

“双碳”目标背景下船舶动力技术的自主创新与发展论坛论文专栏

40 000 m³ 液氨运输船氨燃料技术应用

蒋雄健, 张道志, 周鑫元

(江南造船(集团)有限责任公司, 上海 201913)

摘要: 以中型液氨运输船为研究对象, 针对氨燃料相关应用进行探讨和研究, 主要包括氨燃料船型设计、氨燃料理化特性分析, 以及氨燃料在中型气体运输船(MGC)上的安全储存、输送和利用等。研究结果可为未来氨燃料动力实船的开发和应用提供技术储备。

关键词: 液氨运输船; 氨燃料; 供气系统

中图分类号: U664.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)06-0001-04

Application of Ammonia Fuel Technologies to a 40 000 m³ Liquefied Ammonia Carrier

Jiang Xiongjian, Zhang Daozhi, Zhou Xinyuan

(Jiangnan Shipyard (Group) Co., Ltd., Shanghai 201913)

Abstract: Taking the midsized ammonia carrier as the research object, the application of ammonia fuel technologies were discussed and studied, mainly including ammonia-fueled ship design, ammonia physicochemical properties analysis, as well as safe storage, transportation and utilization on ammonia-fueled MGC. The research results can provide technical reserves for the development and application of ammonia-fueled ships in the future.

Key words: liquefied ammonia carrier; ammonia fuel; gas supply system

0 引言

2018 年, 国际海事组织 (IMO) 提出碳强度和温室气体初步阶段性减排战略。IMO MEPC. 304 (72) 决议^[1]明确: 相比 2008 年, 国际航运碳强度到 2030 年至少减少 40%, 到 2050 年至少减少 70%; 相比 2008 年, 到 2050 年航运业温室气体排放至少减少 50%。IMO 海上环境保护委员会第 76 次会议 (MEPC 76) 通过了降低国际航运碳强度的技术和营运措施; 商定了针对中长期措施的工作计划, 包括促进新燃料使用的措施以及对潜在温室气体的排放要求。面对日益严苛的法规要求, 全球航运业的能源需求发生结构性变化: 向低碳甚至零碳能源如甲烷、甲醇、氨和氢气等转型。结合燃料的燃烧特性和理化特征 (表 1), 从长期减排策

略来看: 相比于甲烷和甲醇等, 氨在碳减排方面更具优势; 相比于液氢, 液氨更易储存和运输, 且功率密度高于液氢。因此, 氨成为了当前备受业界关注和亟待开发的新燃料。

表 1 不同燃料燃烧特性和理化特征

燃料	燃烧产物 是否含 CO ₂	储存条件	功率密度/ (GJ · m ⁻³)	特点
甲烷	是	常压, -163 ℃	11.4	易燃
甲醇	是	常压, 常温	8.2	有毒
液氢	否	常压, -253 ℃	4.8	易燃
液氨	否	常压, -33 ℃	6.8	有毒

本文针对氨燃料技术在中型液氨运输船上的应用展开相关研究。

1 背景介绍

1.1 船型概况

1.1.1 船舶设计

研究基于的船型为中型全冷式液化气运输船,设计上可用于满载运输无水氨(anhydrous ammonia),此外也能满载运输丙烷等LPG货物。基于不同的货物装载条件,船舶吃水有所不同。该船采用江南造船专利技术垂直球艏(VS-Bow)以及敞水式方艏设计;推进系统型式为低速二冲程氨燃料主机驱动定距桨,并可根据需求配备抱轴式轴带发电机。

该船主要结构参数见表2。

表2 船舶主要结构参数

参数名称	数值
船舶总长/m	180.00
垂线间长/m	176.20
型宽/m	30.00
型深/m	18.60

1.1.2 液罐设计

该船货舱舱型采用独立菱形舱设计(IMO A型舱),主货舱3个。在20℃、100%装载条件下,货舱总舱容为40 000 m³。货舱设计温度为-52℃,设计密度为0.7 t/m³,在海上航行模式下设计压力为0.025 MPa,可用于满载运输无水氨和LPG货物。此外,该船还可按需配备两个C型甲板罐,设计温度和设计密度同主货舱,其中:一个甲板罐可按照设计压力1.8 MPa进行设计;舱容均为500 m³,可用于装载燃料或进行货物操作。该船三维模型如图1所示。



图1 40 000 m³液氨运输船三维模型

1.2 氨燃料

氨(NH₃)的化学组分为氮(N)和氢(H),是一种不含碳的氮氢化合物。氨在氧气中燃烧生成氮气(N₂)和水(H₂O),燃烧过程不产生二氧化碳(CO₂),因此对于碳减排来说,氨是较有前景

的零碳燃料。氨气是一种无色、有毒气体,有强烈的刺激气味,其密度小于空气,极易溶于水,常温、常压下1体积水可溶解700倍体积的氨气。氨气溶于水制成水溶液——氨水,可应用于化工等多领域。氨的沸点为-33.3℃,因此,氨气极易液化,在常压条件下冷却至沸点温度以下即可液化,或在常温(20℃)条件下加压至0.86 MPa以上便可将气态氨转变成无色液氨。氨的液化性质和LPG比较相似。

氨作为一种富氢化合物,优点显著。首先,氨的生产工艺有很多。典型的氨气生产工艺都是利用高压、高温条件将氮气和氢气结合在一起形成化合物氨^[2]。在该过程中,氮气主要从空气中分离得到,氢气则主要来源于化石燃料(如天然气等)。结合碳捕获和储存(carbon capture and storage, CCS)技术,可以捕捉提炼过程中排放的二氧化碳,通过该种方式制得的氨称为蓝氨。更为绿色清洁的生产工艺是利用电解水制氢,电解水所需的电力则来自可再生能源,如水力、风能和太阳能等,通过该种方式制得的氨称为绿氨。鉴于当前大规模生产绿氨的成本较高,因此多采用前一种方式。其次,氨容易储存和运输。根据氨的液化特性,氨在常压下便可轻易地冷却液化,或在环境温度下加至较低的压力也可液化。因此,陆路储存和运输多以液态形式进行,并采用钢瓶、管道和储罐等媒介。液氨运输方便且成本低。再者,液氨的储能较高。相比于液氢,同样体积的液氨储能约高40%,且更易储存和运输,是氢理想的载体。

作为一种燃料,氨的利用方式主要有:(1)氨燃料发动机;(2)氨燃料电池。一方面,氨本身不含碳,是一种清洁高效的二次能源,燃烧过程可以实现温室气体零排放;另一方面,氨在市场上价格较低,并已经在世界范围内运输和使用,有着良好的产业基础。基于现有的设施和条件,氨作为船舶燃料具有较好的发展潜力。从当前技术的成熟度、可操作性和成本等方面综合考虑,相比于氨燃料电池,氨燃料发动机在船舶领域的应用更具潜力。

以氨为燃料,在船舶设计过程中须注意以下几个问题:(1)氨有毒性,在设计过程中须注意潜在的风险;(2)相比于其他燃料,如MGO、LNG和LPG等,氨的热值较低,因此氨燃料单位能量储存所需储罐的容积会更大。氨燃料与其他燃料能量密度等属性对比见表3。

表 3 氨燃料与其他燃料属性对比

燃料	密度/ (t · m ⁻³)	低热值/ (GJ · t ⁻¹)	体积能 量密度/ (GJ · m ⁻³)	等效 重量 ^① / (t · GJ ⁻¹)	等效 容积 ^② / (m ³ · GJ ⁻¹)
MGO	0.85	42.7	36.3	1.00	1.00
LNG	0.50	50.0	25.0	0.85	1.45
LPG	0.60	46.0	27.6	0.93	1.32
液氢	0.07	120.0	8.4	0.36	4.32
液氨	0.68	18.6	12.6	2.30	2.88

注：①假设用于储存 MGO 单位能量所需的重量为 1，与之对比采用氨燃料及其他燃料所需的等效重量。

②假设用于储存 MGO 单位能量所需的容积为 1，与之对比采用氨燃料及其他燃料所需的等效容积。

2 氨燃料技术应用

2.1 氨燃料船上储存与输送技术

由于氨沸点低，容易液化，大多采用液罐形式储存和运输。目前，大规模的海上氨运输是由液化气船来完成的。由于氨在 45℃ 时的饱和蒸气压力与丙烷近似，因此，液氨运输船的设计大体类似于液化石油气运输船。结合当前市场，氨的运输量尚小于液化石油气，本项目中设计的中型液化气运输船（MGC）为目前市场上的主流船型，且多数情况下会从事液氨运输。因此，在未来氨燃料主机及相关技术商业化后，此类船舶应用氨燃料技术的可能性极大。氨和丙烷等 LPG 的液化温度及压力见表 4。

表 4 氨和丙烷等 LPG 的液化温度及压力

燃料	常压条件下饱和温度/℃	45℃ 条件下饱和压力/MPa
丙烷	-42.1	1.435
丙烯	-47.7	1.747
正丁烷	-0.5	0.334
异丁烷	-11.7	0.504
无水氨	-33.3	1.680

理论上，氨的储存可以采用 3 种不同的舱型，分别为全压罐、半冷半压罐和全冷罐，具体可根据不同的船型进行选择。全压罐和半冷半压罐均为压力罐（可承压），为 IMO C 型舱，两种压力罐只是在设计压力上有所区别。通常，受设计压力和液罐板厚的限制，该类舱型容积不能做得很大；散货船、滚装船和油船等须应用氨燃料，且燃料罐设计容积在 2 000 m³ 以下的，可以使用该类储罐。本项目采用全冷 A 型舱设计，完全可用于运输无水氨，舱内装载的液氨也可为氨燃料主机提供燃料。此外，本船还可提供两个 C 型甲板罐，当主货舱运输丙烷等

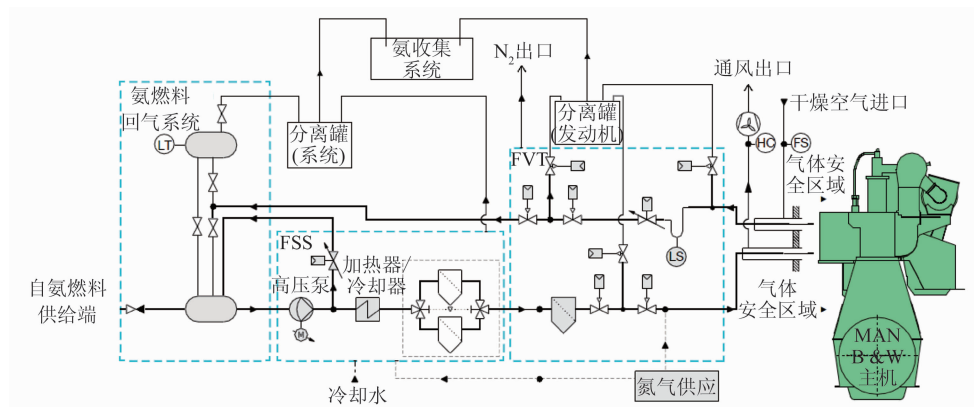
其他货物时，可用作氨燃料储存罐，也可兼做换货用，设计灵活，可满足各种运输需求。由于氨会引起某些材料如碳锰钢和镍钢的应力腐蚀，因此在选择液罐材料时须特别注意。本船液罐材料采用低温钢，其抗拉强度和屈服强度可以满足船级社要求；对于甲板罐，还须应用特殊热处理工艺。

40 000 m³ 液氨运输船配置 3 个主液货舱，每个舱各配置 2 台液货深井泵，用于卸货操作，并配置 3 套再液化系统，用以处理货物蒸发气。氨燃料供应系统的设计压力 and 设计温度根据 MAN ES 氨燃料主机要求进行设计，设计压力为 7~8 MPa。氨燃料供气系统主要包括低压泵、高压泵和加热器/冷却器等。对于液货舱装氨且不配备甲板燃料罐的情况，可选用深井泵型低压泵，并安装在货舱内，通过低压泵直接从货舱内抽出液氨，并输送给供气系统高压泵。如果液货舱用于装 LPG 货物，则氨燃料可储藏在甲板罐内，并通过低压泵供应给后端。低压泵可根据实际需求进行布置，如：采用侧流道低压泵（side channel pump），可布置在甲板半封闭处所；采用深井泵，可布置在甲板罐内。加热器用于加热氨燃料，使氨燃料温度满足进机要求；冷却器则用于冷却从主机出来，位于回气管路内的过热氨燃料，防止氨燃料回气温度过高。氨燃料回气通常回到循环系统中的收集罐，并与新鲜燃料混合，去往高压泵。高压泵对来自低压泵的氨燃料加压，确保氨燃料压力满足进机要求。通常，在供气系统和主机之间还会配置燃气阀组单元（fuel valve train, FVT），FVT 可在主机燃气模式切断或维护时保证主机和供气系统安全隔离，同时也能提供氮气吹扫功能。供气系统高压泵和主机 FVT 等设备可布置在压缩机房内或单独的燃气设备间。MAN ES 氨燃料供气系统如图 2 所示。

2.2 氨燃料船舶系统设计

氨燃料船舶系统设计主要围绕如何安全有效地在船上使用氨展开，包括氨燃料供气管系、通风系统和气体探测系统等，主要关注氨的腐蚀性和有毒性问题。

首先，氨具有腐蚀性，会腐蚀某些材料，如铜、铜合金和锌等，因此在设计氨燃料供气系统管系时须选择合适的材料。根据现有经验，甲板供气系统管路一般采用不锈钢管，氨燃料供气管系也可采用不锈钢管。但须特别注意的是，机舱区域一般均采用本质安全型机舱设计理念，氨燃料供气管路须采用不锈钢双壁管。双壁管的材质、规格等可根据主机厂的推荐进行选择。

图2 MAN ES 氨燃料供气系统示意图^[3]

其次,氨是一种有毒危险气体,且有刺激性气味^[4]。对于氨这类危险气体,通常可在船上相应区域安装气体探测传感器,用来检测相应区域是否存在泄漏。这些区域包括但不限于以下处所:(1)压缩机房或燃气设备间;(2)前泵舱和水手长储藏间;(3)上建、机舱通风进口;(4)机舱等可能存在氨泄漏的处所。此外,为了保护机舱安全区域,在主机以燃气运行时须设置双壁管风机,对机舱双壁管外管路进行持续通风,并在通风出口端设置气体探测传感器。氨气的密度比空气小,但当环境湿度较大时,氨气会与空气中的水分接触形成冷雾,混合了水分的氨的密度比空气重,存在下沉的风险,因此在做气体探测点布置时须综合考虑上述因素。

对于处理和使用氨燃料的处所,有效的通风系统必不可少,换气次数可结合规范和船东的实际需求。船级社对透气桅的布置有一定的要求,如美国船级社(ABS)要求布置在离上建开口和通风进口至少10 m的位置。本船将透气桅布置在液货集管区域前面,已经远离上建处所,可以满足规范要求。

此外,在人员保护方面,还须配备应急淋浴和洗眼装置、应急呼吸机(emergency escape breathing device, EEBD)等设备。当然,这些设备的设置并不仅针对氨燃料的设计要求。因此,在系统设计的时候可以综合考虑,在功能上满足即可。

液氨作为一种液货,还须考虑其存在低温和爆炸伤害等隐患。相比于LPG,这些风险程度可能相对较低,但是在设计中仍须考虑。通常,为了在船上更安全、合理地使用氨燃料,船厂、船东、船级社和设备商须针对使用氨燃料的船舶进行风险识别和分析(hazard identification, HAZID)。风险分析须根据船级社的要求,对涉及氨燃料的处所、系统设备和管系等

多方面内容逐项进行分析,以确保在船上储存、输送、处理和使用氨燃料的安全性和可靠性。

对于散货船和油船等非液化气船应用氨燃料的情况,氨燃料系统设计须满足“国际气体及低闪点燃料动力船舶安全规范(IGF规范)”的要求;而对于液化气船则须按照“散装运输液化气体船舶构造及设备规范(IGC规范)”的要求进行设计。但当前IGC规范明确规定不允许使用有毒货物作为燃料,因此,对于液化气船使用氨燃料,获得挂旗国的豁免和接受是一个必要条件。

3 结语

当前,氨燃料主机和供气系统还处在研究和开发阶段,从目前情况来看,氨作为燃料应用于船上可能会面临如下挑战:

(1) 氨的热值并不高,对于不是专门运输氨的船舶来说,必须在氨燃料的续航力和船上有限的空间间做权衡。

(2) 氨的燃烧性能较差,且点火油耗较高,采用氨燃料主机可能会导致油耗上升。本项目团队后续将关注相关试验的进展。

(3) 燃用氨导致的 NO_x 和 N_2O 排放以及未完全燃烧的氨逃逸问题仍须明确。如果确定存在上述问题,则在系统设计上须进一步考虑,如加装后处理系统等,以满足排放法规要求^[5]。

针对氨的毒性和腐蚀性等明确的特性,可以在氨燃料动力船舶设计过程中采取合适的措施和手段。随着技术、规范等的不断发展和完善,相信未来氨能够安全有效地用作船舶燃料,成为零碳排放船舶的一种选择。与此同时,随着氨需求量的提高,未来制氨技术将逐渐迈向绿氨时代,实现真正的绿色、环保和可持续发展。

(下转第14页)

“气垫”效应,该效应可以有效缓解燃气与缸内高温废气以及高温零部件的接触,有助于降低不正常燃烧发生的概率。

(2) 燃气喷射正时提前会增加甲烷在压缩行程的物理扩散逸量,而燃气喷射正时推迟这种现象可得到有效控制。

(3) 由于甲烷逃逸对于 X-DF 主机来说不可避免,所以在缸内不发生早燃的情况下,可设置尽可能早的燃气喷射正时,以提高活塞头附近零部件的可靠性。目前在 X-DF 2.1 版本中,甲烷逃逸已通过引入智能废气再循环系统(iCER)得到有效控制。

(上接第 4 页)

参考文献

- [1] IMO Marine Environment Protection Committee. Resolution MEPC. 304 (72) -Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships [R/OL]. (2018-04-13) [2021-03-12]. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf).
- [2] DNV. AMMONIA as a marine fuel white paper [R/OL]. (2020-11-20) [2021-03-12]. <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385>.

(上接第 9 页)

5 应用案例及展望

某单位以一台 6230SG 天然气机为原动机,与德国西门子技术制造的 1FC6 发电机配套,组成 600 kW 应急发电机组,2014 年 1 月交付使用。市电失电时,机组自动启动,在 30 s 内对外供电;市电恢复正常后,自动切换和停机,由市电对负载供电。

该机组直接采用城市管网的天然气为燃料,使用十分方便。机组采用隔振器弹性支承,所有外接

参考文献

- [1] 马义平,曾向明,魏海军,等.国内外船用 LNG 动力发动机发展现状[J].中国航海,2016,39(3):20-25.
- [2] 谷林春.两种主流双燃料柴油机特性对比[J].中国船检,2020(2):72-75.
- [3] 冯立岩,刘超,吴瑶.低速二冲程双燃料船用主机气缸润滑油自燃引发不正常燃烧问题的研究[J].柴油机,2017,39(1):1-5.
- [4] HAN Z Y, REITZ R. Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG $k-\varepsilon$ models [J]. Combustion Science and Technology, 1995, 106(4/6):267-295.
- [3] MAN Energy Solutions. MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia, (2020-11-01) [2021-03-12]. <https://www.man-es.com/marine/strategic-expertise/future-fuels/ammonia>.
- [4] ABS. Sustainability white paper: ammonia as marine fuel [R/OL]. (2020-10-29) [2020-03-12]. <https://absinfo.eagle.org/acton/media/16130/sustainability-white-paper-ammonia-as-marine-fuel>.
- [5] IMO. Revised MARPOL Annex VI [R/OL]. (2017-01-01) [2021-03-12]. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx>.

管路均采用挠性接头连接,机组安放在办公大楼下,发动机运行时,机械振动不对外传播。

在当前节能减排的大环境下,天然气发动机将拥有良好的市场前景。

参考文献

- [1] 中国船级社.钢质海船入级规范[R/OL].(2018-06-29)[2021-08-22].<https://www.ccs.org.cn/ccswz/articleDetail?id=201900001000008486>.