

# 零散气回收橇装 LNG 装置优化与实践

蒋 军 李文艺 鲁龙兴 何 伟 邢云键 (中国石油西南油气田分公司, 四川 成都 610213)

**摘要:** 国内非常规天然气进入大勘探大开发阶段, 因缺乏集输管网, 涌现出通过橇装 CNG、LNG 等方式对油气田单井零散气进行回收利用的新业态, 存在工艺路线多、设备选型差异大等问题。本文通过对零散气回收橇装 LNG 装置的统计和调查, 在工艺方案、主要耗能、“四新”技术、总图布置等现状进行调查, 对现有工艺开展优比较, 提出定型设计思路, 以提高评价井区甲烷排放管控能力, 推动试采天然气的放空回收业务质量和规模提升。

**关键词:** 零散气; 回收; 优化; 设计

**Abstract:** The domestic unconventional natural gas has entered the stage of large exploration and development. Because of the lack of gathering and transportation pipeline network, a new business mode of recovery and utilization of scattered gas from single well of oil and gas field by skid-loading CNG and LNG has emerged, there are many problems, such as multi-process, large differences in equipment selection and so on. This article, through statistical and investigatory analysis of the skid-mounted LNG facility for scattered gas recovery, investigates the current status of the process scheme, primary energy consumption, “four new” technologies, and general layout. It conducts a comparative optimization of the existing processes and proposes design concepts for improvement. The aim is to enhance the methane emission management and control capabilities in the evaluation well area and to promote the quality and scale of the flare recovery business for trial natural gas production.

**Keywords:** Scattered gas; recovery; optimization; design

## 1 零散气回收基本情况

零散气主要包括测试、试产、试采阶段无法进入集输系统的天然气; 气田开发初期, 工艺设施不完善, 尚未建设集输管网及天然气处理等地面设施, 建设外输管网不经济的边远区块或边远井所产天然气。在推动试采放空天然气回收之前, 评价井试采阶段的天然气全部通过放喷坑燃烧排放, 导致了能源的损耗, 造成了环境污染。

## 2 零散气回收工艺应用

目前, 零散气回收对象是致密油气和页岩气, 主要采用了橇装 LNG 工艺 (占 80%) 和橇装 CNG 工艺 (占为 20%); 同时, 储备了天然气就地发电和 CNG 就近回注工艺; 并进一步探索和掌握天然气吸附储存、天然气水合物固化回收技术。鉴于橇装 LNG 工艺在零散气回收业务中要素多、规模大、占比高, 本文仅选取橇装 LNG 工艺作为研究样本开展工艺比对, 并提出定型设计构想。

## 3 零散气回收工艺现状

液化工艺是 LNG 液化工业的核心技术。20 世纪 60 年代早期的 LNG 液化工厂采用不同单一工质制冷

剂分级制冷的级联式液化工艺, 由于该类工艺流程和控制系统复杂、建设造价高, 在 70 年代被新工艺替代; 随着液化技术更新, 丙烷预冷混合制冷剂液化工艺由于其流程简单能耗更低特点成为应用最为广泛的天然气液化工艺<sup>[1]</sup>。

### 3.1 零散气回收典型工艺路线

在的零散气回收工艺中, 不同的装置根据评价井气源选用了单级混合制冷工艺和丙烷预冷混合制冷工艺, 典型工艺路线如图 1 所示。

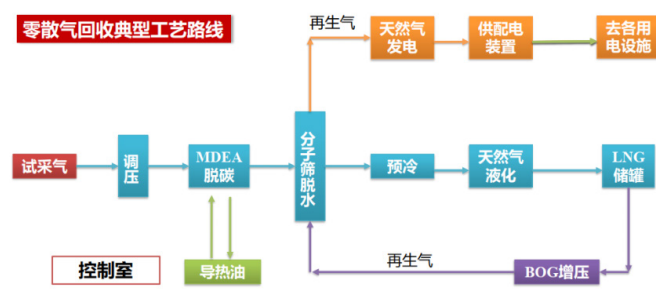


图 1 零散气回收典型工艺路线

### 3.2 在运场站工艺优缺点

零散气回收多数在运在运的场站受设备供货时

间、场站建设周期等原因的影响，均选用了市场上提前成橇的设备，对实践过程中发现的问题、提出的改进措施无法响应和落实，工艺包提供商只是核心部分以外的单元做了少量优化迭代。

### 3.2.1 工艺适应性方面

#### 3.2.1.1 优点

①在设计阶段开展了 HAZOP 分析，装置的工程设计水平和项目本质安全水平得到提高，有效把控设计意图及生产过程固有危险特性，生产操作及维修管理更加受控；应用的典型工艺较成熟，装置运行稳定，有助于在实践中进一步优选；②橇块化设计结构紧凑便于井场道路搬迁减少土地租用，普遍采取了余热技术，整体能耗水平较理想，采用的全风冷方式具有传热效率高、对市政工程依托度降低特点。

#### 3.2.1.2 缺点

①未建立标准化设计规则，给项目议价和后期维护带来困扰；②没有按行业要求开展安全仪表系统安全完整性等级评估（SIL 评估）工作；③设计深度不够，存在设计的运行压力范围窄、预处理单元分离稳压功能弱、装置安稳长满优运行能力不高、整体适应匹配性弱等问题；④未考虑致密油气场站重烃储罐总图布置适应性；⑤计量仪表选择自由度过高，未对介质与精度、安装方式、施工方法、检定维护做出明确要求，给 LNG 充装的终点控制带来不利影响；⑥制冷压缩机等主要设备选用了“小众”产品，带来跑冒滴漏、振动超限、噪声超标等问题。

### 3.2.2 安全环保性方面

#### 3.2.2.1 优点

①减少了高温气体排放。采用余热回收装置，提高了商品转化率 2%；②火灾风险有效削减。试验站高标配置固定式应急水系统，降低了安全风险。

#### 3.2.2.2 缺点

①采标不统一。缺少对专业规范的采标和应用；②电气防爆管理不规范。电气防爆安全管理、油气设施防雷防静电安全管理、等电位跨接方面的问题较多；③特种设备管理时效性不高；④工业噪声处于被动管理阶段。没有对噪声水平、频率谱特性进行评估；⑤新技术应用配套不完善。部分余热回收装置未经正规设计，高存在温阀门选型不当、调节功能差、安装位置不合理、远程控制功能未实现问题；⑥瓶装冷剂类危险化学品管理薄弱。装置制冷系统严密性不理想，钢瓶包装的零星冷剂管理不满足“专门储存 统一配送”

要求；⑦充装区设备规格不统一。LNG 充装臂厂家多型号杂，增加了管理难度和操作复杂性。

### 3.2.3 技术经济性方面

#### 3.2.3.1 优点

①产品单位能耗在合理区间。经统计分析，每吨 LNG 的电耗约 751kWh，即每液化 1Nm<sup>3</sup> 天然气需 0.5kWh 电能，在兼顾社会和环境意义前提下仍保持了经济性；②选用了主流液化工艺。多数装置选用了带预冷的混合制冷工艺，性能考核数据较理想。

#### 3.2.3.2 缺点

①液化工艺未完全优选。包含了 R22 通过乙二醇传热的预冷、R22 直接预冷+混合制冷、丙烷+混合制冷、全混合制冷等工艺，未实现定型优选。在天然气液化工艺中预冷设计对装置能耗水平有较大影响，无预冷混合制冷剂循环的比功耗分别是三级丙烷预冷混合制冷剂循环的 7.28 倍、单级丙烷预冷混合制冷剂循环的 7.23 倍；其焓损失量是三级丙烷预冷混合制冷剂循环的 10.74 倍、单级丙烷预冷混合制冷剂循环的 10.62 倍，单级丙烷预冷混合制冷剂循环更具经济性<sup>[3]</sup>；②部分装置负荷弹性调节能力差，特别是对页岩气评价井试采初期井口压力高、气量波动大、产能递减快、返排液段塞流频繁特性的适应有局限性，对试采中后期低压力低流量的工况仍然需要较高的能耗输出；③液化工艺多样性增加冷剂管理难度。场站存在 6 种以上的冷剂类危险化学品和化学品，在工艺上增加了比功耗和焓损失，给危化品管理增加了难度，带来了新的安全风险；④部分装置的 BOG 闪蒸气采取了放散直排，冷量和资源未回收，装置经济性甲烷排放控制存在负影响。

## 4 定型优化

### 4.1 设计思路

①在设计过程中，了解并掌握当前国际先进的 LNG 工艺技术，如 APCI、Shell、ConocoPhillips 等，以及不断发展的新技术，如 C3-MR、SMR 等，把行业前沿核心技术应用的橇装设备设计；②在设计过程中，充分考虑设备布局、工艺流程、安全环保等因素，进行多方案比选，力求达到投资最优、运行安全、占地最少、安装省时、拆解方便、搬迁快捷，实现环保和经济效益最大化；③在设计过程中，重点关注节能减排技术的应用，如提高换热器效率、采用高效压缩机、优化冷却系统等，降低能耗，践行好中国石油的社会责任，减少温室气体排放；④在设计过程中，充分考虑装置的安全性和环保性能，例如设置合理的安

全防护设施、采用先进的泄漏检测和报警系统、设计合理的排放处理方案等；⑤在设计过程中，关注操作人员的工作环境和操作便利性，如合理布局操作平台、设置便捷的通道和楼梯、提供足够的照明和通风设施等；⑥在设计过程中，重视各系统之间的集成和协调，确保整个装置在运行过程中的稳定性和可靠性。

## 4.2 设计建议

### 4.2.1 工艺设计方面

①适用标准的确定。开展标准、规范和规程的专项识别和诊断工作，明确项目采标范围和引用条款，提高合规管理水平；②本质安全保障。每套装置应开展危险与可操作性分析（HAZOP）和安全仪表系统安全完整性（SIL）等级评估，提高本质安全水平；③工艺与配套优选。根据业界优化模型计算法和原理优化法及现场实践，5组分冷剂配方经济性更加突出，应优先选用5组分单级丙烷+预冷混合制冷剂循环液化流程；在冷机压缩机配套方面，设计规模在10万方/天以下的装置可在活塞式与螺杆机间选择，超过10万方/天的装置应优选进口或国内大厂螺杆压缩机，以提高装置平稳运行能力<sup>[2]</sup>；④三级节流推荐。采用MRC三级节流技术，配套冷剂空冷一体化设计，节约设备投资、简化工艺流程和优化设备操作；⑤燃气压力匹配。燃气发电机采用低压供气方案，减少BOG压缩机的投入，确保液化天然气和重烃闪蒸汽（BOG）就地利用。

### 4.2.2 安全环保方面

①应参照《石油天然气工程设计防火规范》、按照《消防设施通用规范》和公司管理制度正规设计消防水系统，配置消防设施操作员规范管理；②优化冷剂补充流程、完善零星危化品安全使用管理功能，设置固定的防倾倒、防静电、防雨、防晒和消防措施；③把在AI智能识别、激光甲烷泄露检测等新技术与现场装置紧密融合，提升零散气回收生产现场的风险管控能力；④危险废物的标准化管理。工厂化定制双层钢板内衬保温层板房，具备防腐防渗、集液槽与排液管功能，规范设计电气线路、防爆设施、台账系统、标志系统，实现危废物的高密封性和零泄漏管理。

### 4.2.3 “四新技术”方面

①做好能量回收。做好装置能源管理，识别并确定用能点，提高BOG冷能和烟气热能的综合利用，推进节能降耗工作；②定型优选计量仪表设备器具。提高贸易计量、过程控制的准确性，为装置的性能考核提供科学依据，利用性能考核推动设备优选、工艺

更新、技术迭代、管理升级，提高零散气回收的技术经济水平；③推动高度集成橇装化。按照组合橇、大底橇、空间化思路，减少管道和管件、降低管道阻力损失，提高经济性；通过三维制图实现管口精准设计定位，橇间高效组合，优化总图布置，压减土地租用量；在电气电缆和控制线缆连接方式上借鉴航空插头应用；④推动烟气换热技术迭代。对燃气发电机烟气直热技术的安全性开展进一步论证，对材料选择、换热选型、火星熄灭、耗热设备、集成橇装进行统一设计，进一步提高装置经济性；⑤推动分子筛复合床层脱水脱烃技术。采用复合吸附剂脱除橇装LNG装置天然气中的水分及烃类物质，缩短成橇周期，减小装置占地，降低能耗，提高装置的技术先进性。

## 5 工艺实践总结

通过优化设计，规范了管理、沉淀了技术，随着零散气回收业务的发展，改善了区域能源结构，减少了环境污染，更好地服务了地方经济发展；融入全生命周期管理设计理念，统筹考虑橇装LNG装置的选址、设计、制造、安装、运行、维护、搬迁、复垦等环节，提高了装置本质安全水平，推动了零散气回收安全高质量发展新进程。

通过工艺实践，装置“安稳长满优”能力提升，装置年运行时间超过8000小时；采用高度集成化技术，通过定型化设计、订单化采购、工厂化预制，提高议价能力、缩短订货周期、减少设计和审图工作量、缩短了建设工期，最短场站建设仅为73天，满足了“快建快投”需求；采用“四新”技术设计了余热回收装置，提高了评价井试采气商品转化率2%；橇装LNG装置吨产品消耗仅1570Nm<sup>3</sup>/t，位于行业领先地位，经济和环保能力更加凸显。

### 参考文献：

- [1] 李超. 天然气液化工艺技术的发展路径研究[J]. 江苏科技信息, 2022, 39(09): 40-43.
- [2] 陈鹏轩, 胡成勇, 张硕, 邓全文. 橇装成套装置在零散气田的应用[J]. 石油科技论坛, 2016, 35(S1): 169-171+254.
- [3] 吕双双, 周训, 王平. 三种混合制冷剂循环液化天然气的比功耗和对比[J]. 天然气技术与经济, 2017, 11(04): 54-57+83.

### 作者简介：

蒋军(1972-), 男, 汉族, 四川内江人, 大专, 高级技师, 研究方向: 天然气液化与深冷。