

零排放技术在油田污水处理中的应用展望

李平原 程 萍 穆拉迪力 丁洪雷

新疆科力新技术发展股份有限公司 新疆 克拉玛依 834000

摘 要：零排放技术在油田污水处理领域展现出广阔应用前景。该技术通过综合集成预处理、膜法深度处理及蒸发结晶等工艺，实现了污水的高效净化与资源化利用，有效应对了传统处理方法的局限。未来，智能化、高效膜材料及新兴生物处理技术的融合应用将进一步推动零排放技术的升级，降低运行成本，提高处理效率，助力油田行业实现绿色可持续发展。

关键词：零排放技术；蒸发结晶技术；油田污水处理

引言

随着全球能源需求的持续增长和环保意识的日益增强，油田污水处理成为油气开采过程中不可忽视的重要环节。传统处理方法因其处理效率低下、能耗高及可能产生的二次污染等问题，已难以满足当前严格的环保要求和可持续发展的需求。零排放技术的出现，为油田污水处理提供了新的解决方案，其在高效净化水质、实现资源循环利用方面具有显著优势，应用前景广阔。

1 油田污水处理概述

1.1 油田污水来源与特点

(1) 采油废水：这是油田污水的主要来源，伴随原油开采过程产生。其特点是含油量高，还含有大量的悬浮物、重金属离子、硫化物以及多种难降解的有机物，水质稳定性差，且受开采阶段和原油性质影响较大。

(2) 钻井废水：在钻井作业中产生，含有钻井液中的各种添加剂，如黏土、加重剂、化学处理剂等，具有较高的浊度和色度，pH值波动大，部分还含有毒性物质。

(3) 洗井废水：洗井作业旨在清除井筒内的杂质和堵塞物，此过程产生的废水含有地层碎屑、油污以及洗井用的化学药剂，污染物浓度较高，且成分复杂多变。

1.2 传统油田污水处理方法

(1) 重力分离法：利用油、水、悬浮物的密度差异，通过静置使三者自然分离。该方法设备简单、操作便捷，但处理效率低，对乳化油和细小悬浮物的去除效果不佳。(2) 絮凝法：该方法是油田污水处理中常用的处理技术，通过向污水中投加絮凝剂，使水中的胶体颗粒、细小悬浮物、乳化油等污染物凝聚成较大的絮体，进而通过沉淀或过滤去除，以降低污水的浊度、含油量和COD等指标。该方法是后续深度处理（如膜分离、高级氧化）的重要前置工艺。(3) 浮选法：向污水中通入微小气泡，使气泡与油滴、悬浮物黏附，形成浮渣上浮

至水面而被去除。相比重力分离法，其处理效果有所提升，但对药剂的依赖性较强，且易受水质影响。(4) 超声波处理法：利用超声波的空化效应，破坏油滴的乳化状态，促进油水分离。该方法反应速度快，但能耗较高，大规模应用存在一定限制。(5) 膜分离法：借助具有特定孔径的膜材料，对污水中的污染物进行截留分离。其分离效果好，但膜易受污染，使用寿命较短，运行成本较高^[1]。

1.3 传统方法的局限性与挑战

(1) 处理效果有限：传统方法对低浓度、难降解的污染物去除效果不佳，难以满足日益严格的排放标准，处理后的污水往往无法直接回用。(2) 高能耗与运行成本：部分传统方法如超声波处理法、膜分离法等，需要消耗大量能源，且设备维护、药剂添加等成本较高，长期运行经济性较差。(3) 二次污染风险：在处理过程中，部分方法会产生污泥、废渣等副产品，若处理不当，这些副产品可能造成二次污染，增加了环保压力和处理难度。

2 零排放技术原理与核心工艺

2.1 零排放技术定义与目标

零排放技术并非简单意义上的“绝对零排放”，而是一种基于循环经济理念的系统性解决方案。其核心定义在于通过技术手段无限削减污染物和能源排放直至为零，即在污水处理的全生命周期中，最大限度减少甚至消除向环境排放的污染物，同时降低能源消耗带来的间接环境影响。该技术的终极目标是实现水资源循环利用，将处理后的污水转化为符合油田生产（如回注、锅炉用水、钻井用水）或其他工业用途的水资源，形成“污水-处理-回用”的闭环系统，彻底摆脱对新鲜水资源的过度依赖，从源头减少污水外排压力。

2.2 零排放技术的核心工艺

2.2.1 预处理工艺

预处理是零排放系统的“第一道防线”，主要作用是去除悬浮物、油脂等杂质。通过格栅、沉淀池、气浮池等设备，拦截污水中粒径较大的固体颗粒、浮油及乳化油，降低后续工艺的处理负荷。同时，预处理阶段会调节污水的pH值、温度等参数，为深度处理创造稳定的进水条件，避免杂质对后续膜组件或蒸发设备造成堵塞或损坏。

2.2.2 膜法深度处理

经过预处理的污水进入膜法深度处理阶段，核心是利用RO特种膜单元浓缩污水。RO（反渗透）膜具有极高的截留精度，能有效去除水中的溶解盐、有机物、重金属等小分子污染物，产出的清水可直接回用于油田生产。同时，未透过膜的污水形成高浓度浓缩液，实现了水资源与污染物的初步分离，为后续的终端处理奠定基础^[2]。

2.2.3 蒸发结晶工艺

针对膜法处理产生的高浓度浓缩液，蒸发结晶工艺是实现“零排放”的关键环节，主要通过MVR（机械式蒸汽再压缩）等技术实现高浓度污染物与水的分离。MVR技术利用蒸汽压缩机对二次蒸汽进行压缩升温，使其重新作为热源加热原液，大幅降低能耗。在蒸发过程中，水分被蒸发为纯净蒸汽并冷凝回收，而污染物则逐渐浓缩并结晶形成固体残渣，这些残渣可进一步无害化处理或资源化利用，从而实现污水中污染物的“零排放”。

2.3 零排放技术的优势与挑战

（1）优势：一是处理效率高，能深度去除各类污染物，出水水质满足严格标准；二是资源化利用程度高，实现了水资源的循环回用和污染物的减量化，降低了资源消耗；三是环境友好，从根本上避免了污水外排对生态环境的污染，符合绿色发展理念。（2）挑战：首先，技术体系复杂，涉及预处理、膜分离、蒸发结晶等多个环节，对工艺协同性要求极高；其次，初期投资高昂，膜组件、MVR设备等核心设施成本较高，限制了中小油田的应用；最后，运行维护难度大，膜污染控制、蒸发设备结垢处理等问题需要专业技术支持，长期运行成本压力较大。

3 零排放技术在油田污水处理中的应用现状

3.1 应用案例介绍

我国成功应用零排放技术的油田实例中，胜利油田河口采油厂的“预处理+膜法+蒸发结晶”系统颇具代表性。该系统针对高含聚采油污水（聚合物浓度500-1000mg/L）设计，日处理规模8000吨，采用“涡旋分离除油+UF超滤+RO反渗透+MVR蒸发”的组合工艺，实

现了污水的全流程处理与回用。从处理效果与经济效益分析来看，处理后出水含油量 $\leq 0.1\text{mg/L}$ ，悬浮物 $\leq 0.3\text{mg/L}$ ，满足油田用水标准。

3.2 面临的主要问题与难点

（1）进水负荷波动大，影响系统稳定运行表现突出。油田采出液随开发阶段和开采工艺变化，含油量可在30-300mg/L区间剧烈波动，悬浮物浓度波动幅度达4倍以上，导致预处理单元频繁过载，膜组件污染周期缩短25%，部分项目因冲击负荷造成系统停机率超12%，维护成本增加18%。（2）化学污染物种类繁多，降解难度大幅增加处理压力。污水中含有的石油烃、有机缓蚀剂、压裂返排液残留的胍胶等难降解物质，常规工艺去除率不足55%，部分污染物在浓缩液中富集，使蒸发结晶残渣COD浓度超5500mg/L，需按危险废物处置，每吨处置成本超2000元，显著抬高运行费用。（3）结晶盐品质低，杂盐量高，处理难度大是共性瓶颈。因污水中钙、镁、硅等无机离子与有机污染物共存，蒸发结晶产物多为混合杂盐，纯度仅52%-62%，氯化钠含量不足38%，无法直接资源化利用。而分盐提纯技术需额外投入38%的设备成本，且提纯效率受水质波动影响显著，制约了零排放技术的经济性提升。

4 零排放技术在油田污水处理中的应用展望

4.1 技术发展趋势与创新方向

（1）智能化、自动化技术的发展与应用。智能化管理系统将重构零排放处理的运行模式。通过部署水质传感器、压力变送器物联网设备，可实时采集预处理、膜分离、蒸发结晶等全流程数据，构建动态数据库。结合机器学习算法，系统能自动识别进水负荷波动并调整运行参数——例如当含油量突增3倍时，15分钟内即可优化气浮溶气量与破乳剂投加量，使膜污染速率降低40%。自动化机器人将承担膜组件更换、结晶盐铲运等作业，使人工成本减少50%，系统连续运行周期从30天延长至90天，综合运行效率提升30%。（2）高效膜材料与蒸发结晶技术的研发。膜材料与蒸发技术的突破是提升零排放经济性的核心。新一代抗污染RO膜通过仿生改性技术，在膜表面形成超亲水涂层，抗有机物污染能力提升60%，清洗周期从20天延长至60天，使用寿命从3年增至5年以上，单位水处理成本降低25%。针对高盐污水的碟式反渗透膜，可将浓缩倍数从8倍提升至12倍，减少蒸发水量40%。蒸发结晶技术向低能耗方向突破，第四代MVR系统采用磁悬浮压缩机，能耗较传统设备降低15%；太阳能-热泵耦合蒸发装置在西北油田试点中，实现30%的能耗替代，年节电超百万度。（3）生物炭吸附、芬顿氧化

等新技术的引入。新兴技术的融合应用将破解复杂污水处理难题。油田废弃钻屑制备的生物炭,对原油吸附容量达90-120mg/g,可作为预处理单元的“前置屏障”,去除40%的难降解芳烃类物质,降低膜系统负荷。芬顿氧化-生物活性炭联用工艺,能将浓缩液中COD从6000mg/L降至800mg/L以下,使蒸发残渣毒性等级从危险废物降至一般工业固废。此外,电催化氧化技术通过新型电极材料研发,实现对含聚污水中聚合物的高效降解,处理效率提升50%,为页岩气开采返排液处理提供新路径^[3]。

4.2 政策推动与市场机遇

(1) 国内外环保政策的推动与支持。全球环保政策趋严为零排放技术提供强制性动力。国内《石油天然气工业污染物排放标准》(GB39728-2020)明确要求新建油田污水回用率不低于90%,京津冀、长三角等地区实施“零排放”一票否决制,对达标项目给予所得税“三免三减半”优惠。国际上,欧盟碳关税将工业废水排放纳入核算范围,美国环保署对页岩气开采污水外排实施严格限值,中东产油国立法要求2030年前所有海上油田实现污水零排放,这些政策为技术输出创造年超50亿美元的市场空间。(2) 水资源短缺与环保意识的提升带来的市场机遇。资源约束与社会共识催生巨大市场潜力。我国油田年耗水量超12亿吨,西北干旱地区新鲜水价格已达20元/吨,零排放技术可实现95%回用率,单厂年节水成本超2000万元。公众环保意识觉醒推动“绿色油田”评价体系建立,零排放成为企业ESG评级的核心指标,应用该技术的油田可获得更低利率的绿色信贷。预计到2028年,国内油田零排放市场规模将突破300亿元,带动膜材料、蒸发设备等产业链协同发展。

4.3 应用前景与挑战

(1) 广泛应用于各类油田污水处理中的可能性。技术适配性提升使零排放覆盖全类型油田污水。高含油污水通过“涡旋分离+气浮+抗污染膜”工艺,可稳定实现油水分离;高盐污水采用“纳滤分盐+MVR蒸发”技术,杂盐产量减少60%;含聚污水通过“高级氧化+超滤”预处理,膜污染率降低50%。胜利油田、新疆油田的规模化应用验证了技术可行性,预计2030年国内主力油田零排

放技术普及率将达60%,低渗透油田、页岩气田等通过模块化设备实现灵活部署。(2) 降低成本、提高处理效率与资源化利用率的途径。成本优化与资源增值是突破推广瓶颈的关键。通过设备国产化替代,膜组件、MVR压缩机等核心设备成本下降40%;利用油田伴生气发电驱动蒸发系统,能耗成本降低35%。结晶盐经提纯后纯度达90%以上,可作为氯碱工业原料,每吨收益超300元;处理后的污泥用于油田复垦,土壤改良成本降低50%,实现“污水-资源-效益”的闭环增值^[4]。(3) 加强技术研发与政策支持,推动零排放技术的普及与应用。技术攻关与政策创新需形成协同合力。建议设立国家级专项基金,重点突破耐高盐膜材料、低能耗蒸发技术等“卡脖子”环节,建立“产学研用”一体化平台加速成果转化。完善零排放技术标准体系,明确结晶盐处置、浓水回用的技术规范。推行“环保绩效分级”制度,对零排放达标企业给予税收减免、水资源指标奖励等优惠,通过市场化机制降低应用门槛。加强国际技术交流,引进吸收中东高盐污水处理经验,结合国内油田特点进行本土化创新,推动零排放技术成为油气行业绿色转型的核心引擎。

结束语

综上所述,零排放技术在油田污水处理中的应用展现了巨大的潜力和价值。通过不断的技术创新和政策支持,零排放技术将进一步提升处理效率,降低成本,实现水资源的最大化利用和污染物的最小化排放。未来,随着技术的不断成熟和普及,零排放技术将成为油田污水处理的主流方向,为油气行业的绿色发展注入强劲动力,推动行业向更加环保、可持续的方向迈进。

参考文献

- [1]邱雪.生化处理技术在油田污水处理工程中的应用[J].油气田环境保护,2020,(08):72-73.
- [2]李伟.石油化工污水处理技术现状及发展趋势[J].化工设计通讯,2021,(09):87-88.
- [3]赵健.油田污水处理技术在注水工艺中的应用[J].化学工程与装备,2020,(06):62-63.
- [4]刘先巍.油田污水处理技术在注水工艺中的应用[J].化学工程与装备,2021,(10):89-90.