

# 油田采出水生化处理技术应用

宋玉

中石化石油工程设计有限公司，山东省东营市，257000；

**摘要：**油田采出水含有石油类、有机物、悬浮物等复杂成分，具有水质波动大与污染物难降解等特性。生化处理技术涵盖好氧、厌氧及组合工艺，通过微生物代谢降解污染物。然而在实际应用中，面临水质波动冲击生化系统、微生物适应性差、污泥处置易引发二次污染等问题。为此可采取采用新型生化剂与微生物、完善监测控制系统、改进处理系统设计等优化创新措施，以提升油田采出水生化处理效率，实现稳定达标排放与绿色处理目标。

**关键词：**油田采出水；生化处理；应用

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.05.047

随着石油工业的快速发展，油田采出水的处理已成为行业可持续发展的关键问题。油田采出水成分复杂，含有大量石油类物质及重金属等污染物，若未经有效处理直接排放，将对生态环境造成严重破坏。生化处理技术凭借其高效、经济、环境友好等优势，在油田采出水处理领域得到广泛应用。但受水质波动、微生物耐受性等因素制约，其处理效果与稳定性仍面临挑战，所以研究生化处理技术在油田采出水中的应用，对提升处理效能、推动石油工业绿色发展具有重要意义。

## 1 油田采出水的主要成分及特性

油田采出水是指在石油开采过程中，伴随原油一同抽取的水，其主要成分包括水、溶解盐分、有机化合物、重金属及微生物等。根据不同的油田地质条件和原油性质，采出水的化学成分会有所差异。一般而言，油田采出水的盐分浓度较高，含有氯化钠、硫酸钠和碳酸钠等离子，或者含有较高浓度的镁、钙等阳离子，以及铁、锰等重金属元素，这些成分不仅影响水的物理化学性质，还对环境及生态系统构成潜在威胁。

从特性分析，油田采出水水质变化幅度大，不同开采时期、油层区域的水样成分存在明显差异。污染物浓度高且降解难度大，石油类物质与高分子聚合物化学性质稳定，传统处理技术难以实现有效去除，并且该类废水普遍具有高矿化特性，对处理设备腐蚀性强，加上高盐环境还会削弱微生物活性，为生化处理工艺的实施带来巨大挑战。

## 2 生化处理技术原理与分类

### 2.1 好氧生化处理技术

好氧生化处理技术基于有氧条件，借助好氧微生物

的代谢机制实现污染物降解，运行时好氧微生物凭借体内酶系，将油田采出水中的有机污染物转化为二氧化碳、水及自身细胞物质，同时释放能量维持生长与繁殖。在工艺应用层面，活性污泥法通过曝气使微生物形成悬浮絮体，促使其与废水充分混合，进而吸附、氧化分解有机物；生物膜法则依赖附着于载体表面的生物膜，对废水中污染物进行截留与降解，典型装置包括生物滤池、生物接触氧化池等。此类工艺具备处理效能高、反应进程快、剩余污泥产量低等显著优势，可有效去除采出水中大部分可生物降解的有机成分。

### 2.2 厌氧生化处理技术

厌氧生化处理技术依托无氧环境，借助产酸菌、产氢产乙酸菌及产甲烷菌等厌氧微生物的协同代谢实现有机物分解，整个反应历程涵盖水解酸化、产氢产乙酸和产甲烷三个阶段，先是复杂有机物被降解为小分子有机酸，继而转化为氢气、乙酸等中间产物，最终生成甲烷与二氧化碳。

在实际应用中，升流式厌氧污泥床（UASB）通过三相分离器实现气体、液体和固体的高效分离，促使高浓度颗粒污泥层形成，显著提升处理效率；厌氧生物滤池则凭借内部填充的滤料截留微生物，有效延长污泥停留时间。此技术无需持续供氧，能耗较低，适合处理高浓度有机废水，且能产出沼气作为清洁能源。然而，厌氧处理存在启动周期漫长的问题，微生物对环境波动耐受性差，对温度、pH值等运行参数要求苛刻，并且处理后的出水往往难以直接达标，需搭配后续处理工艺以满足排放要求。

### 2.3 组合生化处理技术

组合生化处理技术融合好氧与厌氧工艺优势，通过优化流程组合实现污染物高效去除。厌氧-好氧（A/O）工艺是典型代表，前端厌氧段利用厌氧菌分解大分子难降解有机物，提高废水可生化性，后端好氧段进一步降解小分子有机物并实现氨氮硝化。此外，还有厌氧-缺氧-好氧（A<sup>2</sup>/O）工艺，在A/O基础上增加缺氧段，实现脱氮除磷功能。这种组合模式既能降低能耗、减少污泥产量，又能应对复杂水质。例如：在处理含高浓度石油类和氨氮的油田采出水时，先经厌氧预处理降低有机物浓度，再通过好氧处理去除残余污染物与氨氮，并且结合膜分离技术形成的膜生物反应器（MBR），可进一步提升固液分离效果与处理效率，确保出水水质稳定达标，满足严格的排放要求。

### 3 油田采出水生化处理技术应用问题与挑战

#### 3.1 水质波动对生化系统的冲击影响

油田采出水的水质因开采阶段、油层特性等因素呈现显著波动，这种不确定性对生化处理系统的稳定运行构成严重威胁。其一，有机物浓度的剧烈变化易导致生化系统负荷失衡，当进水有机物浓度突然升高时，微生物代谢速率无法及时响应，会引发处理效率下降、出水水质恶化；而浓度骤降则可能致使微生物营养不足，活性降低甚至死亡。其二，盐度波动同样影响巨大，高矿化度采出水常含有大量无机盐，盐浓度的大幅变化会破坏微生物细胞的渗透压平衡，干扰其正常代谢功能，削弱对污染物的降解能力。其三，石油类物质、重金属离子等污染物的浓度变化，可能超出微生物的耐受阈值造成毒性抑制，使生化系统处理效能大幅衰减，难以维持稳定的污染物去除率<sup>[1]</sup>。

#### 3.2 微生物适应性与抗毒性问题

油田采出水复杂的污染物成分对微生物的适应性和抗毒性提出严峻挑战，一方面，采出水中含有的石油烃类、苯系物等难降解有机物，不仅无法被普通微生物有效分解，还可能对微生物产生毒害作用，破坏细胞结构和酶活性；另一方面，重金属离子具有强毒性和生物累积性，会与微生物细胞内的蛋白质、酶等物质结合，抑制微生物的生长和代谢，甚至导致微生物死亡。除此之外，采出水的高盐环境同样制约微生物活性，过高的盐浓度会使微生物细胞发生质壁分离，影响营养物质吸收和代谢产物排出，降低微生物对污染物的降解效率。微生物对环境变化的适应周期较长，而采出水水质的频繁波动，使得微生物难以快速适应，进一步加剧了处理

系统的不稳定。

#### 3.3 污泥处置与二次污染风险

油田采出水生化处理衍生的污泥因富含多种污染物，若处置不当将导致严重二次污染风险。污泥中浓缩的石油类化合物与重金属离子等有害物质，若采用粗放的填埋处理，极易伴随渗滤液迁移扩散，对土壤及地下水环境造成持续性污染。与此同时，污泥内残留的未完全分解有机物在自然条件下持续发酵，释放硫化氢、氨气等刺激性恶臭气体，不仅恶化区域空气质量，还会对周边居民生活环境产生负面影响。若污泥处理环节消毒流程存在疏漏，其中含有的病原菌、寄生虫卵等微生物将成为潜在污染源，威胁生态安全与人体健康。值得注意的是，传统污泥脱水、干化等处理技术普遍存在能耗高、成本大的问题，部分企业为压缩开支采取非正规处置手段，进一步加剧了环境安全隐患<sup>[2]</sup>。

### 4 油田采出水生化处理技术的优化与创新措施

#### 4.1 采用新型生化剂和微生物

提升油田采出水处理效能的核心在于新型生化剂与微生物技术的创新应用。研发针对性复合生化药剂可有效攻克处理难题，通过筛选具备破乳、絮凝及降解多重功效的药剂，能精准应对采出水中乳化油稳定、有机物顽固分解等困境。以新型生物表面活性剂为例，其可大幅削弱油水界面张力，加速乳化油破乳分离，为后续生化处理环节奠定基础，而功能性高分子絮凝剂则能高效捕获悬浮物与胶体颗粒，降低水体浑浊度，减轻生化系统运行负担。

微生物技术革新聚焦于培育特种菌群以适应严苛环境，借助基因工程技术与定向驯化策略，筛选出耐高盐、抗重金属且具备石油类污染物降解能力的菌株，通过科学调配菌群结构，构建高效复合微生物体系。将烃类降解优势菌株与耐盐微生物协同组合，可形成适应高盐环境的强化降解菌群，在保障微生物活性的前提下，显著增强对石油污染物的分解效能。固定化微生物技术通过将优势菌种锚定在新型载体材料上，提升微生物对极端环境的抵御能力，延长生物膜使用周期，减少污泥产出量，进而稳定提升生化处理系统的整体效能。

#### 4.2 完善监测与控制系统

完善的监测与控制系统是保障生化处理技术稳定运行的核心支撑。首先，应构建全方位的在线监测网络，部署多参数水质传感器，实时监测 COD、氨氮、pH 值、

溶解氧、石油类物质浓度等关键指标，同时对微生物活性、污泥浓度等生物参数进行动态监测，并且利用物联网技术实现数据的实时采集与传输，确保操作人员及时掌握系统运行状态<sup>[3]</sup>。

其次，引入人工智能与大数据分析技术，建立动态预测模型。通过对历史数据和实时监测数据的深度挖掘，预测水质变化趋势与系统运行风险，提前调整工艺参数。例如：当预测到进水有机物浓度升高时，系统自动增加曝气量、延长水力停留时间，保障微生物代谢需求；当监测到微生物活性下降时，及时调整营养物质投加量。

最后，搭建智能化管理平台，实现远程监控与故障预警功能，一旦系统出现异常，平台自动发出警报并推送解决方案，减少人工干预，提升系统的自动化与智能化水平，有效降低因人为操作失误或响应不及时导致的处理效率下降问题。

#### 4.3 改进处理系统设计

在工艺规划中，运用模块化与集成化设计思路，依据水质特征及处理目标，灵活配置预处理、生化处理与深度处理单元。以高浓度有机废水处理为例，增设强化预处理模块，借助高级氧化协同混凝沉淀技术，削减污染物含量，改善废水可生化性，并且在生化处理阶段，采用多级厌氧-好氧串联工艺，实现污染物的分步降解与转化。

在反应器革新层面，致力于开发新型高效处理装置。通过改良厌氧反应器的布水构造与三相分离组件，优化流体力学特性，强化污泥截留效果与污染物传质效率；研制具备高比表面积、优异生物相容性的新型填料应用于生物膜反应器，促进微生物附着生长，提升单位容积处理能力。同时，融合膜分离技术构建 MBR 或 AnMBR 系统，实现固液高效分离，提升污泥浓度与系统处理效能，缩小设备占地空间。此外，系统设计应充分融入节能理念，选用高效曝气设备并配置余热回收系统，降低运行能耗，以及优化污泥处理流程，减少污泥产生量并提升脱水性能，从而有效缓解污泥处置压力。

#### 4.4 资源回收与再利用

资源循环利用是推动油田采出水处理迈向绿色低碳发展的核心路径。在污染物资源化领域，对采出水中石油类物质的回收尤为关键，借助优化后的预处理工艺，配合高效破乳剂与离心分离装置，能够有效实现乳化油的分离提纯，既降低后续处理环节的负荷压力，又能创造可观的经济收益。针对采出水中的无机盐成分，可运

用蒸发结晶、膜分离等先进技术，实现盐分的精准提取与分离，产出的工业用盐可直接应用于化工生产，或作为油田回注用水调配原料，显著降低淡水资源消耗<sup>[4]</sup>。

能源回收层面，厌氧生化处理过程所产生的富含甲烷的沼气，经净化处理后可转化为清洁电力与热能，实现能源的循环再生，达标处理后的采出水经深度净化后，可广泛应用于油田注水、生态灌溉及道路降尘等场景，极大减少新鲜水资源的开采依赖。污泥处理环节同样蕴含资源潜力，通过厌氧发酵产沼、热解制油等技术手段，可将污泥转化为能源或工业原料；而利用污泥中丰富的有机质与矿物质，还能制备生物炭、土壤改良剂等产品，达成污泥处理的减量化、无害化与资源化目标。通过上述资源回收与再利用策略，不仅显著降低处理成本，更有效减少污染物排放，有力推动油田采出水处理向循环经济模式转型升级<sup>[5]</sup>。

#### 5 结语

油田采出水生化处理技术的应用对保障生态环境与石油工业可持续发展意义重大。尽管当前面临水质波动、微生物适应性及二次污染等挑战，但通过采用新型生化剂与微生物、完善监测控制系统、改进处理系统设计等优化创新措施，可有效提升处理效率与稳定性。未来，需进一步加强技术研发与实践探索，深化多技术协同应用，推动智能化升级，从而实现油田采出水的高效处理与资源化利用，助力石油行业绿色低碳转型。

#### 参考文献

- [1] 乔明,于森,孙雁伯,等.油田采出水外排处理厂碳排放核算方法及碳减排路径研究[J].给水排水,2024,60(07):78-84+114.
- [2] 张召召,杜宁波,张红岗,等.油田采出水生化处理技术应用效果评价[J].石油化工应用,2024,43(04):119-122.
- [3] 赵东睿,靳筱宣,余天宝.油田采出水水质影响因素分析及治理措施研究[J].石油化工应用,2023,42(06):74-77.
- [4] 汪洋,魏军,赵高领,等.油田采出水处理工艺应用及认识[C]//宁夏回族自治区科学技术协会.第十七届宁夏青年科学家论坛石油石化专题论坛论文集.中国石油长庆油田分公司第七采油厂;,2021:169-172.
- [5] 潘永强,于丹丹,杜春安,等.基于生化双膜工艺的油田采出水处理与资源化[J].环境工程学报,2021,15(02):530-536.