

四色分级管控在 LPG 船舶装卸泄漏风险防控中的应用

张 凯 (山东渤海湾港港华码头有限公司, 山东 滨州 251700)

摘要: 液化石油气 (LPG) 作为易燃、易爆、有毒的危险化学品, 其海上运输与装卸作业安全风险极高。传统的风险管控模式存在识别粗放、响应滞后、措施泛化等问题, 难以满足现代港口对精细化、动态化安全管理的需求。本文引入“四色分级管控”理念, 结合 LPG 船舶装卸作业方式, 构建基于风险辨识、评估、分级与响应的闭环管理体系。采用划分红、橙、黄、蓝四级风险区域与作业环节的优化方式, 配套了差异化管控措施、应急资源配置与智能化监测方法, 实现 LPG 船舶装卸泄漏风险防控。

关键词: LPG 船舶; 装卸作业; 泄漏风险; 四色分级管控; 风险分级

中图分类号: U698.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 035-0165-04

Application of Four-Color Graded Control in the Prevention and Control of LPG Tanker Loading and Unloading Leakage Risks

Zhang Kai (Shandong Bohaiwan Port Ganghua Wharf Co., Ltd., Binzhou Shandong 251700, China)

Abstract: Liquefied petroleum gas (LPG), as a flammable, explosive, and toxic hazardous chemical, poses extremely high safety risks in its maritime transportation and loading and unloading operations. The traditional risk management model has problems such as extensive identification, delayed response, and generalized measures, which are difficult to meet the needs of modern ports for refined and dynamic safety management. This article introduces the concept of “four-color grading control” and combines it with the loading and unloading operations of LPG ships to construct a closed-loop management system based on risk identification, assessment, grading, and response. The optimization method of dividing the risk areas into four levels of red, orange, yellow, and blue and the operation process is adopted, accompanied by differentiated control measures, emergency resource allocation, and intelligent monitoring methods, to achieve the prevention and control of LPG ship loading and unloading leakage risks.

Keywords: LPG ship; Loading and unloading operations; Leakage risk; Four color grading control; risk classification

液化石油气 (LPG) 是丙烷、丁烷及其混合物的统称, 它在民用燃气、工业燃料、化工原料等领域应用广泛。在现代社会发展下清洁能源应用广泛, 能源消费结构不断优化, LPG 进口量呈现出快速增长趋势, 其在 2024 年的进口量已经达到 2800 万 t, 沿海港口 LPG 接卸能力不断扩张。然而 LPG 具备密度大于空气、爆炸极限低、易积聚、闪点低等特点, 一旦在港口装卸时发生泄漏容易引发火灾以及人员中毒事件。目前 LPG 船舶装卸码头采用“人防+物防+技防”的综合防控体系, 而其在风险识别和响应机制方面依然存在诸多不足。LPG 船舶装卸泄漏风险防控中需要严格遵守国家应急管理部门发布的《危险化学品企业安全风险隐患排查治理导则》, 按照该标准采用红、橙、黄、蓝四色风险分级管控机制, 使风险防控达到精准化、可视化要求。

1 四色分级管控理论基础与适用性分析

四色分级管控源于风险矩阵法 (RiskMatrix), 其主要是结合风险事件发生的可能性、后果严重程度分为四个等级, 使用红、橙、黄、蓝四色进行标识, 其分别代表重大风险、较大风险、一般风险和低风险。LPG 船舶装卸中采用四色分级管控措施, 通过风险分

级措施匹配动态管理的模式, 其应用到实践中具备较高的适应能力。①作业环节清晰。通过四色分级管控使 LPG 船舶装卸环节靠泊、连接、装卸断开到离泊进行标准化风险点分解; ②风险因子明确。针对 LPG 泄漏问题重点检查阀门、法兰接口、泵仓、软管等部位; ③后果可量化。通过四色分级管控模式建设完善的 LPG 泄漏分析模型, 能够模拟不同泄漏量下的影响范围与危害程度; ④管控措施可分级。四色分级管控模式从禁止作业、强化监护到常规巡检制定梯度鲜明的管理措施^[1]。

2 LPG 船舶装卸泄漏风险辨识与评估

LPG 船舶装卸作业具有介质易燃易爆、操作环节密集、设备接口复杂等特点, 一旦发生泄漏极易引发火灾、爆炸或中毒事故。系统辨识关键风险源并科学评估其危险程度, 是制定针对性防控措施、保障作业安全的前提和基础。

2.1 主要泄漏风险源识别

通过对 LPG 船舶装卸泄漏风险点的分析、识别, 在接卸操作中容易存在如下泄漏风险: ①船岸连接接口。该接口中主要包含法兰、快速接头、阀门等部件, 因为操作失误或密封失效引发 LPG 泄漏; ②输料臂间

题。由于输料臂弯头密封存在老化、超压等问题容易引起泄露。③紧急切断系统(ESD)失效,无法在泄漏初期自动切断流程;④人为操作失误。由于人员操作中未确认连接状态造成LPG泄漏。

2.2 风险评估方法

LPG船舶装卸泄漏风险使用作业条件危险性评价法,即:LEC法进行半定量评估。①L(Likelihood)。事故发生的可能性(1-10分);②E(Exposure)。人员暴露频率(0.5-10分);③C(Consequence)。事故后果严重性(1-100分);④ $D=L \times E \times C$,根据D值划分风险等级。通过分析LPG的特性与历史事故数据明确如下分级阈值:①红色($D \geq 160$)。重大风险,容易造成重大污染、经济损失或人员伤亡;②橙色($70 \leq D < 160$)。较大风险,容易造成局部火灾或者人员重伤;③黄色($20 \leq D < 70$)。一般风险,容易引发小范围的泄漏或者人员受伤;④蓝色($D < 20$)。低风险,风险影响较为轻微,处于可控状态。

3 四色分级管控体系构建

构建四色分级管控体系是实现LPG船舶装卸作业风险识别、评估与防控基础。通过将风险区域与作业环节按红、橙、黄、蓝四级划分,并配套差异化管控措施,可推动安全管理由“被动应对”向“主动预防”转变,全面提升泄漏风险的全过程、全要素、动态化管控水平。

3.1 风险区域与作业环节分级

四色分级管控在LPG船舶装卸泄漏风险分析时,需要从作业流程、空间划分等构建全流程、全区域覆盖的分级风险管理体系。在该环节对LPG船舶装卸中作业频次、设备分布、历史风险数据、物料接触程度等划分,明确风险等级匹配四色管控标准,见表1。在表1中明确划分各风险等级相应的颜色、标识、典型区域以及环节,并明确核心风险特征。

表1 LPG船舶装卸作业四色风险分级示例

风险等级	颜色	典型区域/环节	风险特征
重大风险	红色	船岸液相快速接头作业区、ESD阀周边	泄漏量大、扩散快、点火源多
较大风险	橙色	装卸输料臂区	设备密集、人员频繁操作
一般风险	黄色	码头巡检通道、控制室外围	偶发小泄漏、远离主流程
低风险	蓝色	辅助办公区、消防站	无直接接触LPG

“以低温丙烷卸船作业为例,QCDC接船密封、ERC快速脱离装置、QCDC液压连接装置等3类关键接口点位,因泄漏后果严重、管控层级为公司级,被统一划入红色风险;输料臂立柱、内臂、外臂及三维接头的环缝焊口(共14道)因存在开焊风险但可通过定期检测控制,划为橙色风险;而氮气手阀、底排阀等小口径法兰连接点共7处,因介质压力低、影响范围有限,列为黄色风险;压力管道本体焊缝(如LA81至801段共3道)经周期性检测且无历史泄漏记录,列为蓝色风险。”

3.2 分级管控措施配置

3.2.1 红色区域

红色风险区域采用双人操作、全程视频监控的措施,需要两人协同完成且全程视频记录留存30天以上。该区域中安装光谱成像设备、激光甲烷检测仪等24h监控,并保证LPG泄漏后5s以内发出警报。同时,在该区域内设置自动水幕隔离系统。该系统和ESD紧急切断装置进行通信信号联动以达到两者协同作业。而在LPG船舶装卸区域入口位置设置门禁系统、物理隔离门栏,禁止无关人员进入现场;相关作业前需要提交申请,经过安全管理部门、技术部门共同审核之后才能放行人员进入^[2]。

3.2.2 橙色区域

橙色风险区域建设间隔2h人工巡检和气体检测制度,巡检人员做好检查记录。通过了解管线连接状态、设备运营状态等,判定是否存在风险问题。同时,橙色区域需要通过设备检测器的泄漏浓度,保证检测数据真实准确且有人员签字负责。橙色区域配置2台以上可燃气体检测报警器(固定式);巡检人员随身佩戴便携式气体检测仪以及防爆对讲机。针对橙色区域软管装卸需要每使用50次进行更换,并且建设设备使用寿命管理台账,精准记录软管型号、领用日期、使

用次数、每次使用时间、更换时间以及更换人员信息。

3.2.3 黄色区域

黄色区域纳入日常巡检覆盖范围，巡检人员需将该区域纳入每日固定巡检路线，巡检时检查设备外观、阀门状态、安全标识完整性等，若发现设备异响、部件损坏、标识脱落或其他安全相关问题，需立即通过工作群或专用上报系统提交异常信息，同时在现场设置临时警示标识。区域内沿设备周边与通道间隔 10m 设置 1 台固定式可燃气体探测器，探测器的报警阈值设定为于或等于 25%LEL，探测器需接入中控 GDS 系统，保持 24h 正常运行状态，实时传输监测数据，当浓度达到阈值时，触发本地声光报警并同步推送至中控平台^[3]。

3.2.4 蓝色区域

蓝色风险区域落实常规管理措施，工作人员执行通用安全管理规范进行每周一次安全巡查，确保消防器材有效期、门窗完好性、应急照明等功能合格；每月需要进行一次通道清理、电气线路检测等基础设施维护；每季度进行安全标识检查，并将破损、褪色的标识进行更换。蓝色风险区域将其作为企业应急预案的重点内容，针对该区域中泄漏、火灾等安全隐患采取应急处理措施，并及时进行现场指挥、人员疏散、信息上报等责任分工，标注 3 条以上疏散路径及集合点位，每年组织 1 次全方位应急演练^[4]。

3.3 智能化监测与动态调整

四色分级管控在 LPG 船舶装卸泄漏风险管控中需要构建智能化检索平台，该平台需要在船舶装卸各区域内安装视频监控、气体检测设备、设备运行状态传感器等，能够及时获取设备运行参数、气体泄漏浓度、人员活动轨迹等信息，并且将信息传输到后台终端系统。该系统内设置异常参数阈值，如果系统监测发现参数超出阈值则立即发送声光报警，并将预警信息推送给管理人员、终端设备。同时，LPG 船舶装卸区域构建动态化调整机制，每季度根据隐患排查计划、现场监测数据、行业安全标准等及时更新安全风险管理措施，主要进行巡检频次、设备配置类型、人员管控计划的调整^[5]。

4 工程应用案例分析

4.1 项目概况

某沿海 LPG 专用码头设计装卸能力为 200 万 t，其设计有 2 个 5 万 t 级泊位，码头配置全封闭装卸臂、ESD 紧急切断系统、水幕隔离装置以及智能气体监测设备等设施。该码头在 2023 年引入四色分级管控体系，其在管控过程中对 LPG 装卸、船舶停靠、管线输送至离泊等全作业过程进行风险分级管控。

4.2 实施过程

4.2.1 风险地图绘制

本项目四色分级管控中通过 BIM+GIS 技术建设码头三维风险地图，在系统设计前由技术人员进入现场勘测后确定管线走向、设备布局、作业流程等信息，并结合模拟结果、历史风险记录进行三维模型中红色、橙色、黄色、蓝色四色区域标记。在上述各区域中确定分界范围，明确相应颜色区域中风险等级说明以及管控要求，并构建可视化三维风险地图。

4.2.2 标识系统建设

该码头在现场根据四色分级管控要求绘制不同颜色的区域，在绘制不同风险分级地带中涂抹颜色色带宽度为 50cm；不同颜色区域入口悬挂标示牌，标示牌中精准标记区域颜色、风险等级、核心管控原则；码头中作业人员休息区、中控室等位置设置电子屏，能够及时显示各颜色区域中风险状态，主要包含异常报警、当天作业情况等信息，以便人员了解风险动态。

4.2.3 人员培训

根据四色分级管控要求组织各级人员进行专业技能学习，再组织人员教育学习中从不同颜色区域的处置流程出发，确保各级工作人员掌握巡检标准、各区域准入要求、异常处置步骤等。同时，定期组织开展分级响应演练，模拟红色区域泄漏、橙色区域设备异常等场景，使作业人员了解自己工作职责，其具备较强的应急处置能力。应急演练完成后，就演练中存在的漏洞进行复盘讲解，确保每位工作人员能够了解不同颜色紧急应对方法和处置措施。

4.2.4 系统集成

本项目在码头中安装有智能气体监测系统、视频监控、ESD 紧急切断系统以及消防系统接入统一管理平台，并对各系统进行单独和整体运维测试，以保证信息达到互联互通要求。该平台中能够显示气体监测数据、各区域视频画面、ESD 系统运行状态、消防设备状况等，如果某区域系统监测发现存在气体浓度超出标准，则由平台联动触发视频监控聚焦、ESD 系统报警等，并将信息传输到消防系统以构建监测、预警、联动的一体化管理流程。

4.3 应用成效

该码头应用四色分级管控系统后，能够有效提升风险识别精度和准确性，使原模糊界定的高风险区细化为 12 个红色点位和 8 个橙色区，从而使风险管控精度提升，应急效率提升明显。在 2024 年模拟演练中，红色区域从报警出发到 ESD 系统动作时间从 18s 缩短到 6s；安全事故发生率下降，该系统运行 1 年内码头 LPG 气体泄漏事件发生率降低 62%，未出现 2 级及以

表 2 四色分级管控实施前后关键指标对比

指标	实施前	实施后	改善幅度
泄漏事件数 (次 / 年)	13	5	↓ 61.5%
平均应急响应时间 (s)	22	9	↓ 59.1%
高风险作业审批效率 (h)	4.5	2.0	↑ 55.6%
员工风险认知合格率	78%	96%	↑ 18 个百分点

上的安全事故；管理成本优化，通过该系统能够使资源集中投向高风险环节，巡检人力投入减少 20%、设备维护成本降低 15%，从而使安全管控效益全面提升。

5 结语

四色分级管控应用到 LPG 船舶装卸泄漏风险防控中，能够实现风险精准识别和管控，进而解决以往 LPG 船舶装卸中存在的泄漏风险问题，确保 LPG 船舶装卸过程有序完成，还能提高应急处置水平和资源配置效果，以实现经济效益、社会效益全面提高。

参考文献：

[1] 李强强. 基于四色图的风电场安全风险分级管控模式探索 [J]. 风能, 2020,(08):60-64.

[2] 张国良. 建设安全风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制的策略 [J]. 化工管理, 2021,(28):115-116.

[3] 熊茂平. 风险分级管控和隐患排查治理双重预防机制与信息化的融合 [J]. 质量与认证, 2022,(06):70-72.

[4] 刘宇. 基于信息化的安全风险分级常态化管控 [J]. 电力安全技术, 2023,25(02):10-12+16.

[5] 刘兴. 关于石油企业构建风险分级管控体系的研究 [J]. 化工安全与环境, 2023,36(09):69-72.

作者简介：

张凯 (1990-)，男，汉族，山东潍坊人，本科，研究方向：危险化学品装卸作业安全管理。