

遵义地区页岩气 LNG 储配库 BOG 提氦项目 投资估算研究

鲁耽¹, 王斌^{2*}, 孙竣世^{2*}

1. 贵州页岩气勘探开发有限责任公司, 贵州 遵义 563400

2. 北京沃德拓普科技有限公司, 北京 100190

DOI:10.61369/IED.2025060034

摘 要 : 本文围绕中国南方储配库 BOG 可行性研究展开。遵义 LNG 储配库目前日处理天然气 50 万 Nm³/d, BOG 气量约 300Nm³/h, 二期新建后 BOG 气量总量为 600Nm³/h。若仅按一期运行规模建设提氦装置, 无法满足二期建成后的处理能力, 氦气资源回收不充分, 故确定提氦装置处理 BOG 气量 600Nm³/h。选择工艺技术方案时, 原料路线遵循先进性、可靠性、合理性原则。低温法提氦工艺应用广泛, 国内外多采用氮气循环制冷技术, 项目采用低温提氦工艺, 集成低温分离、纯化工艺, 流程简洁先进, 撬装化程度高。优选方案包括 BOG 调压、催化脱氢及分子筛脱水、粗氦提取、低温纯化、氦气充装、回收气压缩等环节。BOG 调压系统稳定压力后送至催化脱氢反应器; 催化脱氢脱除氢气, 分子筛脱水至 ppm 级; 粗氦提取通过三级冷凝分离得到高纯度氦气; 低温纯化利用吸附剂吸附杂质; 氦气充装采用隔膜压缩机增压充装; 回收气压缩机将回收气增压送回原料气入口。投资估算范围包括工艺设备等工程费用及相关建设费用, 总投资估算(含增值税)5090 万元, 各项费用明确。

关 键 词 : 中国南方储配库; BOG; 提氦装置; 工艺技术; 投资估算

Investment Estimation Study on BOG Helium Extraction Project of Shale Gas LNG Storage and Distribution Depot in Zunyi Area

Lu Dan¹, Wang Bin^{2*}, Sun Junshi^{2*}

1. Guizhou Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Zunyi, Guizhou 563400

2. Beijing WordTop Technology Co., Ltd., Beijing 100190

Abstract : This paper focuses on the feasibility study of BOG (Boil-Off Gas) at LNG storage and distribution terminals in southern China. Currently, the Zunyi LNG storage and distribution terminal processes 500,000 Nm³/d of natural gas, with a BOG volume of approximately 300 Nm³/h. After the second phase construction, the total BOG volume will reach 600 Nm³/h. If the helium extraction unit is built based only on the Phase I operating scale, it will not be able to meet the processing capacity after Phase II completion, leading to insufficient helium recovery. Therefore, it is determined that the helium extraction unit should handle a BOG volume of 600 Nm³/h. When selecting the technological process scheme, the raw material route follows principles of advancement, reliability, and rationality. Cryogenic helium extraction technology is widely applied, and both domestically and internationally, nitrogen cycle refrigeration technology is often used. The project adopts a cryogenic helium extraction process that integrates low-temperature separation and purification, featuring a simple and advanced flow process with a high degree of skid-mounted integration. The optimized scheme includes BOG pressure regulation, catalytic dehydrogenation and molecular sieve dehydration, crude helium extraction, cryogenic purification, helium filling, and recovered gas compression. The BOG pressure regulation system stabilizes the pressure before sending the gas to the catalytic dehydrogenation reactor; catalytic dehydrogenation removes hydrogen, and molecular sieve dehydration reduces water content to ppm levels; crude helium extraction uses three-stage condensation separation to obtain high-purity helium; cryogenic purification removes impurities using adsorbents; helium filling uses diaphragm compressors for pressurization and filling; the recovered gas compressor pressurizes the recovered gas and returns it to the raw gas inlet. The investment estimate covers process equipment and other engineering costs as well as related construction expenses. The total estimated investment (including VAT) is 50.9 million yuan, with all costs clearly defined.

Keywords : southern China storage and distribution depot; BOG; helium extraction device; process technology; investment estimation

引言

BOG（蒸发气体）是指在液化天然气（LNG）储存过程中，由于外部热量的输入导致部分液态天然气蒸发而形成的气体^[1-3]。BOG 主要由甲烷组成，同时含有少量的乙烷、丙烷等烃类。合理处理 BOG 对于减少环境污染和降低碳排放具有重要意义，因为甲烷是一种温室气体，其温室效应约为二氧化碳的 20 倍。

处理 BOG 技术，一是再液化与直接利用^[4,5]；二是高效回收与低碳化；三是小型化与移动式解决方案，即针对 LNG 加注站、小型储罐开发模块化设备。例如船舶应用：LNG 动力船配备 BOG 再液化系统（如 MAN Energy Solutions 的船用技术）^[6-9]。

按照遵义 LNG 储配库二期投入运行后（处理天然气 100 万 Nm³/d）进行提氮装置规模建设（提氮装置处理 BOG 气量 600Nm³/h），具有良好的经济效益，并且可以兼顾仅一期运行工况^[10]。

综上所述，提氮装置处理 BOG 气量 600Nm³/h，具有更好的经济效益。因此拟建装置的建设规模确定为：提氮装置处理 BOG 气量 600Nm³/h。

遵义 LNG 储配库原料天然气提供数据如表 1 所示。目前遵义 LNG 储配库日处理天然气 50 万 Nm³/d，BOG 气量约 300Nm³/h，

二期新建 50 万 Nm³/d 天然气液化装置，BOG 气量约 300Nm³/h。项目按照日处理天然气 100 万 Nm³/d 设计，提氮装置 BOG 供气量约 600Nm³/h。

遵义 LNG 储配库供提氮装置 BOG 提供组分含量估算数据如表 1 所示（BOG 总量 600Nm³/h）

表 1 BOG 组分含量（BOG 总量 600Nm³/h）

组分 / 浓度	原料气 /%	备注
甲烷（CH ₄ ）	84.48	
乙烷（C ₂ H ₆ ）	0.00	
丙烷（C ₃ H ₈ ）	0.00	
异丁烷（i-C ₄ H ₁₀ ）	0.00	
正丁烷（n-C ₄ H ₁₀ ）	0.00	
异戊烷（n-C ₅ H ₁₂ ）	0.00	
正戊烷（i-C ₅ H ₁₂ ）	0.00	
氮气（He）	3.10	
氢气（H ₂ ）	0.07	
氧气（O ₂ ）	0.01	
二氧化碳（CO ₂ ）	0.00	
氮气（N ₂ ）	11.71	

一、从含氮 BOG 中提取高纯氮气

从含氮 BOG 中提取高纯氮气，剩下的 BOG 主要成分不变，回收利用。

符合以下原则：

（1）先进性原则

先进性是指在工艺流程选择时技术上的先进程度和经济上的合理可行。先进性评价包括基建投资、生产成本、消耗定额以及劳动生产率等方面。选择的生产方法应达到物料损耗较小、物料循环量较少并易于回收利用、能量消耗较少和有利于环境保护等要求。

（2）可靠性原则

可靠性主要是指所选择的生产方法和工艺流程是否成熟可靠。要选择一些比较先进成熟的生产方法和工艺，避免只考虑先进性的一面，而忽视不成熟、不稳妥的一面。另外，要考虑原料供给的可靠性，对于一个建设项目，必须保证在其服务期限内有足够的、稳定的原料来源。

（3）合理性原则

合理性是指在进行工艺流程选择时，应该结合我国的国情，从具体项目的实际情况出发，考虑各种可能的影响因素。

二、提氮工艺技术方案的选择和比较

（一）非低温法提氮技术

非低温法主要采用膜分离和变压吸附。我国研究的膜分离技

术采用国产聚砜硅橡胶中空纤维膜，常温下经一级膜分离可使氮浓缩 5~5.5 倍，氮收率达到 63%~75%。但该工艺技术还没工业化，同时膜的可靠性和稳定还需进一步研究证明。在此研究的基础上，我国研究人员提出了用膜分离 + 低温分离联合法从天然气中提取氮气。利用膜分离天然气中的氮气，在相同氮气产量的情况下，可大幅度降低低温分离的规模及投资费用。但同样存在分离膜的技术问题。而没有真正意义上的工业化。

在国外，俄罗斯科学院西伯利亚分院研究于 2006 年研究出一种采用非低温法从天然气中分离氮气的新工艺。该工艺利用极为细小的玻璃微珠组成的膜将氮气从气流中吸附出来，但目前该工艺尚未投入规模化工业生产中，还有待进一步的研究开发。

国内现有提氮项目中膜的来源，主要来自于法液空、林德、美国 AP 公司，并于欧洲、美国本土生产，被列为机密制造项目。据调研发现，此种膜最初设计用途为氢气的初步分离，并非针对氮提取工业，存在设计目标与应用场景的部分偏移。另外，氮作为战略物资被“巴统”进行限制，若我国提氮工业所依靠的技术基础却建立于“巴统”的管辖国之下，对我国内的氮气提取工业将是非常不利的。

（二）低温提氮技术

低温法提氮工艺，国内外一般采用氮气循环制冷技术来满足低温法提氮工艺中所需的制冷温度。对于前端原料气预冷方案，根据具体原料气气质条件，一般采用膨胀制冷、外部制冷（如

PRICO 混合制冷剂制冷循环)以及膨胀制冷+外部制冷的方 式。目前在低温提氮工艺中主要有两种工艺应用较为广泛。以 BOG 为原料气,粗氮单元和精制单元组成的深冷提氮系统。系统通过一级提氮塔直接在塔顶分离出含氮 70% 以上的粗氮产品,塔底混合液通入脱氮塔分别获得粗氮、液氮及 LNG 产品。粗氮经主换热器回收冷量后通入精制单元,即催化脱氢单元、脱水单元和脱氮单元,最终得含氮 99.999% 的高浓度氮气。其中,系统主换热器所需的冷量由混合剂制冷循环提供,氮气循环制冷则为脱氮塔及提氮塔的冷凝器提供冷量。粗氮气中的氢气进行吸附脱除,使最终的氮气产品满足国标高纯氮气的要求。

三、优选的方案和经济性估算

表 2 低温法与非低温法(膜法)提氮的比较

序号	比较项目	低温法	非低温法	备注
1	能耗	电功率为 126kW,液氮消耗 60L/h	电功率约为 250kW,液氮消耗约为 36L/h	低温法通过装置循环工艺设置,冷量回收,大大降低物料及能量消耗;非低温法电耗增多主要来自于更多台压缩机的必须配置,液氮消耗主要来自于最后低温纯化装置的消耗,设计消耗量相比低温法减少。
2	氮纯度	连续、稳定、国标高纯产出	氮纯度不稳定	从现有实际应用案例分析,宁夏深燃众源、内蒙万瑞已连续稳定投产运行较长时间,均为 99.999% 的高纯氮气/液氮产出;非低温的膜法尚存在设备故障频发、氮气产品质量不受控等问题。
3	氮收率	90% 以上	88% 附近	膜在长期工业化运行中,业界公认会潜在存有结构变化,膜后渗透气组分变化的固有缺陷。设计收率数值与工业化长期运行数值间存在必然偏差。
4	自主可控	国内自主可控	膜受制于“巴统”委员会国家供给	膜属于高分子材料,由于构型原因,不同品牌膜之间不存在互换性。若唯一供应商发生变故,则整个提氮系统存在重新设计、重新安装的可能。

(一) 估算范围

遵义 LNG 储配库 BOG 提氮项目投资估算范围为工艺设备、管道、电气、给排水及消防、土建改造等工程费用以及固定资产其他费用、预备费等相关建设费用。

(二) 估算编制依据

- (1) 国家及贵州省有关工程建设和造价管理的法律、法规和方针政策。
- (2) 业主提供的有关资料及现行有关文件。
- (3) 有关设计专业提供的估算工程量。
- (4) 工程增值税按“贵州省住房和城乡建设厅(黔建建字〔2019〕121号)

(三) 估算指标

(1) 安装工程:根据业主提供的数据及中国石油化工集团公司发布的《石油化工安装工程概算指标》(2019)和《石油化工工程建设费用定额》等计算。

(2) 建筑工程费:根据业主提供的数据及相关专业提供的建(构)筑物工程量根据单位造价指标估算,单位造价指标的确定参照近期类似工程指标,并按现行材料价格水平予以调整。

(四) 主要设备及材料价格

(1) 设备价格:定型设备及非标设备均采用近期的询(报)价,或参照近期同类工程的订货价水平及业主提供的资料计价。

(2) 主要材料价格:参照近期材料信息价结合市场价确定。

(五) 其他费用

其他费用按国家或行业有关规定结合建设单位实际情况计算。

- (1) 基本预备费按 12% 计算(扣除工艺设备)。
- (2) 建设单位管理费按工程费用的 1.5% 计算。
- (3) 工程监理费根据相关文件结合市场价计取。
- (4) 可行性研究报告编制费及前期咨询费按合同计取。
- (5) 设计费参照计价格[2002]10 号文《工程勘察设计收费管理规定》根据项目情况计取。

(六) 估算投资情况

总投资估算(含增值税):5090 万元

总投资估算(不含增值税):4573 元

建设投资(不含税):4400 万元

其中:设备购置费 3038 万元,占建设投资 69.05% 主要材料费 237 万元,占建设投资的 5.39% 安装工程费 354 万元,占建设投资的 8.05% 建筑工程费 216 万元,占建设投资的 4.91% 其他建设费 555 万元,占建设投资的 12.61% 增值税:517 万元

建设期贷款利息:131 万元

流动资:42 万元

附表 3 总估算表

三、结论

本文围绕遵义 LNG 储配库 BOG 提氮项目展开。BOG 即蒸发气体,主要成分是甲烷,处理它对环保和碳排放意义重大。传统处理技术有再液化与直接利用,新兴技术包括冷能利用、氢能耦合、数字化管理等,还有针对小型化与移动式的解决方案。

目前遵义 LNG 储配库日处理天然气 50 万 Nm³/d,BOG 气量约 300Nm³/h,二期建成后 BOG 气量将达 600Nm³/h。确定提氮装置处理 BOG 气量 600Nm³/h 经济效益更佳。

选择工艺技术方案时,原料路线要遵循先进性、可靠性、合理性原则。非低温法提氮技术如膜分离和变压吸附,我国虽有研究但未工业化,国外相关工艺也有待开发,且存在膜的技术问题及氮气提取工业依赖国外技术基础的弊端。低温法提氮工艺应用广泛,国内外一般采用氮气循环制冷技术,前端原料气预冷有多种方式。基于现有提氮工厂及可研分析,项目采用低温提氮工

艺,该工艺集成低温分离、纯化,流程先进、撬装化程度高、占地面积集约。

优选方案中,BOG 经调压、催化脱氢及分子筛脱水、粗氮提取、低温纯化后进行氮气充装,回收气压缩机增压后送至原料气入口。投资估算范围涵盖工艺设备等相关建设费用,总投资估算(含增值税)5090万元,包括建设投资、建设期贷款利息和流动资金等。

参考文献

[1] 高栋华. 低温液化烃储罐 BOG 计算及处理工艺分析 [J]. 天津科技, 2025, 52(01): 41–45. DOI: 10.14099/j.cnki.tjkj.2025.01.025.

[2] 薛志勇, 刘中河. 探索 LNG 接收站 BOG 增压压缩机维修及故障分析处理 [J]. 石化技术, 2024, 31(12): 135–137.

[3] 史恬阳. 液化天然气接收站工艺分析 [J]. 石化技术, 2024, 31(11): 221–222.

[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. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14–1109/tq.2024.10.046.

[5] 孙庆国, 陈强, 邱一男, 等. 我国 LNG 装置 BOG 尾气中潜在氮资源存量及提氮经济性分析 [J]. 低温与特气, 2024, 42(05): 19–23+48.

[6] 姜英宇, 张奕, 艾绍平. LNG 接收站节能减排措施 [J]. 煤气与热力, 2024, 44(09): 9–11. DOI: 10.13608/j.cnki.1000–4416.2024.09.014.

[7] 姜亚如. 基于逆布雷顿循环的大型 LNG 储罐 BOG 处置技术研究 [D]. 安徽理工大学, 2025.

[8] 杨龙. LNG 装置中 BOG 压缩系统存在的问题分析与改进 [J]. 当代化工研究, 2021, (02): 1–3.

[9] 谢福寿, 杨迪, 陈兵, 等. 天然气提氮工艺关键技术研究进展 [J]. 天然气工业, 2025, 45(04): 155–169.

[10] 刘洋. 接收站 LNG 冷能利用与 BOG 回收利用匹配性 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(20): 3.