

# 液化天然气船舶卸料期间舱内压力控制研究

陈经发（国家管网集团粤东液化天然气有限责任公司，广东 揭阳 515200）

**摘要：**液化天然气（LNG）已成为全球能源市场的重要组成部分，其安全卸载对液化天然气船舶（简称“LNG 船舶”）和 LNG 接收站运行至关重要。在卸料过程中，舱内压力将直接关系到 LNG 的卸载效率和安全性。鉴于此，本文综合探讨了 LNG 船舶卸料系统的组成、操作流程及压力控制的重要性，并提出了舱内压力控制的主要措施和建议，旨在为 LNG 船舶卸料期间的安全操作提供技术支持。

**关键词：**液化天然气船舶；卸料；BOG；压力控制

LNG 船舶作为清洁能源天然气的运输载体，在全球能源供应链中扮演着关键角色，随着全球对清洁能源需求增加，LNG 船舶的运用也日益频繁。在此背景下，确保 LNG 船舶在卸料期间的安全和效率显得尤为重要。LNG 船舶舱内压力控制作为卸料过程重点监控环节，其重要性不容忽视。货舱压力过高将会使岸方被迫接收更多的蒸发气（Boil Off Gas，简称 BOG），如果超出岸方处理能力，将会导致不得不减缓卸货速率，或者船方开启气体燃烧装置（Gas Combustion Unit，简称 GCU）来处理过多的 BOG 而造成货损，又或者超过货舱压力释放阀直接放空造成浪费及影响环境，甚至会造成货舱的损毁，带来巨大的经济损失。因此，深入探讨和分析 LNG 船舶卸料期间舱内压力控制技术的应用和效果，能够为 LNG 船舶安全运营提供理论和实践指导。

## 1 液化天然气船舶卸料系统概述

### 1.1 LNG 船舶卸料系统

船舶卸料系统主要涉及货舱、货物泵、管道、阀门以及压力控制设备等。货舱用于存储  $-162^{\circ}\text{C}$  左右的液化天然气，具备极好的保温隔热效果，能够防止装载的 LNG 吸热而产生大量的 BOG，造成货损和浪费。货物泵是卸料系统中将 LNG 从船舶转移到岸上储存设施的动力源，其必须具备足够的外输压力和扬程，以克服管道中的阻力并保持 LNG 在输送过程中的流畅性。管道贯通着整个系统，不仅要保证耐低温性和气密性，还要包裹着绝佳的保冷材料以防止 LNG 吸收大量的外界热量。阀门在控制 LNG 流动方向和流量方面起到关键作用，根据实际情况调整阀门的开度以控制卸货速率，并在紧急情况时可迅速切断 LNG 的输送。最后，压力控制设备是 LNG 船舶储存和卸料安全运行的重要保障，大副应持续监控货舱内的压力水平，以便在压力超出安全范围时可及时采取相关措施，如调

整返气阀、开启气体燃烧装置（GCU）或再液化装置等，以避免潜在危险。

### 1.2 卸料操作流程

LNG 船舶的卸料操作是一个由船侧和岸侧双方紧密配合的过程，必须严格按照《国际油轮与油码头安全指南》和国际气体船运输与码头经营者协会（SIGTTO）相关规范开展卸料。卸料操作流程主要为：卸料臂连接、卸前计量、热态 ESD 测试、预冷、冷态 ESD 测试、开始卸料、全速卸料、取样分析、减速卸料、吹扫置换、卸后计量、卸料臂断开等。卸料期间，应密切监控 LNG 船舶货舱内压力，防止超压或者欠超出现安全事故。为保证安全顺利的完成卸料作业，卸货速率和相关的返气阀门应根据实际情况进行调整，期间船岸间作为一个整体需要相互配合和协作。此外，卸料过程中还需要考虑气候条件和海况等自然环境的变化，当出现恶劣状况时，船岸间进行充分沟通以确定是否中断卸料、脱离卸料臂以及船舶离泊等措施。

### 1.3 BOG 处理系统

LNG 船舶装载的是极低温的液化天然气，沸点约为  $-162^{\circ}\text{C}$ ，任何热量的输入，都会使 LNG 转化为 BOG，由液态变成气态的过程将会使 LNG 货舱压力升高。目前主流 LNG 船舶均使用薄膜型液货舱，其设计能力通常为 25kPa 或者 35kPa，超过该压力限值将打开压力释放阀进行排气。而自支撑型如 Type C 型液货舱则由于其按照压力容器的规范进行设计，故可承受较大压力，本文所述主要针对薄膜型液货舱的压力控制方案。

货舱 BOG 产生的途径主要有：①货舱的设计。尽管 LNG 货舱有绝热层的防护，但无法做到 100% 的隔温，仍会造成货物 LNG 的蒸发，通常日蒸发率约为 0.15%；②启动喷淋泵预冷以及货物泵卸料时，泵运转产生的热量输入；③卸料过程由岸方返回货舱的

BOG；④当货舱压力过低时启动喷淋泵将 LNG 泵入 LNG 蒸发器变成 BOG 以维持货舱压力；⑤ LNG 船舶航行过程中风浪、海况引起的船体摇晃也是 BOG 产生过多的因素之一。根据 LNG 船舶推进装置的不同而采用不同的 BOG 处理方式，一种方式是 LNG 船舶推进装置采用 BOG 作为燃料，BOG 经由液化舱引出燃烧，为推进装置提供动力；另一种方式是将 BOG 再液化返回液货舱。

## 2 舱内压力控制技术

### 2.1 压力监测技术

在液化天然气 (LNG) 船舶卸料操作中，压力监测技术是保障安全的核心环节。首先，LNG 船舶需要配备适合 LNG 舱内环境的传感器，传感器不仅要具备高精度，还应适应极端的物理条件。例如，压阻式传感器因其在  $-196^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$  的宽广温度范围内能保持  $\pm 0.25\%$  的精度而广泛应用于 LNG 舱内；电容式传感器在  $-200^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$  的温度范围内提供  $\pm 0.2\%$  的精度，适用于动态压力测量；而振动式传感器则以其在极端环境下的  $\pm 0.1\%$  高精度和对温度变化的低敏感性著称。其次，数据采集与处理同样至关重要。在此环节，系统应每秒进行一次数据采集，以确保数据及时性。在数据处理方面，需要使用先进软件进行数据实时分析，从而快速识别响应压力变化。最后，安全阈值的设定和报警系统的配置是保证 LNG 舱内安全的重要措施。例如一艘 LNG 船舶，货舱设计最大压力为 25kPa，合理的安全阈值应在 4kPa~19kPa 之间；当压力达到 20kPa 时，高压报警；达到 22kPa 时，高高压报警；达到 23kPa 时，排气阀开启，BOG 通过 1# 舱透气桅排放；达到 25kPa 时，安全阀打开，通过本舱透气桅排放。另外，LNG 船舶配备有另一个重要的系统——紧急关闭系统 (ESD)，货舱压力到达一定的异常值时也会触发 ESD，如货舱压力和主绝热层压力差小于 0.5kPa 或 0kPa 时触发 ESD，紧急关闭相关阀门以中断 LNG 船舶卸料，防止安全事故发生。

### 2.2 自动控制系统

LNG 船舶自动控制系统通常包括压力监测传感器、压力调节设备 (如调压阀和节流阀)、数据处理单元以及控制软件。以上组件必须互联互通，以实现无缝地信息流和控制命令的传递。系统架构设计上，应确保数据从传感器到控制器的传输是实时且无误差。例如，传感器应每秒至少采集一次数据，并通过高速网络实时传输至中央控制系统。控制系统设计要求高度的可靠性和容错能力，以应对可能的硬件故障

或数据传输中断。在软件算法方面，PID (比例-积分-微分) 控制算法是自动控制系统中的核心，能够根据压力监测数据调整阀门开度，以维持舱内压力在预设范围内。PID 控制器的比例增益、积分时间和微分时间等参数需要根据实际情况进行调整，以适应不同的操作条件。最后，系统测试与维护是确保自动控制系统长期稳定运行的关键，应定期进行模拟操作测试，以确保在各种潜在情况下系统响应均为正确且有效的。

## 3 舱内压力控制手段

### 3.1 岸方协助控制压力

LNG 船舶停靠在 LNG 接收站卸料，此时船岸方作为一个共同体，应共同承担起卸料安全的职责，任何一方出现异常情况另一方均应在安全前提下实施最大限度的协助、救援。船岸间气相臂连接后，船岸间的 BOG 即可实现自由流动。卸料过程中，随着 LNG 从船舱输送至岸方储罐，货舱的压力会逐渐降低，当下降到一定值后即需要岸方进行返气，这一过程实现了船岸间的压力平衡。卸料开始时，船岸双方应了解各自的压力，以便卸料过程合理控制返气阀开度，避免压力超出预设范围。卸料过程中，如果船舱压力较高，应保持返气阀小开度甚至完全关闭，但如果岸方储罐压力保持高位并没有下降趋势，经岸方卸船主管要求，船方应尽量提供协助，加大返回船舱的 BOG 接收量，甚至进一步开启 GCU 燃烧蒸发气以保证船岸的压力不失控，但此举容易出现损耗 BOG 的费用纠纷，建议船方大副及时汇报船舶租家请求批示或作好相关文件记录并要求岸方签署；否则，可与岸方卸料主管沟通以降低卸料速率的方式以配合岸方抑制压力上涨。如果卸料期间，船舱压力过小，尽管岸方已经全开了返气阀，那船方为保持舱压良好，可适度降低发电机组的负荷，如果效果不理想可考虑开启 LNG 蒸发器进行增压。

### 3.2 BOG 用作燃料控压

对于双燃料蒸汽轮机的 LNG 船，航行期间货舱蒸发的 BOG 气体被低压压缩机抽至机舱燃烧，为船舶提供前行的动力；靠泊卸料期间，则通过低压压缩机抽至双燃料主发电机组，燃烧发电以供船舶用电设备使用。此方式既有效利用了 BOG，也控制了货舱的压力。

### 3.3 GCU 控压

当 BOG 产生量过大，超出了船舶用电设备的消耗量并且启用船舶的蒸汽冷凝系统也无法有效处理时，

超过的 BOG 将通过 GCU 烧掉。此方式纯粹把多余的 BOG 消耗掉,不产生有价值的结果,但为了船舶货舱的安全,也必须要如此。

### 3.4 再液化装置控压

对于采用单燃料低速柴油机的 LNG 船,如 Q-MAX 和 Q-FLEX 型 LNG 船,以燃料为燃料,BOG 不作为燃料使用。该船型配备了再液化装置,将货舱内过多的 BOG 液化为 LNG,再返回货舱,从而达到降低舱压的目的。

### 3.5 安全释放阀控压

如果前述几种手段依然无法控制货舱内压力,则开启货舱设置的压力释放阀直接排放 BOG 进行泄压,这是一种会加剧温室效应的环境不友好方式,但同时也作为货舱超压保护的最后一道防线,通常当货舱达到 90% 的最高压力设定值时,船方应及时通知岸方。针对最高设计压力为 25kPa 的货舱,当舱压上升至 23kPa 时,货舱排气阀将自动开启,BOG 通过货舱 1# 的透气桅排放;当舱压升高至 25kPa 时,货舱的安全释放压将自动打开,多余的 BOG 通过本舱透气桅排放。

### 3.6 与船舶其他安全系统的协同

在 LNG 船舶的卸料操作中,与船舶其他安全系统的协同能够提高整体安全管理效率,并增强应对紧急情况的能力。在具体实施过程中,首先,船舶应能实现压力控制系统与船舶其他安全系统之间的数据交换和集成,将压力控制系统与火灾报警系统、舱室隔离系统等关键安全系统有效连接。例如,当压力控制系统检测到某个舱室的压力异常该信息应该立即传输给舱室隔离系统,以便于迅速采取隔离措施,防止潜在的安全风险扩散。为实现这一集成,LNG 船舶需要设定明确的数据接口和传输标准,确保各系统间的无缝连接和数据一致性。其次,定期进行联合安全演练是确保各安全系统协同工作的有效方法。在演练中应模拟液化天然气泄漏、火灾或舱内压力异常等各种紧急情况,以测试压力控制系统与其他安全系统的联合响应能力。例如,在模拟泄漏情况下,演练需要测试压力控制系统的响应速度(比如在多少秒内降低舱内压力至安全水平),以及火灾报警系统和舱室隔离系统的及时激活。最后,船舶还需采用高速通信网络和统一数据格式,以减少数据传输的延迟和误差。此外,还应确保在系统间传输的指令和警报具有明确优先级,当压力控制系统发送超压警报时,该警报应能够优先于其他非紧急信息被处理,以便于及时采取措施。

## 4 舱内压力控制方案

LNG 船航行过程中,BOG 通过低压压缩机抽至机舱使用,使货舱压力保持 4kPa~19kPa 范围;压载航行时,通常保持舱压在 7kPa~19kPa;满载航行时,通常保持舱压在 4kPa~9kPa。以下为最高设计压力为 25kPa 的货舱的舱内压力控制方案示例:

### 4.1 舱压降低

①当舱压降低至 3kPa 时,发出低压报警;②当舱压降低至 2kPa 时,发出低—低压报警,货舱保护系统自动开启(货泵和压缩机,喷淋阀关闭);③当舱压进一步降低至 -1kPa 时,货舱安全阀打开,吸入空气,避免舱压进一步降低造成损伤。

### 4.2 舱压升高

①当舱压升高至 20kPa 时,发出高压报警;②当舱压升高至 22kPa 时,发出高—高压报警,喷淋泵、喷头自动关闭;③当舱压升高至 23kPa 时,排气阀自动打开,BOG 通过货舱 1# 透气桅进入大气(当舱压降低至 21kPa 时,排气阀自动关闭);④当舱压进一步升高至 25kPa 时,货舱安全阀打开,BOG 通过本舱透气桅进入大气。

## 5 结束语

综上所述,液化天然气船舶卸料期间舱内压力控制技术是 LNG 供应链中至关重要的步骤。通过压力监测技术、自动控制系统、舱压控制技术和相应手段的应用,可以实现对舱内压力的有效控制,从而保护 LNG 船舶货舱以及确保卸料过程的安全高效进行。

### 参考文献:

- [1] 王亮张坤.LNG 船舶接卸过程中作业压力控制研究[J].中国化工贸易,2020,000(009):16,18.
- [2] 何庆华,尹建川、章文俊.考虑货舱绝热层压力的薄膜型 LNG 船相关操作要领[J].船海工程,2015.
- [3] 王书雷,陈业平.NO.96 薄膜货仓及双燃料电力推进(DFDE)LNG 船的舱压控制[J].航海,2014.
- [4] 单学永,周毅,李萌,等.C 型货舱液化天然气运输船压力控制实例与探讨[J].天津科技,2022(003):049.
- [5] 陈功剑.液化天然气船旁靠补货过程中舱内压力控制技术[J].石油化工设备,2023.
- [6] 陈功剑.液化天然气船旁靠补货过程中舱内压力控制技术[J].石油化工设备,2023,52(05):33-36.
- [7] 李品友,顾安忠.液化天然气船液货翻滚及其预防[J].上海海运学院学报,1999(02):21-25.