

大规模炼化污水场浮渣与污泥的气化协同处置技术研究

王治龙, 魏文*

(浙江石油化工有限公司, 浙江 舟山 316000)

摘要: 依托企业现有煤焦制气装置, 开发了一套浮渣-污泥协同气化资源化利用技术。通过设计多组适应不同产出工况的定制化掺烧比例, 并结合预处理与混浆气化耦合工艺, 实现了对污水处理场浮渣与污泥的全量、稳定消纳。该技术将危废在高温下转化为高价值合成气($\text{CO}+\text{H}_2$), 无需新增核心设备, 且运行稳定、环保达标。工业应用结果表明, 该技术可处理浮渣含油率 35%~42%、污泥含水率 85% 的复杂物料, 年消纳危废 1.58 万 t, 替代燃料煤 3.95 万 t。基于 2025 年市场价核算, 年新增综合经济效益达 1.83 亿元, 投入产出比超过 1:8。本研究为大型炼化企业解决高负荷污水处理系统固废出路、实现绿色低碳转型提供了切实可行的技术路径与实践范本。

关键词: 炼化一体化; 污水处理; 含油污泥; 气流床气化; 资源化利用

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0326-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.055

Research on synergistic disposal technology of scum and sludge from large-scale refinery wastewater treatment via gasification

WANG Zhi-long, WEI Wen*

(Zhejiang Petroleum & Chemical Co., Ltd., Zhoushan 316000, China)

Abstract: This paper develops a synergistic gasification technology for the resource utilization of scum and sludge, leveraging an existing coal-coke gasification unit. By designing multiple customized co-processing ratios adaptable to different output conditions and integrating pretreatment with slurry-mixing gasification, the technology achieves complete and stable consumption of scum and sludge from the wastewater treatment plant. This process converts hazardous waste into high-value synthesis gas ($\text{CO}+\text{H}_2$) at high temperatures without requiring new core equipment, ensuring stable operation and environmental compliance. Industrial application results demonstrate that the technology can effectively treat complex materials—scum with 35%–42% oil content and sludge with 85% moisture content—achieving an annual hazardous waste disposal capacity of 15 800 tons and replacing 39,500 tons of fuel coal. Based on 2025 market prices, the calculated annual incremental comprehensive economic benefit reached 183 million yuan, with an input-output ratio exceeding 1:8. This study provides a feasible technical pathway and a practical paradigm for large-scale refining enterprises to resolve the solid waste disposal challenges in high-load wastewater treatment systems and to achieve green and low-carbon transformation.

Key words: integrated refining and chemical; wastewater treatment; oily sludge; entrained-flow gasification; resource utilization

在“双碳”目标和《“十四五”工业绿色发展规划》的引领下, 炼化行业正加速向“源头减污、资源循环、低碳高效”的模式深度转型^[1]。然而, 随着炼化一体化规模跃升, 污水处理场产生的浮渣与含油污泥等危险废物总量急剧增加, 成为行业绿色发展的突出痛点^[2]。炼厂污水处理系统产生的浮渣(含油率 35%~42%)与含油污泥(含水率 85%±3%)富含矿物油、重金属及机械杂质, 处理难度极大。传统处置路径存在固有缺陷。①污油回炼: 将污油掺入原油进入常减压装置, 极易导致电脱盐系统运行恶

化, 造成切水含油/含盐超标, 引发电化学腐蚀并冲击下游污水系统, 仅适用于杂质含量极低的特定工况, 目前大型炼化企业已严格限制或逐步淘汰此做法^[3]。②污泥焚烧: 虽减量化彻底, 但设备投资和运行成本高昂, 且烟气中含有的 SO_2 、 NO_x 及二噁英需配套复杂的深度净化系统, 仅实现减量化而未真正资源化, 环保压力巨大。③填埋处置: 受土地资源和高标准的环保政策严格限制, 存在重金属渗漏的长期环境风险, 已基本退出主流处置序列。更为关键的是, 传统工艺的处理弹性远无法匹配大型炼化

收稿日期: 2026-02-24; 修回日期: 2026-03-16

作者简介: 王治龙(1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为石油化工技术管理, 0580-8265688, 574681063@qq.com; 魏文(1983-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为石油化工技术管理, 通讯联系人, 0580-8265161, 185835079@qq.com。

企业污水处理场的动态负荷。当上游装置生产波动或污水处理系统自身遭遇冲击时,浮渣与污泥的产量会急剧增加,物性亦发生剧烈变化。此时,受限的回炼能力和昂贵的焚烧瓶颈,导致大量危废无法及时处置,只能在场内积压,严重时甚至不得不降低污水处理负荷,直接威胁到上游炼化主装置的连续、高负荷运行。因此,开发一种能够弹性适应高产出工况、实现危废全量消纳且稳定可靠的资源化技术,已成为保障炼化一体化企业安稳长满优运行的迫切需求。本研究依托现有煤焦气化装置,将预处理后的浮渣-污泥按动态比例与煤焦共制成浆,送入多喷

嘴对置式气流床气化炉。在1300℃以上的高温下,危废中的有机物发生部分氧化反应,彻底分解二噁英等有害物质,并同步转化为以CO和H₂为核心的合成气^[4]。该路径无需新增核心设备,直接嵌入现有流程,旨在彻底解决高负荷、波动性工况下炼厂危废的出路问题,实现“固废处置-能源生产-降本增效”的协同。

1 原料特性与技术适应性分析

污水处理厂产生的浮渣与污泥物性复杂,是实现稳定气化的关键制约因素。主要指标如表1所示。

表1 浮渣-污泥关键物性指标

样品类型	含水率/%	含油率/%	残炭值/%	Ni+V/(mg·kg ⁻¹)	灰分/%	低位热值/(MJ·kg ⁻¹)	硫含量/%
浮渣	75~82	35~42	12~18	320~480	15~22	18~22	0.8~1.2
含油污泥	85±3	32~38	10~15	350~460	18~25	16~20	0.9~1.3
生化污泥	85±3	8~12	15~20	300~420	22~28	12~16	0.7~1.1

如表1所示,浮渣与污泥兼具“高能源价值”与“高处理难度”的双重特性。一方面,含油率高、热值适中(低位热值12~22 MJ/kg),具备作为气化原料的热解产气潜力;另一方面,高含水率、高灰分及含有重金属、机械杂质,若直接进入气化系统,将导致能耗升高、系统结渣和堵塞风险增加。

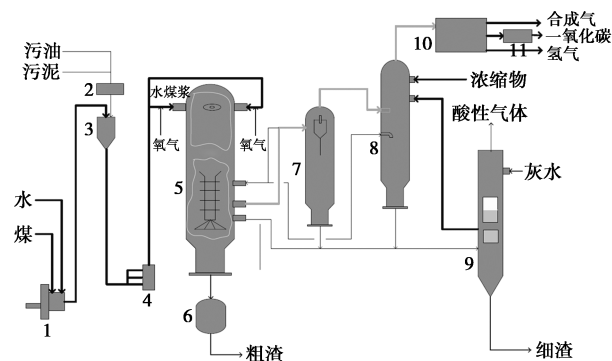
为此,本研究设计了“除杂+均质+混配”的预处理工艺。首先对浮渣和污泥进行破碎、除杂,控制粒径≤6 mm,并在均质化槽内充分混合,以平抑来料波动。然后将预处理后的混合原料按优化比例连续打入煤浆槽,与煤焦浆混合,形成质量分数为58%~62%、流变性满足高压煤浆泵输送要求的混合浆。通过此工艺,将高风险的危废转化为适配现有气化炉的“定制化”原料。

2 协同气化工艺流程与机理

本方案的核心是将预处理后的浮渣-污泥混合原料,通过进料与气化、洗涤、净化3大系统,最终转化为满足下游需求的合成气、氢气及一氧化碳。工艺流程如图1所示。

2.1 进料与气化系统

经预处理合格后的混合原料(含水率≤20%、粒径≤6 mm),通过新增的精确给料系统,按设定的比例连续打入煤浆槽,与煤焦浆混合。混合浆经高压煤浆泵加压至6.5 MPa,与纯度为99.6%以上的高压氧气通过4个水平对置式烧嘴喷入气化炉。在炉



1—磨煤机;2—过滤器;3—煤仓;4—煤浆泵;5—气化炉;
6—锁斗;7—旋分器;8—水洗涤塔;9—蒸发热水塔;
10—净化系统;11—深冷

图1 浮渣-污泥协同气化工艺流程简图

内平均温度1350℃、压力6.0 MPa的苛刻条件下,物料在4~10 s内迅速完成部分氧化反应^[5]。有机物分子键断裂,生成以CO和H₂为主的粗合成气,碳转化率稳定在98.8%以上。无机物则熔融为液态渣。

2.2 洗涤系统

出气化炉的1300℃高温粗合成气进入激冷室,与激冷水直接接触,被冷却至220~240℃,同时熔融灰渣淬冷固化,经锁斗系统定期排出。冷却后的合成气进入洗涤塔,与塔盘上的洗涤水逆流接触,脱除其中的灰渣颗粒至≤1 mg/m³,同时回收热量副产中压蒸气。洗涤产生的黑水经闪蒸、絮凝沉淀处理

后循环利用,脱水后的灰渣作为建材原料外售,实现全过程无废液外排。

2.3 净化系统

洗涤后的粗合成气进入低温甲醇洗装置。在 $-50\sim-40\text{℃}$ 的低温下, H_2S 和 CO_2 被选择性吸收,净化气中 $\text{H}_2\text{S}\leq 0.1\text{ mg/m}^3$ 、 $\text{CO}_2\leq 2\%$ 。富含 H_2S 的酸性气送硫磺回收装置,生产硫磺。净化后的气体进入变压吸附(PSA)装置,分离出高纯度氢气($\geq 99.9\%$)、高纯度一氧化碳($\geq 98.5\%$)以及燃料气,分别送往炼厂加氢装置、醋酸装置及全厂燃料气管网,实现资源梯级利用。

3 多工况适应性与工业验证

为应对污水处理场产出工况的剧烈波动,确保

危废“产得出、销得掉”,本研究设计了多组灵活的掺烧方案,并通过工业试验进行验证。

3.1 方案设计原则

方案设计以“全量消纳、运行稳定、效益最优”为原则,充分考虑污水处理厂的产出波动(日均浮渣 $20\sim 40\text{ t}$ 、污泥 $70\sim 110\text{ t}$),设定了 $1.4\sim 1.75$ 万 t/a 的总消纳目标。通过调控浮渣与污泥的混合比例($1:2\sim 1:4$),平衡混合原料的含油率与热值,确保始终在气化炉原料设计窗口内。核心约束是总掺烧比例(危废占混合浆总固体重量的比例)不超过 5% ,以保障气化炉长周期运行。

3.2 多组掺烧比例验证结果

设计并验证了 5 组核心掺烧比例,覆盖了污水处理厂常见及极端工况,结果见表 2。

表 2 浮渣-污泥掺烧比例工业验证方案与结果

掺烧方案	浮渣:污泥	含油率/%	热值/($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	掺烧比例/%	消纳量/($\text{万 t}\cdot\text{a}^{-1}$)	验证结果
基准	1:3	28~35	13.81~17.07	3.0	1.50	合成气有效组分 $\geq 80\%$,运行平稳
浮渣偏多	1:2	30~38	15.23~18.14	2.5	1.40	配浮渣高产工况,气化效率无下降
污泥偏多	1:4	25~32	13.10~16.32	4.0	1.60	配污泥高产工况,灰渣排放正常
高负荷	1:3.5	26~33	13.35~16.58	5.0	1.75	极限消纳量工况,合成气品质稳定
低负荷	1:2.5	29~36	14.56~17.65	2.0	1.45	适配低产出工况,能耗成本最优

3.3 核心结论

验证结果表明:①高弹性适配,5 组方案均满足气化要求,碳转化率 $\geq 98.5\%$,有效气($\text{CO}+\text{H}_2$) $\geq 80\%$,覆盖了浮渣:污泥=1:2~1:4的宽幅波动范围。②全量消纳保障,方案总消纳能力覆盖了 1.4 万~ 1.75 万 t/a 的波动区间,可 100% 消纳厂区危废,彻底消除了因危废积压而被迫降低污水处理负荷的风险。③装置运行稳定,运行期间,气化炉温度、压力波动 $\leq \pm 30\text{℃}$ 、 $\pm 0.1\text{ MPa}$,排渣顺畅,无结渣、腐蚀迹象,证明技术具备长周期安全运行能力。

4 运行效果与经济效益分析

4.1 操作参数与产品品质

掺烧前后关键操作环节的调整及合成气品质对比如表 3、表 4 所示。结果表明,掺烧后通过氧煤比的动态微调($1.0\sim 1.05$)和排渣频率的优化,系统保持了高度稳定。合成气中有效组分($\text{CO}+\text{H}_2$)较纯煤浆工况提升了 $1.04\%\sim 2.06\%$,杂质含量均在净化单元设计处理能力之内,实现了产品品质的稳中有升。

表 3 关键操作环节对比

操作环节	掺烧前 纯煤焦气化	掺烧后 协同气化	调整目的
进料控制	单一煤浆泵输送	双路流量调节,变频泵控制比例	精准匹配比例,避免进料波动
气化炉调节	氧煤比固定	氧煤比动态微调,维持炉温	适配混合原料含碳量波动
排渣系统	排渣频率固定	按掺烧比例动态调整	及时排渣,避免堵塞

表 4 合成气主要组分对比

组分	纯煤浆制气 基准	协同气化 制气	变化趋势
$\text{CO}/\%$	39.52~41.23	39.45~42.68	基本稳定/小幅上升
$\text{H}_2/\%$	39.68~40.75	39.72~40.89	基本稳定/小幅上升
$\text{CO}+\text{H}_2/\%$	79.20~81.98	79.17~83.57	小幅提升
$\text{H}_2\text{S}/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-3})$	1200~1600	1300~1800	可控范围内上升

4.2 经济效益核算

基于年消纳危废 1.58 万 t、替代燃料煤 3.95 万 t

的工业运行数据,结合 2025 年市场价进行核算,结果见表 5。

表 5 综合经济效益核算表

核算维度	具体项目	数量	单价	效益/(万元·a ⁻¹)	备注
危废处理	节约危废处置成本	1.58 万 t	2800 元/t	+4424	参考行业处置招标价
	危废预处理成本	1.58 万 t	120 元/t	-189.6	含破碎、均质等
节省燃料	节约原料煤采购	3.95 万 t	750 元/t	+2962.5	动力煤市场价
	新增系统运行能耗	—	—	-715	含电、水等消耗
产品增收	替代外购氢气	7300 万 m ³	1.6 元/m ³	+11680	纯度≥99.9%
	替代外购一氧化碳	1825 万 m ³	1.4 元/m ³	+2555	纯度≥98.5%
	灰渣资源化收益	0.35 万 t	150 元/t	+52.5	建材外售
	新增维护及辅料			-990	含检修、耗材
合计	年度综合经济效益			+18309.4	投入产出比>1:8

核算表明,该技术年综合经济效益达 1.83 亿元。其中,氢气与一氧化碳的产品替代收益贡献超过 70%,危废处理由“成本中心”转变为“效益中心”。这不仅彻底解决了长期制约生产的环保难题,更实现了资源的深度价值挖掘。

5 结论

(1)针对大型炼化企业污水处理场浮渣与污泥产量大、波动性强、传统工艺难以有效处置的共性痛点,成功开发并验证了一套基于现有煤焦气化装置的协同处置技术。该技术彻底打通了危废出路,消除了因固废积压而制约主装置运行的重大隐患。

(2)工业应用证明,该技术通过多比例掺烧方案(浮渣:污泥=1:2~1:4,总掺比 2%~5%),可弹性应对污水处理场的各类工况,实现对浮渣与污泥的 100% 全量、稳定消纳。年处置能力达 1.58 万 t,碳转化率≥98.5%,合成气有效组分稳中有升。

(3)经济效益与环境效益显著。在不新增核心设备前提下,年替代燃料煤 3.95 万 t,生产高附加值氢气与一氧化碳,综合经济效益达 1.83 亿元。实现

了“危废资源化、能源清洁化、效益最大化”的协同目标。

本研究为同类大型炼化企业破解固废处置瓶颈、实现绿色低碳高质量发展,提供了一条技术可靠、经济可行、易于复制的实践路径。未来可进一步探索更高比例掺烧及与其他有机固废协同处置的可能性。

参考文献

- [1] 柯晓明, 乞孟迪, 吕晓东, 等. “双碳”目标下中国炼化行业“十四五”发展新特点分析与展望[J]. 国际石油经济, 2021, 29(5): 33-38.
- [2] 赵杰, 杜海波, 丛飙, 等. 克拉玛依石化公司炼油污水“三泥”的无害化处置解决方案[C]. 中国环境科学学会: 中国绿色财富论坛暨科技创新与可持续发展研讨会, 2006.
- [3] 潘涛, 骆坚平, 郭行. 废水处理及回用工程技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024: 691.
- [4] 黄俊霖. 生活垃圾焚烧飞灰高温烧结协同重金属氯挥发调控机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [5] 王明兰, 满孝辉, 于伟然. 气化炉炉砖异常烧蚀原因分析[J]. 氮肥技术, 2023, 44(3): 13-17. ■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿, 投稿系统: <http://www.xdhg.com.cn>