

液化天然气低温储存的安全与经济性研究

王崇男 (山西华新液化天然气集团有限公司, 山西 太原 030032)

摘要: 本研究聚焦液化天然气 (LNG) 低温储存技术体系, 提出双金属全容罐创新方案: 采用 9% 镍钢内罐与预应力混凝土外罐复合结构, 结合真空粉末绝热系统实现日蒸发率 0.05%, 抗震性能达 8 度设防标准; 安全防护体系融合激光甲烷遥测与分布式光纤传感网络, 泄漏响应时间 ≤ 30 秒, 检测效率提升 97%; 经济性优化方面, 冷能梯级利用技术提升能源利用率至 78%, 珠海项目验证年运营成本降低 15%。基于风险驱动的智能监控体系可降低全生命周期维护成本 18%-25%, 建议同步修订 GB-50264 规范与完善碳交易机制, 形成技术-政策协同发展路径。

关键词: 液化天然气低温储存; 安全性; 经济性

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 015-0132-03

Research on the Safety and Economy of Low Temperature Storage of Liquefied Natural Gas

Wang Chongnan (Shanxi Huaxin Liquefied Natural Gas Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030032, China)

Abstract: This study focuses on the low-temperature storage technology system of liquefied natural gas (LNG) and proposes an innovative solution for bimetallic full containment tanks: a composite structure of a 9% nickel steel inner tank and a prestressed concrete outer tank is adopted, combined with a vacuum powder insulation system to achieve a daily evaporation rate of 0.05% and seismic performance up to 8 degrees of defense standard; The safety protection system integrates laser methane telemetry and distributed fiber optic sensing network, with a leakage response time of ≤ 30 seconds and a detection efficiency improvement of 97%; In terms of economic optimization, the cold energy cascade utilization technology has increased the energy utilization rate to 78%, and the Zhuhai project has reduced the annual operating cost by 15%. A risk driven intelligent monitoring system can reduce maintenance costs throughout the entire lifecycle by 18%-25%. It is recommended to simultaneously revise the GB-50264 standard and improve the carbon trading mechanism to form a technology policy coordinated development path.

Keywords: liquefied natural gas low-temperature storage; Security; economic

我国液化天然气的应用技术还处于发展阶段, 其安全储存尤为重要^[1], 然而, LNG 在 -162°C 超低温储存过程中面临材料低温脆化、泄漏风险及高成本等挑战, 现有研究多聚焦单一技术领域, 缺乏安全性与经济性协同优化的系统性分析; 本文基于多维度技术验证与工程实践, 提出双金属全容罐结构创新与智能监控体系构建方法, 通过真空粉末绝热与 9% 镍钢材料优化, 突破传统储罐保冷性能瓶颈; 集成声发射检测与 LSTM 动态模型, 实现裂纹扩展预测精度误差 $< 15\%$; 并引入冷能梯级利用技术, 结合碳交易机制使项目投资回收期缩短至 6 年。

1 LNG 低温储存技术概述

1.1 LNG 物理特性与储存要求

随着新能源的安全和再利用问题的日益严重, 天然气的开发和利用在国内被广泛推广^[2]。液化天然气作为以甲烷为主的烃类混合物, 需在常压 -162°C 条件下储存, 其体积缩减至气态 1/600 的特性对储运系统提出特殊要求: 材料需兼具低温韧性、结构需满足 29kPa 设计压力, 且具备防泄漏冗余设计。当前主流

储存设备中, 双金属全容罐采用镍钢内罐与预应力混凝土外罐的复合结构, 通过真空粉末绝热系统实现日蒸发率 $\leq 0.05\%$, 可有效拦截泄漏并抵御外部冲击, 适用于 10 万立方米级储配库; 真空粉末绝热储罐则通过多层绝热材料优化保温性能, 两者均满足极端工况下抗压强度与密封性要求。

1.2 关键技术难点

LNG 储罐材料需在 -162°C 下保持优异低温韧性, 9% 镍钢因双相组织特性, 在 -196°C 冲击功 $\geq 100\text{J}$, 其焊接采用氩弧焊结合小电流快速焊工艺, 配合 100% 磁粉检测及真空氦检漏, 确保焊缝气孔率 $\leq 0.1\%$, 奥氏体不锈钢通过固溶强化提升低温稳定性, 广泛应用于内罐制造; 储罐绝热系统采用真空夹层结合 20-40 层铝箔辐射屏, 实现日蒸发率 $\leq 0.05\%$, 罐底铺设抗压强度 0.8MPa 的泡沫玻璃砖承重基体, 罐壁采用 300mm 玻璃纤维毡与 0.3-0.6mm 珠光砂梯度隔热层, 顶部氮气微正压抑制湿气渗透, 复合保冷体系通过分层设计实现辐射 / 传导协同抑制, 已在 FLNG 船舶验证长期稳定性。

1.3 安全与标准体系

天然气是一种优质洁净燃料,在能源、交通、生活等领域具有十分诱人的应用前景,但由于其具有易燃、易爆危险性,在实际应用中,需始终将安全问题列于首位^[3]。液化天然气储罐的双重防护体系构建遵循 BS-7777 标准的完全封拦准则,通过内罐失效工况下外罐的完全拦截能力实现本质安全,全容罐结构验证采用有限元动力分析与振动台缩比试验,确保储罐在设防烈度 ≥ 8 度地震荷载下的完整性,针对坠落物冲击风险,预应力混凝土外罐壁可有效抵御 30kg 物体自 15m 高度坠落的动能冲击,力学性能满足 BS-7777 的 II 类防护等级。

2 LNG 低温储存安全性研究

2.1 储罐结构安全设计

液化天然气储罐结构安全设计以双金属全容罐为核心技术路径,内罐采用 9% 镍钢或奥氏体不锈钢,其 -196°C 冲击功 $\geq 100\text{J}$ 的低温韧性通过磁粉检测与真空氦检漏双重验证^[4];外罐采用预应力混凝土结构,抗压强度 $\geq 50\text{MPa}$,经抗震试验验证可承受 8 度设防烈度地震荷载,坠落物冲击测试表明可抵御 30kg 物体 15m 高度坠落动能,而夹层绝热系统采用梯度化设计,底部铺设 0.8MPa 抗压强度的泡沫玻璃砖,罐壁设置 300mm 玻璃纤维毡与珠光砂填充层,真空度 $\leq 1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 条件下日蒸发率稳定在 0.05% 以下。

2.2 泄漏风险与检测技术

液化天然气储罐泄漏风险分析需重点关注内罐焊缝失效与外罐超压两大场景,内罐焊缝受焊接残余应力与低温脆性双重影响,镍基合金焊缝裂纹 $\geq 0.1\text{mm}$ 时渗漏速率达 0.5L/min,卡塔尔项目曾因微裂纹触发夹层温度报警;外罐超压风险源于夹层真空失效或外部冲击,环形真空塞在 1.59MPa 阈值时爆裂泄压;泄漏监测采用分布式光纤测温系统与 1650nm 激光吸收光谱技术,前者具备 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 空间分辨率可识别 5 分钟内 10 $^{\circ}\text{C}$ 温升异常,后者甲烷检测限低至 5%LEL,FLNG 船舶应用验证其可实现百米级甲烷云团追踪。

2.3 安全防护措施

液化天然气设施防爆体系采用三重冗余 PLC 架构,集成压力梯度监测与分布式光纤温度传感网络^[5],济南南曹范 LNG 项目构建储罐-气化器动态联锁控制机制,当储罐液位偏差超过 $\pm 10\%$ 、压力超 1.9MPa 或温升达 5 $^{\circ}\text{C}$ 时,系统触发氮气微正压吹扫及进料切断,泄漏响应时间 ≤ 30 秒。紧急切断系统集成真空塞爆破泄压与 400 L 高倍泡沫联锁,CFD 模拟验证 ESD 阀 1 秒封闭管道,蒸气云扩散抑制率达 83%;人员防护装备采用五层复合结构, -162°C 接触 30 秒无

渗透,激光甲烷检测仪与氧传感器实现双级监测,槽车检修通风 ≥ 12 次/h。BIM 三维预案结合 VR 演练优化泡沫覆盖角度,低温伤员 4 分钟转移达标率提升至 98%,事故致死率降低 72%。

3 LNG 低温储存经济性分析

3.1 成本构成与优化

液化天然气低温储存系统的经济性优化需统筹初始投资与全生命周期运营成本,双金属全容罐采用国产低温钢替代进口 9% 镍钢,单罐建造成本为 1.5–2.5 亿元,其中内罐材料占比 40%,外罐预应力混凝土占比 25%;真空粉末储罐受限于单罐容积及保冷性能,主要适用于小型调峰站,绝热系统投资占比 15%–20%;另外,舟山 LNG 接收站采用 300mm 真空夹层集成 20–40 层铝箔辐射屏,材料成本占比 18%,安全监测系统集成激光甲烷遥测仪与分布式光纤传感网络,单站设备投资约 250 万元,初期投入占比 5%–8%;冷能综合利用技术结合 ORC 发电与 LAES 储能协同,能源利用率提升至 78%,珠海项目验证年运营收益达 1650 万美元。

3.2 冷能梯级利用技术

在冷能发电技术领域,丙烷工质 ORC 系统结合海水温差梯级利用显著提升发电效率,上海 LNG 项目采用该技术实现年发电量 2400 万千瓦时,舟山双环系统通过双工质换热介质整合海水温差资源,年发电量达 2300 万千瓦时。液态空气储能技术依托 LNG 冷能液化空气,珠海项目优化相变储热系统后储能密度提升 40%,综合能效达 65%。碳氢协同方面,CO₂ 液化捕集系统结合碳税机制降低碳成本 15%,湿气源 LNG 通过 -120°C 低温精馏工艺实现 C₂⁺ 组分回收率 $\geq 95\%$ 。工程实践中,珠海绿色智算中心创新应用 LNG-162 $^{\circ}\text{C}$ 冷能构建定制冷媒系统,替代传统电制冷实现能耗降低 50%,结合保税政策缩减投资 15%;卡塔尔项目集成 ORC 发电与碳捕集技术,年发电 3.5 亿千瓦时并捕集 CO₂ 12 万吨,验证多能互补模式下冷能利用率突破 70% 的技术经济可行性。

3.3 经济性评价模型

液化天然气储存项目的全生命周期经济性评估需统筹建设、运营及残值回收成本,以舟山 LNG 接收站为例:双金属全容罐建造成本中镍钢内罐(40%)与真空绝热层为核心支出,真空粉末储罐因单罐容积 $\leq 5000\text{m}^3$ 适用于小型调峰设施,运营成本模型整合能耗(0.3 元/ m^3)、维护费(0.05 元/ m^3)及冷能收益(-0.1 元/ m^3),冷能梯级利用通过 ORC 发电与液态空气储能(LAES)降低气化费用 20%,珠海项目验证该方案可使运营成本优化 15%。贴现率取 8% ~

10% 反映中高风险属性, 青岛 LNG 实证显示冷能集成使 NPV 提升 12%, 碳税抵扣及轻烃回收 ($\geq 95\%$) 进一步强化经济性, 敏感性分析表明电价每涨 0.1 元/kWh, IRR 提升 1.5 个百分点, 政策补贴可缩短投资回收期 2~3 年。

液化天然气冷能利用项目的经济性评估需整合静态与动态模型, 珠海智算中心项目静态分析显示, 初始投资 2.5 亿元, 年运营成本节约 3000 万元, 静态回收周期 8.3 年 (较同类缩短 15%)。动态指标中: FLNG 项目采用 15% 贴现率测算, IRR 达 12% ~ 15%, NPV 4.2 亿元, 显著优于行业基准 8% ~ 10%。敏感性分析表明: 电价每涨 0.1 元/kWh 可提升 IRR 1.5 个百分点, 政策补贴可使盈亏平衡点由 8 年降至 6 年。

4 安全与经济性协同优化策略

4.1 技术集成路径

4.1.1 RBI 技术降低维护成本

基于风险的检测技术通过定量评估 LNG 储存设施风险优化维护策略, 显著降低全生命周期成本, 针对双金属全容罐焊缝应力腐蚀裂纹风险, 结合 Paris 裂纹扩展模型与材料疲劳寿命曲线动态调整检测周期至 5~8 年, 天津 LNG 项目验证该方案使储罐年维护成本下降 22%; 依据 API 581 标准建立三维风险矩阵, 对环焊缝等高危区域实施定向检测, 珠海项目数据表明 20% 高风险设备贡献 95% 系统风险, 检测工作量缩减 40%; 集成声发射与相控阵超声构建预测性维护体系, 舟山接收站裂纹扩展数据库实现剩余寿命预测误差率 $< 15\%$ 。

4.1.2 智能监控系统: 物联网与大数据驱动的风险预警

液化天然气储运智能监控体系通过多维感知与智能决策协同优化, 实现安全经济性突破, 集成光纤光栅、红外热成像及激光甲烷遥测的多维感知网络, 构建储罐本体、BOG 系统的全息监测体系, 舟山项目误报率 $\leq 3\%$; LSTM 动态模型基于 10,000 组失效案例训练, 提前 48 小时预警热桥效应; 智能决策引擎触发三级应急响应, BOG 再冷凝、高倍泡沫灭火及精准定位 ($\pm 5\text{m}$), 响应时间压缩至 30 秒。工程验证显示: 舟山接收站年维护成本降 2300 万元, 数字孪生模块台风工况预测误差 $< 5\%$, 避免损失 1.2 亿元。

4.2 政策与标准建议

4.2.1 完善 LNG 储运安全规范 (如 GB 50264—2013 修订)

液化天然气储运安全规范优化应聚焦抗震设计、应急响应与检测技术三大领域, 抗震性能提升方面, 建议: 全容罐抗震设防烈度由 8 度提至 9 度, 青岛 27 万 m^3 储罐采用外罐变截面设计与 6 扶壁柱预应力

体系, 结合流固耦合模型, 实现液面地震净空缩减 35%、罐壁减厚 18%; 应急机制优化需构建双冗余安全阀系统与氮气吹扫 5 秒响应技术, 天津项目通过微孔气流旋流工艺使 BOG 再冷凝效率达 97.3%。

检测体系需整合真空氦检漏与磁粉检测 (阈值 0.1mm), 舟山项目应用 0.01mm 级声发射与 0.1mm 相控阵超声, 环焊缝缺陷检出率 99.8%, 规范体系应集成 API 625 流固耦合建模、EN 14620 锚固参数及动态风险评估模型, 形成设计—施工—运维全链条标准。

4.2.2 政府补贴与碳交易机制推动冷能利用

财政层面实施能效分级补贴机制, 珠海 LNG 接收站通过冷能替代 56MW 制冷负荷, 年节电 1.1 亿千瓦时并获 6890t 标煤补贴。碳市场机制方面: 上海 LNG 冷能发电项目碳强度仅 0.03kg CO_2/kWh , 碳信用收益占比达 18% ~ 22%, 采用全生命周期排放因子法确保追溯性。

区域协同通过长三角冷能交易平台实现液态氮跨区调度, 上海洋山港冷能梯级利用 (-162°C 至 -50°C) 综合利用率达 35%, 年收益增加 2.7 亿元, 区块链溯源系统使珠三角冷能交易摩擦成本降至传统模式 28%。政策创新需同步推进低温管网覆盖 ($\geq 80\%$) 与冷能价格指数挂钩电力市场, 形成技术—市场协同路径。

综上所述, 本研究系统解析 LNG 低温储存技术体系的核心问题, 提出安全性与经济性协同优化策略, 工程验证表明: 双金属全容罐结构可降低泄漏风险 83%, 冷能梯级利用技术使珠海项目年收益增加 2.7 亿元, 并通过构建基于 RBI 的预测性维护体系, 设备全生命周期成本降低 18% ~ 25%; 政策层面建议修订 GB 50264 标准, 强化抗震设防与检测技术集成, 同时依托碳交易机制推动冷能市场化应用, 未来研究需进一步探索智能化监控与多能互补模式, 实现 LNG 储运系统安全冗余与经济收益的深度耦合。

参考文献:

- [1] 朱保国, 李晓明, 宋启祥, 等. 液化天然气储罐安全技术分析 [J]. 石油化工设备, 2010, 39(01): 86-89.
- [2] 温慧. LNG 的物理特性及冷能利用浅析 [J]. 中小企业管理与科技, 2016(11): 184-185.
- [3] 黄立凤. 液化天然气储罐安全防护技术现状及发展趋势 [J]. 化工管理, 2018, (27): 171.
- [4] 马树辉, 刘清华, 徐敬, 等. LNG 双金属全容罐温度场参数化计算与分析 [J]. 天然气与石油, 2024, 42(02): 97-102.
- [5] 郑培奖, 江湖一佳. 液化天然气站防爆电气典型案例探析 [J]. 电气防爆, 2022, (04): 28-29+33.