

液化天然气接收站工艺优化运行研究

刘毅, 李小玲*, 魏浩宇

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年3月13日; 录用日期: 2025年5月29日; 发布日期: 2025年6月10日

摘要

液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)接收站在优化能源结构和改善环境质量中发挥关键作用, 而蒸发气(Boiling Off Gas, BOG)的高效处理是保障接收站安全、经济及环保运行的核心环节。针对传统再冷凝工艺能耗高、最小外输量限制等问题, 本研究提出一种预冷式BOG再冷凝工艺优化方案, 旨在降低系统能耗。基于某LNG接收站的实际运行数据, 通过HYSYS软件构建工艺模型, 系统分析了BOG处理量、压缩机出口压力、BOG温度及外输压力等参数对系统能耗与液气质量比的影响规律。研究结果表明: 在相同工况下, 预冷式BOG再冷凝工艺相比传统工艺节能效果显著, 系统总能耗、液气质量比和最小外输量均明显下降。研究结果为LNG接收站的工艺优化提供了理论依据, 对提升接收站运行经济性、安全性及环境效益具有重要意义。

关键词

LNG, BOG, 工艺优化, 模拟计算

Research on Process Optimization and Operational Study of LNG Receiving Terminal

Yi Liu, Xiaoling Li*, Haoyu Wei

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Mar. 13th, 2025; accepted: May 29th, 2025; published: Jun. 10th, 2025

Abstract

Liquefied Natural Gas (LNG) terminals play a pivotal role in optimizing energy structures and improving environmental quality, with the efficient handling of Boil-Off Gas (BOG) constituting a crit-

*通讯作者。

ical link in ensuring safe, economical, and environmentally friendly terminal operations. Addressing the challenges of high energy consumption and minimum output limitations inherent in traditional re-condensation processes, this study proposes an optimized pre-cooled BOG re-condensation process designed to reduce system energy consumption. Utilizing actual operational data from an LNG terminal, a process model was established through HYSYS software to systematically analyze the influence of key parameters—including BOG processing capacity, compressor outlet pressure, BOG temperature, and output pressure—on system energy consumption and liquid-to-gas mass ratio. Findings demonstrate that under identical operating conditions, the pre-cooled BOG re-condensation process achieves significant energy savings compared to conventional methods, with marked reductions in total system energy consumption, liquid-gas mass ratio, and minimum output requirements. This research provides theoretical foundations for process optimization in LNG terminals, offering substantial implications for enhancing operational economy, safety, and environmental performance.

Keywords

LNG, BOG, Process Optimization, Simulation Calculation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2024年,随着LNG在优化中国能源结构、改善大气环境中的作用日益凸显,液化天然气行业加速发展,推动国内天然气日均产量稳定在6.4亿~7.2亿立方米区间,同比日均增产3800万立方米,增幅达6.0%。随着天然气工业发展,液化天然气接收站建设不断推进,未来加强其储气与气化能力是重要发展方向之一[1]-[3]。在LNG接收站的日常运营中,BOG处理系统是其关键核心环节,对于保障接收站的平稳、高效与安全运行发挥着至关重要的作用[4],LNG接收站运营中,卸船、外输等工况产生大量复杂BOG,生成与处理关乎安全、经济、环保,有效处理保障接收站平稳运行。

目前,LNG接收站在处理产生的BOG时,主要采用两种工艺:一种是直接压缩工艺,另一种为再冷凝液化工艺[5]-[7]。目前,国内外大多数接收站采用再冷凝工艺来处理接收站内产生的BOG[8],一些大型LNG接收站通常以再冷凝液化工艺为主,同时结合直接压缩工艺进行运行[9]。国内外学者在BOG再冷凝工艺研究方面已取得进展[10][11]。LI等[12]采用二阶压缩再冷凝工艺优化现有再冷凝系统。薛鹏等[13]开发了一种利用制氮系统的BOG回收技术。傅皓等[14]提出了一种采用第一级耐低温BOG增压机的混合制冷剂再液化工艺流程方案。赵顺喜等[15]对现有的再冷凝器进行了技术改造和升级。现有的研究主要集中在BOG处理工艺及设备改良上,随着LNG接收站布局扩大,其接收能力显著提升,该工艺在能耗和适用范围方面仍有优化空间。本文基于某LNG接收站的实际运行数据,通过HYSYS软件构建工艺模型,系统分析了关键参数对系统能耗与液气质量比的影响规律。提出一种预冷式BOG再冷凝工艺优化方案,旨在降低系统能耗。

2. BOG再冷凝工艺

液化天然气接收站的核心工艺设备涵盖储罐、低压潜液泵、高压外输泵、BOG压缩机、增压压缩机、再冷凝器、气化器及海水泵等关键设备[16]。在各设备运行时产生的BOG会对工艺产生影响。基于LNG接收站的设计参数,在HYSYS软件中构建模型,结果如图1所示。流程中的关键节点参数见表1。

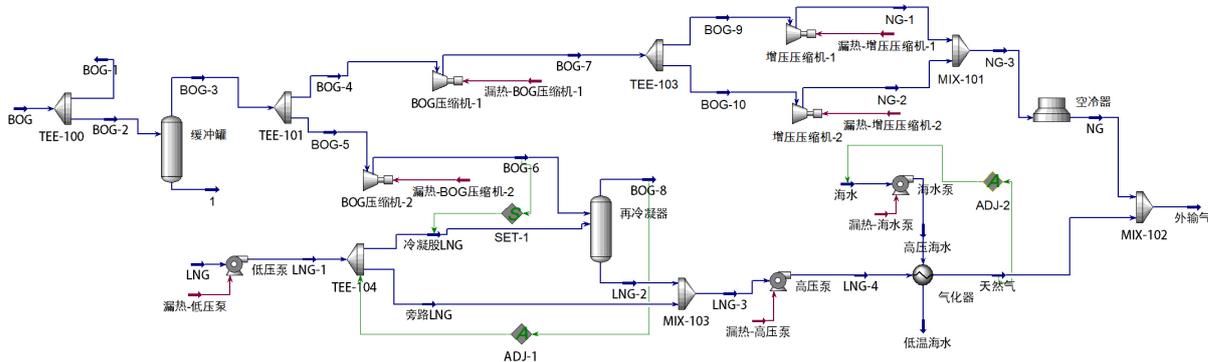


Figure 1. Process simulation flow of LNG termina

图 1. LNG 接收站工艺模拟流程

Table 1. Simulation parameters of important nodes

表 1. 重要节点的模拟参数

主要节点	运行参数		
	温度/°C	压力/kPa	流量/(kg·h ⁻¹)
储罐出口 LNG	-161.1	118	958,904
储罐出口 BOG	-158.3	118	17,339
BOG 压缩机入口 BOG	-158.3	118	17,339
BOG 压缩机出口 BOG	-70.74	700	17,339
低压泵出口 LNG	-160.8	700	958,904
再冷凝器入口	-160.8	700	96,418
再冷凝器出口	-132.5	700	113,757
高压泵入口 LNG	-157.3	700	976,243
高压泵出口 LNG	-153.8	7800	976,243
海水泵入口	8	101.3	40,000,000
海水泵出口	8.1	600	40,000,000
外输天然气	3	7600	976,243

LNG 接收站组分主要为甲烷(88.8455%)、乙烷(7.1515%)、丙烷(2.8995%)以及异丁烷(0.3950%)等。通过研究 BOG 处理量、BOG 压缩机与低压潜液泵出口压力参数对再冷凝工艺的作用规律、BOG 温度对液气质量比的影响以及外输压力对外输系统的影响四个方面来分析各因素对再冷凝工艺的影响。

2.1. BOG 处理量对再冷凝工艺的影响

接收站内 BOG 产生量动态变化，研究其处理量对再冷凝工艺影响，在压缩机与泵出口压恒定时，BOG 量从 7 t/h 增至 14 t/h，参数采用表 1 中的数据，保持不变，相关设备能耗随之变动。

由图 2 可知：随着 BOG 处理量的持续增加，BOG 压缩机和高压泵的能耗也相应上升。具体来说，BOG 处理量每增加 1 t/h，BOG 压缩机能耗增量为 46 kW，高压外输泵能耗提升幅度约 10 kW。由于 LNG 储罐输出流量保持恒定，低压潜液泵能耗维持基准值。系统总能耗因压缩机组与高压泵组的能耗叠加效应呈现同步增长趋势。由图 3 可知，随着冷凝股 LNG 流量的增加，液气质量比波动源于 BOG 流量的阶梯型增大，但其数值仍保持在 5.75~5.85 之间。当操作压力恒定时，冷凝 LNG 流量与 BOG 流量之比基本稳定。

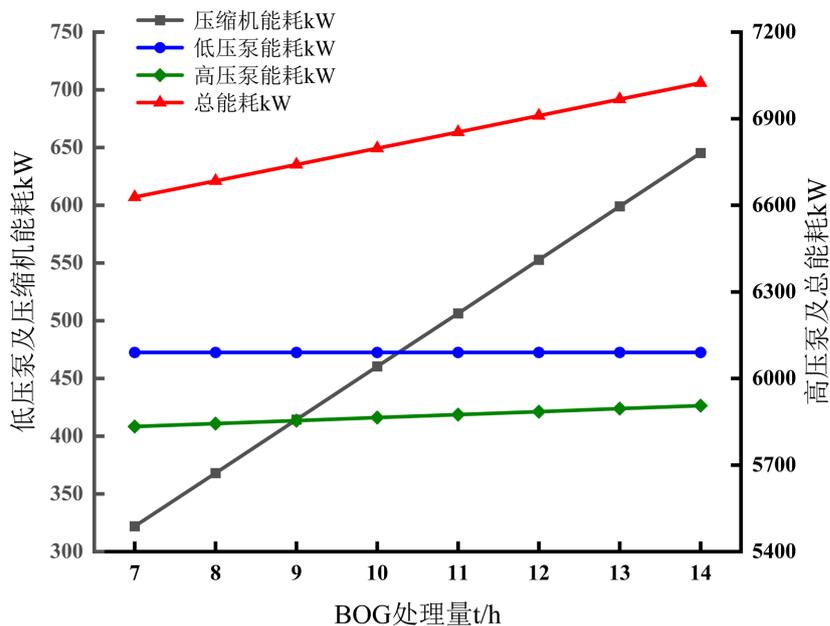


Figure 2. Influence of BOG treatment capacity on equipment energy consumption of the terminal
图 2. BOG 处理量对接收站设备能耗的影响

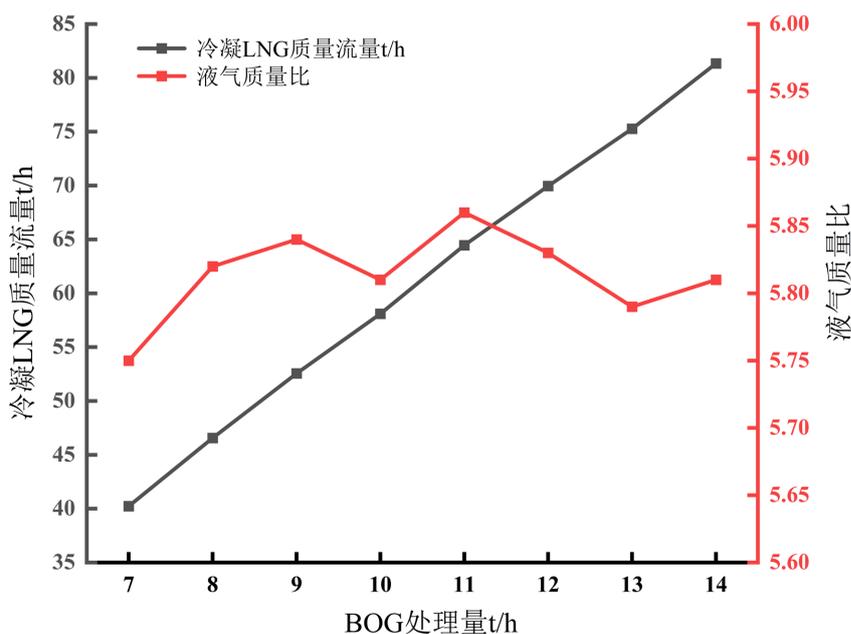


Figure 3. Influence of BOG treatment capacity on condensed LNG mass flow rate and material ratio
图 3. BOG 处理量对冷凝 LNG 质量流量及物料比的影响

2.2. 压缩机和低压泵出口压力对系统工艺的影响

本研究接收站压缩机组设计压力参数为 1790 kPa。在额定外输工况下，当蒸发气产生量、高压外输泵出口压力等关键参数保持恒定，且 BOG 压缩机与低压潜液泵出口压力参数处于相同设定值时，压缩机组出口压力参数由 450 kPa 提升至 750 kPa，系统各部分能耗及总能耗的变化如图 4 所示；出口压力对冷凝 LNG 质量流量与液气质量比的影响如图 5 所示。

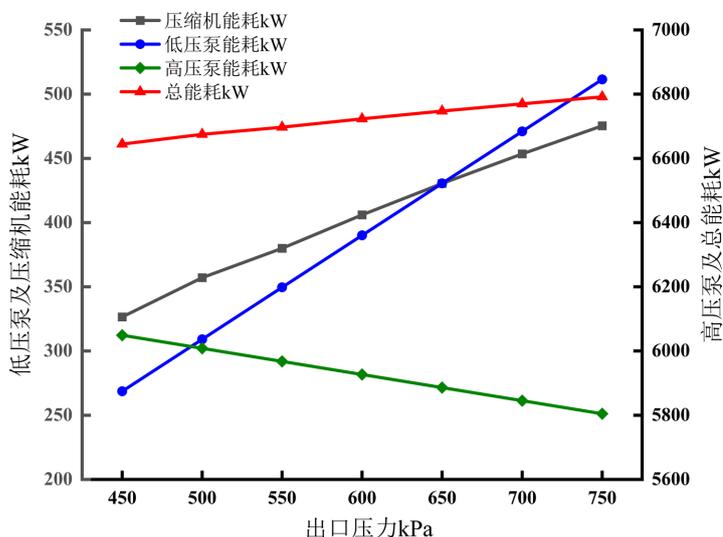


Figure 4. Influence of outlet pressure on equipment energy consumption
图 4. 出口压力对设备能耗的影响

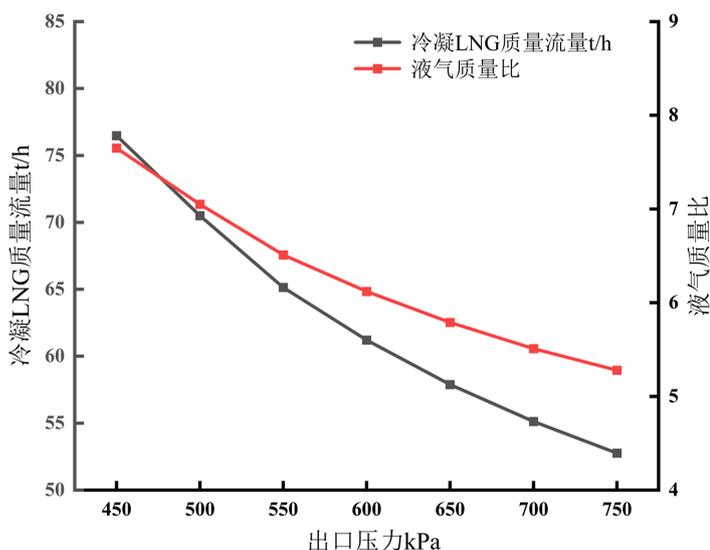


Figure 5. Influence of outlet pressure on condensed LNG mass flow rate and liquid-gas mass ratio
图 5. 出口压力对冷凝 LNG 质量流量与液气质量比的影响

由图 4 可知：随着出口压力的增大，压缩机能耗由 326.61 kW 增加到 475.37 kW，能耗增加约 149 kW；低压泵能耗由 268.69 kW 增加到 511.48 kW，能耗增加约 242.79 kW。随着 BOG 压缩机与低压潜液泵出口压力参数的递增变化，再冷凝器操作压力呈现同步上升趋势，导致高压泵能耗降低，但系统总能耗增大 2.22%。

从图 5 可以看出，当进入再冷凝器的 BOG 量稳定时，压缩机和低压泵的出口压力逐渐升高，冷凝 LNG 的流量随之下降。这是因为 BOG 压力上升导致冷凝温度升高，所需冷量减少。根据表中数据，当出口压力为 600 kPa 时，冷凝 LNG 流量 61.21 t/h，总能耗 6723.13 kW。此时冷凝 LNG 流量和总能耗均处于较低水平，且与相邻压力点相比，变化趋势平缓，因此 600 kPa 是减小冷凝 LNG 流量与降低能耗的最佳状态。

2.3. BOG 温度对液气质量比的影响

LNG 接收站中的液气质量比是一个重要的参数,它通常指的是 LNG 在气化过程中,液气质量比为 LNG 质量流量与 BOG 之比,这个比例对于 LNG 接收站的运营和设计具有重要意义,主要体现在能源利用效率、安全运行以及经济效益等方面。在实际的工况运行中,液气质量比一般在 6~8 之间。现研究 BOG 温度对液气质量比的影响,设定 BOG 压缩机进出口压力不变,再冷凝过程中液气质量比与再冷凝器 BOG 进口温度变化之间的关系见表 2。

Table 2. Influence of BOG outlet temperature on liquid-gas mass ratio

表 2. BOG 出口温度对液气质量比的影响

出口温度/°C	液气质量比
-130	4.36
-120	4.57
-110	4.78
-100	4.98
-90	5.18
-80	5.39

从表 2 可得,随着 BOG 进入再冷凝器时,其温度降低,导致液气质量比相应减少。由于 BOG 温度较低,降低了冷凝所需的 LNG 流量。基于此,可以通过降低 BOG 进入再冷凝器的温度,来缓冲因压缩机出口压力降低而导致的液气质量比增加。由此可以在液气质量比变化不大时,通过使压缩机出口压力降低,可以有效地减少其能耗。

2.4. 外输压力对外输系统的影响

LNG 经高压外输泵升压后输送至气化器,通过海水换热系统进行间接加热,使 LNG 气化并升温至设计温度(高于 0°C)。完成气化过程后,经管道外输。本接收站的外输压力最大范围为 5 MPa~9.5 MPa,设定外输温度为 3°C,海水泵入口温度参数设计值为 8°C,海水流经气化器时温降不应超过 5°C。在外输压力由 5.5 MPa 增大至 9.0 MPa 过程中外输系统参数如图 6 和图 7 所示。

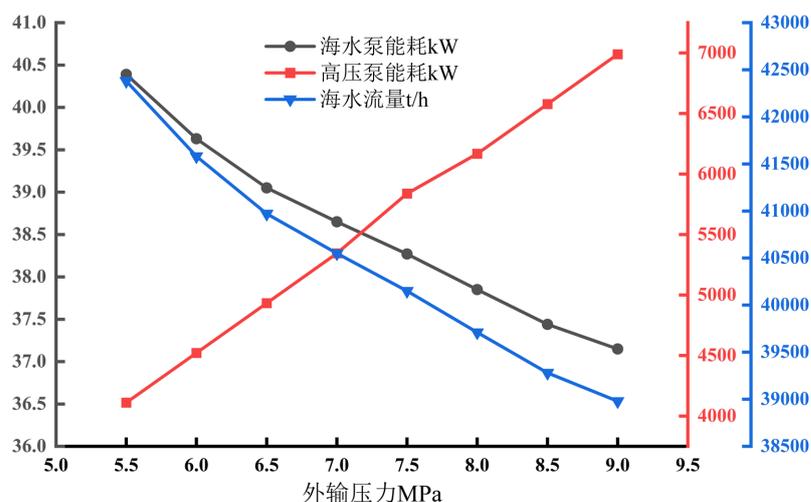


Figure 6. Impact of outlet pressure on the energy consumption of export equipment and the flow rate of seawater
图 6. 外输压力对外输设备能耗及海水流量的影响

由图 6 可知, 当高压外输泵出口压力参数递增时, 海水循环量与海水泵能耗呈递减趋势, 而高压外输泵能耗呈递增趋势, 三者呈现显著的参数关联性。高压泵能耗增大主要由于压力升高。外输压力升高后, LNG 气化所需的热量减少, 单位时间内所需的冷源量也随之降低, 因此海水泵的能耗下降。

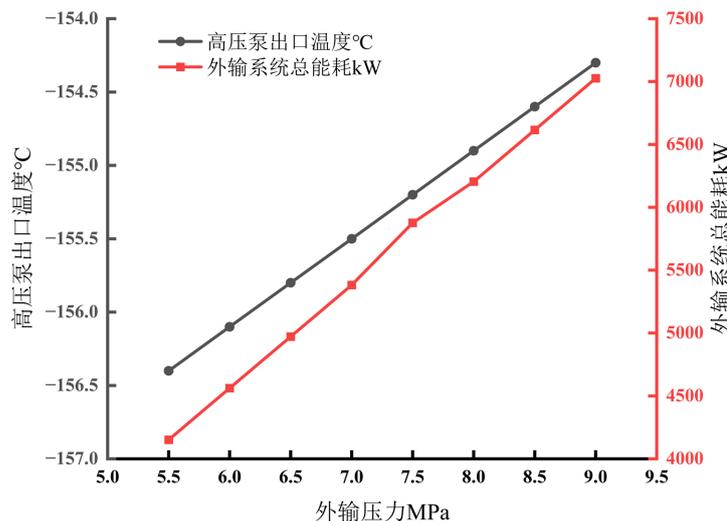


Figure 7. Influence of export pressure on gasification export process energy consumption
图 7. 气化外输工艺能耗随外输压力的变化

由图 7 可知: 在气化量保持恒定的条件下, 单位质量液化天然气所需换热量随外输压力提升而减少, 从而降低海水循环量及海水泵能耗。

尽管外输压力的提升能够降低海水泵的能耗, 但外输总能耗仍然上升。这表明高压泵能耗的增加超过了海水泵能耗的减少。因此, 在设定外输压力时, 必须同时满足下游输气管网和用户, 并需综合考虑外输压力对外输系统能耗的影响。

3. BOG 再冷凝工艺优化

3.1. 预冷式再冷凝工艺优化方案

通过 2.1 节分析可知, 随着 BOG 压缩机出口压力的增大, 液气质量比逐渐减小, 系统能耗相应增加。为降低系统能耗, 依据 2.3 节的结论, 降低进入再冷凝器的 BOG 温度是种有效方法, 可以抵消因压缩机出口压力降低而导致的液气质量比增加, 反之当处理 BOG 量相同时, 若降低液气质量比, 即冷凝液 LNG 流量减少, 通过减少低压泵和高压泵的 LNG 流量, 可以有效降低系统能耗。因此, 优化 BOG 再冷凝工艺的核心在于降低 BOG 进入再冷凝器前的温度。

优化后的工艺流程为: 接收站产生的 BOG 经 BOG 压缩机增压后, 进入预冷换热器进行预冷处理。在预冷换热器中, BOG 与高压泵输送的 LNG 进行热交换, 预冷换热器使 BOG 温度降低。之后, 预冷后的 LNG 与高压外输泵输出的另一股 LNG 混合后共同进入气化器进行气化处理。

3.2. 最小外输工况的计算

在再冷凝工艺中, 必须考虑的关键因素是最小外输量。为保障 BOG 完全冷凝及高压外输泵安全运行, 需明确不同运行参数条件下的最小冷凝 LNG 流量及旁通 LNG 流量等关键参数, 以保证足够的 LNG 供应来为 BOG 提供冷能。需界定接收站在稳态运行条件下的最小外输流量参数, 该参数需根据下游用户

在预冷式 BOG 再冷凝工艺中, BOG 进入再冷凝器时温度从 -70.74°C 降至 -120°C , 减少了冷凝相同质量 BOG 所需的 LNG 量。从 162.26 t/h 降至 123.01 t/h, 液气质量比也出现了降低, 由 5.72 降至 4.33。由于冷凝股 LNG 流量和旁路 LNG 流量的减少, 导致最小外输量进一步降低, 由 213.28 t/h 降低至 162.10 t/h。系统总能耗由 3055.38 降至 2682.75, 降低约 13.89%。

在处理相同量的 BOG 时, 两种工艺中的 BOG 压缩机出口压力参数保持一致, 因此压缩机能耗相同。然而, 在预冷式 BOG 再冷凝工艺中, 由于冷凝相同量的 BOG 所需的 LNG 流量减少, 同时最小外输量也随之降低。这导致通过低压泵和高压泵的流量减少, 从而使得整个系统的总能耗得以降低。

4. 结论

针对 LNG 接收站 BOG 再冷凝工艺, 基于 ASPEN HYSYS 软件建模、计算与优化, 得出以下主要结论:

(1) 随着 BOG 处理量增加, 低压泵能耗不变, BOG 压缩机和高压泵能耗上升, 系统总能耗随之增长; 液气质量比在 5.75~5.85 间波动, 操作压力恒定时, 冷凝 LNG 流量与 BOG 流量之比保持稳定。压缩机和低压泵出口压力升高, 压缩机能耗增加, 高压泵能耗减少, 总能耗上升。同时, BOG 更易液化, 单位质量 LNG 提供的冷量增多, 液气质量比降低。

(2) 降低 BOG 进入再冷凝器的温度, 可以减少冷凝所需的 LNG 流量, 从而缓冲因压缩机出口压力降低导致的液气质量比增加。在液气质量比变化不大时, 降低压缩机出口压力能有效减少能耗。尽管外输压力提升能降低海水泵能耗, 但总能耗仍上升, 因为高压泵能耗增加超过了海水泵能耗的减少。设定外输压力时, 需综合考虑下游需求和系统总能耗。

(3) 优化后的工艺通过预冷换热器将进入再冷凝器的 BOG 温度降低, 显著减少了冷凝所需的 LNG 流量, 进而降低了低压泵与高压泵的能耗。预冷式 BOG 再冷凝工艺显著降低了接收站的最小外输量, 从 213.28 t/h 降至 162.10 t/h, 系统总能耗由 3055.38 降至 2682.75, 降低约 13.89%。

基金项目

辽宁省高校创新人才支持计划(202068)。

参考文献

- [1] 高芸, 王蓓, 胡逸丹, 等. 2024 年中国天然气发展述评及 2025 年展望[J]. 国际石油经济, 2025, 33(2): 55-67.
- [2] 中国石化经济技术研究院产业发展研究所. 国内天然气市场供应充足前景向好[N]. 中国石化报, 2025-01-20(005).
- [3] 武艺, 李然, 张丹迪. 中国 LNG 接收站发展趋势及利用效率提升思考[J]. 油气储运, 2024, 43(7): 721-729.
- [4] 段兆芳, 张晓宇, 吴珉颀, 等. 2023 年国内外天然气市场回顾与 2024 年展望[J]. 国际石油经济, 2024, 32(3): 19-28.
- [5] 吴洁, 刘灿. LNG 船舶蒸发气处理系统技术发展态势研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(2): 1-7.
- [6] 陈光铨. 蒸发气回收利用技术在液化天然气接收站中的应用现状与进展[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(6): 107-108+111.
- [7] 周亚洲. LNG 接收站蒸发气处理工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [8] 王雅倩, 马荣荣. LNG 接收站 BOG 处理工艺的优化对策探索[J]. 山西化工, 2024, 44(10): 134-136.
- [9] 马倩倩. LNG 接收站新型节能技术综述[J]. 清洗世界, 2021, 37(9): 62-63.
- [10] Cao, S., Luan, T., Zuo, P., Si, X., Xie, P. and Guo, Y. (2025) Simulation and Economic Benefit Analysis of Carburetor Combined Transport in Winter at a Liquefied Natural Gas Receiving Station. *Energies*, **18**, Article 276. <https://doi.org/10.3390/en18020276>
- [11] Zhang, C., Chen, F., Wang, Y., Peng, Y., Zhao, Y. and Lv, M. (2020) A Study on Temperature-Stress Model of Pre-

Cooling for Re-Condenser in LNG Receiving Station. *AIP Advances*, **10**, Article 065322.

<https://doi.org/10.1063/1.5143104>

- [12] Li, Y. and Wen, M. (2016) Boil-Off Gas Two-Stage Compression and Recondensation Process at a Liquefied Natural Gas Receiving Terminal. *Chemical Engineering & Technology*, **40**, 18-27. <https://doi.org/10.1002/ceat.201500751>
- [13] 薛鹏, 张引弟, 杨建平, 等. 基于变压吸附制氮系统的 BOG 再冷凝工艺[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 92-98.
- [14] 傅皓, 张健, 畅梓博, 等. LNG 接收站蒸发气(BOG)增压再液化技术路线选择及条件限制[J]. 天然气化工—C1 化学与化工, 2021, 46(6): 97-103.
- [15] 赵顺喜, 嵇俊, 温庆城, 等. 一种再冷凝回收 LNG 接收站蒸发气的工艺方案[J]. 山东化工, 2023, 52(10): 217-219.
- [16] 宋宇, 肖述民, 高小永, 等. 基于 Aspen HYSYS 的 LNG 接收站全流程模拟[J]. 化工自动化及仪表, 2024, 51(1): 92-101+127.