

LPG 和 NH₃ 燃料同船使用分析

Analysis of Shipboard Use of LPG and NH₃ Fuels

景江成 吴家云 柳国胜

Jiangcheng Jing Jiayun Wu Guosheng Liu

中远海运重工设计院 中国·辽宁 大连 116600

COSCO Shipping Heavy Industry Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116600, China

摘要: 随着技术的革新, 船用燃料液化天然气 (LNG) 和液化石油气 (LPG) 有可能成为被氨或氢替代的过渡产品, 为应对燃料市场的变化, 增强船舶燃料使用的灵活性, 论文介绍了液化石油气和氨同船使用设计的可行性。

Abstract: With the innovation of technology, marine fuels liquefied natural gas (LNG) and liquefied petroleum gas (LPG) are likely to become transitional products replaced by ammonia or hydrogen fuel. In order to cope with the change of fuel market and enhance the future usability of vessels, this paper introduces the feasibility of operation and using LPG and ammonia on the same ship.

关键词: 液化石油天然气 (LPG); 氨燃料 (NH₃); 供气系统; 主机

Keywords: liquefied petroleum natural gas (LPG); ammonia fuel (NH₃); gas supply system; main engine

DOI: 10.12346/etr.v3i9.4220

1 引言

国际海事组织 (IMO) 开始实施严格的低硫船舶燃油标准后, 全球航运燃油需求出现了结构性变化, 为了实现国际海事组织关于减少船舶温室气体排放的战略设定目标, 航运业必须改用替代的零碳燃料, 氨 (NH₃) 和氢 (H₂) 是脱碳航运业中未来最有希望的可选择燃料, 液化天然气 (LNG)、液化石油气 (LPG) 随着技术的革新有可能成为被替代的过渡性产品, 为增强船舶燃料使用的灵活性, 论文将介绍液化石油气和氨同在船舶上使用设计的可行性^[1]。

2 燃料特性对比

除了液化天然气, 液化石油气也是另一种值得关注的替代性环保燃料。LPG 为碳氢气体混合物, 主要是丙烷和丁烷的混合物, 还含有少量的丙烯和其他轻烃物质, 碳/氢 (C/H) 值比较低 (约 0.38), 因此 LPG 燃烧产生的 CO₂ 排放量低于柴油。但其碳/氢 (C/H) 值比液化天然气 (LNG) (约 0.25) 要高, 因此其 CO₂ 排放量相对液化天然气也略高。随着全球天然气开采量的增加, 未来 LPG 产量也将大大增长, 价格也会降低, LPG 市场也将更为稳定, 这些因素为该燃料在船舶使用方面奠定了一定的基础。

根据其物理和化学特性, 氨 (NH₃) 也是一种可行的船用燃料, 它不含碳和硫, 因此消除了燃烧过程中 CO₂ 或硫

化合物 (SO_x) 的形成, 如今世界上有 120 多个港口已具备大量的设施可以处理这类产品的进出口, 同时还具备存储能力。这些基础设施都代表了一个良好的起点, 确保氨燃料的可用性。两种燃料的物理特性见表 1。

表 1 燃料物理特性

种类	液化石油气 LPG	氨 NH ₃
主要成分	丙烷 C ₃ H ₈ 丁烷 (C ₄ H ₁₀)	NH ₃
气相密度 kg/Nm ³	2.48	0.73
液态密度 kg/m ³	520~620	770
常压沸点 (1bar) °C	-42.4	-33
蒸发压力 (bar) 45°C	15.2	18
自燃点 (°C)	465	650
爆炸极限	9%~2%	15%~28%
挥发性	不易挥发	易挥发

LPG 密度高于大气, 这意味着一旦发生泄漏, 蒸气将聚集在周围处所的较低位置。相反, 氨气是挥发性气体比大气轻, 因此 LPG 在泄漏探测和通风方法上有别于氨气; 但氨燃料也有其缺点, 比如其有味且有一定的毒性, 需保证整个供给系统在任何情况下无泄漏且透气至安全区域。

氨可在 8.6bar 的压力和环境温度下液化, 因此易于在船上储存。氨通常储存在 17bar 的压力下, 这样即使环境温度上升它也可保持液态。LPG 在环境压力下的沸点是 -42.4°C,

【作者简介】景江成 (1978-), 男, 中国辽宁大连人, 本科, 工程师, 从事船舶海洋工程设计研究。

在环境温度 20℃和 8.4bar 的压力下就可以液化，但通常都是在 18bar 的压力下储存，两者的储存条件几乎一样；但氨的能量密度较小，使用能量含量低的燃料氨时，燃料储罐需要扩大，这样才能储存足够的能量，满足航线的需求。LPG 和氨的供气压力和喷射压力都较为相近，船舶营运方面主机稍作改动同一套供给系统可以多一份燃料的选择^[2]。

3 双燃料主机

石油液化气船用发动机已较为成熟，曼恩能源解决方案公司 (MAN Energy Solutions) 的 LPG 机型已有市场应用，而瓦锡兰 (Wärtsilä) 认为 LPG 是燃料的过渡产品，所以不做技术投入，但关于氨燃料技术两大主流公司都在研发中，发动机制造商瓦锡兰和曼恩都计划在 2021 年开始测试氨燃料主机，瓦锡兰方面希望在 2023 年将其发动机安装到船上，而曼恩表示将在 2024 年才会将其原型机投放市场。

曼恩公司 ME-LGIP 液化石油气双燃料主机和 ME 主机对比，气缸盖增加 LPG 燃料的喷射阀及燃料的控制模块。控制模块包括 LPG 蓄能器、液压蓄能器、压力传感器、密封蓄能器、密封调节阀和一些比例三通阀等；增加了燃料控制模块的供应管路和回路模块；增加独立的燃料控制模块 ECS (Engine Control System)。两种燃料的特性和供气参数见表 2。

LPG 二冲程机供气压力需要达到 50bar 左右；然后通过 FBIV-P 燃料喷射阀达到 600~700bar；FBIV-P 是 MAN 公司双燃料主机主喷射阀 FBIV 中的一员，主要用于 LGIP 双燃料主机中液化石油气燃料的喷射。FBIV-P 集成了燃料增压功能和喷射功能。在液态 LPG 燃料以低压状态进入阀体后，液压油通过内部柱塞对燃料加压，并通过控制油控制阀的开启和关闭，从而达到有效控制喷射的功能。为避免 LPG 燃料进入液压油系统，液压密封油需要达到 80bar，其来源于主机 300bar 的液压油减压获得，MAN 主机容许少量的液压密封油和 LPG 燃料共存混合燃烧；从结构上 FBIV-P 比常规喷油器增加了多个油路通道，且集成了柱塞偶件和导套组件为一体，结构更加复杂，零部件的尺寸精度控制要求更高，产品总成装配更严格，性能试验较为复杂^[3]。

曼恩公司仍然基于 ME-LGIP 的主机上解决氨燃料的适用开发；两种燃料的使用在 ME-LGIP 机型上没有明显的差别；氨燃料需要 70bar 的供气压力稍稍高于液化石油气 50bar 要求，但喷射压力都在 600~700bar，基本一致。形成的氮氧化物仍然可以采用 SCR 或 EGR 脱硝技术来处理；氨具有很高的汽化热，导致喷射后混合气大量蒸发冷却，并降

低燃烧开始时的气缸温度，反而有助于氮氧化物 (NO_x) 的降低，与柴油相比，燃烧氨可生成等量或更低的氮氧化物 (NO_x)，所以同一主机用于燃油或 LPG 配置的 SCR 反应器的容量也可以用于氨燃烧的氮氧化物处理。但氨气是一种有毒的化学物质，不同于 SCR 系统中氨水的处理，机器自身供气管路也需要有双壁管且双壁管内需要每小时 30 次的换气处理。且依据 IGF 和船级社规范要求，燃气注入系统一旦停止工作，主机可以自动切换到燃油模式同时供给主机和机舱的燃料系统关闭；机舱或机器自身的剩余气体可以通过回收系统自动减压且通过氮气系统清扫；如果回收系统失效，则会通过惰气系统直接清扫至缓冲罐，以确保主机和机舱的安全，这些要求对两种燃料的供气处理都基本一致。

氨燃料的辛烷值 110 左右，液化石油气的辛烷值也在 100 左右，抗爆性能较好，都适宜于增大压缩比来提高内燃机的热效率，也都适合于低转速高负荷工况。氨的显著特点就是在恶劣的工况下，也能在任何燃油品质的情况下工作，而效率不会降低，并具有传统二冲程发动机所具有的可靠性能和工作特性。对可燃性和燃烧性较差的燃料有较大的耐受性的根本原因是发动机转速低，允许燃烧完成的时间长，尺寸大，导致体积与表面比大，这有利于完全燃烧和低壁面热损失。以上充分说明两种燃料在 MAN 的 G 型机上将会更能突出其燃烧优势。

4 供气系统

液化石油气和液氨的供气系统中均包括液体储罐、气化加热系统、冷却单元、增压泵组单元、阀组控制单元、双壁管保护系统。

参考 CB/T4240—2013 船用全压式液化气储罐标准要求，储罐均可储存介质为液化石油气 (LPG)、液氨、氯乙烯 (VCM)、二甲醚 (DME) 等，设计蒸气压力不大于 2.0MPa，设计温度不低于 -10℃液化气体，在 45℃的平衡压力下，LPG 中丙烷的蒸发压力是 1.5Mpa，丁烷的蒸发压力 0.3Mpa，液氨是 1.72Mpa，当储罐设计压力是 1.8Mpa 时，以上产品均能装载；氨在 20℃，8.6bar 条件下就可以液体形式储存，当环境温度上升时，也可以在 45℃，18bar 的压力下储存，从设计压力和温度的限制条件可以看出 LPG 储罐也同样适用于氨的存储。通常 LPG 储罐设计最高温度是 50℃比标准要求高 5℃，比液氨罐高 10℃，液氨罐是 40℃；LPG 储罐设计压力是 1.77MPa，液氨罐为 1.705MPa 压力十分相近；设计试验压力 2.16MPa 也要高一点，液氨罐为 2.13MPa；设计筒体材料厚度也要大一点，液氨罐大约是 14.32mm^[4]。

表 2 燃料特性和供气参数

燃料	热值	能量密度	容积	供气压力	喷射压力	排放 (相对 HFO 二阶段)			
	(MJ/Kg)	(MJ/L)	(m ³)	(bar)	(bar)	(%)	(%)	(%)	(%)
HFO	40.5	35	1000	7~8	950	SOX	NOX	CO2	PM
LNG(-162℃)	50	22	1590	300~380	300~380	90~99	20~50	15~24	90
LPG	42	26	1346	50	600~700	90~100	10~15	13~18	90
Ammonia(液体-33℃)	18.6	12.7	2755	70	600~700	90~95		95	90

液化石油气和液氨的储罐设计制造所用钢材均可采用碳锰钢或奥氏体钢等, 根据 IGC 规则《国际散装运输液化气体船舶构造和设备规则》的要求, C 型 LPG 储罐使用材料必须低于设计温度下限值 20℃, 因此衡量储罐选材的一个重要的条件就是要考虑低温冲击韧性。目前中国制造 LPG 船罐所用容器板材主要有三种: 07MnNiMoVDR、07MnCrMoVR 和 15MnNbR。分别执行国标 GB19189—2003 和 GB713—2008, 材料也只有 E 级 (-40℃) 和 D 级 (-20℃) 两个级别。中国制造全压式 LPG 船储罐应用较多的是抗拉强度为 610MPa 级别的调质高强度钢 07MnNiMoVDR, 该钢目前仅有武钢取得中国船级社 (CCS)、日本海事协会 (NK) 认证; 宝钢同类钢也取得了 CCS 的认证。而在其他国家船舶行业, 屈服强度高于 620MPa 或 690MPa 的高强度钢, 如 P690 (Rel ≥ 690MPa, 770MPa ≤ Rm ≤ 940MPa; EN10028) 已广泛应用于 LPG 船罐, 发展较为成熟, 其他国家容器钢可供选择的比较多。

液态 LPG 在环境温度 10bar 压力下, 黏度是 0.181cSt, 50bar 的压力下黏度是 0.205cSt; 液氨在环境温度 10bar 压力下, 黏度是 0.218cSt, 50bar 的压力下黏度是 0.219cSt。两者液体物理特性基本相似, 运输 LPG 的泵基本也可以用于液氨的传输, 储罐的深井泵对于两种液体的运输都可以兼用, 这在 LPG 多用途船上已得到验证, 但针对于燃料增压泵, 考虑到主机对两种液体的供气压力有差别, 可以选用压力在 50~70bar 的变频泵, 但成本会增加选型会比较困难, 另外也可以在 LPG 增压泵这里旁通一路预留空间, 用于后续安装液氨的燃料增压泵。

液态 LPG 在管道中的流速, 泵前不宜大于 1.2m/s, 泵后不应大于 3m/s, 通常管道内的平均流速取 0.8m/s ~ 1.4m/s, 液氨在管道中流速不宜大于 1.5m/s; 根据表 2 中液化石油气和氨燃料的热值和密度以及燃料在管道中的流速要求, 如在相同主机功率下, 氨燃料的供气管路流通面积约等于 1.5 到 2 倍液化石油气管路。

输氨介质的管道应采用无缝钢管, 其质量最低应符合 GB8163《流体输送用无缝钢管》的要求, 碳钢 (20# 钢) 主要用在热氨管道, 其使用的极限温度为 -20℃; 港口码头多采用 20# 碳钢管, 低标号碳钢在常温时具有较高韧性和较强抵抗断裂的能力, 但在低温时则表现出强度增加和韧性快速下降, 管道在低温下输送流体如产生振动或水锤效应受冲击易产生脆性开裂, 导致泄漏事故; Q345E 用在冷氨管道温度不能超过 -40℃, 否则钢的应力容易达到下限, 也可以用 A33Gr6 低温无缝钢管; 不锈钢管道可以用在 -196℃ 的低温下。为防止液氨应力腐蚀, 要求碳钢管材作焊后热处理。

输送 LPG 介质的管道通常采用奥氏体不锈钢和低温碳钢, 奥氏体不锈钢价格昂贵而较少适用。目前, 普遍使用进口的低温碳钢作为输送 LPG 的管材; 港口码头 LPG 供应站常采用 16Mn 低温管材, 船用 LPG 双燃料系统常采用奥氏体不锈钢, 目前改装完毕的“BWGEMINI”和“BWLEO”2

艘 LPG 船, 双燃料系统均采用 316L 不锈钢, 船中透气桅主机、阀组 and 高压泵组透气泄放采用 304L 不锈钢管; 如果是输送全压式 LPG 介质也可以考虑用普通的碳钢, 但需保证最低设计温度高于 -20℃。

5 续航力

氨在 20℃, 8.6bar 环境条件下, 密度是 0.61ton/m³, 在 45℃, 18bar 环境条件下, 密度是 0.57ton/m³, 其单位体积密度变化不大, 又因为氨的能量密度约是 LPG 的一半, 所以同样的主机功率和续航力要求, 船上需要安装接近 2 倍全压体积的氨储罐。苏伊士油轮在续航力 20000 海里的条件下使用双燃料系统, 如果要达到 EEDI 三阶段, LPG 储罐需要达到 3000m³ 左右; 如果续航力缩短到 10000 海里左右, 就可以采用一个 1500 立左右的 LPG 储罐同样能满足 EEDI 三阶段的要求。这也验证了 ABS 船级社低碳船运报告中对新能源船舶的设计展望, 文中提到续航力要求很高的全球贸易航线上的两艘基准船舶设计, 一艘苏伊士型油轮、一艘大型散货船。考虑到低碳燃料能量密度较低, 对于油轮来说续航力可以降低到现行标准一半左右, 目前 18000 海里的航程表明其燃料和余量足以往返中东和中国北部一次半, 拟议的 9000 海里续航力表明其燃料在中东至中国最长单次航程后约有 50% 的余量, 同时也能满足温室气体排放的要求^[5]。

6 结语

如新造船用液化石油气作为主机燃料, 氨燃料备用, 考虑到未来改装成本投入, 最初供气系统中管路阀门附件的设计采购可以按照氨燃料的高压供给系统设计; 相关仪表的量程和工作范围也要尽可能达到两种燃料的供气要求, 但要确保测量的精度; 安全阀和输送泵可以按照液化石油气供气要求去设计, 但要考虑可替换性, 预留拆装接口和布置空间; 全压式储罐设计压力 1.8Mpa, 设计温度不低于 -10℃, 材料使用高强度钢 07MnNiMoVDR 或 P690, 保证两种燃料都可以装载, 亦可大大减轻储罐的重量; 甲板预留同等体积的氨储罐安装空间, 保证改装后的续航力要求。

参考文献

- [1] ABS low-carbon-shipping-outlook ABS-WorldHQ@eagle.org www.eagle.org 2020 American Bureau of Shipping[Z].
- [2] MAN B&W. Two-stroke Engine Operating on Ammonia MAN Energy Solutions[J].Denmark,2018(3):15-16.
- [3] 高荃.LNG LPG 船用燃料的开发和利用[J].柴油机,2011(3): 67-69.
- [4] 黄金祥.全压式LPG 运输船储罐国产化制造技术现状及应用[J].中国化工装备,2010(4):4-5.
- [5] 管宇恒.LPG 船舶双燃料改造现场施工分析[J].船舶物资与市场,2021,2(29):46-48.