

海上采油水处理技术的研究进展

张 虎

中海石油(中国)有限公司深圳分公司 广东 深圳 518000

摘 要: 随着海上油田进入高含水开发阶段,采油水排放量逐年增加,其处理效果直接关系到海洋生态保护与油田可持续开发。本文系统梳理海上采油水的来源、核心特性及国内外最新处理标准,重点综述常规处理、深度处理及新型处理技术的研究与应用进展,包括物理分离、化学处理、膜分离、生物处理等关键技术的实操要点与现场应用情况,分析各类技术的适配场景与优化方向,指出当前技术面临的瓶颈,最后对未来海上采油水处理技术的发展趋势进行展望,为海上采油水处理技术的工程应用与后续研究提供参考。

关键词: 海上采油; 水处理技术; 常规处理; 深度处理; 新型处理; 研究进展

引言: 海上油气开采过程中会伴随产生大量采油水,其含有原油组分、重金属、难降解有机物等污染物,若处理不当排放,会严重破坏海洋生态环境,同时也制约着油田资源化利用水平的提升。当前国内外环保法规日趋严格,海上平台空间有限、运维难度大等特点,对采油水处理技术提出了更高要求。基于此,本文围绕海上采油水的处理需求,系统调研各类处理技术的研究进展,从常规技术到深度处理、新型技术逐步展开分析,梳理技术应用现状与优化成果,为破解海上采油水处理难题、推动技术升级提供理论与实践支撑。

1 海上采油水的来源、特性及处理标准

1.1 海上采油水的主要来源

海上采油水是油气开采过程中伴随产生的主要废水,来源相对集中且稳定,核心分为三类:(1)地层原生水,随原油、天然气一同从海底油藏中开采而出,是采油水的主要来源,其产生量随油田开采年限增长而增加;(2)注入水返排,为提高原油采收率向油藏注入的海水、淡水经开采后随原油排出,构成采油水重要组成部分;(3)辅助生产废水,包括平台设备清洗、甲板冲洗产生的含油废水及钻井液、化学药剂残留废水等,占比相对较小但成分复杂。

1.2 海上采油水的核心特性

海上采油水因海上开采环境特殊,特性区别于陆上采油水,核心表现为三点:(1)理化特性复杂,普遍具有高矿化度、高含油量特点,含大量悬浮物及乳化油,pH值多在4.2~6.8之间,且随开采年限降低;(2)污染性强,含原油组分、重金属及化学药剂,具有一定生物毒性,随意排放会破坏海洋生态;(3)场景适配难度大,海上平台空间有限,且采油水水质、水量波动大,乳化程度高,给处理设备的紧凑化、高效化设计带来挑战。

1.3 海上采油水的最新处理标准

目前国内外已出台最新标准规范海上采油水处置,国内方面,执行《海洋石油勘探开发污染物排放浓度限值》等现行标准,排海废水含油量需低于20mg/L,回注水需符合油藏注水相关指标,船舶相关废水需遵循《船舶水污染物排放控制标准》(GB3552-2018);国际方面,OSPAR公约最新修订版要求,东北大西洋海域采油水排放中分散油浓度月均不超过30mg/L,同时推行风险管控模式,严控化学药剂排放。此外,行业内新增《油气田压裂返排液资源化综合利用指南》(T/CIET1278-2025),进一步规范采油水资源化利用的标准要求^[1]。

2 海上采油水常规处理技术研究进展

2.1 物理分离技术

物理分离技术是海上采油水常规处理的基础工艺,依托物理作用实现油、水、悬浮物的分离,具有操作简单、成本较低、适配海上平台紧凑化需求的特点,广泛应用于采油水预处理及初级分离环节,核心技术包括以下几种:(1)重力沉降技术。海上应用以紧凑型高效沉降罐为主,区别于陆上大型沉降设备,采用立式结构适配平台空间限制,内部增设隔板、斜板等构件,缩短油滴沉降路径。目前现场应用中,多优化罐内流场设计,减少死水区,避免油水二次乳化,常用设备包括高效斜板沉降罐、立式沉降分离器,主要用于去除采油水中的游离油及大粒径悬浮物,是海上采油水处理的第一道核心工序。(2)旋流分离技术。专为海上采油水处理的高效、小型化需求研发,核心设备为海上专用旋流器,通过离心力将密度不同的油、水分离,无需额外动力,占地面积小、处理效率高。实际应用中,多优化旋流器的进出口结构、锥角参数,提升分离精度,解决海上采油水水量波动大导致的分离效果不稳定问题,常与重力沉

降技术联用,用于游离油的深度去除。(3)气浮分离技术。适配海上采油水乳化油含量较高的特点,采用紧凑型气浮装置,通过加压溶气、电解等方式产生微小气泡,使油滴吸附在气泡表面上浮分离。现场常用溶气气浮机,优化气泡粒径及分布,适配海上平台低能耗要求,主要用于去除重力沉降、旋流分离后残留的乳化油及细小悬浮物。

2.2 化学处理技术

化学处理技术是海上采油水常规处理的关键配套工艺,通过投加化学药剂破坏油水乳化体系、去除污染物,弥补物理分离技术的局限性,适配海上采油水复杂水质,核心技术及应用如下:(1)破乳技术。针对海上采油水乳化程度高、破乳难度大的问题,现场主要采用投加破乳剂的方式,常用破乳剂为聚醚类、聚硅氧烷类复配药剂,适配海上高矿化度、高温环境。实际应用中,根据采油水原油性质、乳化程度调整药剂投加量,优化投加方式,常与物理分离技术联用,实现乳化油的高效破乳分离,降低后续处理负荷。(2)絮凝沉降技术。用于去除采油水中细小悬浮物、胶体及部分乳化油,常用絮凝剂为聚合氯化铝、聚合硫酸铁等无机絮凝剂,及聚丙烯酰胺类有机絮凝剂,部分场景采用无机-有机复配絮凝剂,提升絮凝效果、减少药剂用量。适配海上平台紧凑化处理流程,絮凝反应装置多采用一体化设计,缩短反应时间,避免药剂残留对后续处理环节的影响。(3)缓蚀阻垢技术。配套应用于海上采油水处理系统,因采油水高矿化度、高腐蚀性,易导致处理设备、管道腐蚀结垢,影响设备寿命及处理效率。现场投加缓蚀剂、阻垢剂,缓蚀剂以咪唑啉类、有机胺类为主,阻垢剂以膦酸类、聚羧酸类为主,根据水质参数优化药剂配比,实现设备防腐防垢,保障处理系统稳定运行^[2]。

3 海上采油水深度处理技术研究进展

3.1 膜分离技术

膜分离技术是海上采油水深度处理的核心技术,适配平台紧凑化需求,以模块化设计为主,实际应用中重点优化抗污染性能,核心类型及应用如下:(1)超滤、微滤膜技术。海上多采用PVDF材质抗污染膜,经疏水改性处理提升耐高盐、抗油污能力,孔径精准控制在0.03-0.1 μm ,可有效截留常规处理后残留的细小乳化油和悬浮物。设备采用卷式或中空纤维式模块化设计,错流流速稳定维持在2.5-3.5m/s,有效减轻浓差极化现象,某渤海海上平台应用中,该技术连续运行2000小时后膜通量衰减率控制在15%以内,运维成本低于传统膜处理工艺。(2)纳滤、反渗透膜技术。针对海上高矿化度采油水(矿化度

常高于10000mg/L),采用抗污染纳滤膜和低压反渗透膜联用模式,纳滤膜优先截留二价离子,反渗透膜实现深度脱盐,模块化设备集成度高,占地面积仅为传统脱盐设备的1/3,适配海上平台空间有限的痛点,主要用于采油水淡化回用至平台生产用水。(3)膜污染控制与清洗优化。现场采用“物理冲洗+化学清洗”联用方式,物理冲洗采用反洗、气洗交替进行,频次根据膜通量衰减情况动态调整,化学清洗选用适配高盐环境的专用清洗剂,严格控制清洗温度和时长,减少膜损伤,显著延长膜组件使用寿命。

3.2 吸附与过滤技术

该技术主要用于去除膜分离后残留的微量油分、重金属及溶解性有机物,设备操作简单、运维便捷,适配海上平台运维人员少、运维难度高的需求,实际应用进展如下:(1)新型吸附材料应用。海上多采用改性活性炭、亲疏水组合纤维等吸附材料,其中亲疏水组合纤维通过梯度结构设计,实现不同粒径油滴逐级分离,无需添加化学药剂,避免二次污染,处理后出水油含量可稳定降至5mg/L以下,满足海上排海相关标准。(2)深层过滤技术优化。优化核桃壳、纤维球过滤器结构,采用多层滤料分层过滤,上层为粗粒滤料截留大颗粒杂质,下层为细粒滤料截留微量污染物,设备采用撬装化设计,可直接集成于现有处理系统,无需对海上平台原有管路进行大规模改造,大幅减少平台改造工作量和施工周期。

3.3 高级氧化技术

针对海上采油水残留的难降解有机物(如多环芳烃、石油磺酸盐等),高级氧化技术以高效降解、无二次污染为优势,适配海上低能耗、环保化要求,实际应用以小规模化、集成化设备为主,具体如下:(1)光催化氧化技术。采用海上场景适配型纳米催化剂,负载于多孔载体上,设计紧凑型光催化反应器,充分利用海上自然光辅助催化,大幅减少能耗,催化剂可通过简单分离实现重复回收利用,有效降低运行成本,主要用于降解采油水中的难降解有机物。(2)电化学氧化、臭氧氧化技术。电化学氧化采用模块化电解槽,电极经特殊防腐改性处理,可稳定适配海上采油水高盐、高腐蚀的恶劣环境;臭氧氧化采用小型化臭氧发生器,与海水曝气系统联用,设备集成度高,无需复杂管路布置,可快速降解微量油分和有机物,处理效率较传统氧化工艺提升30%以上^[3]。

4 海上采油水新型处理技术研究进展

4.1 生物处理技术

生物处理技术依托微生物降解作用去除污染物,无需大量化学药剂,契合海上绿色开发需求,经优化后适

配高盐、高含油的海上采油水特性,实际应用进展如下:

(1) 高效微生物菌剂研发与应用。筛选适配海上高盐环境的本土石油降解菌,包含5种核心菌株,无生物安全性风险,可直接适配采油水高矿化度特性,无需额外调节水质。现场应用中,将菌剂与隔油池工艺结合,已在厦门观音山沙滩油污修复工程中落地,实现高效除油效果。(2) 紧凑型生物处理工艺与设备。采用一体化颗粒污泥反应器,以钙基膨润土、钠基膨润土为基材制备颗粒污泥,接种降解菌后41天即可培养成熟,适配海上平台狭小空间。在南海西部油田现场应用中,采用厌氧-好氧联用工艺,反应器运行稳定,无需复杂运维。(3) 生物-电化学耦合改良技术。构建双室微生物燃料电池系统,阳极接种油田污泥降解污染物,阴极处理氨氮,系统可稳定输出电压,同时实现污染物降解,连续运行180天仍保持高效处理状态,已完成实验室验证并逐步推进现场中试。

4.2 耦合处理技术

耦合处理技术整合不同工艺优势,简化处理流程、提升处理效率,适配海上平台流程集约化需求,核心以物理-化学、物理-生物耦合为主,实际应用如下:(1) 物理-化学耦合工艺优化。采用密闭气浮与注水系统耦合设计,形成高效短流程就地分水工艺,处理流程较传统工艺缩短近一半,30分钟内可完成处理并回注。胜利油田海洋采油厂CB20C平台应用该工艺,累计处理生产水15万吨,运行稳定可靠。(2) 膜-吸附耦合技术应用。将改性超滤膜与亲疏水组合纤维吸附材料联用,膜组件负责截留细小颗粒,吸附材料去除微量油分,设备采用撬装化设计,仅需130平方米即可实现传统240平方米设备的处理功能,适配海上空间限制。(3) 物理-生物耦合工艺应用。采用旋流分离与生物反应器耦合模式,旋流分离预处理去除大部分游离油和悬浮物,降低生物反应器负荷,生物反应器接种耐高盐降解菌,实现难降解有机物高效降解。该工艺已在渤海某海上平台中试应用,处理后出水达标率稳定在98%以上,运维成本较单一生物处理

工艺降低20%,适配海上高盐、高含油水质特点。

4.3 其他新型高效处理技术

此类技术聚焦绿色、高效、低成本,针对性解决海上采油水处理中的痛点难题,经现场验证后逐步推广应用,具体如下:(1) 微波辅助处理技术。采用高效微波浸渍法制备疏水多孔吸附材料,仅需4分钟即可完成制备,水接触角高达146.3°,饱和吸附量可达自身重量的149倍,重复使用15次后性能衰减仅5%,已由中石化宁波新材料研究院研发成功,具备规模化应用潜力。(2) 超声波辅助处理技术。利用超声波的空化和热效应辅助破乳分离,可显著降低采油水黏度,提升分离效率,与常规破乳工艺联用时,能进一步优化处理效果,目前已开展现场中试,重点优化超声参数以适配海上低能耗要求^[4]。

结束语

海上采油水处理技术的发展始终围绕高效化、小型化、绿色化、资源化的方向推进,常规处理技术作为基础保障,经不断优化已实现稳定应用,深度处理技术有效解决了微量污染物去除难题,新型处理技术则为绿色高效处理提供了新路径。结合当前技术应用现状,仍面临核心技术适配性不足、运维成本偏高、复杂水质处理难度大等问题。未来需进一步优化技术工艺,强化多技术耦合应用,推动核心设备国产化,提升技术的经济性与稳定性,助力海上油田绿色可持续开发。

参考文献

- [1] 卢才通.海上油气平台生产水处理工艺及技术研究[J].化工管理,2025(9):129-131.
- [2] 王胜,刘敏,段铮,万钧,郭沛文,王瑶,马喜超,史仕荧.海上油田大处理量井下油水分离技术研究及应用[J].中国海上油气,2023,35(5):164-170.
- [3] 罗京.海洋石油低渗透油藏回注污水处理技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(23):181-183.
- [4] 王雄武.海上油田采油污水处理方式及发展趋势[J].石油石化物资采购,2023(8):125-127.