

# LNG接收站扩建储罐预冷投产方案分析与优化

李 云

(中石油江苏液化天然气有限公司, 江苏 南通 226400)

**摘 要** LNG (Liquefied Natural Gas, 液化天然气) 接收站扩建储罐的投产预冷工艺可以参照接收站首次储罐投产的预冷工艺, 也可以在扩建储罐处于工艺管道设计阶段时预留相关预冷管线接口, 充分利用在役接收站内已有的BOG (Boil-Off Gas, 蒸发气体)、LNG以及相关工艺管线。本文以江苏如东 LNG接收站为例, 详细介绍了扩建储罐预冷与接收站首次储罐预冷的差异、扩建储罐预冷投产期间关键工艺参数控制以及整个预冷过程中产生的BOG全回收的控制要求, 并对扩建储罐预冷遇到的问题进行了分析。结果表明, 本次扩建储罐预冷采用的方案具有一定的普适性, 可以为其他接收站提供指导和参考。

**关键词** LNG接收站; 扩建储罐; 预冷; BOG回收

**中图分类号:** TE974

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.06.024

## 0 引言

LNG接收站会按照“一次规划、分期实施”的原则, 根据业务发展需要扩建工程也会紧随其后。LNG储罐是扩建项目最关键的设施, 其具有投资高、建设时间长的特点。当前国内大型LNG接收站中的储罐大都采用LNG储罐, 容积普遍在 $16 \times 10^4 \sim 27 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 主要由预应力混凝土外罐、Ni9钢内罐、热角保护系统、内外罐环隙保冷系统、吊顶板保冷系统以及工艺管道仪表等系统组成<sup>[1]</sup>。LNG储罐在投产前需要进行预冷, 主要是因为当储罐处于零下 $162 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境时, 储罐金属内罐将发生冷缩, 在内罐受热不均匀或者预冷速度过快时会造成罐内壁及罐底板温度不均匀变化, 使金属罐内壁产生不正常收缩和不正常的应力, 增加储罐产生结构性损坏概率<sup>[2]</sup>。然而接收站首次储罐投产与扩建储罐预冷投产由于所处工艺条件不同, 在预冷方案选择上存在显著差异。

## 1 储罐预冷投产过程介绍

### 1.1 置换储罐内氮气

储罐内空气合格后要用NG (Natural Gas, 天然气) 把储罐内的氮气置换掉, 以防止较低的烃分压造成储罐过低温, 并且储罐内残留较多的氮气时, 也会对再冷凝器的操作造成较大影响。置换储罐内的氮气主要

用活塞效应原理置换, 因为氮气的密度比NG或BOG的密度大, 一般将NG或BOG从储罐顶部注入储罐, 并通过储罐底部工艺管线把 $\text{N}_2$ 储罐顶部排出。当排放口的甲烷含量达到5%时, 置换完成。

对于接收站首个预冷的储罐, 如果接收站采用首船预冷的方式, 会用LNG船上的LNG蒸发器产生BOG对卸料管线进行预冷, 由于卸船管道较长, 可以利用冷却卸船管道BOG对罐内氮气进行较为彻底的置换, 一般不单独进行氮气置换。采用这种方式时LNG船滞港时间较长, 产生的费用较多。目前部分接收站由于船期或其他原因储罐会先于码头卸料管道投产, 此时置换储罐内的氮气一般采用将LNG槽车外来临时气化器将槽车内LNG气化成BOG, 通过调解汽化器与混合器获得温度合适的BOG对进料管道进行预冷, 同时对储罐内氮气进行置换, 置换完成后再利用槽车内LNG进行储罐冷却。此方案待LNG接卸首船时可以减少LNG船舶滞港费用, 但如果槽车安排不合理可能会出现连续冷却中断。

接收站扩建储罐置换罐内氮气时可以利用扩建储罐自身高压补气管线对外输管道高压NG降压后对罐内氮气进行置换, 也可以在站内LNG工艺管线选择合适接口如卸船工艺线或低压输出管线, 外接临时气化器(如图1所示), 在扩建储罐进料管线利用BOG预冷

时同时进行罐内氮气置换。

### 1.2 进料管道的冷却与充填

LNG 储罐完工后其相应工艺管线处于常温状态, 根据 GB/T 51257—2017《液化天然气低温管道设计规范》规定“管道系统试车预冷宜采用低温气体”。当 LNG 管道直径一般大于 DN 1000, 需要采用低温气体 +LNG 的方式预冷<sup>[3]</sup>。预冷过程中应注意监控管道系统的温降速度, 如果温差过大应及时调整低温气体流量, 管道温度下降速度不大于 10 °C/h 并且管道任意顶、底部的温度差不大于 50 °C。管道末端的温度降至 -110 °C 时管道系统预冷结束。

若接收站投产采用首船预冷的方式时会利用 LNG 船上的蒸发器产生的 BOG 对进料料管道进行预冷; 对于新建 LNG 接收站, 如果储罐先进行投产, 目前也有接收站会采用液氮 +LNG 的方式, 先利用液氮储罐外接临时气化器将液氮气化后对储罐进料管道进行气体预冷, 预冷结束后再用 LNG 进行进料管道充液, 此方案相对成本较低, 可减少船舶靠泊时间; 也有接收站会全部采用 LNG 槽车外接临时气化器对储罐进液管道用 BOG 进行预冷, 然后再用槽车内 LNG 进行充液。对于扩建储罐一般会在 LNG 低压输送管道或卸船管道选择合适接口外接临时气化器将 LNG 气化后产生的 BOG 对储罐进液管道进行预冷, 然后再利用管道内 LNG 对进料管道进行 LNG 填充。

### 1.3 储罐预冷

储罐进料管线充液完成后就可以通过储罐配备的预冷管线进行储罐预冷, 并通过调节预冷管线上的阀门控制进液速度。一般要求 LNG 储罐金属内罐冷却速度为 3~5 °C/h, 储罐内任意两个相邻温度计之间的最大温差为 30 °C, 相邻温度计最大温差为 20 °C。在储罐预冷期间要实时监测储罐内各温度计示数, 如果温度超过规定数值时应及时减少 LNG 冷却量, 平衡罐内温度。当储罐底板温度计示数为 -150 °C 时代表储罐冷却完成<sup>[4]</sup>。

## 2 扩建储罐预冷工艺优化

LNG 接收站扩建储罐的预冷投产可以利用在役接收站的资源, 在储罐工艺管道设计阶段预留出相应管线接口。可以对 LNG 储罐冷却投产工艺做出以下优化。

### 2.1 置换储罐氮气与预冷储罐进料管线

在役 LNG 接收站生产过程中产生的 BOG 主要来自

以下几个方面<sup>[5]</sup>: (1) 储罐内 LNG 由于漏冷产生 BOG 的蒸发; (2) 设备运行时产生的热量导致部分 LNG 气化; (3) 码头保冷循环 LNG 回罐闪蒸; (4) 停止设备保冷用 LNG 回罐闪蒸; (5) 槽车装车; (6) LNG 收集罐产生的 BOG; (7) 高、低压 LNG 泵回流时产生 LNG 闪蒸。江苏 LNG 如东接收站在预冷投产第 5 号罐期间每日产生的 BOG 气体大约在 16 t 左右。置换储罐内氮气时可以充分利用在役接收站内储罐每日产生的 BOG, 在扩建储罐进行工艺管线设置时在 BOG 总管上预留了 4" 管线接口阀门 MV17, 如图 1 所示。

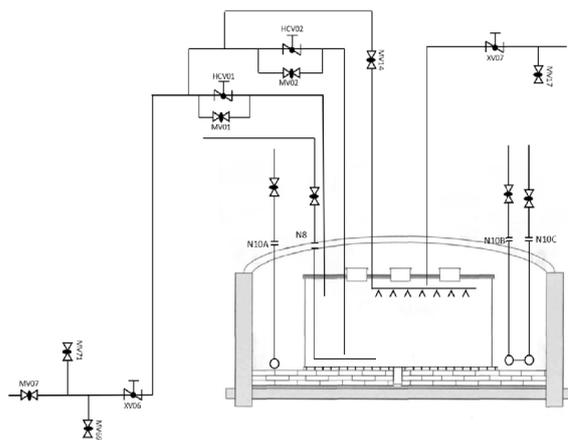


图 1 储罐工艺管线示意图

(注: MV17、MV71、MV69 都布置在地面储罐罐前平台, 距离很短。)

在进行 BOG 置换储罐内氮气前在 MV17 与 MV71 之间连接低温软管, 将 BOG 总管的 BOG 引入新增卸船管线和储罐, 通过将 BOG 引入储罐进料管线并通过储罐上进液管线进入 LNG 储罐内来冷却新建储罐进料管线, 与此同时对储罐进行氮气置换。内罐排气通过氮气线上的临时放空口排气; 环隙空间通过排气口排气; 泵井通过出口管线的倒淋或排空口排气。当排气口处的甲烷含量达到 5% (体积) 后, 视为置换结束, 关闭所有的排气口。逐步将储罐的压力升高至与已投用储罐平衡的压力, 正常投用 XVO7, 将 5 台储罐的 BOG 线并线。置换储罐内氮气这个过程大约持续 2~3 天, 储罐进料管预冷会先于储罐氮气置换完成, 此时可以直接进行储罐进料管线进液和储罐预冷, 利用 LNG 气化产生的 BOG 继续对储罐内氮气置换。

### 2.2 储罐进料管线充液及储罐预冷

扩建储罐进料管线充液及储罐预冷所选冷源应为

在役接收站内 LNG, 并充分利用站内已有工艺管线。作为冷源的 LNG 主要引自以下管线预留接口: 码头保冷循环管线、低压外输总管引出 LNG、在役储罐低压泵出口汇管引出 LNG。

1. 当来自码头保冷循环管线时工艺流程为: 低压泵→出口总管→低压输出总管→保冷循环管线→40"卸船总管→扩建储罐进料管线→4"喷淋线→扩建储罐。如果接收站内处于卸船工况: 此时 LNG 来自 LNG 船, 由于卸船时存在储罐切换卸船总管压力会发生波动, 对储罐均匀预冷产生影响。同时, 如果扩建储罐罐容比前期储罐大可能会造成扩建储罐比前期储罐高, 卸船管线内压力可能不足以使 LNG 进入扩建储罐内部。在储罐冷却前, 尽量使卸船总管处于较低压力, 以 3 kg/cm<sup>2</sup>(G) 左右为宜, 当开始储罐的冷却时, 可将卸船总管压力提高到 4 kg/cm<sup>2</sup>(G)。通过控制返回在役储罐的 LNG 量来控制卸船总管的压力。

2. 当 LNG 来自低压外输总管时工艺流程为: 低压泵→出口总管→低压输出总管→临时低温软管→扩建储罐进料管线→4"喷淋线→扩建储罐。此方案压力易受到外输影响, 在无外输调整时低压输出总管压力总体处于平稳。

3. LNG 来自低压外输总管时工艺流程为: 低压泵→出口总管→临时低温软管→扩建储罐进料管线→4"喷淋线→扩建储罐。此方案储罐预冷压力稳定, 不受在服役接收站工艺调整影响, 但由于储罐冷却时需要的 LNG 流量较低, 需要运行的低压泵处于回流状态造成一定的能量浪费。

### 3 储罐预冷投产的难点

扩建储罐预冷需要考虑预冷操作对已投运接收站运行的影响, 其中最大的难点是实现 BOG “零排放” 全部回收。考虑到能耗问题, 大部分接收站对于 BOG 处理有再冷凝器再液化处理、增压机增压外输, 影响扩建储罐预冷 BOG “零排放” 因素主要有每小时外输量、再冷凝器额定负荷、站内 BOG 压缩机总负荷、增压机负荷、储罐预冷速度, 以上因素要统筹考虑。为了回收全部的 BOG, 并使储罐冷却过程平稳, 要求降温速度控制在 2~3 °C/h 范围内。根据以往储罐预冷“零排放”的经验, 喷淋 LNG 流量前期在 10~20 t/h, 到了后期, 最大喷淋量达到 32 t/h, 由于此时罐内温度已经较低, 大部分 LNG 会保存在储罐内不会蒸发。储罐预冷时分

时冷却速率和 LNG 喷淋量如图 2 所示。

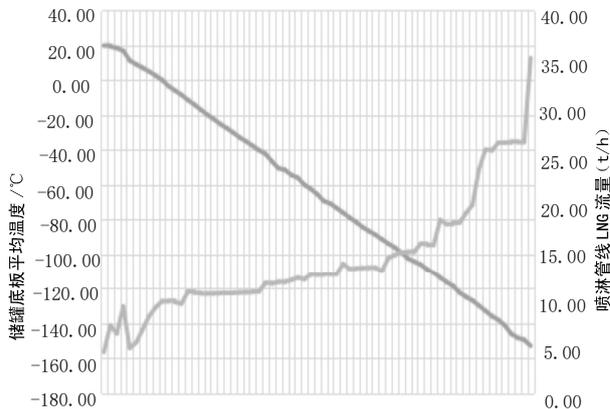


图 2 储罐预冷时分时冷却速率和 LNG 喷淋量

在储罐冷却期间, 如监控发现 BOG 系统压力有持续上升趋势, 应及时调整 LNG 喷淋量, 此时有可能会相应地影响到储罐的降温速度。如果扩建工程有新增压缩机要先进行压缩机投产, 以满足站内压缩机总负荷。

### 4 结论

处于不同建设阶段的 LNG 接收站, 储罐预冷工艺可分为新建接收站的首个储罐预冷工艺与扩建工程储罐的预冷工艺。本文主要分析了扩建与新建储罐项目在预冷各个阶段的差异性, 结合实际投产操作总结出以下结论:

1. 扩建储罐预冷投产时应充分依托在役接收站资源, 储罐工艺管线设计时预留好预留工艺接口, 不仅可以简化冷却工艺, 还可以节约储罐冷却投产时间。
2. 扩建储罐预冷投产时要结合接收站实际运行情况统筹考虑影响 BOG “零排放” 的各项因素, 在特殊情况下可以适当降低预冷速度, 以满足 BOG 全回收要求。

### 参考文献:

[1] 顾安忠. 液化天然气技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
 [2] 成永强, 田士章, 魏念鹰, 等. LNG 接收站试运投产中储罐冷却的相关问题 [J]. 油气储运, 2013, 32(05): 517-520.  
 [3] 刘猛. 低温氮气预冷 LNG 接收站卸料管道 [J]. 煤气与热力, 2017, 37(02): 5-8, 14.  
 [4] 牛斌, 童文龙, 陶克. LNG 储罐与管道的冷却方法研究 [J]. 天然气与石油, 2020, 38(01): 54-60.  
 [5] 田路江. 非卸船工况下 LNG 接收站 BOG 产生量的计算 [J]. 油气储运, 2020, 39(08): 924-932.