

液化天然气储罐 BOG 再液化工艺能耗优化分析

宁水健 (辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要: 液化天然气储罐在运行过程中持续产生 BOG 气体, 如何以较低能耗实现其再液化已成为工艺系统优化的重要课题。本文围绕 BOG 再液化过程中的压缩系统、膨胀单元与冷剂回路结构展开技术剖析来分析各关键设备的能耗构成及运行参数对能效表现的耦合机制, 并在此基础上提出冷剂参数优化、余冷回收利用与压缩控制策略等路径, 构建了具备热力闭环特征的能耗优化方案。本文在厘清结构逻辑与能耗来源关系的基础上, 提出多维协同的工程改进方向, 为高效型再液化系统的设计与改造提供理论支撑和实践指导。

关键词: BOG 再液化; 系统能耗; 冷剂优化; 压缩控制

中图分类号: TE974 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 035-0159-03

Energy consumption optimization analysis of BOG re liquefaction process for liquefied natural gas storage tanks

Ning Shuijian (School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Liaoning University of Petrochemical Technology, Fushun Liaoning 113001, China)

Abstract: During the operation of liquefied natural gas storage tanks, BOG gas is continuously generated. How to achieve its re liquefaction with low energy consumption has become an important issue in process system optimization. This article focuses on the technical analysis of the compression system, expansion unit, and refrigerant circuit structure in the BOG re liquefaction process to analyze the energy consumption composition of each key equipment and the coupling mechanism of operating parameters on energy efficiency performance. Based on this, paths such as refrigerant parameter optimization, residual cold recovery and utilization, and compression control strategies are proposed to construct an energy consumption optimization scheme with thermal closed-loop characteristics. On the basis of clarifying the relationship between structural logic and energy consumption sources, this article proposes a multidimensional collaborative engineering improvement direction, providing theoretical support and practical guidance for the design and renovation of efficient re liquefaction systems.

Keywords: BOG re liquefaction; System energy consumption; Refrigerant optimization; Compression control

液化天然气 (LNG) 储罐在运行过程中不断产生 BOG (Boil-Off Gas), 其高效回收与再液化已成为保障储运系统安全与降低能耗的重要研究方向。近年来, 学界与工程界围绕 BOG 处理工艺开展了多维探索。崔淑雅等人从风险控制角度出发, 分析 BOG 再液化系统对储罐火灾爆炸风险的缓释作用, 强调其安全边界管理的重要性; 姜亚如等针对大型储罐闪蒸气回收路径设计提出了结构优化建议, 突出系统热耦合匹配对液化效率的影响; 王莹钊则从 LNG 接收站工艺角度出发, 探讨了压缩与节流配置对再液化能效的影响机制。尽管已有研究在结构建模与局部优化方面取得初

步成果, 但现有系统在多工况适应性、冷量耦合路径与压缩控制灵敏性方面仍存在结构性短板。为应对储运规模扩大与能耗刚性约束的双重挑战, 亟须从工艺系统视角出发, 解析了 BOG 再液化过程中的能耗构成与控制边界, 构建具备热力闭环特征的优化方案, 从而提升装置整体运行效率与工程适应能力。

1 储罐 BOG 再液化工艺结构

1.1 储罐 BOG 压缩系统构成特点

压缩系统作为储罐 BOG 再液化流程的起始环节, 决定后续冷却与膨胀工段的工质条件, 其结构配置需在热力学效率与负荷适应性之间实现平衡^[1]。BOG 气

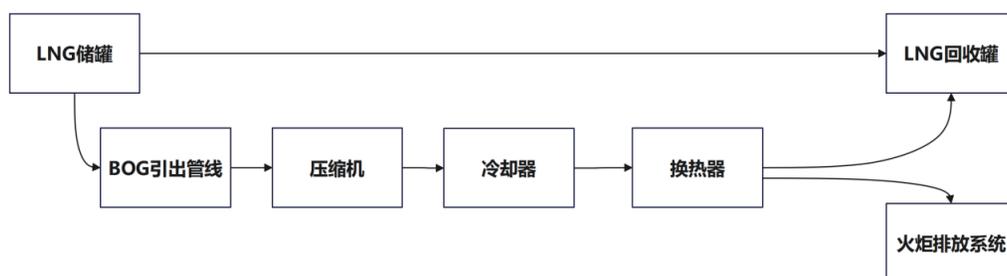


图 1: BOG 再液化系统结构流程图

体常压下压力低、体积大，需经初步压缩提升能级后进入换热段完成相变过程。工程中常用压缩机类型为离心式和往复式，前者适用于大流量中低压比场景，结构紧凑、运行稳定，后者适用于高压比区间，调节弹性大但负荷波动明显、维护成本高。在多级压缩中，合理压比分配是控制终端温升的关键，通常设定总压比在 2.5–3.5℃内，25–35℃内以避免换热器入口过热引发冷却负载集中与系统喘振。辅助系统如润滑油回路应具备温控调节与分油功能，避免低温段油膜覆盖换热界面；冷却水系统用于轴承与壳体外温控制，其布置应匹配热源强度，防止局部热集聚影响压缩效率。

1.2 储罐 BOG 膨胀单元结构特性

膨胀单元在 BOG 再液化路径中承担冷焓释放与制冷量转化功能，其结构形式对冷能梯级转换效率具有决定性影响。常规结构中膨胀机可输出可用机械功，适用于高冷量需求下的焓差充分释放；节流阀虽结构简单、响应灵敏，但其焓降过程为不可逆等焓扩散过程，无法实现冷能回收^[2]。膨胀机运行需保持在高效率区，其等焓效率应高于 70%，以避免放大系统能耗负担。核心管线与壳体材料需兼具低温强度与热绝缘性能，常用低碳奥氏体不锈钢或复合铝基合金，界面设有绝热衬层与蒸汽屏障，阻断热泄漏通道防止焓值衰减。膨胀比与制冷能力关系非线性，存在最优工作区，受冷剂物性、入口焓值与末端压力共同制约，需通过热力模型匹配计算。膨胀单元与压缩系统之间存在冷焓耦合边界，其出口焓需与主冷箱进口相匹配，否则将导致焓值冗余或换热滞后，影响液化深度。

1.3 储罐冷剂回路集成方式

冷剂回路作为冷量搬运与热闭环核心，其拓扑结构与控制方式决定系统热耦合效率。常见回路类型为单组分与混合冷剂系统，前者响应快但适配范围窄，后者通过组分分布实现多段换热适应。混合冷剂常用 R290/R134a 配比，在主冷箱内通过预冷器与过冷器构建递进换热模式。主换热器温差控制在 8–12℃以提升换热驱动力，并避免面积过度扩展。气液分离器与补液调节器用于保障冷剂相态稳定，纯化系统去除杂质提升运行寿命。冷剂总流量调节需与换热面积与压缩负载形成动态耦合，构建压力—焓差协同控制机制，增强系统连续性与适应性。

2 储罐能耗来源分析

2.1 储罐关键设备功耗分布

压缩机作为 BOG 再液化的首要驱动单元，其功耗在系统中处于绝对主导地位，功率需求主要由压比设定、流量负荷与等焓效率共同决定^[3]。在连续运行状态下，其总功率占比常维持在 60–70% 区间，是系统节能策略锁定的优先对象。膨胀段的能耗则表现为能

效系数的消耗放大，尤其在等焓降速率低于设计值时，制冷焓差减小导致能耗递增效应明显。冷剂驱动系统中的循环泵构成稳定负载，虽单体功率不高，但对整体冷量形成具有叠加效应。空冷器风机虽为辅助单元，但在高温工况下，其冷却能力决定换热效率曲线走向，是影响系统部分负载效率的重要环节。下表 1 为中等规模 BOG 再液化系统下的主要能耗构成数据节选：

表 1: 系统关键设备功耗分布表 (节选, 单位: kW)

设备类别	功耗 (kW)	占总功率比 (%)
压缩机组	275	65.5
膨胀机单元	48	11.4
冷剂循环泵	36	8.6
空冷器风机	29	6.9

2.2 储罐工艺参数影响机制

工艺参数的设定决定系统内部的热力匹配条件与能量转换效率，具备对能耗表现的决定性影响^[4]。在压缩段，BOG 初始温度与压力构成压缩起始状态，其蒸发压力每升高 0.1MPa 将降低单位气体所需压缩功约 6–8%，这一变化是非线性的，表现为高低压端效率敏感区分明显。膨胀系统中的膨胀比对焓降效果具有直接影响，当回压稳定而入口压力提高时，单位质量可释放冷量增加，提升液化效率，进而反向削减冷剂流速与泵耗。冷剂组分对系统性能系数 (COP) 形成放大反馈，小组分浓度变化 5% 可引起系统 COP 波动超过 0.2，在多级换热路径中表现为换热末端温差扩大。换热端差 (ΔT) 过小虽可提升热交换效率，但需扩大换热面积以维持负荷平衡，若 ΔT 设置偏大，则压缩负载上升形成“温差补偿”效应，反而提升总能耗。

2.3 储罐工况调整负载响应

BOG 再液化系统运行于变工况环境中，其负载响应能力决定实际能耗水平能否贴近理论值。当外界气温升高超过 5℃、风速下降至 2m/s 以下时，空冷器散热能力下降，冷剂凝液温度上升造成压缩机出口过热，进一步扩大下一段压比需求，形成能耗链式抬升^[5]。BOG 蒸发量波动频繁时，压缩机在部分负载状态下运行效率降低，特别是低负载下压缩机可能进入喘振区，出现单位冷量能耗激增现象。在启停阶段，系统需逐步建立冷量梯度，期间换热器尚未稳定传热，冷剂回路中存在明显未利用冷量损耗，该部分损耗约占启动阶段总能耗的 12%–15%。负载快速变化还会干扰控制系统的节能逻辑，使变量频繁越限，形成非稳态调节峰值。

3 储罐再液化工艺的能耗优化路径

3.1 储罐冷剂参数优化策略

冷剂在 BOG 再液化工艺中起到核心热量转移与相

变媒介的作用，其物性参数直接决定冷量释放效率与系统能耗水平。特别是在混合冷剂系统中，不同组成的正沸点（NBP）、蒸发焓与气液相行为对换热器各段温差的稳定性与热力匹配能力产生明显影响。当前工程中广泛使用的R290（丙烷）与R134a（四氟乙烷）混合体系，在调整配比的基础上可实现多冷点路径中的连续相变与能量分层释放。研究表明，当R290/R134a配比为40:60，且蒸发压力维持在0.25 MPa、冷凝压力不超过1.2 MPa时，系统性能系数（COP）达到最大值3.1，单位能耗降至0.37 kWh/kg-LNG，液化效率提升至93.8%。不同混合比下性能数据如表2所示：

表2：不同冷剂混合比下性能对比表（蒸发压力0.25MPa）

冷剂配比 (R290/R134a)	COP	单位能耗 (kWh/kg-LNG)	液化效率 (%)
30 / 70	2.7	0.41	90.1
40 / 60	3.1	0.37	93.8
50 / 50	2.6	0.44	88.3

为确保冷剂性能保持在高效运行区间，可引入动态组分调节机制，以机器学习模型对不同负荷条件下的组分比例进行实时修正，从而避免静态配比在变工况条件下产生热力偏移。

3.2 储罐冷能回收措施

BOG再液化过程中，除主冷箱输出的显性冷量外，系统还存在大量被动冷焓资源未被利用，主要集中于压缩前气体、储罐闪蒸气以及部分未参与相变的回流段气体。冷能回收的关键在于构建高效的换热耦合结构，将低品位冷量通过合理路径引入主流程中的预冷区段或过冷区段，从而降低主系统负荷并提高总能效。常见策略是在BOG入口设置逆流换热器，辅以R290中间回路，该中间流体初温控制在-30℃，在与BOG换热后升温至0℃并通过闭环循环完成回收，其过程不改变主流程压力等级，换热效率稳定。实测结果显示，该回收路径可减少主冷箱冷负荷约8%~12%，且不引发换热不对称问题。储罐顶部产生的闪蒸气通常焓值较低但温差适宜，可通过恒压控制引入回液支路前段，不仅提升整体焓值平衡，还可削弱气液分离器的瞬态波动幅度。值得注意的是，在回收路径设计中需严格避免冷能与主冷剂回路产生热短路或串扰，推荐采用套管式或双回路结构将回收冷焓与主系统实现物理隔离。应辅以换热仿真软件（如Aspen HYSYS）建立热流闭合模型，计算冷能分布系数、回收效率以及换热器压降系数，从而实现精细化调度。

3.3 储罐压缩单元控制方法

压缩系统是BOG再液化过程的最大能耗来源，占总功率超过65%，因此其控制策略直接决定系统运行

能效与经济性。传统定频控制策略在负荷波动场景下效率大幅衰减，压缩机常在低效率运行区甚至喘振边界徘徊，形成系统能耗过剩现象。为提高运行适应性，可引入变频驱动（VFD）技术，按需调节电机转速与压缩比，使压缩机始终维持在热力最佳运行区。数据表明，该技术在部分负载状态下可削减单位压缩功12%~17%，显著降低系统负载响应成本。为适配VFD模式，工程中推荐使用多台等容结构压缩机构建并联系统，结合负荷切换逻辑与启动次序调节机制，根据BOG蒸发量变化情况进行主辅机转换，实现节能与稳定运行兼顾。在控制策略方面，采用以线性功耗函数与负载惩罚因子构建的优化模型，可实现能耗最小化目标下的最优负载分配。针对低频喘振问题，可引入模型预测控制（MPC）方法，通过实时采集蒸发压力、冷剂焓值与压缩机出口温度等参数，预测喘振临界状态并提前实施转速跳阶或气流旁通操作。与传统PID控制相比MPC具备更高的预测精度与响应速率，特别在压缩负载剧烈波动（如LNG卸料或装车高峰时段）下，可显著降低调节延迟带来的能耗峰值。

4 结论

本文围绕液化天然气储罐BOG再液化工艺的结构机制与能耗表现，分析了压缩单元、膨胀段及冷剂回路的构成特性，明确指出压缩机为主导能耗设备占比超过系统总功率的65%，而冷剂组分与操作参数的变化对COP具有明显调节作用。文章在此基础上提出冷剂优化、冷能回收与压缩控制三类路径，并量化验证其对系统能效的改善边界。冷剂配比调优可实现单位能耗下降0.04kWh/kg-LNG，冷能回收提升液化效率约4%，而压缩调度策略具备压缩功削减17%的潜力。本文提出的分级优化方案为BOG再液化系统的工程节能设计提供了理论依据与实践方向。面向未来，提升控制策略的智能响应能力与冷量系统的耦合效率，将成为再液化技术可持续演进的关键节点。

参考文献：

- [1] 崔淑雅, 许秀丽, 张恒, 等. BOG再液化储罐火灾爆炸事故定量分析[J]. 油气田环境保护, 2025, 35(02): 15-21.
- [2] 姜亚如, 冯汉升, 袁树杰, 等. 大型液化天然气储罐闪蒸气再液化系统设计[J]. 低温与超导, 2025, 53(02): 58-65.
- [3] 王莹钊. LNG接收站蒸发气处理工艺研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14(12): 98-100.
- [4] 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.
- [5] 刘森儿, 李欣欣, 李恩道, 等. 基于BOG回收的多槽车对船LNG加注方案设计[J]. 船海工程, 2024, 53(05): 25-28+32.