

FSRU货物控制和再气化综合气体处理系统

吴国顺 潘宇

上海中远海运重工有限公司 上海 200100

摘要: 文章结合常规浮式储存和再气化装置(简写FSRU)对蒸发气(简写BOG)高效安全处理的需求以及碳减排背景下对环境保护的要求,围绕货物控制和再气化气体处理方面进行研究,形成一套包括货舱压力和气体用户管理、LNG翻滚探测和预防以及货舱维护处理为一体的综合气体处理系统,满足各种工况下对蒸发气的高效安全处理。

关键词: 浮式储存和再气化装置;货物控制;再气化;蒸发气处理

我国是世界上最大的能源消费国,且能源消费总量保持着较高增速,过去以煤为主的能源消费结构亟需调整。而由于风能、水能、核电等可再生资源的发展受到地理条件的限制,且发展周期较长,短期内无法直接实现可再生资源替代化石燃料的消费占比,因此在发展可再生资源的同时,提高清洁能源天然气的消费比例是更可行且必须的举措。

其中浮式储存和再气化装置(FSRU)由于其功能齐全、灵活性好、适用于海上、远离陆上居民生活区等诸多优点越来越多的被使用于世界主流港口/码头向内陆供应天然气,实为碳减排目标中的重要一环。

FSRU用途广泛,工况复杂多变,且船上产生的蒸发气(BOG)随着工况不同导致其产生量随之变化,对于这种气体船而言,如何高效安全地进行气体处理一直是该领域的核心问题。本文结合实际项目对气体处理多维度进行研究,打造出一套能有效针对FSRU气体处理的综合系统,能满足高效安全蒸发气(BOG)和环境保护的双重要求,为国家碳中和/碳达峰的双碳减排目标做技术储备。

1 FSRU 货物控制和再气化综合气体处理系统组成

LNG在常压下当温度低于沸点(约-163℃)时为液相状态,而在LNG运输过程中由于外部环境热量输入,部分LNG会挥发产生蒸发气。蒸发气产生量与诸多因素相关,如外部环境温度、航行或加注/卸载工况、电机散热、船舶和管路预冷、货舱压力等。产生的蒸发气可以用于燃料消耗,但在消耗不足时舱内压力由于蒸发气的持续产生而上升。如不能及时处理,会导致安全阀起跳释放蒸发气到大气中或造成货舱损坏,严重影响船舶安全。因此气体处理系统在LNGC、FSRU或FLNG等类似项

目中至关重要。

此FSRU货物控制和再气化综合气体处理系统包含货物储存、舱压控制、用户管理、LNG翻滚预测和预防、货舱维护及再气化再冷凝装置等。主要设备有主锅炉、高/低压缩机、双燃料发电机、蒸发器、再冷凝设备、气体燃烧单元(GCU)、气液分离罐等,如下图1所示。

1.1 货物储存

目前主流的液货舱形式有薄膜型和球形^[1]。薄膜型液货舱相对于球形液货舱甲板面空间更大,易于设备管路布置,具有较好航行视野,但球形液货舱在防晃荡和降低货物蒸发率方面效果更优,因此系统基于175 000m³ MOSS型球形液货舱设计,货舱设计温度-163℃,装卸速率10 000m³/h。

1.2 舱压控制

船舶在装载LNG后,液货舱虽有低温绝缘,但受环境热量渗入和摇晃等影响,舱内或管道内LNG会蒸发产生蒸发气(BOG),当蒸发气的产量大于消耗或吸收量时,液货舱内压力会因蒸发气(BOG)的不断积聚而持续上升。常规液化天然气运输船(简写LNGC)工况下液货舱舱压设定为0.25barg,而FSRU工况下由于装卸载频率高、融合再气化工况、液位变化大或考虑气相蒸发气可不回加注船等特性,相对于LNGC工况会产生更高的蒸发气,因此提升液货舱舱压设定提升至0.7barg。压力积聚(舱内蓄压)可以有效降低蒸发气产量和增加蒸发气容量,便于在复杂工况下对蒸发气的管理。

在最小燃气消耗的情况下,根据液位的不同,舱压提高可以使BOG存储时间延长5~20天不等。

根据《散装运输液化气体船舶构造与设备规范》(简写IGC CODE)^[2]对于LNG运输船至少设有2种BOG处理方式。改装前处理BOG首要方式是通过主锅炉强制燃烧,产生的多余蒸汽通过海水冷却冷凝器进行冷凝排放(Steam Dump)处理;次要处理方式通过手动放空阀

作者简介: 吴国顺(1986-),男,山东菏泽人,工程师,大学本科,主要从事船舶与海洋工程轮机和管路系统设计工作。

或安全阀释放排大气（仅应急情况下使用）。由于FSRU运营时主要为开式加热模式^[1]，此时主锅炉会停止运行，同时蒸汽冷凝排放对海水环境有一定影响，因此改装后增加了如下3种处理BOG的方式：

（1）通过双燃料发电机运行发电，供应船舶设备运

行所需电力；

（2）通过再气化LNG缓冲罐对多余BOG再冷凝，随外输气体输送至岸；

（3）通过高压压缩机直接输送至岸；

（4）通过GCU燃烧多余BOG（仅应急情况下使用）；

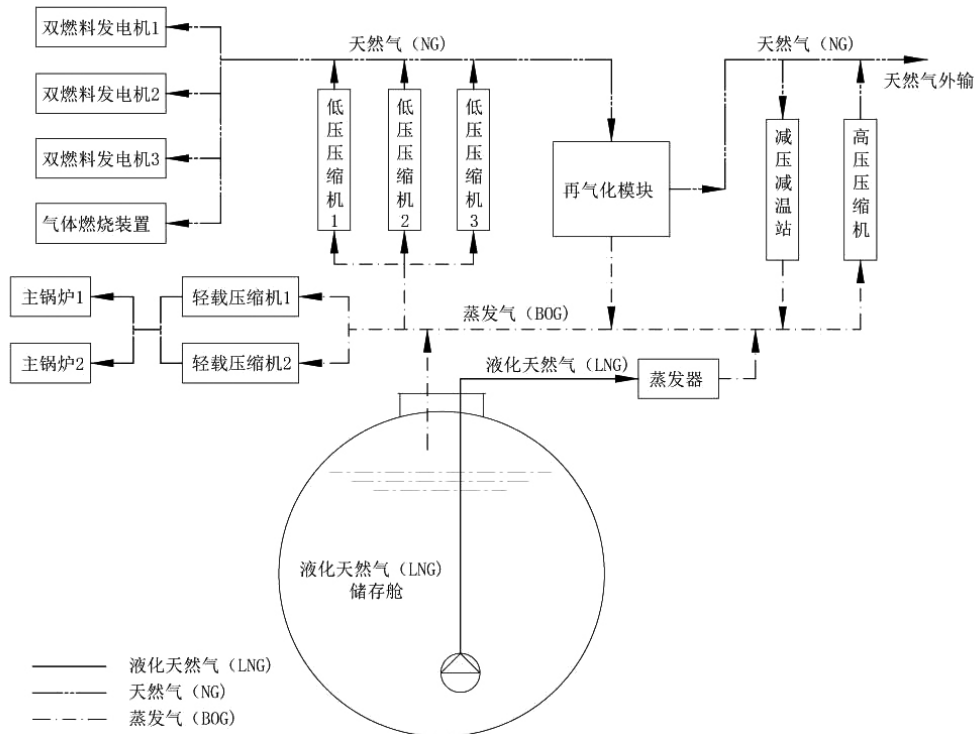


图1 FSRU货物控制和再气化综合气体处理系统主要流程图

1.3 燃气用户管理

原船配有2台双燃料主锅炉，用于透平推进和发电。改装后由于主锅炉在常规开式气化加热模式^[1]下处于冷态关闭状态，因此多余的BOG不能直接通过强制燃烧进行及时处理。现船上增配有3台低压压缩机用于常规燃气供应及处理，每台容量4t/h@6barg。常规工况下1台低压压缩机即可满足自然蒸发气（~3.6t/h）BOG的处理；当LNG加注操作时，根据加注速率不同及置换气体是否回舱等因素，第2台低压压缩可随时启动以处理多余BOG，第3台压缩机保持备用。低压压缩机将低压燃气供应至如下主要用户：

- 1) 双燃料发电机；
- 2) 再气化（REGAS）再冷凝器；
- 3) 气体燃烧单元（GCU）；

当燃气用户用量低于压缩机最小排量要求时，过量燃气将通过过压保护阀（OPV）回舱。

双燃料发电机在常规FSRU工况下使用BOG作为燃料，由于发电机所在舱室根据《海上人命安全公约》

（SOLAS）对房间划分属于A类机器处所，具有较高失火风险，因此BOG燃气管在货舱区设置主气体燃料阀（Fuel Gas Master Valve）用于应急切断，穿过生活区右侧室外区域采用全对焊连接，进入动力模块后采用双壁管。双壁管环形空间设有机械通风使其内部保持负压状态，且换气次数不少于30次/小时。

FSRU液货舱设计BOG产生量不高于3 600kg/h，实船蒸发率根据天气情况、LNG组分和液位不同而有所变化，增加或减小舱压同样会影响BOG的产生速率。有时，由于天气寒冷等原因舱内BOG的产生量较小，不足以支撑船上正常的用电消耗，此时如果外输系统正常运行情况下可以通过外输回舱管路，经减压、预冷和气液分离处理后回至气体总管补充蒸发气（BOG）。或者，可以启用货物设备房间的强制蒸发器通过蒸汽加热对LNG气化产生气体予以补充。

气体燃烧单元（GCU）将多余无法处理的BOG气体进行燃烧处理，由于燃烧处理同样有一定空气污染，因此常规工况下不启用。应急工况下燃气可以通过低压压

缩机供应，也可以从气体总管通过货物机械间燃气加热器后直接取气

1.4 BOG再冷凝

在再气化系统运行工况下，多余的低压燃气可以通过压力控制阀送至再气化模块，经BOG冷却器（BOG cooler）冷却后至缓冲罐（Suction Drum）进行再冷凝。额定再冷凝量可达8t/h，即可以同时满足2台低压压缩机供应的总量。当然再冷凝量的大小和再气化量成正比关系，最小再冷凝量（外输量最小9t/h）为0.84ton/h。

1.5 LNG翻滚监测和预防

LNG在舱内随着不断吸收外部热量，顶部轻组分率先挥发，造成液态LNG重组分积聚，密度增大。而底部

LNG密度没有变化而造成上重下轻的颠倒现象，如图2所示。超过临界点后顶部较重LNG会翻至底部，而底部的LNG会转移至舱顶部，这种LNG翻滚现象会伴随大量蒸发气的产生，可致正常工况的10倍~20倍。从而可能导致安全阀起跳，蒸发气大量排放到大气中，引发严重的安全风险。由于常年停靠码头、舱内LNG滞留时间较长（即LNG老化）等因素，FSRU相对于LNGC更易于发生翻滚现象。为避免这种情况，本系统增加了LNG密度监测系统，同时在2[#]~3[#]号舱增加了顶部注入管线。一旦监测到LNG分层，随即有相应的报警提醒船员来进行处理，如通过顶部注入管线，将底部LNG驳运至顶部。

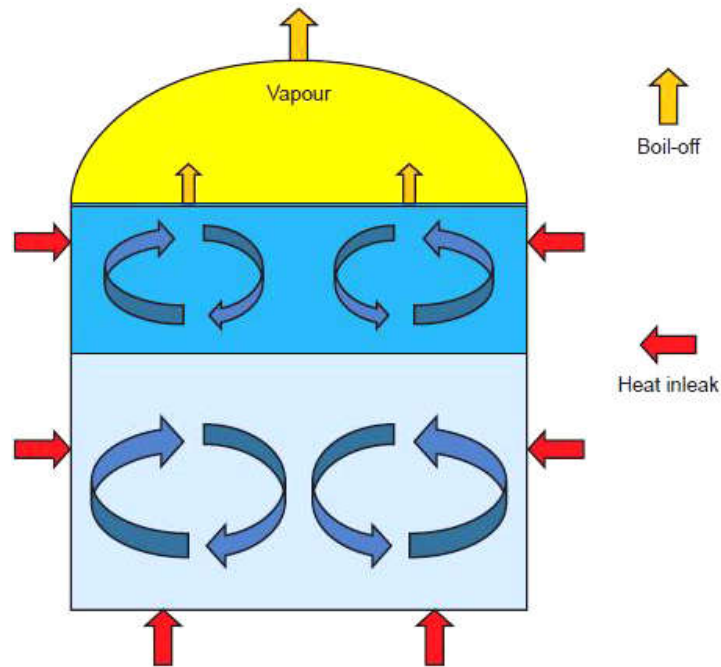


图2 LNG分层示意图

1.6 货舱维护

为满足船舶在20年不进坞和运行的高利用率要求，同时在LNG加注、卸载或驳运作业中不能影响再气化LNG的供应，改装后新增维护总管以替代原船LNG总管在维护（暖舱、气体置换或惰化等）中的作用，同时对单个液货舱的气/液管路进出口增加相应的隔离设施，从而保证了单个液货舱在维护时不影响全船其他LNG加注、卸载和驳运等相关作业。

2 结束语

FSRU货物控制和再气化综合气体处理系统不仅能满足高效安全处理蒸发气（BOG）的需求，避免环境污染

和能源浪费，同时也为不同项目不同要求提供参考和借鉴。为当今碳减排背景下节约能源消耗、保护环境、碳中和/碳达峰战略提供技术支撑。

参考文献

- [1] 吴国顺. 浮式储存和再气化装置多重加热系统. 中国修船. 2023(03):65-67
- [2] 中国船级社. 散装运输液化气体船舶构造与设备规范. 北京. 2018.01
- [3] 谢彬. 海上浮式液化天然气生产装置及关键技术. 北京: 中国石化出版社. 2016.33