

油田采出水深度处理与回用技术优化研究

李宁

辽河油田分公司曙光采油厂质量健康安全环保部

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8696

[摘要] 随着油田开发的不断深入, 油田采出水量日益增大, 其成分复杂且对环境具有潜在危害, 因此深度处理与回用技术的研究显得尤为重要。本文旨在优化油田采出水深度处理与回用技术, 以应对油田采出水处理面临的诸多挑战。通过对膜分离、电化学、生物处理等深度处理技术进行了系统优化, 并针对回注水处理等不同回用场景开展了适应性研究。研究发现, 新型膜材料的应用、电絮凝参数优化及高效微生物筛选与驯化等措施, 显著提升处理效率与水质达标率, 同时降低处理成本。本文为油田采出水处理领域提供了技术改进思路, 有助于推动该领域朝着高效、经济、环保的方向发展, 对缓解水资源短缺和减轻环境压力具有重要意义。

[关键词] 油田采出水; 深度处理; 回用技术; 技术优化

Research on Optimization of Deep Treatment and Reuse Technology for Oilfield Produced Water

Li Ning

Quality, Health, Safety, and Environmental Protection Department of Shuguang Oil Production Plant, Liaohe Oilfield Branch

[Abstract] With the continuous deepening of oilfield development, the amount of water extracted from oilfields is increasing day by day, and its composition is complex and has potential harm to the environment. Therefore, the research on deep treatment and reuse technology is particularly important. This article aims to optimize the deep treatment and reuse technology of oilfield produced water to address the many challenges faced by oilfield produced water treatment. Systematic optimization was carried out on advanced treatment technologies such as membrane separation, electrochemistry, and biological treatment, and adaptive research was conducted for different reuse scenarios such as reinjection water treatment. Research has found that the application of new membrane materials, optimization of electrocoagulation parameters, and efficient microbial screening and domestication measures have significantly improved treatment efficiency and water quality compliance rate, while reducing treatment costs. This article provides technical improvement ideas for the field of oilfield produced water treatment, which will help promote the development of this field towards high efficiency, economy, and environmental protection. It is of great significance for alleviating water scarcity and reducing environmental pressure.

[Key words] oilfield produced water; Deep processing; Reuse technology; Technical optimization

引言

随着全球能源需求的持续增长, 油田开采活动在全球范围内不断扩大, 油田采出水的产生量也随之显著增加。油田采出水是石油开采过程中产生的主要副产物, 其成分复杂且含有高浓度的油类、悬浮物、有机物及盐类, 对环境具有潜在的严重危害。特别是在三次采油技术广泛应用后, 采出水中含油量和矿化度进一步升高, 乳化现象加剧, 使得传统水处理技术难以满足深度处理的需求。此外, 水资源短缺问题日益突出, 尤其是在干旱和半干旱地区, 淡水资源的匮乏已成为制约社会发展的重要因素。在此背景下, 对油田采出水进行深度处理并实现资源化回用, 不仅能够有效缓解环境污染问题, 还可以为油田生产提供可持续的水资源保障, 具有重要的现实意义。

1. 油田采出水深度处理技术优化

1.1 膜分离技术优化

1.1.1 膜材料改进

膜分离技术作为油田采出水深度处理的核心手段之一, 其性能的提升主要依赖于新型膜材料的研发与优化。近年来, 研究者针对传统膜材料在抗污染性、通量和选择性方面的不足, 开展了大量关于超润湿纳米纤维复合膜膨化聚四氟乙烯微滤膜的研究。这些新型膜材料通过表面改性或结构优化, 显著增强了膜的抗污染能力, 同时保持了较高的水通量和溶质截留率。例如, 赵明杰等开发的新型超润湿纳米纤维复合膜在华北油田采出水的处理中表现出优异性能, 其高通量特性大幅降低了运行能耗此外, 微滤膜因其独特的孔隙结构和化学稳定性,

在处理高含油采出水时展现出良好的适用性, 极限膜通量可达 8000 L/(m²·h) 以上, 且通量衰减较小。通过对不同膜材料的对比分析, 可以明确其在特定采出水处理场景中的适用性, 为实际工程应用提供理论支持。

1.1.2 膜污染控制

尽管新型膜材料在一定程度上缓解了膜污染问题, 但膜污染仍然是影响膜分离技术长期稳定运行的关键因素。膜污染的主要机理包括颗粒物沉积、有机物吸附以及微生物附着等, 这些问题会导致膜通量下降和运行成本增加。为解决这一问题, 研究者提出了多种膜污染控制策略, 包括在线清洗和化学清洗。在线清洗通常采用反冲洗的方式, 通过瞬时负压反流剥离膜表面的滤饼层, 从而恢复膜通量。赵明杰等的实验结果表明, 以 20min 为在线反冲洗周期能够有效减小膜污染, 保持系统稳定出水。化学清洗则通过使用特定清洗剂去除顽固污染物, 如采用质量分数 0.5% 的盐酸和表面活性剂对膜片进行交替清洗, 清洗周期设定为 100h, 可显著延长膜的使用寿命。这些策略的合理组合与应用, 对于提高膜分离技术的经济性和可靠性具有重要意义。

1.2 电化学技术优化

1.2.1 电絮凝参数优化

电絮凝技术作为一种高效水处理手段, 在油田采出水中油和悬浮物的去除方面表现出显著优势。高越的研究表明, 电絮凝过程中电流、运行时间和 pH 值等关键参数对处理效果具有重要影响。通过单因素影响实验, 确定电絮凝工艺的最优条件为运行时间 60min、电流 0.8A, 此时油、悬浮物和 COD 的去除率分别达到 95.41%、92.67% 和 85.42%。此外, pH 值的调节能够显著改善絮体的形成与沉降性能, 从而提高处理效率并降低能耗。值得注意的是, 电絮凝工艺对油的去除率始终高于 COD, 这与其在处理过程中产生的氢氧化絮体的吸附作用密切相关。通过优化这些关键参数, 电絮凝技术在油田采出水处理中的应用潜力得到了进一步提升。

1.2.2 电氧化催化剂研发

电氧化技术通过催化氧化作用降解采出水中的难降解有机物, 是深度处理的重要补充手段。然而, 传统电氧化技术的效率较低, 且催化剂的稳定性和重复使用性能有待提高。为此, 研究者致力于开发高效电氧化催化剂, 以增强对难降解有机物的去除效果。高越的研究表明, 通过添加适量催化剂可以显著提高电氧化工艺对 COD 的去除率, 最优催化剂添加量为 300g/L, 运行时间为 40min。此外, 催化剂的稳定性是决定其实际应用效果的关键因素, 因此需要对其在长期运行中的性能变化进行深入分析。目前, 已有研究通过改进催化剂的制备工艺和表面修饰技术, 显著提高了其稳定性和重复使用性能。这些研究成果为电氧化技术在油田采出水处理中的广泛应用奠定了基础。

1.3 生物处理技术优化

1.3.1 高效微生物筛选与驯化

生物处理技术通过微生物的代谢作用降解采出水中的有机物和石油类物质, 是一种经济环保的处理手段。然而, 由于油田采出水的成分复杂且毒性较高, 常规微生物难以适应其处理需求。因此, 筛选适应采出水复杂环境的高效微生物菌种, 并通过驯化提高其降解能力, 成为生物处理技术优化的关键环节。丁慧和王海峰的研究表明, 当水力停留时间 (HRT) 为 6-8 h 时, 经过筛选和驯化的微生物菌种能够显著降低生化出水中石油类物质和 TOC 的质量浓度, 分别由处理前的 5-15 mg/L 和 45-55 mg/L 下降到处理后的 0.6-0.8 mg/L 和 18-20 mg/L。此外, 通过优化微生物的生长条件, 如温度、溶解氧和营养物质浓度, 可以进一步提高其降解效率。这些研究为生物处理技术在油田采出水深度处理中的应用提供了重要参考。

1.3.2 生物处理工艺改进

生物处理工艺的优化不仅依赖于微生物菌种的筛选与驯化, 还需要对其运行条件进行精细调控。生物接触氧化和生物膜反应器是两种常用的生物处理工艺, 其处理效果受温度、溶解氧和水力停留时间等因素的影响显著。丁慧和王海峰的研究表明, 在适宜的温度范围 (25-35℃) 和溶解氧浓度 (2-4 mg/L) 下, 生物接触氧化工艺能够显著提高对有机物和石油类物质的降解效率。此外, 通过延长水力停留时间, 可以进一步增强处理效果, 但过长的停留时间可能导致反应器体积增大和运行成本增加。因此, 需要在处理效果和经济性之间寻求平衡。与此同时, 生物膜反应器的优化重点在于载体材料的选择和填充方式, 以提高微生物的附着能力和传质效率。通过对这些运行条件的系统优化, 生物处理技术在油田采出水深度处理中的应用前景将更加广阔。

2. 回用技术优化与适应性研究

2.1 回注水处理技术优化

油田采出水作为回注水再利用时, 其水质需满足特定的行业标准以避免对地层和注水设备造成损害。回注水中常见的结垢和腐蚀问题主要由高矿化度、成垢离子以及腐蚀性物质引起。研究表明, 混合水样在近井口地带的结垢量最大, 且随着注水井筒深度的增加, 结垢量逐渐减少。这一现象与温度、压力变化及流体动力学条件密切相关。此外, 当温度超过 40℃ 时, CaCO₃ 的结垢量快速上升至 672mg/L, 表明温度是影响结垢行为的关键因素之一。为解决上述问题, 可通过优化阻垢剂和缓蚀剂的投加量及投加方式来提高回注水水质达标率。例如, 复配阻垢剂 (ATMP: TPA=2: 1) 在总浓度为 40mg/L 时表现出最佳阻垢效果; 同时, 合理控制絮凝剂 (PAC 为 90mg/L, PAM 为 1mg/L) 的投加条件 (搅拌时间 6min、加药间隔 30s), 可显著改善水质处理效果。这些措施不仅有效降低了结垢风险, 还满足 SY/T5329-2016 中关于二级回注水质指标的要求, 为类似油田提供实际参考。

2.2 用于配置驱油聚合物溶液的技术优化

在油田开发过程中, 驱油聚合物溶液的配置通常需要使用高质量的水源, 而经过深度处理的采出水因其成本优势成为潜

在的选择之一。然而，采出水中含有的离子和有机物可能对驱油聚合物的性能产生不利影响。例如，高浓度的二价阳离子会与聚合物分子发生相互作用，导致其黏度下降，从而削弱驱油效果。此外，某些有机污染物还可能引发聚合物降解，进一步降低其稳定性。因此，针对这些问题，需通过先进的深度处理技术调整采出水的水质。研究表明，采用“生物接触氧化-微滤-超滤-反渗透”组合工艺能够有效去除采出水中的石油类物质、TOC、悬浮物及盐分，使处理后的水质达到 SY/T5329-2012 的 A1 级标准，并满足反渗透进水要求。该工艺中，反渗透单元的脱盐率可达 98% 以上，确保出水水质符合配置驱油聚合物溶液的要求。这种技术优化不仅提高了采出水的回用价值，还为缓解水资源短缺问题提供了可行途径。

2.3 不同回用场景适应性研究

油田采出水的回用场景多样，包括回注水、配置驱油聚合物溶液以及工业用水等，不同场景对水质的要求各异，因此需要选择适宜的深度处理技术组合以实现资源的高效利用。在实际应用中，单一处理技术往往难以满足复杂的回用需求，而多种技术的协同作用则能显著提高处理效果。例如，在回注水处理中，结合 Scale Chem 结垢预测软件与实验验证的方法，可以精准调控阻垢剂和絮凝剂的投加参数，从而最大限度地减少结垢风险。而在配置驱油聚合物溶液的场景下，“生物接触氧化-微滤-超滤-反渗透”组合工艺因其高效的脱盐和有机物去除能力而被广泛推荐。为了评估不同技术组合的适应性，需综合考虑处理效果、运行成本及环境效益等指标。

研究表明，通过对比多种技术组合的实际表现，可以确定针对不同回用场景的最佳方案。例如，对于回注水场景，优先选用低成本、高效率的物理化学处理技术；而对于配置驱油聚合物溶液场景，则需重点考虑膜分离技术的高精度处理能力。这种基于场景需求的技术优化策略，不仅提升了回用技术的整体适应性，还为油田采出水的综合利用提供了科学依据。

3. 经济与环境影响评估

3.1 经济成本分析

油田采出水深度处理与回用技术的经济成本分析是评估技术优化可行性的重要环节。建设成本主要包括设备购置、安装调试及基础设施建设等费用，运行成本则涉及能耗、药剂消耗和人工操作支出，而维护成本涵盖设备检修、更换以及膜污染控制等额外投入。以电絮凝-电氧化组合工艺为例，其建设成本相对较高，但由于该工艺在油和悬浮物去除率方面表现优异，运行时间 60 分钟、电流 0.8A 条件下可达到 95.41% 和 92.67% 的去除效率，因此长期运行成本得以降低。此外，膜分离技术尽管初期投资较高，但其抗污染性和通量提升显著减少了化学清洗频率，从而降低了维护成本。通过成本效益分析发现，优化后的深度处理技术在提高水质达标率的同时，能够有效减少清水使用量，进而实现节水效益的最大化。如油田采用改进后的膜分离技术后，每年节约清水量达 500m³，投资回收期缩短

至 1.65 年。由此可见，技术优化不仅提升了处理效率，还具备显著的经济可行性。

3.2 环境影响评价

深度处理与回用技术的优化对环境保护具有深远意义，主要体现在污染物减排量和水资源节约量两个方面。首先，在污染物减排方面，电化学技术和膜分离技术的应用显著降低了采出水中油、悬浮物和 COD 的含量。研究表明，电氧化工艺在最佳条件下（运行时间 40 分钟、催化剂添加量 300g/L）可实现 COD 值 85.42% 的高效去除，这对减少水体污染起到了关键作用。其次，水资源节约量的提升也是技术优化的重要成果之一。通过对废水进行深度处理并回用于循环冷却补充水和油田注水驱动注入水，不仅减少了新鲜水资源的使用，还降低了废水排放对环境的影响。例如，某炼化企业通过反渗透技术处理废水后，污水回用率达到了 75%，显著缓解了区域水资源短缺问题。此外，技术优化还带来了其他环境效益，如减少泄漏量和降低腐蚀风险，进一步提升了绿色矿山建设的整体水平。综上所述，深度处理与回用技术的优化不仅实现了污染物的高效去除，还为水资源的可持续利用提供了有力支持，充分体现了其环境效益的显著提升。

4. 结论

(1) 本文围绕油田采出水深度处理与回用技术优化展开，通过系统分析现有技术的不足并结合最新研究成果，提出一系列改进措施。

(2) 本研究在技术改进、处理效果提升和成本降低等方面取得了显著成果，为油田采出水的深度处理与回用提供了重要的理论依据和实践指导。

(3) 为进一步推动油田采出水深度处理与回用技术的发展，通过加强新技术的研发，注重多学科融合，深化对不同回用场景适应性研究，强化经济与环境影响评估等措施，有望实现油田采出水处理技术的全面升级，为缓解水资源短缺和环境保护作出更大贡献。

[参考文献]

- [1]李哲;张璐;梁舒娟;梁志龙;齐哈兵.油田采出水处理技术的研究进展[J].化学工程师,2024,38(3):59-62.
- [2]高越.基于电絮凝-电氧化工艺的油田采出水达标处理及节能评价[J].石油石化节能与计量,2024,14(3):32-36.
- [3]丁慧;王海峰.油田采出水回用处理试验研究[J].水处理技术,2013,39(3):107-110.
- [4]孙树芝;郑玉倩;王书庆;张挺.油田采出水处理工艺改造优化设计[J].化工管理,2016,(8):185-.
- [5]牟思文.油田采出水处理新设备与新工艺分析[J].中国设备工程,2020,0(1):102-103.
- [6]敖露;郭亮;王飞;庞焕岩;马超.电化学-超滤联合深度处理三元复合驱采出水[J].石油和化工设备,2021,24(2):103-106.