

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2024.01.001

稠油污水处理技术研究进展

张钰琪^{1,2} 全坤¹ 聂凡¹ 岳长涛² 谢加才¹ 吴宣章³ 马跃²

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司; 2. 中国石油大学(北京); 3. 中国石油辽河油田分公司)

摘要 针对稠油污水来源广、成分复杂、污染物浓度高、油水密度差小、毒性大、可生化性差、处理成本高等问题,梳理了稠油污水的来源、成分、特点及处理难点,总结了稠油污水处理中调质破乳、絮凝/气浮、生物降解、氧化或吸附四级处理技术的进展,对比了各种方法的优缺点。并提出缩短工艺流程、采用物理法与化学法相结合工艺以减少新污染引入,采用靶向氧化技术去除生物毒性、难降解有机物以提高污水可生化性,增强生物处理以提高处理效能等建议,以期为稠油污水绿色、低碳、低成本、高效处理提供借鉴。

关键词 稠油污水; 调质破乳; 絮凝/气浮; 生物降解; 氧化; 吸附

中图分类号: X703; TE992.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2024)01-0001-06

Research Progress on Heavy Oil Wastewater Treatment Technology

Zhang Yuqi^{1,2} Tong Kun¹ Nie Fan¹ Yue Changtao² Xie Jiakai¹ Wu Xuanchang³ Ma Yue²

(1. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology;

2. China University of Petroleum (Beijing); 3. CNPC Liaohe Oil Field Co., Ltd.)

ABSTRACT Addressing the challenges posed by heavy oil wastewater, characterized by its wide range of sources, complex composition, high concentration of pollutants, small difference in oil-water density, high toxicity, poor biodegradability, and high treatment costs, this paper systematically reviews the sources, components, characteristics, and treatment difficulties of heavy oil wastewater. It summarizes the progress in four key treatment technologies used in heavy oil wastewater treatment: conditioning demulsification, flocculation/air flotation, biodegradation, and oxidation or adsorption, comparing the advantages and disadvantages of each method. Additionally, the paper suggests shortening the process flow, combining physical and chemical methods to reduce the introduction of new pollutants, using targeted oxidation techniques to remove biotoxicity and hard-to-degrade organic substances to enhance the biodegradability of wastewater, and strengthening biological treatment to improve treatment efficiency. These suggestions aim to provide a reference for green, low-carbon, cost-effective, and efficient treatment of heavy oil wastewater.

KEYWORDS heavy oil wastewater; conditioning and demulsification; flocculation/air flotation; biodegradation; oxidation; adsorption

0 引言

我国稠油储量占总探测石油量的 20% 以上^[1],通常采用蒸汽驱、蒸汽吞吐^[2]的方式开采,采油污水处理后,大部分回用于热采注汽锅炉^[3-4]或回注^[5],小部分达标外排^[6-7]。稠油污水富含胶质、沥青质,及开采

和油水分离过程中加入的大分子有机表面活性剂,具有成分复杂、有机物含量高、油水密度差小、乳化严重、稳定性强等特点,处理难度高。本文梳理了稠油污水的来源、成分、处理难点和研究进展,以期为其处理技术研究及应用提供参考。

基金项目: 中国石油重大科技专项《绿色油气田污染防治及生态保护研究》(2021DJ6605)。

第一作者: 张钰琪, 中国石油大学(北京)理学院 2021 级在读硕士, 研究方向: 化学工程。通信地址: 北京市昌平区学府路 18 号, 102299。E-mail: zhangyuqi0716@163.com。

通讯作者: 全坤, 2013 年毕业于中国地质大学(北京)环境科学与工程专业, 博士, 教授级高级工程师, 现在中国石油集团安全环保技术研究院有限公司从事含油固废处理与资源化利用技术研究工作。通信地址: 北京市昌平区黄河北街 1 号院 1 号楼, 102206。E-mail: 13904279390@139.com。

1 概述

1.1 稠油污水的来源、组成及特点

稠油污水来源复杂,主要包括稠油采出液分离水^[8](占比最大)、蒸汽辅助重力驱油污水(SAGD)^[9]、稠油污水深度处理回用排放尾水(浮渣脱水、过滤浓水、离子交换酸碱污水等)、洗油管污水、稠油油泥清洗污水及其他杂排水等。

稠油污水含有大量的矿物油和非油有机物、悬浮物(SS)^[10]、还原性物质(如硫化物、Fe和Mn)、细菌和盐类等。其中矿物油^[11]主要以悬浮油、分散油、乳化油和溶解油四种形式存在;非油有机物^[12]为聚合物、表面活性剂和油田化学品(破乳脱水剂、驱油剂、降黏剂等);SS大部分为有机成分;无机盐主要为碳酸盐、氯化钠及硫酸盐,亚铁盐及硫化物的含量较少。

稠油污水中有机污染物种类多、毒性较强、可生化性差,乳化油含量高、稳定性强、破乳难度大,是典型的水包油型乳液。其油水密度差小^[13](0.01~0.04 g/cm³),稠油黏度大(100 000~200 000 mPa·s (50℃)),胶质和沥青质含量高^[14](≥30%),属于高含油、高乳化、高COD、高SS、高含硅、高矿化度、有机组成复杂的污水。

1.2 稠油污水的处理难点

油水密度差小,油水重力分离时间长,不利于除油;黏度大,不利于悬浮物重力沉降与去除,收油排泥困难;温度高,不利于悬浮物絮体的沉降及水质净化;因胶质、沥青质及大量亲水性表面活性剂存在,稠油污水中油与水间易形成稳定的水包油(O/W)型乳状液或水包油(O/W)、油包水(W/O)多相乳化体系,增加了稠油污水破乳除油的难度;化学驱技术开采的稠油污水,溶解了大量的聚丙烯酰胺,导致分散性强,黏度大,稳定性更强,可生化性差(BOD₅/COD<0.2),生物法处理适应性差。

2 处理方法

稠油污水可分为四级处理,其工艺流程见图1。一级处理是预处理,即调质破乳,主要去除浮油;二级处理为絮凝/气浮,主要去除分散油、乳化油和其他非油COD及SS;三级处理为生物降解,主要去除溶解油和溶解性非油有机污染物;四级处理为保安处理,一般为氧化/吸附等,进一步去除难降解有机物,确保达标排放。

由于稠油污水处理后去向不同,处理方法各异,但一级、二级处理是必备工艺,而三级、四级处理则是达标外排常设工艺。

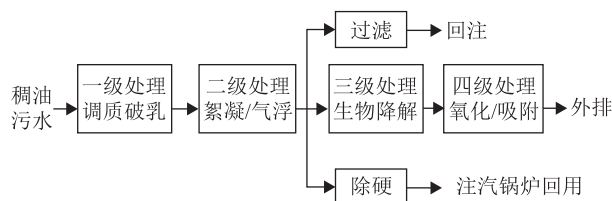


图1 稠油污水处理工艺流程

2.1 一级处理——调质破乳

稠油污水一级处理是除油,通过调质破乳实现油水分离。调质破乳^[15]是先通过加酸或加碱、升温、搅拌等预处理,降低稠油污水的黏度,然后加入反相破乳剂,使稠油污水中黏度较大的乳化油发生破乳反应,实现油、水、固三相分离。加水稀释也可辅助调质降黏^[16],调控乳化态,即在破乳之前,向稠油污水中加入二级处理后的污水进行稀释回调,降低Zeta电位,促进污染物沉降;加酸或加碱调节稠油污水pH值为5.5~6.0,破坏胶体稳定性,促进絮体产生。

稠油污水主要为O/W型乳液,称为反相乳液,主要利用液滴间的双电层排斥作用稳定,其破乳机理是:加入反相破乳剂(水溶性破乳剂),可以中和O/W乳液中液滴表面的负电荷^[17],压缩破坏双电子层,降低Zeta电位^[18],减小乳化油胶粒间排斥力,促进油滴的絮凝与聚结^[19],实现油水分离。因此,稠油污水破乳采用的反相破乳剂,主要有阳离子型聚合物(如聚季铵盐型、聚醚型)、非离子型聚合物、新型树状大分子和磁性纳米颗粒等。

Sun等^[19]制备的聚醚聚季铵盐(PPA)反相破乳剂,综合了聚醚破乳剂高化学稳定性、低界面张力、能有效降低油水界面膜厚度的优点,以及聚季铵盐(PAS)类反相破乳剂水溶性好、电中和性能^[20]显著的优点,在投加量为110 mg/L时,可使模拟聚驱采出液含油量从500 mg/L降至97 mg/L,除油率达80.6%;李树涛^[21]使用丙烯酸丁酯和甲氧基聚氧乙烯醚为共聚单体,合成具有良好分散和反相破乳效果的乳液型非离子反相破乳剂(PEA),发现PEA-46的除油效果相对较好,在300 min时,除油率可达90.28%;肖丽华等^[22]研发的以聚苯乙烯-马来酸酐共聚物为主链、1.0代聚酰胺-胺(1.0G PAMAM)为侧链的树状多支化水溶性破乳剂TS-Z806,在处理渤海原油采出液时,破乳后上层油乳化层较低,脱水后乳化层减少约69%。

阳离子型聚合物油水分离速率高且除油效果好,但破乳温度高,产生的絮体多;非离子型聚合物除油效率高但分离效果较差,在现场作业中可与阳离子型聚合物复配使用^[23];树状大分子反相破乳剂合成简

单、易改性,适用于含油量较高的 O/W 乳液^[24],对于含油量很低的 O/W 乳液,其破乳效果反而会变差。磁性纳米颗粒作为乳状液化学破乳剂的应用正在迅速增长,其原理为:对 Fe_3O_4 颗粒(表面带正电荷)进行改构或接枝其他两亲性物质,在外加磁场和重力的影响下,分散的液滴易被捕获、聚结,并与连续相分离;该类破乳剂可利用其磁性、吸附性、自组装性来进行破乳^[25],具有可循环利用、易分离、毒性低的优点,但用量大、分离成本高,破乳效率较低。

2.2 二级处理——絮凝/气浮

二级处理主要是去除稠油污水中 COD 和 SS,主要方法为絮凝沉淀或气浮浮选。

絮凝沉淀的原理是:无机絮凝剂中带有正(负)电性的基团与稠油污水中带有负(正)电性的颗粒相互吸引,发生电中和,降低颗粒的 Zeta 电位绝对值,增强其不稳定性,然后协同有机絮凝剂的吸附、架桥、卷扫网捕作用^[26],使这些颗粒集聚变大,形成絮团,加快颗粒的聚沉,然后通过物理或化学方法分离沉淀物与液体。

气浮浮选是通过向污水中通入大量的微细气泡,使细小的悬浮颗粒附着气泡上升至水体表面,达到去除油及其他污染物的目的^[27-28],因此大小均匀、数量多的微纳米气泡是气浮法高效除油的关键^[29]。气浮技术处理效果取决于微气泡与油滴之间的碰撞、聚结、迁移和分离状况,因此水流量及曝气量起到主要调节作用。气浮浮选包括溶气气浮、电解气浮、散气气浮和涡凹气浮技术等^[30]。为强化气浮或絮凝效果,有的研究采用旋流气浮分离技术,可发挥浮选分离和水力旋流分离的协同作用,以达到快速、高效分离的目的^[31-32],但油水密度差小时,分离效果较差;也有将聚结工艺与气浮工艺耦合^[33],强化含油污水的油水分离,以解决聚结工艺对分散油处理速率慢且分离效果差的问题。

絮凝沉淀或气浮浮选均需加入絮凝剂,分为无机混凝剂和有机助凝剂。无机混凝剂是通过压缩双电子层、吸附电中和、吸附架桥、沉淀等作用,将污水中污染物凝聚和絮凝。有机助凝剂作用是调节或改善混凝条件及絮凝体的结构,利用高分子助凝剂的强烈吸附架桥提高絮凝效果。混凝剂一般为无机高分子絮凝剂,包括聚铁类、聚铝类和聚硅酸盐类等,电中和能力强,且处理污水的 pH 值范围宽,絮体形成的速度也比较快,但用量大、易腐蚀装置、产生的污泥量大;助凝剂为有机絮凝剂,包括合成有机高分子絮凝剂(如聚丙烯酰胺(PAM)类)和天然有机高分子絮凝剂(如改性淀粉絮凝剂和生物絮凝剂)等。PAM 的特点是用量小(约为无机浮选剂的 1/20~1/100)、浮渣

少、含水率低。水处理领域应用较多的是带正电的阳离子聚丙烯酰胺类(CPAM),可用来中和压缩污水中乳化油颗粒表面的双电层结构,降低油粒的动电位,帮助分散的油粒克服彼此之间的排斥力,聚并成大的油珠上浮。在稠油污水絮凝处理中,CPAM 的效果优于其他 PAM,其正电性对污水中的胶体微粒具有很好的吸附效果和电中和作用,利于颗粒沉降。有机絮凝剂分子链较长,用量少,受盐类和环境的影响更小,产生的污泥量也更少,但絮凝效果受制于污水的复杂程度。微生物絮凝剂是由细菌、真菌等或其分泌物产生的代谢产物,发酵、提取而制备,具有无毒、无二次污染、生物分解性和安全性好等特点,但对水质要求高。

宋丽^[34]采用自制的聚硅硫酸锌絮凝剂,与聚乙烯多胺类反相破乳剂复配后处理稠油污水,除油率达到 98.3%,悬浮物含量降至 10.2 mg/L;赵飞^[35]配制出聚硅酸锌-聚丙烯酰胺复合凝剂,使污水最佳浊度去除率为 90.47%,最佳 COD 去除率为 50.16%;陈丹丹等^[36]配制的聚合氯化铁-CPAM 复合絮凝剂,浊度去除率可达到 97.8%;张静等^[37]研发的高效有机絮凝剂复配 PAM,在辽河油田特油污水站进行工业试验,药剂投加量小,产生浮渣量少,形成的絮体密实,上浮快,使处理后的污水含油、悬浮物指标分别达到小于 20 mg/L 的技术要求;Huang 等^[38]研究发现,生物吸收可以协同絮凝,增强对污水中重金属的去除效果。复合絮凝剂基于其特性,对于复杂水质具有重要的研发意义;微生物絮凝剂由于其无二次污染、环境友好等特点,未来可能替代传统絮凝剂,实现大规模工业应用。

混凝沉降方法虽然处理效果较好,但设备体积大、基建费用高、产泥量大;气浮浮选具有处理效率高、设备简单、能耗低、可回收有用物质等优点,应进一步研发高质量微纳米气泡发生装置,研发新型高效浮选剂,加强对气浮组合工艺的研究,提高稠油污水处理中气浮单元的处理效率。

2.3 三级处理——生物降解

生物降解主要是通过引入一定数量的微生物,降解稠油污水中一级和二级处理不能去除的有机物质。稠油污水为难降解有机污水,应根据稠油污水成分选择适宜的处理工艺(好氧法、厌氧法、生物酶法等)和微生物的类型。此外,稠油污水是氮、磷等营养成分缺乏的有机污水,应根据需求补充氮、磷。

张虎虎^[39]研究发现,通过投加尿素和磷酸二氢钾等营养物质,可以使系统进水中总氮浓度达 16 mg/L,总磷浓度为 2 mg/L,刺激微生物快速繁殖,稠油污水生化处理装置 COD 去除率可达 80%;赵光可等^[40]分

别利用隔油-生物膜酸化水解-生物膜接触氧化工艺技术、隔油-气浮-悬浮生长生物膜接触氧化工艺技术、隔油-絮凝-生物膜接触氧化工艺技术及稠油联合站污水分段处理工艺技术,先除油和悬浮物,再通过微生物的氧化作用去除氧和其他有害成分,使注入水的水质符合标准。张杨等^[41]基于“水解酸化+接触氧化”的稠油污水处理工艺,采用增加“两级过滤+一级超滤”的工艺方法,对稠油污水进行深度处理,使外排水质连续稳定实现 COD 小于 120 mg/L 的要求。

生物膜法包括曝气生物滤池、接触氧化、水解酸化等工艺技术,可以吸附、降解、过滤污染物,耐负荷能力较强。基于生物膜的生物膜反应器,具有运行成本低、污泥产量低、处理效果优、稳定性较好等优势,正在逐渐取代常规活性污泥法,但膜污染和膜堵塞^[42]、膜厚度的自动化控制^[43]、生态系统的平衡稳定等问题仍然是其研究开发过程中所面临的挑战。

为提高生物降解效果,常采用氧化法提高污水可生化性。Su 等^[44]研究发现,Fenton 氧化与曝气生物滤池的组合工艺在较低 Fenton 剂量情况下,可以提供>70%的矿化效率。张艳等^[45]研究发现,当臭氧协同光催化降解含油污水时,其降解率可提升至 91%,Fenton 氧化反应迅速,氧化和矿化效果较好,但最佳反应 pH 值范围窄(一般为 2~5),含渣高;臭氧法臭氧利用率高,安全无污泥,但成本高,不易实现污水大规模处理。

生物降解对污水的净化效果相对较好,且经济成本较低,对低浓度含聚污水具有较好的处理效果^[46]。高浓度含聚污水的低成本达标处理是生物降解今后努力的一个方向。

2.4 四级处理——氧化/吸附

四级处理也称为保安处理,主要技术有氧化法和

吸附法,是达标外排的最后屏障。

2.4.1 氧化法

氧化法主要包括芬顿(Fenton)/类芬顿法、光电催化法、TiO₂ 光催化法、电化学法、臭氧氧化法、超声法、H₂O₂/UV 法等,其核心为采取各种手段催化产生羟基自由基($\cdot\text{OH}$), $\cdot\text{OH}$ 具有 2.8 V 的高电极电位,可彻底去除污水中的有毒、有害有机物,甚至转化为 CO₂、N₂、SO₄²⁻、O₂、H₂O、PO₄³⁻ 等无机物^[47],对改善水体可生化性、氧化难生物降解有机物有巨大优势。

2.4.2 吸附法

吸附法是采用吸附剂将三级处理后的残留难降解有机物进一步去除,确保稠油污水处理后达标排放。常用的吸附材料有半焦、膨润土、粉煤灰、活性焦、活性炭、锯末及膨胀石墨等,吸附树脂在高有机物浓度、难降解的污水处理方面还有很大发展前景。

全坤等^[48]研究发现,与常规微孔活性炭相比,活性焦能有效吸附污水中的大分子有毒难降解物质。杜国勇等^[49]研究发现,酸化处理后的硅酸镁微孔数量与比表面积增加,对稠油污水的有机物吸附能力增强,将同浓度 COD 的去除率从 52.94% 提高到 76.12%。白玉琦等^[50]采用海藻酸钠(SA)溶液与磁性氧化石墨烯(MGO)共混制备了复合微球(MGO/SA),MGO/SA 具备内部含氧基团增多、吸附活性增强、能快速从水溶液中分离的优点,最佳污水中 Cr(VI)的去除率为 97.28%。由于传统吸附剂吸附量有限,再生困难,处理成本高,廉价吸附剂取代传统吸附剂正逐渐受到重视,新型吸附剂的开发制备、改性提高吸附能力和再生等技术的开发与应用已成为研究热点。

稠油污水四级处理的主要方法及其优、缺点比较见表 1。

表 1 稠油污水四级处理方法比较

主要方法	优点	缺点
一级处理- 调质破乳	物理法	操作简单
	化学法	反应迅速、耗时短
	生物法	处理费用低
二级处理- 絮凝/气浮	絮凝沉淀	分离效果差
	气浮浮选	引入新污染物,增大后续处理难度
三级处理- 生物降解		对水质要求高
	活性污泥法	成本低
	生物膜法	耗时长
四级处理- 氧化/吸附		反应迅速、耗时短
		成本低
		占地面积极小、反应快、耗时短
四级处理- 氧化/吸附	氧化法	处理周期长,占地面积大
	吸附法	投资大
四级处理- 氧化/吸附	氧化法	耗时短
	吸附法	选择性差
四级处理- 氧化/吸附		选择性好
		再生效果差、饱和吸附剂处理成本高

3 结束语

现有稠油污水处理工艺流程复杂,存在问题较多,例如:一级处理大多采用化学破乳,不仅药剂消耗量大、成本高,也增加了后续 COD 去除难度;二级处理采用絮凝/气浮,增加含油固废产生量;三级处理效能低;四级氧化处理针对性差,饱和吸附剂处置成本高等。因此,后续应开发短流程处理技术,如构建亲疏水组合纤维破乳-粗粒化快速分离的新装备、膜分离技术等,实现除油、除 COD 和悬浮物一体化;采用电化学氧化等技术提高污水可生化性,并采取生物增强技术提高生物降解效能;或强化氧化技术既能靶向去除生物毒性、难降解有机物,又大幅提高稠油污水可生化性,同时降低污染物浓度。

今后应不断完善稠油生产配套工艺系统,少用或不用化学药剂以减少新污染物产生,降低稠油污水产生量 and 处理难度,多采用物理法和生物法处理污水以减少含油固废的产生,实现低碳、绿色、清洁治理稠油污水。

参考文献

- [1] 谭利敏. 油田稠油污水处理方法及发展趋势[J]. 化工管理, 2019(10): 60-61.
- [2] 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.
- [3] 曹佳旭. 电化学处理稠油采出水技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021: 10-20.
- [4] 陈文. 稠油污水处理回用[J]. 石化技术, 2020, 27(2): 324-325.
- [5] 周春于, 汪燕秋, 王俊. 油田采油废水处理技术的研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(2): 67-71.
- [6] 中华人民共和国国家环境保护局. 污水综合排放标准: GB 8978—1996[S]. 1996.
- [7] 李根. 稠油热采出水超滤—反渗透除盐技术评价试验研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019: 20-30.
- [8] 李金林, 于鹭. 稠油废水回用热采锅炉供水工艺与工程实践[J]. 工业水处理, 2006, 26(5): 87-90.
- [9] 宋永亭, 杜春安, 王新, 等. 采油污水回用深度处理技术研究进展[J]. 工业水处理, 2009, 29(1): 1-5.
- [10] 邓述波, 周抚生, 余刚, 等. 油田采出水的特性及处理技术[J]. 工业水处理, 2000, 20(7): 10-12.
- [11] 付武军. 海上油田含油污水处理及回用技术分析[J]. 化工管理, 2022, 37(9): 20-22.
- [12] 籍国东, 孙铁珩, 常士俊, 等. 自由表面流人工湿地处理超稠油废水[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 95-99.
- [13] 雷乐成, 陈琳, 张瑞成. 油田废水的 COD 构成分析及生物可降解性研究[J]. 给水排水, 2002, 28(6): 44-47.
- [14] 侯傲. 油田污水回注处理现状与展望[J]. 工业用水与废水, 2007, 8(3): 9-12.
- [15] 齐茗, 林新宇, 黄作男, 等. 含油污泥调质破乳及减量化处理工艺[J]. 新疆石油天然气, 2015, 11(3): 91-96.
- [16] 杨娟娟, 何林, 贺常晴, 等. 含油污泥多相复合调质降黏破乳分离过程[J]. 化工进展, 2023, 42(2): 614-623.
- [17] 赵林, 马超, 徐玉霞, 等. 稠油污水处理高效反相破乳剂应用现状[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(5): 112-115.
- [18] 徐明进, 李明远, 彭勃, 等. Zeta 电位和界面膜强度对水包油乳状液稳定性影响[J]. 应用化学, 2007(6): 623-627.
- [19] SUN H, WANG Q, LI X, et al. Novel polyether-polyquaternium copolymer as an effective reverse demulsifier for O/W emulsions: Demulsification performance and mechanism[J]. Fuel, 2020, 263: 116770.1-116770.7.
- [20] NGUYEN D, SADEGHI N, HOUSTON C. Chemical interactions and demulsifier characteristics for enhanced oil recovery applications[J]. Energy fuels, 2012, 26(5): 2742-2750.
- [21] 李树涛. 热采超稠油用非离子反相破乳剂的合成与应用[J]. 化学工程师, 2023, 37(1): 54-57.
- [22] 肖丽华, 薛宝庆, 吕鹏, 等. 一种树状多支化破乳剂的合成与应用[J]. 油田化学, 2022, 39(4): 699-702.
- [23] 王永军. 聚合物类反相破乳剂研究现状[J]. 石油化工应用, 2021, 40(2): 6-11.
- [24] HAO L, JIANG B, ZHANG L, et al. Efficient demulsification of diesel-in-water emulsions by different structural dendrimer-Based demulsifiers[J]. Industrial engineering chemistry research, 2016, 55(6): 1748-1759.
- [25] 陈依文, 王睿, 文婕, 等. 纳米颗粒在破乳领域的应用研究进展[J]. 石油化工高等学校学报, 2021, 34(2): 9-16.
- [26] BOLTO B, GREGORY J. Organic polyelectrolytes in water treatment[J]. Water research, 2007, 41(11): 2301-2324.
- [27] AL-SHAMRANI A A, JAMES A, XIAO H. Destabilisation of oil-water emulsions and separation by dissolved air flotation[J]. Water research, 2002, 36(6): 1503-1512.
- [28] ZOUBOULIS A I, AVRANAS A. Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation[J]. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2000, 172(1): 153-161.
- [29] 王晨, 王振波, 李娅萱, 等. 气浮气泡的生成规律影响因素实验研究[J]. 过滤与分离, 2016, 26(3): 13-17.
- [30] 刘好闯, 王辉, 李本高, 等. 含油污水气浮除油技术进展[J]. 广东化工, 2018, 45(1): 101-103.
- [31] WANG C, WANG Z, WEI X, et al. A numerical study and flotation experiments of cyclone column flotation for treating of produced water from ASP flooding[J]. Journal of water process engineering, 2019, 32: 100972.

- [32] DENG X W, LIU J T, WANG Y T, et al. Velocity distribution of the flow field in the cyclonic zone of cyclone-static micro-bubble flotation column [J]. International journal of mining science and technology, 2013, 23(1): 89-94.
- [33] 齐玉成, 赵会军, 张璇, 等. 聚结-气浮装置处理含油污水试验研究[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(4): 51-55.
- [34] 宋丽. 稠油热采污水高效净水剂的研制[J]. 油田化学, 2019, 36(3): 546-550.
- [35] 赵飞. 高效复合絮凝剂的制备及絮凝效果的研究[J]. 现代盐化工, 2022, 49(6): 7-9.
- [36] 陈丹丹, 王海琼, 蒋佳芯, 等. 无机-有机复合高分子絮凝剂的制备与性能研究[J]. 化学工程与装备, 2022, 10(3): 16-18.
- [37] 张静, 朱洪生. 高效有机絮凝剂在辽河油田稠油废水中的应用[J]. 科技创新导报, 2020, 17(3): 2.
- [38] HUANG J, HUANG Z L, ZHOU J X, et al. Enhancement of heavy metals removal by microbial flocculant produced by *Paenibacillus polymyxa* combined with an insufficient hydroxide precipitation [J]. Chemical engineering journal, 2019, 374: 880-894.
- [39] 张虎虎. 稠油污水处理系统生物增强技术的应用[J]. 清洗世界, 2020, 36(6): 35-36.
- [40] 赵光可, 李岩, 崔巍. 稠油联合站污水分段处理工艺技术及应[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(4): 226.
- [41] 张杨, 姚晓林. 稠油污水外排处理工艺提标改造技术研究与应用[J]. 石油石化节能, 2019, 9(2): 30-33.
- [42] MAHTO K U, DAS S. Bacterial biofilm and extracellular polymeric substances in the moving bed biofilm reactor for wastewater treatment: A review[J]. Bioresource technology, 2022, 345: 126476.
- [43] WERKNEH A A. Application of membrane-aerated bio-film reactor in removing water and wastewater pollutants: Current advances, knowledge gaps and research needs-A review [J]. Environmental challenges, 2022, 8: 10052.
- [44] SU T, WANG Z K, KANG Z, et al. Advanced treatment of secondary effluent organic matters (EfOM) from an industrial park wastewater treatment plant by Fenton oxidation combining with biological aerated filter [J]. Science of the total environment, 2021, 784: 147204.
- [45] 张艳, 赵丽. 臭氧协同石墨烯/ZnIn₂S₄ 光催化降解含油污水的性能[J]. 化学研究与应用, 2022, 34(8): 1719-1726.
- [46] 王宝峰. 辽河油田采出水处理现状及新技术应用试验[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(3): 51-55.
- [47] 张光明, 张盼月, 张信芳. 水处理高级氧化技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [48] 全坤, 蔺爱国, 宋启辉, 等. LC-OCD 分析活性焦吸附-生物降解去除稠油废水中 DOC 的历程[J]. 环境工程学报, 2015, 9(11): 5432-5438.
- [49] 杜国勇, 张洪铭, 李艳, 等. 硅酸镁的改性及其对稠油污水中有机物的吸附[J]. 功能材料, 2017, 48(6): 6013-6017.
- [50] 白玉琦, 安燕, 陈娇, 等. MGO/SA 制备及其对含 Cr(VI) 污水吸附处理研究[J]. 应用化工, 2021, 50(3): 697-701.

(修回日期 2023-06-02)

(录用日期 2023-07-13)

(编辑 刘晓辉)

《油气田环境保护》期刊荣获 2023 年度“优秀科技期刊奖”三等奖

1 月 10 日, 中国石油和化工自动化应用协会官网发布授奖公示, 《油气田环境保护》期刊荣获 2023 年度“优秀科技期刊奖”三等奖。

作为石油石化行业环境保护与绿色发展产、学、研、用交流沟通的专业学术平台, 《油气田环境保护》期刊发行面覆盖全国油气田、炼化等企事业单位及各高等院校和科研院所, 近年期刊复合影响因子保持了稳中有升的趋势。期刊将紧密结合“双碳”目标下石油天然气行业绿色可持续发展趋势, 从学术研究、技术创新、管理三方面, 围绕生态保护红线、双碳转型、危废管控、HSE 管理等专业领域, 及时响应行业热点, 发挥积极而重要的信息传播作用。