

# LNG 储罐预冷方式和 BOG 回收技术研究

潘义良 邵荣泽 (山东裕龙石化有限公司, 山东 烟台 265716)

**摘要:** LNG 储罐预冷工艺与 BOG 回收技术的合理应用, 是保障 LNG 接收站建设工程投资效益的关键依托。本文以常见的两种预冷方式, 即氮气预冷法、液氮预冷法进行研究, 归纳可行性预冷方案设计经验, 提出在 BOG 回收站建设阶段, 有必要应用直接压缩回收技术、低温制冷机回收技术、再冷凝回收技术, 为投建单位提供可靠的技术指导, 使建成后的 LNG 接收站在 LNG 供配服务场景内发挥显著作用, 进而优化 LNG 储罐预冷及 BOG 回收成效, 满足全社会能源稳定供应需求。

**关键词:** LNG 储罐; 预冷方式; BOG 回收技术; 低温制冷机; 喷淋流量

**中图分类号:** TE988 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0100-03

## Research on Pre cooling Method of LNG Storage Tank and BOG Recovery Technology

Pan Yiliang, Shao Rongze (Shandong Yulong Petrochemical Co., Ltd., Yantai Shandong 265700, China)

**Abstract:** The reasonable application of LNG tank pre cooling process and BOG recovery technology is a key support for ensuring the investment efficiency of LNG receiving station construction projects. This article studies two common pre cooling methods, namely nitrogen pre cooling method and liquid nitrogen pre cooling method, summarizes the design experience of feasible pre cooling schemes, and proposes that it is necessary to apply direct compression recovery technology, low-temperature refrigeration machine recovery technology, and recondensation recovery technology in the construction stage of BOG recycling stations to provide reliable technical guidance for construction units, so that the completed LNG receiving station can play a significant role in LNG supply and distribution service scenarios, and optimize the pre cooling of LNG storage tanks and BOG recovery effectiveness to meet the stable energy supply demand of the whole society.

**Keywords:** LNG storage tank; Pre cooling method; BOG recycling technology; Low temperature refrigeration machine; Spray flow rate

LNG 储罐属于液化天然气储存及输送过程中所用关键设备, 一旦出现泄漏现象, 将引发严重事故。一般而言, LNG 储罐多由内容器、底部绝缘层、绝热密封层、基础加热系统等部分组成。考虑到 LNG 储罐初始状态下储存介质为空气, 可能影响能源储存利用功效, 所以需及时采用可靠的预冷方式与先进的 BOG 回收技术, 在投产及运行过程实施有效冷却与高效回收, 以维护 LNG 储罐使用安全, 提升经济性价值, 通常要求底部及管壁表面温度梯度低于 50℃, 其任意相邻测点温度梯度低于 30℃, 以优化 LNG 储罐投产状态。

### 1 LNG 储罐常见预冷方式实施方法

#### 1.1 氮气预冷法

LNG 储罐常见冷却方式包括氮气预冷法, 主要是通过为 LNG 储罐连接干燥氮气装车站, 而后将汽化后温度 > -20℃ 的氮气连接到 LNG 储罐内, 通过氮气置换等步骤, 达到辅助冷却目的。预冷操作步骤: 吹扫干燥 LNG 内罐 → 吹扫干燥内外罐环形空间 → 吹扫干燥 LNG 储罐底部 → 吹扫干燥 LNG 储罐管口 → 逆向进入低温氮气。

内罐吹扫干燥阶段, 投建单位可直接为 LNG 储罐

连接干燥氮气装车站, 且吹扫干燥处理中, 需先行检测罐内压力, 达标后将吹扫氮气引入内罐内, 使内罐压力达到 400mmH<sub>2</sub>O, 开启放散管口继续释放干燥氮气, 氮气吹扫流量保持在 300Nm<sup>3</sup>/hr-600Nm<sup>3</sup>/hr, 初期以低流量供给状态吹扫干燥氮气, 4h 后增加吹扫流量; 第二步保证出口处含氧量 < 8%, 开启氮气吹扫阀门, 待氮气放散气体露点 < 标准值后降低氮气供应量; 第三步要求氮气吹扫出口处含氧量 < 10%, 开启管口阀门后, 保证干燥氮气直接吹扫到底部保温层处, 精准控制氮气供应量; 第四步将干燥氮气吹扫到管口处, 在放散气体含氧量与露点直接达标后关闭放散阀门; 第五步为 LNG 储罐引入低温氮气, 经过气化处理后氮气温度 > -163℃, 预冷速率保持在 3℃/h-5℃/h 以内。

#### 1.2 液氮预冷法

液氮预冷法是以低温氮气与液氮混合物充当 LNG 储罐冷却介质, 经过连接大口径管道, 为 LNG 储罐提供所需预冷介质。该预冷方式鲜明特点是安全性强, 操作简便。但此方式实施过程中, 要求投建单位设置明确的技术参数, 否则可能影响预冷效果。经研究发现: 液氮预冷法应用期间, 主要受罐内初始温度与液

氮喷淋流量两项因素影响。

一般而言, LNG 储罐运行时, 罐内与底部初始温度基本为 313K、305K, 其初始压力为 129kPa 左右。为直观验证适宜的初始温度与喷淋流量参数, 本文以模拟分析法构建三维模型, 从模型反馈结果中整合变化规律。具体统计不同初始温度下所需预冷时间, 随着初始温度从 356K 降为 249K, 其预冷所需时间从 58h 缩短为 37.5h, 且初始温度与预冷所需时间呈正相关关系, 因此本文认为投建单位应用此方式进行预冷时, 宜尽可能以较低的初始温度优化预冷效果。另从液氮喷淋流量角度进行分析, 得出(表 1)统计数值<sup>[1]</sup>。由(表 1)数据显示: 随着时间延长, LNG 储罐温度随之降低, 且喷淋流量越大, 其降温速率越大, 故要想进一步改善 LNG 储罐预冷效果, 需尽量设置较大的喷淋流量, 以便在较短时间内达到预期预冷目标值。

上述研究结果显示: 投建单位采用液氮预冷方式预冷 LNG 储罐, 可设置 249K 或 313K 较低的初始温度与 4000kg/h、5000kg/h 较高的喷淋流量, 进而达到高效显著的预冷成效。从 LNG 储罐预冷方式的适用性角度进行分析, 前一种方法可作为初级预冷方式; 后一种可持续作为对 BOG 增压器、LNG 低温储罐等 LNG 接收站低温设施预冷的优选方式。投建单位选择预冷技术时, 需始终以是否实现 LNG 储罐的安全投产为前提。

表 1 随着时间延长 LNG 储罐不同喷淋流量条件下温度变化趋势 (单位: K)

时间/h	10	20	30	40	50	60	70
2000kg/h	400	360	340	300	290	260	250
3000kg/h	400	350	320	290	250	240	230
4000kg/h	400	330	290	250	230	200	180
5000kg/h	400	320	280	240	200	170	150

## 2 LNG 储罐 BOG 回收技术应用要点

LNG 储罐 BOG (闪蒸汽) 回收技术是 LNG 储罐运行期间, 避免能源浪费, 减少直接排放所需关键技术, 具有良好的节能减排与高效利用能源的辅助作用。在实际回收环节, 所用技术较为多样, 本文仅列举几种普适性较强的 BOG 回收技术, 以此为投建单位给予指导, 使 LNG 储罐投产后获得可观效益。

### 2.1 直接压缩回收技术

LNG 储罐 BOG 回收场景内, 较为主要的是采用直接压缩回收技术。该技术具体配备了回收气压缩设备, 使 LNG 储罐回收的 BOG 快速通过该设备进行压缩处理, 保证回收后 BOG 得到深度开发利用。根据相关调查: 该技术在 BOG 小生成量 LNG 储罐 BOG 回收过程中, 具备突出适用性, 如若生成量偏大, 有必要联合其余先进技术进行综合回收<sup>[2]</sup>。该技术无需投入较高的投资费用, 所配备的回收设备数量不多,

更适合初期投资规模较小的投建单位。该技术应用期间, 实际可采用两种常用途径对 BOG 进行压缩处理, 其一, 在 > 3MPa 的压力条件下对 BOG 予以加压气化处理; 其二, 在特定压力区间内将回收后的 BOG 输送至用户端, 其压力多 < 1MPa。为展现该技术的实用价值, 投建单位宜加强压缩机等配套压缩回收设备的合理配置, 并精准判断当下 LNG 储罐 BOG 回收项目是否适宜选择该技术。

如某个 LNG 接收站运行 LNG 储罐时, 其 BOG 处理量为每小时 5t, 为优选 BOG 回收技术, 专门制定了两个 BOG 回收方案, 即方案 1: 直接压缩回收方案; 方案 2: 再冷凝回收方案。采用方案 1 时, 以潜液泵、汽化器、高压泵、BOG 压缩机等设备, 对 BOG 未经处理的情况下予以回收; 方案 2 则以低压泵、再冷凝器为主要设备, 其技术要点见下文, 此处不赘述。投建单位分析两个方案的功耗水平时, 发现方案 1 所用高压泵能耗为 513.8kW, 压缩机为 725.1kW; 方案 2 低压泵为 60.12kW, 高压泵与压缩机能耗分别为 475.3kW、253.6kW, 显然在该 BOG 处理量场景内应用直接压缩回收技术, 其能耗水平相对较高, 适合选择方案 2。从该实例分析结果中验证: 若 BOG 回收量较小, 则优先以直接压缩回收技术为主, 实际在于该技术配套设备数量较少, 整体投资费用较低, 但可能会带来高能耗缺陷, 所以需加强其余技术要点的应用研究, 今后将朝着节能降耗方向升级设备。

### 2.2 低温制冷机回收技术

除上述技术以外, 投建单位也可采用低温制冷机回收技术, 该技术对于占地规模有限, 且噪声要求较高的 LNG 储罐建设工程的适用性更强, 虽然该技术在 BOG 回收过程中的启动速度相对较慢, 但并无噪声污染, 且易于操作, 仅需采用撬装方式配置低温制冷机, 无需过大的占地面积, 更适合在地价较高的城市区域选择该技术。该技术主要是利用低温制冷机连通 BOG 管路, 并在 BOG 冷却与液化处理后, 将回收后的 BOG 重新流入 LNG 储罐内, 以提高 BOG 回收利用率。

为证明低温制冷机回收技术在 BOG 回收过程中具备推广价值, 本文认为可在不同 BOG 生成量条件下进行对比分析。一般小型 LNG 接收站的 BOG 生成量多在 100kg/d-200kg/d 之间, 中型为 1000kg/d-2000kg/d, 大型为 5000kg/d-10000kg/d。低温制冷机回收技术无需传热介质, 仅需依靠低温制冷机回收 BOG。具体在某个 BOG 出口压力为 0.2MPa, 温度为 -153℃ 的 BOG 回收项目中进行分析, 发现在 100kg/d-200kg/d BOG 生成量较小的场景内进行观察, 投建单位选择直接压缩回收技术与低温制冷机回收技术, 设备运行功耗分别

为 1kW、1.2kW，所以在小型 LNG 接收站中两种技术均有适用性<sup>[3]</sup>。

比较投资回收期时，发现两种技术在小型 LNG 接收站中，前者需要 5 年左右才能回本，后者不足 2 年可进入盈利状态，故针对 BOG 生成量较小的投建项目，优选投资回收期更短的低温制冷机回收技术。其余回收技术还包括氮膨胀回收技术、混合冷剂制冷回收技术等，此类技术所需启动时间在 6h-12h 以内，虽然与低温制冷机回收技术比较，并不会受制冷设备效率的影响，造成 BOG 回收量下降，但所需占地面积较大，甚至需要配套复杂设备，具有较强的噪音污染，这与目前倡导的节能环保理念缺少契合度，因此本文并对其余 BOG 回收技术要点进行细致研究，推荐投建单位从本文提出的三项关键技术中，结合 BOG 生成量予以优选。

## 2.3 再冷凝回收技术

### 2.3.1 再冷凝回收

再冷凝回收技术也属于应用广泛的 BOG 回收技术，具体是采用加压与冷凝相结合的方式控制功耗水平。即从 LNG 储罐内回收的 BOG 经过设置表压为 0.5MPa 的条件，而后再将 BOG 回收再冷凝器内，经过低压泵对 BOG 进行冷凝处理，能有效降低压缩功耗水平。但需注意的是，该技术应用期间，BOG 回收时所需 LNG 量为 1000%BOG 回收量，且高压泵入口处需配置具备冷却功能的配套设施，使进入高压泵的 LNG 得到充分的冷却处理，其经过冷却与未经过冷却的 LNG 配置比例 > 1 : 1，BOG 回收量与 LNG 输出量比例设为 1:21，即采用该技术，基本 1tBOG 回收量，至少需要 21tLNG，所以对于中型或大型 LNG 接收站，更适合选择该技术。

作为一项节能作用强，经济性突出的优选 BOG 回收技术，投建单位也要从长远角度选择综合回收技术，继而通过多种 BOG 回收技术的有效结合，强化节能环保效果，使 LNG 接收站在未来 BOG 高效回收过程中体现竞争优势。

### 2.3.2 再冷凝回收 + 直接压缩回收

针对 LNG 储罐 BOG 综合回收技术的应用研究，本文认为可联合应用再冷凝回收与直接压缩回收技术。由于 LNG 接收站在不同运行模式及投资规模下，其 BOG 回收需求存在差异性。对此，本文认为投建单位可从多种运行模式的分析结果中，选定最佳技术。该部分提到的运行模式，以 BOG 再冷凝技术长期连续工作模式、中期连续工作模式、短时间工作模式为主<sup>[4]</sup>。

如 LNG 接收站采取长期连续工作模式，即 BOG 再冷凝回收技术应用周期  $\geq 360d$  时，统计 BOG 再冷

凝回收技术、直接压缩回收技术、综合回收技术对应的设备一次性投资、耗电量、20 年费用现值指标，发现单独应用 BOG 再冷凝回收工期，其 20 年费用现值最低，为 5722 万元，虽然一次性需投资 3200 万元，但耗电量仅需  $670 \times 10^4 kW \cdot h$ ；而在全年 BOG 再冷凝回收技术应用周期不足 360d 时，该模式下经对比发现采用综合回收技术，其 20 年费用现值仅需 6459 万元，且未见年损失气量表现，耗电量低至  $675 \times 10^4 kW \cdot h$ ；另从全年 BOG 应用周期为 90d 以内的工作模式中进行分析，此时证明单独应用 BOG 再冷凝回收技术，其 20 年费用现值过高，且年损失气量可达到  $6122 \times 10^4 m^3$ ，相比选择直接压缩回收技术，其 20 年费用现值仅为 7415 万元，设备一次性投资最少，仅需 1800 万元，从中验证投建单位宜兼顾工作模式差异性，制定可行性 BOG 回收方案，即 BOG 再冷凝技术应用周期  $\geq 360d$ ，单独应用再冷凝回收技术；90d-360d 以内优选综合回收技术；低于 90d 选用直接压缩回收技术，由此获得理想的 BOG 回收成果<sup>[5-6]</sup>。

## 3 结论

综上所述，LNG 储罐常见冷却方式具体实施阶段，多采用氮气预冷法与液氮预冷法，且预冷效果与冷却介质的喷淋流量与储罐初始温度有关。故投建单位需优选预冷方式，并采用直接压缩回收技术、低温制冷机回收技术、再冷凝回收技术等 BOG 回收关键技术，改进 BOG 回收利用成效，使 LNG 储罐投产期间保持最佳状态，实现我国能源事业壮大发展，为全社会提供满意的 LNG 能源供应服务。

### 参考文献：

- [1] 王屹亮, 许彦达, 张猛, 等. 大型 LNG 储罐预冷模型构建和预冷参数计算 [J]. 天然气与石油, 2024, 42(03):55-61.
- [2] 梁爽, 秦嗣凯, 艾奇昌, 等. LNG 接收站大型储罐预冷过程状态研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(13):89-91.
- [3] 郝磊. 液化天然气装置 BOG 回收技术方案研究与应用 [J]. 石化技术, 2024, 31(01):131-133.
- [4] 王小琬, 庚军, 李亚松, 等. LNG 储配站储罐预冷问题分析研究 [J]. 城市燃气, 2023, (03):6-11.
- [5] 金光. LNG 接收站储罐预冷工艺的优化 [J]. 化工技术与开发, 2023, 52(Z1):81-84+57.
- [6] 张豪, 杨伟红, 李民星, 等. 新增 LNG 储罐预冷过程中的气体处理方法 [J]. 化工管理, 2021(19):116-117.

### 作者简介：

潘义良 (1993-), 男, 满族, 辽宁丹东人, 本科, 研究方向: 化工工艺、油气储运。