

LNG 高压供气系统工艺方案研究

曹鹏伟*

(中国海洋工程装备技术发展有限公司, 上海 200010)

摘要: LNG(液化天然气)高压供气系统主要应用于大型 LNG 动力船舶,其中 MAN ME-GI 二冲程低速机一直受制于国外技术。为了打破这一局面,对典型的 LNG 高压供气系统工艺进行分析梳理,提出了 2 种新型 LNG 高压供气系统工艺替代方案。通过实际案例分析比较,对 LNG 动力船舶在航行、装卸、加注、港口和锚地工况的 BOG(蒸发气)气体量进行平衡计算,对比了不同 LNG 高压供气系统关键设备的规格,推荐 BOG 再液化装置采用 Turbo-Brayton 型、BOG/LNG 管式混合器替代传统 BOG/LNG 换热器,优选出方案 2 作为国产化的 LNG 高压供气系统,为后续实船验证提供了工程基础。

关键词: LNG 供气系统;BOG 再液化装置;LNG 动力船舶;BOG/LNG 管式混合器

中图分类号:TE832

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)S2-0283-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S2.056

Study on process scheme of LNG high pressure gas supply system

CAO Peng-wei*

(China Offshore Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200010, China)

Abstract: LNG high pressure gas supply system is mainly applied in large-scale LNG powered ships for the MAN ME-GI two stroke low speed engine that is a technical barrier for China's companies. In order to solve this problem, two novel LNG high pressure gas supply system process alternatives are proposed through analyzing and sorting out the typical LNG high pressure gas supply system technologies. Through analyzing and comparing actual cases, the volume of boil off gas (BOG) of LNG powered ships is balanced during sea going, loading & offloading, bunkering, at port and anchorage conditions. Through comparing specifications of key equipment of different LNG high pressure gas supply system, it is suggested that Turbo-Brayton type is used as the BOG re-liquefaction unit, and BOG/LNG tube type mixer is used to replace the traditional BOG/LNG heat exchanger. Option 2 is selected as the localized LNG high pressure gas supply system in China, which provides an engineering basis for the follow-up actual ship verification.

Key words: LNG gas supply system; BOG re-liquefaction unit; LNG powered ship; BOG/LNG tube type mixer

由于日益严格的排放要求, LNG(液化天然气)作为清洁能源的一种将逐渐替代传统柴油作为船舶燃料,可减少 80%的 NO_x 排放、20%的 CO_x 排放,几乎不产生 SO_x, 满足 MARPOL 公约要求的排放标准。LNG 动力船舶采用双燃料推进系统,需要配置相应 LNG 供气系统,以满足燃料供应需求,而 LNG 高压供气系统应用于 MAN ME-GI 的船舶二冲程低速机。

Yude 等^[1]对 LNG 燃料舱内 LNG 老化进行了动态模拟研究,为 X-DF 发动机对供气系统中 LNG 老化问题提供了解决方案。裘春华等^[2]对低压和高压天然气供气系统的基本构成、主要设备选项以及相关设计要点进行了介绍。王涛等^[3]对供气系统的技术难点进行了分析,并对国内外供气系统发展进行阐述。李志鹏等^[4]分析供气系统组成及各部分功能,对关键设备进行选型研究,提出了供气系

统完整设计方案。Michael 等^[5]对供气系统天然气和柴油进行燃烧比较,并从燃料舱到进气管汇进行了相关布置研究。李鑫^[6]叙述了 LNG 燃料的优点和经济性,并介绍了 LNG 燃料系统设计和建造过程中的问题。Jungho 等^[7]对燃气汽化系统进行模拟分析,二氧化碳替代乙二醇水溶液,汽化效率明显提高。范延品等^[8]介绍了某 LNG 加注船燃料供气系统的设计方案,总结出满足 IGC 规则的 1 个燃气主阀用于多个设备的燃气供气系统设计。Helena 等^[9]对燃料罐和供气系统进行了系统优化设计,检查了船舶操作条件对燃料罐和燃料供气系统的影响及相互作用。以上论文,缺乏如何对 LNG 燃料罐内产生的 BOG 处理进行研究论证,而 BOG 处理工艺方案是 LNG 高压供气系统中的核心技术,因此,本文中针对 LNG 高压供气系统工艺方案进行研究,提出一种 BOG/LNG 管式混合器作为 BOG 处理工艺

收稿日期:2023-04-27;修回日期:2023-07-17

作者简介:曹鹏伟(1983-),男,硕士,工程师,研究方向为浮式 LNG 装备开发设计,通讯联系人,caopengwei@coffshore.cn。

核心设备,应用到国产化的新型 LNG 高压供气系统中。

1 BOG 的处理方法

在正常操作工况下,LNG 作为低温燃料储存在燃料罐内,由于和环境温度存在温差,LNG 会吸收外界热量汽化,从而产生 BOG 气体,将导致燃料罐内操作压力逐渐升高。为了维持储罐操作压力在正常的操作范围内,避免安全阀事故起跳,必须处理过量的 BOG 气体,保证 LNG 高压供气系统正常运行。目前,产生的 BOG 气体主要作为船舶燃料,再液化装置作为 LNG 高压供气系统的一个独立单元,可处理过量的 BOG 气体。传统的 BOG 再液化装置分别有瓦锡兰的 MARK III BOG 再液化装置,法液空的 Turbo-Brayton BOG 再液化装置和 Stirling 低温的 BOG 再液化装置。

图 1 为瓦锡兰的 MARK III BOG 再液化装置,采用三级压缩氮气膨胀制冷,BOG 经过冷箱液化后返回 LNG 液货舱。单套液化能力达到 7 t/h 的 BOG 气体,功效为 0.78 kWh/kg BOG,可回收 LNG 液货舱产生的 BOG 气体,提高 LNG 液货的运输率。

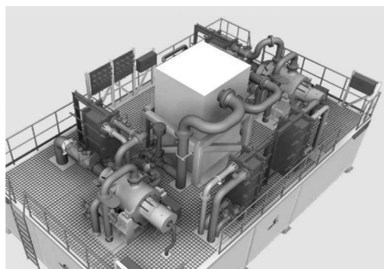


图 1 MARK III BOG 再液化装置

图 2 为法液空的 Turbo-Brayton BOG 再液化装置,采用压缩氮气膨胀制冷,通过过冷 LNG 温度到 -170°C ,喷淋进入 LNG 燃料舱以降低操作压力,单套液化能力达到 2 t/h,功效为 1.05 kWh/kg BOG,通过降压降温 LNG 燃料舱,达到液化 BOG 的效果,避免货舱超压。

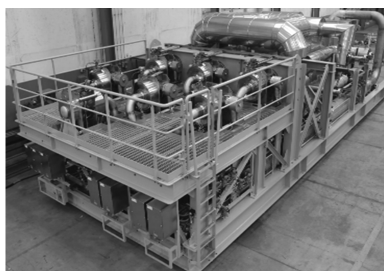


图 2 Turbo-Brayton BOG 再液化装置

图 3 为 Stirling BOG 再液化装置,采用斯特林制冷循环,氦气作为工作介质,利用回热原理降低温度,单套最大液化能力为 0.61 t/d,功效为 0.25 kWh/kg BOG。

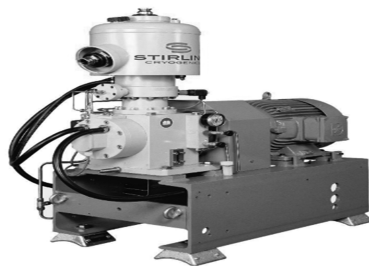


图 3 Stirling BOG 再液化装置

以上 3 种 BOG 再液化装置都可以用在 LNG 动力船舶,特别对于 LNG 动力船舶靠港和装卸货期间,主机处于停机状态,大量 BOG 气体无法作为燃料气,对于低压燃料舱而言,最大设计压力 0.025~0.07 MPa,耐压时间较短,为避免 BOG 超压泄放,配置 BOG 再液化装置起到至关重要的作用。

2 典型 LNG 高压供气系统工艺

对于 LNG 动力船舶航行期间,BOG 气体主要通过作为燃料、再液化和两者相结合的工艺处理,应用在 LNG 高压供气系统中。

LNG 高压供气系统的市场主要被韩国大宇 DSME 占据,供气系统工艺如图 4 所示。由图 4 可见,工艺方案包含 LNG 燃料舱、LNG 燃料泵、BOG 压缩机、BOG 冷却器、BOG/LNG 换热器、LNG 高压泵和 LNG 汽化器。LNG 燃料舱内的 LNG 经过 LNG 燃料泵输送到 BOG/LNG 换热器,而 LNG 燃料舱内产生的 BOG 气体经过 BOG 压缩机加压后冷却,在 BOG/LNG 换热器内利用 LNG 的冷能完成液化,返回到 LNG 燃料舱。换热后的 LNG 经 LNG 高压泵增压后进入 LNG 汽化器完成汽化,输送到燃料气用户,主要为 LNG 动力船舶主机。

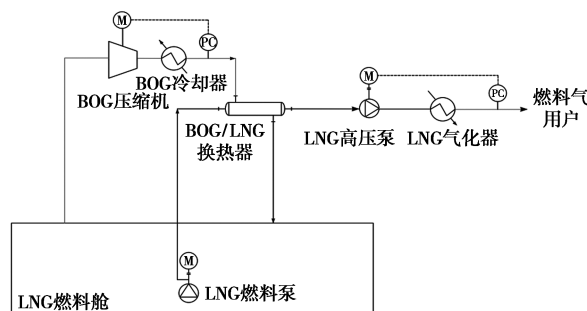


图 4 DSME LNG 高压供气系统工艺

DSME 方案的优点是工艺流程和控制方案简单易操作;缺点是经过低温 BOG 压缩机加压产生的压力能返回 LNG 燃料罐内,又会产生少量的 BOG,增大了 BOG 压缩机的负荷能力,投资较大。

3 新型 LNG 高压供气系统工艺

为了突破国外专利商的技术,形成拥有自主知识产权的国产化工艺方案,提出了 2 种新型 LNG 高压供气系统方案。

图 5 所示为方案 1,是采用 BOG 再冷凝器替代 BOG/LNG 换热器,因为 BOG 再冷凝器非常成熟可靠(图 6),已经大规模应用在陆上 LNG 接收站内。来自低压泵输送的 LNG 喷洒进入 BOG 再冷凝器,BOG 再冷凝器内部安装了规整填料,与经过加压后的 BOG 气体充分接触混合液化,底部排出进入 LNG 高压泵加压,经 LNG 汽化器汽化输送到燃料气用户。

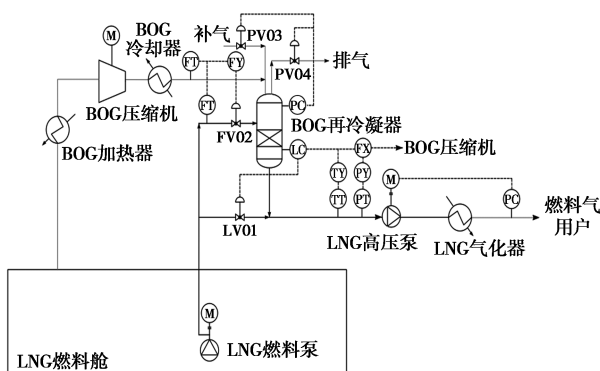


图 5 方案 1 LNG 高压供气系统工艺

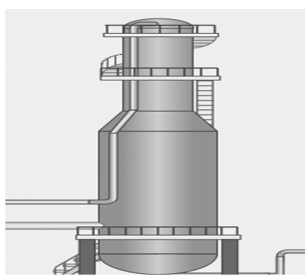


图 6 BOG 再冷凝器

方案 1 的缺点是:①BOG 再冷凝器设备体积较大,不利于船舱布置;②船舶晃动会影响 BOG 再冷凝器的运行;③流程工艺和控制方案复杂,不易操作。

图 7 所示为方案 2,是采用 BOG/LNG 管式混合器代替 BOG/LNG 换热器,BOG/LNG 管式混合器设备简单(图 8),已经大规模应用在 LNG 接收站内,

主要作为 BOG 过热器设置在 BOG 压缩机吸入罐的入口,起到稳定 BOG 压缩机进气温度作用。来自低压泵输送的 LNG 从底部进入 BOG/LNG 管式混合器,与经过加压后的 BOG 气体高速进入管内,且内部设置了混合元件,冷凝效率高于常规的填料型 BOG 再冷凝器,BOG 与 LNG 混合液化后,顶部排出进入 LNG 高压泵加压,经 LNG 汽化器汽化输送到燃料气用户。

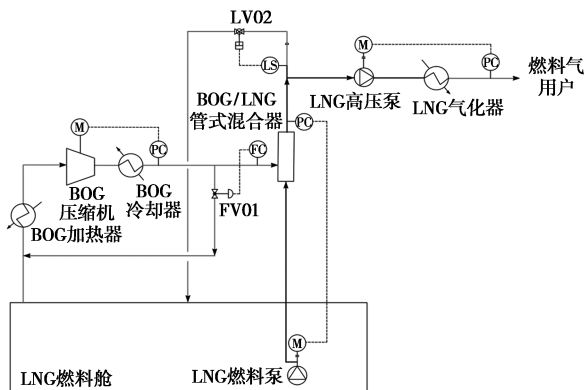


图 7 方案 2 LNG 高压供气系统工艺

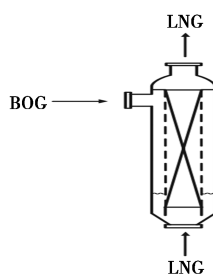


图 8 BOG/LNG 管式混合器

方案 2 的优点是:①使用了常温 BOG 压缩机,相比低温 BOG 压缩机,价格显著降低;②采用 BOG/LNG 管式混合器代替 BOG/LNG 换热器或者 BOG 再冷凝器,不仅价格降低,而且控制系统复杂程度大大降低,同时设备尺寸也显著减小;③为避免 BOG/LNG 管式混合器内的不凝气体汽蚀损坏 LNG 高压泵,顶部管道设置液位控制以排出不凝气。

4 案例分析

以某 LNG 动力船舶为例,LNG 常压液货舱为 11 100 m³,BOG 蒸发率为 0.2%,LNG 加注速率为 1 600 m³/h。船舶配置 1 台 MAN B&W 7G80ME-C9.5 TH 二冲程的双燃料主机,3 台瓦锡兰 9L20DF 4 冲程双燃料辅机,1 台 8 t/h 的双燃料蒸汽锅炉。计算出 LNG 动力船舶运输中 BOG 的产生及消耗量,包括航行、装卸、加注、港口和锚地等,LNG 动力

船舶中不同工况 BOG 气体消耗计算见表 1, 在航行工况下, 产生 148 kg/h 的过量 BOG 气体, 需要通过 LNG 高压供气系统液化作为主机燃料处理。不同 LNG 高压供气系统对比见表 2, 新型方案 1 采用的 BOG 再冷凝器, 由于需要配置大量的控制阀、仪表元件和流量计, 投资成本高昂; 而新型方案 2 采用 BOG/LNG 管式混合器, BOG 和 LNG 直接接触换热, 设备简单、效率高、尺寸小、成本低, 可以作为替代 DSME 的 BOG/LNG 换热器的方案。

表 1 LNG 动力船舶不同工况 BOG 气体平衡表

工况	kg/h				
	航行	装卸	加注	港口	锚地
BOG 蒸发量	389	389	389	389	389
辅机消耗	241	446	140	140	140
锅炉消耗	0	42	42	42	42
过量 BOG	148	0	207	207	207

表 2 不同 LNG 高压供气系统对比

方案	关键设备	尺寸(直径×长)/ m	价格/ 万美元
DSME 方案	BOG/LNG 换热器	0.7×2.8	15
新型方案 1	BOG 再冷凝器	1.2×3.5	40
新型方案 2	BOG/LNG 管式混合器	0.4×3.0	8

在加注、港口和锚地工况下, 主机停止运行, 无法消耗燃料, 需要通过独立的 BOG 再液化装置处理。不同 BOG 再液化装置对比见表 3, 瓦锡兰 MARK III 型 BOG 再液化装置标准产品最低液化能力 0.85 t/h, 远高于 207 kg/h 过量 BOG, 功率消耗过高; 斯特林低温 Stirling 型标准产品最大液化能力 610 kg/d, 为匹配过量 BOG 流量需配置至少 8 台, 数量较多, 操作复杂; 法液空 Turbo-Brayton 型标准产品液化能力 200 kg/h, 可完美匹配 BOG 流量, 可作为此项目 LNG 动力船舶 BOG 再液化装置的选择。

表 3 不同 BOG 再液化装置对比

BOG 再液化装置	能力/ (kg·h ⁻¹)	数量/ 台	功率/ kW	价格/ 万美元
瓦锡兰 MARK III 型	850	1	896	
法液空 Turbo-Brayton 型	200	1	210	275
斯特林低温 Stirling 型	25.4	8	52	240

5 总结

(1) 介绍了 LNG 动力船舶各种运行工况下 BOG 气体的处理方法, 比较了已经应用的瓦锡兰 MARK III 型、法液空 Turbo-Brayton 型和斯特林低温 Stirling 型 BOG 再液化装置的优缺点。

(2) 介绍了已经成熟应用的 DSME LNG 高压供气系统工艺特点, 并研究开发了 2 种新型的 LNG 高压供气系统工艺, 进行各自优缺点的对比介绍。

(3) 以实际案例分析, 得出 LNG 动力船舶各种运行工况下的 BOG 气体量, 比较了不同 BOG 再液化装置能力、数量、功率和价格, 推荐采用法液空 Turbo-Brayton 型。

(4) 比较了不同 LNG 高压供气系统关键设备的尺寸和价格, 推荐采用 BOG/LNG 管式换热器作为替代 BOG/LNG 换热器, 最终采用新型方案 2 作为对标国外的 LNG 高压供气系统工艺方案。

参考文献

- [1] Yude Shao, Sangdeuk Yoon, Hokeun Kang. Dynamic simulation of fuel tank aging for LNG-fueled ship apparatus in an X-DF otto cycle engine[J]. Energy Science and Engineering, 2019, 7(6): 1-15.
- [2] 裴春华, 孙永元, 王璞. 双燃料发动机天然气供气系统设计[J]. 柴油机, 2018, 40(5): 27-33.
- [3] 王涛, 李善从, 吴璇, 等. 双燃料低速发动机供气系统分析[J]. 柴油机, 2014, 36(6): 22-25.
- [4] 李志鹏, 马忠丽, 李大伟, 等. 双燃料大型集装箱船 LNG 燃料供气系统设计[J]. 应用科技, 2019, 46(2): 7-12.
- [5] Michael Rachaw, Steffen Loest, Leonardo Risman Maruli Sitinjak. Concept for a LNG gas handling system for a dual fuel engine[J]. International Journal of Marine Engineering Innovation and Research, 2017, 1(4): 272-283.
- [6] 李鑫. LNG 作为燃料在船舶上的应用[J]. 船舶设计通讯, 2014, (B09): 91-95.
- [7] Jungho Choi, Eun-Young Park. Comparative study on fuel gas supply systems for LNG bunkering using carbon dioxide and glycol water [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7: 184, 1-13.
- [8] 范延品, 季宝军, 孟中原, 等. 满足 IGC 规则的燃料供气系统应用研究[J]. 船舶, 2022, 33(2): 71-78.
- [9] Helena Galic, Danijel Zdravec. The concept phase design of LNG tank and fuel supply system on dual fuel ships [J]. Ships and Offshore Structure, 2022, 18(3): 235-252. ■