

油田含油污泥资源化处理技术研究进展

胡浩^{*#}, 曹端帅, 马彩文, 孙洪洋, 徐建根

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年6月26日; 录用日期: 2025年7月28日; 发布日期: 2025年9月9日

摘要

油田含油污泥是石油开采过程中产生的废弃物, 具有成分复杂、含油率高、处置难度大等特点, 若处理不当将对生态环境和人类健康造成严重威胁。近年来, 随着环保法规的日益严格和资源化利用意识的增强, 含油污泥的处理技术研究不断深入, 主要包括物理法、化学法、生物法等处理技术。本文系统综述了主要处理技术的发展现状, 分析了各类技术的适用范围与存在问题, 指出当前研究在处理成本、资源化利用效率与环保性能等方面仍面临诸多挑战, 最后展望了绿色、高效、低能耗处理技术的未来发展方向, 以期为油田含油污泥的资源化、无害化处理提供参考。

关键词

含油污泥, 资源化处理, 综述

Research Progress on the Resourceful Treatment of Oily Sludge from Oilfields

Hao Hu^{*#}, Duanshuai Cao, Caiwen Ma, Hongyang Sun, Jiange Xu

School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jun. 26th, 2025; accepted: Jul. 28th, 2025; published: Sep. 9th, 2025

Abstract

Oily sludge generated during oilfield exploitation is a hazardous waste characterized by complex composition, high oil content, and great disposal difficulty. Improper treatment poses serious threats to both the ecological environment and human health. In recent years, with increasingly stringent environmental regulations and growing awareness of resource utilization, research on oily sludge

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 胡浩, 曹端帅, 马彩文, 孙洪洋, 徐建根. 油田含油污泥资源化处理技术研究进展[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 918-925. DOI: 10.12677/me.2025.135104

treatment technologies has deepened. Major treatment methods include physical, chemical, and biological approaches. This paper systematically reviews the current development status of these major technologies, analyzes their applicability and existing challenges, and points out that issues such as treatment cost, resource recovery efficiency, and environmental performance still present significant obstacles. Finally, it looks ahead to the development of green, efficient, and low-energy treatment technologies, aiming to provide a reference for the resourceful and harmless treatment of oily sludge in oilfields.

Keywords

Oily Sludge, Resourceful Treatment, Review

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油田含油污泥是油气产业和矿油加工的产物。国家能源局发布数据显示：2024年，我国国内油气产量当量首次超过4亿吨，原油产量达2.13亿吨，天然气产量2464亿立方米，含油污泥产量大约占到2% [1]，按照现行危废处置方案，委托处理费1000~3000元·t⁻¹，每年油泥处理市场规模巨大。这些污泥主要由油气沙、油边污染泥土和污染水组成，其中带有大量的有机物、金属和有毒化学物质。如不进行有效处理，含油污泥将对地下水、土地和气体导致严重污染，并且容易带来明显的生态风险。各种技术具有自身的优势和不足，而合成性处理方案则通常能在效率和环境亲和性方面并存。本文旨在综述当前研究广泛的含油污泥处理技术的研究进展，分析未来含油污泥处理技术的发展方向和研发重点，以期对技术的发展和应用提供启示和借鉴。

2. 含油污泥物理处理法研究现状

含油污泥的物理法处理是通过物理手段实现油、水和固体的分离，达到减量化和资源回收的目的[2]。物理法处理技术因其工艺相对简单、处理速度快、对二次污染控制较好，在含油污泥的前期处理和资源回收方面发挥着重要作用。物理法处理主要通过改变污泥的物理状态或利用物理分离手段，使油、水和固体颗粒实现有效分离，从而达到减量化和资源化利用的目的。常见的物理处理技术包括离心分离、冻融处理及超声波分离等，这些方法在不同的含油污泥处理场景中展现出较好的应用潜力。以下是主要的物理处理方法：

2.1. 机械离心法

机械离心法是一种常见的含油污泥处理技术，其原理是在污泥经过重力沉降、气浮等初步浓缩后，利用机械离心力进一步脱水、减容或分离油、水和固体组分，机械离心处理示意如图1所示。该方法的回收率主要受到含油污泥的黏度、颗粒大小、离心速度、离心时间以及预处理方式等因素的影响。机械离心法具有操作简单、处理速度快、分离效率高、处理能力强等优势，且无需额外添加化学药剂，因而在工业应用中具有较高的推广价值。王丹等人[2]的研究发现，调质参数对离心分离性能具有重要影响。试验结果表明，在引入破乳剂与复配絮凝剂，并将体系加热至50℃、搅拌5min后，以2500r/min的转速离心20min，可实现高达90%的脱油率。

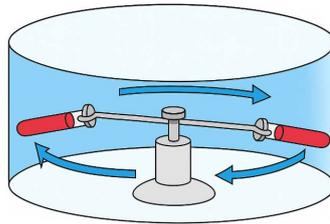


Figure 1. Schematic diagram of mechanical centrifugal treatment
图 1. 机械离心处理示意图

2.2. 冻融法

冻融法是一种利用低温冻结和自然融化循环来处理含油污泥的物理方法，冻融法处理流程如图 2 所示。该技术的核心原理是，在污泥冻结和融化过程中，水、油和固体颗粒之间的相互作用性质发生变化，从而实现油水分离、体积减量和污染物去除。在冻结过程中，污泥中的水分结冰并发生体积膨胀，破坏油水固的结合结构，使其逐步分离；在融化过程中，水从固体基质中释放，进一步促进油和固体颗粒的分层。此外，冻融循环还能破坏污泥中的某些结构性结合力，使污染物更易于去除。该方法主要包括预处理、冻结、融化和分离等步骤，具有操作简便、环境友好、适用性广、处理量大等优势，在含油污泥的资源化处理方面展现出良好的应用潜力。李一川等[3]研究发现，将油泥的含水率调节至 70%，在 -16.5°C ~ -15.5°C 下冷冻 8 h，随后在 20°C ~ 25°C 融解后，污泥的残油率可降至 2.6%；若采用二级冻融处理，污泥含油率可进一步降低至 0.5%。Zhang 等[4]研究了超声波预处理与冻融法的联合工艺，结果表明，在超声预处理后，将油泥在 -20°C 冷冻 12 h，再在 24°C 下融解，油品回收率可达 80%，有效提升了油水分离效率。

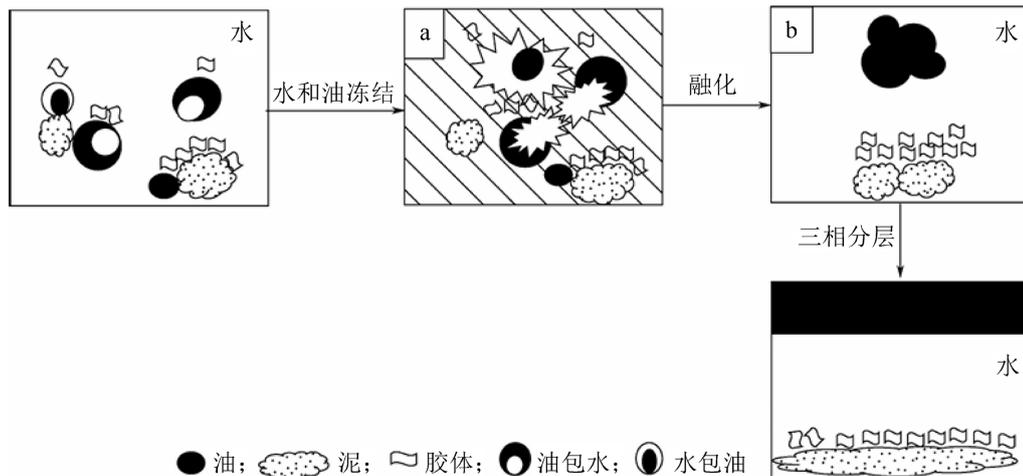


Figure 2. Freeze-thaw treatment process [5]
图 2. 冻融法处理流程[5]

2.3. 超声波处理法

超声波处理法是指利用超声波的空化效应和机械振动，使污泥中的油滴从固体颗粒表面剥离，并分散到液相中，从而实现油水分离，超声法处理流程如图 3 所示。超声波处理法对高黏度、高含油污泥效果显著，但设备成本较高，能耗较大，需要与其他分离技术结合使用，如离心或过滤。Gao 等人[6]针对大规模油泥的超声清洗参数开展研究。结果显示，在 45°C 下，热洗结合超声可去除 40% 的沥青质，总石

油烃去除率为60.7%；而将表面活性剂与超声联用，则对极性组分的清除更具优势，总体去除率可达90%。

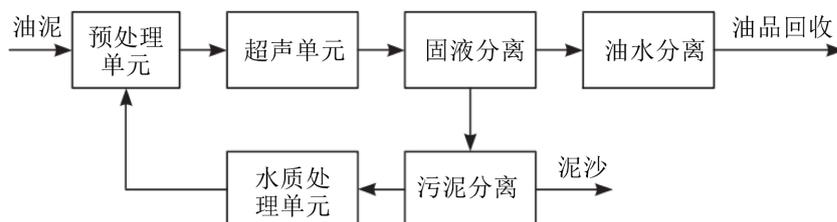


Figure 3. Ultrasonic treatment process [7]

图 3. 超声处理流程[7]

3. 含油污泥生物处理法研究现状

生物法处理含油污泥的基本原理是利用微生物的代谢作用降解污泥中的有机污染物，使石油烃类物质逐步转化为二氧化碳、水和生物质，从而实现污染物的无害化处理。与物理法和化学法相比，生物法具有能耗低、处理过程温和、可长期作用的特点，特别适用于低浓度含油污泥的处理。当前，主要的生物处理方法包括氧化法、原位生物修复法、生物强化法，这些方法在提升石油烃降解效率、加速污泥矿化和资源化利用方面展现出良好的应用前景。

3.1. 氧化法

氧化法是一种利用强氧化剂或催化氧化技术，将含油污泥中的有机污染物分解为无害或低毒性的物质，氧化法系统原理如图 4 所示。该技术适用于高浓度、难降解的含油污泥，可有效减少有机污染物的残留，提高污泥的无害化程度，并且对氧化过程中释放的热量进行回收可以实现含油污泥资源化利用。段远望等[8]采用小型高温高压反应釜对不同过程参数下的含油污泥降解规律进行研究，并对三相产物进行检测分析，结果表明：当反应温度为 640℃ 时，COD 去除率达到 99.41%，出水 COD 为 465 mg/L。

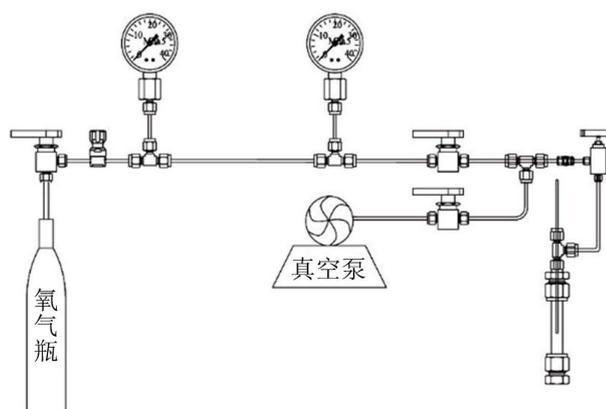


Figure 4. Principle of the oxidation system [8]

图 4. 氧化法系统原理[8]

3.2. 原位修复法

原位修复法是指直接在污染场地(如油田)进行微生物降解，常结合营养盐和氧气补充。常慧萍[9]等开展了植物—微生物联合强化修复的田间试验。试验分为黄豆区、有机肥区、有机肥加蓬松剂锯末区、空白对照区，结果表明，四个区平衡降解率为 89.4%、72.5%、76.7%、49.2%，黄豆区最后石油烃残留量

最低, 为 463.6 mg/kg, 低于临界残量 500 mg/kg, 主要因为黄豆植物根形成根瘤提供氮源, 根系生长扩大为微生物提供营养, 使菌数增加, 可显著提高含油污泥处理效果。

3.3. 生物强化法

生物强化法通过引入特定功能微生物(如石油烃降解菌)或添加生物酶、表面活性剂, 提高污泥中石油污染物的生物降解效率。筛选高效降解菌株并接种到污泥中, 添加低毒表面活性剂, 促进油水分离并增强微生物活性增强作用, 该方法降解效率高, 尤其对难降解组分效果显著。可根据污泥特性定制菌株和处理条件, 但需要菌株分离、培养等前期准备, 技术要求高。陈应星等[10]从污染土壤中分离筛选出 2 株高效石油降解菌株 CY-1 和 CY-2, 经形态学观察、生理生化实验及 16SrRNA 基因序列分析, 鉴定 CY-1 为多舌假单胞菌, CY-2 为土地戈登菌, 结果表明两株菌在柴油污染治理方面均具有一定的应用前景, COD 去除率达到 83%。

4. 化学处理法研究现状

化学处理法是目前处理油田含油污泥的重要手段之一, 主要通过添加化学试剂促进油、水、固三相分离或实现有机污染物的降解与转化[11]。常见的方法包括化学破乳、溶剂萃取、化学氧化和絮凝沉降等。其中, 破乳剂可有效破坏油泥中的稳定乳状体系, 释放出游离油分; 溶剂萃取技术利用有机溶剂溶解油相组分, 适用于高含油污泥的资源化回收; 化学氧化则借助强氧化剂分解有机污染物, 提高无害化处理效率; 而絮凝沉降法则通过加入高分子絮凝剂促进固液分离。化学法具有处理速度快、适应性强的优点, 但也存在处理成本高、药剂残留、二次污染风险等问题。

4.1. 溶剂萃取法

溶剂萃取法包括一般溶剂萃取法与超临界流体萃取。一般溶剂萃取法是将适宜的萃取剂加入到含油污泥中, 在二者混合均匀的过程中, 萃取出含油污泥中油相的过程和方法, 溶剂萃取法处理流程如图 5 所示。该方法主要受提取剂、提取工艺、污泥性质、溶剂-油泥比等因素影响, 易于应用, 快速高效, 适合现场规模应用可通过增加循环萃取次数提升含油污泥脱油率。赵瑞玉等[11]通过 3 轮循环萃取, 分别获得 96.1%、98.7% 和 99.9% 的含油污泥脱油率。超临界流体萃取是溶剂萃取法的一项前沿技术, 利用超临界流体兼备气体和液体的特点, 其高渗透性和高溶解性对油品资源的回收效率高。主要受油泥性质、超临界流体类型和量、反应器类型、反应温度、压力、萃取时间影响, 具有高效、环保、可循环利用、性价比高的特点。

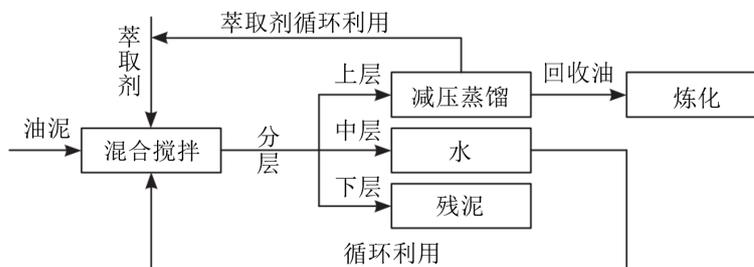


Figure 5. Process flow of solvent extraction treatment [11]

图 5. 溶剂萃取法处理流程[11]

4.2. 表面活性剂处理法

化学表面活性剂处理法是一种通过添加表面活性剂降低油与固体颗粒之间的界面张力, 从而实现油

水固分离的技术。表面活性剂的独特分子结构(具有亲水性和亲油性部分)使其在油污降解和资源回收方面具有显著优势。表面活性剂通过降低界面张力、乳化与分散、增溶作用对含油污泥进行处理。Zhang 等 [12]采用了阴离子型表面活性剂十二烷基苯磺酸钠和非离子表面活性剂吐温 80 的复配体系,联合活化过硫酸盐降解含油污泥。该研究表明,该复配体系可以通过降低表面张力来提高油的溶解度,同时活化过硫酸盐产生的羟基自由基和硫酸根自由基有助于将复杂的有机物降解为小分子化合物,从而实现了含油污泥的高效降解。这些研究结果揭示了复配表面活性剂对含油污泥清洗的协同作用,为高效清洗含油污泥提供了可行的方法。

4.3. 热解法

热解法主要包括一般热解法与催化热解法,一般热解法是在无氧或缺氧条件下对含油污泥进行加热处理,回收率主要受加热速率、含油污泥性质、热解温度影响可将含油污泥热解为热解渣、热解液和热解气以回收资源,热解法处理流程如图 6 所示。阮宗琳等 [13]发现含油污泥在热解温度为 450℃ 时的热解油回收率呈现出快速增长的趋势,而在该温度下添加催化剂可以提高含油污泥热解油的产率。

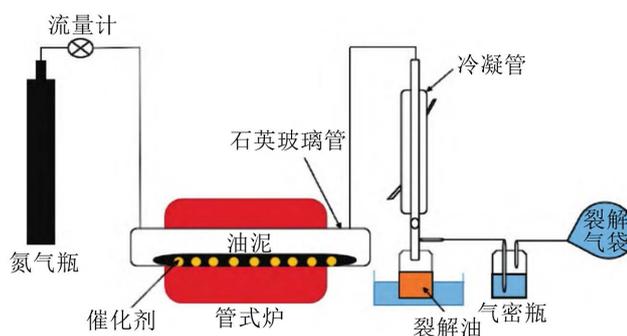


Figure 6. Flowchart of oily sludge treatment by pyrolysis [10]

图 6. 热解法处理含油污泥流程图 [10]

4.4. 浮选法

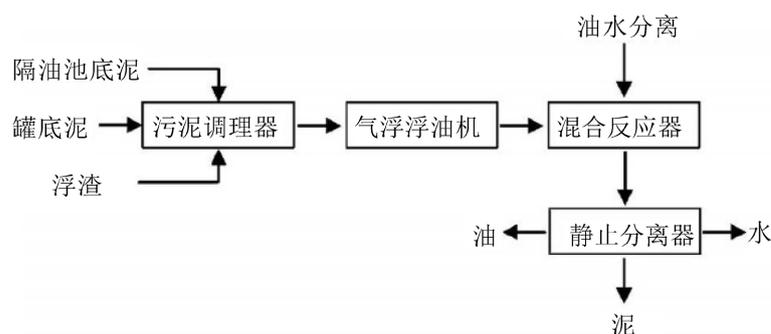


Figure 7. Flotation treatment process [14]

图 7. 浮选法处理流程 [14]

浮选法是一种基于固体颗粒表面疏水性差异进行分离的物理化学方法,浮选法处理流程如图 7 所示,浮选法近年来被广泛应用于采油污泥处理领域。通过向油泥中加入浮选剂,在搅拌和通气条件下,油滴及疏水性颗粒附着在气泡上浮出,实现油、水、固三相分离。该方法具有处理效率高、能耗低、适用范围广等优点,尤其在处理高含油、复杂组成的采油污泥中表现出良好效果。魏彦林等 [14]调查发现采用调理

- 气浮 - 分离法处理延长油田油泥后, 油品回收率达 80%, 沉淀的泥砂通过压滤干化后的体积只有处理前的 5%。

5. 总结

含油污泥作为石油工业生产过程中的危险固体废弃物, 具有成分复杂、含油率高、资源化难度大等特点, 其高效、绿色、低成本的处理技术一直是研究热点[15]。本文系统梳理了当前国内外在物理法、化学法、生物法等方面的研究进展, 如表 1 所示, 分析了各类方法的适用范围、技术优势与存在问题。总体来看, 虽然现有技术在一定程度上实现了含油污泥的减量化、无害化与资源化处理, 但仍面临处理效率低、成本高、环境友好性不足等挑战[16]。未来的研究应聚焦于智能化、低能耗、高适应性的处理技术开发, 加强多技术协同与产业化应用, 以推动含油污泥处理向绿色可持续方向发展。

Table 1. Comparison of oily sludge treatment technologies

表 1. 含油污泥处理技术对比表

技术名称	优点	缺点	主要影响因素	应用范围
焚烧法	处理效率高, 彻底无害化, 适用于大规模处理	需添加助燃物, 设备投资大, 运行和维护成本较高	焚烧温度、助燃材料用量、污泥含量与空气混合程度	原油含量高的含油污泥
固化法	成本低、可稳定重金属、处理后便于运输	占地面积大, 无法回收油品, 存在渗漏隐患	固化剂类型与用量、含油污泥的含油率	原油含量低的油泥
氧化法	降解速度快, 不易受环境干扰, 基本无二次污染	需大量氧化剂与催化剂, 安全性较差, 运行和维护成本较高, 无法回收油品	氧化/催化剂的种类与用量、污泥的理化性质	各类含油污泥
生物法	成本低、能耗小、环保性好, 避免污染物迁移	处理速率慢、周期长, 占地资源多, 易受环境条件限制	生物种类、污泥特性、土壤水分、温度和 pH	原油含量较低的含油污泥
溶剂萃取法	效率高、操作简便, 原油回收率较高	成本较高, 萃取剂可能带来二次污染	萃取剂配比、温度、搅拌强度与时间	含复杂有机质的含油污泥
热解法	处理彻底, 油品回收率高, 环境影响小	设备投资和维护费用高, 处理规模有限, 难以工业放大	污泥性质、热解温度	含油量较低的油泥
超声法	效率高、无需添加化学药剂, 适用范围广	能耗高、设备成本大, 运行维护复杂	超声频率与功率、含油比例、泥水比、处理时间与温度	各类含油污泥
浮选法	工艺可靠、操作简便, 油品回收率高, 适合大规模应用	难以处理乳化严重的油泥, 部分残留难清除	清洗剂种类与用量、温度、搅拌强度、处理时间、污泥特性	含油量高、乳化程度低的油泥
机械离心法	工艺简单、处理快速, 效率高, 处理能力强	需添加改性剂, 存在二次污染风险, 设备维护成本高, 噪声较大	改性剂类型、处理速度、分离时间、转速、化学剂种类与浓度	原油含量高的含油污泥

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2420142)。

参考文献

- [1] 国家能源局. 2024 年全国油气勘探开发十大标志性成果[EB/OL]. <https://www.nea.gov.cn/20250120/f16a9ad91ce8459d9fc03d1d2869a588/c.html>, 2025-01-20.

- [2] 王丹. 油田含油污泥处理技术研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- [3] 李一川. 罐底油泥中原油回收的工艺技术研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [4] Zhang, J., Li, J., Thring, R.W., Hu, X. and Song, X. (2012) Oil Recovery from Refinery Oily Sludge via Ultrasound and Freeze/Thaw. *Journal of Hazardous Materials*, **203**, 195-203. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.016>
- [5] 李文英, 李阳, 马艳飞, 等. 含油污泥资源化处理方法进展[J]. 化工进展, 2020, 39(10): 4191-4199.
- [6] Gao, Y., Ding, R., Chen, X., Gong, Z., Zhang, Y. and Yang, M. (2018) Ultrasonic Washing for Oily Sludge Treatment in Pilot Scale. *Ultrasonics*, **90**, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.05.013>
- [7] 方柳亚, 齐锁平, 邓龙斌, 等. 含油污泥处理技术研究进展[J]. 石油管材与仪器, 2023, 9(2): 1-7.
- [8] 段远望, 王树众, 贺超, 等. 超临界水氧化法处理含油污泥的特性分析[J]. 化学工程, 2024, 52(11): 4-8, 37.
- [9] 常慧萍, 王丁, 夏铁骑, 等. 产生物表面活性剂石油降解菌 *Bacillus BS-8* 的生物学特性[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(7): 1567-1569, 1573.
- [10] 陈应星, 王建刚, 陈长灏, 等. 高效柴油降解菌的分离鉴定及降解性能研究[J]. 绿色科技, 2024, 26(6): 191-197.
- [11] 赵瑞玉, 宋永辉, 孙重, 等. 活性水洗-溶剂萃取组合处理含油污泥[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 169-175.
- [12] Zhang, Q., Jiang, Q., Bai, Y., Li, H., Xue, J., Gao, Y., *et al.* (2021) Optimization and Mechanism of Oily Sludge Treatment by a Novel Combined Surfactants with Activated-Persulfate Method. *Science of The Total Environment*, **800**, Article ID: 149525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149525>
- [13] 阮宗琳, 刘昶, 杨秀娜, 等. 新型加氢催化剂密相装填装置的设计与应用[J]. 炼油技术与工程, 2016, 46(9): 35-39.
- [14] 魏彦林, 吕雷, 杨志刚, 等. 含油污泥回收处理技术进展[J]. 油田化学, 2015, 32(1): 151-158.
- [15] 徐开慧, 哈斯其美格, 张传涛, 等. 堆肥强化微生物法处理含油污泥的现场试验[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(2): 178-181.
- [16] Cheng, S., Wang, Y., Fumitake, T., Kouji, T., Li, A. and Kunio, Y. (2017) Effect of Steam and Oil Sludge Ash Additive on the Products of Oil Sludge Pyrolysis. *Applied Energy*, **185**, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.055>