

# 循环经济导向下油田污水深度处理及资源化利用技术研究

安超群 (马来亚大学, 吉隆坡 50603)

**摘要:** 循环经济是推动油气绿色转型的重要支撑, 油田污水深度处理与资源化利用是破解资源型缺水地区油田开发水资源矛盾的核心途径。本文以西北某低渗透碎屑岩油田为研究对象, 针对其高含水开发阶段污水水质复杂、现有处理系统效能不足等问题, 探究气浮-膜分离、高级氧化-混凝沉淀等深度处理技术, 分析分质回注驱油、余热梯级利用、多元化外供等资源化利用路径, 构建循环经济导向下油田污水“处理-回用-循环”技术体系, 以期为同类油田污水资源化利用及绿色低碳开发提供实践参考。

**关键词:** 循环经济; 油田污水; 深度处理; 资源化利用; 油气绿色转型

中图分类号: X741 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 011-0044-03

## Research on Advanced Treatment and Resource Utilization Technologies for Oilfield Wastewater under the Context of Circular Economy

An Chaoqun (University of Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia)

**Abstract:** The circular economy serves as a crucial pillar in driving the green transformation of oil and gas industries. The advanced treatment and resource utilization of oilfield wastewater are key strategies to address the water resource challenges in oilfield development in resource-based water-scarce regions. This paper focuses on a low-permeability clastic oil reservoir in Northwest China. Addressing issues such as complex wastewater quality during the high water-cut development stage and the insufficient performance of existing treatment systems, it explores advanced treatment technologies like air flotation-membrane separation and advanced oxidation-coagulant precipitation. It also analyzes resource utilization pathways like quality-based reinjection for oil displacement, cascade utilization of waste heat, and diversified external supply. The aim is to establish a “treatment-reuse-recycling” technical system for oilfield wastewater under the guidance of the circular economy, providing practical references for similar oilfield wastewater resource utilization and green, low-carbon development.

**Keywords:** circular economy; oilfield wastewater; advanced treatment; resource utilization; green transformation of oil and gas

循环经济作为绿色发展的核心路径, 推动油气行业向低碳化、资源化转型已成为行业发展必然趋势。油田开发过程中伴生的大量含油污水, 既是水资源短缺地区可挖掘的潜在水资源, 也是实现油气开发与生态保护协同发展的关键切入点。我国西北地区低渗透油田居多, 多数已进入高含水开发阶段, 污水排放量巨大, 而该区域人均水资源占有量远低于全国平均水平, 水资源供需矛盾突出。将循环经济理念融入油田污水处置, 通过深度处理实现资源化利用, 既能破解油田开发水资源瓶颈, 也能践行绿色油气发展理念, 助力行业实现资源循环、节能降耗的发展目标。

### 1 工程概况

某油田位于我国西北地区, 为典型低渗透碎屑岩油藏, 自 20 世纪 90 年代开发建设至今, 已进入高含水开发阶段。该油田日产原油  $2.8 \times 10^4$ t, 每日伴生含油污水达  $15 \times 10^4$ m<sup>3</sup>, 污水含油量 200 ~ 800mg/L、COD 浓度 400 ~ 1200mg/L、悬浮物含量 150 ~ 500mg/L, 水质复杂且波动幅度较大。油田所处区域为资源型缺水地区, 人均水资源占有量仅为全国平均水平的 35%, 水资源供需矛盾突出。现有污水处理系统存在

处理能力不足、出水水质不稳定、资源化利用率偏低等问题, 为此油田启动污水深度处理及资源化利用工程, 设计日处理规模  $12 \times 10^4$ m<sup>3</sup>/d, 采用“预处理 + 深度处理 + 分质回用”技术路线推进工程建设。

### 2 循环经济导向下油田污水深度处理方法

#### 2.1 气浮-膜分离组合物理处理技术

以循环经济减量化、资源化为核心导向, 实施油田污水深度物理处理。采用溶气气浮与超滤-反渗透双膜组合工艺, 固化溶气压力 0.4MPa、气水比 8 : 1、停留时间 15min 的气浮运行参数, 在进水含油 200-800mg/L 条件下, 将出水含油量控制在 20mg/L 以内。超滤选用截留分子量 10 万道尔顿的 PVDF 膜组件, 运行通量 60-80L/(m<sup>2</sup> · h), 反渗透采用低压复合膜, 操作压力 1.2-1.5MPa, 脱盐率稳定  $\geq 98.5\%$ 。工艺运行中严格管控膜组件清洗周期与气浮刮渣频率, 超滤前端配套 5 $\mu$ m 保安过滤单元, 反渗透系统设定合理浓水回流比例, 通过物理分离协同作用减少化学药剂投加, 从源头控制污泥产生量, 稳定出水悬浮物、含油等核心水质指标, 为后续资源化利用环节提供水质稳定、污染物浓度达标的进水条件, 全程践

行循环经济减量化处理要求<sup>[1]</sup>。

## 2.2 高级氧化-混凝沉淀化学处理技术

立足循环经济污水深度处理要求,针对难降解有机物采用芬顿氧化-混凝沉淀耦合处理工艺。此工艺精准破解油田污水中酚类、多环芳烃难降解的行业痛点,避免过量投加造成二次污染与成本浪费,在保证去除效率的同时,兼顾低碳运行与资源节约,契合循环经济高效处理准则。设定芬顿反应pH值3.5、 $H_2O_2$ 投加量800mg/L、 $Fe^{2+}/H_2O_2$ 摩尔比1:4的运行参数,定向降解酚类、多环芳烃等污染物。混凝沉淀采用PAC与PAM复配药剂,PAC投加量150mg/L、PAM投加量2mg/L,执行快速搅拌120s、慢速搅拌15min、静置沉淀30min的操作流程,严控悬浮物与浊度指标。工艺实施中精准调控反应时序与药剂投加点位,芬顿反应后配套pH回调单元,混凝段设置在线水质监测联动投加系统,通过氧化破环与混凝沉降协同作用降低污水中难降解有机物含量,将 $BOD_5/COD$ 比值调控至适宜范围,改善污水可生化性,为后续生物深度处理及资源化利用筑牢稳定工艺基础<sup>[2]</sup>。

## 2.3 电化学-吸附耦合物理化学处理技术

遵循循环经济高效集约化处理原则,构建高浓度油田污水电化学-吸附耦合深度处理系统。该耦合工艺抗水质冲击负荷强、占地面积小、处理效率高,电化学絮凝无需外加大量混凝药剂,改性煤基活性炭吸附容量大且可再生复用,既降低运维难度与处置成本,又满足循环经济集约高效、绿色低碳的处理要求。电化学单元采用铁板阳极、不锈钢阴极,极板间距8cm,设定电流密度 $40A/m^2$ 、电解时间25min,依托阳极溶出絮体去除胶体和乳化油。吸附单元投加8g/L改性煤基活性炭,吸附时间60min,去除残留溶解性有机物与油类<sup>[3]</sup>。全程水力停留时间控制为2.5h,将出水含油量稳定 $\leq 5mg/L$ ,满足低渗透油藏回注水水质控制指标<sup>[4]</sup>。

## 2.4 生物强化处理与能源回收技术

紧扣循环经济能源回收与资源化目标,采用厌氧产能-好氧降解-生物强化三段式深度生物处理工艺。本工艺依托专属优势菌种强化石油烃降解,厌氧段沼气回收实现能源就地转化,好氧段精准调控降低曝气能耗,实现治污、能源回收、成本管控三重统一,完整落地循环经济能源资源化核心理念。UASB厌氧反应器经45天污泥驯化,控制容积产气率 $0.45m^3/(m^3 \cdot d)$ ;改良A/O好氧单元维持溶解氧2.5-3.5mg/L、污泥龄18d,碳氮比调控为100:5。投加浓度 $10^6 CFU/mL$ 的假单胞菌、红球菌优势菌株,强化石油烃降解效果<sup>[5-6]</sup>。按0.85元/ $m^3$ 管控工艺运行成本,通过精

准调控曝气强度、污泥回流比与菌剂投加量,配套厌氧污泥内源消化减量措施,稳定有机物降解效率,出水水质达标碎屑岩油藏注水标准,同步完成厌氧段沼气收集、储存与厂区辅助供能,实现污染物降解与能源循环利用的一体化落地实施<sup>[7]</sup>。

## 3 循环经济导向下油田污水资源化利用技术

### 3.1 分质回注驱油技术,提升油藏采收率

循环经济导向下,以油田污水资源化闭环回注为核心目标,针对低渗透碎屑岩油藏孔隙细小、地质适配性要求高的特征,系统实施污水分质回注技术。依据油藏渗透率差异划分三级注水区块,建立与地质条件匹配的水质控制体系(见表1):A类区块执行常规深度处理回注标准,悬浮物含量控制为5mg/L、粒径中值 $\leq 2\mu m$ ;B类区块采用超滤处理工艺,限定悬浮物 $\leq 3mg/L$ 、粒径中值 $\leq 1.5\mu m$ ;C类特低渗透区块采用反渗透深度处理,严控悬浮物 $\leq 1mg/L$ 、总溶解固体 $\leq 2000mg/L$ <sup>[8]</sup>。配套建设日处理规模 $8.5 \times 10^4 m^3$ 的回注水处理系统,优化水处理单元与注水井网的对接流程,建立分质供水、分层注水的运行机制,通过在线水质监测装置实时调控处理工艺参数,稳定污水回注率稳定达到92%。同时建立回注水质与油藏工况联动调控机制,定期校验监测设备精度,根据地层渗透率动态调整水处理工艺运行参数,按油藏需求精准调配回注水源,实现污水资源与油藏开发的一体化循环利用<sup>[9]</sup>。

表1 低渗透油藏分质回注关键运行参数表

区块类型	回注水压差 /MPa	单井日注量 / $m^3$	注入层位深度 /m	精滤滤料精度 / $\mu m$
A类区块	2.5	120	1800	5
B类区块	3.2	90	2100	2
C类区块	4.0	60	2400	1

### 3.2 聚驱采出水处理回用技术,破解聚合物驱水质难题

围绕循环经济水资源全量利用要求,针对聚合物驱采出水含水解聚丙烯酰胺、黏度高的处理难点,落地实施专项处理回用技术。构建“氧化降黏-混凝除聚-精细过滤”标准化处理工艺,氧化降黏单元采用 $ClO_2$ 氧化剂,设定投加量120mg/L、反应时间45min,完成聚合物降解与黏度调控;混凝除聚单元采用铝盐与阳离子型聚合物复配药剂体系,通过电荷中和与网捕卷扫去除残留聚合物;精细过滤单元配置 $5\mu m$ 精密过滤装置,执行分级过滤与滤芯定期维保制度<sup>[10]</sup>。建立聚驱采出水全流程在线监测体系,实时管控黏度、悬浮物、聚合物含量等关键指标,处理后污水按回注水质要求定向输送至注水井网,规范回注压力、流量调控流程。配套设置药剂自动投加控制系统与过滤单元压差监测装置,定期开展工艺参数校准与设备检修,形成聚驱区块污水“产生-处理-回注”

的闭环运行模式，保障聚合物开发阶段水资源循环利用的稳定实施<sup>[11]</sup>。

### 3.3 余热回收与梯级利用技术，实现能源资源协同循环

以循环经济能源与水资源协同利用为原则，针对油田污水 50—65℃ 的余热禀赋，实施污水余热梯级回收与资源化利用技术。采用板式换热器搭建余热提取系统，对日处理量  $10 \times 10^4 \text{m}^3$  的污水进行热量回收，构建“余热提取—分场景利用—降温回注”的一体化运行流程，板式换热器关键运行参数详见表 2。冬季将回收热量输送至采油作业区，满足办公生活区供暖需求；夏季为生化处理系统提供温控热源，维持系统 30—35℃ 最佳运行温度；换热后将污水温度调控至 35—40℃，再输送至回注管网<sup>[12]</sup>。配套建设余热计量、温度自动调控与换热设备运维体系，优化换热器换热效率、污水流速等运行参数，同步管控污水降温幅度与回注水质。建立换热系统能耗监测与故障预警机制，定期清理换热器换热面以保障换热效率，实现污水热能回收与水资源回用的协同管控，完善循环经济体系下能源—水资源一体化循环模式<sup>[13]</sup>。

表 2 板式换热器余热提取关键技术参数表

换热器型号	换热系数 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{C}$ )	传热面积 $\text{m}^2$	介质流速 $\text{m/s}$	进出口温差 $^{\circ}\text{C}$
BR01	2200	1200	0.9	6
BR02	2500	1500	1.1	7
BR03	2800	1800	1.3	8

### 3.4 多元化外供技术，拓展污水资源利用边界

基于循环经济全域资源化配置理念，在满足油田内部回注刚需基础上，实施处理达标污水多元化外供技术。按外供场景分类制定刚性水质控制标准：农田灌溉用水控制  $\text{COD} \leq 200 \text{mg/L}$ 、石油类  $\leq 10 \text{mg/L}$ 、总盐量  $\leq 2000 \text{mg/L}$ ，配套建设专用供水管网与流量计量装置，执行定期水质抽检制度；工业复用分为两类，反渗透产水（电导率  $\leq 50 \mu\text{S/cm}$ ）用作锅炉补给水，超滤产水（浊度  $\leq 1 \text{NTU}$ ）用作循环冷却水补水；城市杂用水执行  $\text{COD} \leq 50 \text{mg/L}$ 、 $\text{BOD}_5 \leq 10 \text{mg/L}$ 、氨氮  $\leq 10 \text{mg/L}$  标准，搭建与市政管网的接驳系统<sup>[14]</sup>。建立外供水量动态调配机制，依据油田产水量、内部回用量与外部需求实时调整供给规模，配套设置分场景水质在线监测终端与供水管网压力调控装置，构建“油田内循环为主、外部协同利用为辅”的污水资源化格局，实现污水资源跨场景、全域化循环配置<sup>[15]</sup>。

## 4 结束语

循环经济导向下，油田污水深度处理及资源化利用技术研究的核心创新点在于构建了“多元耦合处理+分质精准利用+能源协同回收”的一体化技术体系，突破传统单一处理模式的局限。创新采用多工艺耦合技术，实现不同浓度污水的针对性深度处理，同步通

过生物强化工艺实现污染物降解与沼气回收的协同落地。技术成果方面，已形成适配低渗透油藏的分质回注标准与流程，污水回注率稳定达 92%，余热回收可满足厂区辅助供能需求，多元化外供拓展了资源利用边界，最终实现污水资源闭环循环、能源高效回收，为油气行业绿色转型提供了可复制、可推广的技术范式，彰显了循环经济的集约高效理念

### 参考文献：

- [1] 张婷婷. 油田含油污水处理水质达标与净化技术研究 [J]. 化工安全与环境, 2026, 39(01): 58-61.
- [2] 夏帆. 油田污水处理技术研究 [J]. 清洗世界, 2025, 41(10): 89-91.
- [3] 何晋祥. 油田采油污水处理技术的研究进展 [J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(06): 273-275.
- [4] 孙建, 李鑫. 多层滤料过滤技术在油田污水处理中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(11): 163-165.
- [5] 付文奇. 油田污水处理中的节能策略与实践 [J]. 石油石化节能与计量, 2025, 15(05): 66-70.
- [6] 刘东贤. 广西百色盆地田东油田污水处理及回注设计 [J]. 化学工程与装备, 2023(11): 244-248.
- [7] 孙永强. 基于循环经济的油田污水资源化利用模式探讨 [J]. 石油科技论坛, 2024, 43(03): 56-62.
- [8] 徐万莉. 油田污水深度处理参数的优化 [J]. 化学工程与装备, 2022(05): 268-273.
- [9] 周连庆. 油田含油污水深度处理与回用技术 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(17): 236-237.
- [10] 吴国维. 油田采油污水的深度处理工艺研究 [J]. 山东工业技术, 2016(22): 67.
- [11] 张建军, 牟心鸣, 董滨. 油田采出水深度处理回用水用作消防补给水的试验 [J]. 净水技术, 2016, 35(05): 63-68.
- [12] 邱斌. 浅谈油田污水深度处理与回用 [J]. 黑龙江科技信息, 2016(17): 29.
- [13] 刘小兵, 汪益宁, 刘兵. 大港油田污水资源化利用技术及评价 [J]. 油气田地面工程, 2015, 34(11): 76-78.
- [14] 丁慧. 胜利油田污水回注处理及资源化利用新技术研究 [J]. 油气田环境保护, 2012, 22(04): 37-40+88.
- [15] 骆伟, 王爱军, 张志庆, 等. 新疆油田稠油污水处理资源化利用技术 [J]. 油气田地面工程, 2009, 28(09): 62-63.

### 作者简介：

安超群 (2002-), 男, 汉族, 河北定州人, 硕士, 研究方向: 环境监测与评价、定量风险评估及危险废物控制。