

甲醇双燃料集装箱船“车-船”撬装加注安全解析与分级管控

——基于上海港首艘16000TEU集装箱船甲醇燃料加注作业实践研究

吕亮亮

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘要: 国际海事组织 (IMO) 2023 年修订的《国际航运温室气体减排战略》明确要求, 全球航运业需在 2030 年实现碳排放强度较 2008 年下降 40%, 2050 年前后达成碳中和目标。船用燃料作为航运碳排放的主要来源, 其低碳化转型成为关键突破口。甲醇燃料因具有零硫排放 (硫含量 $\leq 0.5\text{mg/kg}$)、低碳足迹 (全生命周期碳排放较传统燃油降低 25%~40%)、常温常压储存 (无需高压或深冷设备) 等优势, 被国际航运界认定为最具规模化应用潜力的船用替代燃料之一。上海港作为全球领先的国际航运中心, 其首艘 16000TEU 甲醇双燃料集装箱船的燃料加注作业具有重要的示范意义, 标志我国甲醇燃料补给模式从传统“固定码头—管线—加注船”刚性模式, 向“槽车—移动撬—船舶”柔性模式转型。本文以上海港该船首次甲醇燃料“车对船”撬装加注作业为研究对象, 结合其专项安全风险评估报告, 系统辨识了加注作业过程中存在的危险有害因素, 如火灾、爆炸、中毒窒息、泄漏、环境污染等。文章重点阐述了基于风险分区的分级管控策略, 将作业区域划分为危险区、限制区和警戒区, 并针对各区域提出了具体的安全技术与安全管理措施。通过对平面布置、工艺设施、安全管理等方面的定性定量评估, 论证了该加注作业方案的风险可控性。最后, 本文总结了此次首船加注作业的成功经验, 旨在为后续同类甲醇燃料加注作业的安全标准化和规范化管理提供技术参考和实践借鉴。

关键词: 甲醇燃料; 船舶加注; 车对船撬装; 安全风险评估; 分级管控; 风险辨识

1 引言

航运业的绿色低碳转型是应对全球气候变化的关键环节。甲醇因其储运相对便利、技术成熟度较高以及潜在的绿色合成路径, 被视为实现船舶减排目标的重要过渡性及中长期替代燃料之一。全球首艘及后续系列大型甲醇双燃料集装箱船的投运, 标志着甲醇燃料在远洋航运领域的应用进入实质性阶段。然而, 甲醇具有易燃、易爆、有毒等危险特性, 其加注作业过程, 特别是在港口环境下进行的首次、大规模“车对船”(Truck-to-Ship, TTS)撬装加注, 面临着复杂的安全挑战。

上海港此次为 16000TEU 超大型集装箱船进行的甲醇燃料加注作业, 采用撬装式设备与槽罐车联合作业模式, 属于国内首创。这种模式灵活性强, 适用于码头初期未建设固定加注设施的阶段, 但同时也带来了移动设备多、接口复杂、现场管控难度大等新的安全风险。因此, 开展针对性的安全风险评估, 并建立科学的分级管控体系, 是确保作业安全、推动甲醇燃料加注技术标准化发展的迫切需求。

本文以上海港 16000TEU 甲醇双燃料集装箱船“车-船”撬装加注作业为实证样本, 系统解析加注作业全流

程中的关键风险点, 深入探讨基于区域风险等级的安全管控措施, 以期为同类作业的安全实践提供理论指导和操作范本。

2 项目概况与加注工艺

2.1 项目基本概况

本次加注作业位于上海中远海运重工有限公司码头 1# 泊位。受注船为扬州重工建造的 16000TEU 甲醇双燃料集装箱船, 需加注甲醇燃料 900 吨 (分 40 车次运输), 并预先使用 38 吨液氮对船舶燃料舱及相关管路进行惰化处理。作业涉及三方责任主体: 燃料加注单位 (上海中燃)、受注船制造单位 (扬州重工) 和港口经营单位 (上海重工), 各方职责在方案中予以明确界定。

1. 船舶参数: 船长 366m, 船宽 51m, 型深 30.2m, 甲醇储存舱 3 个 (P/C/S 舱, 单舱容积分别为 2125.6m³、6703.9m³、2125.6m³), 加注接口位于右舷 A 甲板;

2. 加注设备: 3 辆 22 吨级甲醇槽车、1 套移动式撬装设备 (含 3 台卸车泵, 总流量 180m³/h)、DN150/DN100 不锈钢软管 (CCS 认证, 爆破压力 $\geq 6.4\text{MPa}$);

3. 作业流程: 5 月 6 日槽车上岛→5 月 7 日液氮惰化 (氧含量 $\leq 8\%$)→5 月 9 日-10 日加注作业 (分三舱同

步加注,每舱300吨)→5月10日氮气扫线;

2.2 加注工艺流程

加注作业主要分为两大步骤:

1. 惰化工艺:使用液氮槽罐车提供气源,通过汽化器产生氮气,对船舶的甲醇储存舱、日用舱、泄放舱、水吹扫舱及相关管路进行空气置换和氮封,以消除形成爆炸性环境的可能性。

2. 甲醇加注工艺:采用三台甲醇槽罐车同时连接至撬装加注装置,通过DN150和DN100两条液相软管及一条DN100气相软管,将甲醇燃料输送至受注船的三个燃料舱。工艺流程包括加注前检查与准备、管线连接与气密测试、加注作业实施、加注后扫线与管线拆除等环节。作业过程配备了紧急切断系统(ESD)、气体泄漏检测报警系统、防静电接地系统和完善的通信联络系统。

3 危险有害因素辨识与分析

国内外学者已针对船用替代燃料加注安全开展部分研究:例如LNG(液化天然气)加注领域,但LNG与甲醇的危险属性差异显著(LNG主要风险为低温冻伤与蒸气云爆炸,甲醇兼具易燃、有毒及水溶性),现有LNG研究成果无法直接套用。在甲醇加注领域,现有研究多聚焦固定码头场景,未涉及“车-船”撬装模式。综上,针对甲醇“车-船”撬装加注全过程的风险辨识、动态量化及分级管控研究仍属空白,亟须构建适配该模式的安全评估框架。基于GB/T 13861-2022和GB6441-1986等标准,对加注作业全过程进行危险有害因素辨识,主要风险集中于以下几个方面:

3.1 物质危险性

• 甲醇(UN 1230):属于重点监管和特别管控的危险化学品。其主要危险特性包括:

◦ 易燃易爆性:闪点低(11℃),爆炸范围宽(5.5%-44%),蒸气密度大于空气,易在低洼处积聚,遇明火、高热或静电火花极易引发火灾爆炸。

◦ 毒性:可通过吸入、食入、皮肤接触途径中毒,对中枢神经系统和视神经有严重损害。

◦ 易挥发、易流淌、易产生静电。

• 液氮(UN 1977):作为加压气体和深冷液体(-196℃),主要风险是泄漏导致作业空间缺氧窒息,以及接触人体造成低温冻伤。

3.2 工艺设备危险性

• 泄漏风险:加注软管、法兰、阀门、泵等连接处因质量缺陷、腐蚀、疲劳、操作不当或船舶晃动等原因可能发生泄漏,是事故的主要初始原因。

• 火灾爆炸风险:甲醇泄漏后,若遇点火源(如明

火、电气火花、静电放电、雷电、高温表面等),极易引发火灾爆炸。设备设施防爆等级不足或失效是重大隐患。

• 设备故障风险:撬装设备压力仪表、安全阀、气体报警器、ESD系统联锁等安全附件失效,可能导致工况失控。

• 机械伤害与物体打击:软管吊装、连接拆卸过程中存在挤压、碰撞风险。

3.3 作业环境与自然条件危险性

• 码头环境:1#泊位虽为内档码头,水域受控,但其原有电气设备多数为非防爆型,需在加注期间实施大面积断电,给应急照明和监控带来挑战。

• 自然条件:大风(>6级)、大浪、雷电、大雾等恶劣天气会影响船舶系泊稳定性,增大软管应力,影响能见度,必须停止作业。潮汐变化需随时调整缆绳和关注软管状态。

3.4 管理行为危险性

• 人员失误:操作人员未经充分培训、违章作业、沟通不畅、检查不到位等是导致事故的重要因素。

• 应急缺陷:应急预案不完善、演练不到位、应急物资缺失或失效,会在事故发生时导致响应延误,后果扩大。

4 安全风险评估与重大事故隐患判定

4.1 定性定量评估

评估报告采用了安全检查表法、作业条件危险性评价法(LEC)和危险度评价法进行综合评估。

• 安全检查表法:对码头平面布置、加注工艺设施、安全管理等单元对照近百项法规标准进行检查,结果均符合要求。

• 作业条件危险性评价(LEC):评定“加注作业”本身为“比较危险”等级(D=42),需重点关注;而检查、惰化、监护等辅助作业为“稍有危险”等级,可接受。

• 危险度评价:受注船的甲醇燃料舱被评定为“高度危险”单元。

4.2 重大事故隐患判定

依据《危险货物港口作业重大事故隐患判定标准》,对本项目进行了逐条排查。结果表明,本项目在许可范围、设备设施、安全距离、安全管理等方面均不构成重大事故隐患。特别是,作业不涉及固定的危险货物储罐、仓库,且临时使用的槽罐车和软管等设备均经检测合格,有效规避了多项重大隐患点。

5 分级管控策略与安全对策措施

为实现风险的精细化管理,本项目核心举措是实施

了基于风险分区的分级管控策略。

5.1 风险区域划分

以加注撬外围和槽车卸料口为中心，划分三级管控区域：

- 危险区（核心区）：以加注撬外围向外拓展 3 米，或槽车卸料口半径 1.5 米的球形空间。此区域严禁非作业人员进入，禁止一切与加注无关的作业。

- 限制区（严格控制区）：以加注撬外围向外拓展 30 米的区域。此区域内停止所有产生静电和火花的作业（如动火、打磨），切断非防爆设备电源。

- 警戒区（监控区）：以加注撬外围向外拓展 60 米的区域。此区域进行交通管制，限制无关人员和车辆进入，作为应急响应和人员待命区。

5.2 安全技术对策措施

• 防火防爆技术：

- 严格控制火源：加注期间，危险区和限制区内严禁烟火、禁用非防爆电器。对码头非防爆电源进行区域性断电。

- 防静电与防雷：槽车、撬装设备、管道、软管均需有效静电接地；作业人员穿戴防静电服，进入区域前释放人体静电。码头防雷设施经检测合格。

- 气体监测：在撬装设备内部、加注站附近设置固定式甲醇气体探测报警器，作业人员配备便携式检测仪，实时监测泄漏情况。

• 防泄漏与应急控制：

- 设备可靠性：使用的软管、干式拉断阀、绝缘法兰等均需取得船级社认证，并定期检验。

- 紧急切断：ESD 系统实现船岸联动，一旦发生泄漏、火灾或气体浓度超高，可远程一键停泵并关闭紧急切断阀。槽车紧急切断阀响应时间 ≤ 5 秒，撬装设备 ≤ 3 秒，船舶 ≤ 10 秒，形成三级切断保护。

- 泄漏收集：在关键法兰连接处下方设置集液盘，配备吸附棉、堵漏工具等应急物资。

• 个体防护与消防：

- 作业人员配备防静电服、防毒面具、防护眼镜、耐甲醇手套等个人防护装备。

- 现场按标准配置抗溶性泡沫灭火器、干粉灭火器、消防水带等，并确保上海重工专职消防队及消防车处于应急待命状态。危险区配置 25L 抗醇泡沫灭火器（覆盖半径 15m）+ 水幕喷淋（流量 $\geq 15\text{L/s}$ ），限制区配置 6L 抗醇泡沫灭火器。

5.3 安全管理对策措施

- 明确责任与协议：签订三方安全协议，清晰界定上海重工（属地管理）、上海中燃（加注作业）、扬州重

工（船舶管理）的安全职责。

- 作业许可与交底：实施作业前安全检查确认制度，使用标准检查表，各方共同确认条件具备后方可作业。

- 人员培训与资质：所有参与人员必须经过专项安全培训和应急演练，关键岗位人员（如现场指挥、安全员、操作工）需持证上岗。

- 应急准备与响应：制定专项应急预案，明确应急撤离路线，并组织三方参与的联合应急演练，确保信息畅通、响应迅速。

6 结论

上海港首艘 16000TEU 集装箱船甲醇燃料“车-船”撬装加注作业的成功实施，为大型绿色船舶的燃料补给积累了宝贵经验。本次作业的安全保障得益于以下几个关键因素：

1. 前瞻性的风险评估：在作业前开展了系统、深入的危险辨识与风险评估，为制定管控措施提供了科学依据，构建了甲醇“车-船”撬装加注全过程安全评估框架。

2. 精细化的分级管控：创新性地应用风险分区管理理念，将作业现场划分为危险区、限制区和警戒区，并针对不同区域采取差异化的、严格的控制措施，实现了风险的有效隔离和控制。

3. 全方位的技术与管理措施：从防火防爆、防泄漏、应急切断到个体防护和消防安全，构建了多层次、立体的安全防护网，并辅以严格的安全管理制度和流程。

4. 高效的协同机制：通过明确三方职责、签订安全协议、建立联合指挥体系，确保了作业过程中信息畅通、协调一致。

实践证明，通过科学的规划、严格的管理和有效的技术手段，“车-船”撬装式甲醇加注作业的风险是可控的。本研究总结的安全解析与分级管控策略，可为国内外其他港口开展类似甲醇燃料加注作业提供一套可复制、可推广的安全管理范式，对促进甲醇燃料在航运业的安全应用具有重要的参考价值。未来，随着加注频次和规模的增加，仍需持续优化应急预案，加强人员熟练度培训，并推动加注技术的智能化和标准化发展。

参考文献

- [1] 中国船级社. 船舶甲醇燃料加注作业指南 [S]. 2023.
- [2] JT/T 845-2020, 危险货物港口作业安全评价导则 [S].
- [3] 国际海事组织 (IMO). 国际海运危险货物规则 (IMDG Code) [S].
- [4] GB 18218-2018, 危险化学品重大危险源辨识 [S].
- [5] GB 50058-2014, 爆炸危险环境电力装置设计规范 [S].