

船对船甲醇燃料加注安全管控体系构建与 关键风险防控研究

——基于“中远海运天秤座”轮国内首次大型集装箱船甲醇双燃料 改装项目实践

吕亮亮

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

摘 要：全球航运业向2050年净零排放转型中，甲醇因全生命周期减碳优势被IMO认定为“零/近零”温室气体燃料。截至2025年9月，全球甲醇动力船舶订单超220艘，但甲醇低闪点、宽爆炸极限、高汽化速率的特性，使船对船加注（STS-B）作业面临多灾种耦合风险，传统规范难以套用。

2025年9月，上海中远海运重工完成国内首次大型集装箱船（“中远海运天秤座”轮，20000TEU）2100t甲醇STS-B作业，实现“三零”目标。本文以该项目为样本，梳理全链条安全实践，构建“5-4-3”STS-B安全管控体系（5大风险域、4层管控区、3级应急线），识别11项关键风险，提出“人-机-料-法-环-测”六维防控模型，参照CCS、海事局相关规范，形成工程级合规技术范式，填补国内空白。

关键词：船对船加注；甲醇燃料；安全管控；风险耦合；应急演练

1 引言

IMO《2028年航运温室气体减排战略》将甲醇纳入“零/近零”燃料，计划2026年发布专项安全规则；欧盟Fit for 55法案要求2025年起5000 GT以上船舶在欧盟港口绿色燃料占比不低于2%，马士基、中远海运等船东纷纷订造甲醇动力船。

与LNG相比，甲醇有“三不”特性：蒸气密度高于空气易聚集、汽化潜热低致设备低温脆裂、腐蚀金属增加密封失效风险。目前ISO甲醇加注指南未发布，国内仅存团体标准征求意见稿，缺乏工程级细则。本文结合CCS《船舶应用甲醇乙醇燃料指南（2022）》、海事局《醇燃料动力船舶技术与检验暂行规则（2023）》等规范，以“中远海运天秤座”轮项目为样板，构建安全管控体系。

2 项目概况与风险特征

2.1 作业场景

◇ 受注船：“中远海运天秤座”轮（20000 TEU，总长399.9m），按相关规则完成双燃料系统改装，燃料舱设独立隔离空舱，舱壁用A-60级防火分隔。

◇ 加注船：“海港致远”轮（3500m³），配备符合GB/T 38520-2020的紧急脱离装置，加注软管经1.5倍设计压力水压试验合格。

◇ 作业地点：上海中远海运重工13号码头（长江口南支），符合选址要求。

◇ 作业参数：加注量2100t，速率750m³/h；用99.9%纯度氮气惰化，12h内使燃料舱O₂浓度 ≤ 8%；作业选夜间，能见度1.2n mile，风速4.5m/s，雷暴指数0，满足气象阈值。

2.2 核心风险特征

2.2.1 易燃易爆风险（高风险）

甲醇最小点火能量低（0.14mJ），作业过程中存在多重点火源：船舶静电积聚、非防爆设备电火花等。若甲醇蒸气在密闭空间（如船舱、管路）聚集至爆炸极限（6-36 vol%），遇点火源将引发爆炸，且爆炸冲击波可能破坏周边管路，导致二次泄漏爆炸，形成“泄漏-聚集-爆炸-再泄漏”的耦合风险链。

2.2.2 蒸气探测与扩散风险（中高风险）

甲醇蒸气无色透明，人工无法直接识别，且其密度（1.11kg/m³）高于空气，易在甲板低洼处、舱室底部形成“蒸气云”。若探测设备（如PID检测仪）布设不足或故障，无法及时发现蒸气泄漏，“蒸气云”可能随风扩散至周边作业区域，扩大风险影响范围；同时，甲醇与水互溶特性导致常规围油栏失效，若泄漏至水域，COD贡献值达1.5g/g，将引发水体污染风险。

2.2.3 设备腐蚀与密封失效风险（中风险）

甲醇-水-氯离子体系会对金属设备产生腐蚀：316L不锈钢管路若长期接触含氯离子（> 10ppm）的甲醇，易发

生应力腐蚀开裂；密封件若选用丁腈橡胶等非耐甲醇材质，会出现溶胀、硬化现象（膨胀率超10%），导致法兰、阀门密封失效。设备腐蚀失效会直接引发泄漏，且腐蚀过程具有隐蔽性，常规巡检难以提前发现，增加风险管控难度。

2.2.4 船舶碰撞与漂移风险（中风险）

加注作业中，受注船与加注船需保持稳定间距，若遭遇突发强风（风速 $>10.8\text{m/s}$ ）、水流冲击或缆绳断裂（破断力 $<200\text{kN}$ ），船舶易发生漂移。两船碰撞可能导致加注软管断裂、法兰脱落，引发大量甲醇泄漏；同时，漂移会破坏船岸接地系统，增加静电积聚风险，形成“漂移-碰撞-泄漏-静电”的耦合风险。

2.2.5 极端环境风险（中风险）

长江口区域易出现雷暴、大雾（能见度 $<1000\text{m}$ ）、强风等极端天气：雷暴天气的雷电可能直接点燃甲醇蒸气；大雾导致能见度降低，影响船舶操控与应急疏散；强风（ >6 级）会加速甲醇蒸气扩散，同时破坏系泊系统，加剧船舶漂移风险。极端环境会降低人员操作精度与设备可靠性，多重风险叠加可能导致应急处置延误。

2.2.6 人员安全风险（中风险）

作业人员面临中毒、窒息风险：甲醇蒸气吸入会导致中枢神经系统损伤，若接触液态甲醇（皮肤接触或误食），可能引发化学灼伤；燃料舱惰化后 O_2 浓度 $\leq 8\%$ ，若人员未佩戴自给式呼吸器（SCBA）进入，会发生窒息事故。

3 “5-4-3”安全管控体系构建

3.1 五大风险域（R1-R5）

◇ R1（泄漏风险）：选荷兰MannTek干式拉断阀（爆破压力 $\geq 2.5\text{MPa}$ ），每航次1.5倍水压测试；法兰用PTFE+FKM垫片，气密性试验保无泄漏。

◇ R2（点火源风险）：危险区（Z0）仅允许Ex d IIC T4防爆设备，人员穿防静电服、带静电释放器，禁非防爆设备进入。

◇ R3（人员安全风险）：人员配自给式呼吸器（续航 $\geq 15\text{min}$ ）及甲醇蒸气检测仪（报警阈值20% LEL）；惰化舱 $\text{O}_2 \leq 8\%$ 时强制通风至 $\geq 19.5\%$ 方可进入。

◇ R4（船舶碰撞风险）：“6+6”系泊+2条拖轮值守，AIS监控周边船舶，VTS每30min播报作业信息，15min查缆绳状态。

◇ R5（极端环境风险）：设气象监测站，触发预警即启动“三停一撤”（停泵、停作业、断电源，人员撤离）。

3.2 四层管控区（Z0-Z3）

◇ Z0危险区（加注点50m内）：2套红外成像仪、

4台PID探头（精度 0.1ppm ）、环形水幕（喷水率 $10\text{L}/\text{min} \cdot \text{m}^2$ ）。

◇ Z1限制区（50~100m）：1.8m物理围栏隔离，设静电释放桩（接地 $<1\Omega$ ）、洗眼器（响应 $<10\text{s}$ ）；断非防爆电源，30min测蒸气浓度。

◇ Z2警戒区（100~200m）：驱离无关船舶，禁热工作业，1艘拖轮值守，AIS监控，1h巡查边界。

◇ Z3防范区（200~500m）：设临时锚地，VTS每15min播报信息，高清AI摄像头监控，报备海事申请临时交通管制。

3.3 三级应急线（E1-E3）

◇ E1岗位级（泄漏 $\leq 1\text{L}$ ）：现场用防爆堵漏工具处置，便携式检测仪确认控制，报指挥中心记录。

◇ E2船厂级（泄漏 $>1\text{L}$ ）：2s内启动ESD系统，关泵阀、开消防水幕；人员沿预设路径撤离，120待命，活性炭吸附泵收泄漏甲醇。

◇ E3市区级（火灾爆炸）：联动多部门，启动《长江口船舶污染事故应急预案》II级响应；用AR-AFFF抗醇泡沫灭火，围油栏防扩散。

4 关键风险识别与六维防控措施

4.1 关键风险评估

识别11项关键风险，高风险事件及管控如下：

（1）软管爆裂：原风险不可接受（频率 $1.2 \times 10^{-3}/\text{次}$ ），增干式拉断阀、每航次水压测试后，风险降至 $1.2 \times 10^{-6}/\text{年}$ （ALARP原则）。

（2）ESD失效：风险等级III级（频率 $5.0 \times 10^{-4}/\text{次}$ ），用船岸双端冗余ESD（光纤+硬线双回路，响应 $\leq 2\text{s}$ ），每3个月维护校准。

（3）加注船漂移：风险等级IV级（频率 $2.3 \times 10^{-3}/\text{次}$ ），2条拖轮值守+缆张力监测（偏差 $>10\%$ 预警），磨损超20%换缆。

（4）雷暴突袭：风险等级II级（频率 $1.1 \times 10^{-2}/\text{次}$ ），接气象台API（每5min刷新），雷暴指数 >0 即停注，预警提前量 $\geq 30\text{min}$ 。

4.2 “人-机-料-法-环-测”六维防控

4.2.1 人：行为管控与能力提升

◇ 准入制：人员经 $\geq 24\text{h}$ 专项培训（甲醇特性、应急处置等），考核合格发“专项作业证”。

◇ 技能提升：8月27日“双盲”桌面推演（6大耦合场景），纠正9项缺陷。

◇ 通讯规范：防爆对讲机一用一备，设独立应急频道，断联5min停作业。

◇ 健康管理：作业前心理筛查、酒精检测，每日作

业 $\leq 8\text{h}$ 防疲劳。

4.2.2 机：设备完整性与冗余设计

◇ 选型：加注软管为耐甲醇PTFE内层+不锈钢网外层（ -40°C 至 80°C ）；ESD系统船岸双冗余（响应 $\leq 2\text{s}$ ）。

◇ 维护：软管每6个月1.5倍设计压力循环试验；ESD每3个月校准，接触成功率100%。

◇ 接地：船-船-码头用镀锌钢管接地极（埋深 $\geq 0.8\text{m}$ ），等电位连接后接地阻值 $< 1\Omega$ 。

◇ 冗余：关键设备备用机组（30s自动切换）；PID检测仪同点设2台探头防漏报。

4.2.3 料：介质相容与纯度控制

◇ 材料：密封件用PTFE+FKM复合材料（膨胀率 $< 5\%$ ），每6个月更换；管路、法兰用316L不锈钢（含钼 $\geq 2.5\%$ ），焊接后100%射线探伤。

◇ 泄漏收集：易泄漏部位下设集液盘（容量 $\geq 110\%$ 单管容积），接专用回收舱（高液位80%报警）。

◇ 纯度：每批次甲醇测纯度（ $\geq 99.5\%$ ）、水分（ $\leq 0.1\%$ ）、氯离子（ $\leq 10\text{ppm}$ ），不合格禁用；燃料舱氮气惰化（ $\text{O}_2 \leq 8\%$ ）防氧化。

4.2.4 法：流程标准化与制度保障

◇ “三阶段七检查”：准备阶段（预检、气密性试验、惰化）；加注阶段（初速 $\leq 50\text{t/h}$ 、常速 470t/h 、补足 $\leq 30\text{t/h}$ ）；结束阶段（吹扫、封堵、复位）。

◇ “三停一撤”：通讯断联5min、雷暴预警提前 $> 30\text{min}$ 、蒸气浓度超40%LEL，立即执行。

◇ 制度：制定《甲醇加注作业安全管理规定》等，明确职责流程，定期培训考核。

4.2.5 环：环境监控与污染防控

◇ 监测：2套红外热像仪（Z0区）+6台PID检测仪（Z0-Z2区）+专人每30min巡查（Z3区），数据实时传指挥中心，超阈值报警。

◇ 气象：接上海气象局API（每5min刷新），超安全阈值（风速 $\leq 10.8\text{m/s}$ 等）即停注。

◇ 污染防控：作业区设围堰（ $\geq 0.5\text{m}$ ），备活性炭吸附泵（ $\geq 10\text{m}^3/\text{h}$ ），排水COD $\leq 100\text{mg/L}$ 排江；水域泄漏布围油栏（ $\geq 500\text{m}$ ），吸油毡回收。

4.2.6 测：监测预警与数据溯源

◇ 泄漏：关键节点装传感器（精度 0.1L/min ）， $\geq 1\text{L/min}$ 报警触发ESD。

◇ 气体：Z0-Z2区PID检测仪 $\geq 20\%$ LEL声光报警，

$\geq 40\%$ LEL断加注泵。

◇ AI监控：关键区域装高清AI摄像头（24h），识别违规行为自动预警。

◇ 数据：监测数据存 ≥ 3 个月，便于复盘优化。

5 应急演练与能力验证

5.1 桌面推演

8月27日推演6大场景，设14个决策节点、32项指标，“红蓝对抗”找隐患。发现9项缺陷（如堵漏工具不足），修订预案9处，明确职责。

5.2 实战演练

9月4日加注时触发“高液位报警”演练，ESD停泵38s（ $\leq 60\text{s}$ 目标），验证系统协同性，复盘优化流程。

6 结论与建议

6.1 结论

（1）构建国内首套“5-4-3”甲醇STS-B安全管控体系，实现全流程管控，依托项目达“三零”目标，符合规范，为行业提供样板。

（2）识别11项关键风险，六维防控降事故概率，应急演练验证体系有效。

6.2 建议

（1）完善标准：推出《船舶甲醇燃料加注安全规范》，将干式拉断阀等技术纳入强制条款。

（2）人员培训：建立专业体系，考核发证，定期跨区域演练。

（3）推广智能技术：普及数字孪生、AI监控等，建立全国监管平台。

（4）强化监管：海事核查备案、资质、设备合规性，加大违规处罚。

参考文献

[1]中国船级社. 船舶应用甲醇乙醇燃料指南（2022）[S].北京：人民交通出版社，2022.

[2]中华人民共和国海事局. 醇燃料动力船舶技术与检验暂行规则（2023）[S].北京：中国交通新闻出版，2023.

[3]上海海事局. 上海海事局水上甲醇燃料加注作业安全管理办法（2024）[S].上海：上海浦江教育出版社，2024.

[4]International Maritime Organization. IMO 2028 Strategy on Reduction of Greenhouse Gas Emissions from Ships [R]. London: IMO, 2023.