₂,因此如何解决 CH₄ 泄漏也是以后研究工作的重点。

2.2 甲醇

甲醇中含有氧元素,碳氢比为 1:4,能够实现自供氧完全燃烧,减少 CO 和 HC 排放。目前研究表明,醇类燃料是内燃机最有前景的液体替代燃料之一。甲醇具有来源广泛,方便存储、运输和加注等优点。目前全球已有 14 艘甲醇船舶投入使用,另有 14 艘正在建造^[13]。这些甲醇发动机在低速柴油发动机的基础上增加了一套甲醇供给装置,性能有待进一步优化。Wärtsilä 即将交付一款 32DF 甲醇双燃料发动机。这款发动机配备了单独的甲醇燃料供给系统,能够对甲醇进行简单的处理和储存,实现可靠的燃烧,如图 1 所示。中船动力集团也正在研发 320 mm 缸径的甲醇燃料中速机,预计近期完成研制。此款甲醇中速发动机在保证功率和热效率的同时,能够实现 95% 以上的甲醇替代率,并可降低 30% 的 NO_x 排放以及 10% 的 CO₂ 排放。此外, WinGD、Rolls-Royce、Caterpillar、Cummins 以及中船等企业目前也都在开发船用甲醇发动机。

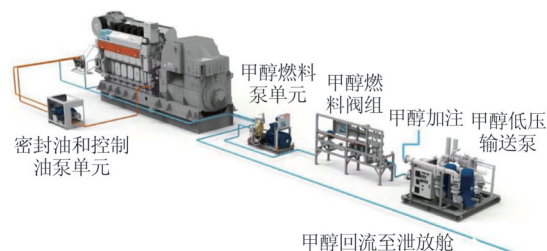


图 1 Wärtsilä 32 甲醇燃料发动机

甲醇发动机主要分为纯甲醇发动机和柴油-甲醇双燃料发动机。其中，纯甲醇发动机存在压缩困难以及冷启动困难的问题，目前并不能很好地适用于船舶，故目前甲醇发动机以柴油-甲醇双燃料发动机为主。柴油-甲醇双燃料发动机的燃料供给方式可以分为直接混合法、气道喷射法以及缸内直喷法^[14-17]。

直接混合法事先将甲醇与柴油按照一定的比例进行混合，然后将混合好的燃料通过喷射系统喷入缸内。这种方式可以直接使用原机的燃料喷射系统，对原机改动较小。甲醇与柴油的性质具有较大的差异，当甲醇掺混比例较大时通常要使用助溶剂促进混合。

气道喷射法是在原机的基础上加装一套甲醇进气道喷射装置，甲醇通过进气道与空气一起通入缸内，而柴油则使用原机的高压喷射装置，可以实现甲醇与柴油的任意配比。甲醇在进气道喷射时会有部分甲醇残留在进气道，无法实现甲醇精准喷射；混合气也会受到节气门开度的影响，不利于燃烧效率的提高。

缸内直喷法通过加装一套单独的甲醇高压喷射装置，可以实现甲醇和柴油的缸内高压直喷，改善甲醇进气道喷射损失的问题。对于不同工况，可以分别调节甲醇和柴油的喷油量，从而实现甲醇和柴油的灵活配比，实现柴油-甲醇双燃料发动机的高效清洁燃烧。船用中高速发动机气缸盖设计紧凑，很难在其上面安装新的喷油器，为此研究人员提出了同一喷油器调节不同燃油管道的开关时刻以实现甲醇和柴油分层喷射的概念。这种分层喷射法不仅可以解决喷油器的安装问题，还可以利用柴油点燃甲醇，是未来柴油-甲醇双燃料发动机研究的重点。

与柴油相比，甲醇的热值和理论空燃比偏低，动力黏度也低得多，柴油-甲醇双燃料发动机中甲醇的替代比例较低，为此研究人员对甲醇的燃烧特性以及双燃料发动机的进气参数、喷射策略等进行了优化研究，实现了较高的甲醇替代率以及燃烧热效率，并降低废气中PM、碳烟以及NO_x的排放。WU等^[18]研究了甲醇替代率以及柴油晚喷策略对排放性能的影响，结果表明甲醇替代率为50%时，PM和NO_x均下降30%左右，而采用柴油晚喷策略最多可使NO_x排放减少12.9%。NING等^[19]研究了喷油时刻和甲醇替代率对燃烧和排放的影响，结果表明更高的甲醇替代率可以增加点

火延迟时间并减少燃烧持续时间，在替代率不变时推迟喷油时刻可以提高缸内压力峰值，并降低最大放热速率。LI等^[20]研究了柴油和甲醇的喷射正时对燃烧和排放的影响，结果表明提前进行柴油和甲醇的喷射可以降低燃料消耗与碳烟排放，但噪声和NO_x排放会随之增加。甲醇双燃料发动机除可以与柴油混合外，还可以与其他燃料掺混燃烧。MAURYA等^[21]以四冲程发动机为试验机进行了甲醇-乙醇混合燃料与汽油的对比，结果表明：在均质压燃点火工况下，混合燃料的着火温度较低；在空燃比相同工况下，混合燃料的指示平均有效压力更高；在均质压燃燃烧工况下，混合燃料燃烧时排放的NO_x更低。

值得注意的是，甲醇作为燃料燃烧时会生成甲醛、未燃甲醇等非常规排放物，对环境以及人们的生命安全造成危害。此外，甲醇具有较强的腐蚀性，对有机物有一定的溶解作用，会使橡胶和垫圈等变软。因此，如何解决甲醇的这些问题是甲醇在中高速船用发动机中应用的关键。

3 零碳燃料在船用中高速机中的应用

上述替代燃料虽然可以减少碳排放，解决化石能源短缺以及环境污染的问题，但它们的燃烧产物中仍含碳，无法彻底实现零碳排放。因此，研究人员开始关注氢气、氨气等不含碳元素的新型燃料，研究它们在船用中高速发动机上应用的可行性，发现它们可以实现全生命周期的零碳排放，是未来实现“双碳”目标的理想燃料。

3.1 氢气

氢气是一种无色的气体。燃烧1 g氢能释放出142 kJ的热量，并且氢气完全燃烧的产物是水，没有灰渣和废气，不会污染环境。氢气作为替代能源的突出特点是无污染、效率高、可循环利用，因此受到研究人员的青睐。作为船用发动机的替代燃料，氢气受制于“异常燃烧”的限制，无法在大缸径的船用发动机中稳定燃烧^[22]。为此，Wärtsilä公司提出了氢气掺混天然气的想法，通过双燃料的掺混燃烧改善氢气的“异常燃烧”形象，并实现了氢气在船用发动机中的应用^[23]。Anglo Belgian、CMB等公司也对氢气双燃料发动机进行了一系列研究优化，提高了双燃料中氢气的占比。目前仍然无法实现纯氢气在船用发动机中的应用，这也将是未来研究的重点。

表3展示了比利时ABC公司的几款船用中高速氢燃料发动机。这些双燃料发动机能够实现85%氢燃料与15%柴油的燃料配比,CO₂排放量减少高达85%。此外,日本的Kawasaki Heavy Industries、

NYK Group等公司也在开发氢燃料发动机,预计在2026年左右推出一系列可用于各种船型的氢燃料中高速船用发动机。

表3 ABC公司船用中高速氢燃料发动机

项目	6DZD BEHYDRO	8DZD BEHYDRO	12DZD BEHYDRO	16DZD BEHYDRO
冲程	四冲程	四冲程	四冲程	四冲程
喷射方式	燃料直喷	燃料直喷	燃料直喷	燃料直喷
气缸数/个	6	8	12	16
功率/kW	1 013	1 352	2 018	2 704
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000	1 000	1 000	1 000
排放标准	IMO Tier III & EU Stage V	IMO Tier III & EU Stage V	IMO Tier III & EU Stage V	IMO Tier III & EU Stage V
发动机实机				

氢燃料发动机根据燃料喷射方式的不同分为进气道喷射发动机和缸内直喷发动机。进气道喷射发动机中氢气与空气的混合时间较长,燃烧及排放效果较好,但是在进气时氢气占据了部分体积,从而导致进入的空气量减少,造成缸内燃料总热值降低。缸内直喷发动机通过喷油器将氢燃料直接喷入缸内,根据氢气处于气态还是液态,可分为低压预混和高压直喷两种形式,类似于天然气的缸内直喷。与进气道喷射相比,直接喷射可以获得更高的能量密度,减少废气排放。当直喷时刻较晚时,氢气与空气的混合性较差,并且局部燃料过浓也会造成NO_x排放增加。氢燃料发动机同样分为纯氢发动机以及氢双燃料发动机,其中纯氢发动机缸内氢气燃烧速度较快,容易出现工作粗暴以及爆震等问题。氢双燃料发动机通过氢气与其他燃料的混合燃烧,有效改善了氢气燃烧爆震的问题。BAO等^[24]研究了喷油正时以及喷油速度对氢气直接喷射发动机的影响,结果表明随着喷射时间的增加,发动机压缩行程的多变指数上升,并且随着氢气的注入,多变指数急剧增加并剧烈波动。氢气-柴油缸内直喷发动机可以有效改善燃油喷射氢气发动机存在的爆震问题。LIU等^[25]研究了高压氢气喷射正时对缸内燃烧的影响,结果表明较早喷氢时缸内处于预混燃烧状态,而较晚喷氢时缸内处于混合燃烧状态。当氢气占比为50%,喷氢正时为上止点前40°时,

氢气-柴油缸内直喷发动机具有最佳的燃烧热效率。此外,氢气还可以与天然气混合燃烧,氢气和氨气的混合也是研究的重点。ARSLAN等^[26]研究了氢气与天然气混合在发动机中的燃烧特性,结果表明与纯天然气相比,掺氢后的天然气燃料可以优化发动机的燃油消耗和热效率,HC排放也有所降低。

氢气的存储问题也是限制船用氢发动机发展的关键,为此,研究人员提出了可以通过有机液体储氢、甲醇重整制氢、金属水解制氢和合金储氢等方式进行存储^[27]。在实际使用过程中,氢气的成本、安全性和运输同样都是有待解决的问题,并且目前我国对氢气的监管有限,社会对氢燃料的关注也很少。

3.2 氨气

氨气作为脱碳燃料同样适用于船用动力系统。氨气在常温下是一种无色但具有刺激性气味的气体,不含碳元素,并且在氨中氢元素占比为17.6%,具有易获得、易储存、高辛烷值等特点。氨气作为发动机燃料在完全燃烧时产物只有水和氮气,不含其他污染气体,是一种理想的替代燃料。表4为氨与其他化石燃料燃烧特性的对比^[28]。目前,Wärtsilä和MAN这两家欧洲公司对氨燃料船用发动机的研究较为成熟,并且已经有相关的氨燃料船用发动机投入使用,但主要集中于大型二冲程低速机。相比之下,我国对氨燃料船用发动机的研究起步较晚,目前仍处于理论研究阶段。

表 4 燃料燃烧特性对比

项目	柴油	天然气	氨气	氢气
密度/ (g·cm ⁻³)	0. 840	0. 187	0. 770 (液)	0. 071
燃点/℃	220	650	800	400
汽化潜热/ (kJ·kg ⁻¹)	232. 4		1 370	
低热值/ (kJ·kg ⁻¹)	42 700	38 100	18 610	120 000
辛烷值		107	110	130
爆炸极限/%	0. 7~5. 0	5. 0~15. 0	16. 0~28. 0	4. 5~75. 0
能量密度/ (MJ·m ⁻³)	35. 690	7. 134	11. 300	3. 750
最小着火能量/MJ	0. 63	0. 32	680. 00	0. 02

注：空白代表“不适用”。

从氨的特性来看，氨具有作为发动机燃料的潜力，但由于纯氨燃烧时存在较高的点火能量以及较低的燃烧速度，使得氨难以单独作为燃料使用，通常需要其他燃料引燃，因此目前对于氨燃料在发动机中的应用研究多集中于双燃料方案。氢气具有燃烧界限宽、火焰传播速度快以及燃烧温度高的优点^[29]，因此通常被选作引燃燃料与氨气共同燃烧做功。大量的研究^[30-33]表明加入适量的氢气可增加氨燃料的燃烧速度、扩大燃烧范围、增加燃烧强度。LHUILIER 等^[34]的研究表明，在纯氨中掺混 20% 的氢可以实现最佳的工作输出和效率，同时提高发动机的稳定性。YAPICIOGLU 等^[35]经试验发现，随着氨氢混合燃料中氨含量的增加，发动机的能量效率从 35. 70% 降到 28. 74%，但 CO₂ 的排放降低。POCHET 等^[36]研究了不同氨氢掺混比对均质压燃发动机的燃烧影响，结果表明与纯氢燃料相比，70% 氨的混合燃料燃烧效率几乎不变，平均有效压力升高。ROCHA 等^[37]研究了氨燃料掺氢的预混火焰和 NO_x 排放的化学动力模型，结果表明在纯氨中掺混氢气共燃，燃烧火焰的速度呈指数增长，并且废气中 NO_x 的排放显著增加。

此外，氨气除了与氢气混合燃烧，还可与 CH₄、二甲醚（DME）、柴油等燃料混合共燃^[38-40]。作为船舶替代燃料，氨气可以实现船舶的零碳排放，但是其本身热值较低，因此与燃用柴油相比，发动机须燃用更多的氨气才能达到相同的功率。此外，氨气不完全燃烧会产生 NO_x 的过量排放，对环境造成污染。如何解决这些问题也是未来船用氨燃料研究的重点。

4 中高速船用发动机用燃料发展预测

船用替代燃料是实现船舶低碳排放的一个重要方向，包括 LNG、甲醇、氢气、氨气等。图 2

对几种替代燃料进行了对比，可以看到 LNG、甲醇具有较高的能量密度，并且技术也已经较为完善，是目前船用中高速发动机较为合适的替代燃料。然而，LNG 和甲醇燃料在燃烧过程仍然存在含碳化合物的排放，并且 LNG 在使用时存在 CH₄ 泄漏的风险，对环境造成的危害远大于 CO₂，因此 LNG 和甲醇并不能作为船用中高速机最终的替代燃料。在未来十几年内，氨、氢等零碳燃料将逐渐取代 LNG 和甲醇等低碳燃料，而在此期间双燃料技术将作为过渡技术应用于船用发动机。

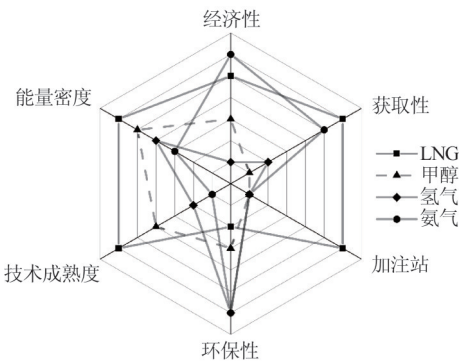


图 2 几种替代燃料的特性比较

5 结论

(1) 天然气是目前在船用发动机上应用最广泛的替代燃料，具有较高的热值，能够满足船舶的运行要求。研究人员对天然气双燃料发动机做了很多研究，技术较为成熟。天然气不完全燃烧会产生未燃 CH₄ 的排放，造成更为严重的环境污染，是其进一步发展的障碍。

(2) 甲醇也是未来船舶的主要替代燃料之一，燃烧产物只有水蒸气和少量碳化合物，是极其清洁的燃料。目前甲醇在船用发动机中主要与柴油混合燃烧，柴油-甲醇缸内高压直喷可以实现高效清洁的燃烧，如何优化柴油与甲醇的喷油策略是

目前研究的关键。此外,甲醇的腐蚀性较强,在储存运输时须采用耐腐蚀的材料,这也限制了甲醇在船用发动机中的应用。

(3) 氢气具有较高能量密度,并且完全燃烧的产物是水,没有灰渣和废气,不会污染环境。作为船用发动机的替代燃料,氢气受制于“异常燃烧”的限制,无法在大缸径的船用发动机中稳定燃烧,因此氢气多与其他燃料混合燃烧。此外,由于低温储存问题,氢无法在船用上大规模应用。如何解决氢的储存问题也是未来重要的研究方向。

(4) 氨气与氢气类似,完全燃烧后的产物不含污染性气体,是一种理想的替代燃料。目前国内对氨气在发动机上的应用仍处于理论研究阶段。

参考文献

- [1] 钱跃华, 刘博, 吴朝晖. 船用低速发动机技术发展综述[J]. 推进技术, 2020, 41 (11): 2418-2426.
- [2] DieselNet. Emission standards [EB/OL]. (2022-06-10) [2022-08-20]. <https://dieselnet.com/standards>.
- [3] ZHU L, LI B, LI A, et al. Effects of fuel reforming on large-bore low-speed two-stroke dual fuel marine engine combined with EGR and injection strategy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45 (53): 29505-29517.
- [4] 聂小焜. 直喷天然气柴油引燃发动机火核形成及燃烧过程的研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [5] 刘娜. 脉冲多次缸内直喷天然气发动机控制策略及试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [6] 黄英杰, 王谦, 芮璐, 等. 过量空气系数对柴油引燃高压直喷式天然气发动机的影响[J]. 通信电源技术, 2019, 36 (7): 12-16. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2019.07.003.
- [7] 杨书乔, 平涛, 李翔. 燃气喷嘴结构对天然气发动机混合气均匀性的影响研究[J]. 柴油机, 2015, 37 (1): 13-16, 30.
- [8] 林煜. 双燃料发动机高负荷时替代率的选取[J]. 内燃机与配件, 2020 (20): 7-9.
- [9] 龙焱祥, 王忠俊. 替代率对船用LNG/柴油双燃料发动机性能的影响[J]. 内燃机, 2016 (2): 44-47.
- [10] YOUSEFI A, GUO H, BIROUK M. Effect of diesel injection timing on the combustion of natural gas/diesel dual-fuel engine at low-high load and low-high speed conditions[J]. Fuel, 2019, 235: 838-846.
- [11] MOUSAVI S M, SARAY R K, BAHLOULI K, et al. Effects of pilot diesel injection strategies on combustion and emission characteristics of dual-fuel engines at part load conditions[J]. Fuel, 2019, 258: 116153.
- [12] YOUSEFI A, GUO H S, BIROUK M. Split diesel injection effect on knocking of natural gas/diesel dual-fuel engine at high load conditions [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115828.
- [13] 王丹, 毕研涛. 航运业应用替代燃料实现碳减排的实践及思考[J]. 国际石油经济, 2021, 29 (6): 17-23, 34.
- [14] JAMROZIK A. The effect of the alcohol content in the fuel mixture on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with diesel-methanol and diesel-ethanol blends [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 461-476.
- [15] WEI L, YAO C, WANG Q, et al. Combustion and emission characteristics of a turbocharged diesel engine using high premixed ratio of methanol and diesel fuel [J]. Fuel, 2015, 140: 156-163.
- [16] PAN W, YAO C, HAN G, et al. The impact of intake air temperature on performance and exhaust emissions of a diesel methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2015, 162: 101-110.
- [17] 李智勇. 柴油引燃缸内直喷甲醇发动机燃烧过程及排放的研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [18] WU T, YAO A, YAO C, et al. Effect of diesel late-injection on combustion and emissions characteristics of diesel/methanol dual fuel engine [J]. Fuel, 2018, 233: 317-327.
- [19] NING L, DUAN Q, KOU H, et al. Parametric study on effects of methanol injection timing and methanol substitution percentage on combustion and emissions of methanol/diesel dual-fuel direct injection engine at full load[J]. Fuel, 2020, 279: 118424.
- [20] LI Z, WANG Y, GENG H, et al. Effects of diesel and methanol injection timing on combustion, performance, and emissions of a diesel engine fueled with directly injected methanol and pilot diesel [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 163: 114234.
- [21] MAURYA R K, AGARWAL A K. Experimental investigations of performance, combustion and emission characteristics of ethanol and methanol fueled HCCI engine [J]. Fuel Processing Technology, 2014, 126: 30-48.
- [22] 曲文静, 孙洪杰, 龚震, 等. 低速二冲程氢气发动机氢气逃逸抑制及混合气质量改善 [J]. 应用科技, 2021, 48 (5): 92-98.
- [23] PORTIN K, STEGAR J, MONNET G, et al. Hydrogen as fuel for Wärtsilä gas engines [C]//CIMAC Congress 2016. Helsinki: CIMAC, 2016: Paper No. 084.
- [24] BAO L Z, SUN B G, LUO Q H, et al. Experimental study of the polytropic index of the compression stroke for a direct injection hydrogen engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45 (52): 28196-28203.

- [25] LIU X, SRNA A, YIP H L, et al. Performance and emissions of hydrogen-diesel dual direct injection (H2DDI) in a single-cylinder compression-ignition engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (1): 1302-1314.
- [26] ARSLAN E, KAHRAMAN N. The effects of hydrogen enriched natural gas under different engine loads in a diesel engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47 (24): 12410-12420.
- [27] 贾江鑫, 洪浩源, 王振. 几种储氢技术在氢燃料电池船舶应用的对比分析 [J]. *船电技术*, 2022, 42 (5): 37-40.
- [28] 郭朋彦, 申方, 王丽君, 等. 氨燃料发动机研究现状及发展趋势 [J]. *车用发动机*, 2016 (3): 1-5, 13.
- [29] 秦豪杰, 申方. 掺氢氨发动机的燃烧理论研究 [J]. *河南科技*, 2017 (1): 137-140.
- [30] WANG D, JI C, WANG S, et al. Numerical study of the premixed ammonia-hydrogen combustion under engine-relevant conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (2): 2667-2683.
- [31] ZHU R, ZHAO M, ZHANG H. Numerical simulation of flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in ammonia-hydrogen-oxygen mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46 (1): 1273-1287.
- [32] SHRESTHA K P, LHUILLIER C, BARBOSA A A, et al. An experimental and modeling study of ammonia with enriched oxygen content and ammonia/hydrogen laminar flame speed at elevated pressure and temperature [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38 (2): 2163-2174.
- [33] CHEN J, JIANG X, QIN X, et al. Effect of hydrogen blending on the high temperature auto-ignition of ammonia at elevated pressure [J]. *Fuel*, 2020, 287: 119563.
- [34] LHUILLIER C, BREQUIGNY P, CONTINO F, et al. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions [J]. *Fuel*, 2020, 269: 117448.
- [35] YAPICIOGLU A, DINCER I. Performance assesment of hydrogen and ammonia combustion with various fuels for power generators [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43 (45): 21037-21048.
- [36] POCHET M, TRUEDSSON I, FOUCHER F, et al. Ammonia-hydrogen blends in homogeneous-charge compression-ignition engine [J]. *SAE technical paper*, 2017, 2017-24-0087. (2017-09-04) [2022-09-30]. DOI: 10.4271/2017-24-0087.
- [37] ROCHA R C, COSTA M, BAI X S. Chemical kinetic modelling of ammonia/hydrogen/air ignition, premixed flame propagation and NO emission [J]. *Fuel*, 2019, 246: 24-33.
- [38] TERAMOTO K, IWAI H, KISHIMOTO M, et al. Direct reforming of methane-ammonia mixed fuel on Ni-YSZ anode of solid oxide fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45 (15): 8965-8974.
- [39] TAY K L, YANG W, CHOU S K, et al. Effects of injection timing and pilot fuel on the combustion of a kerosene-diesel/ammonia dual fuel engine: a numerical study [J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 4621-4626.
- [40] REITER A J, KONG S C. Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel [J]. *Fuel*, 2011, 90 (1): 87-97.