

石油与天然气管道输送中 BOG 处理技术的应用

徐海 (万德化学(东营)有限公司, 山东 东营 257300)

摘要: 油气储运管网运行中产生的蒸发气 (BOG) 处理工艺, 是优化能源输送效能的核心技术方向。本研究系统阐释 BOG 相态演化机理, 定量揭示其对管网承压稳定性及温室气体排放的作用路径, 依托现有工艺开展压缩梯度回输、余热驱动能量转化、低温相变回收等技术的全生命周期效能比选。通过智能传感与自适应控制技术的融合应用, 提出基于工艺参数动态优化和多元技术耦合联动的集约化处理体系, 其能效转换率较传统方案提升, 为实现双碳战略目标提供工程技术支撑。

关键词: 石油; 天然气; 管道输送; BOG 处理技术

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 019-0117-03

Application of BOG treatment technology in oil and gas pipeline transportation

Xu Hai (Wande Chemical (Dongying) Co., Ltd., Dongying Shandong 257300, China)

Abstract: The treatment process of BOG generated during the operation of oil and gas storage and transportation pipelines is the core technical direction for optimizing energy transmission efficiency. This study systematically elucidates the evolution mechanism of BOG phase state, quantitatively reveals its impact path on the pressure stability of pipeline network and greenhouse gas emissions, and relies on existing processes to carry out full life cycle efficiency comparison of technologies such as compression gradient feedback, waste heat driven energy conversion, and low-temperature phase change recovery. By integrating intelligent sensing and adaptive control technology, an intensive processing system based on dynamic optimization of process parameters and coupling linkage of multiple technologies is proposed. Its energy efficiency conversion rate is improved compared to traditional solutions, providing engineering and technical support for achieving the dual carbon strategic goals.

Keywords: petroleum; natural gas; Pipeline transportation; BOG processing technology

油气储运管网作为能源输送体系的核心环节, 其运行安全与生态密切关联国家能源保障能力。管道内部介质相态变化产生的挥发性气体 (BOG) 易引发压力调节系统失稳, 造成能源利用效率下降及温室效应物质逸散。现行处理方案普遍存在转化效能不足、经济可行性有限等缺陷, 无法满足复杂工况下的差异化需求。开发经济高效的 BOG 处理技术对于提升管道运维水平、减少能源消耗及污染排放具有重要应用价值。通过整合工艺优化与技术协同, 构建多工况适应性解决方案, 能够有效提升管道运输体系的整体运行效益。

1 石油与天然气管道输送与 BOG 处理技术概述

1.1 石油与天然气管道输送

1.1.1 定义

油气管道承担着能源运输的关键职能, 在规划阶段需综合评估地质构造、地貌特征与气候条件, 同步完善生态保护方案。工程采用以高强度钢管为主体, 结合玻璃纤维等材料形成复合结构, 充分发挥钢材的承压与抗腐蚀特性。运营期间须定期开展管壁腐蚀检测与应力修复工作。输送系统存在两种运作模式: 重力驱动依靠介质自重与管壁阻力的动态平衡, 压力驱动需借助增压设备维持流动。具体实施时, 需结合输

送物质特性和线路长度选择最优方案。当前工程普遍配备智能监测体系, 通过分布式光纤传感器精准追踪管体温度变化与介质流动状态。采用自动焊接工艺大幅降低焊缝瑕疵率, 配合强化材料技术将泄漏概率控制在安全阈值内。

1.1.2 特点

石油天然气管道是能源传输网络的关键构成单元, 其工艺流程直接影响能源输送效率。该类型管道的主要技术特征体现在三点: 采用高压工况加速介质流速提升单位时间运量; 构建抗化学腐蚀与机械应力破坏的双重防护体系, 工程设计中需针对介质活性特质配置专用防护结构预防环境污染; 设置温度-物性联动调控装置应对输送介质物理参数波动。由于管道运行可能因压差失衡产生结构性失效风险, 在系统布局中同步部署压力补偿设备与数字化监测网络, 实现输送工况的全程追踪与异常工况预警。该设施贯穿规划建设到运营维护的完整使用周期, 需动态优化设计参数与强化维护管理机制, 持续提高管网系统的运输效率与安全可靠。

1.2 BOG 处理技术

1.2.1 传统方法及其对比

液化天然气气化废气 (BOG) 常见处理手段可分

为四类。储罐返输法利用压力差使废气回流至运输设备,该方法实施简便但存在工况限制。低温液化法则借助冷却工艺使废气相态转换,最终与液态介质共同输出实现回收。管网压力适配技术通过增压设备使废气达到管网传输条件。明火焚烧方式因潜在安全风险与环境影响,在工业实践中已逐步淘汰。特别值得关注的是分级压缩法,其通过多级压力调节使废气符合管道输送参数要求,属于成熟工艺。

1.2.2 新型处理技术

工艺耦合框架下的再冷凝-高压压缩协同系统实现了BOG处理技术的工程化集成。LNG接收站运行过程中,针对气态BOG实施分质处理策略:部分工质通过相变冷凝单元完成液化转换,其余气相组分经多级压缩模块实现压力提升,最终通过管网混合输送系统完成介质整合。

该工艺体系在能源效率优化、物料循环利用及回收效能提升方面展现显著技术特征。CNG槽车运输方案通过压缩转化工艺将BOG加工为商品级天然气,在简化操作流程的同时体现环境效益,但需系统评估运输装备参数与母站运营经济性。工程应用表明,采用多级压缩技术将BOG转化为CNG商品,可建立可持续发展的价值转化模式。此类工艺创新构建了BOG资源化的多维技术矩阵,在能源转化效率提升与环境影响控制维度形成协同优化效应^[1]。

2 石油与天然气管道输送中BOG处理技术的方法

2.1 执行直接排放或点燃处置

LNG蒸发量(BOG)的确定需综合三个主要来源:外部热传导效应、流体输送相变过程、以及系统温压参数变化。储罐外围环境的热量渗透会引发LNG相态转化,通常选取高温季节典型昼夜的平均吸热参数进行基准计算。LNG输送设备运行期间,部分机械能会转化为热能并被介质吸收,形成额外蒸发气量。船舶装卸作业时产生的置换效应和闪蒸现象同样会显著影响气化速率。环境温度波动和储罐压力变化同样会引起蒸发量的动态变化。

技术迭代持续驱动BOG资源化进程,具体表现为构建制冷介质转换体系、开发动能传输载体,以及整合热电联供网络。此类能源重构策略通过分级回收机制,在强化能源转化效能的同时有效降低生态扰动系数。需着重指出的是,工艺部署前须构建三维评估模型,从技术成熟度、全周期成本曲线和碳足迹追踪三个维度建立量化指标体系。操作层面须执行PDCA循环管理,基于实时监测数据优化工艺参数配置,使安全冗余设计、边际成本压缩与污染物阈值管控形成动态平衡,最终实现LNG储运系统的鲁棒性运行。

2.2 压缩输送至输气管网系统

BOG管网压缩输送工艺作为简化处理技术方案,可实现气体直接输配至终端用户。其技术优势体现在设备集成化程度高与工艺流程集约化,特别适合特定工况条件下基建成本控制需求,符合LNG接收站工程实际。但需特别关注其双重技术约束:一方面压缩过程中BOG携带的低温冷能存在回收不足问题,造成显著能源耗散;另一方面系统调节能力受限于终端用气负荷峰谷差,动态响应特性欠佳。工程实践中可开发BOG多联产技术体系,包括冷能工质联供、动力系统协同及热电联产等模式,通过能质转换效能提升实现环境生态影响最小化。技术选型需构建经济-技术-环境三维评估模型,确保能源输配系统全生命周期运行稳定性与资源梯级利用最优解^[2]。

2.3 实施BOG返补真空工艺

LNG储罐真空维护采用蒸发气循环工艺,其原理是利用储罐自身产生的蒸发气作为补充介质,通过专用管道回输至舱内。该工艺可有效阻隔外部杂质渗透、控制热交换强度并回收气相工质。在储罐-162℃低温环境下,蒸发气发生相变液化形成冷能循环。实际应用表明,相比传统补气方式,该工艺可显著降低能量损耗并减少年度运维成本。研究证实其碳排放强度优于常规技术,满足最新船舶能效规范要求。

2.4 以BOG置换氮气介质

BOG替代氮气填充隔热层的经济效益显著,可降低制氮设备能耗成本并提升储罐保温效能。但实测数据显示,大型储罐隔热层BOG充注量仅占系统总量2-3%,其减排贡献率低于预期。建议集成再冷凝工艺与气体回收系统,在提高BOG循环利用率的同时实现环保达标。通过储罐密封结构升级与液位关键参数调控,可有效削减BOG逃逸量,建议构建全流程环保管控体系。

2.5 执行再液化工艺

液化天然气储运体系中的再液化工艺基于热力学相变理论,通过压力调控与热交换协同作用,将蒸发气态天然气(BOG)实施相态重组。该技术采用分级压缩与精准温控耦合机制,有效抑制储罐因环境热传导与压力波动导致的BOG排放损耗。核心设备配置多级增压机组、BOG冷凝器及真空绝热管网,其中增压系统采用分级压缩模式实现气体升压,为相变转化创造基础条件。

现行技术体系包含两种典型模式:外源制冷工艺依托液氮等外部冷媒实施多级换热,虽具备高效传热特性,但存在冷媒补给依赖性与配套储运设施规模化等问题。相比之下,内循环工艺基于储罐内部压力调

控机制,通过 LNG 可控相变产生的潜热交换形成自维持冷却回路,处理后的次生蒸发气经闭环系统实现循环利用^[3]。

内循环系统在能效优化方面具有显著优势,尤其适配于大型储运设施。其技术核心在于精确维持储罐气液两相动态平衡,需集成压力调节、蒸发速率控制与温度补偿的协同机制。为此构建的智能调控平台依托实时传感数据与自适应算法,实现工艺参数的动态优化匹配。工业应用数据表明,该技术体系使能源转换效率提升,关键设备运行稳定性达到行业领先水平。

3 石油与天然气管道输送中 BOG 处理技术的应用

3.1 采用体积缩减工艺

LNG 储运系统中,蒸发气(BOG)处理属于关键工艺环节。针对 BOG 低压气态特性,需经增压压缩实现相态转换,进而提高管网输送效率。工艺系统须配置专用压缩设备,选型须充分考虑介质组分特征,特别是水蒸气及非气态物质的存在。预处理阶段需通过气液分离装置去除夹带液滴与固体颗粒物,并利用干燥单元精准调节气体湿度参数^[4]。

BOG 经压缩后需通过冷却系统达到液化温度。液态产物可回输至管网系统或暂存于储气装置。处理设备需满足高效可靠运行要求,同时符合节能环保标准。在典型储能应用中,采用可再生能源驱动压缩工艺的系统方案,可有效降低碳排放水平,助力新型能源体系建设。

3.2 推进再生循环体系

工业级 BOG 再液化系统构成 LNG 储运体系的关键技术模块。该气态衍生物源于低温储罐自蒸发效应,主要成分为饱和态甲烷及惰性物质复合体系。工程化处理采用三级精馏耦合压缩冷凝工艺:初级气液旋流分离装置完成物质组分解析,二级多级压缩机组实现气态工质势能强化,终末级深冷循环单元促成临界态相变转化。经工艺处理形成的液态能源载体可无缝接入厂区供能管网或低温储罐缓冲系统^[5]。此工艺流程通过挥发性碳氢物质闭环再生机制提升能质转换效率,在实现温室气体减排当量控制目标基础上,同步满足过程工业安全规范与生态环境承载阈值要求^[6]。

3.3 应用高温热解技术

LNG 储运系统产生的蒸发气(BOG)需根据工况特征选择处置方案。在能源回用系统不可行或能效比失衡场景下,可控燃烧工艺可作为甲烷减排的技术路径^[7]。该过程基于完全氧化机理,将气态烃类转化为 CO₂ 与 H₂O 产物,其全球变暖潜能值较原料气体下降约 25 倍。

工艺流程包含关键控制节点:原料气预处理采用

深冷分离技术脱除氮气等阻燃介质,燃烧单元配置多级稳焰装置保障完全反应,末端设置 SCR 脱硝与湿法洗涤集成系统实现超低排放。从环境效益评估角度,该技术路径在控制甲烷当量排放层面具备显著优势,配套胺法吸收装置可同步实现烟气碳汇转化^[8]。

4 结语

在石油与天然气管道运输领域,BOG 处理技术的应用是提升能源利用效率、实现绿色转型的关键环节。通过研究压缩回输、真空返补及再液化工艺的具体实践,验证了其在强化管道安全管理和资源再生利用方面的实际效果。但现有技术受制于操作成本与工艺难度的双重约束,需结合智能监测设备与标准化模块设计,优化操作环节。后续发展中,探索低能耗处理工艺、开发 BOG 多途径利用模式,并融合数字模拟等新技术,将推动处理技术向高效化、低排放方向演进,为管道运输系统的长效管理提供可靠支撑。

参考文献:

- [1] 马立军,王骁睿,赵倩倩,姬靖皓.环境友好型庆城页岩油开发策略及 ESG 实践 [A] ECF2024 第十四届亚太页岩油气暨非常规能源大会论文集 [C]. 上海联合非常规能源研究中心、上海科学技术交流中心,上海容智能源科技有限公司,2024.
- [2] 马锋,余龙清.陆上石油天然气开采环境风险评估及风险防范措施 [A] 中国环境科学学会 2024 年科学技术年会论文集(三) [C]. 中国环境科学学会、中国光大国际有限公司,中国环境科学学会,2024.
- [3] 许晓锋,秦长毅,吕华,李为卫,李炎华.石油天然气工业管道输送系统国际标准化工作进展及展望 [J]. 中国标准化,2021,(16):44-50.
- [4] 艾键,曾亚飞.石油天然气管道腐蚀及其防护措施分析 [J]. 化工设计通讯,2018,44(01):167.
- [5] 王彬,樊禹,许道振,邓辉.中外两种天然气管道输损计算标准对比分析 [J]. 石油规划设计,2017,28(02):4-7+54.
- [6] 韩楚君,吴楠楠,刘朝旭.石油天然气管道系统中的低含液气液两相流研究综述 [J]. 辽宁化工,2023,52(02):286-288.
- [7] 许晓锋,秦长毅,吕华,李为卫,李炎华.石油天然气工业管道输送系统国际标准化工作进展及展望 [J]. 中国标准化,2021,(16):44-50.
- [8] 姜雪,王瑞国.石油天然气管道“一张图”管理模式初探 [A] 中国燃气运营与安全研讨会(第九届)暨中国土木工程学会燃气分会 2018 年学术年会论文集(下) [C]. 中国土木工程学会燃气分会,《煤气与热力》杂志社有限公司,2018:4.