

基于技术经济性分析和生命周期评价的 印染行业污泥资源化降碳绩效研究^{*}

张东明¹ 陈东波¹ 樊立安¹ 王智慧² 杨 晨¹ 吕洪炳³ 李清毅³ 蔡依曼¹
 田金平² 陈亚林² 陈吕军^{2#}

(1.浙江浙能兴源节能科技有限公司,浙江 杭州 311121;2.清华大学环境学院,北京 100084;
 3.浙江省能源集团有限公司,浙江 杭州 310007)

摘要 推进污泥处置节能降碳,是深入打好污染防治攻坚战、推动温室气体减排的关键抓手。针对印染污泥高硫、高氯特性,依托浙江某 2 500 t/d 规模印染污泥焚烧工程案例,运用物质流分析、能量流分析、技术经济性分析和生命周期评价等方法,系统揭示印染污泥资源化面临的能源效率、烟气超低排放、经济环境效益等主要挑战,比较了 3 种技术路线,提出印染污泥资源化节能降碳综合解决方案。研究发现:该工程案例印染污泥干化焚烧能源利用效率可达 78.1%;与卫生填埋+燃煤热电联产相比,处理 1 t 印染污泥混合燃料(干燥基)全生命周期可减排温室气体 647 kg(以 CO₂ 当量计);运用炉内脱酸+选择性非催化还原法+选择性催化还原法+活性炭吸附+布袋除尘+双塔脱酸可实现焚烧烟气超低排放;煤炭掺烧比例(质量分数)控制在 20%,印染污泥干化焚烧热电联产能产生良好的经济环境效益。研究可为印染行业推进减污降碳协同增效提供工程借鉴。

关键词 印染行业 污泥干化焚烧 碳减排 技术经济性分析 生命周期评价

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.202404198

Carbon mitigation performance associated with sludge-to-energy in the printing and dyeing industry based on techno-economic analysis and life cycle assessment ZHANG Dongming¹, CHEN Dongbo¹, FAN Li'an¹, WANG Zhihui², YANG Chen¹, LYU Hongbing³, LI Qingyi³, CAI Yiman¹, TIAN Jinping², CHEN Yalin², CHEN Lyujun².
 (1.Zhejiang Zheneng Xingyuan Energy Saving Technology Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 311121; 2.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084; 3. Zhejiang Provincial Energy Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310007)

Abstract: Advancing energy-saving and carbon-reducing measures in sludge treatment is a crucial strategy for effectively combating pollution and reducing greenhouse gas emissions. Focusing on the challenges posed by the sludge's high sulfur and chlorine contents, this study presented a case study of a 2 500 t/d large-scale incineration project in Zhejiang. Employing methodologies including material flow analysis, energy flow analysis, techno-economic analysis, and life cycle assessment, this study systematically elucidated the primary challenges with printing and dyeing sludge's resource usage. Energy efficiency, achieving ultra-low emissions of flue gas, and assessing economic and environmental benefits were all part of these challenges. Comparing three technical routes, the study proposed a holistic solution for energy-saving and carbon-reducing in printing and dyeing sludge resource utilization. The study unveiled that the energy utilization efficiency of the case study's printing and dyeing sludge drying and incineration reached 78.1%. This process contributed to a significant reduction of greenhouse gas emissions, with a decrease of 647 kg (measured as CO₂ equivalent) per ton of printing and dyeing sludge mixed fuel (dried basis) over its lifecycle compared with sanitary landfill + coal-fired cogeneration. The adoption of a comprehensive technological suite, comprising in-furnace acid removal + selective non-catalytic reduction + selective catalytic reduction + activated carbon adsorption + bag filtration + double-tower acid removal, achieved ultra-low emissions in the flue gas of printing and dyeing sludge drying and incineration. Furthermore, the case study underscored the economic and environmental benefits of maintaining a coal blending ratio (measured as mass fraction) at 20% in sludge drying and incineration cogeneration. Therefore, this research provided engineering strategies to promote synergistic pollution reduction, carbon mitigation, and efficiency enhancement for the printing and dyeing industry.

Keywords: printing and dyeing industry; sludge drying and incineration; carbon mitigation; techno-economic analysis; life cycle assessment

第一作者:张东明,男,1968 年生,本科,高级工程师,主要从事能源环境工程研究。[#] 通信作者。
^{*} 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关技术项目(No.2023C03008);国家自然科学基金资助项目(No.72274103)。

印染行业是美丽中国建设的重要支撑^[1],但印染行业低碳循环发展也面临着突出挑战。2022 年全国工业废水处理量为 301.6 亿 t,其中纺织业废水处理量占比为 5.3%^[2]。印染废水排放量约占纺织业废水排放量的 70%,印染生产过程是纺织产业链中水污染物排放的最主要环节^[3]。印染废水处理过程会产生大量污泥,其成分复杂,且含有毒有害有机物^[4-5]。根据我国相关政策要求^[6-8],宜优先采用集中或协同焚烧方式处理印染污泥,这对于行业绿色低碳循环发展具有重大现实意义。

印染过程中大量使用分散染料、活性染料、助剂、漂白剂等化学品^[9-10],其中许多分散染料、活性染料、漂白剂中含有氯元素^[11],染色过程中染料的上染率介于 70%~80%,未上染的染料、助剂进入废水,最终转移至印染污泥^[12],导致污泥呈现高硫、高氯、高热值等特性^[13]。印染污泥高热值有利于焚烧,但焚烧过程中产生的高硫、高氯烟气在实现稳定运行和烟气超低排放中会带来新的挑战。

目前,国内外在污泥处置领域的研究较多集中于城市污水污泥即市政污泥,主要运用生命周期评价(LCA)对其单独焚烧、协同焚烧和厌氧消化等处置场景进行环境影响和能耗评估,印染污泥相关的 LCA 研究相对较少^[14-17],而同时基于技术经济性分析(TEA)-LCA 的综合评价研究则未见述及。同时,针对印染污泥干化焚烧烟气超低排放技术工程化案例研究尚较少,实践中在借鉴燃煤烟气颗粒物、SO₂、氮氧化物(NO_x)等常规污染物去除及重金属、气溶胶、酸性气体、白烟控制等解决策略^[18-21]的同时,需针对印染污泥干化焚烧产生的高硫、高氯烟气超低排放特征,兼顾技术经济性和环境友好性,开发全过程清洁生产和超低排放技术,并开展工业化实践。这是印染行业低碳循环发展的一项紧迫任务,也是贯彻落实《空气质量持续改善行动计划》中“重点行业污染深度治理”的重要举措。

本研究选择 2 500 t/d 规模低煤炭掺烧印染污泥干化焚烧热电联产工程案例,从物质代谢、能量平

衡、技术经济性和全生命周期等多视角进行综合评价,以期建立印染行业污泥资源化利用经济环境最佳平衡策略,为污泥资源化节能降碳提供借鉴参考。

1 研究方法

基于工程案例,综合运用物质流分析(MFA)、能量流分析(EFA)、TEA 和 LCA 等方法,全面揭示印染污泥焚烧烟气超低排放的技术经济性和环境影响。研究系统边界为工程案例的厂界,时间为 2023 年 1—12 月,数据来源于工程案例实际运行数据,并进行必要的延伸计算。本研究中烟气污染物浓度在标准状态(273.15 K,101 325 Pa)下以 O₂ 体积分数 11%的干烟气作为换算基准。

1.1 案例选取

以浙江某印染污泥焚烧清洁化处置项目为案例,该工程主要用于集中焚烧处置所在区域 141 家印染企业的污泥,同时处理区域集中污水处理厂污泥,总设计处置规模为 2 500 t/d,干化后入炉污泥含水率控制在 55%左右,煤炭掺烧比例(质量分数)控制在 20%。该项目于 2021 年建成投运,主体设施为 1 台额定蒸发量为 130 t/h 的高温高压循环流化床(CFB)污泥焚烧锅炉、1 台 25 MW 抽凝式汽轮发电机组及烟气超低排放系统。工程案例烟气污染物 NO_x、SO₂和颗粒物等指标限值执行《燃煤电厂大气污染物排放标准》(DB33/ 2147—2018),HCl、CO 等指标限值执行《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)。本案例印染污泥干化焚烧工艺流程见图 1。

1.2 EFA

EFA 可揭示印染污泥焚烧过程中能量的产生、传递和消耗规律,定量刻画能源利用和热电转化效率^[22-23]。本研究中物质显热采用定压比热容计算,物质化学能采用量热仪(SDC712)检测。工程案例能量输入为印染污泥、燃煤和市政污泥,能量输出为电力、热力、烟气、灰渣等。

表 1 为印染污泥、燃煤和市政污泥的基本特性。

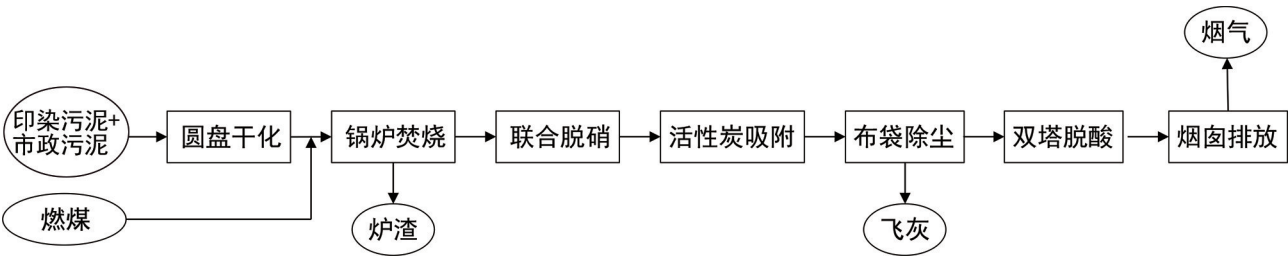


图 1 印染污泥干化焚烧工艺流程示意图
Fig.1 Schematic diagram of the printing and dyeing sludge drying and incineration process

表 1 印染污泥、燃煤和市政污泥工业分析和元素分析¹⁾

Table 1 Industrial analysis and elemental analysis of printing and dyeing sludge,coal and municipal sludge

燃料	元素分析/%		工业分析/%				低位热值 (kJ/kg)
	碳	氢	水分	挥发分	固定碳	灰分	
印染污泥	26.8	3.7	11.6	44.6	6.0	37.8	12 311
燃煤	52.4	3.5	2.8	26.6	44.8	25.7	20 758
市政污泥	16.5	3.6	6.0	37.4	0.2	56.4	5 186

注:¹⁾表中数值均换算为空气干燥基(以下简称空干基),且元素分析和工业分析结果以质量分数表示。

印染污泥空干基低位热值为 12 311 kJ/kg,是燃煤的约 60%,但超过市政污泥 2 倍,具有较好的能源利用价值。以 1 t 印染污泥混合燃料(以下简称混合污泥)为基准进行热力计算,分析印染污泥焚烧的能源效率和能量转化特征。该工程案例污泥掺烧燃煤比例设置基于两个原因:一是政策要求燃煤掺烧比例控制在 20%以内;二是保证锅炉蒸发量达到额定工况。

1.3 MFA

MFA 基于物质守恒定律,对指定系统边界内物质的流量变化开展系统性分析^[24-25]。本研究 MFA 包括污泥入厂至焚烧烟气净化达标排放全过程,沿工艺流程定量分析硫、氯的迁移转化特征,重点分析烟气中 SO₂、HCl 等污染物在各阶段的浓度变化。

图 2 为本工程案例所在园区 141 家印染企业的污泥元素分析结果。污泥中空干基全硫质量分数集中分布在 2.1%~3.5%(平均值为 2.9%),空干基氯质量分数集中分布在 0.1%~0.4%(平均值为 0.3%)。燃煤空干基全硫质量分数普遍在 1%以下,空干基氯质量分数在 0.1%以内;相较而言,印染污泥具有高硫、高氯特征,实现烟气超低排放难度更高,需要在燃煤烟气超低排放技术积累的基础上,开展针对性研究。

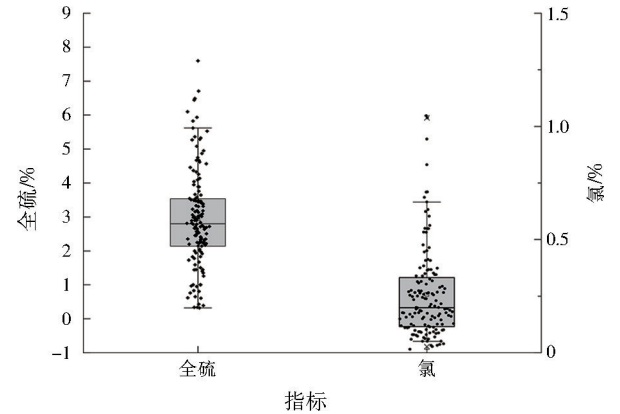


图 2 工程案例所在园区 141 家企业印染污泥硫、氯分布
 Fig.2 Distribution of sulfur and chlorine in printing and dyeing sludge of 141 enterprises in the park

1.4 TEA

TEA 可从技术和经济两个维度对工程案例进行分析,识别主要的技术经济指标和关键参数^[26-27]。TEA 分析对象包括主机系统和烟气超低排放系统,经济分析包括总投资、运行成本和经济收益等,并与两种类似案例进行比较,探究不同污泥处置方式的技术经济特点。

1.5 LCA

LCA 是对产品的整个生命周期——从原材料获取到设计、制造、使用、循环利用和最终处理等过程的环境影响进行定量分析的技术方法^[28-29]。本研究构建的工程案例 LCA 模型,包括污泥干化、锅炉焚烧和烟气净化等主要系统,功能单元为 1 t 混合污泥(干燥基),评价方法采用 CML 2001,重点分析温室气体排放。工程案例污泥热电联产包括污泥焚烧、烟气净化、废水处理等 10 个工艺环节,污泥焚烧、烟气净化、废水处理等主要工艺环节生命周期清单见表 2 至表 4。燃煤电厂的排放量采用《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》中华东电网电量边际因子和容量边际因子等权重加权计算得到,卫生填埋 LCA 建模的输入输出见表 5。

鉴于工程案例在实现污泥减量化的同时产出蒸汽和电力,具有协同处置印染污泥和热电联产双重

表 2 污泥焚烧过程生命周期清单

Table 2 Life cycle inventory of sludge incineration process

项目	参数	单位	数值
输入	电力	kW · h	140.99
	脱水后混合污泥	kg	1 739.10
	无需脱水混合污泥	kg	379.46
	煤炭	kg	514.89
	除盐水	kg	2 263.02
输出	产热	MJ	9 096.05
	发电	kW · h	1 033.40
	灰渣	kg	229.98
	添加煤炭的碳排放 ¹⁾	kg	1 008.69

注:¹⁾以 CO₂当量计。

表 3 烟气净化过程生命周期清单

Table 3 Life cycle inventory of flue gas purification process			
项目	参数	单位	数值
输入	氨水	kg	11.97
	活性炭	kg	0.44
	石灰石粉	kg	78.28
	电力	kW · h	35.25
输出	飞灰	kg	232.49
	石膏	kg	94.65
	CO ₂	kg	<0.01
	CO	kg	2.16×10 ⁻¹
	颗粒物	kg	1.66×10 ⁻²
	NO _x	kg	3.24×10 ⁻¹
	SO ₂	kg	2.95×10 ⁻²
	HCl	kg	2.34
	汞	kg	5.84×10 ⁻⁷
	镉	kg	9.29×10 ⁻⁶
	铊	kg	9.29×10 ⁻⁸
	铜	kg	5.84×10 ⁻⁴
	铬	kg	1.40×10 ⁻⁴
	铅	kg	1.86×10 ⁻⁴
	二噁英	kg	1.67×10 ⁻¹⁰

表 4 废水处理过程生命周期清单

Table 4 Life cycle inventory of wastewater treatment process			
项目	参数	单位	数值
输入	脱硫废水	m ³	0.27
	氢氧化钠	kg	19.20
	聚合硫酸铁	kg	5.90×10 ⁻³
	有机硫	kg	2.44×10 ⁻³
	电力	kW · h	23.26
输出	回用水	m ³	0.27

功能,建模时采用系统 LCA 扩展方法,即将“干化焚烧处理 1 t 混合污泥(干燥基),产出一定数量的蒸汽、电力”作为功能单元;印染污泥干化焚烧热电联产的比较对象,采用“卫生填埋处理 1 t 混合污泥(干燥基)”+“燃煤热电联产产出相应数量的蒸汽、电力”,使得协同处置情景与比较情景的功能相同。采用系统扩展建模,既考虑了污泥热电联产替代煤炭带来的降碳效益,又基于印染污泥处置视角对比污泥焚烧与卫生填埋的环境效益。

2 结果与讨论

2.1 污泥焚烧过程能量流特征

1 t 混合污泥所含热量的 78.1%转化为热力和

电力,其他 21.9%为能量损失(见表 6)。所产蒸汽供给印染企业,部分替代园区自备热电联产燃煤消耗,形成污泥-蒸汽/电力循环经济共生链接。

表 5 卫生填埋的物质和能量输入输出清单

Table 5 Materials and energy input and output inventory of sanitary landfill				
环节	项目	参数	单位	数值
输入	输入	市政污泥	t	1.60
		印染污泥	t	1.94
		电力	kW · h	24.80
		黏土	t	2.81
		高密度聚乙烯	kg	0.02
		无纺布	kg	1.72
		鹅卵石	t	0.81
		水泥	kg	397.84
		金属螯合剂	kg	0.06
		柴油	kg	32.38
		石灰石	kg	70.37
		硫化钠	kg	0.15
		硫代硫酸钠	kg	0.05
		水	t	0.23
填埋处理	输出	电力	kW · h	32.50
		SO ₂	kg	0.06
		NO _x	kg	2.20×10 ⁻²
		CH ₄	kg	13.40
		铬	kg	9.53×10 ⁻⁵
		铅	kg	5.98×10 ⁻⁵
		镉	kg	1.21×10 ⁻⁵
		汞	kg	1.20×10 ⁻⁹
		铜	kg	1.83×10 ⁻⁵
		锌	kg	3.60×10 ⁻⁵
		钡	kg	7.19×10 ⁻⁴
		镍	kg	3.93×10 ⁻⁴
		氩	kg	4.00×10 ⁻⁴
		渗滤液	t	2.80
渗滤液处理	输入	渗滤液	t	2.80
		聚合氯化铝	kg	0.14
		聚丙烯酰胺	kg	0.01
		电力	kW · h	2.24
输出	输出	处理出水	t	2.80

表 6 1 t 混合污泥焚烧过程能量平衡

Table 6 Energy balance for the incineration process of 1 t mixed sludge				
项目	参数	数值/kJ	占比/%	能量去向
能源输出	热力	4 288 779	55.4	企业
	电力	1 754 098	22.7	电网
能量损失	设备热损	431 469	5.6	损耗
	烟气	1 176 197	15.2	排放
	炉渣	70 995	0.9	外运
	飞灰	13 364	0.2	外运

2.2 印染污泥焚烧全过程硫、氯元素迁移特征

印染污泥焚烧过程中,污泥中的硫和氯基本转化为 SO₂ 和 HCl。基于在线监测、样品分析和物料衡算,烟气超低排放系统各工艺过程环境因子指标变化情况见表 7。

原烟气经炉内脱酸,约 75% 的 SO₂ 和 10% 的 HCl 分别转化为亚硫酸盐和氯化盐进入炉渣和烟气,进一步经炉后双塔脱酸,原烟气中约 22% 的 SO₂ 和 50% 的 HCl 进入脱硫浆液,经一系列净化后 SO₂ 和 HCl 分别降到 4.5~8.7、2.8~9.5 mg/Nm³,达到超低排放水平。NO_x 通选择性非催化还原法(SNCR)+选择性催化还原法(SCR)联合脱硝方式去除,脱硝环节喷入的氨水对 SO₂ 和 HCl 也能起到中和脱除作用。颗粒物经过布袋除尘分级脱除。

2.3 烟气超低排放 TEA

我国污泥焚烧处置技术主要有单独焚烧和协同焚烧两种^[30]。单独焚烧技术通常对高含水污泥直接焚烧或污泥先干化再焚烧,单独焚烧由于燃烧不稳定、污染物排放难以达标、处置成本高等原因发展缓慢。协同焚烧技术包括低煤炭掺烧、燃煤发电耦合焚烧、工业窑炉耦合焚烧等。本工程案例属于低煤炭掺烧技术,煤炭掺烧比例按政策要求控制在 20% 以下,属于国家鼓励的资源综合利用项目,超低排放可享受相关扶持政策产生效益^[31]。燃煤发电耦合焚烧技术是近年来发展起来的污泥焚烧技术^[32],为降低污泥掺烧对锅炉、烟气净化系统的影响,减少改造费用,通常燃煤发电耦合焚烧时污泥掺烧比例不大于 5%^[33-35],但煤炭掺烧比例远大于 20%,尚不能纳入国家相关政策支持。

根据 TEA,当污泥处置规模在 500 t/d 以下时,低煤炭掺烧项目经济性较差,可选择燃煤 CFB 机组耦合掺烧或大型燃煤(PCB)机组耦合掺烧。比较了本工程案例、燃煤 CFB 机组耦合掺烧、燃煤 PCB 机

组耦合掺烧 3 种案例的 TEA。由于印染污泥具有高硫、高氯特性,本工程案例烟气净化系统采用炉内脱酸+SNCR+SCR+活性炭吸附+布袋除尘+双塔脱酸工艺技术,总投资约 7.9 亿元,其中超低排放系统投资占比 13.9%,项目年产值超过 2 亿元(见表 8)。

2.4 印染污泥干化焚烧 LCA

运用系统扩展的 LCA 方法,本研究重点分析了工程案例污泥处置各主要工艺过程的全球变暖潜势(GWP),并与污泥卫生填埋+燃煤热电联产模式比较减碳效益。结果显示,同样处置 1 t 混合污泥(干燥基),污泥热电联产的 GWP 为 1 358 kg(以 CO₂ 当量计),而卫生填埋+燃煤热电联产生产相同热电的 GWP 为 2 005 kg,该评估策略下,本工程案例处置 1 t 混合污泥(干燥基)可减排温室气体 647 kg,具有较好的减污降碳效益。

污泥热电联产各工艺环节的 GWP 由大到小依次为:污泥焚烧(主要来源于辅助燃煤,1 279 kg)、烟气净化(69 kg)、压滤脱水(4 kg)、物料运输(4 kg)、化水处理(1 kg)、废水处理(1 kg)。

3 结 论

本研究依托 2 500 t/d 印染污泥低煤炭掺烧热电联产工程案例,针对高硫、高氯印染污泥资源化过程中能源高效转化、烟气超低排放等问题,运用 MFA、EFA、TEA 和 LCA 等方法,开展实证研究,得出以下结论:

(1) 运用 MFA、EFA 方法,定量刻画印染污泥焚烧全过程硫、氯等特征元素的迁移转化规律和能量利用效率,印染污泥干化焚烧能源利用效率达 78.1%;与污泥卫生填埋+燃煤热电联产相比,处理 1 t 混合污泥(干燥基)全生命周期可减排温室气体 647 kg,实现减污降碳。

表 7 烟气超低排放各工艺环境因子指标¹⁾
 Table 7 Environmental impact indicators in different process of the flue gas ultra-low emission system

环节	排放质量浓度/(mg/Nm ³)			
	SO ₂	NO _x	颗粒物	HCl
炉内脱酸前	8 893.4~15 854.8	10 060.3~11 703.2	24 106.1~36 949.9	442.5~1 548.8
炉内脱酸后	2 223.3~3 963.7	188.9~219.7	24 106.1~36 949.9	398.3~1 393.9
联合脱硝	2 223.3~3 963.7	36.8~42.8	24 106.1~36 949.9	309.8~1 084.2
布袋除尘	1 956.5~3 782.6	36.8~42.8	2.4~3.7	221.3~774.4
双塔脱酸	4.5~8.7	36.8~42.8	0.1~0.6	2.8~9.5
烟囱排放	4.5~8.7	36.8~42.8	0.1~0.6	2.8~9.5

注: ¹⁾ 烟囱排放为实测值,其他为理论计算值。

表 8 3 种不同污泥处置案例的 TEA 结果
Table 8 TEA results of three sludge disposal cases

项目	本工程案例		燃煤 CFB 掺烧案例		燃煤 PCB 掺烧案例	
机组规模	1×130 t/h 污泥 CFB 1×25 MW 抽凝机组		3×180 t/h 燃煤 CFB 3×15 MW 抽背机组		2×1 087 t/h 燃煤 PCB 2×330 MW 抽背机组	
污泥焚烧工况	80%污泥+20%煤		5%污泥+95%煤		5%污泥+95%煤	
设计污泥处置量/(t/d)	2 500		75		250	
超低排放工艺技术	炉内脱酸+SNCR+SCR+ 活性炭吸附+布袋除尘+双塔脱酸		SNCR+SCR+活性炭吸附+ 布袋除尘+单塔脱酸		SCR+静电除尘器+ 石灰石/石膏湿法脱硫+ 湿式电除尘器+烟气换热器(GGH)	
TEA 分析	项目整体	超低排放系统	项目整体	超低排放系统	项目整体	超低排放系统
总投资/万元	79 000	11 000	64 369	11 574	254 787	14 907
运行成本/(万元/a)	11 591	1 627	19 469	450	105 000	9 040
产值 ¹⁾ /(万元/年)	21 636		684		2 936	

注：¹⁾本工程案例产值包括污泥处置补贴、热电联产收入；燃煤 CFB 掺烧案例和燃煤 PCB 掺烧案例产值均为污泥处置补贴收入。

(2) 印染污泥热值高,干化焚烧热电联产具有较好的经济效益和降碳效益,但其高硫、高氯的特性,对烟气超低排放系统提出新的技术要求。本工程案例实践采用了炉内脱酸+SNCR+SCR+活性炭吸附+布袋除尘+双塔脱酸,SO₂、HCl 分别降到4.5~8.7、2.8~9.5 mg/Nm³,达到超低排放水平。

(3) 运用 TEA,比较了 2 种不同污泥处置技术方案,本工程案例污泥处置能力 2 500 t/d,煤炭掺烧比例控制在 20%,项目总投资 7.9 亿元,年产值达 2.16 亿元,取得较好的经济效益,对行业同类项目具有积极的借鉴启示意义。

参考文献：

[1] 制造强国战略研究项目组.面向 2035 推进制造强国建设战略研究[R].北京:中国工程院,2021.

[2] 生态环境部.2022 年中国生态环境统计年报[R].北京:生态环境部,2022.

[3] 刘添涛,林琳.印染行业水污染防治工作进展及建议[J].染整技术,2022,44(9):1-4.

[4] 王玉婷,赵泽华,王逸,等.我国典型印染行业废水处理污泥污染特征研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(12):1598-1604.

[5] 陈剑峰.印染污泥元素分析及干化焚烧方案[J].化学工程与装备,2017(9):343-346.

[6] 国家发展改革委,住房城乡建设部,生态环境部.关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见(发改环资〔2023〕1714 号)[EB/OL]. [2024-01-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923468.htm.

[7] 国家发展改革委,住房城乡建设部,生态环境部.关于印发《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》的通知(发改环资〔2022〕1453 号)[EB/OL]. [2024-01-06]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-09/28/content_5713319.htm.

[8] 中共中央,国务院.关于全面推进美丽中国建设的意见[EB/OL].[2024-01-02].https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11126/202401/content_6928805.html.

[9] 李春庚,甄新,李亚丽,等.印染废水染料降解技术研究进展[J].应用化工,2022,51(5):1439-1444.

[10] AHMAD A,MOHD SETAPAR S H,CHUONG C S,et al.Recent advances in new generation dye removal technologies: novel search for approaches to reprocess wastewater[J].RSC Advances,2015,39(5):30801-30818.

[11] 陈荣圻.活性染料染色牢度对策和固色剂的发展[J].印染助剂,2015,32(11):1-7.

[12] SABA B,KHALID A,NAZIR A,et al.Reactive black-5 azo dye treatment in suspended and attach growth sequencing batch bioreactor using different co-substrates[J].International Biodeterioration & Biodegradation,2013,85:556-562.

[13] 涂勇,田甲蕊,朱化军,等.江苏省印染污泥现状分析[J].环境科学学报,2015,35(2):527-534.

[14] 袁言言,肖军,黄瑛,等.基于 LCA 和 AHP 的污泥处理技术的综合性能评价[J].环境科学与技术,2015,38(增刊 1):263-268.

[15] ABUŞOĞLU A,ÖZAHİ E,KUTLAR A İ,et al.Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production[J].Journal of Cleaner Production,2017,142:1684-1692.

[16] YOSHIDA H,TEN HOEVE M,CHRISTENSEN T H,et al.Life cycle assessment of sewage sludge management options including long-term impacts after land application[J].Journal of Cleaner Production,2018,174:538-547.

[17] CHEN G,WANG X,LI J,et al.Environmental,energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge:a case study in China[J].Science of the Total Environment,2019,647:1433-1443.

[18] CHENG T,LUO L,YANG L,et al.Formation and emission

characteristics of ammonium sulfates aerosols in flue gas downstream of SCR[J]. *Energy Fuels*, 2019, 33(8): 7861-7868.

[19]

ZHENG L B, JIAO Y Y, ZHONG H, et al. Insight into the magnetic lime coagulation-membrane distillation process for desulfurization wastewater treatment; from pollutant removal feature to membrane fouling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 391: 122202.

[20]

蒋奕锋, 王家伟, 汪涛, 等. 1 000 MW 超低排放燃煤机组湿法脱硫和湿式电除尘运行性能及废水排放工艺研究[J]. *现代化工*, 2021, 41(增刊 1): 324-327.

[21]

YANG Z D, ZHENG C H, CHANG Q Y, et al. Fine particle migration and collection in a wet electrostatic precipitator[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, 67: 498-506.

[22]

解蕾, 姚扬, 但智钢, 等. 基于物质流和能量流分析的典型工业园区循环经济发展评价[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 609-616.

[23]

陈群, 郝俊红, 付荣桓, 等. 基于(火积)理论的热系统分析和优化的能量流法[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(7): 1376-1383.

[24]

SCHANDL H, FISCHER KOWALSKI M, WEST J, et al. Global material flows and resource productivity: forty years of evidence[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(4): 827-838.

[25]

高洋, 王帅, 程蕾, 等. 工业园区物质流管理: 内涵、方法与建议[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(12): 2417-2424.

[26]

贾秀明, 李艳萍, 史彦伟, 等. 污水厂污泥脱水系统升级改造设计与经济技术分析[J]. *工业水处理*, 2017, 37(7): 103-106.

[27]

杨儒浦, 胡松, 池寰瀛, 等. 基于 Aspen Plus 的污泥热解与混烧技术经济特性对比分析[J]. *可再生能源*, 2017, 35(6): 798-804.

[28]

张智慧, 王媛, 柴立和, 等. 城市垃圾与污水污泥能源化处置方案对比——基于两种生命周期影响评价方法[J]. *资源科学*, 2022, 44(4): 860-870.

[29]

周钢, 宋涛, 马士伟, 等. 不同污泥混燃发电工艺生命周期评价[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(11): 19-29.

[30]

李赞. 城市污泥焚烧技术研究进展[J]. *东北电力大学学报*, 2022, 42(3): 46-56.

[31]

国家发展改革委, 财政部, 税务总局. 关于印发《国家鼓励的资源综合利用认定管理办法》的通知(发改环资〔2006〕1864 号)[EB/OL]. [2024-01-06]. https://www.gov.cn/zwgk/2006-09/13/content_387619.htm.

[32]

王飞, 张盛, 王丽花. 燃煤耦合污泥焚烧发电技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(3): 82-94.

[33]

邹良栋, 吕国钧, 王飞, 等. 50 MW 燃煤机组耦合污泥焚烧发电

电的工艺研究[J]. *锅炉技术*, 2023, 54(2): 1-7.

[34]

李森. 300 MW 循环流化床锅炉耦合城市污泥焚烧研究与应用[J]. *煤炭科技*, 2020, 41(5): 91-93.

[35]

刘永利, 蒋春雷, 刘志超. 330 MW 循环流化床锅炉污泥焚烧应用探究[J]. *国网技术学院学报*, 2020, 23(6): 56-58.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2024-04-29)

(上接第 113 页)

[18]

刘红晨, 吴瑞. 海口湾海域表层沉积物石油类分布与评价[J]. *热带农业工程*, 2018, 42(5): 31-33.

[19]

陈凯. 湄洲湾海域表层沉积物石油类分布特征[J]. *福建水产*, 2009, 31(3): 27-29.

[20]

刘芳, 柯盛, 周立喜, 等. 广东雷州珍稀海洋生物国家级自然保护区水体和沉积物中石油类含量与分布特征[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(1): 69-74.

[21]

ZOPFI J, FERDELMAN T G, FOSSING H. Distribution and fate of sulfur intermediates - sulfite, tetrathionate, thiosulfate, and elemental sulfur - in marine sediments[R]. *McLean: Geological Society of America*, 2004.

[22]

鲁超, 邹凤, 徐炳旭, 等. 元素硫对海洋沉积物石油类测定的影响[R]. 上海: 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 2020.

[23]

李彦, 郭新宇, 王云涛. 中国近海海表叶绿素及环境要素的空间分布和季节变化特征[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2023, 62(3): 397-405.

[24]

焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(11): 1393-1421.

[25]

JRGENSEN B B, FINDLAY A J, PELLERIN A. The biogeochemical sulfur cycle of marine sediments[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 849.

[26]

何禄卿, 曹磊, 高光金. 矿物中微量元素硫的气相色谱测定[J]. *中南矿冶学院学报*, 1986(6): 81-85.

[27]

严莎, 高博, 罗蕾. 气相色谱-质谱法测定煤炭中单质硫的含量[J]. *分析试验室*, 2016, 35(2): 180-183.

[28]

卢芳, 王卉, 贾永刚, 等. 波浪作用下沉积物中总石油烃的迁移释放规律[J]. *海洋通报*, 2023, 42(4): 375-384.

[29]

单红仙, 王卉, 贾永刚, 等. 海洋沉积物中石油类污染物的释放研究[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(3): 481-488.

[30]

陈清, 韩龙喜, 袁玲玲, 等. 海洋沉积物中石油类污染物动态释放的实验研究[J]. *四川环境*, 2019, 38(3): 11-16.

[31]

USEPA Method 3640A, Gel-permeation cleanup[S].

[32]

USEPA Method 3660B, Sulfur cleanup[S].

[33]

ROGOWSKA J, SYCHOWSKA J, CIESZYNSKA SEME-NOWICZ M, et al. Elemental sulfur in sediments: analytical problems[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(24): 24871-24879.

编辑: 陈锡超 (收稿日期: 2023-12-29)

• 156 •