DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.02.015

我国氨氢动力海上船舶创新发展研究

胡玉真，王敏，李灵东，门志国*，赵修涛，朱元清，刘龙

（哈尔滨工程大学海洋科技发展战略研究院，哈尔滨 150001）

摘要：航运业的迅猛发展使得传统船舶的能耗与环境问题日益显现，氨氢动力海上船舶将成为未来海洋交通运载工具的重要发展方向，从而有助于完成“双碳”目标任务和应对国际海事组织温室气体减排战略导向。本文研判了氨氢动力海上船舶的发展需求并全面梳理了国际发展现状，系统分析了氨氢动力海上船舶的关键技术体系，涵盖安全防护、燃料加注、氨重整制氢、海上船舶氨氢动力、可再生能源制氢、基于可再生能源的合成氨工艺、有害污染物排放处理；立足国情，论证提出了我国氨氢动力船舶的阶段性发展目标、上 / 中/ 下游的产业发展要素。研究建议，开展氨氢燃料供应体系、氨氢动力海上船舶基础设施建设等专项规划，加强支持性服务设施的维护，尽快积累工程化经验，为后续大规模产业链及基础设施建设提供依据，稳健推动氨氢动力海上船舶产业创新发展。

关键词：氨氢动力海上船舶；“双碳”；氨重整制氢；氨裂解；制氢

中图分类号：U674　　**文献标识码：**A

Innovative Development of Ammonia–Hydrogen Powered Marine Ships in China

Hu Yuzhen, Wang Min, Li Lingdong, Men Zhiguo*, Zhao Xiutao, Zhu Yuanqing, Liu Long

(Institute of Marine Science and Technology Development Strategy, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The rapid development of the shipping industry has made energy consumption and environmental problems of traditional ships increasingly prominent. Considering the carbon peaking and carbon neutralization goals and the *Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, ammonia-hydrogen powered marine ships will become an important development direction for waterway transportation vehicles. This study explores the demand for and the international development status of ammonia-hydrogen powered marine ships and analyzes the key technologies, involving ship safety, fuel filling, hydrogen production from ammonia reforming, power production from ammonia and hydrogen, hydrogen production from renewable energy, ammonia synthesis based on renewable energy, and treatment of harmful pollutant discharge. Moreover, staged goals and upper/mid/lower-stream industrial elements are examined based on China’s national conditions. To promote the sustainable and innovative development of ammonia-hydrogen powered marine ships in China, we propose the following suggestions: (1) implementing special plans for an ammonia and hydrogen fuel supply system and the infrastructure construction of ammonia-hydrogen powered marine ships, (2) strengthening the maintenance of supportive service facilities, and (3) accumulating engineering experience to provide support for the subsequent large-scale industrial chain and infrastructure construction.

Keywords: ammonia-hydrogen powered marine ships; carbon peaking and carbon neutralization; ammonia reforming; ammonia cracking; hydrogen production

收稿日期：2023-01-13；**修回日期：**2023-03-07

通讯作者：*门志国，哈尔滨工程大学海洋科技发展战略研究院副教授，研究方向为海洋科技战略； E-mail: menzhiguo@hrbeu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“基于氨 – 氢融合一体化运输装备碳中和科技创新战略研究”(2022-XZ-45)；国家自然科学基金项目(71801061)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

当前，人类生活在以化石能源为主要动力用能的社会模式中，而消费化石能源伴生的环境污染问题日益显现。与此同时，近年来航运业发展迅速，80%以上的国际贸易往来通过海上运输实现；每年全球远洋船舶排放的SO_2约占人为排放源的8.1%，NO_x约占排放总量的15.2%[1]。未来若继续采用不可再生能源作为海上船舶的动力用能，将进一步使全球生态环境恶化。国际海事组织（IMO）通过了《IMO船舶温室气体减排初步战略》（2018年）[2,3]，倡导在中长期逐步引入氢、氨等零碳燃料技术，驱动航运业交通运载工具实现CO_2零排放。2020年我国提出了“双碳”战略目标，深入推进能源革命、加快规划建设新型能源体系成为国家要求。这些宏观形势的变化，将引导我国海上船舶绿色发展；将氨、氢等可再生能源应用于远洋船舶，从根源上降低船舶的碳排放量，进而驱动海上船舶新技术研发。

氨、氢虽是良好的船舶能源材料，但单独使用时不可避免地面临技术难题。氢气的储运性能和安全性是制约氢能产业发展规模的“瓶颈”环节，与氨的结合使用有望解决储运成本高、能量密度低、安全性差等应用挑战。氨氢融合动力船舶尚未实现工程应用，主要原因是缺乏适用的动力装置和船上重整制氢相关技术，这也是近年来新能源船舶动力的开发重点[4~8]。

氨氢融合燃料有多层含义：① 存储的氨燃料进行现场重整制氢，将氢作为燃料使用；② 取一小部分氨，通过催化或高温裂解制氢，用氢作为主燃料氨的引燃介质；③ 氨、氢两种燃料按不同的比例进行混烧。对于海上船舶，第一种动力形式仍然以氢为主要燃料，氢的稳定性特性使得规模化存储困难，第三种动力形式也存在类似的问题；从预期的技术发展水平看，第二种动力形式最具前景，规避了氢燃料安全燃烧、氨燃料不易点燃等技术难题。氨、氢燃料的低碳开发技术及商业化已成为氨氢动力海上船舶发展的关键内容，既能降低传统能源消耗量、减少污染物排放，也可激励能源企业转型升级、驱动能源和交通产业链良性循环。可以认为，氨氢动力海上船舶是航运业减排、脱碳的必经之路[9~13]。

针对氨氢动力海上船舶这一全新的发展方向，航运业需及时开展产业发展战略论证，辨识关键技术难题、组织优势力量攻关、引导产业链规划建设。为此，本文开展氨氢动力海上船舶的需求研判、现状梳理、技术分析，提出阶段性发展目标和产业发展要素，以期为船舶创新发展、能源革命深化等研究提供基础参考。

二、发展氨氢动力海上船舶的工程需求

（一）宏观需求

1. 船舶碳排放

在氨氢动力海上船舶的碳排放方面，船舶使用氨和氢作为燃料，此类燃料在正常燃烧过程中不会排放二氧化碳。然而，按照目前的技术水平而言，氨和氢的制取还无法完全实现零碳排放。研究表明，产自化石燃料的液氨和液氢相对于船用轻柴油，全生命周期的温室气体排放比例高达140%和166%。因此，在进行氨氢动力海上船舶碳排放量计算时，需要考虑燃料的全生命周期。

此外，目前国际上对于远洋船舶的碳排放归属国的界定仍不清晰，需要加快制定相关法规完善远洋船舶碳排放的归属政策。随着可再生能源制氢、基于可再生能源的合成氨工艺及海上船舶氨氢动力等技术的发展，预计2060年前，氨氢动力海上船舶可以完全实现零碳排放。

2. 船舶NO_x排放

目前氢能船舶绝大多数采用燃料电池驱动，可以从根源上杜绝NO_x排放。然而，燃料电池的功率不足以驱动海上船舶。因此，以目前的研究水平来看，实现燃料电池驱动氨氢动力海上船舶仍存在一定困难，短时间内内燃机将作为此类船舶发动机研制的主要方向。首先，以大功率低速二冲程氨发动机为代表，目前该种氨内燃机的NO_x排放在没有后处理装置的情况下只能满足国际海事构造二级排放标准（IMO TierII）要求；其次，对于氨氢融合动力船舶，有学者对柴油引燃氨氢混合燃料发动机的NO_x排放水平进行了研究，结果表明随着掺氢比例的增加，NO_x排放量呈增加趋势[14]。在未来，有必要采用成熟的有害污染物排放处理技术将氨氢动力海上船舶的NO_x排放进行完全后处理，消除船舶排放到大气中的有害污染物。

3. 船舶成本

在计算船舶成本时，不仅应考虑船舶的运营成本，同时也应考虑燃料的制备以及船舶后期的维护等成本，即对船舶的全生命周期的成本进行计量。氨氢动力海上船舶和普通海上船舶的主要区别在于动力层面，因此其成本较其他船舶的差异主要集中在氨氢燃料的制备、储存、加注以及使用方面。其中，燃料的制备是消耗最大的一环。从合成氨和制氢的成本来看，目前按天然气 8 美元/百万英热考虑，合成灰氨的成本约为 2750 元/吨，完全成本接近 3300 元/吨（含税），同时，灰氨市场受煤炭价格波动及节能降碳政策影响，合成成本日益升高。若考虑碳捕集与封存的成本，即合成蓝氨，其成本将达到 4000 元/吨以上，且成本也会受煤炭价格和政策的影响。而未来绿氨合成的成本会受新能源发电、电解水制氢以及小型氨合成与分解技术的进步实现稳步下降。同时，随着氨重整制氢技术的发展，未来氢燃料的成本也会受到合成氨成本的影响。研究表明，预计 2030 年产自可再生能源的电制氢、氨燃料的成本将会是船用轻柴油制取氢、氨燃料价格的 3.2 倍，2050 年即可下降到 2.7 倍。因此，随着制取绿氨和绿氢等技术的成熟、新政策的制定以及其他辅助设施的大规模生产，未来氨氢动力海上船舶的总拥有成本（TCO）有望实现稳步下降的趋势[15]。

（二）技术需求

海上船舶作为航运的重要组成部分，与内河船舶相比，其远洋航行过程中产生的碳排放对环境的影响更大。因此，为满足“双碳”目标的迫切需求，更大程度上降低船舶远洋航行过程中的碳排放，推动航运业绿色发展，氨氢动力海上船舶需要一套完整的技术研发体系。

1. 安全层面

推动氨氢动力海上船舶的普及应用并确保船舶能大幅减缓气候变化影响的一个先决条件是要保障燃料有可靠供应以及这些燃料能安全地储存、运输和加注。所以，在短期应首先解决安全层面的技术，才能保证船舶行驶过程中不发生意外，船舶能在指定的航段完成相应的任务。

2. 动力层面

动力技术的实现是保证氨氢动力海上船舶正常航行的决定性条件。因此，只有在短期内解决了船舶动力层面的技术，才能保证氨氢动力海上船舶投入测试以及后续进一步的推广应用。

3. 能源经济层面

在中期阶段，需要解决能源经济层面的问题，主要包括低成本制氢、制氨，并对动力层面技术进一步完善，使得以更低的成本完成船舶动力推进，从而达到降本增效的目的。

4. 环境层面

长期来看，应从环境层面对船舶进行改进，减轻船舶排放污染，主要包括安全制取绿氢、绿氨并及时对船舶排放污染物进行无害化处理。

三、氨氢动力海上船舶的发展现状

目前国内外已经开展了一些关于氨动力海上船舶、氢动力海上船舶及氨氢动力海上船舶的相关研究。其中，氨动力海上船舶目前仍处于前期的技术研发阶段，主要集中于油船、集装箱船、散货船等主流船型及液化气船的研发，全球范围内还没有投入商用的船用氨燃料发动机，也没有投入实际应用阶段的氨燃料动力船，仅有氨燃料预设船舶在运营；氢动力船舶目前一般采用氢燃料电池动力装置和高压储氢设计，其功率等级与传统的柴油机动力有较大差距，故氢动力船舶目前只能作为内河和近海船舶的主动力和远洋船舶的辅助动力；氨氢动力海上船舶的研究仅停留在理论及燃料试验层面。

值得注意的是，海上船舶与内河船舶的主要区别为海上船舶航行距离远且燃料消耗量大，为此，其往往需要能够提供持续动力的大功率发动机。然而，依据目前的技术水平，上述任何一种船舶仍不能满足这一需求，由此可见，氨氢动力海上船舶的发展具有巨大的空间。

（一）氨动力船舶

早在 20 世纪中期即有氨燃料电池的相关研究，近年来已有少量氨燃料电池产品进入实际应用，国际上也已经开展了一些关于氨动力船舶及其动力装置的研究项目。全球首艘氨燃料电池驱动船 Viking Energy 号于 2003 年研发成功[16]；2016 年，美国能源部通过了 REFUEL 计划；2019 年，中国大连船舶重工集团有限公司和德国曼恩集团（MAN）联合设

计的氨动力超大型集装箱船方案通过船级社原则性批准；大宇造船海洋（山东）有限公司、韩国三星重工业株式会社等企业在2020年分别推出了氨燃料苏伊士型油船和23000TEU超大型集装箱船概念设计；2022年，由中国船舶集团有限公司旗下上海船舶研究设计院自主研发设计的中国首创首款氨燃料动力7000车位汽车运输船（PCTC）正式获得DNV颁发的认可证书；MAN集团已经于2020年启动了氨燃料的研发，预计在2024年实现首台氨燃料船舶低速机样机交付；芬兰船用发动机制造商瓦锡兰、挪威海工传动Eidesvik以及挪威国有能源公司Equinor正在合作研发以氨燃料电池为动力、可完成远距离航行的零排放大型船舶，预计最早将于2024年下水，届时将成为首艘用于公海的商业化氨动力船（见图1）。由于氨燃料电池的功率等级尚达不到氨动力海上船舶应用的需求，未来的氨动力海上船舶主要会采用内燃机形式作为动力。

氨作为一种价值高、风险低的零碳燃料，可以同时满足经济性和供给稳定性的要求，对于航运业“双碳”目标的实现具有重要价值。但氨燃料应用的相关技术仍不成熟，配套标准仍有空白，包括其性能、转化技术和利用后可能出现的环境问题。且氨的热值和层流燃烧速度低，本身还是一种有毒化学物质，在高温下也可能与氧气发生化学反应形成有害气体（氮氧化合物）。为促使标准与技术共同协调发展，航运界应紧密结合氨动力船舶技术发展现状，逐一攻克氨动力船舶存在的各方面技术问题，同时出台相关政策引导其总体发展方向，为我国“双碳”目标的早日实现提供支撑和保障。

（二）氢动力船舶

目前关于氢动力船舶的已有研究基本以燃料电池作为动力装置。1990年德国研制了世界上第一个装备氢氧燃料电池的212A型空气动力（AIP）潜艇；2003年10月，德国氢燃料电池推进船舶Alsterwasser号下水运行；2005年，我国研制成功天翔1号氢动力试验船，电池功率2 kW，航速约13 km/h，续航3 h，可搭载2人；挪威的FellowSHIP项目在2011年首次将氢燃料电池成功安装在Viking Lady号海洋供应船上；日本在2015年下水试航首款氢燃料电池渔船；法国在2017年建成了氢–风–光动力船Energy Observer号，该船长30 m，重20 t，采用氢燃料电池系统（22 kW）；2021年中国同时下水蠡湖号游艇和仙湖1号游船两艘氢动力船舶；2020年，挪威启动研发以液态氢为燃料的零排放滚装船Topeka号，计划于2024年投入使用；2021年4月，荷兰开发的氢燃料动力耙吸式挖泥船获原则性批准，计划2024年投入使用（见图2）[17]。

除燃料电池外，氢内燃机也是船舶应用氢能的重要途径。虽然现有的氢内燃机的效率偏低，但功率已能满足拖船和渡船的需求。同时，氢内燃机的成本明显低于质子交换膜燃料电池（PEMFC）。此外，

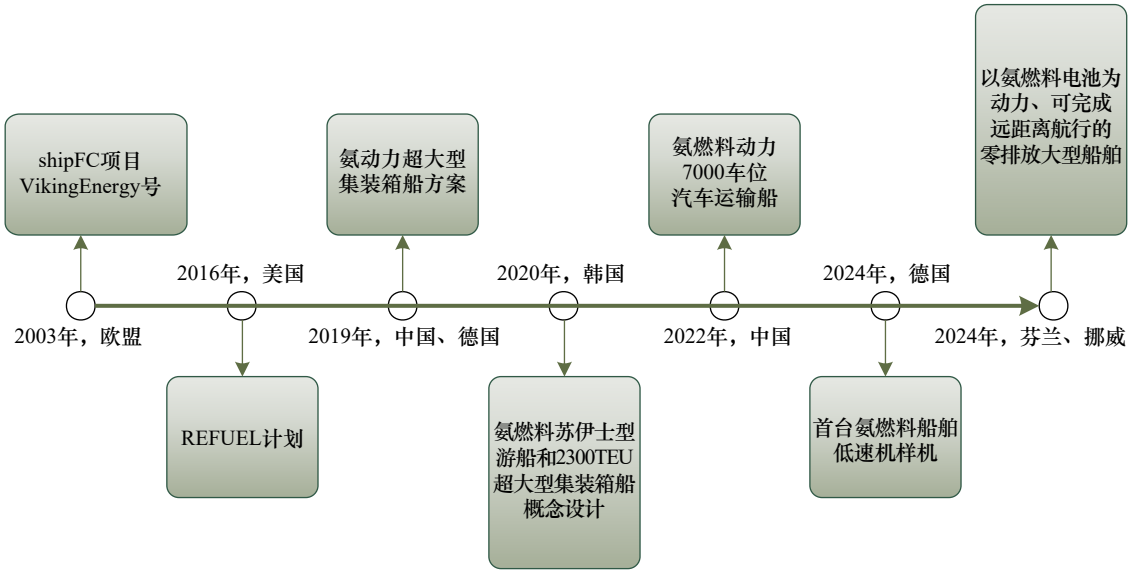

图1　国内外已下水和计划研制的氨动力船舶

氢能源在船舶中的应用也大大减少了各种污染废弃物的排放。美国、德国、欧盟、日本、韩国等先进国家和地区在船用氢能源推进技术领域处于领先地位，已实现船用氢燃料电池动力推进装置的试点及应用。国内的氢动力船舶与国际上先进的氢船舶相比仍存在一定差距，氢能的安全性是影响船舶安全的重要因素，相关产业链也有待进一步建设。

（三）氨氢融合动力

日本近年来十分关注氨氢燃料等新能源船舶项目的研究和开发。韩国现代重工集团造船部门造船与海洋工程（KSOE）在德国杜塞尔多夫开设了全球研发中心，旨在获得与氢燃料电池、氨燃料动力和电力推进相关的下一代造船技术。我国研究机构认为，氨既是氢能载体，也是零碳燃料，对实现“双碳”目标将具有重要意义，而开发储氨—氨裂解纯化制氢—加氢的“一站式”加氢站新模式具有很好的应用前景；2021 年 12 月 10 日，福州大学、北京三聚环保新材料股份有限公司、紫金矿业集团股份有限公司在福州举行绿色能源重大产业项目战略合作签约，创建了国内首个氨–氢能源重大产业创新平台；2022 年，福州大学对传统高压储氢的方式进行改进，实现了低温环境下氨到氢的转化，推动了“氨分解制氢”催化剂的产业化，对氨氢动力海上船舶的发展具有重要意义。图 3 描绘了“氨–氢”能源“绿色碳”循环经济路线未来的应用场景[18]。发展以氨作为清洁高效新能源，既可实现传统合成氨工业节能减排，又能贯通可再生能源和新

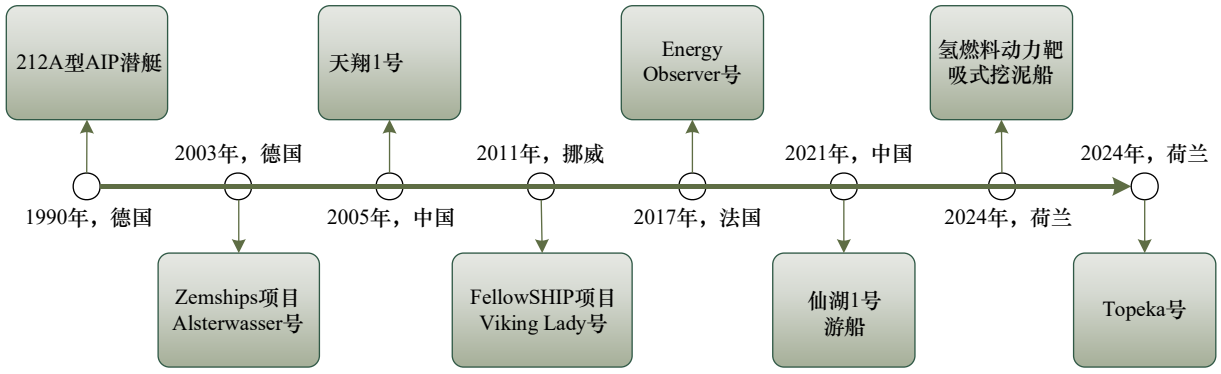

图 2　国内外已下水和计划研制的氢动力船

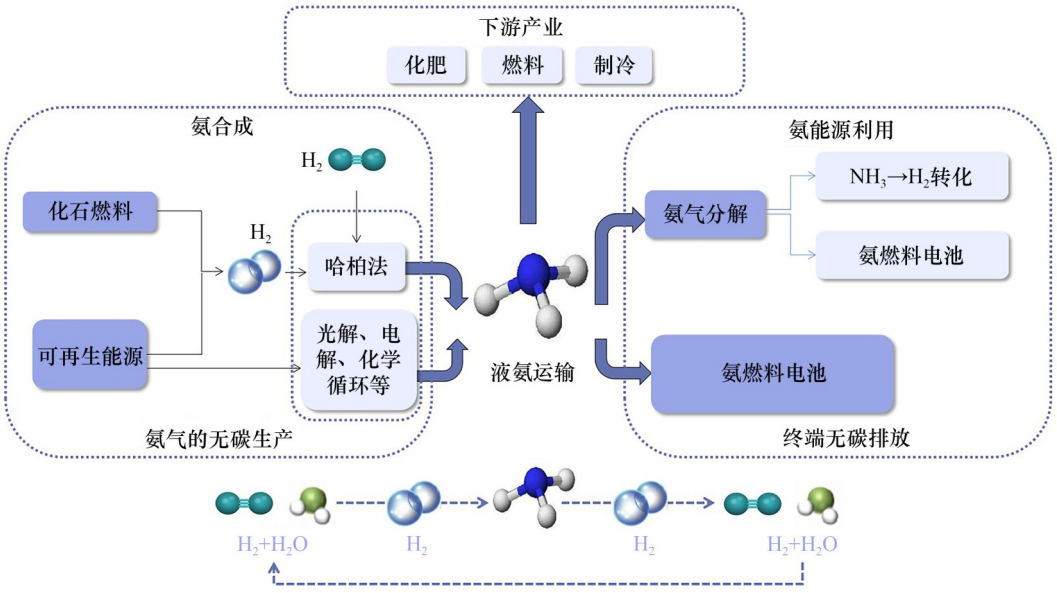

图 3　“氨–氢”能源“绿色碳”循环经济路线应用场景

能源产业，具有巨大的应用前景。制定清洁高效的氨能源发展蓝图有助于实现氨合成的节能减排，同时弥补由氢的储存和运输造成的可再生能源和氢能源产业的差距。2021年有学者开展了关于船用发动机中氨氢混合燃料燃烧性能的研究，结果证明氨氢混合提高了氨的层流燃烧速度，优化了氨的燃烧性能，优于二者单独燃烧时的表现[19]。2022年7月，哈尔滨工程大学提出了一种基于氨氢驱动的复合型船舶混合动力系统及以氢气引燃的氨氢混合燃烧的零碳发动机及控制方法。

船用动力装备特别是远洋船舶，需要较大的功率输出，其动力系统目前主要以燃油为主，排放大量二氧化碳是致命缺陷。而氨氢燃料融合作为船舶动力，可突破氢气难储存、易泄露、氨层流燃烧速度慢的技术难关，亦能提高能源利用的安全性，降低使用成本，实现船舶运行过程中的零碳排放。除此之外，目前已有的氨、氢动力船舶仍以燃料电池作为主要动力，其功率等级相比传统柴油机动力仍存在较大差距，并不适合作为海上船舶动力，无法满足其远洋航行的需求。因此，研发氨氢动力内燃机是发展氨氢动力海上船舶的重中之重。

综上所述，发展氨氢动力海上船舶是国际清洁能源的前瞻性、颠覆性、战略性的技术发展方向，是解决氢能和氨能发展重大瓶颈的有效途径，同时也是实现全球零排放的重要技术路线，对保障国家能源环保安全和社会经济可持续发展具有重要意义。

四、氨氢动力海上船舶关键技术分析

氨氢能源动力船舶技术体系（见图4）分为四个层面，分别为安全层面、动力层面、能源经济层面和环境层面。推动氨氢动力海上船舶的普及应用

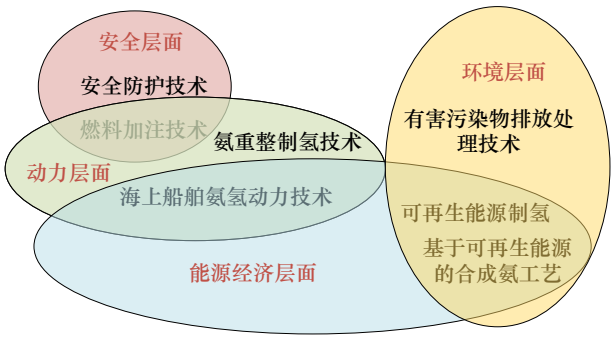

图4　氨氢能源动力船舶技术体系

并确保船舶能大幅减缓气候变化影响的一个先决条件是要保障燃料有可靠供应以及这些燃料能安全地储存、运输和加注。所以，在短期应首先解决安全层面和动力层面的技术，才能保证氨氢动力海上船舶投入测试应用，主要包含安全防护技术、燃料加注技术、氨重整制氢技术及海上船舶氨氢动力技术，中期和长期再从能源经济层面和环境层面改进船舶，从而达到降本增效、减轻船舶排放污染的目的，主要包含可再生能源制氢技术、基于可再生能源的合成氨工艺、海上船舶氨氢动力技术及有害污染物排放处理技术。氨氢动力海上船舶技术体系发展路线图如图5所示。

（一）安全防护技术

氨和氢在储运过程中对设备、人体、环境均有潜在危害风险。首先，氨极易溶于水、乙醇、乙醚和氯仿，溶于水后呈弱碱性，易挥发，具有中等毒性，且具有刺激性气味。人体长时间暴露在氨环境中，可能会损害眼睛、肝脏、肾脏或肺部。氨与皮肤接触，会引起灼热感并使皮肤变红。氨与头皮接触，可能会导致脱发。其次，氢的体积能量密度低，具有易爆的危险性质，且容易发生氢脆现象。因此，氨和氢在船舶上应用时还需要注意安全防护。

1. 氨安全防护技术

氨的安全防护技术目前处于研发阶段。中国船级社武汉规范研究所和上海规范研究所结合国内外对氨燃料动力船舶的实际需求和国际规则最新研究成果，制定了《船舶应用氨燃料指南》；可以有效满足船舶应用氨燃料的发展需求，对于氨燃料船舶的安全发展和水上清洁能源应用具有积极的促进作用，已经通过专家评审。在氨的毒性防护方面，为了避免液氨和气态氨泄漏到货舱、发动机室、压缩机室以及两者之间的区域，可采用以下几种策略：流量和氨检测、将管道放置在单独的管道中、及时通风以及采用本质安全型机舱。同时，由于危险区域和毒性区域的划分，其他舱室的布置应在通风进出口、开口等方面受其限制；在氨的腐蚀性防护方面，目前研究发现氨对铜、铜合金、镍浓度大于6%的合金和塑料具有腐蚀性，当有水分时，这些金属上的氨腐蚀更为剧烈，因此在燃油系统中必须避免使用这些材料。氨在船舶上的安全防护技术仍需要进一步研发。

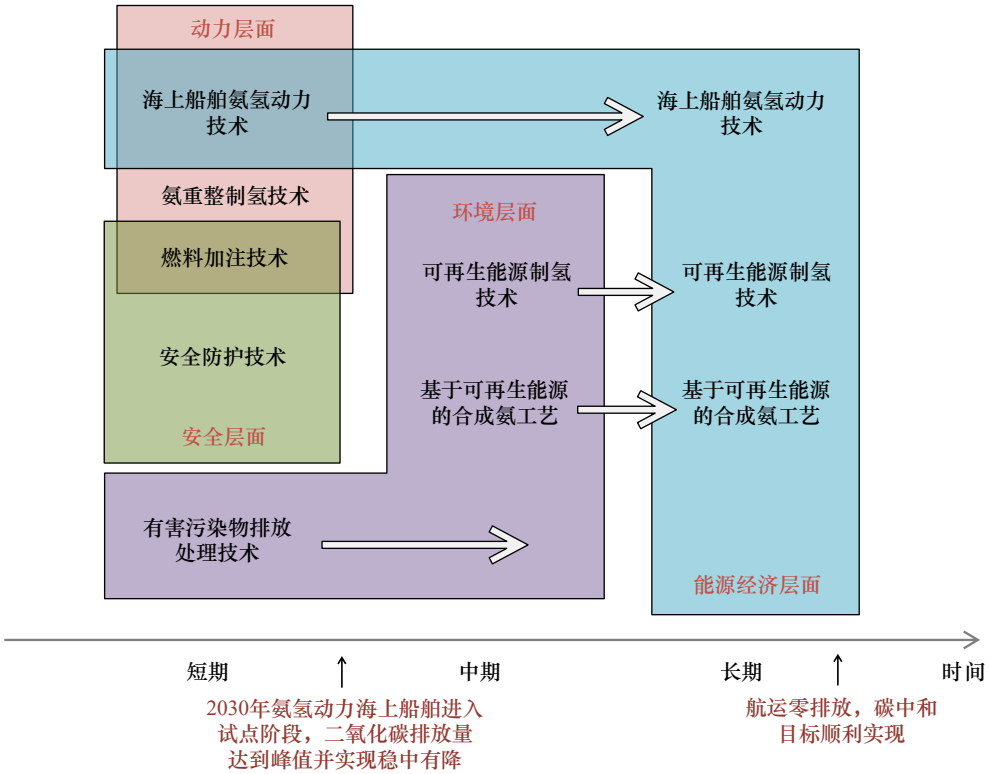

图5　氨氢能源动力船舶技术体系发展路线图

2. 氢安全防护技术

氢的安全防护技术目前处于研发阶段。首先，船舶必须有良好的通风，通风口应设置在较高位置；其次，氢气在管道中输送时要严格控制流速，防止摩擦产生和积聚静电；再次，装有氢气的钢瓶应远离火源、热源、强酸、强碱及氧化剂等化学危险物品；最后，船舶上应安装氢气泄露报警器，保证氢气泄露时相关人员能第一时间发现。除此之外，还需要采取更多的防护措施和技术确保氢燃料在氨氢动力船舶中应用的安全问题。

3. 安全防护技术发展目标

2025—2030 年，工业界可以完成氨氢动力海上船舶安全防护技术的研发。2030—2035 年，安全防护技术可以初步在氨氢动力海上船舶中进行试点和示范应用。在 2035 年后，相关技术可完全成熟，跟随船舶进入商业推广阶段。

（二）燃料加注技术

1. 氨燃料加注技术

（1）发展现状

氨动力海上船舶的燃料加注技术目前正处于研发阶段。2022 年 1 月，商船三井株式会社、伊藤忠商事株式会社和胜科海事有限公司共同设计并开发了世界上第一艘氨燃料加注船；挪威化肥巨头雅苒国际集团（Yara International）近期将在斯堪的纳维亚半岛打造全球首个零碳氨燃料加注网络，为航运业提供绿色氨燃料[20~22]。

（2）攻关内容

氨具有腐蚀性、毒性和易燃性，选择合适的材料可以防止腐蚀，但有毒气体扩散和燃烧的影响却具有高度不确定性，因此，氨动力船舶目前仍存在一些待解决的技术难题。船舶燃料加注具有加注量大，持续时间长的特点，考虑到氨的稳定性和易逃逸问题，加注设备应采用更加可靠的加注连接方式并避免加注过程中燃料与空气接触。同时船舶应具备船岸之间紧急切断的联动功能以满足紧急脱开需要。燃料加注时既要保证动力系统能正常工作，又要保障燃料加注过程中的安全性问题。

2. 氢燃料加注技术

（1）发展现状

氢动力船舶的燃料加注技术目前也正处于研发阶段。由于现有的氢动力船舶储氢方式多样，相应

的加氢方式和耗时不尽相同。在Alsterwasser游船示范项目中，实现了加氢站为氢动力船舶提供氢能，船上最多可存储50 kg氢气，单次加氢过程耗时约为12 min；近期，液氢海运船受到广泛关注，有可能成为新兴的液氢运输方式，如日本Suiso Frotier液氢运输船[23]。

（2）攻关内容

由于氢比空气轻14倍，氢燃料在加注过程中面临着泄露的风险。首先，加氢站所涉及的氢气、氮气物料均属于极易燃物质，因此设计过程中需高度关注安全问题；再次，燃料加注过程中还应考虑风险控制；最后，船舶也应保证具有联动功能的控制系统不断电。

3. 氨氢燃料加注技术

由于氨氢融合动力海上船舶目前还未有试点或示范项目，所以与其相关的燃料加注技术仍处于研究空白阶段，相关部门应尽快开展此技术的研发，同时制定相关的加注作业标准，助力“双碳”目标尽早实现。

4. 燃料加注技术发展目标

2025—2030年，重点解决与燃料加注有关的技术问题。2030—2035年，此项技术预计进入示范应用阶段，将燃料加注技术应用到实际的氨氢动力船舶上。在2035年后，此技术可进入商业推广阶段，即开始投入大规模船舶应用。

（三）氨重整制氢技术

1. 发展现状

与化石燃料相比，氢的体积能量密度较低，这导致氢气的存储需要大量的空间。对于远洋船舶，其大规模储存燃料的需求更为强烈。因此，长期储氢的挑战成为制约氨氢动力海上船舶发展的主要“瓶颈”[24~27]。

氨重整制氢技术或将解决氢储运难的问题。氨是一种无碳富氢气体，理论上氨的储氢密度约为17.6%，是液氢的1.5倍。同时，氨的液化、储存、运输技术成熟，且氨与氢在常规条件下不发生化学反应。由此可见，氨与液氢相比更安全、更易储运，且同体积的液氨重整制取的氢比液氢多至少60%的氢。目前许多国家正在打造基于氨的氢能储运新体系——将氢气与氮气反应合成为氨气，随后将氨气液化，运输到目的地后，再将氨分解为氢气利用。研究表明，氨重整制氢技术形成的“氨–氢”路线在储氢及制氢的总效率上优于传统的压缩储氢路线。因此，氨能是氢能在海上船舶中发展的补充，是氨氢动力海上船舶大规模推广的必经之路。

2. 技术难点

氨重整制氢技术的实现仍存在一些难点。一是高效低温低压合成氨，二是安全低温高效氨分解制氢，其中最关键的是缺少低温氨分解催化剂、自热反应器以及现场制氢加氢成套系统。液氢再气化只消耗很低的能量，而从氨中释放氢需要消耗相对巨大的能量，这阻碍了NH_3作为载体在制氢工业中的应用和推广。除此之外，还需要加快对大功率船舶内燃机排气温度条件下等离子体催化氨裂解重整机理、氨裂解重整气体与氨气混合后的燃烧特性、氨氢预混合燃烧与氨燃料喷雾扩散燃烧耦合的复合燃烧机制以及氨燃料大功率船舶内燃机氨氢复合燃烧控制策略等研究的步伐，实现基于氨燃料的重整制氢，形成富氢气体与氨气混合燃料燃烧，优势互补高效稳定燃烧，降低储运安全风险。英国、德国等国家也已经开始对氨重整制氢技术进行深入探索研究，有望在2026年取得初步研究成果。初步预计我国在未来十年内能攻破该项技术并在2030年后实现商业推广。然而，所有的项目仍在发展之中，它们的商业推广将取决于许多因素，包括发展所需的基础设施（尤其是进口和出口终端）、对氢气和氢基燃料的需求、制定标准、认证计划、适当的监管框架以及相关政策，且氨重整制氢的产业链较长、此技术尚处于萌芽阶段，参与主体较少，产业也面临资金来源少、规模小等客观问题。因此，氨重整制氢技术还有很长的一段路要走。

（四）海上船舶氨氢动力技术

1. 发展现状

氨氢动力技术被认为是减少船用内燃机温室气体排放的最有希望的解决方案。尽管科学界和工业界十分重视，但多数研究集中在小型发动机上，不适用于大型船舶，氢、氨燃料以及氨氢燃料内燃机的实际应用仍然有限且存在一些待解决的技术难题。

2. 氨动力海上船舶动力技术难点

对于氨动力海上船舶，由于其航程较远，目前的主要技术难点还停留在内燃机的设计。由于纯氨的燃烧性能有限。氨气自燃温度高、低火焰速度、

窄可燃极限以及高汽化热的特性可能导致发动机转速非常低或非常高时燃烧条件不稳定。

3. 氢动力海上船舶动力技术难点

对于氢动力海上船舶，目前主要的技术难点在于氢燃料电池技术及氢内燃机技术。对于远洋船舶，由于氢燃料电池续航时间的限制，主要的难题还是在于氢内燃机的设计。其中，重点为氢气在船上的储存和安全性问题。此外，氢气与其他燃料相比不稳定，燃料使用过程中更易发生爆炸；对于氨氢融合动力船舶，燃料的稳定性问题仍有待解决。

4. 氨氢动力海上船舶动力技术难点

目前国外主要研发的是有碳燃料引燃零碳氨燃料的发动机，这种引燃方式并没有做到完全清除碳排放，目前已经有研究团队开始对氨氢融合动力内燃机进行了初步探索。如清华大学团队提出了氨氢融合零碳内燃机的自主创新技术方案，可以实现利用氨裂解生成的氨氢混合气体预燃，多源火焰喷火点燃内燃机缸内的混合气体，实现全过程的零碳排放。试验证明氨氢融合零碳内燃机的效率和动力性能优于柴油机，且此种创新对于内燃机本身的改动并不是很大，只需要对电子控制单元（ECU）电控系统、增压器系统、多点供氨系统、氨氢喷射系统、高能点火系统及氨裂重整系统等九个系统做到零部件的改进即可。然而，目前氨氢融合动力船舶只停留在内燃机的初步研发试验阶段，大规模应用于海上船舶还有很长的路要走。

5. 氨氢动力技术发展目标

工业界正在努力研制氨氢动力海上船舶内燃机， 预计在2024年，作为氨船舶动力的氨内燃机可以进入试点阶段。由于氢内燃机开发面临的问题短时期无法完全解决，还需较长的发展成熟期。随着未来航运界对氨、氢以及氨氢融合动力船舶接受度的提高以及船舶的应用程度的提高，应用前景将非常广阔。

（五）可再生能源制氢技术

1. 发展现状

对于氨氢动力海上船舶应用而言，氢燃料制取技术是重要的一环。当前的制氢方式主要有四种，分别为化石能源制氢、电解水制氢、工业副产氢、光解水与生物质制氢（见表1）。其中，80%以上的氢气生产来源于化石能源制氢，而化石燃料本身是造成环境污染的主要因素。大规模生产低排放氢气需要对可再生能源进行大量投资。电解水制氢、工业副产氢与光解水与生物质制氢等可再生能源产生的氢气是逐步取代化石燃料的理想选择。在过去几年里，包括可再生能源在内的其他制氢技术也有了显著改进，不断增长的可持续氢生产研究表明，氢生产已成为更具商业可行性的技术。因此，基于可再生能源的制氢技术才是未来氢气制取的发展趋势[28~31]。

2. 发展目标

综合来看，未来电解水制氢技术将逐步对化石能源和工业副产制氢技术进行替代。然而，为大幅降低成本，此技术还需进一步研究和在实践中不断创新。中短期来看，我国氢气来源仍将以化石能源制氢为主，以工业副产氢作为补充，可再生能源制氢的占比将逐年升高。预计到2050年，约70%左右的氢气由电解水制氢技术制取，其余30%由生物制氢等其他技术供给。

未来的氨氢动力海上船舶中氢气的制取可以采用电解水制氢的方式。其中，由于船舶所处海上环

表1　制氢方法优缺点对比

制氢方法	分类	优点	缺点
化石能源制氢	煤气化制氢、天然气重整制氢、石油焦和渣油制氢等	技术成熟，适用范围广，可满足近期所需	原料利用率低，工艺复杂，操作难度高，且生成物中的二氧化碳等温室气体使之环保性降低
电解水制氢	电力来源主要包括火电、水电、风电、光电以及核电等	技术较为成熟，工艺简单，无污染，可制备高纯度氢	电耗巨大，能量利用效率仅有70%~80%，成本高
工业副产氢	氯碱工业、煤焦化、合成氨、丙烷脱氢等	可再生能源资源分布广、储量大，成本较低	产氢速率慢，原料具有污染性
光解水与生物质制氢	—	无污染，有工业潜力	光能转化率和产氢速率低，离实用距离尚远

境的特殊性以及氢储存和运输的高成本，海上分布式制氢平台（电解海水制氢）也有利于实现绿氢的生产并直接用于船舶，省去了氢的大规模、长距离运输过程。预计十年之内，材料和其他科学领域的进步可以将电解水制氢的成本降低70%，届时电解水制氢的技术在船上的应用将会非常具有可行性。待技术发展成熟及管道和产氢站等基础设施建设完备，此技术便可以实现商业化应用。

（六）基于可再生能源的合成氨工艺

1. 发展现状

合成氨工艺对人类社会的发展有着重要作用，氨是关系国计民生的基础化工原料，氨促进农作物生长以满足人口增长的需要。目前合成氨主要分为灰氨、蓝氨、绿氨。其中，灰氨指由天然气蒸汽重整制取的氢气、从空气中分离的氮气通过Haber-Bosch法合成氨，此工艺已沿用上百年，是目前最成熟和最主要的合成氨方法。

然而，用Haber-Bosch法合成氨所需的高压和高温条件需要巨大能耗。此外，由于使用天然气等化石燃料生产氢气，需要消耗大量能源，将导致高水平的二氧化碳排放。此种合成氨工艺直接或间接产生碳排放的缺点亟待被解决；如果利用碳捕集利用与封存技术（CCUS）在二氧化碳排放前就对其进行捕捉，此种工艺成本会明显高于灰氨的制取；为了使氨从根源上成为完全脱碳的燃料，可使用可再生电力的电化学合成氨，从而得到绿氨。绿氨是一种在产品生命周期的任何时候都不会排放温室气体的燃料，在实现国际海事组织的脱碳目标方面可以发挥重要作用。因此，可再生能源用于氨的合成被认为是实现该工业过程达成“碳中和”目标的一个具有前景的途径。

2. 技术难点

目前对于合成氨工艺最大的技术挑战在于实现高效率、规模化的绿氨制取以及研发高性能低温低压合成氨的催化剂及反应器。国内外对基于可再生能源驱动的绿氨生产工艺技术进行了大量研究。隶属于韩国科学技术信息通信部的机械材料研究院开发出了一种在常温常压下利用可再生能源生产氨的创新工艺；蒙纳士大学的研究人员使用了一种称为磷离子盐的特殊化学物质，可在室温和常压下直接使用空气、水和可再生能源制氨。此外，国内外也在探索低温低压温和条件下的合成氨工艺。总体来看，电解水制绿氢并采用Haber-Bosch法工艺合成氨的技术路线最为成熟，被认为是最有可能率先实现绿氨产业化的技术路线。

3. 发展目标

目前来看，基于可再生能源的合成氨工艺实现大规模应用还存在一定困难。中短期来看，国内氨气来源将仍以化石能源制氨为主，但随着电化学法合成氨的工业化应用和可再生能源制氢产业规模的扩大，实现灰氨逐渐向蓝氨、绿氨转型，绿氨合成工艺的占比将逐年升高。唯有解决绿氨合成工艺的大规模应用问题，才能有效推动氨氢动力海上船舶的进一步研发。

（七）有害污染物排放处理技术

1. 发展现状

氨动力、氢动力及氨氢融合动力船舶发动机虽然不会排放二氧化碳，但依旧会排出其他有害污染物，这种污染物也是需要处理的。其中，氨燃料发动机会排放未燃尽的氨（氨逃逸）、氮氧化物（NO_x）及笑气（N_2O），其中笑气的温室效应是二氧化碳的296倍；同时由于氢燃料发动机反应条件需要高温，在燃烧燃料时空气中的氮气和氧气也会发生反应转化成NO_x；氨氢融合发动机的排放物中同时包含氨、氢发动机的排放物。目前已经为公路运输过程中排放的有害污染物处理开发了相应的解决办法，未燃烧的氨和NO_x排放可通过发动机标定和更受控的燃烧条件来减少，例如通过应用废气再循环。然而，目前的技术和法规都未曾应用于船用氨燃料内燃机，因此有必要进行进一步研究，以确定并开发针对船用燃料内燃机有效的有害污染物排放处理技术。

2. 技术难点

针对NO_x排放，目前氨排放的政策规定以及处理技术均缺乏。同时解决氨逃逸和NO_x排放问题也是亟需。NO_x排放倾向于在高温燃烧时产生，而在低温下会产生未燃烧的氨，目前没有理想的温度水平同时消除这两种排放物质。此外，如何处理笑气的排放也是亟待解决的问题之一。目前已经有停留在试验阶段的氨氢融合内燃机，此种内燃机结合了污染物生成的化学反应动力学原理，并引入了缸内氨/NO_x双低控制方法，实现了NO_x排放量不大于27 mg·kW·h，氨和笑气的排放量小于10^{-5}数量级。

然而，这种内燃机还需测试在船舶中应用的可靠性。

3. 发展目标

2025—2030年，重点解决船舶中氨气逃逸、笑气、NO_x的处理。2025—2030年，目前存在的技术难点将获得初步解决，有害污染物的排放处理技术将进入到实船中的示范应用阶段。在2035年后，此技术将跟随氨氢动力海上船舶进入商业化推广阶段。

五、我国氨氢动力海上船舶发展目标与产业要素

（一）氨氢动力海上船舶发展目标

发展氨氢动力海上船舶，可以有效降低碳排放，实现由化石燃料或低碳燃料船舶向零碳燃料船舶的转型，从而全面牵引航运领域从氢能、氨能基础设施到终端应用的建设，实现清洁能源转型[32]。立足“双碳”战略目标，依据《IMO船舶温室气体减排初步战略》《中国能源体系碳中和路线图》等行动计划，积极推动氨氢动力海上船舶制氢、储氢以及氨氢融合等关键技术研发，制定氨氢动力海上船舶标准及规范；加快船舶试点、示范应用及商业化推广进程，实现传统船舶制造行业的转型与升级，引领船舶制造业高质量发展（见图6）。

1. 氨动力海上船舶

目前全球范围内没有投入商业使用的船用氨燃料发动机，也暂时没有投入实际应用阶段的氨燃料动力船。2023—2025年，以氨燃料发动机的研发作为研究重点，针对氨燃料发动机研发给予包括资金和政策在内的全面支持。2025—2030年，氨燃料在海上船舶上应用的主要风险在于其毒性、燃爆性和腐蚀性，加之氨燃料目前并未完全实现零碳排放制取，需加强关键技术攻关，重点突破绿氨的大规模制取技术，推动氨动力海上船舶进入试点阶段。2030—2035年，加快氨动力海上船舶示范推广，重点完善相关产业链及基础设施建设，如氨动力海上船舶的燃料围护系统、燃料供应系统及燃料加注系统等。在2035年后，氨动力海上船舶进入商业化推广阶段。

2. 氢动力海上船舶

目前国际上的氢动力船舶研究集中在以氢燃料电池作为船舶动力方面。2023—2025年，我国继续处于以氢燃料电池作为船舶动力的试点阶段。2025—2030年，进入氢内燃机的研发阶段，提高内燃机性能、系统使用寿命及转化效率，重点开发大功率氢内燃机，解决长运行寿命内燃机的可靠性问题；积极推进相关技术研发以提高技术成熟度，如突破可再生能源制氢等前期的燃料制备技术。2030—2035年，争取进入以氢内燃机为动力装置的氢动力海上船舶试点阶段。在2035后，进入氢动力海上船舶的示范推广及商业化推广阶段，完善相关产业链及基础设施建设，如氢燃料加注码头、船舶上的燃料供应及维护系统等。

3. 氨氢动力海上船舶

目前，氨氢融合动力海上船舶没有实船投入应用，主要原因是缺乏可使用的动力装置和船上重整

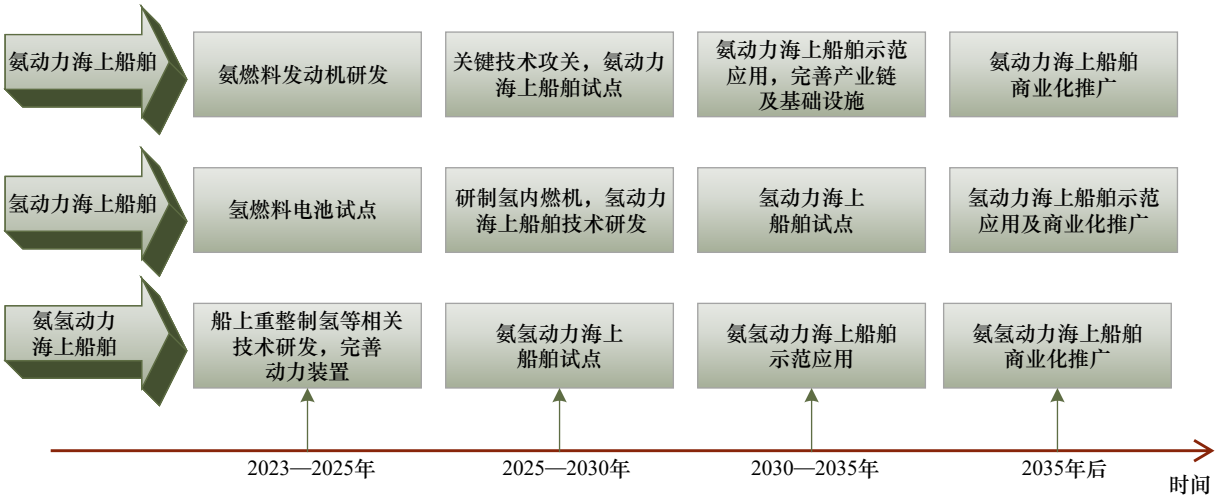

图6　氨氢动力海上船舶的阶段发展目标

制氢等技术。2023—2035年，开展船上重整制氢等技术研发，完善已有的氨氢融合发动机装置。2025—2030年，进入氨氢动力海上船舶的试点阶段，加速推广市场上已有但尚未达到大规模应用的低排放技术，尽量降低船舶制造、建设和运营方面的成本。2030—2035年，进入氨氢动力海上船舶的示范应用阶段，构建氨氢动力海上船舶的设计、制造、测试、调试及性能评估体系和完备的水路交通载运装备技术和产业体系，建立配套的氨氢能源“制备、储存、运输”基础设施，在特定场景下实现对氨氢动力海上船舶的项目进行初步示范应用。在2035年后，进入氨氢动力海上船舶的商业推广阶段，在国际航线上开展氨氢动力船舶应用示范，增强氨氢动力海上船舶产业的国际竞争力，以氨氢动力海上船舶与氨、氢等动力形式海上船舶协同推进碳中和进程。在2060年前，实现航运业零排放，碳中和目标顺利完成。

（二）氨氢动力海上船舶产业要素

氨氢动力海上船舶快速优质发展，需要配套产业链的协同发展。氨氢动力海上船舶产业要素可分为上、中、下游3个环节。上游产业负责原材料、关键技术及零部件的研发，中游产业负责开展氨氢动力船舶示范项目以及完善氨氢动力船舶相关的标准和指南，下游产业负责船舶的推广及商业化应用并提供服务设施配套。

1. 上游环节

（1）严格把控原材料质量

首先，氨氢动力海上船舶由于其航程较远往往需要较长的使用寿命，因此其在建造及设计过程中，应重点把控原材料的质量，其直接影响了船舶的质量、性能和寿命，尤其是与氨氢燃料存储、供应、使用以及加注相关的原材料。同时，对于稳定性较差的原材料，如氨、氢，还应在储存时定期检查其安全性，防止泄露等情况的发生。

（2）加强关键技术研究

我国应兼顾自主创新与对外合作，积极引进国内高水平船舶研制单位合作，同时引进高水平船舶研发设计机构和人才，积极开展氨氢动力海上船舶及其关键领域技术的研究，尽快推动科研立项攻关。为了鼓励科研成果转化，应给予引进人才相应的扶持政策和奖励，如支持享受当地科技、教育、人才、住房等方面的扶持和补贴等，对于具有重大研究成果的机构、单位或个人，给予重点表彰和奖项、奖金等鼓励。

（3）研发船舶关键零部件

由于远洋船舶的航行里程较远，碳排放量较大，因此应着重研制功率等级较大的氨氢动力内燃机，更大程度上降低全球平均碳排放量。由于氨氢动力汽车与船舶在动力形式上具有类似性，氨氢动力海上船舶在发展初期，其他零部件的研发可对比氨氢动力汽车的研发模式，同时在研发过程中需要及时对两类产品的差异性进行评估，保证零部件在船舶上的适用性。

2. 中游环节

（1）增加船舶的出厂测试项目

船舶组装制造完成后，往往需要进行各种出厂试验测试项目。测试项目主要分为系泊试验的检验项目及航行试验项目，其中系泊试验主要包括主机和轴系试验、发电机组和配电板试验、甲板机械及各类辅机试验、电器设备试验、倾斜试验及高温试验等。氨氢动力海上船舶作为新型的新能源远洋船舶，其各方面测试项目更应谨慎，因此需要适当增加出厂测试项目，以保证船舶在投入运营后安全性和使用寿命情况达到最优。

（2）推进氨氢动力海上船舶示范项目建设

相关产业链和政府应加快推进氨氢动力海上船舶示范项目的建设，积极拓展远洋航行示范应用场景，拓宽船舶的应用范围。这将有效促进船舶的建设和改进，促进其由示范建设向规模化发展转变，可对相关企业的健康持续发展起到积极作用。相关企业应尽快攻克氨氢动力海上船舶示范项目的关键性技术和难题，企业之间可以互相进行调研并开展合作，充分发挥自身优势从而及时找到攻克技术的关键点。同时，在示范项目中，船舶交付且运行一定里程后，可以给予船舶制造企业一定比例的补助，这将会对项目建设起到积极作用。

3. 下游环节

（1）与互联网产业融合发展

近年来，互联网技术得到突飞猛进的发展。氨氢动力海上船舶可以借助互联网技术，自主搭建符合远洋船舶和企业自身特点的电商平台，实现船舶产业的线上运营，促进氨氢动力船舶产业的全球化发展。同时，企业还可和船舶产业合作开发氨氢动

力船舶周边特色产品，一方面可以加强人们使用清洁能源意识，同时还可为产业创收。航运电商现在还处于探索阶段，发展空间巨大，特别是新能源运输业与互联网融合发展将成为新的产业风向标。即使在全球发达国家，也没有类似成功的航运电商平台。我国“十三五”规划明确提出建设物联网应用基础设施和服务平台，打造电子商务国际大通道；加快构建车联网、船联网，因此将氨氢动力船舶与互联网产业融合发展具有前瞻性、部署性及可操作性。

（2）制定有效的法规、标准和认证体系

为了确保氨氢能源在海上船舶中发挥作用和持续性应用发展，需要制定有效的法规、标准和认证体系。例如，在与氢气制备和运输相关方面，国际标准化组织（ISO）建立的标准方法可以提供一种可靠的方法计算氢气从生产到运输到船舶上的碳足迹。反过来，ISO 还可以通过制定法规限制船舶研发初期碳排放的阈值。

（3）完善基础设施

目前我国与航运业相关的氨能、氢能基础设施基本空白，可借助氨动力海上船舶或氢动力海上船舶的发展进程，统筹考虑氨氢动力船舶的基础设施布局与规划，同时在码头和氨氢燃料加注站建设时应考虑氨氢动力海上船舶的特点，如国内外的燃料加注站在设计和布局时必须考虑氨氢燃料特有的加注风险，并制定相应的风险控制措施和布置要求，同时还必须能满足所有适用船型的加注要求。除此之外，相应的检修工具和基本配套设施也应基本满足，以此促进氢动力船舶的高效率发展。

六、结语

本文面向国家“双碳”战略的目标导向，聚焦航运业中长期发展，梳理了氨氢动力海上船舶的发展需求，氨动力、氢动力以及氨氢动力海上船舶的发展现状。为了细化氨氢海上动力船舶的发展方向，全面分析了涉及的关键技术并论述了船舶发展目标与产业要素。相关研究有助于促进海上船舶关键技术发展，推动氨氢动力海上船舶深化发展，加快实现绿色航运，为全球碳减排提供借鉴。

氨氢动力海上船舶可视为衡量我国综合创新能力、争取国际话语权和产业地位的重要支撑，也是不同国家之间沟通和合作的桥梁。在未来工程应用中，可在国家层面开展海上交通领域需求论证，形成氨氢燃料供应体系、氨氢动力海上船舶基础设施建设等专项规划[32]；鼓励各地区在辖内海域建设氨氢燃料加注站、开展海上风电制氢项目，加强支持性服务设施的维护，以积累工程化经验，为后续产业链培育及基础设施建设提供依托。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 13, 2023; **Revised date:** March 07, 2023

Corresponding author: Men Zhiguo is an associate professor from the Institute of Marine Science and Technology Development Strategy of Harbin Engineering University. His major research field is marine science and technology strategy. E-mail: menzhiguo@hrbeu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Carbon Neutral Scientific and Technological Innovation Strategy based on Ammonia-Hydrogen Fusion Integrated Transportation Equipment” (2022-XZ-45); National Natural Science Foundation of China (71801061)

参考文献

[1] Corbett J J, Winebrake J J, Green G H, et al. Mortality from ship emissions: A global assessment [J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(24): 8512–8518.

[2] International Maritime Organization. Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships [R]. London: International Maritime Organization, 2018.

[3] 胡琼, 周伟新, 刁峰. IMO 船舶温室气体减排初步战略解读 [J]. 中国造船, 2019, 60(1): 195–201.
Hu Q, Zhou W X, Diao F. Interpretation of initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships [J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(1): 195–201.

[4] Al-Enazi A, Okonkwo E C, Bicer Y, et al. A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation [J]. Energy Reports, 2021, 7: 1962–1985.

[5] Wijayanta A T, Oda T, Purnomo C W, et al. Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(29): 15026–15044.

[6] Klerke A, Christensen C H, Norskov J K, et al. Ammonia for hydrogen storage: Challenges and opportunities [J]. Journal of Materials Chemistry, 2008, 18(20): 2304–2310.

[7] van Biert L, Godjevac M, Visser K, et al. A review of fuel cell systems for maritime applications [J]. Journal of Power Sources, 2016, 327: 345–364.

[8] Lin Y M, Rei M H. Study on the hydrogen production from methanol steam reforming in supported palladium membrane reactor [J]. Catalysis Today, 2001, 67(1): 77–84.

[9] Choi C H, Yu S J, Han I S, et al. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist

boat [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(5): 3591–3599.

[10] Tarasenko A B, Kiseleva S V, Popel O S. Hydrogen energy pilot introduction–Technology competition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(23): 11991–11997.

[11] Tong L, Yuan Y P, Yang T Q, et al. Hydrogen release from a metal hydride tank with phase change material jacket and coiled-tube heat exchanger [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(63): 32135–32148.

[12] Yuan Y P, Wang J X, Yan X P, et al. A review of multi-energy hybrid power system for ships [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 132: 1–12.

[13] Klebanoff L E, Pratt J W, Leffers C M, et al. Comparison of the greenhouse gas and criteria pollutant emissions from the SFBREEZE high-speed fuel-cell ferry with a diesel ferry [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 54: 250–268.

[14] 杨传雷, 王保华, 王银燕, 等. 增压柴油机性能参数GM预测仿真平台研究 [J]. 内燃机与配件, 2020, 315(15):25–28.
Yang C L, Wang B H, Wang Y Y, et al. Research on GM prediction simulation platform for performance parameters of sequential turbocharged diesel engines [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020, 315(15):25–28.

[15] 汪颖异, 魏梅. 绿色低碳燃料船舶总拥有成本分析 [J]. 船舶, 2021, 32(5): 10–16.
Wang Y Y, Wei M. Analysis of total cost of owner-ship for green low carbon ships [J]. Ship & Boat, 2021, 32(5): 10–16.

[16] Kim K, Roh G, Kim W, et al. A Preliminary Study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: Environmental and economic assessments [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(3): 183.

[17] Jiang L L, Fu X Z. An ammonia–hydrogen energy roadmap for carbon neutrality: Opportunity and challenges in China [J]. Engineering, 2021, 7(12): 1688–1691.

[18] Wang Y, Zhou X H, Liu L. Theoretical investigation of the combustion performance of ammonia/hydrogen mixtures on a marine diesel engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(28): 14805–14812.

[19] 周洋, 杨发财, 李世安, 等. 燃料电池动力船舶安全问题及对策探讨 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(4): 91–96.
Zhou Y, Yang F C, Li S A, et al. Discussion on safety problems and countermeasures of fuel cell powered ships [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(4): 91–96.

[20] Salmon N, Banares-Alcantara R. Green ammonia as a spatial energy vector: A review [J]. Sustainable Energy and Fuels, 2021, 5(11): 2814–2839.

[21] Lin L, Tian Y, Su W, et al. Techno-economic analysis and comprehensive optimization of an onsite hydrogen refuelling station system using ammonia: Hybrid hydrogen purification with both high H_2 purity and high recovery [J]. Sustainable Energy and Fuels, 2020, 4(6): 3006–3017.

[22] Schoyen H, Steger-Jensen K. Nuclear propulsion in ocean merchant shipping: The role of historical experiments to gain insight into possible future applications [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 169: 152–160.

[23] 吴朝玲, 李永涛, 李媛, 等. 氢气储存和输运 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
Wu C L, Li Y T, Li Y, et al. Hydrogen storage and transportation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021.

[24] Klebanoff L E, Pratt J W, Leffers C M, et al. Comparison of the greenhouse gas and criteria pollutant emissions from the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry with a diesel ferry [J]. Transportation Research Part D-Transport and Environment, 2017, 54: 250–268.

[25] Cavo M, Gadducci E, Rattazzi D, et al. Dynamic analysis of PEM fuel cells and metal hydrides on a zero-emission ship: A model-based approach [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(64): 32630–32644.

[26] Tong L, Yuan Y P, Yang T Q, et al. Hydrogen release from a metal hydride tank with phase change material jacket and coiled-tube heat exchanger [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(63): 32135–32148.

[27] Choi C H, Yu S J, Han I S, et al. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(5): 3591–3599.

[28] 邵志刚, 衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状及展望 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 469–477.
Shao Z G, Yi B L. Developing trend and present status of hydrogen energy and fuel cell development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 467–477.

[29] 彭元亭, 徐增师. 船用氢燃料电池推进技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 18–21.
Peng Y T, Xu Z S. Development of hydrogen fuel cell propulsion technology for ships [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(6): 18–21.

[30] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 146–152.
Yu H M, Shao Z G, Hou M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: Progress and suggestions [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 146–152.

[31] 于全虎. 氢能和燃料电池及其船舶应用进展 [J]. 船舶, 2020, 31(5): 69–76.
Yu Q H. Hydrogen, fuel cells and their application on ship [J]. Ship & Boat, 2020, 31(5): 69–76.

[32] 童亮, 袁裕鹏, 李骁, 等. 我国氢动力船舶创新发展研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 127–139.
Tong L, Yuan Y P, Li X, et al. Innovative develop-mental of hydrogen-powered ships in China. [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 127–139.