

生物质与含油污泥协同热脱附工艺及装备研究进展

郭亮¹, 何荣荣², 白鑫³, 王茂仁³

¹ 中国石油招标中心新疆分中心 新疆克拉玛依

² 中石油克拉玛依石化有限责任公司 质量检验中心 (计量检定所) 新疆克拉玛依

³ 中国石油大学 (北京) 克拉玛依校区工学院 新疆克拉玛依

【摘要】在含油污泥热脱附过程中添加生物质能够改变其热脱附行为和过程特性,但目前在工艺参数优化和设备选型方面仍存在诸多挑战。为此,系统分析了含油污泥热脱附与生物质碳化反应过程,探讨了热脱附工艺参数的影响规律及设备的适用性。结果显示:(1)热脱附过程中,含油污泥和生物质均经历了水分脱附、轻质组分脱附、重质组分脱附与分解以及碳化等典型阶段,加热温度和时间是影响回收油品质和回收率的关键控制参数。(2)螺旋推进式和回转窑式连续热脱附装置处理能力大、效率高,能满足协同热脱附的工艺需求。(3)当前仍面临能耗大、温度场分布调控难度高以及残渣资源化路径受限等难题。建议后续研究应从基础理论创新、工艺优化设计和政策法规完善等多维度开展研究。研究进展表明,生物质与含油污泥具有良好的协同热脱附增效作用前景。

【关键词】生物质;含油污泥;热脱附;协同

【基金项目】克拉玛依市科技计划项目“秸秆电磁碳化技术及其土壤作用机制研究”(编号:XQZX20240055)

【收稿日期】2025 年 3 月 3 日

【出刊日期】2025 年 4 月 5 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250148

Research progress on synergistic thermal desorption processes and equipment for biomass and oily sludge

Liang Guo¹, Rongrong He², Xin Bai³, Maoren Wang³

¹Xinjiang Branch of CNPC Tendering Center, Karamay, Xinjiang

²Quality Inspection Center (Metrological Verification Institute), CNPC Karamay Petrochemical Co., Ltd., Karamay, Xinjiang

³College of Engineering, China University of Petroleum (Beijing) at Karamay, Karamay, Xinjiang

【Abstract】 Adding biomass during the thermal desorption process of oily sludge can change its thermal desorption behavior and process characteristics. However, there are still many challenges in the optimization of process parameters and equipment selection at present. For this purpose, the thermal desorption of oily sludge and the reaction process of biomass carbonization were systematically analyzed, and the influence patterns of the thermal desorption process parameters and the suitability of the equipment were discussed. The results show that: (1) During the thermal desorption process, both oily sludge and biomass have undergone typical stages such as water devolatilization, light component devolatilization, heavy component devolatilization and decomposition, and carbonization. The heating temperature and time are the key control parameters affecting the quality and recovery rate of the recovered oil. (2) The spiral propulsion type and rotary kiln type continuous thermal desorption devices have large processing capacity and high efficiency, and can meet the process requirements of collaborative thermal desorption. (3) At present, there are still problems such as high energy consumption, high difficulty in regulating the temperature field distribution, and limited paths for the resource utilization of residues. It is suggested that subsequent research should be carried out from multiple dimensions such as basic theoretical innovation, process optimization design and improvement of policies and regulations. Research progress indicates that biomass and oily sludge have a promising synergistic thermal desorption enhancement effect.

【Keywords】 Biomass; Oily sludge; Thermal desorption; Synergy

石油钻采、集输、储运和使用过程中产生大量的含油污泥。含油污泥热脱附是指在低氧或无氧的条件下加热使有油从泥中脱附出来的一种污染物分离方法, 具有反应快、残渣含油率低等优点而在工业中普遍应用, 但也受能耗局限。生物质(玉米秸秆、木屑、松木等)贫氢富氧, 石油低氧高碳氢, 生物质碳化过程包含了挥发分析出、长链烃分解和碳化等阶段, 反应过程与含油污泥热脱附存在双向相互作用。生物质与含油污泥共同热脱附时潜在加氢作用、脱氧反应及碱金属作用协同增效作用, 可以增加油回收率、缩短反应时间、促进甲基化合物发生分解和转化, 提高含油污泥气化反应活性^[1]。另一方面, 含油污泥热脱附残渣中NiMo/TiO₂、SiO₂/Al₂O₃、 γ -Al₂O₃、CaO等催化剂作用下生物质加氢热反应体系可以实现生物油脱氧效率与碳收率平衡^[2]。因此, 探究生物质和含油污泥热脱附工艺及设备研究进展, 以期为他们协同热脱附工业化应用可行性提供参考。

1 含油污泥热脱附反应过程及主要工艺参数

1.1 含油污泥热脱附反应过程

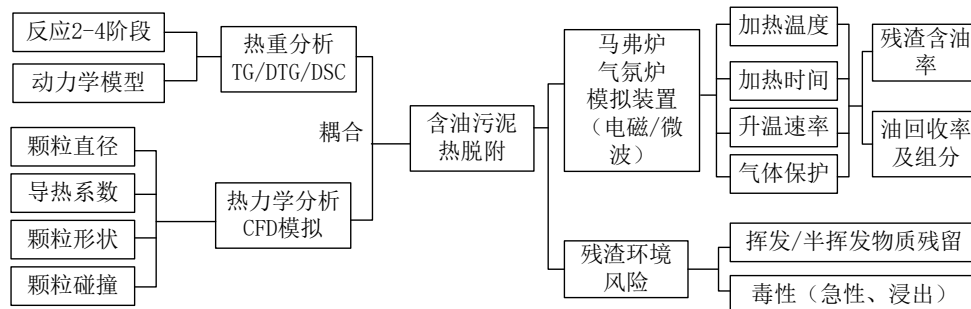


图1 含油污泥热脱附已有研究内容示意图

1.2.1 含油污泥热脱附主要工艺参数对残渣含油率的影响

加热温度和加热时间对含油污泥热脱附残渣的含油率影响最显著, 呈正相关, 相同物性的物料, 加热温度越高, 加热时间越长, 残渣的含油率越低^[5]。加热温度450℃-550℃时, 加热时间30 min-60 min, 热脱附残渣含油率可降低至0.3%以下, 主要由于油基岩屑中的油相来自于配制油基钻井液用的4#、5#白油或0#、-35#柴油, 石油馏分相对稳定和集中。提升加热温度, 可以在一定范围内减少加热时间, 残渣含油率下降速度开始很快, 逐步变慢并趋于平缓。加热温度必须超过含油污泥中油组分的沸点, 才能发生热脱附作用, 延长加热时间, 提供更多的传质传热时间、也可以进一步降

含油污泥可能来源于钻采、集输和炼化等不同环节, 包括油基岩屑、落地油泥、清罐油泥、污水处理污泥等, 理化物性差异较大, 其热重实验显示的失重温度、失重率和吸放热曲线变化也不相同, 但典型过程可分为水分脱附阶段(50℃-150℃)、轻质组分脱附阶段(150℃-300℃)、重质组分脱附和分解阶段(300℃-500℃)、碳化阶段(>500℃)等过程, 可能伴随少量碳酸盐(如含钙、镁等无机组分)、油组分裂解^[3]。碳化阶段剩余的有机物可能发生碳化反应, 形成焦炭状物质, 同时无机组分(如金属氧化物、硅酸盐等)可能进一步稳定化, 控制热脱附残渣中含油率达到相关标准。

1.2 含油污泥热脱附工艺参数影响因素

国内外已经进行了大量的含油污泥热脱附技术研究(见图1), 以含油污泥热脱附后油组分分布及回收率、残渣含油率和能耗等目标的工艺参数影响因素很多, 至少包括含油污泥物理和化学性质(如油和水含量、颗粒粒径、油的沸点等)、加热温度与加热时间、惰性气体、进料速度等^[4], 这些因素又相互关联。

低残渣含油率。此外, 物料的理化性质和在热脱附腔体中的料床厚度、腔体内搅拌方式等也有影响。同等条件下, 进入热脱附腔体的含油污泥的含液率越低、粒径越小, 腔体中料床厚度越小, 残渣含油率越低, 有研究认为, 电磁加热时含油污泥厚度不宜超过80 mm。

1.2.2 含油污泥热脱附主要工艺参数对回收油的影响

热脱附过程中, 回收油的回收率受加热温度和加热时间影响较大。常见3种不同变化趋势, 加热温度为400℃时, 随着加热时间的延长, 回收率上升, 当加热时间为45 min-90 min时回收率增长最快; 加热温度为500℃时, 随着加热时间的延长, 回收率呈现先上升后下降的变化; 加热温度升高至550℃后, 随着温

度的升高,回收率下降,温度越高,更易发生裂解反应,回收率快速下降。

回收油的组分受加热温度影响最大。不同来源的含油污泥,在不同加热温度下回收油的石油烃组分差异较大。当加热温度不超过 300 °C 时,大多数含油污泥都表现为低碳元素的蒸馏分离过程,当加热温度超过 500 °C, C₂₅ 及以上组分发生的裂解反应的几率增加,回收油中酮类和酯类,羰基化合物和多环芳烃增加,而单环芳烃含量减少。随着加热温度的升高,轻质组分会增加,热解得到的组分变得越来越多样,但产物组分中含杂原子的化合物的含量也增加^[6]。

1.2.3 转速对传热速率的影响

含油污泥在热脱附腔体中是一个非均质传热行为,含油污泥在热脱附腔体中从入口向出口移动的过程中,发生碰撞、抛洒、混合及位置变化,促进了含油污泥在腔体中物料层传热。含油污泥颗粒沿着热脱附腔体管壁有垂直和水平 2 个分量,转速增加,水平分量增加,颗粒与管壁接触频次增多,颗粒间气体对流传热也因颗粒被抛洒运动过程而增强,从而增大了传热系数,表现为转速与传热系数呈正相关关系。但转速需要一个合理的范围,转速提升,水平方向分离也增加,含油污泥颗粒加速了向出口的运动速度,减少了加热时间,影响了总传热热量。另一方面,降低转速,在单位时间内进料量相同条件下,热脱附腔体内含油污泥量增大,填充量增加,装置转动的扭矩等负荷加重,易发生设备损坏影响运行。

2 生物质碳化反应过程及主要工艺参数

2.1 生物质碳化反应过程

生物质是一种含有纤维素、半纤维素和木质素为主的有机和无机混合物,含 C、O、H、N、Ca、K 等

多种元素。典型碳化过程一般分为预热阶段(室温至 150 °C)、分解阶段(150-500 °C)、碳化阶段(> 500 °C)。

预热阶段主要是水分蒸发,少量轻质组分如甲醇、乙醇等脱附;分解阶段主要是纤维素和木质素热裂解,产生 CO、CO₂、CH₄、H₂、C₂H₄等气态物;碳化阶段因不同的生物质和碳化工艺所需的碳化温度存在差异^[7],分子量大的上一步未分解固体残渣形成生物炭。

2.2 生物质碳化工艺参数影响因素

影响生物质热解成效的因素众多,与含油污泥热脱附相似,涵盖样品预处理方式、加热温度、碳化时间、机碳化速率等。其中,碳化速率能调控产物(油、气、炭)的产率分布,在常压条件下,典型加热速率为 10 °C/min、碳化时间为分钟级,可在 500 °C-600 °C 下实现生物油产率 50-70 wt.%;而在低温(300 °C-400 °C)、低加热速率(0.1 °C-2 °C/min)、长碳化时间(数小时至数天)下,产物主要为焦炭(50wt.%)^[8]。生物质的组成也能影响热解产物的分布,具有更高含量纤维素和半纤维素的生物质能产生更多的生物油,而木质素含量高的生物质则有更高的焦炭产量^[9]。

3 生物质与含油污泥热脱附协同机制

基于含油污泥与生物质热脱附/碳化存在协同特征,生物质碳氢比高于含油污泥,生物质在热解过程中生成 H·和 OH·自由基(见式 1),这些活性基团可与含油污泥中长链烃发生加氢/脱氧反应,从而提高脱附效率(见图 2)。减缓了自由基的聚合反应,改善了体系中稠环化合物的缩聚程度,提高半焦的反应活性,从而提交反应效率^[10]。

生物质(如 C₆H₁₀O₅) → 焦炭 + 焦油 + CO/CO₂ + H· + OH· + 其他自由基 (1)

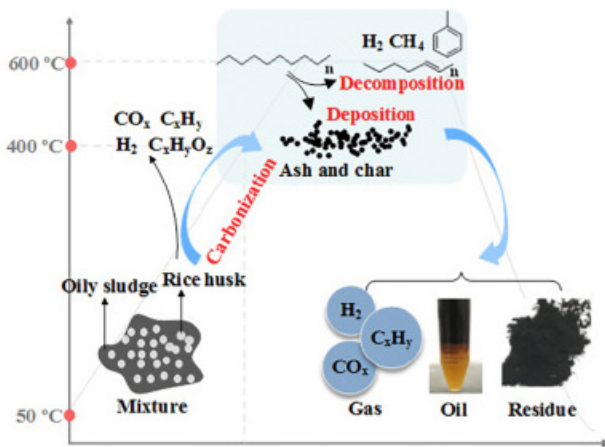


图 2 含油污泥与稻壳共热解可能的反应路径^[11]

生物质添加至含油污泥热脱附有利于中含氧化合物的脱除,随着生物质比例增加,反应过程中脱羧基,脱羰基反应减弱,脱羟基反应增强。不同的是,有研究认为玉米杆灰具有促进催化裂化(FCC)油浆热解的效果,而 FCC 油浆与脱灰玉米杆共热解则几乎没有相互作用。石油馏分加氢精制过程中最主要的反应是加氢脱硫反应,而生物油加氢精制过程中最主要的反应是加氢脱氧反应^[12]。

4 热脱附工艺及设备

4.1 热脱附工艺及设备分类

当前常见热脱附工艺及设备根据不同的分类方法可以分为多种类型(见图3)。由于进料方式不同可分为连续和间歇热脱附,其特征及优缺点见表1。根据热源是否与物料直接接触分为直接和间接热脱附,加热方式可以分为天然气、油、微波、电磁等^[13],腔体可以串联一个及一个以上,分为一段式、两段式或多段式热脱附。根据物料在腔体内移动方式,可分为螺旋推进式和回转窑式热脱附,螺旋也可分为有轴、无轴和双螺旋等形式。

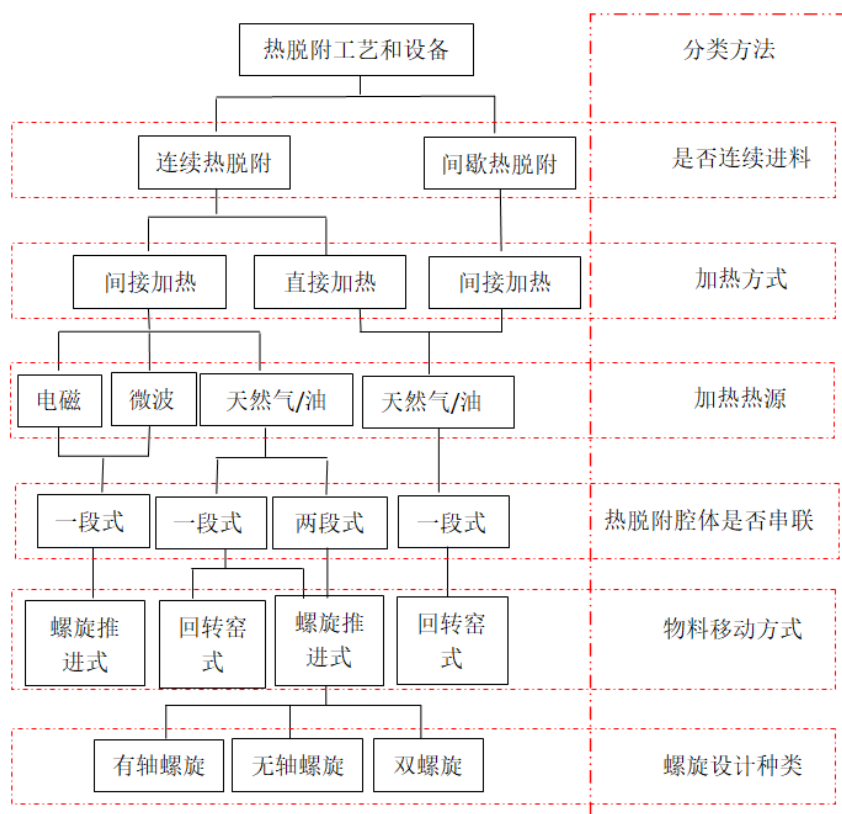


图3 常见的热脱附工艺和装置分类

4.1.1 直接和间接热脱附工艺与装备

间接热脱附火焰或高温烟气与腔体由热脱附腔体分隔开,间接加热,重质组分被碳化,腔体中通过控制低氧或惰性气体驱替的无氧环境,防治闪燃闪爆安全风险,且降低氧参与反应的可能性,更好地回收油类等资源。直接热脱附火焰/高温烟气和物料在热脱附腔体内直接接触,未挥发分直接燃烧,需要一定的氧气助燃,更适用于有机污染物回收价值低,处理规模大的场景,多用于有机污染物土壤修复。两种热脱附的火焰或高温烟气与物料都采取逆向运动的方式热量利用效果高一些。

4.1.2 多种热源热脱附工艺与装备

热脱附装置根据热源不同,可以分为天然气/燃料油加热、微波加热、电磁波加热(见表1)。天然气为清洁能源,燃烧后尾气易达标控制,应用最广泛,对于部分天然气供应困难区域,可以采用柴油等燃料油作为热源。微波加热速度快、热利用效率高、加热均匀等特性^[14]。已有进料速度 250 kg/h-750 kg/h 的微波热脱附设备,含油污泥热脱附残渣含油率可低于 0.1%。但土壤水分、电场强度及沙泥岩质地等都会影响微波穿透能力,黏土较沙土不易被穿透,目前未见规模更大的微波热脱附设备,工业化也受电力局限。

表 1 不同加热方式的热脱附工艺和设备对比

加热模式	作用机理	优缺点
天然气/燃料油	明火燃烧, 火焰加热热脱附腔体	固定的腔体外壁受热不均, 顶端和底端温度差大, 腔体易变形破损, 启停升降温过程需约 6-10 h, 作业场地灵活
微波	分子高速运动, 物料自身发热	非连续进出料, 升温速率快, 处理能力受微波功率大小和安全防护影响
电磁	电磁场使热脱附腔体涡流发热	腔体壁面受热均匀, 可以在腔体上多段缠绕, 分别设置温区, 可连续运行, 升温快, 电量需求大

电磁加热速度快, 同样加热至 520 ℃, 天然气/油加热方式较电磁加热方式增加升温时间 4 倍以上, 且热脱附腔体底部、顶部及周围受热均匀, 装置损害小, 对于页岩气钻井现场含油污泥处理更安全。但用电功率大, 2.5 t/h 的电磁热脱附设备, 需要约 600 kW 总装机功率。

4.1.3 多种热脱附腔体结构的热脱附工艺及装备
从热能利用角度, 可以将 2 个或多个热脱附腔体

依次串联, 目前工业中以一段式和两段式热脱附装置为主 (见图 4), 一段式和两段式热脱附装置各有特点及适宜范围 (见表 2), 从机理上看, 均可以满足含油污泥无害化处理需求^[15]。

含油污泥先经低温烟气预热, 随着物料在腔体内移动, 温度逐步升高进而脱附反应, 高温烟气的总热量和烟气停留的换热时间直接影响热脱附腔体内温度, 从而影响装置的处理能力。

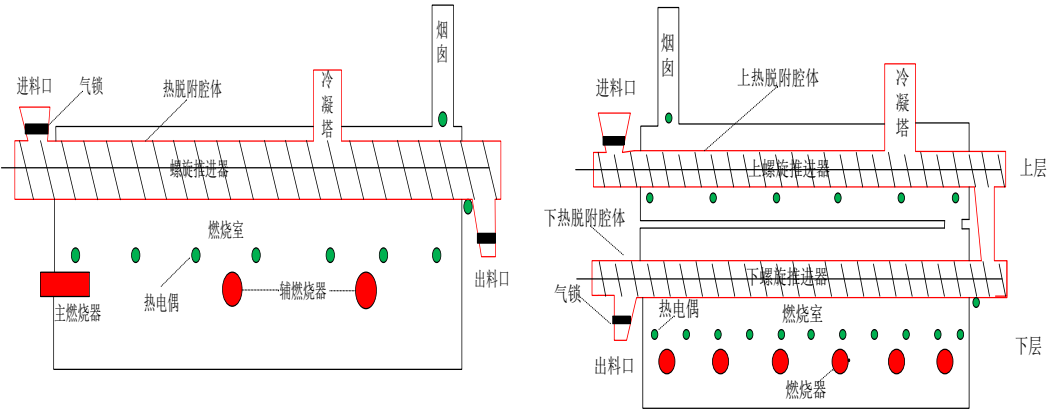


图 4 一段式 (左) 和两段式 (右) 热脱附腔体典型结构示意图

表 2 一段式热脱附设备分类与特点

分类	热脱附腔体数量/个	适用物料	主要特点
螺旋推进式	单个有轴螺旋	2~6	大多数物料
	单个无轴螺旋	2~6	大多数物料
	两个有轴螺旋	1~2	物料黏度大
回转窑式	连续回转窑	1	大多数物料
	间歇回转窑	1	塑料、轮胎、高含液等物料

4.2 热脱附设备存在的问题及建议

(1) 能耗损失偏高

热脱附过程中, 总热源提供的热量近似地认为等于物料中水分和挥发分蒸发吸收的热量、进入冷凝塔

的热脱附气体携带的热量、残渣出料口处携带的热量、烟囱中烟气携带的热量、燃烧室壳体外部向环境中散发的热量之和。热量平衡分析显示, 水分蒸发吸收热量和残渣余热占比最大, 两者之和约占总吸热的 2/3^[16]。

因此,降低进入热脱附装置的物料含水率、热脱附残渣余热回收可以有效降低能耗。将部分热脱附残渣返回热脱附装置进料口,可以节约热量,但降低了装置的处置能力,其综合效益的可行性需要进一步分析。此外,还可以考虑从以下几个方面降低能耗:

①强化传热传质,摸清生物质添加入含油污泥后热脱附过程中热量和质量传递规律^[17],调节生物质掺混比例、均匀度,增加污泥传热传质微孔隙通道,改善其油水固表界面状态;调控热脱附腔体中负压大小和腔体气氛收集路径,加快热量传递和挥发分从固体中迁移扩散速率,避免过热气体。

②余热利用,烟气、冷凝水余热回收利用。

③引入催化剂,降低反应温度、提高反应速率^[18,19]。

(2) 热脱附腔体温度场设置与调控效果欠佳

根据含油污泥热脱附和生物质碳化反应机制及过程,现有热脱附装置都考虑将热脱附腔体设置成为多个温度场分区,希望实现水-轻质组分-重质组分先后依

次分离顺序,减少过热气体节能,同时减少热裂解反应,降低热脱附对回收油馏分的影响,然而,实际含油污泥热脱附过程中水分、轻质组分和重质组分是交替混合发生的^[20]。同一个热脱附腔体,若出现较大温度差时,腔体材质面临考验,其次,热脱附气体的逐级回收通道设置困难。若能较好解决装置旋转和高温条件下密封问题,多个腔体串联物理分区,比当前通过热电偶固定监测点测温调控效果好。

(3) 冷凝系统矛盾

热脱附气体冷凝可分为直接喷淋和间接换热 2 种形式,其特点见表 3。热脱附气体进入冷凝系统时,容易携带大量的亚微颗粒粉尘,直接喷淋后会导致循环水中悬浮物不断增加,导致循环水经常需要更换,且多有刺鼻的气味,处理难度相对较大^[21]。间接换热冷凝可以较好地解决这些矛盾,但这些粉尘容易黏附在冷凝管内壁,降低换热效率,严重时可能堵塞管道,装置设计时需要考虑热脱附气体控尘和机械清除措施。

表 3 两种换热形式对比

	直接喷淋冷凝	间接换热冷凝
换热方式	热脱附气体与循环水直接接触	热脱附气体与冷却水管壁间隔
换热设备	喷淋塔,空冷/水冷(循环水冷却)	冷凝管,空冷/水冷(循环水冷却)
优点	换热效率高,喷淋塔占地面积小,油和水中的悬浮物可通过油水分离时沉降、气浮等措施分离	回收油产量高,不需要油水分离,循环水不宜污染,减少污水产生
不足	废水产生量大,且油水乳化度高,油回收率低	冷凝管壁面容易黏附油、泥,结垢

(4) 热脱附回收油品质差异大

生物质热脱附后回收油含酚类、酮类和酸类等含氧有机物,含油污泥热脱附回收油以石油烃类物质为主,两者在热值、稳定性和气味上存在显著差异。建议针对不同的生物质与含油污泥,优化最佳温度、停留时间和混合比例等条件,深入探究不同回收油组分及回收率的影响因素与规律,通过两者协同热脱附,提高回收油油品质量。

(5) 出料粉尘控制困难

热脱附残渣颗粒中约 90%粒径中值约 37 μm -74 μm ,且从腔体中排出时温度一般高于 400℃,出料、转移等过程中极易造成粉尘污染。采用水直接喷淋增湿的方法,可以降低高温粉尘潜在的安全环境风险,然而,水遇到高温气化,仍有携带粉尘的水蒸气可能进入空气中。有项目对残渣采用循环水间接冷却,然后用灰罐密闭暂存,有效减少了施工区域粉尘污染,但需要及时清运的条件。

(6) 二次气体污染

热脱附原料贮存、回收油、废水及出料残渣等,容易产生无组织挥发性有机物(VOCs)和粉尘等气体污染。含油污泥热脱附回收油存在易挥发且难闻的异味,可能为丁炔、戊烯、苯、 α -癸烯等低沸点有机物,容易弥散在储油罐、污水罐等周围空气中,常规的活性炭吸附或酸解法难以去除,蒸馏方法能有效去除热解析油中的低沸点馏分^[22]。可以通过密封、过滤和吸收等方法,加强无组织 VOCs 处理,减少二次污染。

(7) 残渣资源化路径不通畅

热脱附残渣经鉴别为一般工业固体废物后,可用于制砖、筑路材料等资源化利用,这些方法消纳量非常有限,亟待更安全的大宗资源化路径。此外,也需要相关部门加大政策引导和监管力度,不断完善运行管理机制。

5 结论

(1) 含油污泥热脱附和生物质碳化反应进程、工艺参数主要影响因素具有显著的相似之处,在 450℃,45 min 条件下,掺混 30wt.%生物质可以使油回收率由

68%提升至 78%, 能耗降低 12%, 具有良好的协同作用前景。

(2) 现有热脱附工艺和设备种类丰富, 基本满足生物质与含油污泥 600℃ 条件下共同热脱附的需求, 多段式螺旋推进或回转窑方式热脱附装置更适宜温度场分区调控。

(3) 热脱附工业化仍面临诸多难点, 水分蒸发和残渣余热占总热量消耗的约 2/3, 潜在废水、出料粉尘和 VOCs 二次污染风险, 需要进一步从微观机理、工艺参数和政策法规等方面共同深入研究。

参考文献

- [1] 郝泽光, 张乾, 高增林, 等. 生物质与催化裂化油浆共热解协同作用研究[J]. 化工学报, 2022, 73(09): 4070-4078.
- [2] Yang C, Zhao J, Shi F, et al. Advancements and synergistic mechanism about co-pyrolysis of oily sludge and agricultural biomasses: A review (vol 182, 106710, 2024)[J]. JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS, 2024, 183: 2.
- [3] 刘宇程, 王茂仁, 吴建发, 等. 油基岩屑热脱附处理技术研究进展[J]. 天然气工业, 2020, 40(02): 140-148.
- [4] 许志成, 孙杰, 杨晏泉, 等. 含油污泥处理处置技术研究进展及展望[J]. 现代化工, 2024, 44(09): 75-80.
- [5] 揭业斐, 陈忠伟, 张立志. 含油污泥热解项目残渣资源化利用现状[J]. 当代化工研究, 2025(01): 102-104.
- [6] Yu H, Lin F, Guo X, et al. Comparison of environmental impacts from pyrolysis, gasification, and combustion of oily sludge[J]. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS, 2024, 480: 12.
- [7] Luo Z, Liu L, Miao F, et al. Electron Paramagnetic Resonance in Lignocellulosic Biomass Pyrolysis Mechanism: Advancements, Applications, and Prospects[J]. ENERGIES, 2025, 18(7): 31.
- [8] Liu J, Chen X, Chen W, et al. Biomass pyrolysis mechanism for carbon-based high-value products[J]. PROCEEDINGS OF THE COMBUSTION INSTITUTE, 2023, 39(3): 3157-3181.
- [9] Guedes R E, Luna A S, Torres A R. Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis : A review[J]. JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS, 2018, 129: 134-149.
- [10] Shan T, Chen H, Liu T, et al. Synergistic effects in the Co-pyrolysis of waste tires, plastics, and corn stalks: Kinetic and thermodynamic analyses for enhanced resource utilization[J]. RENEWABLE ENERGY, 2025, 238: 18.
- [11] Lin B, Huang Q, Chi Y. Co-pyrolysis of oily sludge and rice husk for improving pyrolysis oil quality[J]. FUEL PROCESSING TECHNOLOGY, 2018, 177: 275-282.
- [12] 李晔, 鱼涛, 张欢, 等. 含油污泥共热解的研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(10): 2453-2457.
- [13] 栾雪薇, 齐晗兵. 含油污泥热解处理技术研究[J]. 当代化工, 2024, 53(10): 2456-2459.
- [14] 陈星元, 王丽, 王翔鹏, 等. 微波热解油泥研究进展[J]. 当代化工, 2022, 51(05): 1212-1217.
- [15] 张建甲, 宁阳, 单通, 等. 含油污泥热解脱附技术工程应用现状及建议[J]. 资源节约与环保, 2024(05): 38-41.
- [16] 王茂仁, 贾悦, 李慧敏, 等. 油基岩屑热脱附工程实验能耗分析与优化[J]. 油气田环境保护, 2022, 32(04): 37-43.
- [17] 邹旬, 刘冠男, 王同尧, 等. 基于 CRECK 的生物质高温热解动力学研究[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(02): 359-365.
- [18] 张焱鹏, 王志伟, 李学琴, 等. 生物质-塑料共热解制取芳烃的影响因素研究进展[J]. 现代化工, 2025, 45(05): 37-41.
- [19] Liu C, Li Y, Fan D, et al. In situ catalytic pyrolysis of oily sludge using coal gangue char to produce naphthalene-rich oil and hydrogen-rich gas[J]. CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL, 2025, 508: 14.
- [20] Wang M, Liu L, Xu C, et al. Numerical Simulation and Analysis of the Heat and Mass Transfer of Oil-Based Drill Cuttings in a Thermal Desorption Chamber[J]. PROCESSES, 2023, 11(11): 21.
- [21] 胡以朋, 肖超, 李子鸣. 油泥热解废水处理工艺中试应用[J]. 油气田环境保护, 2024, 34(04): 29-33.
- [22] 李建林, 王昌军, 郑延成. 油基钻屑热解析油的异味去除实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(06): 727-730.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

