

液体化工品码头流体装卸输料臂的安全设计与风险防控研究

刘斯强 (青岛海湾液体化工港务有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 液体化工品的运输和装卸是现代化工产业中的重要环节, 而液体化工品码头作为液体化工品运输的重要节点, 其流体装卸输料臂的安全设计与风险防控直接关系到整个产业链的安全性与稳定性。随着化工产品尤其是危险品的产量与运输规模不断扩大, 液体化工品码头的流体装卸作业频率和复杂性也日益增加, 确保液体化工品装卸过程的安全性、可靠性和高效性成为行业面临的重大难题。本文旨在结合液体化工品码头流体装卸输料臂的具体设计与应用背景, 探讨其安全设计与风险防控的技术策略, 期望为相关企业和工程设计提供有力的理论支持与技术参考, 进一步推动液体化工品码头安全管理的现代化与科学化。

关键词: 液体化工品; 流体装卸输料臂; 安全设计; 风险

中图分类号: U653.95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 017-0165-04

Research on Safety Design and Risk Prevention of Fluid Loading and Unloading Arm in Liquid Chemical Terminal

Liu Siqiang (Qingdao Bay Liquid Chemical Port Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: The transportation and loading/unloading of liquid chemicals are important links in the modern chemical industry, and as an important node in the transportation of liquid chemicals, the safety design and risk prevention of the fluid loading/unloading arm of the liquid chemical terminal directly affect the safety and stability of the entire industry chain. With the continuous expansion of the production and transportation scale of chemical products, especially dangerous goods, the frequency and complexity of fluid loading and unloading operations at liquid chemical terminals are also increasing. Ensuring the safety, reliability, and efficiency of the liquid chemical loading and unloading process has become a major challenge facing the industry. This article aims to explore the technical strategies for safety design and risk prevention based on the specific design and application background of the fluid loading and unloading arm of the liquid chemical terminal. It is expected to provide strong theoretical support and technical reference for related enterprises and engineering design, and further promote the modernization and scientific management of liquid chemical terminal safety.

Keywords: liquid chemicals; Fluid loading and unloading arm; Safety design; risk

流体装卸输料臂主要作用是将化学品从船舶或其他运输工具输送到码头储存设施或反向输送至运输工具。由于液体化工品的特殊性质, 如易燃、易爆、腐蚀性等特点, 一旦在装卸过程中发生设备故障或操作失误, 可能会导致严重的环境污染、财产损失, 甚至人员伤亡, 输料臂的安全设计和风险防控至关重要。

针对传统码头流体装卸输料臂的安全防控措施往往侧重于应急响应, 在预防性设计、技术保障和系统集成方面存在显著的不足, 随着液体化工品种类的增多和流体装卸作业环境的复杂化, 如何将先进的自动化控制技术、实时监测系统与传统设施有效结合, 成为提升安全性、预防事故发生的关键。

1 液体化工品码头流体装卸输料臂的结构与功能

液体化工品码头流体装卸输料臂是港口和码头之间进行装卸作业的重要设施, 其作用是通过输料臂将液化品从船舶输送至岸上储罐, 或者从岸上储罐输送

至船舶, 流体装卸输料臂的结构与功能直接关系到液体化工品的装卸效率与安全性, 其设计必须兼顾安全性、可靠性和高效性。码头流体装卸输料臂的实物如图 1 所示。



图 1 码头流体装卸输料臂的实物

液体化工品码头流体装卸输料臂的结构通常由多个主要部分组成,包括输料管道、支撑结构、连接系统、阀门系统、控制系统等,各个部分共同作用,保证了装卸作业的顺利进行。各个结构的特点如下:

①输料管道:输料管道是输料臂的核心部分,主要用于液体化工品的流动。管道必须选择耐腐蚀、耐高压的材质,如不锈钢或合金钢,以应对液体化工品的腐蚀性和运输过程中的高压。输料臂通过支撑结构与码头或船舶保持连接。

②支撑结构:支撑结构需要具备较强的抗风力、抗震性,并能够在船舶摇晃或恶劣气候条件下保持稳定。支撑结构的设计一般采用铝合金或钢铁材料,确保强度和耐久性。

③连接系统:连接系统负责将输料臂与船舶或岸上设施进行对接,常见的连接方式是通过对接装置如浮动接头、快速接头等实现。

④阀门与控制系统:阀门系统用于控制液体化工品的流量与压力,防止装卸过程中出现异常压力或流量问题。阀门通常包括主控阀、紧急关断阀和安全阀等。



图2 码头流体装卸输料臂作业状态

液体化工品码头流体装卸输料臂不仅要满足基本的输送功能,还要具备一系列的辅助功能,流体装卸输料臂的设计需要满足高流量、高压力的输送需求,确保液体化工品能够快速、高效地装卸,现代流体装卸输料臂一般都配备自动化控制系统,可以实现液体流量的精确调控,并通过液体流速、压力传感器等实时监测数据,保障流体运输的稳定性,且液体化工品通常具有易燃、易爆、腐蚀性强等特点,流体装卸输

料臂在设计时必须严格考虑到安全性。为了防止泄漏或爆炸等事故的发生,输料臂通常配备了多个安全阀门、紧急关断系统、泄压装置等,输料臂还须具备防火、防爆功能,避免因操作不当或设备故障引发火灾或爆炸。与此同时,液体化工品码头的流体装卸输料臂应具备较强的适应性,能够适应不同类型的船舶和不同装卸作业的需求,输料臂的长度、角度等都应具有一定的调节能力,能够根据船舶的大小与位置进行灵活调整,以确保每次装卸作业的顺利进行。码头流体装卸输料臂作业状态如图2所示。

2 液体化工品码头流体装卸输料臂的安全设计方法

2.1 结构安全设计

液体化工品码头流体装卸输料臂的结构安全设计直接影响设备在实际操作过程中的稳定性和可靠性,其核心在于确保输料臂在承受运输过程中液体压力、温度变化及外部环境等多种因素作用下,能够维持结构完整性,避免因结构失效导致的安全事故。液体化工品种类繁多,包括易燃、易爆、腐蚀性强等特性,因此输料臂的结构材料需具备出色的耐腐蚀性和强度,常见的材料包括不锈钢合金、耐腐蚀合金钢和碳钢等,以适应不同介质的化学特性及使用环境。

结构设计还需特别关注高压及温度环境下的应力集中问题。应力集中可能导致局部材料疲劳、管道破裂或设备变形,因此设计过程中需避免尖锐弯曲和结构薄弱点。在承压部位,可采用加强措施,如加强肋、加厚管壁、增加支撑结构等,以优化应力分布,降低局部负荷。同时,在邻接部位增设适当的支撑装置,以减少流体流动冲击引发的振动及结构变形,确保输料臂在长期运行过程中保持稳定性和耐久性。此外,输料臂的旋转及伸缩关节部位也应具备合理的受力缓冲设计,以降低频繁操作对结构造成的疲劳损伤。

2.2 泄漏防蚀设计

液体化工品装卸过程中,泄漏可能带来严重的环境污染、火灾及爆炸风险,因此输料臂的泄漏防蚀设计尤为关键。主要防护措施包括密封设计、泄漏检测系统及应急响应机制,以降低泄漏风险并确保装卸作业安全。输料臂各管道接头、阀门连接部位及船岸对接端口均需采用高性能密封结构,所选密封材料须具备耐高温、耐腐蚀及耐压特性。常用密封材料包括PTFE(聚四氟乙烯)、耐腐蚀橡胶密封圈等,同时关键部位可采用双重密封结构,并在易泄漏点配置备用密封系统,以防止单一密封失效导致的泄漏风险。

此外,现代液体化工品码头的流体装卸输料臂已广泛配备在线泄漏检测传感器,可实时监测管道压力、流速、温度等参数。当系统检测到异常情况时,泄漏

检测系统会立即触发报警，并将数据传输至控制中心，联动启动应急响应机制。这类传感器能够精准检测微小泄漏，确保在事故扩展前采取措施以减少损失。输料臂还应配置自动切断阀，与泄漏检测系统联动，一旦监测到泄漏或异常压力波动，自动阀门将迅速关闭，阻断液体流动。此外，装卸作业需建立详细的应急预案，包括泄漏处理、污染控制及人员疏散等措施，以提升事故应对能力，确保作业安全。

2.3 紧急切断系统设计

紧急切断系统是液体化工品码头流体装卸输料臂安全设计的关键部分，在突发事故情况下能够迅速切断液体流动，防止事故进一步扩大。紧急切断系统的设计需根据输送液体的物理化学特性进行针对性优化，如对于易燃易爆介质，应选用防爆型、耐腐蚀型阀门，确保其在高压、低温及腐蚀环境下仍能可靠运行。

输料臂的紧急切断系统通常包括紧急切断阀（Emergency Shut-off Valve, ESV）、过压保护阀（Pressure Relief Valve, PRV）及紧急脱离装置（Emergency Release System, ERS）等。ESV 通常安装在输料臂的主输送管道上，一旦检测到泄漏、火灾或异常压力波动，ESV 能迅速切断流体输送，防止事故进一步扩展。设计时，ESV 应具备快速响应能力，并支持自动触发与手动控制相结合的模式，确保在自动系统发生故障时，仍可由操作人员手动关闭。此外，阀门的结构需保证在极端条件下（如高温、高压及低温环境）仍可正常运作，避免因环境因素导致的功能失效。

过压保护阀（PRV）用于控制管道内压力波动，防止因压力过高导致设备损坏或介质泄漏。当管道压力超出设定安全值时，PRV 会自动开启释放过高压力，并在压力恢复正常后自动复位。PRV 通常布置在管道关键部位，并与系统控制逻辑相结合，以确保压力调节的稳定性。紧急脱离装置（ERS）则用于防止输料臂因突发外力（如船舶意外移动、剧烈晃动等）导致管道断裂或泄漏。ERS 的设计应确保在紧急情况下能够快速脱离，并防止液体溢出。通常，ERS 由快速连接/断开机构组成，并配备自封阀，以确保分离后管道两端自动封闭，避免液体泄漏。部分先进的 ERS 系统还配备自动复位功能，以便在脱离后可快速恢复连接，提高作业连续性。

3 液体化工品码头流体装卸输料臂的风险防控设计

3.1 基于故障模式影响分析的全流程风险管理

在液体化工品码头流体装卸输料臂的风险防控中，FMEA 方法可以有效地帮助识别操作过程中可能出现的各类风险，进而设计针对性地防控措施。FMEA 分析的基本步骤是对液体装卸输料臂的各个环

节进行详细的故障模式识别，所构建的环节可能包括流体输送、阀门操作、管道连接、紧急切断等，基于对相关环节逐一进行评估，可以识别出每个环节可能出现的故障模式，流量传感器可能因传感器故障失效，导致流量数据失真；阀门密封可能因老化或腐蚀导致泄漏。每一个潜在的故障模式都会被记录，并分析其可能带来的后果。FMEA 分析会评估每个故障模式的严重性、发生概率以及发现的难度，并根据这些因素计算出风险优先级数（RPN）。RPN 是 FMEA 分析中重要的量化指标，用于确定哪些故障模式需要优先处理。对于液体化工品码头的流体装卸输料臂，RPN 值较高的故障模式，如阀门失效或管道破裂等，必须得到特别重视，并采取有效的预防措施，根据 FMEA 分析结果，设计团队可以制定一整套全流程的风险管理计划，包括设备的定期检查与维护、冗余设计、自动报警机制等，以确保在潜在故障发生时能够及时发现并采取措施，防止事故的蔓延和扩展。

3.2 构建自动化控制与监测系统

液体化工品码头流体装卸输料臂的安全性和高效性与自动化控制与监测系统密切相关，在监测与管理阶段可以构建完整的自动化控制与监测系统，可以实时获取装卸过程中的关键参数，预警潜在的风险，并做出应对，从而大大提高操作的安全性和可靠性。具体而言，可以在输料臂上安装各类传感器（如温度、压力、流量、液位等传感器），系统可以实时监测液体化工品的流动状态，确保在液体流动、温度控制、压力变化等方面处于安全区间。

一方面，自动化监控系统能够有效识别异常情况，并及时发出警报，基于与数据采集和分析系统的联动，当检测到某些参数超出设定的安全阈值时，系统会自动生成报警信号，提醒操作人员和管理人员采取相应的措施。

另一方面，自动化控制系统还可以通过远程监控进行集中管理，提升整体操作效率，在搭建的远程操作平台中，管理人员可以实时查看液体装卸过程的各项数据，实施远程干预，并调整系统运行，自动化系统的构建不仅能够提升操作的精准度，还能减少人为失误对安全的影响。

3.3 优化应急响应与事故处置机制

应急响应机制的优化需要确保在出现紧急情况时，所有相关人员都能迅速采取行动。在设计时必须明确每个岗位的职责与任务，并定期进行应急演练，确保每个操作人员都能熟练掌握应急操作流程，在发生液体泄漏或管道破裂时，人员应按照预设流程进行泄漏控制、设备停机、火灾扑救等操作，防止事故的

进一步扩大。优化事故处置机制需要确保所有设备设施在紧急情况下能够有效投入使用。关键设备如紧急切断阀、自动喷淋系统、消防设施等都必须能够在最短的时间内启动,实际的设计要求在设计时充分考虑应急情况下设备的响应速度和可靠性,紧急切断阀必须能够迅速切断输送管道,防止泄漏的液体蔓延;消防系统应当具备多重应急预案,确保即使在最极端情况下也能够进行有效灭火。

此外,液体化工品码头通常面临较高的环境风险,与消防、环保、医疗等部门的协作至关重要,实际设计时码头应建立应急信息共享平台,并与周边社区和应急救援部门保持紧密联系,在出现重大事故时,可以迅速调动外部资源,确保及时救援和事故控制。

4 结语

本文从液体化工品码头流体装卸输料臂的安全设计与风险防控角度出发,深入探讨了如何通过技术手段与管理措施,提升装卸过程的安全性及效率。

在安全设计阶段,本次构建的码头流体装卸输料臂通过结构安全设计、泄漏防控设计和阀门与紧急切断设计等方面的阐述,强调了基础设施的稳固性和应急响应的重要性。

在码头流体装卸输料臂运行阶段,为了提升风险管控水平,本文提出了基于故障模式影响分析(FMEA)

的方法,在全流程中进行系统性风险管理,确保各环节的潜在风险得到有效预判与控制。

此外,自动化控制与监测系统的构建为实时监控和动态调整提供了技术保障,同时优化的应急响应机制为突发事件提供了迅速有效的应对方案。

总体而言,本研究为液体化工品码头输料臂的风险防控提供了一套系统的设计框架,不仅促进了理论研究的深入发展,也为实际工程应用中的安全防护措施提供了可行的技术支持与参考依据。

参考文献:

- [1] 崔红棉,兰马静.油气化工码头重点区域安全风险管控技术研究[J].珠江水运,2024,(21):116-118.
- [2] 陶渊懿.基于神经网络技术的港口码头消防安全风险监测系统设计[J].今日消防,2024,9(09):40-42.
- [3] 罗剑波,戚凯旋,邱柯琦.舟山鼠浪湖码头安全生产风险辨识与评估[J].中国船检,2024,(05):67-69.
- [4] 李涛.油气化工码头原油装卸安全风险分析与防范对策[J].石化技术,2024,31(04):302-303+263.
- [5] 赵震,陈琳,王绪亭,等.自动化集装箱码头安全风险管控技术分析[J].劳动保护,2023,(08):87-89.
- [6] 秦庭荣,胡逸凡,闫冠祥,等.改进的模糊DEMA-TEL模型在码头群协同应急风险因素分析中应用[J].安全与环境学报,2023,23(05):1442-1449.

