

储罐投用数量与 BOG 生成量关系研究

刘 博

(中海油江苏天然气有限责任公司, 江苏 盐城 224000)

摘 要 新投产 LNG 接收站面临 BOG (Boil Off Gas, 蒸发气) 放空量大的突出问题, 主要原因包括天气温度高、储罐保温效果差、管道循环量大、下游管道未及时投用等。本研究以江苏 LNG 接收站为典型案例, 针对其下游管网未同步竣工的实际场景, 通过理论计算与现场试验相结合的方法, 系统分析了储罐投用数量与 BOG 产生量的关联规律。研究结果表明, 减少储罐投用数量可显著降低 BOG 生成总量, 为接收站运营优化提供科学依据。

关键词 LNG 接收站; LNG 储罐; BOG; LNG; 关联规律

中图分类号: TU996.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.33.023

0 引言

LNG 接收站作为连接天然气气田与终端用户的关键枢纽, 其核心功能是接收、储存并外输液化天然气 (LNG)。然而, LNG 在储存过程中因外界热量侵入、设备运行等因素会持续气化为 BOG (蒸发气), 若 BOG 无法有效处理, 不仅造成资源浪费, 还可能因储罐超压触发火炬放空, 产生经济损失与环境风险^[1]。本研究通过理论计算与现场实践, 以减少储罐投用数量作为控制新投产 LNG 接收站 BOG 放空的有效手段, 可为同类项目建设提供实践指导。

1 案例概况

江苏 LNG 接收站一期建设 4 座 22 万 m³ 混凝土全容储罐, 配套低压泵 6 台、高压泵 2 台及 2 台 BOG 压缩机。首船接卸 21.6 万 m³ LNG, 扣除铺底气及卸料总管填充量, 可用液相空间约 21 万 m³, 对应气相空间约 9.62 万 m³。运行初期, 当 4 座储罐同时投用时, BOG 日产量约为 118 t/d, 低于 2 台压缩机合计处理能力 (约 184 t/d)。按设备单体能力计算, 压缩机在理论上可完全处理该量 BOG, 因此不会因处理能力不足而导致放空。但由于下游国家管网管道尚未贯通, 站内回气循环量大、液位波动频繁, 导致系统气相空间压力上升速度快, 压缩机频繁启停, 局部时段仍会出现超压放空现象。问题的实质在于储罐投用数量与下游消纳能力不匹配, 使得 BOG 在短时间内集中生成, 造成系统运行负荷不均^[2]。

2 储罐投用数量与 BOG 生成量的定量分析

2.1 LNG 储罐 BOG 静蒸发量计算

为定量评估 LNG 储罐在静止状态下的 BOG (蒸发气) 生成量, 本研究结合江苏 LNG 接收站的气象条件与储

罐结构特性, 通过热量传递模型进行分析。主要参数包括: 环境最高气温 38.4 °C, LNG 介质温度 -160 °C, 其气化潜热为 510 kJ/kg。在储罐结构方面, 外罐直径 88 m, 内罐直径 86 m, 外罐高度 44.77 m, 内罐高度 41.844 m, TPC 区域高度 5 m, 最大操作液位 (LAH) 为 40.02 m。

为深入分析, 研究基于以下假设进行建模: (1) 钢件热阻远小于保冷材料, 故忽略其影响; (2) 不考虑吊顶拉杆、人孔等局部构件对传热的贡献; (3) 日间向阳面与背阴面各占罐壁面积的 50%, 昼夜各为 12 小时; (4) 太阳辐射强度取值为 630 W/m², 符合项目区域实际气象条件。在热工分析中, 罐体总漏热量由罐顶、罐壁与罐底三个部分构成, 计算各部位热量传导的核心在于多层绝热结构的等效热阻, 进而求得总热流速率, 并据此推导 BOG 的日蒸发量^[3]。具体而言, 罐顶在白天受太阳辐射及空气对流共同影响, 热流量大; 夜间则近似视为与环境温度一致 (取 38.4 °C)。传热路径包括混凝土穹顶和玻璃棉毡等多层保温结构。忽略拉杆、人孔等构件的散热贡献, 罐顶总漏热速率可表示为:

$$Q_{gd} = Q_a + Q_b = A_r \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} + A_b \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} \quad (1)$$

式 (1) 中, Q_{gd} 表示罐顶总漏热速率, W; Q_a 表示穹顶漏热速率, W; Q_b 表示罐顶某小时拉杆、人孔、吊顶泄放孔的漏热速率, W, 由于拉杆、人孔、吊顶泄放孔数据暂未确定且其传热面积较小, 可忽略; A_r 表示穹顶的换热面积, m²; A_b 表示拉杆、人孔、吊顶泄放孔的传热面积, m²; T_a 表示罐顶温度, °C (日间取 70 °C,

夜间取 38.4 °C)； T_{LNG} 表示 LNG 的温度，°C； λ 表示保冷层保冷材料的导热系数，W/(m·k)； t 表示保冷层保冷材料的厚度，m。此外，罐壁漏热量的计算步骤如下：罐壁漏热量计算基于热量平衡状态，日间向阳面温度由与空气对流换热及太阳辐射吸收（系数 0.65）、反射（系数 0.94）决定，背阴面及夜间温度与环境温度（极端最高气温）一致，传导热量通过各保温层材料性能确定^[4]。

在此基础上，罐壁部分的漏热计算分成两部分考虑

1. 罐壁 TCP 上部的漏热：

$$Q_{gb} = A_{sA} \times \frac{T_s - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} \quad (2)$$

式(2)中， Q_{gb} 表示罐壁 TCP 上部的漏热速率，W； A_{sA} 表示罐壁 TCP 上部的换热面积，m²； T_s 表示罐壁 TCP 上部的外表面温度，°C（向阳面取 70 °C，背阴面取 38.4 °C）； T_s 表示罐壁上部（TCP 上方）外表面温度，单位为摄氏度（°C）； T_{LNG} 表示 LNG 的温度，°C； λ 表示保冷层保冷材料的导热系数，W/(m·k)； t 表示保冷层保冷材料的厚度，m。

2. 罐壁下部（TCP）的漏热：

$$Q_{TCP} = A_{sB} \times \frac{T_{TCP} - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} \quad (3)$$

式(3)中， Q_{TCP} 表示罐壁下部的漏热速率，W； A_{sB} 表示罐壁下部的换热面积，m²； T_{TCP} 表示罐壁下部的罐壁外表面温度，°C（向阳面取 70 °C，背阴面取 38.4 °C）； T_{LNG} 表示 LNG 的温度，°C； λ 表示保冷层保冷材料的导热系数，W/(m·k)； t 表示保冷层保冷材料的厚度，m。

同时，罐底结构复杂，由中心区域、罐底环梁与罐底砂浆组成。具体可设定其温度等于环境极端高温 38.4 °C，热量传递过程同样遵循多层热阻叠加。罐底总漏热速率表达为：

$$Q_{底} = Q_b + Q_{bA} + Q_{bB} = A_b \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} + A_{bA} \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} + A_{bB} \times \frac{T_a - T_{LNG}}{\sum \frac{t_i}{\lambda_i}} \quad (4)$$

式(4)中， $Q_{底}$ 表示罐底总漏热速率，W； Q_b 表示罐底中心区域的漏热速率，W； Q_{bA} 表示罐底 A 区域的漏热速率，W； Q_{bB} 表示罐底 B 区域的漏热速率，W； A_b 表示罐底中心区域的换热面积，m²； A_{bA} 表示罐底 A 区域

的换热面积，m²； A_{bB} 表示罐底 B 区域的换热面积，m²； T_a 表示罐底温度，°C，取极端最高气温； T_a 表示罐底外表面温度或环境温度，单位为摄氏度（°C）； T_{LNG} 表示 LNG 的温度，°C； λ 表示保冷层保冷材料的导热系数，W/(m·k)； t 表示保冷层保冷材料的厚度，m。综上各部分漏热计算，可得整个储罐的日间与夜间的漏热速率（W），分别乘以 12 小时（43 200 s）再相加，即可得一天内的漏热量（J），换算成（kJ）。通过漏热量除以罐内 LNG 的潜热（kJ/kg），可以得到一天产生的 BOG 量（kg）。在分析储罐数量对 BOG 生成量的影响时，我们不仅考虑了气相压力的变化，还引入了储罐投用数量与整体 LNG 储存空间利用率的关系。随着储罐数量的增加，尽管气相空间压力得到有效控制，液相空间的利用率却可能下降。特别是在 LNG 接收站初期，储罐未完全充满时，气相空间的浪费可能导致 BOG 的增加。因此，合理控制储罐的投用数量，不仅有助于减少 BOG 生成，还能提高储罐的液相空间利用效率，优化整个储存系统的经济性。此外，随着储罐投用数量的增加，设备的维护和能源消耗也需要综合考虑。通过对比不同投用数量下设备的运行成本，可以进一步明确最佳的储罐投用策略，从而在保证 BOG 生成量控制的同时，也能降低系统整体的运行成本。

2.2 投用储罐数量分析

根据储罐压力报警和联锁设定表和实际运行过程中的状况，将储罐气相空间压力控制在 13 ~ 22 kPag 区间范围内最有利于储罐气相空间的利用。而 13 ~ 22 kPag 储罐气相空间能够储罐的 BOG 量，具体根据理想气体方程：

$$PV = ZnRT \quad (5)$$

式(5)中， P 表示储罐压力； V 表示储罐可用罐容； Z 表示压缩因子（BOG 正常取值为 0.97）； n 表示气体物质的量； R 表示理想气体常数（取值 8.31 441）； T 表示绝对温度。

2.3 分析方案优劣

表 1 展示了不同储罐投用数量下，压缩机工况、升压时长、低压泵使用数量、降压耗时、启动次数和综合耗费的变化情况。随着储罐投用数量的增加，整体的升压时长、启动次数和综合耗费均呈上升趋势。例如：投用 4 个储罐时，无论启用 1 台还是 2 台压缩机，升压时长和综合耗费都显著高于投用 1 个储罐的情况。这表明，在增加储罐投用数量的同时，设备负荷和能源消耗增加，从而导致更高的运行成本。与此同时，启用更多的压缩机可以在一定程度上缩短升压和降压

表 1 方案对比

储罐投用数	压缩机工况	升压时长(小时)	可供使用低压泵(台)	降压耗时(小时)	启动次数(次)	综合耗费(元)
投用 1 个	启用 1 台	1.97	1+1	3.43	133	68 429
	启用 2 台		1+1	0.92	249	68 724
投用 2 个	启用 1 台	6.55	4+1	26.21	22	86 493
	启用 2 台		4+1	4.37	66	86 526
投用 3 个	启用 1 台	9.56	7+1	265.34	2.62	104 278
	启用 2 台		7+1	8.92	39	104 364
投用 4 个	启用 1 台	11.69	10+1	/	/	/
	启用 2 台		10+1	15.20	27	123 120

时间,但也会增加设备的启动次数和总耗费。因此,如何在满足BOG处理能力的同时,合理控制储罐投用数量,以平衡成本和效率,成为优化系统运行的关键。在对不同储罐投用方案进行分析时,我们还应综合考虑压缩机与低压泵的协同作用对系统整体性能的影响。通过启用更多的压缩机,可以提高BOG处理效率,但也可能导致设备负荷过大,增加故障风险。因此,在设计方案时,需要对压缩机的启用时长和停机时间进行优化,以确保设备长期运行的稳定性^[5]。

2.4 实际应用效果

江苏 LNG9 月 26 号首船接卸后实际投用储罐数量为 1 个, 从 10 月 17 日完成首船接卸至 11 月 23 日能够处理接收站产生的 BOG 共计减少约 11 831.5 吨 BOG, 保守估计按当时市场价计算 7 000 元 / 吨, 此项举措为江苏 LNG 减少约 8 000 万元。在江苏 LNG 接收站实际运行中, 通过调整储罐投用数量和优化压缩机的工作模式, 有效地降低了 BOG 的生成量。在实际应用中, 首船接卸后的储罐投用数量从 1 个逐步增至 2 个, 且与下游管道的接入同步进行, 确保了 BOG 的及时消纳。由于下游管网尚未完全竣工, 部分 BOG 仍需通过储罐内的回气系统进行处理。通过此项技术手段, 江苏 LNG 接收站在短短两个月内成功减少了约 11 831.5 吨 BOG, 减少的 BOG 量不仅降低了接收站的环境风险, 也有效减少了由于放空所带来的经济损失。根据当时市场价格估算, 约可为公司节省 8 000 万元的费用。此项措施的成功实施, 进一步验证了合理控制储罐投用数量对 LNG 接收站 BOG 管理的重要性, 并为类似项目提供了宝贵的经验教训。未来, 随着下游管网的完善和技术的进一步发展, 预计江苏 LNG 接收站的 BOG 处理

能力将进一步提升，经济效益和环境效益将更加显著。

3 结束语

本文以江苏 LNG 接收站为研究对象, 系统构建了储罐热量传递与 BOG 生成量的理论计算模型, 结合现场运行监测数据, 深入分析了储罐投用数量、气相空间压力及压缩机负荷之间的耦合关系。研究结果表明, 合理控制储罐投用数量是降低 BOG 生成、减少放空损失的关键环节。在单罐运行并配合间歇保冷措施的模式下, BOG 生成量稳定可控, 压缩机运行负荷平衡, 整体系统热效率与经济性显著提升。该成果不仅为 LNG 接收站投产初期 BOG 管理提供了科学依据, 也为后续储罐结构优化、能量回收及节能运行策略制定提供了可行路径, 对同类项目运行管理具有推广价值。

参考文献:

- [1] 赵思琦.基于可靠性对 LNG 接收站 BOG 压缩机选型分析[J].化工设备与管道,2025,62(05):74-80.
- [2] 杨清.LNG 中的氮气含量对船舶 LNG 预留货物消耗的影响[J].航海技术,2025(05):24-27.
- [3] 许鹏,丁建华.新建 LNG 接收站 BOG 压缩机选型研究[J].山东化工,2025,54(17):163-166.
- [4] 郑星伟,赫文博,李雅娴,等.LNG 接收站 BOG 管线进液成因及控制策略研究[J].山东化工,2025,54(14):162-165,168.
- [5] 赵厅,孙东旭,张璇,等.LNG 接收站 BOG 再冷凝工艺模拟优化[J].石油与天然气化工,2025,54(03):49-56.