

海洋工艺管线在线隔离作业的操作风险与防控措施

齐一超 许传庆 杨学海 周迎安 马红亮 (海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452)

摘要: 为解决海洋工艺管线在线隔离作业中介质残留识别不足、隔离边界不稳定及能量释放失控等风险, 本文对海洋油气工艺管线在线隔离工况特征与风险机理进行研究, 提出工况仿真与在线监测耦合的介质残留辨识方法、多级隔离与分级减压策略、人员胜任力与组织协同优化措施以及海洋环境条件评估与干扰防护要求, 以期海上油气工程在线隔离管理提供参考。

关键词: 海洋工艺管线; 在线隔离作业; 操作风险; 防控措施

中图分类号: TE95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0115-03

Operational risks and preventive measures for on-line isolation of offshore process pipelines

Qi Yichao, Xu Chuanqing, Yang Xuehai, Zhou Ying'an, Ma Hongliang (Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: in order to solve that risks of insufficient identification of medium residue, unstable isolation boundary and energy release out of control in the online isolation operation of offshore process pipelines, the characteristics and risk mechanism of the online isolation operation of offshore oil and gas process pipelines are studied in this paper, and the medium residue identification method coupled with operation simulation and online monitoring, the multi-stage isolation and graded decompression strategy, the collaborative optimization measures of personnel competence and organization, and the marine environmental condition assessment and interference protection requirements are proposed. It is expected to provide reference for on-line isolation management of offshore oil and gas engineering.

Key words: offshore process pipeline; online isolation operation; operational risk; prevention and control measures

海洋油气开发向深水、高含硫和高压高温区域延伸, 工艺管线长度、分支数量与运行压力水平持续提高, 在线隔离作业在检维修和工艺调整阶段承担关键功能。隔离操作处于带压带温、流态复杂及环境荷载显著的综合背景下, 操作余度较小, 对方案设计与现场执行精度要求突出。因此, 深入探讨相关操作风险并完善防控思路具有重要工程意义。

1 海洋工艺管线在线隔离作业概述

1.1 海洋油气田工艺管线系统构成及运行特性

海洋油气田工艺管线系统由集输管线、工艺处理管线、注水及气举管线等组成, 承担采出液输送、分离稳压、回注与能量补偿等功能, 具有长距离、多分支、高压、高含硫和强腐蚀等特征。管线服役过程中, 受内外压差、温度梯度、波浪流载、涡激振动等多重荷载耦合作用, 易出现壁厚减薄、局部积液、气液两相流波动以及水合物形成等工况复杂性, 给在线隔离作业中的工况识别、完整性评估和泄压路径设计带来较高技术要求。

1.2 在线隔离作业流程及关键工艺环节

在线隔离作业通常依托工艺流程模拟与现场工况核实, 依顺序完成作业风险识别、系统降压、介质排空或置换、隔离边界建立、完整性验证及恢复投产等环节^[1]。具体流程包括依据工艺流程图和管道等温线

确定隔离范围, 实施分段降压与放空, 采用氮气或干燥空气进行吹扫置换, 按预定位置操作阀门或安装盲板形成单元隔离, 并通过压力保持试验、连通性检查和仪表信号比对确认隔离有效性, 最终在条件满足情况下组织系统受控恢复运行。

2 海洋工艺管线在线隔离作业操作风险分析

2.1 管线内介质残留与工况误判

管线内介质残留与工况误判是在线隔离作业中构成主要操作风险。海洋工艺管线受地形、流型及启停影响, 在高点聚集气体, 在低点形成液舱和泥砂沉积, 局部出现滞留与隔离盲区。若设计资料与历史工况记录不完整, 且压力、温度、流量仪表存在量程选择不当或零点漂移, 依靠瞬时读数判断管内状态时难以识别残余气体、残余液柱及高毒性组分富集区域, 易对泄压充分性与介质相态形成误读。在线隔离阶段若以单一测点压力下降作为排空判据, 在阀腔、支路、立管底部常常保留残压区域, 在后续拆卸、阀门开启或热作业过程中触发喷射、毒害暴露和可燃混合云团, 对作业安全与设施完整性构成重大威胁。

2.2 隔离点选取不当与隔离边界失效

隔离点选取不当与隔离边界失效直接影响在线隔离作业安全性。若隔离方案未按管道详图、P&ID与现场布置综合校核, 易忽视旁路管、排放管、取样支

路及联通汇管,导致理论隔离单元在空间上仍与高压或含烃系统保持连通关系。部分老旧装置中,截止阀密封面磨损、止回阀内漏、工艺联锁放空支路长期处于开启状态,隔离点即使关闭到位,边界两侧仍存在缓慢渗透与回流路径。隔离界面一旦承受上游压力波动、背压叠加或温度升高引起的热膨胀,渗入介质在局部空间内积聚,在后续拆卸法兰、拆除仪表或打开盲板时形成突发泄放,引发毒性气云、可燃气体及高温流体喷射,对作业区域构成安全威胁。

2.3 压力、温度及能量释放失控

压力、温度及能量释放失控在在线隔离作业阶段构成高危操作风险。减压节奏不合理或阀门开度控制不当时,管内压差突变引发剧烈两相流波动、水击和气液界面迁移,局部产生极端冲蚀与振动,对薄弱焊缝、腐蚀减薄区和支吊架稳定性形成破坏^[2]。高压含烃介质急剧降压伴随焦耳汤姆逊效应,导致管壁低温脆化与密封元件性能衰减,在重复启闭过程中触发失稳破裂。若隔离单元内残存易燃、有毒或高温高压介质,在误操作、联锁失效或外来冲击条件下释放速率与方向失控,会形成超出设计假定的喷射火焰、蒸汽云爆炸或高温冲刷,危及关键设备完整性与作业人员生命安全。

2.4 人员能力不足与作业组织失配

人员能力不足与作业组织失配导致在线隔离作业整体风险水平抬升。缺乏海洋工艺流程、动态工况及安全仪表系统基础知识时,作业人员难以及时识别高点积气、低点积液、异常压差等预警信号,易在关键步骤做出错误阀位操作顺序或错误隔离范围判定。若班组构成专业结构单一,缺少工艺、设备、仪控等多专业协同支持,现场决策依赖个体经验判断,难以对复杂联锁逻辑、跨系统连通关系进行系统性分析。指挥链条若存在职责边界模糊、信息传递迟滞与授权机制缺陷,紧急状态下调度指令与现场响应出现偏差,形成误停产、误投产或同时对多处阀组实施操作等情形,诱发超压、泄漏或能量耦合失控事件。

2.5 海洋环境负荷与外部作用引发的突发事件

海洋环境负荷与外部作用构成在线隔离作业中难以忽视的突发事件触发源。平台所在海域风浪流条件变化频繁,风浪叠加引起上部结构振动放大,通过支撑结构传递至管线与阀组,引起疲劳累积与支架松动,在隔离作业阶段降低系统承载裕度。恶劣海况下支援船舶靠泊偏位、系泊缆绳受力异常或吊装设备摆动幅度增大,极易与外输管线、立管或临时软管发生意外接触,产生局部变形、支座失稳或连接件撕裂。若同时存在甲板拥挤、施工交叉与临时设备布置不合理现

象,外部冲击后易阻碍人员撤离路线与应急抢险通道,进而放大泄漏、着火或结构失稳的后果严重性。

3 海洋工艺管线在线隔离作业风险防控措施

3.1 工况仿真与在线监测结合的介质残留识别与确认

工况仿真与在线监测联合应用,对介质残留范围识别具有关键作用。基于管网模型与多相流模拟,依据设计压力 16MPa、运行压力 10~12MPa、介质密度 750kg/m³ 等参数,对降压阶段各节点压力、温度与相态演变进行步长 1s 的动态计算,确定高位积气段、低位积液段及死角空间残余体积,使残余液体体积分数低于 1%、残余气体体积分数低于 2%^[3]。在线监测方面,在隔离单元上下游布设不少于 2 处压力变送器、温度传感器及在线气体成分分析仪,采样周期不大于 5s,按照残余压力小于 0.1MPa、可燃组分体积分数低于下限爆炸浓度 25% 等阈值进行判定。仿真结果与 DCS、ESD 系统实时数据对比,识别仪表指示与实际工况偏差,降低介质未排净情况下误判为安全状态的操作风险。

3.2 多级隔离边界设计与隔离完整性验证

多级隔离边界设计与隔离完整性验证构成在线隔离风险控制核心环节。针对设计压力 20MPa、常规运行压力 13~15MPa 工艺管线,主隔离阀、次级阀组与盲板或插板阀组合形成不少于三级隔离层,优先采用双截止带放空结构,通过中腔放空实现泄漏监控。隔离方案中明确各阀门压力等级、密封副材质与耐温范围,使阀座耐压裕度不低于 1.5 倍设计压力、密封面设计温度上限不低于 120℃。隔离完整性验证阶段,采用清水或惰性气体进行强度与严密性试验,试验压力取设计压力的 1.1~1.25 倍,保压时间不少于 10min,同时监测压降与中腔放空口介质流量。若压降速率超过 0.01MPa/min 或放空口出现连续排放,判定隔离边界功能不满足作业要求,禁止进入后续拆卸与热加工工序。多级隔离边界设计与隔离完整性验证关键参数见表 1。

3.3 分级减压与能量安全释放控制

分级减压与能量安全释放控制需按系统最高设计压力、最小金属温度、支撑结构强度等参数进行整体匹配。隔离单元排放方案中,将初始压力 12~14MPa 分三到四级降低,每级压降不超过 2MPa,单位时间压降速率控制在 0.15MPa/min 范围内,通过限流孔板、角行程调节阀与稳压阀串联,削弱水击和两相流冲击。排放口引至火炬或封闭放空罐,按每条支线不大于 1.0kg/(s·线) 控制质量流量,计算火炬总负荷不高于设计热负荷 80%,防止火炬头温度超过 950℃。对含高 CO₂、H₂S 介质段,采用预热介质或氮气伴流模式,

表1 多级隔离边界设计与隔离完整性验证关键参数

参数项	设计值 / 要求	说明
设计压力	20 MPa	管线设计基准压力
常规运行压力	13 ~ 15 MPa	在线隔离前典型工况范围
隔离层级数	≥ 3 层	主阀 + 次级阀组 + 盲板 / 插板阀
隔离阀结构形式	双截止带放空	中腔放空用于泄漏监控
阀门压力等级裕度	≥ 1.5 × 设计压力	阀座耐压不低于 30 MPa
密封面设计温度上限	≥ 120 °C	适应降压及环境温度波动
完整性试验介质	清水或惰性气体	强度试验与严密性试验
完整性试验压力	1.1 ~ 1.25 × 设计压力	22 ~ 25 MPa 范围
保压时间	≥ 10 min	持续监测压降与泄漏情况
允许压降速率	≤ 0.01 MPa/min	超限视为隔离功能不满足要求
中腔放空口监测	无连续排放	出现持续流量判定为内漏
进入拆卸 / 热加工前提条件	压降、泄漏指标满足全部控制标准	否则禁止进入后续作业

将金属最低温度保持在 -20℃ 以上, 降低脆断风险^[4]。减压过程全程接入 SIS 与 ESD 回路, 根据上下游压差实时调整阀位指令, 避免单阀全行程突开引发能量瞬时释放。

3.4 作业人员胜任力管理与协同组织优化

作业人员胜任力管理与协同组织优化依托量化标准与刚性程序。在线隔离关键岗位按照工艺、设备、仪控三类专业划分胜任等级, 主操人员需具备不少于 5 年海上生产经验, 参与在线隔离项目不少于 3 次, 理论考试成绩不低于 85 分。年度培训计划中, 引入动态仿真系统开展场景化演练, 每人每年仿真操作累计时长不低于 40h, 重点覆盖误关阀门、错定隔离范围、异常压差等情形。现场组织方面, 作业组设置技术负责人、现场协调人、安全监督员与阀操执行人等角色, 通过书面职责矩阵明确指令来源与反馈路径。隔离操作采用“双人操作、一人监护”模式, 每一步阀位变更均在操作票上记录时间、人员与参数, 按每一千次阀门操作误操作率不高于 0.5% 作为绩效指标。

3.5 海洋环境条件评估与外部干扰防护

海洋环境条件评估与外部干扰防护以定量作业窗口和物理隔离带为基础。作业前依据十年一遇海况统计资料, 按照风速、有效波高与流速三项指标设定准入阈值, 如平台顶部平均风速不高于 15m/s、显著波高不高于 2.5m、表层流速不高于 1.0m/s, 超出任一指标即暂停隔离操作。作业期间引入气象海况预报系统与波浪监测浮标, 数据刷新周期不大于 10min, 通过趋势分析识别突变风险^[5]。对靠泊支援船舶和吊装作业区域划定不少于 30m 的工艺管线防护缓冲带, 在管线集中区域增设防撞桩、护栏或钢结构防护框架, 设计冲击能量按 200kJ 考虑。动态定位船舶设定距离平

台 20m 的预警圈, 一旦偏移接近阈值即触发声光报警。甲板上通过统一走廊和应急通道规划, 使隔离作业区域内任一点至最近集合点步行距离不超过 60m, 降低突发事件下人员疏散时间。

4 结语

总而言之, 海洋工艺管线在线隔离作业处于高压工况聚集的敏感边界, 任何环节失控都易诱发连锁事故。管线介质残留、隔离边界失效、压力温度失衡、人员能力与组织错配以及风浪流荷载叠加, 易在复杂工况下演变为泄漏、火灾和结构损伤。构建以工况仿真和在线监测为基础、以多级隔离与分级减压为核心、以胜任力管理和环境评估为支点的防控体系, 有助于前移安全关口, 削弱能量失控与介质突发生释放风险。未来需要在数字孪生、智能感知和远程协同控制等方面持续推进应用, 以进一步提升在线隔离作业本质安全水平。

参考文献:

- [1] 季文中. 石化设备及管线打开作业事故原因分析与预防 [J]. 广州化工, 2023, 51(20): 133-135.
- [2] 盛路路. 管线打开作业管理在化工行业应该重视及推广 [J]. 劳动保护, 2023, (01): 68-70.
- [3] 刘立坤, 陈锐, 李文辉, 等. 激光打码在工艺管线生产执行管理系统中的应用研究 [J]. 石油和化工设备, 2025, 28(02): 90-93+98.
- [4] 于东伟. 海上石油平台工艺管线改造的质量风险及控制措施 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(02): 22-24.
- [5] 李许光, 邵鹏程. 海洋石油平台小尺寸管线焊接变形控制与反变形工装设计 [J]. 海洋工程装备与技术, 2022, 9(03): 22-25.