液化天然气储运安全风险及控制研究

王　超（阆中双瑞能源有限公司，四川　阆中　637400）

摘　要：液化天然气（LNG）的储运过程往往面临多重安全风险，且其安全性直接关系到能源供应链的稳定性和公共安全。因此，本文聚焦液化天然气储运环节，分析设备设施失效、工艺操作失当、外部环境威胁及管理协同缺陷四类核心风险的形成机理与潜在后果，并提出通过本质安全强化提升设备可靠性，优化标准化操作规范工艺流程，设计环境适应性措施增强抗灾能力，构建动态闭环管理体系实现风险全程管控，最后论证其安全投入与长期效益的平衡关系，希望为 LNG 储运安全管理提供支撑，进一步推动行业安全可持续发展。

关键词：液化天然气（LNG）；储运安全；设备失效；工艺操作

中图分类号：TE88　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-5167（2025）030-0136-03

Research on Safety Risks and Control of Liquefied Natural Gas Storage and Transportation

Wang Chao (Langzhong Shuangrui Energy Co., Ltd., Langzhong Sichuan 637400, China)

Abstract: The storage and transportation process of liquefied natural gas (LNG) often faces multiple safety risks, and its safety is directly related to the stability of the energy supply chain and public safety. Therefore, this article focuses on the liquefied natural gas storage and transportation process, analyzes the formation mechanism and potential consequences of four core risks: equipment and facility failure, improper process operation, external environmental threats, and management coordination defects. It proposes to enhance equipment reliability through intrinsic safety strengthening, optimize standardized operation process flow, design environmental adaptability measures to enhance disaster resistance, construct a dynamic closed-loop management system to achieve full risk control, and finally demonstrate the balance between safety investment and long-term benefits, hoping to provide support for LNG storage and transportation safety management and further promote the safe and sustainable development of the industry.

Keywords: liquefied natural gas (LNG); Storage and transportation safety; Equipment failure; Process operation

现阶段，液化天然气凭借其高热值以及低排放的特性，已然成为全球能源结构转型进程中极为关键的组成部分。其在常压状态下需要保持 -162℃的低温液态环境，并且同时有易燃、易挥发以及相变剧烈等物理化学性质，致使其在储运过程中面临着颇为复杂的安全挑战。储运环节属于 LNG 供应链的核心节点，涉及储存容器、运输设备、工艺操作以及环境交互等多个方面的因素，任何一个环节出现失效的情况，都有可能引发泄漏、火灾或者爆炸等一系列连锁事故，造成人员伤亡、环境破坏以及重大经济损失。鉴于此，有必要从技术强化、操作优化、环境适应以及管理升级这四个维度提出相应的控制策略，以此来支撑我国清洁能源产业实现高质量发展。

1 液化天然气储运安全风险分析

1.1 设备设施失效风险

设备设施失效是 LNG 储运中最基础且危害极大的风险源。其核心风险在于 LNG 的深冷、易燃易爆特性对材料与结构的极端要求。首先，材料在超低温下可能发生“冷脆”现象，导致金属韧性下降，引发管道、阀门或储罐本体脆性断裂，造成大量 LNG 泄漏。其次，设备密封元件在温度剧烈波动下易老化失效，形成微小泄漏点，气化的天然气与空气混合形成爆炸性环境。此外，储罐绝热系统若因外部撞击或内胆变形而失效，将导致罐体外部结冰、压力骤升，甚至引发超压爆炸或真空失稳塌陷。最后，关键安全设施如泄压阀、紧急关闭系统若自身因腐蚀、堵塞或误设计而失效，将在事故发生时失去最后一道屏障，导致灾难性后果[1]。

1.2 工艺操作失当风险

工艺操作失当风险主要指在 LNG 接卸、储存、气化、外输等环节中，因人为误判、违规操作或程序缺陷引发的安全事故。其高风险性体现在 LNG 物性的快速相变与能量释放上。例如，在储罐充装作业中，若未严格控制充装速率或液位，可能因“翻滚”现象导致储罐内蒸发量瞬间剧增，压力急剧升高，严重时引发物理爆炸。在设备启停或切换过程中，若吹扫不彻底或顺序错误，可能导致设备管线内形成空气与天然气的预混气体，遇火源即爆燃。此外，对 BOG 回收系统操作不当，会造成系统超压或压缩机液击损坏，导致气体大量释放。低温 LNG 若意外接触水或其他介质，会引发急剧气化甚至剧烈相变爆炸，操作人员对工况的误判是此类风险的主要诱因。

1.3 外部环境威胁风险

外部环境威胁风险是指源自储运系统外部、无法控制或难以预测的因素所带来的挑战。其中首要风险

为极端自然灾害，如强地震有可能直接致使储罐基础发生位移、管道出现扭曲断裂，引发结构性破坏以及次生灾害；特大台风、洪水可能会淹没或冲击设备，造成电气系统短路、罐体漂浮移位甚至倾覆。其次，来自外部的意外人为事故威胁极大，如港口区域船舶误操作引发的碰撞，或者邻近设施火灾、爆炸产生的冲击波和碎片抛射，可能会击穿 LNG 储罐或管道，引发灾难性的连锁反应 [2]，另外，社会安全风险如恐怖袭击、恶意破坏等，虽发生概率较低但后果严重，其目标明确针对关键储运设施，旨在最大程度引发大规模泄漏、火灾和爆炸，给公共安全带来严峻挑战。

1.4 管理协同缺陷风险

管理协同缺陷风险属于深层次系统性风险范畴，它的产生根源在于安全管理体系存在不完善之处以及组织协同效率较为低下。该风险主要呈现出以下几个方面：其一，安全管理制度仅仅停留在表面形式，无法针对新技术、新工况所带来的潜在隐患进行动态的识别与评估，操作规程的更新较为滞后，致使一线操作缺乏有效的指导依据；其二，各个部门之间职责界限不够清晰，信息沟通也不够顺畅，在交叉作业或者应急响应的过程中，容易出现指挥混乱、配合失误或者指令冲突等情况，错失最佳的处置时机；其三，培训体系存在一定的不足之处，造成人员技能水平不足，安全意识较为薄弱，对于异常工况的辨识能力以及初期事件的处理能力有所欠缺，有可能将小故障扩大为重大事故。

2 液化天然气储运安全风险控制策略

2.1 本质安全强化，提升设备可靠性

在液化天然气的储存与运输领域当中，本质安全构成了风险防控体系的基石。其核心要点是从源头出发，借助优化设计以及材料挑选的方式，消除或者减少潜在的危害因素。此项工作起始于对深冷工况的深入认知，对于关键设备以及管道进行选材时，要优先考量其在 –162℃极端低温环境下的力学性能，广泛运用高镍合金、不锈钢等有优异低温韧性且可有效防止脆性断裂情况出现的金属材料。同时，针对密封这个较为薄弱的环节，应选用金属唇焊密封、特殊复合材料垫片等有高性能的密封元件，并且采用先进的密封结构设计，以此保证连接点在温度循环以及长期服役的过程中，始终可维持可靠的密封性，从根本上杜绝微小泄漏现象的发生。

在此之上，设备的结构设计以及制造工艺成为保障其全生命周期完整性的又一关键支撑。以大型 LNG 储罐为例，其设计要全面考量静态载荷、热应力、地震载荷以及液氢致密等诸多复杂因素，借助有限元分析等先进方式来精确进行应力与疲劳计算，对罐体结构和支撑系统加以优化。制造过程中严格落实焊接工艺评定，针对每条焊缝开展无损检测，保证不出现任何先天性缺陷。对于管道系统，着重柔性设计，合理设置膨胀节与支撑，以此吸收热胀冷缩产生的应力，防止因应力集中引发疲劳失效 [3]。另外，构建囊括关键设备的智能监测与预测性维护体系是提升可靠性的动态保障。该体系依靠高精度传感器网络，持续收集储罐的真空度、管道振动、温度场分布、阀门状态等实时运行参数。

2.2 标准化操作优化，规范工艺流程

构建标准化操作体系时核心任务是开发一套规程文件，要详尽清晰且有高度可操作性。此工作从对液化天然气储运全流程开始，涵盖接卸、储存、增压、气化、装车以及 BOG 处理等各个环节进行精细剖析。经过深入的工艺安全分析，针对每一项关键操作，像储罐预冷、槽车充装、船舶卸料等，编制专门的标准操作程序。标准操作程序内容要明确界定操作步骤、工艺控制参数范围、安全临界值以及每一步的确认事项，以此消除操作指令的模糊空间，给生产人员提供唯一且权威的执行依据，保证任何操作都在预设的安全边界内开展。

标准规程确立之后，工作重点转移至人员培训及能力认证。基于已建立的 SOP 文本，开发系统的培训课程和考核机制，保证每位操作人员熟悉规程条文，还可以深入领会每一步操作背后的工艺原理和安全逻辑。培训方式结合理论教学与模拟器实操，在高保真模拟器上模拟各种正常、异常及紧急工况，培养操作员在复杂状况下的精准判断和规范响应能力。

2.3 环境适应性设计，增强抗灾能力

要从根本上提高设施抵御外部环境威胁的能力，首要之事是开展科学的场址选择以及总体规划。在项目起始阶段，需深入推进地质勘查、气象分析以及水文调查工作，全面评定场区及其周边区域的地震活动、极端风况、暴雨强度以及洪水水位等自然条件。依据这些详尽的数据，在总体布局里充分考量安全间距，保证关键设施远离潜在的自然灾害威胁源头以及高风险区域。同时，依照历史极值数据设定防洪堤坝、排水系统的设计标准，并且对场地标高进行适应性设计，构建起一道坚实的实体防护屏障，以此有效规避或者减轻自然灾害的直接冲击 [4]。

在总体规划的指引之下，针对核心设施的结构以及系统开展专项的耐候性设计与加固工作，是构建第二道防线的关键所在。对于大型储罐、气化装置等重大设施而言，运用基于性能的抗震设计方法，同时应

用隔震或者消能减震等先进技术，以此提升其结构在地震作用下的完整性。针对露天布置的工艺设备与管道，其支撑结构的设计风压取值要充分考量极端台风工况，并且采取额外的防风锚固举措。此外，所有关键的仪表控制系统、应急电源以及紧急关断阀的动力单元都需达到相应的防水、防爆等级，并且尽量部署在受保护的遮蔽物之内，保证在恶劣气候条件下依然可靠运行。

另外，整合设置在厂区及周边的高灵敏度地震监测仪、气象站、水位传感器等，可实时感知并分析地质和气象参数的异常变化情况。当监测数据接近预设的预警阈值时，系统会自动触发警报，并且为操作人员提供关键的决策支持。例如，启动预停车程序或者确认应急电源状态，以此争取宝贵的应急处置窗口，使系统可有序、平稳地过渡到安全状态，将突发性外部事件可能造成的破坏降低到最低程度[5]。

2.4 动态管理升级，构建闭环安全体系

考虑到液化天然气储运系统有高度复杂性以及潜在风险呈现出多变性的特点，构建一个可自我完善且持续优化的动态安全管理体系显得极为关键。此体系的基础是要建立起系统化的风险监测与预警机制，依靠覆盖整个流程的传感器网络以及数据采集系统，实时跟踪设备状态参数、工艺运行指标以及环境变化数据。借助构建专业的数据分析平台，对这些数量众多的信息加以整合并进行深入挖掘，可精确识别偏离正常工况的细微迹象，评估设备性能的退化趋势，并且依据预设模型达成风险等级的自动判定与早期预警，为主动干预提供科学的依据。

在获取到精准的风险态势感知之后，若向管理要求转变为清晰的责任分配以及执行跟踪机制，搭建一个纵向可贯通、横向可协同的安全责任网络，依靠数字化管理平台让隐患排查、日常巡检、维修作业等安全流程实现标准化、线上化。每一个环节的执行主体、时间节点、质量要求都清晰地被定义并且记录留痕，形成可视化的安全履职图谱，保证风险控制措施从决策层到执行层达成无缝传导与闭环管理，提升组织的整体安全执行力[6]。

3 液化天然气储运安全风险控制的经济性分析

从全生命周期角度展开分析，液化天然气储运安全投入有成本效益优势。尽管本质安全设计、选用高性能材料以及建设智能监测系统需较高初始投资，然而这些投入可有效降低设备故障率，延长设施使用寿命，减少非计划停产损失。采用基于风险的检验以及预测性维护策略，可优化维护资源配置，把维护重点从应急检修转变为有计划的状态维护，避免过度维修与维修不足所带来的双重浪费。在运营阶段，实施标准化操作流程与数字化管理平台，虽说要投入培训成本与系统建设费用，不过可大幅降低因人因失误引发的事故风险，减少因操作不当造成的物料损失和设备损坏。

深入剖析后可以发现，安全风险控制所带来的效益，并非仅仅局限于直接损失的减少，更为关键的是在隐性价值层面的提升。完善的安全管理体系可有效降低事故发生的可能性，避免因重大事故而产生的如巨额赔偿、环境修复费用以及政府罚金等一系列潜在支出。同时，出色的安全绩效有利于提高企业的声誉，获取保险优惠费率，降低融资成本，为营造稳定的运营环境奠定基础[7]。

4 结束语

经过上述分析，对液化天然气储存与运输整个过程中的关键安全风险展开了剖析，提出了以本质安全、标准化操作、环境适应性以及动态管理作为核心内容的多维控制策略。研究显示，借助技术与管理措施的协同优化，可有效提升系统本质安全水平，达成风险的全周期管控。经济性分析证实了安全投入有长期效益以及可持续性。研究成果为液化天然气储运安全实践构建了系统化的理论框架并提供了可行性路径，对推动该行业安全、高效且绿色地发展有着关键的参考价值。

参考文献：

[1] 雷升涛 . 液化天然气储运安全技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2025,45(10):161-163.

[2] 李晓 . 液化天然气储运技术发展与应用现状分析 [J]. 当代化工研究 ,2025(07):16-18.

[3] 沈振振 , 高飞龙 , 高勇 , 等 . 液化天然气生产与储运中的汞脱除及工艺优化 [J]. 化学工程师 ,2025,39(03):78-82+104.

[4] 冉旭东 , 沈建明 . 天然气液化与储运技术简析 [J]. 中国石油和化工 ,2025(03):97-99.

[5] 杨小辉 , 薛文瑞 . 探讨液化天然气安全管理中存在的问题及对策 [J]. 中国石油和化工标准与质量 ,2023,43(14):95-97.

[6] 石瑞瑞 . 天然气的液化工艺和储运安全性 [J]. 化学工程与装备 ,2022(05):236-238.

[7] 魏洁 , 乔小伟 . 液化天然气储运安全技术和管理措施 [J]. 山东化工 ,2024,53(01):235-237.

作者简介：

王超（1991- ），男，汉族，四川宣汉人，本科，化工工程师，研究方向：液化天然气生产与安全管理。