

# 基于 Aspen Plus 的含油污泥与微藻共热处理工艺的能耗分析

陈锴杰<sup>1</sup>, 刘 亮<sup>1\*</sup>, 吴佳俊<sup>1</sup>, 卿梦霞<sup>1</sup>, 贺云飞<sup>1</sup>, 徐宗兵<sup>2</sup>, 王 涛<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南新华水利电力有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:**含油污泥与生物质共热处理方法在实现污泥资源化的同时能够提高产物热值,为研究不同反应条件对于能耗的影响,利用 Aspen Plus 软件建立了含油污泥与微藻共热处理工艺模型。研究表明,热解能耗随微藻添加比的增加先升高后降低,这与热解油产率的变化趋势一致。此外,污泥的初始含水率对热处理工艺的能耗有着显著影响,在考虑能耗最小化的情况下,初始含水率在 30% 以下的污泥采用单独热解的方式处理的能耗更低,而在初始含水率为 30%~40% 的污泥的热处理工艺中,微藻的添加可以有效降低系统能耗。

**关键词:**含油污泥;微藻;共热解;能耗分析

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S2-0444-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.076

## Aspen Plus based analysis on energy consumption of co-pyrolysis process for oily sludge and microalgae

CHEN Kai-jie<sup>1</sup>, LIU Liang<sup>1\*</sup>, WU Jia-jun<sup>1</sup>, QING Meng-xia<sup>1</sup>, HE Yun-fei<sup>1</sup>,

XU Zong-bing<sup>2</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>

(1.School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Hunan Xinhua Hydropower and Electric Power Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:**The oily sludge-biomass co-pyrolysis method can enhance the calorific value of products while achieving the re-utilization of oily sludge.To find out the impact of reaction conditions on energy consumption, a model for co-pyrolysis treatment of oily sludge and microalgae is developed by using Aspen Plus software.Results indicate that with increasing microalgae addition ratio, the pyrolysis energy consumption rises initially and falls then, which is consistent with the trend of changes in pyrolysis oil yield.In addition, the initial water content of oily sludge affects significantly the energy consumption of the co-pyrolysis treatment process.Under the premise of minimizing energy consumption, separate pyrolysis treatment is more energy-efficient for oily sludge with less than 30% of water content, while adding microalgae can effectively reduce energy consumption for oily sludge with 30%~40% of initial water content.

**Key words:**oily sludge; microalgae; co-pyrolysis; energy consumption analysis

随着能源需求的持续增长,对石油的需求日益提高,含油污泥(OS)的产量也日益剧增。目前,我国待处理污泥存量即达 1.59 亿 t, 存量规模达到 2 000 亿元人民币<sup>[1]</sup>, 全球的含油污泥年产量超过了 6 000 万 t, 累计产量超过了 10 亿 t, 仅仅我国的含油污泥年产量就接近 1 000 万 t<sup>[2]</sup>。OS 的产生在石油工业中是不可避免的污染问题。OS 是油气田生产及炼化生产过程中产生的油水与地面土壤混合形成的油泥、油罐底泥, 污水处理等产生的油泥水混合物<sup>[3]</sup>, 成分非常复杂, 大量含油污泥的滥堆滥放不但浪费大量土地资源, 而且危害人体健康<sup>[4]</sup>。通过回收有机固废中被释放和热裂解的有机挥发物获得气相、液相、固相等能源的热转化过程, 是实现油

泥资源化回收的主要途径之一<sup>[5]</sup>, 但油泥直接热解存在热解能量损耗大的问题<sup>[6-7]</sup>。有研究指出, 将生物质与 OS 进行掺混热解有助于改善油泥的颗粒形态, 提高能源回收效率<sup>[8]</sup>。岳勇等<sup>[9]</sup>在油泥与生物质的协同热解中, 发现木屑的加入有利于热解油产量的增加, 且热解油的热值大幅增加。此外, 木屑与污泥的掺混热解具有显著的协同作用, 大幅降低了第一阶段的热解温度<sup>[10]</sup>。而微藻具有生长速率快、占地少、可利用废水、不与粮争地等特点, 逐渐被人们所利用和重视<sup>[11]</sup>。Wang 等<sup>[12]</sup>通过实验研究微藻与印染污泥协同热解, 发现掺混后热解反应活化能进一步降低。杜爱勋<sup>[4]</sup>通过实验研究微藻与 OS 协同热解, 发现微藻的添加能够提高产物热值。

收稿日期:2025-04-22; 修回日期:2025-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52106131); 湖南省教育厅科研项目(21A0201); 湖南省大学生创新创业训练项目(S202410536119)

作者简介:陈锴杰(2003-), 男, 本科生; 刘亮(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向为煤与生物质高效清洁利用, 通讯联系人, liuliang\_hn@163.com。

Aspen Plus 软件在固废热解领域应用广泛<sup>[13-17]</sup>,通过对工艺过程进行质量和能量衡算,能准确计算出系统的反应热,对系统能耗和热效率的分析有着重要作用。冯东征等<sup>[18]</sup>利用 Aspen Plus 模拟了稻秆与褐煤共热解工艺流程,对热解转化效能进行了分析,研究表明秸秆添加比为 20% 时,工艺的转化效能最高。Gong 等<sup>[19]</sup>利用动力学反应器对含油污泥热解过程进行建模和模拟。研究表明该模型在 400~780℃ 之间具有较高的可靠性。

大量研究已经探究了反应条件对热解产物的影响,而忽视对工艺能耗的影响。但工艺的能耗关系到技术的可持续性与经济性<sup>[20]</sup>。因此,本研究利用 Aspen Plus 软件对油泥与微藻共热处理工艺进行模拟,通过调整微藻添加比、热解温度以及初始含水率分析能耗的变化。

## 1 共热解模型的建立

### 1.1 热处理工艺流程

热处理工艺流程如图 1 所示,首先将湿油泥与微藻干燥后送入热解反应器中,热解产生的三相产物经过分离后,分离出的热解气直接燃烧,燃烧烟气为热解与干燥过程补充热量,热解油与热解炭则直接回收。

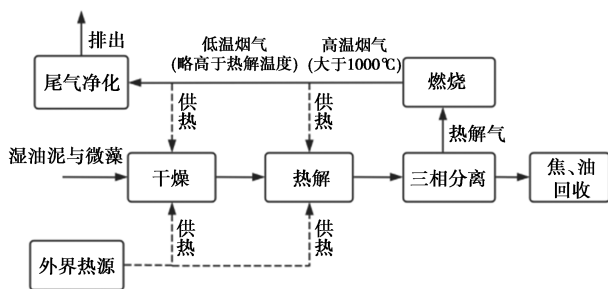


图 1 热处理工艺流程

### 1.2 工业分析与元素分析

本次模拟所选样品材料为雨生红球藻与落地油

泥,原料的工业分析和元素分析如表 1 所示<sup>[4]</sup>。

表 1 样品的工业分析及元素分析

样品	工业分析/%				元素分析/%				
	M <sub>ar</sub>	A <sub>d</sub>	V <sub>d</sub>	FC <sub>d</sub>	C <sub>d</sub>	H <sub>d</sub>	O <sub>d</sub>	N <sub>d</sub>	S <sub>d</sub>
油泥	10.40	57.49	38.82	3.69	29.56	4.24	6.54	0.85	1.30
微藻	25.12	49.40	37.84	12.76	33.96	7.12	1.55	7.53	0.44

注:d 为干燥基,ar 为收到基。

### 1.3 模型参数设置

本研究利用 Aspen Plus 软件对含油污泥与微藻共热解过程进行模拟分析。在软件中,含油污泥、生物质等固体作为一种非常规成分被引入模型,焓和密度的计算模型分别为 HCOALEN 和 DCOALIGT,而含油污泥与生物质的定义方式与煤相同,所以相关含油污泥与生物质的定义方式与煤相同,相关热力学参数设置和计算方法也相同<sup>[21]</sup>。因涉及到常规组分和非常规组分,故全局变量中物流级别选择 MIXCINC<sup>[22]</sup>。

### 1.4 模型流程设计

该流程由干燥、热解、分离、燃烧 4 个单元组成,图 2 为基于 Aspen Plus 软件的模拟流程图,湿 OS 与生物质(微藻)送入干燥单元进行干燥处理,该单元利用 RStoic 反应器模拟油泥与生物质的干燥脱水过程,由 Flash 反应器分离水蒸气。干燥后的油泥与生物质进入热解反应器中。随着热解温度升高,在不同温度段得到共热解产物的组分不同,单纯地利用 Rgibbs 反应器无法准确模拟热解反应过程。因此,本研究利用 RYield 反应器结合实验数据,模拟油泥与生物质共热解,热解产物通过 SSpilt 模块实现气固分离,分离后的气体进入到换热模块中冷凝后进入 SEP 模块实现热解气与热解油的分离。分离后的三相产物中,热解焦与热解油可以实现回收利用,热解气则通过燃烧处理。宋新南等<sup>[23]</sup>选用 Rgibbs 模块,研究了玉米秸秆的燃烧。受此启发,

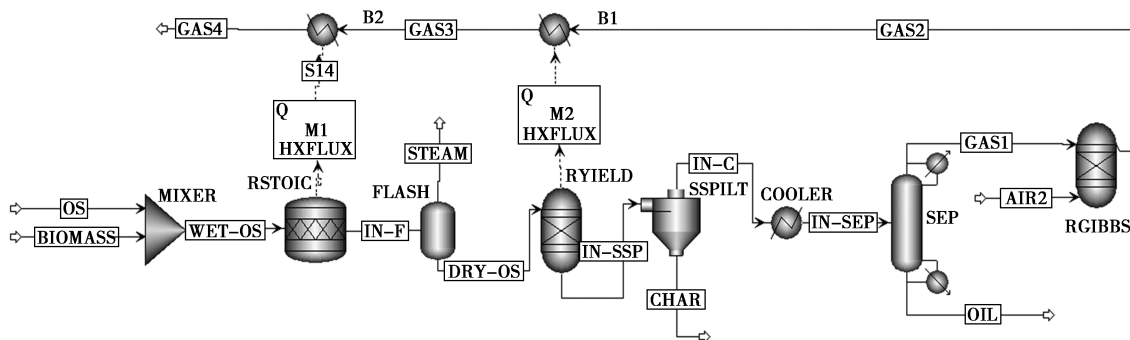


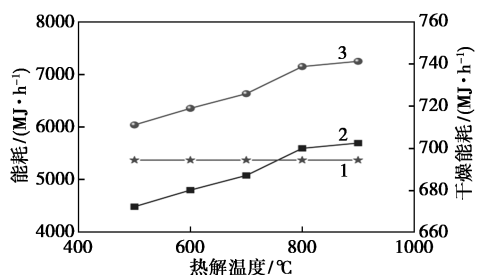
图 2 模拟流程

热解气的燃烧通过 RGibbs 模块对燃烧过程进行模拟。燃烧后的高温烟气经过换热器 HEATER 为热解及干燥供热,并采用 MULT 模块(M1、M2)以反映实际工业过程中的热效率<sup>[24]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 OS 单独处理的能耗分析

OS 单独热解的系统能耗分布如图 3 所示。根据模拟结果,由于热解温度对干燥能耗不产生影响,随着热解温度不断增加,干燥能耗保持不变,热解能耗与系统能耗不断增加,且在不同温度区间内能耗的变化率相差较大。其中,在 700~800℃ 时变化率最大。不同温度梯度下能耗变化不均匀可能是由于在不同的温度区间内,产率变化的不同进而影响反应热的变化不同造成的<sup>[19]</sup>。

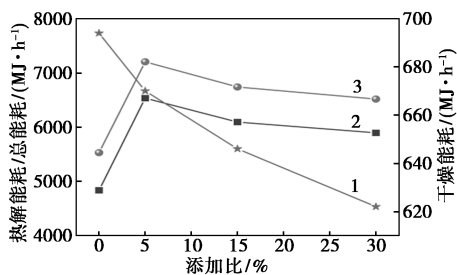


1—干燥能耗;2—热解能耗;3—总能耗

图 3 不同热解温度下的能耗分布

### 2.2 OS 与生物质共热解的能耗分析

生物质的添加比(质量比)是进料的重要操作参数,对共热解产物分布有着重要影响,从而影响着工艺能耗。干燥能耗、热解能耗以及总能耗随微藻添加比上升的变化曲线见图 4。根据模拟结果,随着微藻添加比的增加,干燥能耗不断下降,热解能耗则呈现先增加后减少的趋势,该趋势与文献报道中热解产油率变化相一致<sup>[4]</sup>,说明热解形成高热值焦油需要消耗更多的能量,该模拟结果同褐煤与生物质共热解能耗特征具有相似性<sup>[18]</sup>。此外,由于该反



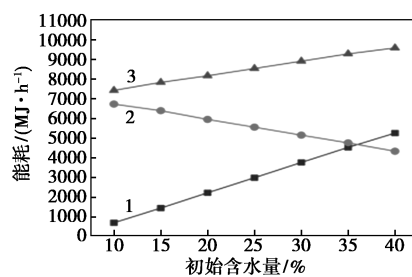
1—干燥能耗;2—热解能耗;3—总能耗

图 4 不同微藻添加比下的能耗分布

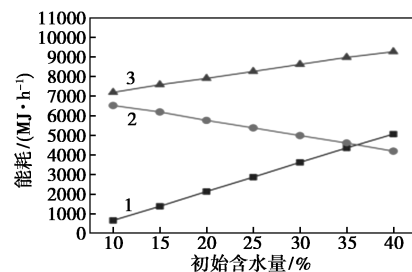
条件下热解能耗占比较大,系统总能耗变化与热解能耗变化规律相近。

### 2.3 含水率对于能耗的影响

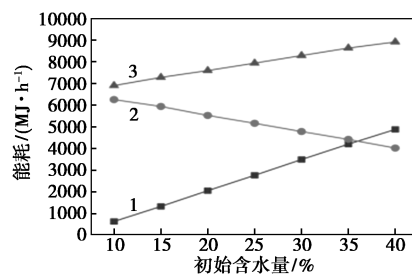
油泥的初始含水率对工艺流程能耗有着显著影响。图 5 展示了 8 组不同热解温度以及微藻添加比的条件下,含油污泥初始含水量对系统能耗的影响,在不同微藻添加比以及热解温度情况下,干燥能耗随着含水率的上升而不断上升,而热解能耗则随着初始含水量的上升而不断下降,但是总体能耗依旧不断上升,这是由于初始含水率的上升导致干燥能耗在总能耗的占比中逐渐增大。对比相同温度下油泥热处理系统的能耗,可以发现随着生物质的添加,干燥能耗不断下降,进而导致总能耗下降。例如,当



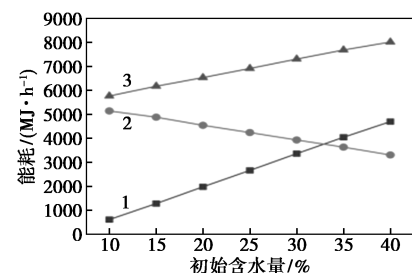
(a) 热解温度 600℃-添加比 0%



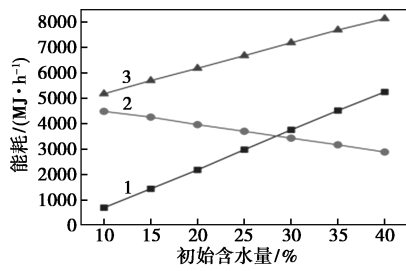
(b) 热解温度 600℃-添加比 5%



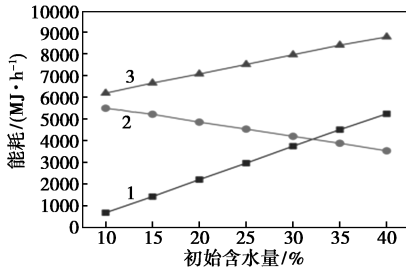
(c) 热解温度 600℃-添加比 15%



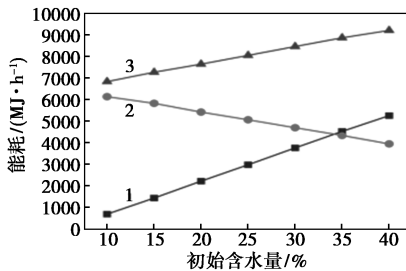
(d) 热解温度 600℃-添加比 30%



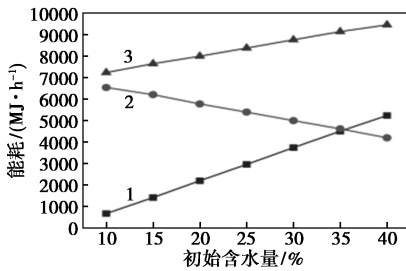
(e) 热解温度 500℃-添加比 0%



(f) 热解温度 700℃-添加比 0%



(g) 热解温度 800℃-添加比 0%



(h) 热解温度 900℃-添加比 0%

1—干燥能耗;2—热解能耗;3—总能耗

图5 不同添加比初始含水量对能耗的影响

热解温度为 600℃、初始含水率为 40%时,30%的微藻添加能够降低能耗约 8.85%。因此,对于高含水量的含油污泥,可以通过添加生物质共热以减少系统总能耗。

### 2.4 热解气热值计算

Aspen Plus 是一款广泛应用于化工过程模拟和设计的软件,能够通过内置的物性集(Property Set)查询和计算各种物质的热值利用热解气分布数据<sup>[4]</sup>,计算得到的热解气热值分布如图 6、图 7 所示,由计算结果可知,随着热解温度的上升,热解气的热值先略有下降后不断上升,而随着添加比不断

增加,热值不断增加。

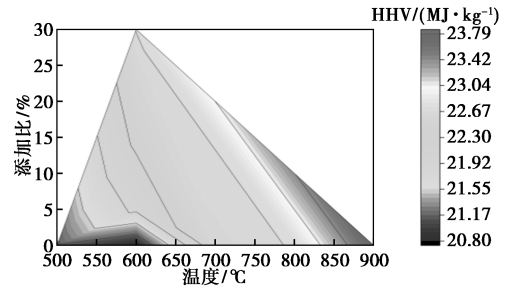


图6 热解气低位热值

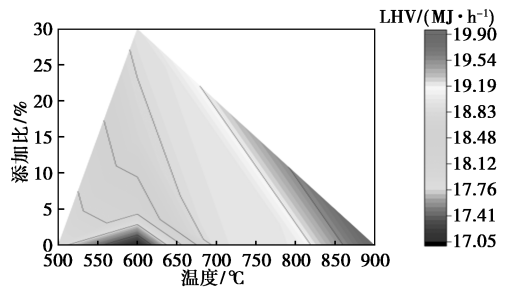


图7 热解气低位热值

### 2.5 烟气温度分布

图 8、图 9 为热解气燃烧的烟气温度分布的三维曲面图。模拟结果表明,热解气燃烧的烟气温度随着空气过量系数的增加而上升,这一现象在不同热解条件范围内均表现一致。在较低热解温度下,烟气温度随空气过量系数的增加而逐渐升高,且在较高热解温度条件下,这种趋势更为显著。随着热

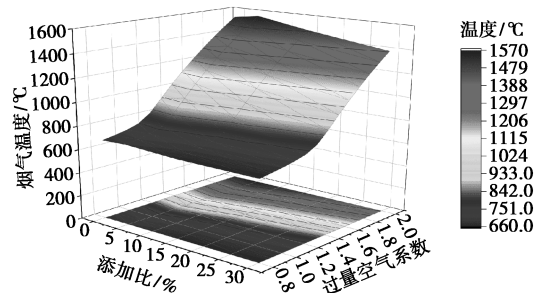


图8 添加比与过量空气系数对烟气温度的影响

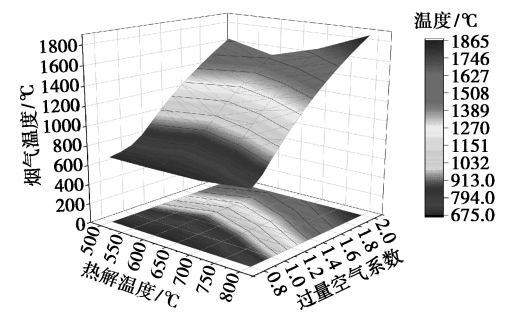


图9 热解温度与过量空气系数对烟气温度的影响

解温度的升高,烟气温度的增幅也更为明显,这可能是由于高温条件下热解气中的大分子烃裂解转化为小分子烃,进而导致热解气燃烧反应更加剧烈,从而产生更多的热量。这种趋势表明,在燃烧过程中,适当提高空气过量系数和热解温度能够有效提升烟气温度,提高燃烧效率和热能利用率。同时,随着微藻添加比的增加燃烧温度也呈现上升趋势,这是由于微藻的添加提高了热解气的热值<sup>[4]</sup>,进而提高了燃烧温度。但是,随着空气过量系数的不断增加,燃烧温度增加的趋势不断放缓,这是由于引入的冷空气的增加影响了燃烧温度。

## 2.6 热解气燃烧供热对能耗的影响

为进一步研究含水率对热处理系统总能耗的影响,有必要对热解气燃烧供热后的热处理总能耗分布展开分析。图 10 为计算热解气燃烧供热后,不同含水率下工艺总能耗变化曲线图。根据模拟结果,不同含水率下的系统总能耗的变化趋势相近,对于

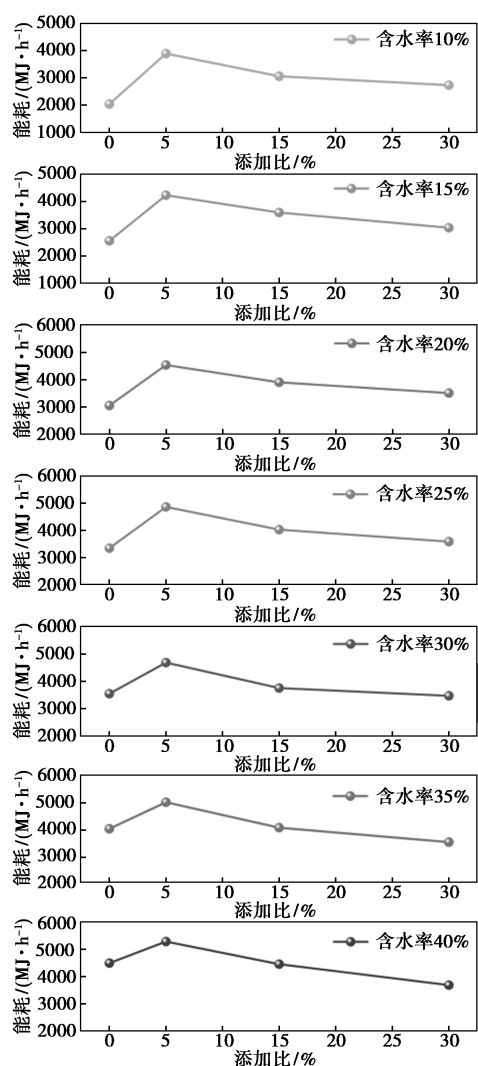


图 10 考虑热解气燃烧供热的工艺能耗

低含水率(10%~30%)的油泥,油泥单独热处理的能耗始终低于添加微藻后的工艺总能耗。而高含水油泥(30%~40%)的工艺能耗在微藻添加比为30%时低于油泥单独热解能耗。其中,初始含水率为40%的高含水油泥在600℃的热解温度条件下,通过添加30%的微藻能够降低工艺总能耗约18.15%。因此,对于低含水率的油泥可采用单独热解处理油泥,对于高含水率的油泥,可使用机械脱水降低含水率后热解或添加微藻以降低系统能耗。

## 3 结论

利用 Aspen Plus 软件,结合实验数据对含油污泥与微藻共热处理工艺流程进行建模,对微藻添加比以及热解温度对于共热处理工艺能耗以及热解气燃烧温度进行了分析讨论,得到以下结论。

(1) 微藻的添加对于干燥能耗与热解能耗均有影响。随着微藻添加比的增加,干燥能耗降低,但热解能耗则呈现出先增后减的趋势,说明热解形成高热值焦油需要消耗更多的能量。

(2) 不同热解条件下的热解气产物分布不同,进而对燃烧温度造成影响,随着热解温度的升高,烟气温度先略有下降后不断上升。同时,微藻的添加可以增加热解气热值而导致燃烧反应能够产生更多热量。

(3) 对于含水率大于30%的高含水率的油泥,微藻的添加能够通过降低干燥能耗以及增加热解气热值进而降低工艺总能耗,对于含水率小于30%的油泥,采用单独热解则能耗较低。例如,在初始含水率为40%的高含水油泥在600℃的热解温度下,通过添加30%的微藻能够降低工艺总能耗约18.15%。

## 参考文献

- [1] Environmental Management. Investigators from fudan university release new data on environmental management (Biochar Derived from pyrolysis of oily sludge waste: Structural characteristics and electrochemical properties) [J]. Ecology Environment & Conservation, 2020, 562.
- [2] 韩东. 含油污泥处理效能研究及装置关键技术分析 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- [3] 李虎山, 徐小伟, 莫文龙. 油泥资源化利用与无害化处理技术研究进展 [J]. 现代化工, 2022, 42(6): 69-72.
- [4] 杜爱勋. 含油污泥热解实验研究及一体化热处理工艺流程模拟 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- [5] Yael S H, Berrin T, Shonali L. 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.

(下转第 454 页)

## 参考文献

- [1] 郝向南,张浩.城市燃气管道泄漏监测系统设计[J].科技与创新,2025,(3):69-71,75.
- [2] 郝婕,徐文满,田瑛.从“底气不足”到“气象万千”——中国天然气工业改革开放 40 年回顾与展望[J].国际石油经济,2019,27(3):60-66.
- [3] 张昆宇.长输天然气管道腐蚀的形成与防腐保护措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(1):31-33.
- [4] Al-lagtah N M A, Al-habsi S, Onaizi S A. Optimization and performance improvement of Lekhwaier natural gas sweetening plant using Aspen HYSYS[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2015, 26: 367-381.
- [5] Rouzbahani A N, Bahmani M, Shariati J, et al. Simulation, optimization, and sensitivity analysis of a natural gas dehydration unit[J]. J Nat Gas Sci Eng, 2014, 21: 159-169.
- [6] 郭良辉,王艺,徐源,等.天然气净化厂重沸器能耗规律分析[J].工程热物理学报,2022,43(2):425-430.
- [7] 邱奎,安鹏飞,杨馥宁,等.高含硫天然气脱硫操作条件对能耗影响的模拟研究[J].石油学报:石油加工,2012,28(6):978-985.
- [8] 何卉,方梦祥,王涛,等.燃煤烟气化学吸收碳捕集系统分析与优化[J].化工进展,2018,37(6):2406-2412.
- [9] Abd A A, Naji S Z, Barifcani A. Comprehensive evaluation and sensitivity analysis of regeneration energy for acid gas removal plant using single and activated-methyl diethanolamine solvents[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(6): 1684-1693.
- [10] Zarezadeh F, Vatani A, Palizdar A, et al. Simulation and optimization of sweetening and dehydration processes in the pretreatment unit of a mini-scale natural gas liquefaction plant[J]. Int J Greenh Gas Control, 2022, 118: 103669.
- [11] 郭土,孙东,杨秀丽,等.胜利油田注汽系统用能现状[J].当代化工,2019,48(10):2370-2373,2381.
- [12] 魏青,张振涛,王瑞祥,等.醇胺法碳捕集技术的研究进展[J].环境工程技术学报,2025,15(1):90-99.
- [13] 唐俊丽.合成氨工艺脱碳方法评述[J].化学工程师,2011,25(12):34-36.
- [14] 梁平,宋冬寒,文明,等.基于 ProMax 的高含硫天然气脱硫装置模拟与优化[J].现代化工,2019,39(7):202-206,208.
- [15] 姜鹏.醇胺法脱碳工艺模拟与装置运行研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- [16] 范秦楚,阮玉蛟,周军.碳达峰碳中和目标下国内天然气净化厂运行现状与展望[J].石油与天然气化工,2023,52(1):25-31,39.
- [17] 葛怀栋.海上平台伴生气脱酸工艺技术改进和评价[J].石油石化节能与计量,2025,15(1):1-5.
- [18] 李焱芳,刘元昊,曹红强,等.适合高含硫天然气的脱硫脱碳工艺研究[J].化学与生物工程,2023,40(7):65-68.
- [19] 丰雪艳.变电站环境下巡检机器人的路径规划方法研究[D].淮南:安徽理工大学,2024.
- [20] Li M Q, Yang S X, Liu X H. Bi-goal evolution for many-objective optimization problems[J]. Artificial Intelligence, 2015, 228: 45-65. ■
- [15] 王驰中,范军毅,陈衡,等.基于城市污泥高效利用的干燥热解及处理一体化系统性能分析[J].洁净煤技术,2024,30(S2):494-500.
- [16] 胡亮,于海龙,郑和,等.撬装式高温等离子体气化熔融设备处理油基钻屑技术研究[J].现代化工,2023,43(11):61-65.
- [17] 高亚丽,田丽娜,崔东旭,等.基于 Aspen Plus 的典型林业生物质气化制氢过程模拟研究[J].新能源科技,2024,5(4):17-25.
- [18] 冯东征,何选明,柯萍,等.稻秆与褐煤共热解转化效能研究[J].煤炭转化,2019,42(1):15-21.
- [19] Gong Z, Du A, Wang Z, et al. Analysis on integrated thermal treatment of oil sludge by Aspen Plus[J]. Waste Management, 2019, 87: 512-524.
- [20] 彭涛.含油污泥干化热解一体化技术及设备[D].常州:常州大学,2021.
- [21] 秦利鹏,吴少基,王智瑾,等.基于 Aspen Plus 的污泥干化-热解耦合工艺模拟及放大实验[J].生物质化学工程,2023,57(2):12-20.
- [22] 王超.生物质快速热解制油工艺分析及油品改质实验研究[D].天津:天津大学,2014.
- [23] 宋新南,徐惠斌,房仁军,等.基于 Aspen Plus 的生物质燃烧 NO<sub>x</sub> 生成模拟[J].环境科学学报,2009,29(8):1696-1700.
- [24] 王学斌,周澳,杨明辉,等.燃煤电厂 200 t/d 生活垃圾无氧热解耦合协同处置优化[J].煤炭学报,2022,47(11):3897-3905. ■

(上接第 448 页)

- [6] Zhao Z, Situmorang A Y, An P, et al. Hydrogen production from catalytic steam reforming of bio-oils: A critical review[J]. Chemical Engineering & Technology, 2020, 43(4): 625-640.
- [7] Gao N, Li J, Quan C, et al. Product property and environmental risk assessment of heavy metals during pyrolysis of oily sludge with fly ash additive[J]. Fuel, 2020, 266: 117090.
- [8] Zhao Y, Yang Z, Niu J, et al. Systematical analysis of sludge treatment and disposal technologies for carbon footprint reduction[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 128(6): 224-249.
- [9] 岳勇,刘鹏,王蓉沙,等.油田含油污泥与芦苇共热解实验研究[J].油气田环境保护,2012,22(1):7-9,60.
- [10] 黄永福.普通小球藻和盐生杜氏藻的快速热解特性研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [11] 房佩文,巩志强,张曼,等.热解温度对微藻基生物质热解焦性质的影响[J].洁净煤技术,2020,26(S1):139-146.
- [12] Wang X, Zhao B, Yang X. Co-pyrolysis of microalgae and sewage sludge: Biocrude assessment and char yield prediction[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 117: 326-334.
- [13] Hasan M M, Rasul M G, Jahirul M I, et al. Modeling and process simulation of waste macadamia nutshell pyrolysis using Aspen Plus software[J]. Energy Reports, 2022, 8: 429-437.
- [14] 吴徐磊,于海龙,张世锋,等.油基岩屑高温等离子体气化过程数值模拟研究[J].现代化工,2024,44(2):227-232.