

康定宇,林 海,牛东坡,等.含油污泥特性及处理技术研究进展 [J]. 中国环境科学, 2023,43(8):4106-4120.

Kang D Y, L H, Niu D P, et al. Research progress of processing technology and characteristics of oily sludge [J]. China Environmental Science, 2023,43(8): 4106-4120.

含油污泥特性及处理技术研究进展

康定宇¹,林 海¹,牛东坡²,田 刚²,徐 瑞¹,张志勇¹,罗一菁¹,张忠智^{1*} (1.中国石油大学(北京),化学工程与环境学院,重质油国家重点实验室,北京 102249; 2.河南石油勘探局有限公司资产经营管理中心应用化工厂,河南 南阳 473132)

摘要: 含油污泥是石油生产与加工过程中产生的固体废弃物,含油污泥的有效处理是石油石化行业待解决的关键问题之一.本文介绍了含油污泥的来源、特征及其对环境的影响.从作用原理、处理效果和研究现状等方面,对目前国内外含油污泥处理技术,例如浓缩、脱水等减量化处理技术、热解、热洗、溶剂萃取、超声波等资源化处理技术和焚烧、固化、生物降解等无害化处理技术,进行了详细的论述分析和对比.根据含油污泥性质及处理技术特点,提出了含油污泥处理技术选择方法,该方法以油泥性质为选择标准,挑选多种处理技术相结合,以达到资源化、无害化高效处理含油污泥的目的.并对含油污泥处理技术的近期发展趋势与未来的研究方向进行了展望,以期对含油污泥处理的相关研究提供借鉴.

关键词: 含油污泥; 处理技术; 资源化; 减量化; 选择方法

中图分类号: X74 文献标识码: A 文章编号: 100-6923(2023)08-4106-15

Research progress of processing technology and characteristics of oily sludge. KANG Ding-yu¹, LIN Hai¹, NIU Dong-po², TIAN Gang², XU Rui¹, ZHANG Zhi-yong¹, LUO Yi-jing¹, ZHANG Zhong-zhi¹ (1.State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2.Henan Petroleum Exploration Bureau Co, LTD. Asset Management Center Applied Chemical Plant, Henan Nanyang 473132, China). *China Environmental Science*, 2023,43(8): 4106-4120

Abstract: Oily sludge is a solid waste produced during the production and processing of petroleum. The effective treatment of oily sludge is one of the key problems to be solved in the petroleum and petrochemical industry. In this review, the origin, type, and characteristics of oily sludge were described. From the aspects of technical principle, treatment effect and research status, the current domestic and international oily sludge treatment technologies are discussed, analyzed and compared in detail. For example, reduction treatment technologies such as concentration and dehydration, resource treatment technologies such as pyrolysis, hot washing, solvent extraction and ultrasonic, and harmless treatment technologies such as incineration, solidification and biodegradation, and so on. According to the characteristics of oily sludge and treatment technology, the selection method of oily sludge treatment technology is proposed. This method takes the characteristics of oily sludge as the selection standard and selects a variety of treatment technologies to achieve the purpose of efficient treatment of oily sludge with resource utilization and harmlessness. The recent development trend and future research direction of oily sludge treatment technology have been prospected. It is expected to provide some reference significance for the relevant research on oily sludge treatment.

Key words: oily sludge; processing technology; resource utilization; reduction; selection method

含油污泥是油田开发、石油炼制、运输储存等过程产生的固体废弃物之一^[1],是油、水、固三相混合形成的复杂乳化物,含有多重有机污染物和重金属污染物,具有很强的生物毒性^[2].如果处置不当而外排,会造成严重危害.随着我国石油工业的发展,含油污泥产生量与日俱增,含油污泥的来源也更加多样,不同来源含油污泥的含水率、含油率、乳化程度等性质差异显著.针对含油污泥性质变化幅度大,处理难度差异大等特点,含油污泥处理技术不断发展创新,从传统的焚烧、填埋到新兴的热解、溶剂萃取,

再到更为前沿的超临界 CO₂ 萃取、微生物电化学耦合等,现在含油污泥处理技术已经发展到一定规模.各种处理技术的作用原理、处理费用、处理效果和副产物等均不相同,每种技术都有优势和局限,没有某种处理技术全面优于其他技术,在高效处理和经济实用之间还未达到最佳平衡状态,因此有必要对于现有的含油污泥处理技术进行梳理总结和

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1804102)

* 责任作者, 教授, zzzhang@cup.edu.cn

对比分析.本文根据含油污泥来源对含油污泥进行分类,详细解释了含油污泥危害大,处理难度高等特性的形成原因,按照处理目的的差别对处理技术整理分类,分析了每种技术的作用原理,影响因素和研究现状,并从适用对象、应用场景、处理条件和处理结果等多个方面对现有处理技术进行总结比较,根据含油污泥性质差异和处理技术特点,建立了含油污泥处理技术选择方法,最后对于含油污泥处理技术近期发展趋势和未来研究方向进行了分析展望.

1 含油污泥的特性

含油污泥中所含的胶质、沥青质、油溶性有机酸及在原油开采、集输及加工过程中添加的化学药剂等显著提高了油水界面膜的强度,形成高度乳化、难以分离的稳定体系,同时含有多种有毒物质和重金属^[3-4],未经处理外排会对生态系统造成严重威胁,因此被列入危险废物名录(WH08).

根据来源及特征可以将含油污泥分为落地油泥、罐底油泥和炼厂“三泥”^[5-6](图 1).落地油泥是石油钻井与开采过程中因井喷、跑冒、液漏等因素所产生,由原油、废液、矿物质和泥沙等成分组成的油水泥三相混合物^[7],落地油泥固体含量高,含油量低,成分复杂,含有重金属、石油烃、膨润土和化学添加剂等多种物质;罐底油泥是原油集输过程中储存装置自然沉降产生的底泥,是产生量最大的一种含油污泥,含油量高、颗粒细小、乳化严重,同时含有一定量的絮凝剂、阻垢剂等化学添加剂^[8-9];炼厂“三泥”是指隔油池底泥、气浮池浮渣以及生化池中剩余活性污泥,含水率高、体积大、含油量变化较大,剩余活性污泥中碳氮磷、蛋白质、有机质等含量较高^[10],使炼厂“三泥”乳化严重、三相分离及处理难度加大^[11-12].

含油污泥的主要特性有危害大、处理难度高和处理时效性强.含油污泥危害性大,是因为含油污泥中有高浓度石油烃和重金属.油泥中石油烃的轻组分挥发到空气中,在生物呼吸作用下进入体内,影响其生长代谢.油泥与土壤接触后,石油烃会吸附在土壤表面形成密闭膜,堵塞土壤孔隙,造成土壤渗透性、保水能力下降,同时降低了土壤中微生物和酶的活性,导致土壤肥力下降,作物生长受限;大分子碳氢化合物堵塞植物根系孔隙,使植物根系腐烂,从而导

致植物生长缓慢直至死亡.重金属进入土壤后,被作物富集沉积,食用后致病致畸风险增加.此外石油烃随着雨水冲刷进入地下水系,导致水体溶解氧减少,生物多样性下降^[13].

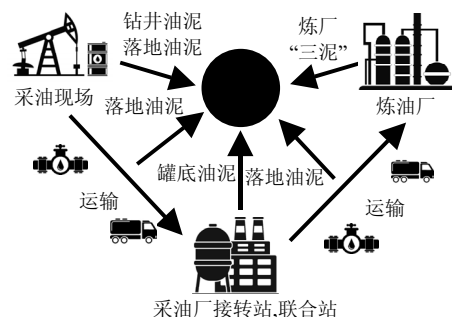


图 1 含油污泥来源及分类

Fig.1 Source and classification of oily sludge

处理难度高主要原因是:(1)含油污泥来源广,种类多,不同来源的油泥组成差别较大,适用的处理方法也不同;(2)含油污泥中胶质、沥青质和石油酸等天然乳化剂促进油水乳化,固相中的细小颗粒吸附到界面膜上,增加了界面膜刚性和强度,表面活性剂、聚合物和碱性无机盐等药剂也会使油泥乳化加剧,乳状体系稳定性增强;(3)油泥粘度高、比阻大、在水中分散性差,破乳剂、添加剂、填充材料等难以与含油污泥均匀混合,影响处理效果;(4)含油污泥体量大,单位质量油泥中有害物质比重高,对于环境危害大,处理要求高.

处理时效性强主要体现在两点,一是含油污泥放置过程中,挥发性有机物、渗滤液等对环境的危害逐渐增大.二是随着油泥放置时间延长,油泥中轻组分石油烃和水相持续挥发,使油泥中重组分物质占比增加,沥青质由分散的大分子变为分子簇状态,附着在界面膜上,增加了界面膜的强度和粘弹性.固体颗粒上吸附了更多的沥青质分子,增强了细小颗粒对界面膜的吸附性和吸附强度,使更多颗粒吸附在界面膜表面上,界面膜的刚性增强,油泥乳化体系稳定性增强^[14].

2 含油污泥处理技术分类

目前含油污泥的处理技术已经显著发展,形成了不同的处理处置技术.根据处理目标的差别,从减量化、资源化和无害化 3 个方向对含油污泥处理技术进行总结与分类(图 2).

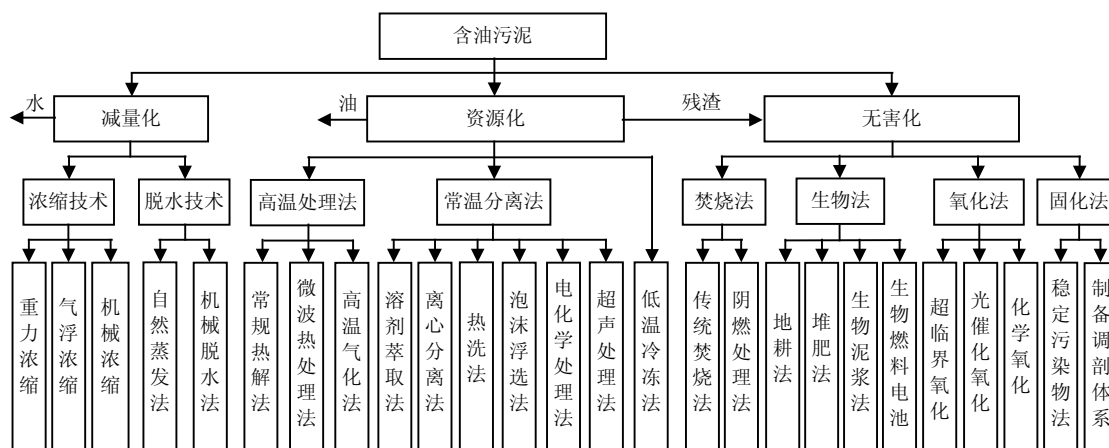


图2 含油污泥处理技术分类

Fig.2 Classification of oily sludge treatment technologies

2.1 减量化处理技术

含油污泥减量化处理技术是通过脱水、污泥浓缩等方式减少含油污泥的体积。减量化处理的主要目的在于降低油泥的含水量,减少污泥体积,以便降低含油污泥后续处理难度和处理成本^[15]。

含油污泥减量化技术可以分为污泥浓缩技术和污泥脱水技术。污泥浓缩技术是通过污泥增稠的方式,降低含油污泥的含水率,减少污泥的体积。Gao 等^[16]将热洗法与原位机械压缩法相结合,处理温度在 120~240℃时,脱水率可达 77%~96%,显著减少了含油污泥的体积。污泥脱水技术有自然蒸发和机械脱水两种方法^[17-18],其中机械脱水法效果稳定,操作简便,目前是大多数油田减量化处理的主要方式。魏立新等^[19]对机械脱水减量化处理含油污泥的工艺流程进行优化,处理后油泥含水率由初始的 97.03%下降到 47.44%,减量化效果显著。

含油污泥中的水相可以分为游离水(自由水)、毛细水、间隙水、表面吸附水、结合水 5 种形式,单一减量化处理技术难以去除油泥中的非自由水^[20],因此在含油污泥减量化处理前,需要加入不同的添加剂,增强含油污泥的脱水效果。表面活性剂可以破坏含油污泥的乳化体系,削弱含油污泥中絮状物之间的结合作用,释放含油污泥中的胞外聚合物(EPS),中和负电荷,使束缚水含量下降,提升含油污泥的脱水效果^[21]。Puasa 等^[22]研究了棕榈基酯季铵盐(PBE)对含油污泥脱水率的影响,添加量为 100mg/L 时,使含油污泥的脱水率从 20.10%提高至 81.31%。

Zhen 等^[23]使用活性 $\text{Fe(II)-过二硫酸盐}(\text{Fe}^{2+}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-})$ 氧化了 EPS,释放 EPS 的边界水,破坏了含油污泥的油水乳化层,使毛细抽吸时间由 79.9s 缩短至 51.1s。有机溶剂以萃取的方式也可以使含油污泥显著脱水,Mu 等^[24]利用液化二甲醚对含油污泥中饱和烃、芳香烃和少量胶质的溶解能力,打破了含油污泥的油包水结构,处理后含油污泥含水量下降了 90%,原油回收率达到 40%。为进一步提升处理效果,降低成本,Mu 等^[25]将醇类溶剂作为助剂添加到处理体系中,结果表明醇类溶剂促进了油水界面膜上的胶质和沥青质的溶解,降低了界面膜强度,显著提升了二甲醚对于含油污泥的脱水效果,最大脱水率超过 95%,使二甲醚用量降低程度高于 50%。除此之外,添加生物炭等材料也可以显著提升污泥减量化处理效果^[26]。

2.2 资源化处理技术

资源化处理能够将含油污泥中有价值的物质处理后再利用,是处理含油污泥的最优途径。美国石油学会的环境指导文件《陆地固体废物管理方法》指出,资源化处理是处理含油污泥时首先考虑的处理方向^[27]。根据处理温度的不同,含油污泥资源化处理方法可以分为低温冷冻法、常温分离法和高温处理法。

2.2.1 低温冷冻法 冷冻/解冻法利用了水和油凝点的差别较大的现象,部分水相凝固后体积膨胀,打破了油相的束缚,凝固水滴聚集的同时产生了足够大的裂缝使未凝固的水滴渗透聚集,解冻后油水分离^[28]。影响低温冷冻/解冻法处理含油污泥效果的因

素有冷冻/解冻的温度、冷冻时间间隔、含水率、矿化度、固体含量等^[29].Zhang 等^[30]分别使用冷冻/解冻法、超声波法和两者相结合的方式处理含油污泥,冷冻/解冻法原油回收率为 65.7%,在三种方法中最高,相应的超声波处理原油回收率仅为 58.9%,而超声波和冷冻/解冻相结合回收率为 64.2%.Hu 等^[31]将冷冻/解冻法和溶剂萃取法联合用于处理含油污泥,可以将原油回收率由萃取处理时的 40%提升至 60%.因为低温冷冻法对于环境要求高,低温地区外处理成本比较高,因此近期对于低温冷冻法的研究和应用较少.

2.2.2 常温分离法 常温分离是含油污泥资源化处理的主要方式,可分为溶剂萃取法、离心分离法、热洗法、气浮法、电化学处理法及超声波法等多种处理方法.

(1)溶剂萃取法是将萃取剂与含油污泥按照一定的比例混合,将油相萃取到萃取剂中形成萃取液,蒸发萃取液后分离回收原油与萃取剂^[32].溶剂萃取法处理效果与萃取温度、压力、固液比、混合程度、萃取剂种类等因素有关,其中萃取剂种类对处理效果的影响最为显著^[33].梁倩倩等^[34]分析了多种萃取剂对于含油污泥的萃取效果,结果表明甲苯作为主萃取剂效果最好,建立了甲苯为主,烃-醇复配剂为辅的萃取剂体系,同时考察了萃取温度、时间、搅拌速度、固液比等因素对于萃取效果的影响.Farzad 等^[35]将甲基乙基酮和甲苯选做极性和非极性的代表溶剂萃取含油污泥,当含油污泥中原油组分主要是非极性组分时,非极性溶剂萃取效果更好.Tian 等^[36]研究了离子液体(1-乙基-3 甲基咪唑四氟硼酸盐)对溶剂萃取法回收原油效果的影响,在含油污泥中添加 0.1%的离子液体后,萃取剂/油泥比从 12:1 降至 0.8:1,萃取时间从 60min 降低至 10min,摇动速度由 500r/min 降至 100r/min,原油回收率由 95.49%提升至 96.92%.

超临界 CO_2 萃取是油泥萃取的新兴技术, CO_2 在超临界状态下,密度接近液体,粘度与气体相近,扩散系数近乎液体的 100 倍,说明超临界 CO_2 在具有较大溶解度的同时也具有较好的传质效率^[37].王思凡等^[38]使用超临界 CO_2 萃取技术实现了对油基钻屑油水萃取,使处理后干钻屑含油率降至 1% 以下,回收油可直接配制油基钻井液,降低了处理

成本.超临界 CO_2 萃取技术也表现出了一定的经济优势,Lin 等^[39]对比了土壤修复的多种方法,发现超临界 CO_2 修复土壤的成本为 100~300USD/ m^3 ,小于热解吸的 100~380USD/ m^3 和生物修复的 245~475USD/ m^3 .

(2)离心分离法是利用高速旋转设备产生强大的离心力,分离含油污泥中不同密度的各个组分.Wang 等^[40]研究了含油污泥在离心过程中油相与固相的分离规律,研究表明分离效果与固相粒径,各组分密度差及乳状液的黏度相关.Motevali 等^[41]将离心温度升至 55℃,分别添加氯化铁、硫酸亚铁和表面活性剂(吐温 80)等处理药剂,使回收燃料的热值增加了 23%,处理成本降低了 70%.

(3)热洗法是将含油污泥与热水、热洗药剂混合,使含油污泥中的原油脱附聚集后分离.热洗效果受含油污泥特性、热洗温度、搅拌速率、热洗药剂种类及加量等因素的影响^[42-43].碱性无机盐作为最常用的热洗助剂,可以显著提升热洗法的处理效果,张大山等^[43]对于表面活性剂和无机盐组成的复配体系进行优选,建立了碱性无机盐-阴离子-非离子表面活性剂热洗药剂体系,除油率达到 75.1%.Duan 等^[44]以表面张力作为评价指标,分别从碱、表面活性剂、生物表面活性剂中选出 Na_2CO_3 、AEO-9 及鼠李糖脂,并按照 10:2:1 的比例复配作为热洗药剂,热洗后残渣的含油量降低至 0.5%.热洗反应器对于处理效果也有较大影响,Zhao 等^[45]在优选热洗药剂种类,优化热洗条件后,研究了热洗反应器对于处理效果的影响,结果显示,与传统的搅拌槽反应器(STR)热洗处理后含油率 5.47%相比,旋转填充床(RPB)处理后含油率为 3.13%,处理效果更好.

(4)气浮法将含油污泥与一定量的水混合后注入气泡,气泡与油滴接触后,界面膜变薄至破碎,产生能量推动油滴快速上升至顶部聚集分离^[46].气浮法的回收效果受油泥性质、矿化度、温度、pH 值、气泡大小、添加剂以及浮选时间等因素的影响.Li 等^[47]发现提高叶轮速度可以产生更强的剪切强度和气浮作用,从而提高原油从固体表面的分离效果.但叶轮速度过高会阻碍稳定泡沫层的形成,使处理效果下降.对处理参数优化后,两种油泥处理后含油率可降至 1.2%和 0.6%.为了减少二次污染,提高气浮

中水相的重复利用性,Li 等^[48]将气浮法与离心法相结合,并对其处理参数进行优化,处理后原油回收率为 93.7%,残渣含油率为 3.1%,油相中固体含量降低至 0.8%,浮选和离心过程中回收的水相可以重复利用,在减少污染的同时提高了回收油的品质.陈红硕等^[49]进一步提升了处理效果,通过“球磨+浮选”联合工艺处理后的罐底油泥尾矿含油率可降低到 0.8%,且回收的油分含水率与含固率均低于 0.5%,可在炼厂进行回收利用,为油泥的无害化、资源化处理提供了一种参考.

(5)电化学处理法利用低强度直流电流穿过多孔介质两侧的电极对,在电解、电渗、电泳、扩散和电迁移 5 个基本过程联合作用下油水固三相分离,处理效果受电极材料、电阻、pH 值、电势、电极间距和添加剂等多种因素的影响^[50-51].Maria 等^[52]以破乳率作为评价指标,调节不同梯度的电势处理含油污泥,电势为 0.5V/cm 时破乳率为 0.0210g/d,比 1.5V/cm 时的 0.0159g/d 提高了 32%,结果表明了较低的电势更有利于回收含油污泥中的原油.目前电化学处理法的研究热点是将电化学与微生物法相结合,通过外加电场促进营养物质在污泥中均匀分布,同时刺激微生物保持较高的酶活性和代谢活性,增强细菌运动,提高微生物的降解效率.譙梦丹等^[53]将两株菌分别以 2.5%的接种量加入含油污泥中,施加电场处理 20d,相比单独的微生物组(7.45%)和电动组(14.18%),电场强化微生物组的石油烃降解率达到 31.25%.

(6)超声波法是指利用超声波通过不同介质产生的气穴效应,增强液相质量传递,增加液滴之间的碰撞频率,从而破坏油泥稳定性,实现固液分离^[54-56].He 等^[57]分析了超声功率、频率、超声时间、初始温度、pH 值、油泥亲/疏水性等因素对含油污泥的原油回收率的影响,通过正交试验的方差分析,超声功率的方差 F 大于 2.49,远大于其他因素,结果表明超声功率是影响超声波法回收原油效果的主要因素.Zhao 等^[58]使用聚乙烯、玻璃、陶和 305 不锈钢材质的反应器处理含油污泥,除油率分别为 94.06%、84.11%、81.26%和 73.22%,表明低声阻介质材料的反应器除油率更高.玻璃反应器的直径从 7.5cm 增加到 11.5cm 时,除油率从 47.74%增加到 96.5%,底部厚度从 0.8mm 增加到 4mm,除油率从

84.32%降低到 81.77%,即降低了 2.55%,结果表明反应器越薄,反应直径越大,超声波能量损失就越小,原油回收率也就越高.无搅拌时除油率为 84.11%,辅助搅拌强度为 200r/min 时,除油率达到 92.8%,提升至 600r/min 时,除油率却降低到 78.03%.表明适度的辅助搅拌有利于原油回收,但搅拌强度如果过大,回收率反而会降低.Gao 等^[59]使用超声波法处理含油量为 25.0%~42.0%的含油污泥时,原油回收率为 46.0%~60.7%,加入表面活性剂(Span-80)后,原油回收率可提升至 82%~90%.

2.2.3 高温处理法 高温处理法可以分为热解法、微波处理法和高温气化法三种方法.

(1)热解法是在惰性气体的保护下,油泥中的有机物在高温下分解,产生轻质石油烃类物质及固体焦炭,使油、水与固三相分离^[60-61].温度、升温速率、油泥特征等因素对热解效果影响较大^[62-63],添加催化剂可以有效增强热解效果^[64].Hu 等^[65]使用锯屑与含油污泥共热解,热解油的产率提升了 4%,H/C 比从 1.5 提高到 2.0,热值从 19.5MJ/kg 提高到 24.5MJ/kg. Lin 等^[66]将 KOH 作为添加剂,使直链烃进一步分解,热解油的平均分子量从 673 降低至 316,粘度降低了 0.7Pa·S,热值提升了 6.3%,热解油的品质提升.为了进一步提升油泥的热解效率,继而使用锌改性的 HZSM-5 沸石催化热解含油污泥,总芳香烃的回收率从 58.7%提升到 81.0%,萘的回收率也从 31.5%增加到 67.5%^[67].后又采用生物质稻壳与含油污泥共热解,稻壳与含油污泥的协同作用使热解产物中饱和烃和芳香烃的含量分别增加了 15%~55%和 55%~86%,这是因为灰分和生物质衍生碱金属的催化作用,促进了重质油产物的二次分解^[68].

(2)微波法将微波能量直接渗透到油泥内部,水相的介电损耗比油相更高,可以吸收更多的微波能量^[69],吸收能量后水相体积膨胀,油水界面膜变薄;而且微波辐射可以使水分子周围的电子重排,破坏油水界面的双电子层,使油泥加速破乳,油相和水相更容易聚集分离^[70].微波功率、处理时间、添加剂、pH 值、矿化度和油泥性质等因素都会影响微波辐射的处理效果.添加破乳剂、表面活性剂、磁性纳米颗粒和微生物菌体等也可以显著提升油泥的分离效果^[71-72].Wen 等^[73]对含油污泥及其微波热解产物的

分析表明,当温度为 450~500℃时,残渣中的固定碳含量从 1.27%增加到 5.79%,表明此阶段油泥中发生明显的缩合反应,多环芳烃产率增加.微波法可控制温度低于 450℃,主要发生芳构化反应,生成的单环芳烃生物毒性远小于多环芳烃,产物的生物毒性大幅度降低.Krishnasamy 等^[74]使用微波法处理含油污泥,使油泥体积减少 80%~90%,同时原油回收率为 50%~70%.丁慧等^[75]使用微波法现场处理含油污泥,原油回收率最高可达 99.84%.

(3)高温气化技术是热处理含油污泥的新兴方法.以水蒸气、CO₂等为气化剂,将含油污泥中的有机物转化为 CO、H₂等可燃气体,实现能源的清洁利用,大大提高了能源回收效率^[76].Cho 等^[77]研究表明,在 CO₂气氛下,单晶氧化锆作为催化剂可以提升咖啡废料的气化效果,使 CO 产量翻倍.Wang 等^[78]研究了含油污泥在 CO₂气氛下的气化特性,根据热重分析结果显示,不同类型的油泥反应终止温度不同,但是油相转化温度都在 200~550℃之间.气化产物主要是 CO 和 H₂,温度超过 800℃时,CO 产量激增,但 H₂的产量增加幅度较小.高温气化法目前研究大多在实验室中进行,还存在产量低,能耗高,产气纯度低,容易产生二次污染等问题,还需要针对这些问题进行进一步的研究.

2.3 无害化处理技术

含油污泥无害化处理技术可分为焚烧,固化,氧化和生物处理法.

2.3.1 焚烧法 焚烧法是在足量空气和助燃剂的条件下,使含油污泥完全燃烧.焚烧效果受装置类型、持续时间、温度、助燃剂和油泥进料率等因素的影响;焚烧过程中所产生的废气、灰渣等需要进一步处理^[79].关于含油污泥焚烧的研究,目前多是将含油污泥与煤、生物质等其他可燃废弃物混合,提高油泥的燃烧性能,制成可利用的成型燃料^[80].王凤超等^[81]将含油污泥、煤、黏土和杏壳按照 4:4:1:1 的质量比制成型煤,热值可达 16505kJ/kg,780℃时,焚烧过程产生的二氧化硫、氮氧化合物的浓度分别低于 60 和 55mg/m³,焚烧残渣及残渣浸出液中的 Cu 等重金属离子浓度,均低于含油污泥综合利用污染物指标.

阴燃法是油泥焚烧处理的新兴研究方向,与传统焚烧法相比,阴燃法具有能耗低,处理彻底,产生废

气少的优点.影响阴燃法处理效果的主要因素有油泥组分、燃烧特性、氧气流流量和外部热源,通过控制氧气流流量使油泥在处理过程中保持阴燃状态,氧气流流量过高会变为明火燃烧,过低则会导致熄灭^[82].杨高玄等^[83]使用阴燃法处理含油污泥,优化处理条件后,油泥中石油烃去除率高达 99%.根据对产物的分析结果可知,阴燃温度低于矿物盐的分解温度,有效降低了含硫、含氮类气体的产生量.葛传芹,雷大鹏等^[84-85]进行了油泥阴燃法处理中试实验和处理工程示范,阴燃处理后的油泥总量减少 90%,目标污染物去除率达到 98%以上,满足项目验收指标.

2.3.2 固化法 固化法是将含油污泥和固化剂、凝结剂以一定比例混合,将污染物转化为较难溶解或相对稳定的形式,并通过固化剂作为基质来封装污染物的处理方法^[86-87].常用固化剂可分为无机类(水泥、粉煤灰、石灰、石膏、硅酸盐等)及有机类(脲醛树脂、环氧树脂等)^[88].Zhang 等^[89]使用 DVB、苯乙烯和 BA 为原料合成了一种新型固化剂,添加 30%~150%固化剂即可固化含油率为 20%~80%的含油污泥,固化后的固化污泥浸出液中含油量为 2~5mg/L,低于 GB8978-1996 标准^[90]中的 5mg/L.

含油污泥经过调质制成调剖剂是当前含油污泥固化处理的热点,通常是通过机械筛分、乳化分散、悬浮降粘来提高含油污泥的悬浮稳定性能,使其制备的调剖体系达到油田应用的要求^[91].谢建勇等^[92]使用预处理后的含油污泥制备成悬浮体系、冻胶体系和固化体系 3 种调剖剂体系,现场应用后,平均井组增油 221t,井组见效率为 92.3%,与常规调剖体系相比差别较小,同时实现了污染物处理和经济效益增加.

2.3.3 氧化法 氧化法是通过化学氧化或其他强化氧化的方法降解含油污泥中的有机污染物,将其氧化成为二氧化碳、水和无机盐等无害物质.常用的氧化方法有化学氧化,超声波氧化,光催化氧化,湿式氧化和超临界水氧化等.化学氧化法是使用芬顿试剂、次氯酸盐、高锰酸钾等氧化剂,产生大量强氧化性的羟基自由基,有效降解油泥中的有机污染物^[93].谷广锋等^[94]比较了高锰酸钾、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸钠和活化过硫酸钠这 5 种氧化剂对含油污泥的处理效果,氧化剂对 C10~C14 去除率均高于 50%,芬顿试剂去除率最高,可达 63%;高锰酸钾对 C15~

C28 和 C29~C36 去除效率分别为 36%和 43%。超声波氧化法是利用空穴效应所产生具有强氧化性的中间自由基($\text{H}\cdot$ 、 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{HO}_2\cdot$ 、 H_2O_2),可分解石油烃、芳香烃、酚类等多种有机物质。增加羟基自由基与石油烃的接触时间和频率可以增强处理效果^[95]。超临界水氧化法是指以超临界状态的水作为反应介质与气、油形成单一均相,然后快速彻底的将 H-C-N 化合物氧化为水、二氧化碳和氮气^[96]。Zhong 等^[97]使用超临界水氧化法处理油基钻井泥浆,在 500℃下处理 10min,TOC(总有机碳)的去除率可达 89.2%。湿式氧化法是在高温高压条件下利用氧气将有害物质氧化为 CO_2 、 H_2O 和其他无害产物^[98]。光催化氧化基于光敏材料表面对于光(紫外或太阳光)的活化作用,将氧气作为电子受体形成超氧化自由基负离子 $\text{O}_2^{\cdot-}$,束缚水和羟基形成羟基自由基,进而氧化有机污染物^[99]。Otidene 等^[100]分别使用黑色光与白色光处理含油量为 218.22mg/kg 的含油污泥,处理 96h 后,白色光处理率达到 100%,高于黑色光的 75.52%。

2.3.4 生物法 生物法是利用微生物降解含油污泥中的污染物。常见的生物降解处理法包括地耕法、生物堆肥法、生物泥浆法和微生物燃料电池法。

(1)地耕法将油泥和新鲜土壤混合散布地面上,通过控制油泥比、通风度、施肥程度、湿度、温度和 pH 值等条件使微生物的密度和活性保持稳定,降解油泥中的污染物^[3]。Alkhateeb^[101]使用地耕法处理含油污泥,120d 后原油降解率可以达到 95.7%。Mishra 等^[102]通过生物强化(引入外来菌落)和生物刺激(添加营养素和水)增强地耕法的处理效果,120d 后 TPH(总石油烃)的降解率可达 90.2%,远高于对照组的 16.8%。地耕法成本低,操作简便,处理规模大,但耗时长,所需空间大,处理效果不稳定^[103],还有可能污染地下水,目前应用较少。

(2)生物堆肥法是将有机质与含油污泥混合后堆成 2~4m 高的肥堆,利用本源或异源微生物降解。肥堆中装有固定的曝气装置,或者添加稻草、锯末、树皮及木屑等填充物可以增加肥堆的孔隙度,有利于空气流通和湿度分布,显著提升处理效果^[104-105]。调整 C:N:P 的比例,增减曝气或翻耕频率,控制湿度和温度,保持生物活性等方式均可提升处理效果^[106]。张传涛等^[107]开展使用混合菌剂强化堆肥法处理含油污泥的小试试验,结果表明 7%的含油污

泥经过生物强化堆肥法处理 49d 后,油泥降解率在 85%以上。随后徐开慧等^[108]同样使用微生物菌剂强化堆肥法,开展现场实验,堆肥达到深度腐熟,初始石油烃含量为 7.8%的含油污泥经过 42d 降解后含量变为 0.8%,降解率可达到 89.7%。Koolivand 等^[106]建立了两阶堆肥反应器,通过两级处理系统 TPH(总石油烃)去除率达到 90.07%~94.23%,高于第一级的 72.13%~89.42%和第二级的 68.36%~81.63%。Tran 等^[109]对堆肥过程中微生物群落研究发现细菌使用 TPH 作为碳和能源,而真菌产生的酶可以催化 TPH 的氧化反应,细菌和真菌之间相互关系形成了一个强大的生物降解系统,但细菌和真菌群落之间的相互作用以及石油烃降解的具体机理尚不明确,需要进一步研究。

(3)生物泥浆法属异位生物修复技术^[110],将油泥、黏土和水混合成为泥浆相,微生物将泥浆中溶解性污染物降解为毒性较小的中间体(例如有机酸和醛)或直接降解为最终产物(二氧化碳和水)^[111-112],可以将微生物含量、pH 值、营养条件和氧气等变量调节到最优值,从而更高效的降解污染物。Forján 等^[113]将生物泥浆法分别结合生物刺激、生物强化处理含油污泥,在 14d 内 PAH(多环芳烃)的降解率都超过了 80%。罗飞等^[2]利用 FLUENT 软件模拟确定最佳工作参数,在生物反应器中降解 6kg 的含油污泥,9d 后石油烃降解率高达 86.20%,处理后油泥含油率为 1.46%,处理效果较好。目前生物泥浆法还是主要处于实验室研究阶段,现场应用较少,需要进一步开展现场应用试验,增大泥浆反应器的处理量和应用范围^[114]。

(4)微生物燃料电池通过电极与微生物间的相互作用,将微生物降解有机物产生的电子提取出来,从而将化学能转化为电能^[115]。微生物燃料电池现在已经广泛应用在废水废气中氨氮和有机物的去除,在含油污泥处理方向还主要处于实验室研究阶段。处理效果受阳极底物、电极材料、电极尺寸、pH 值和添加剂等因素的影响^[116-117]。Guo 等^[118]向油泥中投加了产电微生物,改善了微生物燃料电池的产电和处理效果,最大输出电压、功率密度和原油去除率分别为 384.90mV,1277.90mW/m³ 和 56.51%。后又从含油污泥中筛选分离出一株产电细菌,调整了氮磷比、温度和 pH 值等参数,使最大功率密度,COD

和油污去除率分别达到 65mW/m^3 ,90.51% 和 87.76%^[119]. Hwang 等^[120]利用表面活性剂提高单室微生物燃料电池的产电效率,发现 SDS 的加入形成胶束,增加了可溶性化学需氧量,最大功率密度提升至 $(225.3\pm 3.2)\text{mW/m}^3$,证明加入合适的表面活性剂可以提升含油废水的生物降解率.

3 含油污泥处理技术对比

含油污泥的产生是石油工业不可避免的问题.由于其特性和对环境的有害性,含油污泥需要资源化,无害化处理.表 1 总结了本文所列出的处理方法,并从适用范围,处理条件,处理结果,研究趋势等方向进行比较分析.

此外,还对含油污泥处理技术近期研究趋势和应用现状进行总结.目前研究热度比较高的处理方

法有热解法、微生物法、热洗法、焚烧法.热解法研究热点为热解过程中反应机理研究,新型热解催化剂的制备和热解残渣资源化利用研究;微生物法的研究热度集中在菌种及其代谢产物降解石油烃机理,添加剂和处理条件等对处理效果影响以及现场应用试验;热洗法研究集中在热洗药剂开发及热洗条件的筛选优化;焚烧法的研究重点在制备成型燃烧颗粒和燃烧残渣资源化利用.目前我国约 88% 的含油污泥是通过机械分离、热解、热化学清洗、固化、脱水、热气化、焚烧这七种方法处理,其中应用最广泛的是热化学清洗,其处理量为总量的 42.13%.其次是机械分离,其处理的含油污泥量占总量的 25.28%.这两种处理方法也是在现场应用中原油回收率最高的两种方法,每年分别可回收 $323.82\times 10^3\text{t}$ 和 $126.92\times 10^3\text{t}$.

表 1 含油污泥处理方法汇总
Table 1 Summary of Oily Sludge Treatment Methods

分类	处理方 法	处理前		处理中			处理后		
		适用油泥 特征	应用范围	周期	成本	场地	处理结果	处理产物	目前研究趋势
减量化	污泥浓 缩/分离 技术	乳化程度 较低,容易 分离的油 泥	工艺简单,对场 地,操作条件,配 套设施等要求较 低,应用范围广泛	短	低	小	含油污泥体积减 小,降低了后续处 理的难度和成本	乳状液,减量化 油泥	1、研究油泥分离沉降机理,分析油泥调质脱稳,固液分离的影响因素; 2、针对含油污泥的特性,开发更为高效环保的油泥调质药剂和分离装置; 3、分析油泥特性,调质药剂与分离装置之间的配备程度,建立高效分离体系.
	低温冷 冻法	油水含量 较高的油 泥	主要应用于温度 较低的地区	较短	低	小	含油污泥中部分 油相,水相分离	油相,水相,未分 离油泥	冻融法处理效率低,需研究新型添加剂,优化处理条件,以及与其他方法协同处理等,提升处理效率.
	溶剂萃 取法	含有大量 难降解有 机物的油 泥	工艺简单,对应用 场景要求低,应用 范围广泛	短	较高	小	油泥中绝大部分 原油被萃取,油水 固三相分离	回收的萃取剂, 油相,水相,处理 后固相	1、单一种类的萃取剂处理效果不稳定,探究不同萃取剂协同处理机理,开发复合型萃取剂体系; 2、提高萃取剂重复利用次数,降低处理成本,减少了萃取剂废液所造成的二次污染; 3、开发非有机溶剂类,如超临界 CO_2 的萃取技术.
资源化	热洗法	油水含量 较高的油 泥	工艺简单,对应用 场景要求低,应用 范围广泛	短	较高	小	有效降低油泥中 的含油率,使油泥 破乳,三相分离	大量含油污水, 分离的原油,处 理后固相	1、开发高效,环保,廉价的响应性清洗剂,降低处理成本,减少处理过程中所造成的二次污染; 2、结合油水分离装置,提高热洗处理效果.
	超声处 理法	绝大多数 油泥	实验室研究阶段, 现场应用较少	短	高	小	部分油泥脱稳分 离	含油污水,未分 离油泥	1、探究超声波参数,处理条件和油泥特性等因素对处理效果的影响机理,提高处理效果,降低处理成本; 2、开展超声法在油田现场处理油泥的可行性试验.
	泡沫浮 选法	粘度低,含 水率高的 油泥	常与热洗法结合 使用	短	低	小	低粘度油泥部分 分离,但难以分离 吸附固相表面的 重组分	含油污水,未分 离油泥	1、发展微纳米气泡气浮法,研发稳定产生目标尺寸的微纳米气泡的技术和装置; 2、气浮法与其他处理工艺联合使用,优化其工艺设计和技术参数.
	电化学 处理法	绝大多数 油泥	实验室研究阶段, 现场应用较少	较短	低	小	部分油泥三相分 离;重金属离子 在阴极形成沉淀 去除	含油污水,油相, 未分离油泥	电化学处理法与生物法协同作用处理含油污泥,分析电化学处理中电极材料,电压,环境参数等因素对微生物降解油泥效果的影响,研究两者之间的协同效应.

续表 1

分类	处理方 法	处理前		处理中			处理后		
		适用油泥 特征	应用范围	周期	成本	场地	处理结果	处理产物	目前研究趋势
	常规热 解法	更适合含 水率较低 的油泥	对于场地,环境要 求低,应用范围广	短	高	小	油泥中水相完全 挥发,油相以气态 或液态的形式分 离,重组分,重金 属和矿物质等形 成热解残渣	热解气,热解油, 热解残渣	1、研究热解装置,热解条件,催化剂,油泥物性等因素对处 理效果的影响,优化处理条件,提升处理效果,降低处理能 耗; 2、研究热解残渣的再利用价值,优化热解工艺提升热解残 渣的应用效果,以资源化利用,无害化处理为目标,拓宽残 渣应用范围.
	微波热 处理法	更适合含 水率较低 的油泥	实验室研究阶段, 现场应用较少	短	高	小	水相蒸发冷凝,油 相中轻组分以不 凝气和液态的方 式回收,重组分和 固相成为热解残 渣	热解气,热解油, 热解残渣	1、改良微波处理装置,增加装置的处理容量,提升能量利 用率,减少能量损耗; 2、合成新型高效,节能环保的催化剂,提升处理效果,降低 成本.
	高温气 化法	绝大多数油 泥	实验室研究阶段, 现场应用较少	短	高	小	油泥中部分有机 质生成富氢气体, 油泥分离处理效 果较差	以 CO ₂ H ₂ 为主 的可燃性气体, 未处理含油污 泥	1、优化气化装置,加入催化剂,填充剂等方式降低气化能 耗; 2、增强尾气处理,减少二次污染.
	地耕法	绝大多数 油泥	需要大面积的处 理场地	长	低	大	一定程度的降解 石油烃,会产生大 量的挥发性有机 污染物和渗滤液	挥发性有机污 染物,渗滤液,处 理后土壤	需要解决处理过程中所造成二次污染的问题,但解决二次 污染的工艺流程复杂,成本高,因此地耕法现在研究较少.
	堆肥法	绝大多数 油泥	对于环境,场地要 求低,现场应用广 泛	长	低	较大	有效降解油泥中 的石油烃类物质, 对于油泥特性,环 境的适应性更强	相对较少的挥 发性有机污染 物和渗滤液,处 理后土壤	1、改变处理条件,加入添加剂,营养剂等,加快降解速率, 降低处理周期; 2、收集处理过程中产生的挥发性污染物与渗滤液,减少二 次污染.
	生物泥 浆法	绝大多数 油泥	对于环境,场地要 求低,现场应用广 泛	较长	较低	较大	处理效果好,生物 法中生物泥浆法 处理速度快,降解 效率高,处理用地 面积小	污泥泥浆	1、研究泥浆反应器对于处理效果的影响,设计新型反应器 使石油烃,营养物,氧气,微生物充分接触,提高处理效率,使 处理效果最优化; 2、加入添加剂,填充物和营养物质,增强微生物活性,提高 处理效率.
无害 化	生物燃 料电池	绝大多数 油泥	实验室研究阶段	较长	较低	较大	一定程度上降解 了石油烃,降解效 果普通,可以直接 产生电能	电能,未彻底处 理的油泥	1、对于微生物电池降解油泥中的有机物,产生电能的机理 进行进一步的研究; 2、研究影响微生物电池处理效果及产能的因素,优化电池 材料构造及处理条件.
	焚烧法	含水率较 低的油泥	对于环境,场地要 求低,现场应用广 泛	短	高	小	处理效率高,石油 烃类物质被快速 彻底的去除	燃烧产生的有 害气体和灰分	1、在含油污泥中添加煤粉,生物质,冶炼残渣等固体废弃 物,提升含油污泥的燃烧性能和机械性能,制成可利用的 燃烧颗粒; 2、向含油污泥中加入添加剂,助燃剂等方式预处理,减少 燃烧过程中产生的有害气体.
	固化法	固相含量 较高的油 泥	对于环境,场地要 求低,现场应用广 泛	较短	较高	小	石油烃,重金属等 有害物质都被封 存	固化产物	1、选择合适的固化剂和填充材料,优化固化配方,有效提 升固化物的机械强度,减少浸出液中的有害物质,降低处 理成本; 2、根据油泥中固相性质,添加不同的固化材料,拓宽油泥 固化产物的应用范围.
	氧化法	绝大多数 油泥	实验室研究阶段, 现场应用较少	短	高	小	去除含油污泥中 的部分石油烃,去 除效果不稳定	二氧化碳,水,未 处理的油泥	1、研究氧化法降解含油污泥中石油烃类物质的机理; 2、探索新型氧化方法和氧化剂,提高处理效果.

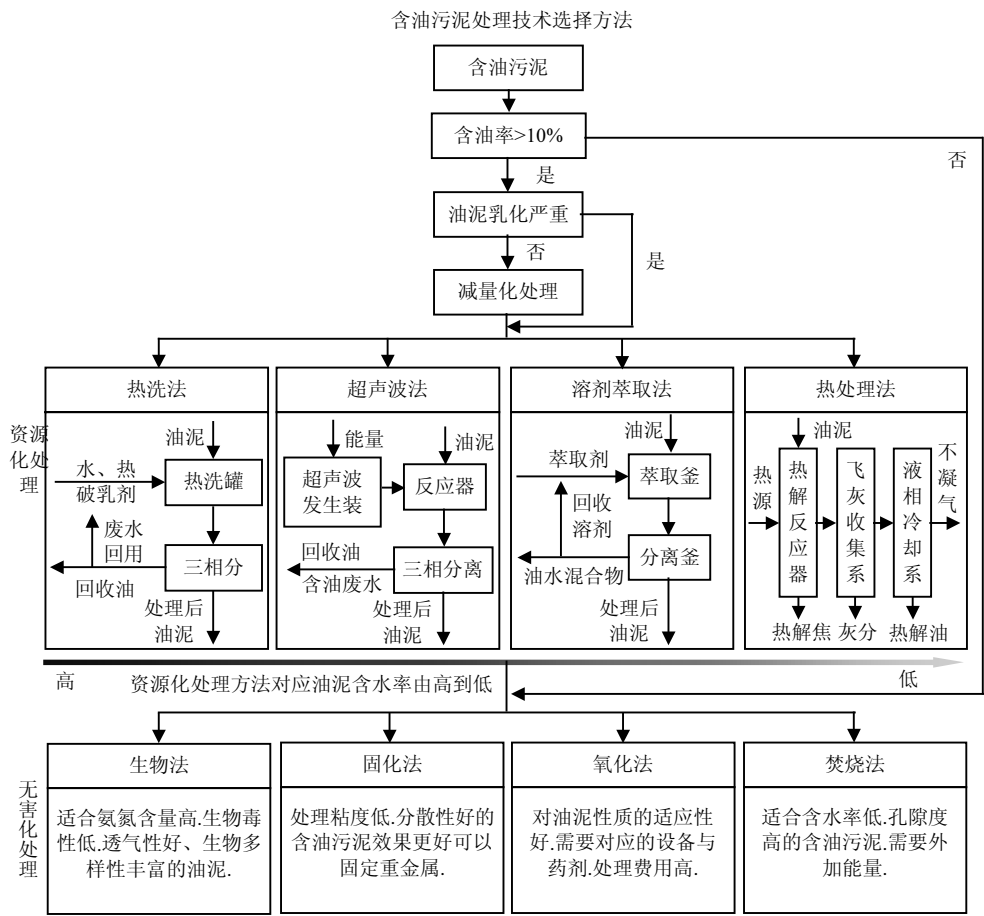


图 3 含油污泥处理技术选择流程图

Fig.3 Flow chart for selection of oily sludge treatment technology

4 结论和展望

4.1 结论

当前研究对于含油污泥的组成结构、性质分析已经取得部分成果,含油污泥中大量存在的石油烃类物质是造成含油污泥危害大、处理难度高的主要因素.正因为含油污泥的这些特性,目前已经开发出多种含油污泥处理技术,根据处理目的不同可以分为减量化、资源化、无害化 3 种.对各项处理技术分析后可以看出,每种技术都有良好的处理效果,但也有明显的限制和不足.比如热解、热洗、溶剂萃取等处理技术适用范围广,处理周期短,但是处理成本高;而堆肥法、生物泥浆法等微生物法处理费用低,但是处理周期长,对处理场地需求较大;离心法处理技术处理周期短,成本低但单独应用效果较差;同时热洗法、焚烧法等产生的副产物也是在应用中不可避免的问题.在进一步研究同时,选择合适的方法也尤为重要,比如含水率高的油泥更适用于热洗法、气浮法

等处理技术,或者通过浓缩、脱水等减量化处理技术降低含水率后再使用其他方法处理,对于固体含量高但含油量相对较少的落地油泥,目前热门的研究方向就是在油田现场制成调剖体系后直接应用,还有氮磷元素等含量较高的炼厂活性污泥,用微生物法处理效果会更好.因此建立了含油污泥处理技术选择方法(图 3),根据含油污泥的含油率、含水率、乳化程度等多种性质,结合处理技术特点和处理目的,选择一种或多种处理技术,达到资源化、无害化高效处理含油污泥的目的.

4.2 展望

目前我国含油污泥产量约为 $4.45\sim6.22\times10^6\text{t}$,预测平均综合利用率为 35%,其中原油利用率占 10%,处理后的污泥利用率占 25%^[12].这一现状说明,含油污泥处理以及综合利用需要进一步发展.

4.2.1 准确分析油泥组成、性质和乳化程度对含油污泥处理极为关键.目前 X-ray 衍射、气相色谱-质谱联用分析和傅里叶红外光谱等方法可以分析含

油污泥的组成结构,但缺乏直接分析油泥中界面膜和固相颗粒表面吸附物结构的表征手段.为了揭示油泥乳化及原油组分吸附聚集到固相颗粒和界面膜上的机理,需要开发含油污泥各组分相互作用方式分析的新方法.结合模拟、计算、实验,有助于进一步研究油泥各组分之间的乳化机理和影响因素,揭示油水界面双层膜的成膜机理.

4.2.2 正确分析含油污泥性质对合理评估含油污泥对环境的影响以及选择合适的处理方法都非常重要.表征含油污泥性质的常见指标包括含油率、含水率、COD、黏度、密度、电导率、石油烃组分等,每项指标都有多种检测方法,评价指标和检测方法的差异会显著影响表征结果.因此需要统一分析步骤,确定主要指标和检测方法,建立综合完善、具有普适性的含油污泥表征体系.

4.2.3 在含油污泥的处理过程中,添加剂扮演着不可或缺的角色.开发纳米流体、开关型微乳液等绿色高效的破乳剂,新型分子筛、金属化合物、焦炭残渣等效果好,寿命长,循环使用率高的催化剂,以及固体废弃物、生物质等经济环保的填充剂,可以使含油污泥的处理效果大幅度提升的同时显著降低处理成本.

4.2.4 目前多种处理技术联合处理含油污泥已经有了一定程度的研究,比如热洗法与离心脱水结合^[21,122],活性水洗与溶剂萃取联合处理^[123],气浮法与离心分离法相结合^[48],生物制剂-微生物降解^[124],电动-微生物法^[53]联合处理.研究多种处理技术之间的协同效应,将不同的方法整合到一个工艺流程中,可以更好的达到资源化,无害化高效处理含油污泥的目的.

参考文献:

- [1] Hu G J, Feng H B, He P W, et al. Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,251:119594.
- [2] 罗 飞,贺利乐.生物法降解含油污泥反应器流场及工作参数研究 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(4):1754-1761.
Luo F, He L. Study on flow field and working parameters of bioreactor for oily sludge degradation Hejazi [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(4):1754-1761.
- [3] Hejazi R F, Husain T, Khan F I. Landfarming operation of oily sludge in and region - human health risk assessment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003,99(3):287-302.
- [4] 杨 勇,杨 庭,郭 兵.含油污泥生物处理物料的危险特性分析及资源化利用研究 [J]. *应用化工*, 2022,51(12):3425-3429.
Yang Y, Yang T, Guo B. Analysis of hazardous characteristics and resource utilization of materials after biological treatment of oily sludge [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022,51(12):3425-3429.
- [5] Ramirez D, Kowalczyk R M, Collins C D. Characterisation of oil sludges from different sources before treatment: High-field nuclear magnetic resonance (NMR) in the determination of oil and water content [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019,174: 729-737.
- [6] 赵泽雨.国内含油污泥处理管控标准现状及比较研究 [J]. *环境污染与防治*, 2022,44(6):829-832.
Zhao Z. Current situation and comparative study on management and control standards for oily sludge treatment in China [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022,44(6):829-832.
- [7] 陈 东,高迎新,李 枫.落地油泥土壤性质对超声除油效果的影响 [J]. *环境工程学报*, 2020,14(2):545-551.
Chen D, Gao Y, Li F. Influence of oil sludge soil properties on oil removal efficiency by ultrasonic treatment [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020,14(2):545-551.
- [8] 郑 发,李浩文,林法伟.大庆罐底油泥热解特性及污染物释放特性 [J]. *化工进展*, 2022,41(1):476-484.
Zheng F, Li H, Lin F. Pyrolysis characteristics and pollutant release characteristics of Daqing oil sludge [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022,41(1):476-484.
- [9] Hochberg S Y, Tansel B, Laha S. Materials and energy recovery from oily sludges removed from crude oil storage tanks (tank bottoms): A review of technologies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,305:114428.
- [10] Jerez S, Ventura M, Molina R, et al. Comprehensive characterization of an oily sludge from a petrol refinery: A step forward for its valorization within the circular economy strategy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,285:112124.
- [11] 刘天波,李 晋,陈春茂.炼化污水处理场三泥处理技术进展 [J]. *炼油技术与工程*, 2020,50(3):60-64.
Liu T, Li J, Chen C. Progress of three sludge treatment technology in refinery wastewater treatment [J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2020,50(3):60-64.
- [12] Wang Q H, Li Y, Benally C, et al. Spent fluid catalytic cracking (FCC) catalyst enhances pyrolysis of refinery waste activated sludge [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,295:112124.
- [13] Johnson O A, Affam A C. Petroleum sludge treatment and disposal: A review [J]. *Environmental Engineering Research*, 2019,24(2):191-201.
- [14] Liu J, Zhang Y X, Peng K M, et al. A review of the interfacial stability mechanism of aging oily sludge: Heavy components, inorganic particles, and their synergism [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,415:125624.
- [15] 张 军,贾 悦,刘 博.油气集输过程中含油污泥减量化 [J]. *化工进展*, 2020,39(S2):372-378.
Zhang J, Jia Y, Liu B. Oily sludge reduction in oil and gas gathering process [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020,39(S2): 372-378.
- [16] Gao N B, Duan Y H, Li Z Y, et al. Hydrothermal treatment combined

- with in-situ mechanical compression for floated oily sludge dewatering [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,402:124173.
- [17] Buyukkamaci N, Kucukselek E. Improvement of dewatering capacity of a petrochemical sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007,144(1/2):323-327.
- [18] 屈京,马跃,岳长涛.含油污泥脱水技术国内外研究现状 [J]. *应用化工*, 2021,50(11):3079-3086.
- Qu J, Ma Y, Yue C. Research status of oily sludge dewatering technology at home and abroad [J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(11):3079-3086.
- [19] 魏立新,李哲,王倩楠.离心式污泥减量化处理工艺方案优化 [J]. *现代化工*, 2016,36(6):136-140.
- Wei L, Li Z, Wang Q. Process optimization of centrifugal sludge reduction treatment [J]. *Modern Chemical Industry*, 2016,36(6): 136-140.
- [20] Tay J H, Jeyaseelan S. Dewatering Characteristics of Oily Sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1993,28(1):249-256.
- [21] Gao N B, Duan Y H, Li Z Y, et al. Hydrothermal treatment combined with in-situ mechanical compression for floated oily sludge dewatering [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,402:124173.
- [22] Puasa S W, Ismail K N, Musman M Z A, et al. Enhanced Oily Sludge Dewatering using Plant-Based Surfactant Technology [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019,19(4):1159-1165.
- [23] Zhen G Y, Tan Y J, Wu T P, et al. Strengthened dewaterability of coke-oven plant oily sludge by altering extracellular organics using Fe(II)-activated persulfate oxidation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,688:1155-1161.
- [24] Mu B A, Zhu W, Zhong J, et al. Mechanism of separation and removal of water from oily sludge using liquid dimethyl ether to dissolve hydrocarbons [J]. *Chemosphere*, 2021,279:130452.
- [25] Mu B, Zhu W, Sun J P, et al. Enhancement of dewatering from oily sludge by addition of alcohols as cosolvents with dimethyl ether [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023,304:122339.
- [26] 郭俊元,文小英,羊润锦.玉米秸秆生物炭改善污泥脱水性能 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(8):3316-3322.
- Guo J, Wen X, Yang R. Preparation of corn stalks biochar and improvement of dewatering performance of sludge [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(8):3316-3322.
- [27] API. API Environmental Guidance Document: Onshore Solid Waste Management in Exploration and Production Operations: 2nd Edition [M]. Washington, DC: American Petroleum Institute, 1997:32-46.
- [28] Feng W L, Yin Y, Mendoza M D, et al. Freeze-thaw method for oil recovery from waste cutting fluid without chemical additions [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,148:84-89.
- [29] 吴镇禹,梁晓燕.冷冻/溶解法对油水乳状液进行油水分离 [J]. *油气田地面工程*, 2013,32(4):18-19.
- Wu Z, Liang X. Freezing-thaw method for oil-water separation of oil-water emulsions [J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2013, 32(4):18-19.
- [30] Zhang J, Li J, Thring R W, et al. Oil recovery from refinery oily sludge via ultrasound and freeze/thaw [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012,203-204(15):195-203.
- [31] Hu G J, Li J B, Hou H B. A combination of solvent extraction and freeze thaw for oil recovery from petroleum refinery wastewater treatment pond sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015,283: 832-840.
- [32] 回军,孙浩程,王宜迪.我国萃取法处理含油污泥的研究进展 [J]. *现代化工*, 2019,39(S1):64-67.
- Hui J, Sun H, Wang Y. China's research progress in treatment of oily sludge by solvent extraction [J]. *Modern Chemical Industry*, 2019, 39(S1):64-67.
- [33] Hamidi Y, Ataei S A, Sarrafi A. A simple, fast and low-cost method for the efficient separation of hydrocarbons from oily sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,413:125328.
- [34] 梁倩倩,乔海燕,石薇薇.炼化含油污泥中有机污染物的提取与分析 [J]. *石油炼制与化工*, 2022,53(1):99-104.
- Liang Q, Qiao H, Shi W. Extraction and analysis of organic pollutions in oil sludge of refinery [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2022,53(1):99-104.
- [35] Nezhdbahadori F, Abdoli M A, Baghdadi M, et al. A comparative study on the efficiency of polar and non-polar solvents in oil sludge recovery using solvent extraction [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018,190:389.
- [36] Tian Y, McGill W B, Whitcombe T W, et al. Ionic Liquid-Enhanced Solvent Extraction for Oil Recovery from Oily Sludge [J]. *Energy & Fuels*, 2019,33(4):3429-3438.
- [37] 贾文龙,宋硕硕,李长俊.超临界 CO₂ 萃取含油污泥研究现状与进展 [J]. *化工进展*, 2022,41(12):6573-6585.
- Jia W, Song S, Li C. Progress of oily sludge extraction by supercritical CO₂ [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022,41(12): 6573-6585.
- [38] 王思凡,胡东锋,李前春.超临界 CO₂ 萃取法处理油基钻屑工艺实验 [J]. *石油钻采工艺*, 2019,41(5):597-602.
- Wang S, Hu D, Li Q. Experimental study on the oil-based drilling cuttings treatment technology based on supercritical CO₂ extraction method [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019,41(5):597-602.
- [39] Chen L, Hasanov J, Chen J, et al. Supercritical fluid remediation for soil contaminants: Mechanisms, parameter optimization and pilot systems [J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2022,189:105718.
- [40] Wang J, Han X, Huang Q, et al. Characterization and migration of oil and solids in oily sludge during centrifugation [J]. *Environmental Technology*, 2018,39(10):1350-1358.
- [41] N M. Investigating centrifuging conditions for sustainable recovery of fuel from oily sludge [D]. Montreal: Montreal Concordia University the Department of Building, Civil and Environmental Engineering, 2020.
- [42] 黄朝琦,秦志文,尚绪敏.含油污泥化学热洗的药剂配方及工艺优化 [J]. *化工进展*, 2020,39(4):1478-1484.
- Huang C, Qin Z, Shang X. Formulation and process optimization of chemical thermal washing of oily sludge [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020,39(4):1478-1484.
- [43] 张大山,陈慧娟,毛林强.碱性无机盐-表面活性剂协同处理炼化油泥 [J]. *化工进展*, 2022,41(1):468-475.
- Zhang D, Chen H, Mao L. Refining sludge treatment with alkaline inorganic salt and surfactant [J]. *Chemical Industry and Engineering*

- Progress, 2022,41(1):468–475.
- [44] Duan M, Wang X D, Fang S W, et al. Treatment of Daqing oily sludge by thermochemical cleaning method [J]. Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects, 2018,554:272–278.
- [45] Zhao S, Li Y J, Qiao N, et al. Study on the oil-sludge separation by thermochemical method in rotating packed bed [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2022,174: 108878.
- [46] 张 军,钟兴福,林黎明.管道式分离技术及其在油气行业混合介质分离中的应用 [J]. 环境工程学报, 2021,15(3):782–790.
Zhang J, Zhong X, Lin L. Pipeline-type separation technology and its application in mixed media separation in oil and gas industry [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021,15(3):782–790.
- [47] Li W, Lin H, Yang Y, et al. Enhanced Separation of Oil and Solids in Oily Sludge by Froth Flotation at Normal Temperature [J]. Processes, 2021,9(12):2163.
- [48] Li W, Ma Y, Feng X, et al. Optimization of an oil recovery process from oily sludge using a combined technique of froth flotation and centrifugal treatment [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,400: 136752.
- [49] 陈红硕,刘佳驹,林俊岭.“球磨+浮选”联合工艺处理罐底油泥的效果 [J]. 环境工程学报, 2019,13(5):1186–1193.
Chen H, Liu J, Lin J. Effect of ball mill + flotation combined process on treating oily sludge of tank bottom [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019,13(5):1186–1193.
- [50] 万德胜.多场作用下含油污泥的减量特性及其实验研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学 机电工程学院, 2020.
Wan D S. Reduction characteristics of oily sludge under multi-field action and its experimental study. [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology School of Mechatronics Engineering, 2020.
- [51] Gidudu B, Chirwa E M N. The Role of pH, Electrodes, Surfactants, and Electrolytes in Electrokinetic Remediation of Contaminated Soil [J]. Molecules, 2022,27(21):7381.
- [52] Elektorowicz M, Habibi S, Chifrina R. Effect of electrical potential on the electro-demulsification of oily sludge [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006,295(2):535–541.
- [53] 谯梦丹,马丽丽,杨 冰.电动-微生物协同处理含油污泥 [J]. 应用化工, 2022,(5):1368–1372.
Qiao M, Ma L, Yang B. Synergistic treatment of oily sludge by electro-bioremediation [J]. Applied Chemical Industry, 2022,(5): 1368–1372.
- [54] Hanxuan S, Yan Y, Weiru Z, et al. Synthesis of nano-beta-CD@Fe₃O₄ magnetic material and its application in ultrasonic treatment of oily sludge [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023,92:106256.
- [55] Liu C, Hu X F, Xu Q, et al. Response surface methodology for the optimization of the ultrasonic-assisted rhamnolipid treatment of oily sludge [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2021,14(3):102971.
- [56] Luo X M, Gong H Y, He Z L, et al. Recent advances in applications of power ultrasound for petroleum industry [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021,70:105337.
- [57] He S L, Tan X C, Hu X, et al. Effect of ultrasound on oil recovery from crude oil containing sludge [J]. Environmental Technology, 2019,40(11):1401–1407.
- [58] Zhao X F, Zhang X Y, Liu L X, et al. Effect of ultrasonic reactor and auxiliary stirring on oil removal from oily sludge [J]. Environmental Technology, 2017,38(24):3109–3114.
- [59] Gao Y X, Ding R, Chen X, et al. Ultrasonic washing for oily sludge treatment in pilot scale [J]. Ultrasonics, 2018,90:1–4.
- [60] Gao N B, Wang X, Quan C, et al. Study of oily sludge pyrolysis combined with fine particle removal using a ceramic membrane in a fixed-bed reactor [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018,128:276–281.
- [61] 黄 静,刘建坤,蒋廷学.含油污泥热解技术研究进展 [J]. 化工进展, 2019,38(S1):232–239.
Huang J, Liu J, Jiang Y. Research progress on pyrolysis of oily sludge [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019,38(S1):232–239.
- [62] Lin B C, Huang Q X, Ali M, et al. Continuous catalytic pyrolysis of oily sludge using U-shape reactor for producing saturates-enriched light oil [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019,37(3): 3101–3108.
- [63] 鲁文涛,何晶晶,邵立明.轧钢含油污泥的热解与动力学分析 [J]. 中国环境科学, 2017,37(3):1024–1030.
Lu W T, He P J, Shao L. Pyrolysis of rolling oil sludge and its kinetic analysis [J]. China Environmental Science, 2017,37(3):1024–1030.
- [64] 李 彦,胡海杰,屈撑国.含油污泥催化热解影响因素研究及热解产物分析 [J]. 现代化工, 2018,38(1):67–71.
Li Y, Hu H, Qu C. Influencing factors for catalytic pyrolysis of oily sludge and analysis of pyrolysis products [J]. Modern Chemical Industry, 2018,38(1):67–71.
- [65] Hu G J, Li J B, Zhang X Y, et al. Investigation of waste biomass co-pyrolysis with petroleum sludge using a response surface methodology [J]. Journal of Environmental Management, 2017,192: 234–242.
- [66] Lin B C, Wang J, Huang Q X, et al. Effects of potassium hydroxide on the catalytic pyrolysis of oily sludge for high-quality oil product [J]. Fuel, 2017,200:124–133.
- [67] Lin B C, Wang J, Huang Q X, et al. Aromatic recovery from distillate oil of oily sludge through catalytic pyrolysis over Zn modified HZSM-5zeolites [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017,128:291–303.
- [68] Lin B C, Huang Q X, Chi Y. Co-pyrolysis of oily sludge and rice husk for improving pyrolysis oil quality [J]. Fuel Processing Technology, 2018,177:275–282.
- [69] Liu Y, Yu H J, Jiang Z H, et al. Microwave pyrolysis of oily sludge under different control modes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,416:125887.
- [70] Lv X, Song Z L, Yu J, et al. Study on the demulsification of refinery oily sludge enhanced by microwave irradiation [J]. Fuel, 2020, 279:118417.
- [71] Chen C X, Ling H J, Qiu S, et al. Microwave catalytic co-pyrolysis of chlorella vulgaris and oily sludge: Characteristics and bio-oil analysis [J]. Bioresource Technology, 2022,360:127550.
- [72] 蒋华义,胡 娟,齐红媛.磁性纳米粒子类型和质量浓度对微波热解含油污泥的影响 [J]. 化工进展, 2022,41(7):3908–3914.
Jiang H, HU J, Qi H. Effect of magnetic nanoparticles type and mass

- concentration on microwave pyrolysis of oily sludge [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022,41(7):3908-3914.
- [73] Wen Y J, Li W X, Xie Y S, et al. A study on the reaction mechanism of microwave pyrolysis of oily sludge by products analysis and ReaxFF MD simulation [J]. Environmental Technology, 2022,43(13):2002-2016.
- [74] Sivagami K, Tamizhdurai P, Mujahed S, et al. Process optimization for the recovery of oil from tank bottom sludge using microwave pyrolysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148:392-399.
- [75] 丁 慧. 含油污泥微波热解工艺条件优化现场实验研究 [J]. 环境污染与防治, 2013,35(4):81-85.
- Ding H. Field test of microwave pyrolysis of oily sludge and the process optimization [J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(4):81-85.
- [76] Nie F, Li Y G, Kun T, et al. Volatile evolution during thermal treatment of oily sludge from a petroleum refinery wastewater treatment Plant: TGA-MS, Py-GC(EGA)/MS and kinetics study [J]. Fuel, 2020, 278:118332.
- [77] Cho D W, Park J, Kwon G, et al. Zirconia-Assisted Pyrolysis of Coffee Waste in CO₂ Environment for the Simultaneous Production of Fuel Gas and Composite Adsorbent [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,386:121989.
- [78] Wang Z Y, Gong Z Q, Wang Z B, et al. Gasification characteristics and kinetic analysis of oily sludge [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022,147(19):10785-10799.
- [79] Gong Z Q, Wang Z T, Wang Z B. Study on migration characteristics of heavy metals during oil sludge incineration [J]. Petroleum Science and Technology, 2018,36(6):469-474.
- [80] 阿依谢姆古丽·赛来, 魏 博, 王建江. 棉花秆粉末掺混油泥制备成型颗粒的燃烧特性研究 [J]. 太阳能学报, 2021,42(8):466-471.
- Ayixiemuguli S, Wei B, Wang J. Combustion characteristics of pressed pellets prepared by cotton straw blended with oil sludge [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2021,42(8):466-471.
- [81] 王凤超, 屈撑国, 王 璞. 含油污泥基型煤成型条件及燃烧速率研究 [J]. 应用化工, 2018,47(7):1382-1386.
- Wang F, Qu C, Wang Y. Study on molding conditions and combustion rate of oily sludge-based briquette [J]. Applied Chemical Industry, 2018,47(7):1382-1386.
- [82] 王天宇, 蒋文明, 刘 杨. 含油污泥阴燃处理技术与进展 [J]. 化工学报, 2020,71(4):1411-1423.
- Wang T, Jiang W, Liu Y. Research and progress of smoldering combustion technology for oily sludge [J]. CIESC Journal, 2020, 71(4):1411-1423.
- [83] 杨高玄, 占敬敬. 阴燃处理华北油田含油污泥的研究 [J]. 应用化工, 2022,51(2):317-321.
- Yang G, Zhan J. Study on the treatment of oily sludge in North China oilfield by smoldering [J]. Applied Chemical Industry, 2022,51(2): 317-321.
- [84] 葛传芹, 雷大鹏, 刘 杉. 采用异位阴燃修复技术处理含油固废中试实验 [J]. 环境工程学报, 2022,16(2):601-611.
- Ge C, Lei D, Liu S. Pilot studies on treatment of oily solid waste with ex situ smoldering remediation technology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022,16(2):601-611.
- [85] 雷大鹏, 单晖峰, 杨 登. 工程化阴燃技术治理含油污泥工程示范 [J]. 环境工程, 2022,40(10):150-155,168.
- Lei D, Shan H, Yang D. A demonstration project of oil sludge treatment with engineered smoldering technology [J]. Environment Engineering, 2022,40(10):150-155,168.
- [86] Lin Z, Wang Z, Hu Y, et al. Mechanical Properties of Cement-Solidified Oily Sludge [J]. Environmental Engineering Science, 2017,34(8):607-615.
- [87] 曹 蕊, 韩冬云, 曹祖斌. 含油污泥的固化与成型机理研究 [J]. 石油化工高等学校学报, 2022,35(2):9-14.
- Cao R, Han D, Cao Z. Study on the Solidification and Forming Mechanism of Oily Sludge [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2022,35(2):9-14.
- [88] Chen B, Liang H, Chen H. Experimental research on oily sludge solidification technology based on environmental protection and renewable utilization [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2020,29 (12A):11685-11692.
- [89] Zhang Z Y, Li L H, Zhang J S, et al. Solidification of oily sludge [J]. Petroleum Science and Technology, 2018,36(4):273-279.
- [90] GB8978-1996 污水综合排放标准 [S].
- GB8978-1996 Integrated wastewater discharge standard [S].
- [91] 戴彩丽, 徐忠正, 刘佳伟. 含油污泥调剖体系的制备及调剖性能评价 [J]. 油田化学, 2021,38(1):58-63.
- Dai C, Xu Z, Liu J. Preparation of Oily Sludge Profile Control System and Evaluation of Profile Control Performance [J]. Oilfield Chemistry, 2021,38(1):58-63.
- [92] 谢建勇, 石 彦, 武建明. 含油污泥调剖体系在裂缝性油藏的应用 [J]. 油田化学, 2021,38(4):627-633.
- Xie J, Shi Y, Wu J. Application of Oily Sludge Profile System in Fractured Reservoir [J]. Oilfield Chemistry, 2021,38(4):627-633.
- [93] Wang T F, Wang J X, Meng X B, et al. Study on chemical oxidation treatment of oilfield sludge [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2018,27(7):5142-5146.
- [94] 谷广锋, 曹兴涛, 王新新. 含油污泥氧化处理实验 [J]. 油气田环境保护, 2017,27(6):14-15,55-56.
- Gu G, Cao X, Wang X. Oxidation Treatment Test on Oily Sludge [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2017,27(6):14-15, 55-56.
- [95] Sivagami K, Anand D, Divyapriya G, et al. Treatment of petroleum oil spill sludge using the combined ultrasound and Fenton oxidation process [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019,51:340-349.
- [96] Cui B C, Cui F Y, Jing G L, et al. Oxidation of oily sludge in supercritical water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,165(1-3): 511-517.
- [97] Chen Z, Chen Z L, Yin F J, et al. Supercritical water oxidation of oil-based drill cuttings [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 332:205-213.
- [98] Zhao Y A, Yan X Y, Zhou J H, et al. Treatment of oily sludge by two-stage wet air oxidation [J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(5):1451-1457.
- [99] Li S, Zhang L, Yin X, et al. Efficient photocatalysis improves the self-cleaning property of the superwetting nanofibrous membrane

- toward emulsified oily wastewater [J]. *Journal of Membrane Science*, 2022,650:120440.
- [100]da Rocha O R S, Dantas R F, Duarte M, et al. sludge treatment by photocatalysis applying black and white light [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010,157(1):80–85.
- [101]Alkhateeb H M M. Effect of Oily Sludge Land Treatment on Soil Conditions [J]. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2018,3(9):1–5.
- [102]Mishra S, Jyot J, Kuhad R C, et al. In situ bioremediation potential of an oily sludge-degrading bacterial consortium [J]. *Current Microbiology*, 2001,43(5):328–335.
- [103]Butt T E, Lockley E, Oduyemi K O K. Risk assessment of landfill disposal sites – State of the art [J]. *Waste Management*, 2008,28(6):952–964.
- [104]Aguelmous A, El Fels L, Souabi S, et al. The fate of total petroleum hydrocarbons during oily sludge composting: a critical review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2019,18(3):473–493.
- [105]Kriipsalu M, Marques M, Hogland W, et al. Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of oily sludge [J]. *Environmental Technology*, 2008,29(1):43–53.
- [106]Koolivand A, Godini K, Saeedi R, et al. Oily sludge biodegradation using a new two-phase composting method: Kinetics studies and effect of aeration rate and mode [J]. *Process Biochemistry*, 2019,79:127–134.
- [107]张传涛,张 璐,徐开慧.含油污泥石油烃在生物强化堆肥处理中降解特性研究 [J]. *环境科学研究*, 2020,33(10):2378–2387.
- Zhang C, Zhang T, Xu K. Composting of Mixed Bacteria Enhanced the Degradation Characteristics of Petroleum Hydrocarbons in Oily Sludge [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020,33(10):2378–2387.
- [108]徐开慧,哈斯其美格,张传涛.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.
- Xu K, Hasi Q, Zhang C. Field test of composting enhanced microbial treatment for oily sludge [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021,43(2):178–181.
- [109]Tran H T, Lin C T, Bui X T, et al. Aerobic composting remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. Current and future perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,753:142250.
- [110]Machin-Ramirez C, Okoh A I, Morales D, et al. Slurry-phase biodegradation of weathered oily sludge waste [J]. *Chemosphere*, 2008,70(4):737–744.
- [111]Mohan S V, Reddy B P, Sarma P N. Ex situ slurry phase bioremediation of chrysene contaminated soil with the function of metabolic function: Process evaluation by data enveloping analysis (DEA) and Taguchi design of experimental methodology (DOE) [J]. *Bioresource Technology*, 2009,100(1):164–172.
- [112]Weber W J, Kim H S. Optimizing contaminant desorption and bioavailability in dense slurry systems. 1. Rheology, mechanical mixing, and PAH desorption [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005,39(7):2267–2273.
- [113]Forjan R, Lores I, Sierra C, et al. Bioaugmentation Treatment of a PAH-Polluted Soil in a Slurry Bioreactor [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020,10(8):2837.
- [114]Sun J, Wang F J, Jia X H, et al. Research progress of bio-slurry remediation technology for organic contaminated soil [J]. *Rsc Advances*, 2023,13(15):9903–9917.
- [115]赵景开,卢一凡,李 伟.微生物燃料电池中有机废气净化强化研究进展 [J]. *高校化学工程学报*, 2023,37(1):1–12.
- Zhao J, Lu Y, Li W. Review on process intensification of volatile organic compounds degradation in microbial fuel cell [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2023,37(1):1–12.
- [116]黄春峰,乔 川,唐善法. pH 对沉积型含油污泥微生物燃料电池的影响 [J]. *应用化工*, 2020,49(9):2159–2163.
- Huang C, Qiao C, Tang S. Effect of pH on sedimentary microbial fuel cell with oil sludge [J]. *Applied Chemical Industry*, 2020,49(9):2159–2163.
- [117]王鹏华,唐善法,郭海莹.沉积型含油污泥微生物燃料电池的性能 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2020,52(1):23–29.
- Wang P, Tang S, Guo H. The Performance of Sediment Microbial Fuel Cell Based on Oily Sludge [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2020,52(1):23–29.
- [118]Guo H, Huang C, Geng X, et al. Influence of the original electrogenic bacteria on the performance of oily sludge Microbial Fuel Cells [J]. *Energy Reports*, 2022,8:14374–14381.
- [119]Guo H, Xie S, Huang C, et al. An electricity-generating bacterium separated from oil sludge microbial fuel cells and its environmental adaptability [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022,30:3697–3706.
- [120]Hwang J-H, Kim K-Y, Resurreccion E P, et al. Surfactant addition to enhance bioavailability of bilge water in single chamber microbial fuel cells (MFCs) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,368:732–738.
- [121]Dal Mas F, Zeng X, Huang Q, et al. Quantifying material flow of oily sludge in China and its implications [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,287:112115.
- [122]安 静,周龙涛,贾 悦.新疆油田含油污泥破乳-离心脱水工艺优化 [J]. *环境工程学报*, 2021,15(8):2721–2729.
- An J, Zhou L, Jia Y. Process optimization of demulsification and centrifugal dewatering of oily sludge in Xinjiang oilfield [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021,15(8):2721–2729.
- [123]赵瑞玉,宋永辉,孙重祥.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.
- Zhao R, Song Y, Sun C. Combination treatment of active water washing and solvent extraction for oily sludge [J]. *Journal of China University of Petroleum. Edition of Natrual Science*, 2021,45(5):169–175.
- [124]李 予.生物制剂清洗+微生物降解处理油田含油污泥技术研究 [J]. *石油炼制与化工*, 2021,52(7):101–106.
- Li Y. Study on biological agent washing and microorganism degradation treatment technology of oily sludge in oil field [J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2021,52(7):101–106.

作者简介: 康定宇(1993–),男,陕西渭南人,中国石油大学(北京)博士研究生,主要研究方向为油气田环境保护,含油污泥处理,含油污水处理.发表论文 6 篇.kang_dingyu@163.com.