

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.010

市政污泥焚烧技术及应用研究进展

许玉卓^{1,2}, 高林霞¹, 赵智^{1,2}, 吴家豪², 金明灏², 刘欢²

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 市政污泥兼具资源与污染的双重属性,污泥焚烧技术因具有高效减量和能源回收等优势,近年来发展迅速。本文梳理了国内外污泥处理政策与技术现状,基于文献总结了污泥性质的波动特征,并探讨了焚烧技术面临的难题,包括热值低且波动大、稳定自持焚烧难,污染物排放控制难,焚烧炉结渣导致的设备维护难。进一步系统综述了污泥单独焚烧与协同焚烧技术的研究进展,重点分析了技术优势、挑战、炉型选择及示范应用,并提出未来研究重点,以期为污泥处理技术的优化提供参考。

关键词: 污泥; 焚烧; 资源化利用; 焚烧装置; 流化床

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0069-08

Research Progress on Municipal Sludge Incineration Technology and Application

XU Yuzhuo^{1,2}, GAO Linxia¹, ZHAO Zhi^{1,2}, WU Jiahao², JIN Minghao², LIU Huan²

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The municipal sludge has dual attributes as both a resource and a pollutant. Incineration technology has developed rapidly in recent years due to its advantages in efficient volume reduction and energy recovery. This paper reviews domestic and international sludge treatment policies and current technological developments, summarizes the fluctuating characteristics of sludge properties based on literature, and examines key challenges in sludge incineration, including low and variable calorific value, difficulties in achieving stable autothermal combustion, challenges in controlling pollutant emissions, and equipment maintenance issues caused by slagging in incinerators. Furthermore, it provides a systematic overview of research progress in both mono-incineration and co-incineration technologies, with a focus on technical advantages, challenges, furnace selection, and demonstration applications. Future research priorities are proposed to provide guidance for optimizing sludge treatment technologies.

Keywords: sludge; incineration; resource utilization; incinerators; fluidized bed

近年来,污泥焚烧技术研究取得了显著进展。例如,华中科技大学向军教授团队深入探讨了污泥

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2023BEB009)

通信作者: 刘欢 E-mail: huanliu@hust.edu.cn

焚烧的机理与应用前景,指出焚烧具有较高通用性,可处理不同含水率污泥,已在全球广泛应用^[1]。德国亚琛工业大学的 Schnell 等^[2]从法律层面总结了德国污泥焚烧现状,指出其污泥处置主要依赖焚烧技术,单独焚烧和协同焚烧各占 1/2。此外,捷克科学院的 Hušek 等^[3]从环境风险与原材料回收角度分析了污泥处理方法,指出流化床锅炉单独焚烧已成为稳定的处理方式,并成功应用于处理量>10万 t/a 的项目。浙江大学王飞教授团队^[4]系统回顾污泥焚烧技术的发展后,认为其在经济和环境成本方面具有显著竞争力,并指出焚烧产生的灰渣富含硅、铝氧化物,具有较高的建材应用潜力。湖南大学翟云波教授团队^[5]则强调焚烧是目前从污泥处理产物中回收磷最成熟有效的技术之一。总体而言,污泥焚烧在技术通用性、成熟度、经济与环境成本及资源能源高效回收利用方面均展现出显著优势。

为推动污泥焚烧技术发展,深入分析其技术瓶颈、明确未来研究方向至关重要。本文从政策沿革、技术演进及污泥特性的地域差异等多个角度,系统分析了污泥焚烧的现状与前景,探讨了发展过程中面临的瓶颈和关键因素,并提出了未来研究重点与发展趋势。

1 国内外政策导向

国外污泥处理政策的发展呈现明显的阶段性特征,各国虽然时间节点不同,但总体上经历了从初步探索到快速发展,最终向资源化和能源化转型的过程。例如,日本在第4个《社会基础设施发展优先计划》中提出,将污泥能源化比率从2013年的15%提高至2020年的30%。自1999年欧盟颁布《废弃物填埋指令》以来,各成员国逐步达成污泥资源化与热能回收的共识。

我国污泥处理政策制定相对滞后,于20世纪80年代开始,经历了起步、高速发展及资源化与能源化并重的转型阶段。1985年—2008年为初期阶段,主要聚焦于污泥含水率和污染物含量的限制及禁止不当弃置。此后进入高速发展期,政策法规逐步增多并完善。2009年—2014年,国家出台多项污泥处理技术标准,明确技术指标。2016年发布的《“十三五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》首次提出从“重水轻泥”向“泥水并重”转变,标志着处理政策向标准化、系统化迈进,配套政策体

系日趋完善。自2020年起,我国污泥处理政策显著增多,逐步进入资源化与能源化并重的转型阶段。2021年发布的《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》(发改环资〔2021〕827号)提出减少污泥填埋,推动资源化利用和能源回收,在大中型城市推广“生物质利用+焚烧”及“干化+土地利用”等模式,倡导焚烧灰渣建材化利用。2022年发布的《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》(发改环资〔2022〕1453号)进一步明确“以无害化为核心,资源化为导向”的目标,鼓励采用厌氧消化、好氧发酵、干化焚烧等多元化技术组合,并鼓励焚烧灰渣建材化利用。2023年发布的《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)新增低碳处理要求,提出利用垃圾焚烧厂、火力发电厂、水泥窑等设施协同焚烧污泥,同时鼓励干化与焚烧结合,推广高效节能设备及余热回收技术。这些政策标志着我国污泥处理逐步从以无害化为核心的传统模式向更加注重资源回收、能源利用及低碳处理的综合方向转变。

2 污泥处理处置技术发展

伴随上述政策的演进,污泥处理处置技术逐步形成多元化技术体系,主要包括厌氧消化-沼气利用、好氧堆肥-土地利用、热解碳化-燃料/土地利用、干化焚烧-热电/建材利用、深度脱水-应急填埋等多种路径。2014年—2019年,土地利用虽占主导地位,但市场份额下降13.2%。填埋因成本低、操作简便等优势,整体呈上升趋势,增幅超过一倍,但占比仍较低,主要用于应急处置。建材利用因成本高、适用范围有限,应用比例较低,且呈下降趋势,降幅为9.1%。其他技术市场份额较小,也呈下降趋势,降幅达40.3%。然而,随着技术的发展完善,热解、好氧发酵等工艺有望成为重要补充手段。值得关注的是,焚烧技术凭借资源化与能源化优势,市场份额从2014年的18.3%增长至2019年的26.7%,增幅达47.54%。

根据最新统计数据^[6],截至2022年,我国污泥处理项目总规模达4 851.4万 t/a,无害化处置率提升至73.5%。其中,厌氧消化(15.55%)、好氧发酵(9.61%)、干化+资源化(4.74%)、热解(2.74%)等技术总体占比仅32.64%,而焚烧技术以65.41%的市场份额成为主流处置方式。2024年,污泥焚烧规

模持续扩大,逐步形成以焚烧为主的高效资源化、能源化发展格局。

3 污泥性质波动特征

污泥性质的波动性较大,尚无统一结论。为此,本研究基于 Web of Science 和中国知识资源总库的数千篇文献,整理了污泥的工业分析及元素含量等燃料特性。

不同文献中污泥工业分析差异显著,挥发分含量为 20.0%~80.0%,灰分含量为 10.0%~80.0%,固定碳普遍低于 20.0%。其中,挥发分的中位数为 50.0%,均值为 51.5%;固定碳中位数为 5.8%,均值为 7.5%,存在较多离群点,部分文献含量超过 15.0%;灰分中位数为 42.3%,均值为 40.5%。与发达国家相比,我国污泥灰分和挥发分含量较高,固定碳含量较低,并存在地域性差异。

整理数据显示,污泥元素组成存在较大波动。C 含量为 20.0%~50.0%,O 含量为 10.0%~40.0%,H、N 和 S 含量均低于 10.0%。其中,污泥 H/C 为 0.14~0.30,与煤炭(0.2~1.0)相近。具体数据表

明,C 含量的中位数为 32.2%,均值 36.6%;H 含量的中位数和均值分别为 4.8% 和 5.5%;O 含量分别为 24.9% 和 25.0%;N 含量分别为 4.3% 和 4.4%;S 含量分别为 1.0% 和 1.8%。污泥热值范围为 8.4~18.0 MJ/kg,中位数为 14.0 MJ/kg,均值为 14.3 MJ/kg。尽管污泥热值低于褐煤(23.0~27.2 MJ/kg),但仍具备能源回收潜力。污泥热值呈现地域性特征,与固定碳含量分布相似,其中辽宁、安徽和山东等地区污泥热值较高。

污水中 70%~90% 的重金属通过沉淀或吸附作用富集于污泥中,污泥中重金属含量对其作为燃料的环境影响至关重要。焚烧过程中,重金属会富集于飞灰和废气中,对飞灰能否直接填埋起到决定性作用。因此,重金属控制也是焚烧的关键环节。

污泥中不同赋存形态重金属的占比^[7-9]如表 1 所示。重金属形态受元素特性和污泥来源影响,差异较大。相比其他重金属,Zn 和 Cd 的可还原态比例较高,表明其潜在迁移风险较大,在处理处置过程中需重点关注。

表 1 污泥中典型重金属含量及存在形态

Tab.1 Typical heavy metal contents in sludge and presence patterns

重金属	酸溶态/%	可还原态/%	可氧化态/%	残渣态/%	含量/(mg/kg)
Cu	0.03 ~ 23.16	2.16 ~ 34.42	40.71 ~ 83.09	3.57 ~ 35.00	55.0 ~ 2 867.4
Pb	0.01 ~ 3.33	11.81 ~ 74.26	4.99 ~ 43.03	13.04 ~ 89.02	9.3 ~ 370.0
Zn	4.94 ~ 58.33	23.22 ~ 81.55	0.63 ~ 12.31	2.58 ~ 25.39	42.1 ~ 3 568.3
Cr	0.20 ~ 5.13	1.93 ~ 33.00	10.48 ~ 39.14	34.61 ~ 80.03	10.6 ~ 639.0
Cd	0.61 ~ 43.07	45.21 ~ 98.16	0.27 ~ 31.65	0.13 ~ 25.26	0.4 ~ 39.9
Ni	0 ~ 70.45	7.36 ~ 39.23	2.84 ~ 19.95	3.90 ~ 55.30	13.1 ~ 495.3
As	5.67 ~ 59.30	0.87 ~ 68.59	5.78 ~ 54.80	2.44 ~ 87.68	0.9 ~ 61.8
Hg	5.71 ~ 34.09	0 ~ 21.70	3.91 ~ 47.89	23.23 ~ 65.33	0.1 ~ 15.8

4 污泥焚烧技术瓶颈及关键因素

当前污泥焚烧技术的发展面临三大技术瓶颈:①燃料热值低且波动大,稳定自持焚烧难;②污染物生成量大,排放控制难;③焚烧炉结渣,设备维护难。

4.1 自持燃烧难

影响自持焚烧的关键因素是污泥性质。不同研究对污泥自持焚烧的说法存在差异,但普遍认为污泥入炉含水率低于 45%~55% 或热值高于 4.18 MJ/kg 时,可实现自持焚烧。因此,焚烧过程中应密切监测污泥性质,确保热值处于合理范围;必要时,可添加天然气、柴油等辅助燃料,使用蒸汽辅助燃烧也是相对低成本的选择。此外,焚烧工艺和炉型

也会影响污泥自持焚烧效果,实际应用中应结合污泥性质选择合适的设备。

4.2 污染物排放较多

焚烧过程的主要污染物包括一氧化碳、氮氧化物、硫氧化物、二噁英等气态污染物及重金属。表 2 和表 3 分别总结了污泥焚烧污染物的排放控制标准、影响因素及控制方法^[10-13]。其中,表 2 中标准分别为《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009,简称 2009 国标)、《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014,简称 2014 国标)、上海《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB31/768—2013,简称上海标准)、深圳《生活垃圾处理设施运营规范》(SZDB/Z 233—2017,简称深圳

标准)、海南《生活垃圾焚烧污染控制标准》(DB46/484—2019,简称海南标准)、《燃煤锅炉协同处理固体废物污染控制标准(征求意见稿)》(简称协同处理固废标准)、《水泥工业大气污染物排放标准》(GB 4915—2013,简称水泥工业标准)、《水泥窑协同处置固体废物污染控制标准》(GB 30485—2013,简称水泥窑协同固废标准)。

焚烧温度、停留时间、污泥含水率,以及氧、硫、

氯含量显著影响气态污染物的排放,可通过烟气再循环、脱硫脱硝、除尘等措施进一步控制。重金属迁移主要受焚烧温度和停留时间影响,添加石灰石、高岭土、活性炭等吸附剂可有效减少重金属挥发,但该研究多限于实验室阶段。在工程实践中,单独焚烧可通过活性炭吸附来控制,掺烧中则普遍采用污泥掺混比例来调节,一般不超过 5%,部分示范项目可达 20%,如浙江省海宁市垃圾焚烧厂。

表 2 污泥焚烧污染控制标准、影响因素

Tab.2 Summary of pollution control standards, influencing factors for sludge incineration

污染物种类	单独焚烧	生活垃圾掺烧					燃煤锅炉掺烧	水泥窑协同焚烧		影响因素
	2009 国标	2014 国标	上海标准	深圳标准 新建	深圳标准 现有	海南标准	协同处理 固废标准	水泥工业 标准	水泥窑 协同固废标准	
颗粒物/(mg/m ³)		20 ^a	10 ^a	8 ^a	10 ^a	8 ^a		30 ^b	30 ^b	泥质、掺烧比例
总有机碳/(mg/m ³)				10 ^a	10 ^a	10 ^a			10 ^a	
CO/(mg/m ³)	150 ^b	80 ^a	50 ^a	30 ^a	50 ^a	30 ^a				氧含量、污泥含水率、焚烧温度、停留时间
NO _x /(mg/m ³)	400 ^b	250 ^a	200 ^a	80 ^a	80 ^a	120 ^a	100 ^a	400 ^b	400 ^b	
SO ₂ /(mg/m ³)	260 ^b	80 ^a	50 ^a	30 ^a	50 ^a	20 ^a	100 ^a	200 ^b	200 ^b	
HCl/(mg/m ³)	75 ^b	50 ^a	10 ^a	8 ^a	10 ^a	8 ^a	10 ^b		10 ^a	
HF/(mg/m ³)				1 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^b	5 ^a (氟化物)	1 ^a	
汞及其化合物/(mg/m ³)	0.2 ^c	0.05 ^c	0.05 ^c	0.02 ^c	0.05 ^c	0.02 ^c	0.03 ^c	0.05 ^c	0.05 ^c	温度和停留时间
镉、铊及其化合物/(mg/m ³)	0.1 ^c	0.1 ^c	0.05 ^c	0.04 ^a	0.05 ^a	0.03 ^c	0.05 ^c		1 ^c	
锑、砷、铅、铬、钴、铜、锰、镍及其化合物/(mg/m ³)	1.6 ^c	1.0 ^c	0.5 ^c	0.3 ^c	0.5 ^c	0.3 ^c	0.5 ^c		0.5 ^c	
二噁英/(ngTEQ/m ³)	1 ^c	0.1 ^c	0.1 ^c	0.05 ^c	0.05 ^c	0.05 ^c	0.1 ^c		0.1 ^c	含氧量、含硫/氯量、焚烧温度、停留时间
氨/(mg/m ³)								10 ^d	10 ^d	
总烃/(mg/m ³)							10 ^b			
烟尘/(mg/m ³)	80 ^c						30 ^c			

注: ^a为 24 h 均值, ^b为 1 h 均值, ^c为测定均值, ^d为限值。由于污泥焚烧没有专门规范规定排放指标,新建的单独焚烧项目多采用生活垃圾大气污染物排放标准,协同焚烧则采用混烧物质对应的排放标准。

表 3 污泥焚烧污染物控制方法

Tab.3 Pollutant control methods for sludge incineration

污染物	控制方法	去除效果
酸性气体	添加钙基脱硫剂	SO ₂ 的排放浓度降低 93% 以上
氮氧化物	选择性催化还原和非催化还原	去除率可达 90% 以上
	分段空气燃烧、低氧稀释燃烧	可减少 NO _x 排放
	烟气再循环	降低 10%~30% 的 NO _x 生成
重金属	添加高岭土	将 Cd 的保留率从 40.2% 提高至 74.2%
	添加 FeCl ₃ /CaO 调理剂	降低底灰中 Pb、Zn 和 Cu 的浓度,提高 Cu 和 Cr 的挥发性
二噁英	添加活性炭	提高二噁英的去除效率
	添加尿素	有效限制二噁英的形成

4.3 结渣问题

污泥中的碱金属和碱土金属易在焚烧床层内形成低熔点共晶体,导致结焦、结渣甚至流化失效,

其含量是影响结渣行为的关键因素。结渣相关反应生成的硅酸盐、硫酸盐及硅铝酸盐矿物可能导致熔融渣的形成,影响焚烧炉的运行与维护。控制相

关成分含量并优化焚烧条件是减少结渣的有效措施。研究表明,适当的添加剂可将碱金属盐包裹成高熔点物质,从而缓解低熔点盐类引发的结构问题。文献[14](西安污泥与煤混燃项目)推荐最佳掺烧比为10%,而文献[15](沈阳污泥与煤混烧项目)认为掺烧比例提高至20%时才会引起轻微结渣,这进一步反映了泥质地域性差异的影响。

5 焚烧设备及焚烧技术的发展

污泥焚烧可将有机质转化为热能,实现能源化利用。污泥焚烧方式可分为单独焚烧和与生活垃圾、煤、生物质、危险废物或其他工业固废的协同焚烧。

5.1 单独焚烧

单独焚烧适用于含水率较低或有机质含量较高的污泥,通常与干化联用以提高处理效率,最大限度实现污泥减量化。此外,单独焚烧不依赖其他产业协同,具有良好的能量回收潜力,尤其适合在土地资源有限且经济条件较好的城市大规模应用。尽管污泥性质复杂多变,但通过优化工艺和严格控制操作参数,仍可有效控制污染物排放,确保全流程符合环保标准。

5.1.1 单独焚烧技术总体发展方向

国内污泥单独焚烧技术呈现单台规模化、超低排放及流化床炉型主导的特征。焚烧项目规模已从2004年的320 t/d增至5 400 t/d,单台炉处理量提升至400~800 t/d。与此同时,烟气排放标准日益严格,部分新建项目已执行严于欧盟的排放标准。炉型逐步由多种并存向鼓泡式流化床为主导方向发展,新建项目几乎均采用该炉型。

5.1.2 单独焚烧常用炉型

污泥单独焚烧常用的炉型主要包括多膛式焚烧炉、回转窑、回旋式焚烧炉和鼓泡式流化床焚烧炉,各炉型的适用规模、特点及经济性指标存在显著差异。

多膛式焚烧炉是最早应用于污泥焚烧的炉型,适用于任意规模。其多层炉膛的设计可处理不同含水率的污泥,且便于控制炉膛温度。然而,该炉型结构复杂,内部传热板易发生堵塞,导致维护难度和保养成本增加,同时需配备二次燃烧设备以确保燃烧完全,进一步提高了投资和运行成本。1935年,美国密歇根州迪尔本的污泥焚烧项目首次采用

多膛式焚烧炉,但由于能耗高、热效率低,其实际应用效果不佳。目前该炉型已鲜有应用,相关的实际案例报道较少。

回转窑焚烧炉适用于中小型规模项目,结构简单,操作维护方便,且具有较强的污泥适应性。然而,其对污泥预处理要求较高,需配备前置干化工序,如喷雾干化或转筒干化,无法直接进料,初始投资成本略高且占地面积较大。目前,回转窑焚烧炉主要用于危险废物处置,在污泥单独焚烧领域也有少量应用。例如,安吉净源项目日处理污泥290 t(含水率80%),减量化率超过92%,投资成本约1亿元,运行成本为190.2元/t,电耗为45 kW·h/t。

回旋式焚烧炉是近年来针对中小规模项目开发的新炉型,在较高的过剩空气及机械搅拌条件下,物料与空气接触充分、燃烧速度快,其缺点在于氮氧化物排放浓度偏高。常州污泥焚烧中心采用该炉型,日处理污泥400 t(含水率80%),配有搅拌筒式、桨叶式干燥机,并回收烟气余热,整体热效率提升至70%以上。该项目投资成本约85万元/t,脱水污泥处理成本为260~290元/t,略高于回转窑焚烧炉。

对于一些大中规模、能源化利用项目,鼓泡式流化床焚烧炉适应性强且占地小,是应用最多的炉型。其床层内高温惰性床料可提供充足热量并提升传热性能,从而显著提高能源利用效率。研究^[16]表明,流化床的能源利用效率(33.84%)远高于炉排炉(20.15%),且SO₂、NO_x及重金属排放量低。该炉型的缺陷在于排尘浓度和飞灰含碳量均较高,因此需配备更高效的烟气处理系统。若采用静电除尘器、布袋除尘器和洗涤塔逐级处理烟气,则可去除95%以上的飞灰。此外,污泥中含有碱金属或碱土金属盐时,易在炉内形成低温共融体,导致床料团聚、流化失败停运等问题。仅从投资和运行成本核算,鼓泡式流化床焚烧炉的成本高于回转窑焚烧炉^[16],但综合考虑环境效益及能源产出,其仍是当前污泥单独焚烧的首选炉型,尤其适用于土地资源有限且经济条件较好的城市进行规模化应用。典型案例包括新建的上海石洞口、竹园、白龙港项目及成都污泥干化焚烧项目。其中,东莞市污泥集中处理处置项目(在建)预计处理量为5 400 t/d,总投资21.88亿元,可实现NO_x和Hg超净排放,余热回收发电量近6 000万kW·h/a。

5.2 协同焚烧

协同焚烧依托现有系统与集中治理设施,可降低投资与运行成本并实现资源回收利用。水泥窑协同焚烧可将灰渣直接用于水泥生产,污泥与煤混烧还可显著提高燃烧效率。然而,协同焚烧对污泥前处理要求较高,加入污泥后可能会增加煤粉炉结焦风险、降低传热效率或引发水冷壁爆管。同时,尾气中污染物浓度升高增加了烟气处理负荷,且污泥中的重金属和二噁英可能导致粉煤灰无法用于建材生产。

5.2.1 协同焚烧技术总体发展方向

污泥协同焚烧技术呈现规模增长、超低排放及多种炉型并存的特征。相比单独焚烧,其整体处置规模较小,但也有部分大型项目投入运行,如萧山污泥集中焚烧项目(4 000 t/d)、深圳污泥资源化利用项目(6 000 t/d)。协同焚烧规模从2011年的250 t/d增至6 000 t/d,表现出显著发展态势。目前,污泥协同焚烧对象以生活垃圾为主,同时煤粉掺烧和水泥窑协同焚烧案例逐渐增多。炉型选择与协同焚烧对象密切相关:生活垃圾多采用机械炉排炉,燃煤电厂以煤粉炉和循环流化床锅炉为主,水泥窑则多采用回转窑工艺。

5.2.2 与生活垃圾协同焚烧

生活垃圾热值较高,可克服污泥热值偏低的不足,提高焚烧温度并减少燃料需求。其低含水量有助于提升燃烧稳定性,同时垃圾焚烧产生的灰分可与污泥灰渣一并处理,简化废物处置流程。污泥与生活垃圾协同焚烧还具有显著的环保优势,可将二噁英和呋喃等气体污染物排放减少90%以上^[17],并降低碳排放量^[18]。相较于其他协同焚烧方式,该技术对污泥含水率的适应性更强,无论是高含水率污泥直接进料,还是经余热蒸汽干化后投入,或者深度脱水后均匀混合投料,均可实现稳定焚烧。然而,该技术也面临一些挑战,如飞灰作为危险废物显著提高了处置成本,且污泥与富含碱金属和碱土金属的废物混烧可能引发结渣、腐蚀及设备材料劣化等问题。掺烧比是实际运行中的关键参数,通常建议控制在10%以下,过高的掺烧比会影响热稳定性,降低系统发电量,加剧结垢和结渣,增加飞灰量,并可能导致NO_x和SO₂排放增加^[19]等问题。

炉排炉凭借在生活垃圾焚烧领域的高适用性,已成为污泥与垃圾协同焚烧的主流炉型。炉排

炉适用于大规模处理,单台炉最大处理能力可达到1 100 t/d。相比之下,流化床炉因飞灰量较大等问题其市场份额逐步下降。小涧西生活垃圾焚烧二期项目采用3台单炉处理能力为825 t/d的机械炉排炉,每年协同处理市政污泥18.25万t,节约标煤12.39万t/a,上网电量约3亿kW·h/a,碳减排超过80万t/a,实现了资源利用、能源回收和碳减排的综合效益。

5.2.3 水泥窑掺烧

水泥窑运行温度高达1 400℃,污泥中的无机成分(如硅、铝和铁)可与水泥原料反应形成硅酸盐矿物(C₃S和C₂S),直接用于水泥生产,实现资源化利用。水泥窑协同焚烧在环保方面也具有显著优势,不仅可显著减少二噁英和NO_x的排放量,还能将重金属整合到水泥硅铝酸盐晶格中形成稳定的化合物,降低浸出毒性。强氧化条件和碱性气氛还有助于吸收废气中的酸性气体和微量元素,进一步减少污染物排放量。此外,污泥中的有机组分可替代部分传统燃料,推动水泥行业节能减碳。然而,掺烧污泥也增加了污染物处置流程和成本,并可能释放持久性有机污染物前体,增加环境风险。为平衡经济效益与环境风险,污泥掺烧比例通常控制在3%~5%,达到规范上限8%时需配套预干化设备。与其他协同焚烧方式相比,水泥窑能够适应多种无机添加剂(如石灰、粉煤灰)的使用,尤其适合处理经深度脱水后掺入无机添加剂的污泥。

水泥窑主要采用回转式炉型,其在能源需求、生命周期成本和环境负荷等方面表现优异^[20]。以华新水泥为例,自2009年起,该公司就开始利用水泥窑协同处置污泥,截至2020年,累计处置污泥300万t。该公司黄石项目日处理脱水污泥100t,掺烧熟料持续用于高速公路路基材料制备。

5.2.4 与煤粉掺烧

污泥与煤粉掺烧具有一定的环保效益,掺烧10%的污泥可有效减少CO₂和CO的排放量^[21],且污泥中的含Ca物质(主要为CaCO₃)可显著抑制SO₂的释放。但污泥的高含水率和低热值会使锅炉温度下降,燃烧效率降低。因此,相较于生活垃圾,燃煤电厂对污泥掺烧比例的要求更为严格,通常限制在10%以下,甚至5%以内。在掺烧比例不超过10%时,锅炉运行稳定性、粉煤灰与炉渣质量、污染物排放及经济成本均可保持在合理范围内。随着掺烧

比例的增加,烟气温度下降、着火距离延长,炭化燃尽率及 NO_x 排放逐渐恶化。

燃煤电厂的主流炉型包括煤粉炉和循环流化床锅炉,二者各有优势。煤粉炉燃烧效率高,煤粉流动性良好,处理规模大,电耗也相对较低。相比之下,循环流化床锅炉因配备大量的床料和浇注料,具有较好的热惯性和蓄热能力,燃料适应性强,负荷调节范围广,但处理规模较小,单位能耗较高。据统计^[22],煤粉炉掺烧污泥,要求含水率 $\leq 40\%$ 、掺烧比例 $\leq 5\%$;循环流化床掺烧污泥,要求含水率 $\leq 80\%$ 、掺烧比例 $\leq 10\%$ 。例如,浙能嘉兴电厂三期项目采用煤粉炉协同焚烧,污泥掺烧比例为 $2\%\sim 3\%$,干化热源由辅助蒸汽提供,年处理污泥8.3万t,处置成本仅160元/t,累计发电量超2 500亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。萧山污泥集中焚烧项目(4 000 t/d)采用循环流化床锅炉,掺烧比例为 10% ,锅炉热效率为 77.8% ,处置成本约300元/t,截至2020年底,累计发电4.45亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

5.2.5 与生物质或危废协同焚烧

生物质燃料供应呈现季节性特征,独立运行的生物质电厂较少,因此生物质掺烧污泥技术多停留在实验阶段,实际推广有限。江苏徐矿综合利用发电有限公司项目是为数不多的工程案例之一,该厂将生物质、污泥和煤泥按体积比 $1:1:1$ 混合,日掺污泥量为100 t。污泥与危险废物的协同焚烧工程也相对较少,多用于处理重金属含量较高的污泥(如电镀污泥)或属于危废类别的含油污泥。

6 结语

① 针对污泥焚烧过程中存在的泥质波动较大和稳定自持焚烧难度较高的问题,亟须因地制宜采取措施,必要时进行碳源补充或灰分去除。同时探索与其他燃料的掺烧策略,以解决广东、湖北、湖南、北京、江苏等地区污泥热值低的问题。

② 在污染物控制方面,除了研究经济有效的处理方法外,结合大数据与智能化技术实现数字化控制将成为未来发展的重要方向。通过智能化、针对性的运维调控,可实现对污染物的局部精准控制,推动节能减排。建立基于大数据分析的决策支持系统,将显著提升污泥焚烧项目的管理水平和环境绩效。

③ 针对结渣问题,应根据地域特征识别容易

发生严重结渣的地区,并采取相应的系统优化或工艺替换措施进行处理。通过对结渣风险的预测与评估,可以提前识别潜在问题,实现适配优化。

参考文献:

- [1] SYED-HASSAN S S A, WANG Y, HU S, et al. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: fundamentals, challenges and considerations [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 888-913.
- [2] SCHNELL M, HORST T, QUICKER P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110367.
- [3] HUŠEK M, MOŠKO J, POHOŘELÝ M. Sewage sludge treatment methods and P-recovery possibilities: current state-of-the-art [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 315: 115090.
- [4] ZHANG S, WANG F, MEI Z, et al. Status and development of sludge incineration in China [J]. Waste and Biomass Valorization, 2021, 12: 3541-3574.
- [5] ZHU Y, ZHAI Y B, LI S H, et al. Thermal treatment of sewage sludge: a comparative review of the conversion principle, recovery methods and bioavailability-predicting of phosphorus [J]. Chemosphere, 2022, 291: 133053.
- [6] 柴宝华,李文涛,亓伟,等.我国市政污泥处理处置现状研究[J]. 新能源进展, 2023, 11(1): 38-44.
CHAI B H, LI W T, QI W, et al. Status of municipal sludge treatment and disposal in China [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11(1): 38-44 (in Chinese).
- [7] 耿源濛,张传兵,张勇,等.我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4834-4843.
GENG Y M, ZHANG C B, ZHANG Y, et al. Speciation and ecological risk assessment of heavy metal(loid)s in the municipal sewage sludge of China [J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4834-4843 (in Chinese).
- [8] TANG J, TANG H J, SIMA W P, et al. Physicochemical properties and heavy metal pollution characteristics and correlation analysis of sludge landfill [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2023, 103(17): 5815-5824.
- [9] USHARANI B, VASUDEVAN N. Eco-friendly

- approach for leaching out heavy metals from sewage sludge [J]. *Chemistry and Ecology*, 2016, 32 (6) : 507-519.
- [10] KOSOWSKA-GOLACHOWSKA M, LUCKOS A, KIJO-KLECZKOWSKA A, et al. Gaseous emissions during oxy-fuel combustion of sewage sludge in a circulating fluidized bed [J]. *Powder Technology*, 2020, 371: 209-216.
- [11] SUNG J H, BACK S K, JEONG B M, et al. Oxy-fuel co-combustion of sewage sludge and wood pellets with flue gas recirculation in a circulating fluidized bed [J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 172:79-85.
- [12] ZHONG Z P, LI J F, MA Y Y, et al. The adsorption mechanism of heavy metals from coal combustion by modified kaolin: experimental and theoretical studies [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 418: 126256.
- [13] ZHA J R, HUANG Y J, CLOUGH P T, et al. Desulfurization using limestone during sludge incineration in a fluidized bed furnace: increased risk of particulate matter and heavy metal emissions [J]. *Fuel*, 2020, 273: 117614.
- [14] 修浩然, 王云刚, 白彦渊, 等. 准东煤/市政污泥混燃燃烧特性及灰熔融行为分析 [J]. *化工进展*, 2023, 42 (6): 3242-3252.
- XIU H R, WANG Y G, BAI Y Y, et al. A combustion characteristics and ash melting behavior of Zhundong coal/municipal sludge blended combustion [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42 (6): 3242-3252(in Chinese).
- [15] 魏砾宏, 马婷婷, 杨天华, 等. 污泥/煤混烧灰的结渣特性及矿物质转变规律 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(18):4697-4702.
- WEI L H, MA T T, YANG T H, et al. Slagging characteristics and minerals conversion of co-firing ash of coal and sludge at high temperature [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2015, 35(18):4697-4702(in Chinese).
- [16] HAO X D, CHEN Q, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Sustainable disposal of excess sludge: incineration without anaerobic digestion [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115298.
- [17] CONESA J A. Sewage sludge as inhibitor of the formation of persistent organic pollutants during incineration [J]. *Sustainability*, 2021, 13(19):10935.
- [18] ZHANG X, CHEN X, XIAO J, et al. Comparative study of different sewage sludge incineration treatments based on environmental and economic life cycle assessment [J]. *Waste Management & Research*, 2023, 42(5):418-429.
- [19] ZHUO X H, LI M, CHENG Q, et al. Experimental studies on the combustion characteristics of multisource organic solid waste for collaborative disposal using municipal solid waste incinerators [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(2): 2911-2919.
- [20] XIAO H P, LI K, ZHANG D Q, et al. Environmental, energy, and economic impact assessment of sludge management alternatives based on incineration [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115848.
- [21] 李春建, 段小云, 曾澄光, 等. 煤掺混污泥的燃烧特性及排放规律 [J]. *工业炉*, 2022, 44(3):20-25.
- LI C J, DUAN X Y, ZENG C G, et al. Combustion characteristics and emission law of coal mixed sludge [J]. *Industrial Furnace*, 2022, 44 (3) : 20-25 (in Chinese).
- [22] 孟春霖, 颜莹莹, 梁远, 等. 关于污泥火电厂协同焚烧的控制性指标的思考和建议 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(14):46-55.
- MENG C L, YAN Y Y, LIANG Y, et al. Thinking and suggestion on the control index of sludge co-incineration in thermal power plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(14):46-55(in Chinese).

作者简介: 许玉卓(2000—), 女, 湖北随州人, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥处理处置、碳排放与生命周期评价。

E-mail: 1196283980@qq.com

收稿日期: 2024-12-13

修回日期: 2025-01-15

(编辑: 丁彩娟)