

浅谈 LNG 动力船舶气试工艺

吕家吴

中海油广东水运清洁能源有限公司, 广东 广州 510000

摘 要 : 新造 / 改造 LNG 动力船投运前需将常温常压下的 LNG 储罐经过吹扫、惰化、预冷、置换和加注五个流程, 才能将极低温的 LNG 液体贮运以作为船舶动力燃料。

关 键 词 : 气试; 吹扫; 预冷; 置换; 加注

Discussion on Gas Testing Technology for LNG Powered Ships

Lv Jiawu

CNOOC Guangdong Water Transport Clean Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : Before the new/renovated LNG power ship is put into operation, the LNG storage tank at room temperature and pressure needs to go through five processes: blowing, inerting, pre cooling, displacement, and filling, in order to store and transport extremely low temperature LNG liquid as ship power fuel.

Key words : gas testing; blowing and sweeping; pre cooling; displacement; filling

引言

党的十九大提出“建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计”。2021 年, 广东省政府正式下发《广东省提升内河航运能力和推动内河航运绿色发展总体分工方案》《广东省内河航运能力提升实施方案》《广东省内河航运绿色发展示范工程实施方案》。11 月, 广东省发改委正式印发《广东省运输船舶 LNG 加注站建设实施方案》。一场关于广东内河航运的“绿色动力革命”正在提挡加速。LNG 作为船舶燃料动力, 相对于柴油动力船舶, 具有明显的优势: ① LNG 动力船可以减少废气排放; ② LNG 动力船可以大大降低船舶能耗, 从而降低船舶运营成本; ③ LNG 动力船可以提高船舶运营效率, 提升企业竞争力; ④减少 20% 的碳、80% 的氮氧化物与 100% 的硫氧化物和颗粒物的排放。积极推动船舶改造升级, 减少船舶污染排放是落实国家碳达峰、碳中和部署的重要举措。因此, 大力发展 LNG 动力船舶成为近年来航运业关注的焦点。

一、LNG 储罐概述

LNG 储罐在正式进入低温液体前, 要首先进行充分的冷却, 即预冷过程。LNG 储罐及管路采用奥氏体不锈钢材料, 奥氏体不锈钢具有优异的低温性能, 但线膨胀系数较大, 在 LNG 温度条件下, 不锈钢收缩率约为千分之三, 对于 304 材质管路, 在工作温度为 -162°C 时, 100m 管路大约收缩 300mm^[2]。两个固定点之间, 由于冷收缩产生的应力, 可能远远超过材料的屈服极限, 特别是对于 LNG 储罐内的管道要求更加严格, 一旦出现问题, 将会产生严重后果^[3]。新造 / 改造的 LNG 动力船燃料储罐在投入运行前必须对其进行吹扫、惰化、预冷、置换和加注五个工艺, 将储罐温度从常温降至 -130°C 以下, 以满足 LNG 的储运, 此过程称之为气试。

二、气试作业介绍

LNG 储罐属于特种设备, 操作人员必须持有压力容器 R 证方可进行操作, 对 LNG 动力船进行燃料充装时需要 P 证, 现场作业管理人员需要安全人员管理 A 证, 临水作业需要船员证等, 作业前应对参与本次作业的人员进行检查确认, 保证所有作业人员均持证上岗。LNG 为低温、易燃易爆危险化学品, 在气试过程中可能会出现泄漏、冻伤、火灾和爆炸等事故, 作业前还应对所有参加气试作业人员开展相关理论培训并开展生产事故应急演练, 对可能发生的故事制定应对措施, 并对现场进行区域责任划分, 确保意外事故发生时能迅速有效处理。

气试所用设备有电力驱动和非电力驱动, 电力驱动指的是使用潜液泵对 LNG 或者液氮进行增压输送介质的设备, 非电力驱动

指的是靠 LNG 槽车与受注船储罐的压差对 LNG 或者液氮输送介质的设备，由于受注船储罐在置换过程中可以将储罐内压力排至常压，所以优先使用非电力驱动设备，也可以使用电力驱动设备不通电对其开展气试工作，但是无论选用那种设备均应确保设备安全阀、压力表等安全附件在检验有效期内。

天然气的爆炸极限（V%）为5-15%，与空气混合之后极易发生爆炸，所以必须选用一种中间介质对其进行置换。液氮是惰性，无色，无味，低粘度，无腐蚀性，不可燃，温度极低的透明液体氮气构成了大气的大部分（体积比78.03%，重量比75.5%）。在常压下，氮的沸点为-196.56℃，是船舶 LNG 储罐气试首选的中间介质，但它在汽化时大量吸热，作业人员接触将造成冻伤，所以在开展气试作业过程中必须全程佩戴防冻手套、防护面具、安全帽、穿防静电服和绝缘鞋等合格劳动防护用品，还应在作业现场配备防冻服、正压式呼吸器等应急救援装备，以防止发生意外时可以及时处置。

气试属于危险化学品作业，所以对现场作业环境和条件要求比较高。作业现场必须有符合国家标准防雷接地网，接地电阻 $\leq 4\Omega$ 。在气试作业码头站周边划分危险区、限制区和警戒区，限制区域和警戒区域的设置有助于将 LNG 燃料泄漏和着火的可能性降至最低，并通过隔离进一步保护生命和财产安全。利用码头上现有的场地、道路、照明、给排水系统，在设备区设置夜间反光警示标示。危险区为加注相关的危险区域，具体指在岸上部分为 LNG 槽车卸车口和气试设备，与岸上相关的船上危险区为与船连接加注口区域。限制区为危险区域的进一步延伸，具体指 LNG 槽车、气试设备、相关连接软管周围3米范围内。限制区域内仅限必要操作人员进入并对潜在火源进行控制，必要操作人员系指对加注作业进行监控和控制的人员。警戒区域为外围控制区域，为限制区域的缓冲区域，最大限度降低安全风险，具体指 LNG 槽车、气试设备、相关连接软管周围25米范围内。气试作业时应设置限制区域和警戒区域，加以监控，非作业期间区域不作为强制要求。应对警戒区内的船舶 / 港口交通进行监控和控制。

三、气试作业要求

LNG 的主要成分为甲烷，还有少量的乙烷、丙烷以及氮等，体积约为同量气态天然气体积的 1/625。LNG 的主要用途是作为船舶燃料和低温冷源，同时也可以作为汽车燃料。在常温常压下，LNG 的沸点温度为-162℃。由于 LNG 的低温特性，所遇 LNG 的金属部件会出现冷收缩，在 LNG 管路系统的焊缝、管件、法兰、阀门、密封处以及 LNG 金属部件存在的腐蚀缺陷处等都可能发生 LNG 的泄漏，泄漏后的 LNG 蒸气会形成比其体积大六百多倍的蒸气云，若遇潜在的火源则会发生火灾和爆炸的危险。LNG 蒸气遇点火源后着火，火焰会随着助燃物氧气而扩散，当燃烧物 LNG 量很大时，火灾引起的伤害半径也会很大，会给周围设备设施以及周围居民等造成严重的损失。《中华人民共和国大气污染防治法》第十九条规定：船舶使用的燃料必须符合国家有关标准。具体要求见《船舶燃料供应规则》（SOLAS）和《船舶燃料供应规则实

施细则》（SOLASII）。《中华人民共和国大气污染防治法》第二十条规定：使用天然气等清洁能源的船舶应当在其机舱和驾驶室配备符合规定的设备，并在船体上标明 LNG 燃料供应设施的位置及工作状态。《中华人民共和国大气污染防治法》第四十五条规定：任何单位和个人不得向大气排放油类、废气和其他有毒有害物质，所以在开展气试作业前，必须对气试作业现场条件进行检查确认，条件不具备不得开展相关工作。具体要求如下表所示：

表 1：气试作业要求

气象要求	雷雨、闪电天气严禁作业
	氮气排放和天然气置换作业时风速应在 2—10m/s，无风不开展作业
船舶要求	船舶建造 / 改造工作已完成，具备气试条件
	船舶燃料系统压力表、安全阀等安全附件均在检验合格有效期内
	船舶燃料储罐到机舱 GUV 的管路焊接射线探伤工作完成，气密试验合格
	船舶周围 25 米范围内无密闭空间或者船舶其他施工工作
码头要求	作业现场周围建、构筑物防雷（感应雷、直击雷）措施符合规范要求
	作业区域有符合规范的接地系统，接地电阻 $\leq 4\Omega$
	作业现场与员工宿舍保持 30 米以上的安全距离
	作业现场设置安全警示标志，无关人员禁止进入

四、作业前检查

作业前应对现场作业环境检查确认，检查内容包括人、机、料、法、环等内容。

表 2：作业前检查内容

作业前检查	检查所有气试作业人员均持证上岗，证件在有效期内
	对罐车、气试设备和气试船舶的各设备、仪表进行检查，确认其处于良好工作状态
	罐车应安全停放在指定位置，并采取措施防止意外移动
	作业服务方、船厂、总包方对作业区域按照《作业前检查表》逐项检查确认，明确各自工作界面、工作职责，并由三方代表签字
	检查所有操作人员均穿戴好合格的劳动防护用品
	检查确认罐车有关证件、标志齐全有效，技术状况良好
	检查确认警戒区域内无动火、密闭空间、吊装等工作
	检查确认天气条件具备作业开工条件
气试前准备工作	将罐车、气试设备、气试船舶接地线与码头接地网络可靠连接，释放车体静电
	在船岸之间设置防落网，防止加注管道超过弯曲半径受损
	将罐车、气试设备用卸车软管连接，并检查其连接的可靠性
	在加注软管与气试船舶之间设置防冻装置，防止甲板冻伤

五、气试作业

船舶气试主要有吹扫、惰化、预冷、置换和加注五个流程来完成，由于液氮比 LNG 便宜且对环境没有污染，所以吹扫、惰化、预冷、置换这四个步骤用液氮来开展相关作业，待 LNG 储罐

温度达到-130℃以下时再利用天然气来对液氮进行吹扫和置换，天然气浓度>95%后再进行LNG加注作业。

（一）吹扫流程

LNG储罐的吹扫主要采用氮气来完成。将液氮槽车液相、气相接口通过卸车软管与移动式橇装加注站液相、气相接口连接，再将移动式橇装加注站加注口通过加注软管与动力船燃料罐连接。利用液氮槽车自带增压器对槽车储罐进行增压，并维持压力不低于0.5MPa。开启液氮槽车气相管道阀门，利用液氮槽车罐内氮气依次分段对增压器、LNG潜液泵泵池、空温式气化器及各液相、气相管道等设备进行吹扫，氮气经过EAG加热器从放散管口排出。完成全面吹扫后开启加注口管道阀门，对船上管道进行吹扫，氮气经船上透气阀排出。合格标准：取样口氧含量<2%，完成设备及管路吹扫工作。

（二）干燥、惰化流程作业

打开液氮槽车液相管道阀门，液氮流向空温式气化器，以氮气形式进入动力船LNG燃料罐，经船上透气桅排出，直至干燥、惰化完成^[1]。合格标准：取样口气体露点温度≤-40℃，氧含量<2%，完成干燥、惰化工作。在操作过程中实时对管线和储罐温度、气体露点、氧浓度等相关数据进行记录。

（三）预冷流程

完成吹扫、干燥、惰化后，关闭液氮槽车气相管道阀门，开启液相管道阀门，液氮流向空温式气化器，以氮气形式从船上充装站液相口以上喷淋方式注入LNG燃料罐，通过控制气化器入口阀门调节液氮流速，从而达到对氮气温度的控制，逐步降低进入LNG燃料罐氮气温度，控制温降率≤10℃/h，直至LNG燃料罐温度低于-130℃，关闭液氮槽车液相管道阀门，完成LNG燃料罐预冷。预冷完成后向动力船储罐加注一定量的液氮，用于动力船LNG燃料系统调试，同时保持储罐内液氮静置时间不小于24小时，直至动力船储罐内压力不再升高，以达到充分预冷的效果。

（四）置换流程

LNG燃料供应系统调试完成后，通过排液口将储罐内的液氮

排出。将LNG槽车液相、增压液相、气相管道与橇装加注站卸车口管道对应连接，开启槽车增压液相阀门，对槽车储罐进行增压并保持压力≥0.5MPa。开启槽车气相阀门，利用槽车储罐内气态天然气对设备及管线进行吹扫，驱散残留在系统内的氮气。完成吹扫流程后，关闭动力船对空排气阀门，开启槽车气相阀，天然气经加注口气相管道注入动力船燃料罐，对储罐进行增压至0.4MPa静置30分钟后，打开动力船对空排气阀门，储罐内气体经船上透气桅排出直至压力小于0.05MPa，重复以上置换操作流程直至取样口天然气浓度>95%为合格（一般情况下，此过程重复两次即可）。

（五）加注流程

完成置换流程后，开启槽车增压液相阀门，保持槽罐压力在0.5MPa左右，检查确认燃料罐压力小于0.05MPa，开启槽车液相阀门，槽罐内的LNG在压差作用下进入动力船燃料罐。通过动力船燃料罐顶、底部进液阀调整罐内压力，始终与槽车保持压差，直至达到计划加注量。

加注初期采用顶部喷淋方式进行小流量加注，充分预冷管道减少系统管道中BOG的产生，待动力船燃料罐压力下降并稳定后采用底部进液方式进行大流量加注。加注过程中密切留意动力船燃料罐液位和压力的变化，当出现压力异常升高或接近预设的加注量时立即停止加注，防止过充或溢流。

六、结语

随着全球海运贸易快速发展，船舶排放已成为航线区域和港口城市大气污染的重要来源之一，LNG是当前经济和技术条件下最安全、减排效果最好的船舶燃料。液化天然气作为国际海事新环保规则下的重要燃料方案，LNG动力船的商业化发展前景因此变得明朗，正日渐受到海运、造船业的广泛关注。当前，以LNG为燃料的船舶订单量出现爆发式增长，同时越来越多港口码头开始布局LNG加注业务。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国国家标准. 液化天然气燃料水上加注作业安全规程 GB42283-2022
- [2] 中华人民共和国长江海事局. 内河LNG燃料动力船舶安全操作指南[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2015
- [3] 中国船级社. 天然气燃料动力船舶规范[S]. 2017
- [4] 宋玉东, 陈功剑. LNG船舶气试工艺及方案实施要点[J]. 广东石油化工学院学报, 2017, 27(06): 41-44+50.
- [5] 胡超, 杨光远, 孙吉业. 山东LNG接收站船舶气试工艺改造方案比选[J]. 油气储运, 2015, 34(03): 323-327.
- [6] 叶芬. 海南LNG接收站配合LNG运输船气体试验方案优化研究[J]. 化工管理, 2014, (14): 204-205.
- [7] 苑伟民. LNG运输船气试与首次装卸操作的程序[J]. 船舶标准化工程师, 2014, 47(03): 30-34.
- [8] 付海泉, 林素辉, 郭志明. 大型LNG接收站配合LNG船气试作业简析[J]. 天然气技术与经济, 2012, 6(04): 47-50+79.
- [9] 张辛. LNG船舶加注浅谈[J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(10): 19-21.
- [10] 聂细亮, 李国帅. VLGC船舶气试流程及操作要点浅析[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(05): 5-7.
- [11] 杨路明, 王志勇, 王昆鹏. LNG加注船配合LNG船舶气试作业流程[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(04): 73-74.