

燃煤耦合污泥焚烧发电技术研究进展

王 飞¹, 张 盛¹, 王丽花²

(1. 浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘要: 焚烧法作为实现我国污泥快速减量化、无害化处置的主流方式得到广泛应用,而在“双碳”减排目标的推动下,燃煤耦合污泥焚烧发电技术能有效实现燃煤低碳减排和污泥清洁焚烧处置。然而,现阶段燃煤耦合污泥焚烧发电技术在锅炉结焦结渣、燃烧污染物排放和技术经济性等方面仍存在较多问题。总结了污泥基本理化性质、水分赋存形态、煤质指标和不同干化技术,对比分析了湿污泥直接掺烧、烟气直接干化污泥后掺烧和饱和蒸气间接干化污泥后掺烧这 3 种技术路线的优缺点,并结合我国燃煤耦合污泥发电典型工程项目的技术参数进行深入分析。实践表明,湿污泥直接掺烧存在燃烧工况稳定性差、处置量低等问题,而“干化+掺烧”技术路线能在保证燃烧热稳定性的基础上实现较大的污泥处置量。考虑到烟气直接干化污泥存在粉尘爆炸风险高、烟气量需求大等问题,利用饱和蒸气间接干化污泥后掺烧燃烧效果较好。在污泥间接干化技术中,桨叶式干化和圆盘式干化热效率高、粉尘产生量低、占地面积小。由于污泥干化过程中存在黏滞性,需选取合适的干化模型对传热传质过程进行分析。我国燃煤耦合污泥发电典型工程项目运行实践表明,污泥掺烧比例控制在较佳范围时,既能保证燃煤机组燃烧热效率,又能满足常规污染物、重金属和二噁英等污染物的排放标准。在国家政策层面,亟需对燃煤耦合污泥焚烧发电技术污染物排放标准、发电补贴标准和碳减排核算标准等相关政策加以明确和细化,大力推动该技术的发展。

关键词: 燃煤机组; 污泥; 掺烧; 燃煤耦合; 干化技术; 燃煤污染物

中图分类号: TQ426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2022)03-0082-13

Research progress of coal-fired coupled sludge incineration power generation technology

WANG Fei¹, ZHANG Sheng¹, WANG Lihua²

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Shanghai Chengtong Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Incineration is widely used as the mainstream way to achieve the rapid reduction and harmless disposal of sludge in China, and with the aim of "double carbon" emission reduction plan, co-combustion of sludge with coal can realize the carbon emission reduction and the clean incineration of sludge. However, there are still many problems in slagging, combustion pollutant emission and technical economy. The basic physical and chemical characteristics, water content distribution, coal quality index, and drying technologies of sludge were analyzed. The advantages and disadvantages of three technical routes of co-combustion of sludge with coal, i.e., direct co-combustion, co-combustion of sludge dried directly by flue gas, and co-combustion of sludge dried indirectly by steam, were thoroughly analyzed based on the typical co-combustion projects. The results show that direct co-combustion of wet sludge is faced with poor combustion stability and low disposal capacity, and the combination of drying and co-combustion can achieve a large disposal capacity and ensure the combustion stability. Considering the problems of high dust explosion risk and large demand for flue gas in the direct drying of sludge by flue gas, co-combustion of sludge dried indirectly by steam is a better choice with good combustion performance. Among sludge indirect-drying technologies, paddle drying and rotary disc drying have high thermal efficiency, low dust production, and small floor area. Due to the exist-

收稿日期: 2022-01-10; **责任编辑:** 白娅娜 **DOI:** 10.13226/j.issn.1006-6772.CC22011001

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1907000); 国家自然科学基金资助项目(51976188); 浙江省科技计划资助项目(2021C03162, 2022C03092); 宁波市科技创新 2025 重大专项资助项目(2018B10023)

作者简介: 王 飞(1972—), 男, 四川泸州人, 教授, 博士。E-mail: wangfei@zju.edu.cn

引用格式: 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.

WANG Fei, ZHANG Sheng, WANG Lihua. Research progress of coal-fired coupled sludge incineration power generation technology[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 82-94.



移动阅读

ence of viscosity during sludge drying, it is necessary to select an appropriate drying model to analyze the heat and mass transfer process. Based on the operation practice of typical co-combustion projects in China, it is found that when the blending ratio of sludge is well controlled, co-combustion technology can not only ensure high combustion thermal efficiency, but also meet the emission standards of pollutants including conventional pollutants, heavy metals and dioxins. In terms of national policy, it is urgent to clarify and refine corresponding policies, e.g., the pollutant emission standard, power generation subsidy standard, and carbon emission reduction accounting standard, to promote the development of co-combustion of sludge with coal.

Key words: coal fired unit; sludge; mixed burning; coal combustion coupled; drying technology; coal combustion pollution

0 引 言

根据《国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》中规划布局,我国将在“十四五”时期严格合理控制煤炭消费增长、加快煤炭减量步伐,到 2025 年,非化石能源消费比重达 20% 左右,单位国内生产总值能源消耗比 2020 年下降 13.5%,单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2020 年下降 18%,为实现碳达峰奠定坚实基础^[1]。在我国现阶段以火力发电为主体的能源结构框架中,煤电产生的碳排放是能源消费的最大碳排放来源。因此,在应对全球气候变化和实现自身经济发展的双重目标下,针对燃煤火力发电领域的碳减排技术研究对我国生态文明建设意义重大。我国燃煤发电减排工艺技术路线主要包括以下 3 方面:煤电升级减排改造技术、燃煤机组耦合有机固废焚烧技术、煤电碳捕集利用和封存 (CCUS) 技术。现阶段煤电的碳排放水平约 875 g/kWh,即使通过对现有煤电机组进行技术升级提高燃烧热效率(如两次再热技术)可降低至约 670 g/kWh,其排放指标离国际标准(100 g/kWh)仍有较大差距^[2]。CCUS 技术虽能实现煤电的近零排放,但面临成本高、能耗高、占地大和灵活性差等问题,离大规模工业化利用尚有一定距离^[3]。而燃煤机组耦合有机固体废物(如污泥、生物质和垃圾等)焚烧发电技术能充分利用已有烟气净化设备、降低燃烧设备投资,是适用于我国煤电机组低碳发展现状的优选方案。

近年来我国城市污水处理能力快速提升,污泥作为污水处理副产物,产量也大幅上升。到 2020 年底,我国城市、县城两级共有 4 326 座污水处理厂,污水处理能力达到 2.304 亿 m³/a,干污泥产量约 1 400 万 t^[4]。污泥含有大量的病原微生物、有机污染物、重金属和恶臭气体,但其有机质质量分数高达 30%~40%,干化后可燃性较好,具有废弃物和生物质资源双重属性。国家能源局于 2017 年发布的《关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知》中,提出“优先选取热电联产煤电机组,布局燃煤耦

合垃圾及污泥发电技改项目”,并于 2018 年批准了 29 个污泥耦合发电示范项目^[5]。我国燃煤耦合污泥焚烧发电技术已取得一定进展,如通过现场掺烧试验结合数值模拟结果发现,污泥掺烧比小于 20% 时,NO_x 排放特性和炉膛燃烧特性与单煤燃烧时无明显差异^[6];针对某 2×300 MW 热电联产燃煤机组耦合污泥发电技术改造项目,发现干化污泥质量掺混比低于 6% 时,锅炉热效率未发生明显变化,二噁英、酸性气体、烟尘等气体污染物满足相关排放标准^[7]。我国燃煤耦合污泥焚烧发电技术主要包括直接掺烧和干化后掺烧 2 种工艺路线,主要应用于流化床和煤粉炉这 2 种燃烧炉型中。借助现役燃煤发电机组的焚烧处置能力,燃煤耦合污泥焚烧发电技术既能通过提高非化石燃料比例实现低碳减排,又能借助高效成套的焚烧系统和烟气处理系统实现高效燃烧和污染物无害化处置,因而具有广阔的发展前景。

1 污泥主要理化性质、燃烧特性及干化技术

1.1 污泥主要燃料指标、元素组成及燃烧特性

我国污泥具有含沙量高、成分复杂等特点,导致其与煤的燃烧性能有较大差异,掌握 2 者区别有助于为燃煤耦合污泥焚烧发电机组的设计、运行和优化提供指导。我国不同类型污泥与典型煤种的工业和元素分析对比见表 1,发现污泥的低位热值远低于烟煤,但与褐煤相当,说明其作为燃煤机组替代燃料的可行性;干化污泥中挥发分、硫含量较高,而固定碳含量较低。我国污泥和煤的燃烧特征参数对比见表 2,发现污泥的燃烧特性参数与常见煤种有较大差异。污泥着火温度一般低于煤,而高灰分导致其总失重率也远低于煤;污泥的着火稳定性指数高于煤,这主要是由于污泥燃烧以有机物分解和挥发分燃烧为主,而污泥的综合燃烧特性指数低于煤,说明其整体燃烧性不及常规烟煤。

我国污泥与煤的灰成分对比见表 3,可知污泥中 SiO₂ 含量较高,这主要是由于污泥中泥沙较多,

表1 我国不同类型污泥和典型煤种的工业分析和元素分析对比

Table 1 Comparison of proximate and ultimate analysis of various types of sludge and typical coals in China

燃料 类型	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,d}}/$ (MJ·kg ⁻¹)	参考文献
	M_{ar}	A_{d}	V_{d}	FC_{d}	C_{d}	H_{d}	O_{d}	N_{d}	S_{d}		
市政 污泥	78.16	54.75	39.13	6.12	25.18	3.88	9.29	2.56	1.59	10.45	[8]
	78.70	52.86	44.62	2.52	26.05	4.19	11.10	2.83	3.09	10.84	[8]
	—	45.91	51.64	2.45	25.53	4.17	70.57	4.76	0.78	9.81	[9]
	8.15	50.39	44.86	4.76	25.35	4.32	15.24	4.02	0.69	8.19	[10]
	84.74	58.46	35.53	6.01	17.85	4.04	—	2.26	0.85	8.62	[11]
	81.20	43.46	45.84	10.70	32.08	3.82	—	2.54	1.91	12.10	[11]
印染 污泥	—	20.21	79.64	0.15	43.37	3.35	32.20	0.03	0.84	13.48	[12]
	72.74	67.86	32.02	0.12	15.42	3.08	7.91	0.98	4.75	5.86	[8]
褐煤	50.00	6.10	59.04	34.86	25.28	2.22	9.80	0.24	0.26	8.83	[13]
烟煤	7.18	14.02	29.33	56.65	68.70	3.94	—	1.11	—	25.37	[14]
准东煤	25.40	12.96	32.26	54.78	64.15	4.24	15.82	1.58	1.23	23.53	[15]

表2 我国污泥和煤的燃烧特征参数对比^[16]Table 2 Comparison of combustion characteristic parameters of sludges and coals in China^[16]

燃烧特征参数	烟煤	1号污泥	2号污泥	3号污泥
最大燃烧速率/(mg·min ⁻¹)	1.385	1.028	0.648	0.750
着火温度/℃	433.1	234.4	263.4	244.4
燃尽温度/℃	662.1	605.7	739.5	605.9
平均燃烧速率/(mg·min ⁻¹)	0.27	0.16	0.14	0.14
总失重率/%	87.8	45.7	44.6	44.5
着火稳定性指数/(10 ⁻⁵ mg ² ·(K ² ·min) ⁻¹)	1.927	4.894	3.192	3.270
综合燃烧性能指数/(10 ⁻¹⁰ mg ² ·(K ³ ·min ²) ⁻¹)	8.020	7.119	3.052	4.375

其次是 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃, 这归因于污泥脱水过程中加入的聚合氯化铝、聚合硫酸铁等絮凝剂^[22-23]。另

外, 污泥中硫含量一般高于煤, 掺烧过程中需注意 SO₂ 等酸性气体排放。

表3 我国污泥和典型煤种的灰成分组成对比(XRF分析)

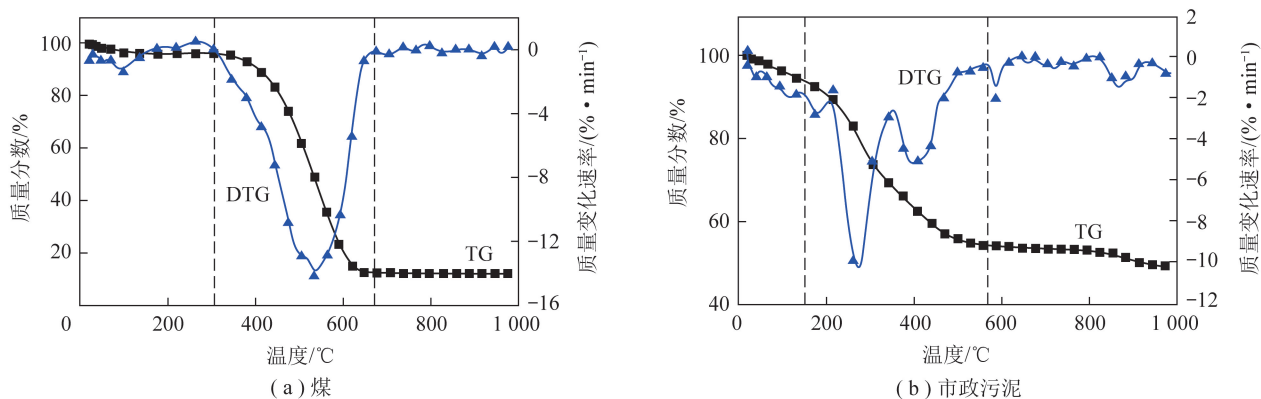
Table 3 Comparison of main elemental compositions between sludge ash and typical coal ash in China (based on XRF analysis)

项目	质量分数/%										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	Cl
市政污泥 ^[17]	52.77	22.31	9.65	6.22	3.21	2.77	1.19	0.70	0.43	0.13	0.02
市政污泥 ^[18]	26.71	31.74	16.96	6.80	0.69	13.08	1.08	0.45	2.27	0.47	0.10
市政污泥 ^[19]	44.04	12.59	8.27	14.55	3.42	8.31	—	1.68	4.77	—	—
市政污泥 ^[20]	41.47	15.95	0.13	3.53	1.58	1.23	1.79	—	0.85	0.58	—
典型煤种 ^[21]	8.47	5.89	0.09	4.85	0.19	1.21	0.22	0.33	—	0.16	—

某市政污泥与煤的热失重特性对比如图1所示, 可知污泥燃烧分为3个阶段, 分别为水分蒸发(20~180℃)、挥发分析出和燃烧(180~550℃)以及碳酸盐分解(550~1000℃)。污泥在第2阶段存在多个失重峰, 而煤在300~680℃内存在1个主失重峰(峰值温度540℃), 说明污泥的主要失重温度区间低于煤, 且燃烧反应过程更加复杂^[24]。

1.2 污泥水分赋存形态

污泥燃烧最大难点在于其含水率高, 经过机械脱水后含水率仍高达80%左右, 这是由于污泥中水分赋存形式复杂。根据污泥水分与污泥颗粒的结合方式, 污泥水分主要分为四大类, 即自由水、间隙水、表面结合水和分子结合水。污泥中不同类型的水分与固体污泥颗粒的结合能不同, 而结合能越大, 水分

图1 污泥和煤在30 °C/min升温速率下热失重曲线对比^[24]Fig.1 Comparison of thermogravimetric curves of sludge and coal at 30 °C/min^[24]

蒸发所需能量越高,一般情况下这4种水分与颗粒结合能大小排序为:内部结合水>表面结合水>间隙水>自由水。其中自由水和部分间隙水易通过机械脱水脱除,而表面结合水和内部结合水则难以通过机械脱水脱除。通过热干燥法测定的不同种类机械

脱水污泥的水分分布^[8]见表4,可知机械脱水污泥中水分主要由间隙水和表面结合水组成,分子结合水占比小于5%,部分污泥样品表面结合水占比高达40.73%,说明机械脱水后仍需进一步深度脱水才能降低其含水率。

表4 机械脱水后污泥的水分分布^[8]Table 4 Water distribution in sludge after mechanical dewatering^[8]

污泥	机械脱水后 含水率/%	自由水 质量分数/ (kg·kg ⁻¹)	间隙水		表面结合水		内部结合水	
			质量分数/ (kg·kg ⁻¹)	比例/%	质量分数/ (kg·kg ⁻¹)	比例/%	质量分数/ (kg·kg ⁻¹)	比例/%
1号	78.16	0	2.062	56.90	1.476	40.73	0.086	2.37
2号	72.74	0	1.563	58.58	1.046	39.21	0.059	2.21
3号	74.64	0	1.916	61.43	1.141	36.58	0.062	1.99
4号	80.99	0	3.133	73.54	1.077	25.27	0.051	1.19

绝大多数脱水污泥含水率在80%左右,而脱水污泥直接掺烧会大幅降低炉膛的理论燃烧温度、增大烟气中水蒸气含量,进而影响炉膛内燃烧热稳定性。而污泥干化技术通过水分蒸发和扩散过程,将低热值污泥转变为高热值燃料,实现污泥的减量化,有利于污泥的存储和运输。因此,在入炉燃烧前一般需对污泥进行干化处理,使其含水率降至50%以下,将污泥从泥状黏稠态转化为粉末或颗粒态,而我国现役大部分燃煤耦合污泥焚烧发电机组也多采用“干化+焚烧”的工艺路线。

1.3 污泥干化技术

污泥干化技术按照热介质与污泥的接触方式,主要包括3种工艺类型:直接干化、间接干化和直接-间接联合干化。直接干化技术包括回转式干化、喷雾式干化、输送带式干化和旋流闪蒸式干化等;间接干化技术包括薄膜式干化、圆盘式干化、卧式转盘式干化和桨叶式干化等;直接-间接联合干化包括流化床污泥干化、混合带式干化等。直接干

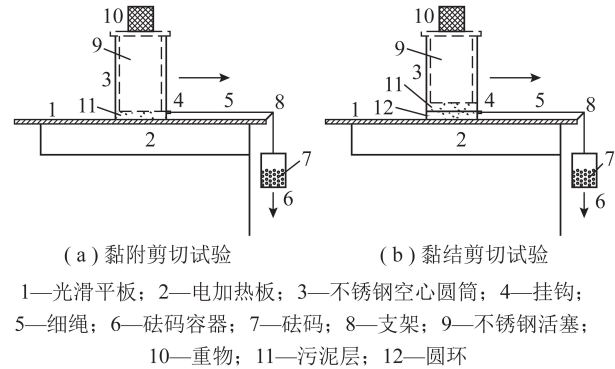
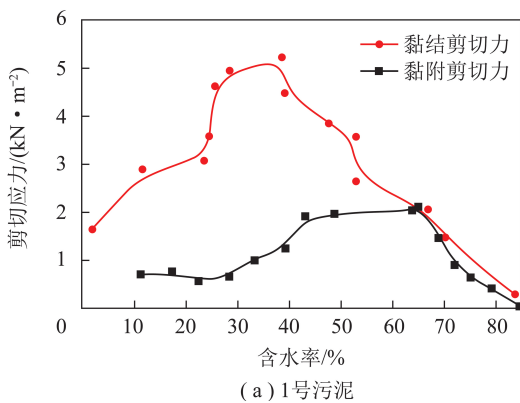
化技术虽然干化效率高,但存在烟尘爆炸、烟气量过大和干化烟气污染等问题^[25];而直接-间接联合干化技术发源于日本和德国,存在安全性低、经济性差和设备占地大等问题,在我国实际应用较少。《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南》中提出推荐采用间接干化的方式^[26],而间接干化具有设备结构紧凑、热量利用率高、烟气量小、物料适应性好等优点。因此,带式干化、桨叶式干化和圆盘式干化等间接干化技术在我国污泥干化领域占主流^[25]。我国主要间接式干化技术工艺特点对比^[27]见表5,可知桨叶式干化和圆盘式干化技术有较高的热效率和较低的热量消耗,其粉尘和臭气产生量也较少。

污泥热干化过程中的黏附和黏结特性会对干化效率和换热系数产生重要影响,而污泥含水率在干化过程中降至一定区间时,会黏附在间接干化器表面,严重降低换热系数和干化效率,这一含水率区间也称为污泥干化黏滞区。影响污泥黏滞性的直接原因是含水率,根本原因是污泥理化成分,主要包括无

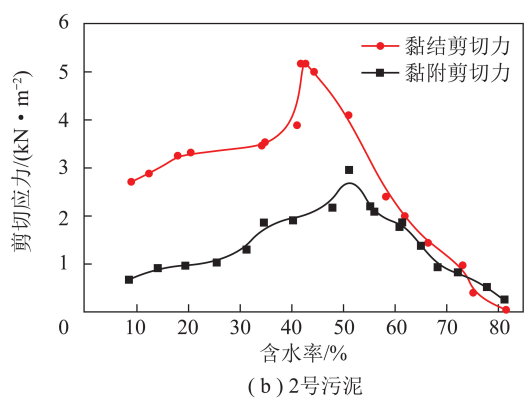
表5 我国主要污泥干化技术工艺特点对比^[26-27]Table 5 Comparison of characteristics of main sludge drying technologies in China^[26-27]

项目	带式干化	桨叶式干化	圆盘式干化	流化床干化
热载体类型	热烟气或热空气	导热油或饱和水蒸气	导热油或饱和水蒸气	热空气、导热油或饱和水蒸气
热载体温度/℃	250左右	180~220	180~220	180~220
干化类型	半干化或全干化	半干化或全干化	全干化	半干化或全干化
污泥黏结性	差	优	差	良
干污泥形态	不全是粒状	粒状	粒状	不全是粒状
粉尘量	中	小	小	中
臭气量	大	小	小	中
热效率/%	60~70	80~90	80~90	60~70
热量消耗/(kJ·kg ⁻¹)	3 177	2 876	2 876	3 010
占地面积	大	小	小	中

机质、胶体物质、有机质(多糖、蛋白质等)、细颗粒等。污泥干化过程中剪切试验原理^[28-29]如图2所示,利用剪切试验装置测试不同含水率下污泥的剪切应力。

图2 干化过程剪切试验装置^[28-29]Fig.2 Schematic diagram of the sludge shear test during drying^[28-29]

(a) 1号污泥



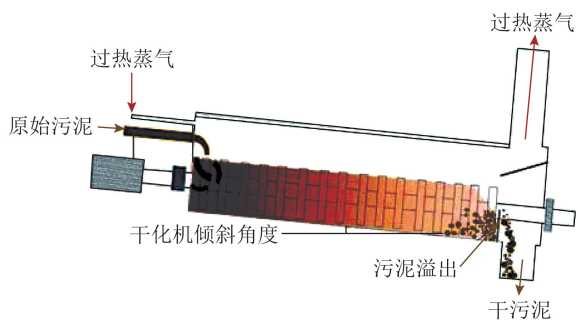
(b) 2号污泥

图3 污泥干化过程中黏性特性^[29]Fig.3 Viscous properties of sludge during the drying^[29]

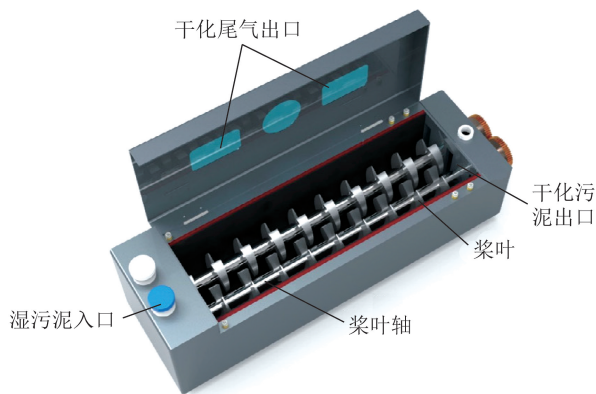
污泥间接干化工艺是一个连续而复杂的传热传质过程,而以桨叶式干化机为例,已有大量文献研究桨叶式干化机的热干化动力学、干化热传递效率和干化模型^[35-37]。干化模型的准确度对于干化机结构参数放大设计及工业化应用意义重大。现阶段间

接式干化传热传质模型主要包括渗透模型、孔隙网络模型、种群平衡模型和离散单元模型^[38-39],而 Markov 链模型通常被用于桨叶式干化机的流动模型^[40]。桨叶式干化机原理及 Markov 链模型如图4所示,其中, x 、 y 分别为异轴前进系数和同轴前进

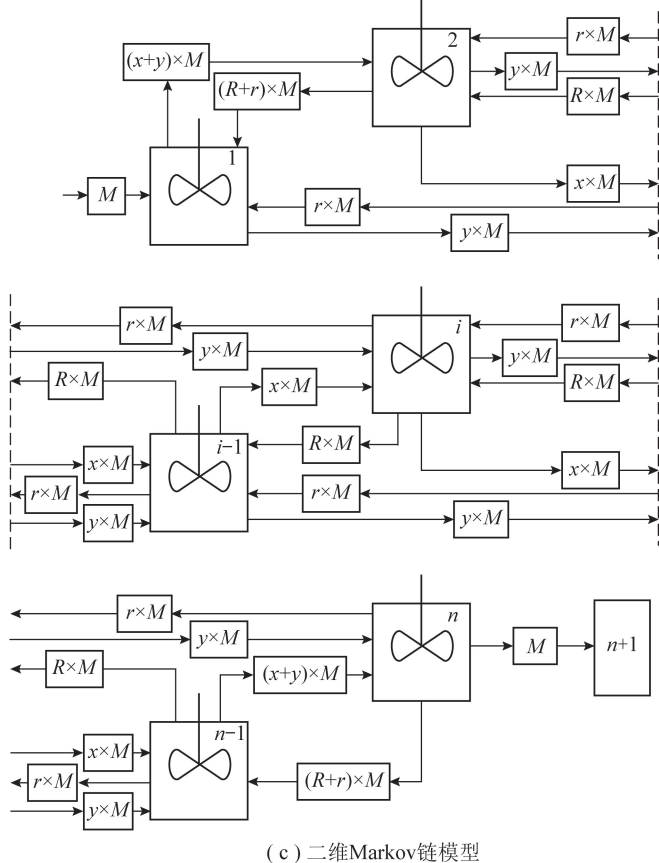
系数; R 、 r 分别为异轴返混系数和同轴返混系数; M 为干污泥质量流量; n 为总桨叶数; i 为第 i 个桨叶数。



(a) 桨叶式干化试验台



(b) 桨叶式干化机结构



(c) 二维Markov链模型

图 4 桨叶式干化机结构原理图及二维 Markov 链模型^[41-42]

Fig.4 Lab-scale paddle dryer device and two-dimensional Markov chain model^[41-42]

2 燃煤耦合发电工艺

我国现役燃煤机组耦合污泥焚烧发电技术主要包括 3 种技术路线,即湿污泥直接掺烧、烟气直接干化污泥后掺烧和饱和蒸气间接干化污泥后掺烧,而燃煤锅炉的类型也包括流化床和煤粉炉 2 种。

2.1 耦合焚烧工艺路线发电技术对比

某湿污泥直接掺混耦合焚烧工艺路线如图 5 所示^[43]。污泥通过螺杆给料机、柱塞泵加压送至给料机送至 CFB 炉膛内燃烧。燃烧烟气依次通过旋风除尘器、高低温换热面和空气预热器,经过活性炭吸附、布袋除尘器、湿法洗涤等烟气净化设备达到排放标准后从烟囱中排出。湿污泥直接掺烧耦合焚烧技术具有设备简单、建设周期短、投资周期相对较短和运行维护费用少等优点,一般适用于污泥掺烧量较小的流化床锅炉。虽然湿污泥直接掺烧避免了污泥干化产生恶臭气体的问题,但高水分污泥直接入炉焚烧可能造成炉膛内燃烧不稳定、燃料燃烧热效率下降以及烟气中水分上升等问题。我国早期出现了一些采用流化床燃煤锅炉直接掺烧少量湿污泥的案

而通过试验与模型模拟结果的对比分析发现 Markov 链模型能较好地模拟并预测污泥的干燥过程^[41-42]。

例,但实际运行中也存在污泥水分过大导致贴壁黏连、破碎机堵塞、锅炉排渣困难等问题,难以提高污泥处置量,甚至导致运行困难^[16]。

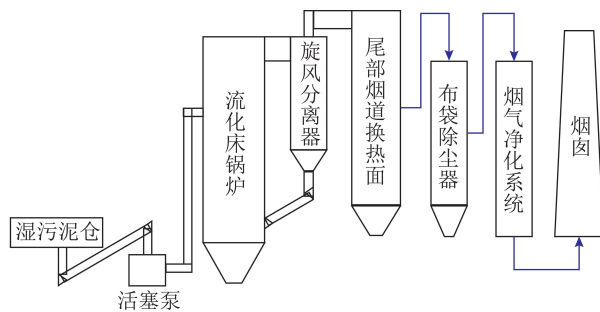


图 5 循环流化床直接掺烧污泥发电工艺流程^[43]

Fig.5 Flow chart of direct co-combustion of sludge in CFB^[43]

烟气直接干化污泥后掺烧发电工艺路线如图 6 所示^[44]。该工艺路线中,湿污泥被输送至污泥干化机中干化,干化热源为燃料在锅炉燃烧产生的高温烟气或排烟。含水率降至 40%的干化污泥送入料仓,随后送入磨煤机与煤粉一同送入锅炉炉膛燃烧,而燃烧产生的烟气经烟气净化装置处理达标后排放。王一坤等^[45]研究了不同烟气抽取位置对烟气

直接干化污泥耦合发电机组参数的影响,发现污泥耦合焚烧会影响锅炉主要运行参数,且随着抽取点温度下降,参数影响幅度上升,综合考虑改造成本和施工难度,推荐选择低温过热器出口作为干化烟气抽取点。烟气直接干化污泥耦合发电技术对锅炉热效率的影响较小、投资成本适中。

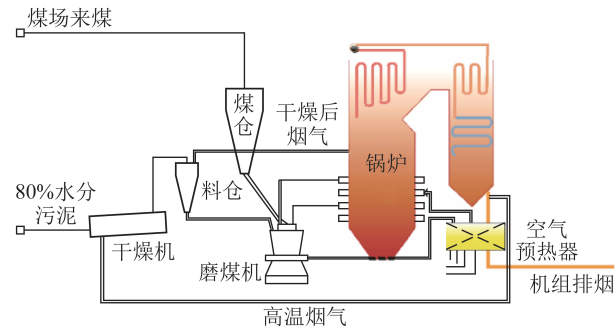


图6 烟气直接干化污泥掺烧工艺路线^[44]

Fig.6 Process route of co-combustion of sludge dried by flue gas directly^[44]

如山东华能莱芜热电有限公司等在大型燃煤电厂建设干化设备,相比单独建小型焚烧炉节省一次性投资40%以上^[46]。但烟气直接干化存在粉尘爆炸风险高、干化烟气量需求大和干化尾气产量大等问题。

饱和蒸气间接干化污泥后掺烧工艺路线如图7所示^[47]。密闭汽车将不同污水处理厂的湿污泥运输至湿污泥贮库,通过抓吊将湿污泥抓入干化机前污泥仓,再通过无轴螺旋输送机送至污泥干化机入口,干化机将综合含水率80%左右的湿污泥干化至含水率30%左右,干化后的污泥通过密闭式输送带收集到干污泥储仓,通过螺旋给料机送入锅炉中。污泥干化机的加热介质为从电厂蒸气系统引来的低压蒸气(0.5 MPa 饱和蒸气),经干化机换热后的蒸气冷凝经疏水阀排至疏水箱。污泥干化产生的废气首先经过旋风除尘器实现气固分离,然后经过冷凝器换热,不可凝结废气通过鼓风机送入锅炉炉膛实现废气中污染物的高效焚烧处置。

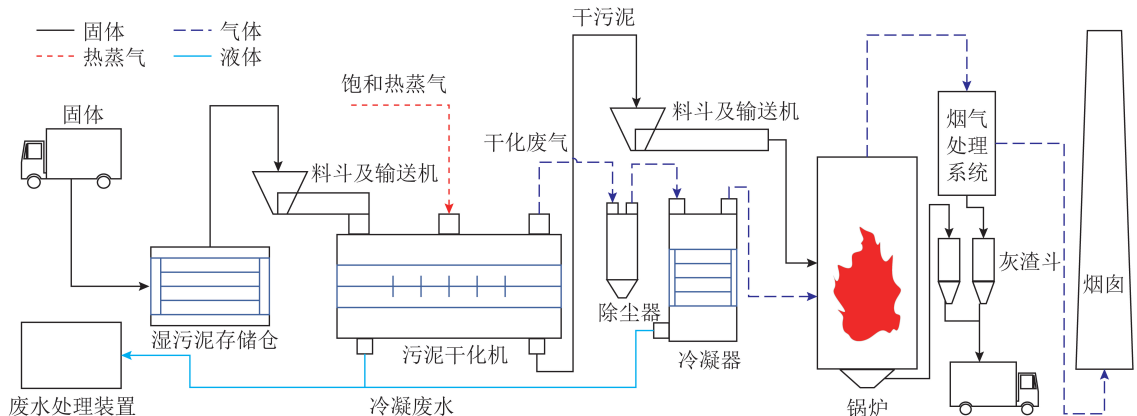


图7 蒸汽间接干化污泥掺烧工艺路线^[47]

Fig.7 Process route of co-combustion of sludge dried by steam indirectly^[47]

3种污泥在燃煤机组中耦合焚烧发电技术路线特点对比^[13,48]见表6。

表6 燃煤耦合污泥焚烧发电技术特点分析^[13,48]

Table 6 Characteristics of co-combustion power generation technology of coal with sludge^[13,48]

项目	湿污泥直接掺烧	烟气直接干化污泥后掺烧	饱和蒸气间接干化污泥
干化热源	不需要干化热源	高温烟气、省煤器出口烟气等	汽轮机抽气
工艺流程	通过煤仓或进料输送带直接掺混入炉	高温烟气干化后送入磨煤机或干化污泥料仓进料	饱和蒸气干化后送入磨煤机或干化污泥料仓进料
入炉污泥参数	黏稠状、80%含水率、低发热量	颗粒或粉末状、30%~40%含水率、高热值	颗粒或粉末状、30%~40%含水率、高热值
锅炉燃烧热效率影响	较大	很小	很小
投资及运行成本	投资成本低、运行成本低	投资成本中等、运行成本80~120元/t	投资成本较高、运行成本160~200元/t
适用炉型	流化床、回转窑	适用于大部分燃煤锅炉,尤其是煤粉炉	适用于大部分燃煤锅炉,尤其是煤粉炉
技术优势	① 投资及运行成本低、设备结构简单;② 避免干化所产生的恶臭气体;③ 可利用燃煤机组烟气净化装置处理污泥燃烧污染物	① 对锅炉燃烧系统运行影响较小;② 炉膛高温环境可充分消除污泥及其干化尾气中的污染性气体;③ 可利用燃煤机组烟气净化装置处理燃烧污染物	① 对锅炉燃烧系统运行影响较小;② 炉膛高温环境可充分消除污泥及其干化尾气中的污染性气体;③ 可利用燃煤机组烟气净化装置处理燃烧污染物;④ 污泥掺烧处置量大

续表

项目	湿污泥直接掺烧	烟气直接干化污泥后掺烧	饱和蒸气间接干化污泥
存在问题	① 燃烧温度低,可能造成二噁英排放超标;② 污泥掺烧量较小,焚烧处置量低;③ 湿污泥的低热值和高含水率影响燃烧热稳定性;④ 湿污泥贮存堆放易产生恶臭气体	① 高温烟气的抽取选择较复杂,需兼顾烟气温度和烟尘量;② 高温烟气的抽取会降低锅炉蒸气出力;③ 污泥掺烧处置量不大	① 投资及运行成本高;② 设备结构复杂,维护成本高,改造建设周期长;③ 需额外处置干化过程中的凝结废水

由表 6 可知,不同燃煤耦合污泥焚烧发电技术的适应场景和优缺点不同。其中,湿污泥直接掺烧对锅炉燃烧热效率和稳定性影响较大,而采用烟气直接干化污泥存在降低锅炉蒸气出力、改造成本较高等问题,随着我国燃煤领域对环境保护和污泥处置量要求的提高,饱和蒸气间接干化污泥耦合掺烧的工艺路线将得到更多工程应用。

2.2 耦合污泥发电对燃煤机组的影响

2.2.1 燃煤机组煤耗影响

以浙江某 330 MW 煤粉锅炉耦合掺烧蒸气干化污泥案例为例^[49],对耦合污泥发电对燃料机组的影响进行系统分析。该项目污泥处理规模为综合含水率 75% 的污泥 200 t/d,采用圆盘干化机,干化介质

为 0.5 MPa 饱和蒸气;干化后的污泥暂存于干污泥储仓,通过封闭式输送机送入煤场,与煤混合后作为燃料入炉焚烧。

干化至不同含水率下干化污泥与煤掺混后入炉燃料工业和元素分析见表 7,其中锅炉燃煤量按照额定负荷考虑(煤耗量 138.6 t/h),锅炉煤种按照设计煤种考虑。相同热负荷下,不同含水率的干化污泥占总燃料的比值见表 8。由表 7 和表 8 可知,掺烧污泥后,入炉燃料的工业和元素分析值相对于设计煤种有一定改变,但变化幅度小于 1%,可见掺烧污泥后燃料的理化性质参数改变很小,而污泥掺混比占总燃料的比值也相对较小,对锅炉的燃烧稳定性影响较小。

表 7 不同含水率的干化污泥与煤掺混后入炉燃料工业和元素分析

Table 7 Proximate and ultimate analysis of coal mixed with dried sludge with different water contents

项目	设计煤种(收到基)	污泥(空干基)	煤+20%含水率污泥 (收到基)	煤+30%含水率污泥 (收到基)	煤+40%含水率污泥 (收到基)
M/%	6.50	7.31	6.63	6.75	6.92
A/%	28.15	37.86	28.19	28.15	28.10
V/%	23.53	48.23	23.69	23.66	23.62
FC/%	41.82	6.70	41.48	41.43	41.35
C/%	56.03	33.49	55.78	55.70	55.60
H/%	3.48	4.59	3.48	3.48	3.47
O/%	4.65	2.50	4.71	4.71	4.70
S/%	0.36	1.20	0.37	0.37	0.37
N/%	0.83	13.13	0.84	0.84	0.84
Q/(MJ·kg ⁻¹)	27.74	15.15	21.65	21.62	21.58

表 8 相同热负荷下不同含水率的干化污泥占总燃料的比值

Table 8 Ratio of dried sludge with different water contents under the same thermal loads

污泥含水率/%	污泥消耗量/(t·h ⁻¹)	实际耗煤量/(t·h ⁻¹)	总燃料量/(t·h ⁻¹)	污泥占比/%	燃煤占比/%
20	1.30	137.84	139.14	0.94	99.06
30	1.49	137.86	139.34	1.07	98.93
40	1.74	137.88	139.62	1.24	98.76

2.2.2 对锅炉结焦结渣影响

不同燃烧温度下污泥的焚烧灰渣和粉煤灰化学成分对比见表 9,污泥中主要金属氧化物中碱金属含量很低,成分组成与粉煤灰相似,不增加锅炉内结

焦风险。由表 7 可知,干化污泥挥发分较高、灰分相对较低,掺烧入炉燃料相比原煤,灰分上升幅度 ≤ 0.1%,对锅炉的结渣影响小。由于干化污泥含水率比原煤高,与原煤掺混制煤易堵塞制粉系统。

表9 不同燃烧温度下污泥的焚烧灰渣和粉煤灰化学成分对比

Table 9 Comparison of chemical composition of fly ash of coal and sludge incinerated at different combustion temperatures

样品	质量分数/%						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Mn ₂ O ₃
750℃灰渣	51.57	20.22	3.60	12.35	0.858	1.01	0.136
800℃灰渣	61.44	23.59	3.29	2.98	0.850	1.24	0.124
850℃灰渣	56.88	27.87	3.45	3.27	0.857	1.17	0.147
一般粉煤灰	40~60	15~40	4~20	2~10	0.5~4.0	—	—

2.2.3 常规烟气污染物排放影响

SO₂生成与污泥中原始硫含量、烟气停留时间、烟气含水率、燃烧温度和烟气流速等密切相关^[50]。刘政梅等^[47]研究发现含水率30%的城市污泥掺混率低于7.35%时,随着污泥掺烧率上升,SO₂排放浓度变化较小,主要由于煤粉中硫含量相对较高,市政污泥的掺烧率对最终SO₂排放量影响较小。岳峻峰等^[51]研究发现SO₂排放浓度由掺混后入炉燃料的硫含量决定,而生成的SO₂很可能在高温时与氧化物形成硫酸盐。因此,掺烧污泥对最终SO₂排放浓度影响可忽略不计。

由于污泥中蛋白质、细菌等含量较高,导致氮元素含量一般高于原煤,而污泥燃烧过程中NO_x的生成机理与煤相似,受温度、气氛和氮元素含量等因素影响。童敏等^[52]利用沉降炉试验研究污泥掺煤燃烧过程中污染物排放特性,发现污泥掺混比例≤20%时,污泥掺烧后尾气中NO_x排放浓度无显著

上升。李凡等^[53]数值模拟研究表明入炉燃料含水率上升会大幅降低燃烧温度,从而使NO_x排放浓度上升;含水率40%工况相比含水率10%工况NO_x排放增加5%。刘政梅等^[47]通过现场试验发现污泥掺混比小于7.35%时,NO_x排放量随掺混比上升而下降,这可能与污泥中少量尿素、氨水等物质的吸收作用相关。对于其他常规污染物,可通过不同手段加以控制,如CO可通过良好配风和燃烧优化控制,而粉尘可通过布袋除尘脱除。

2.2.4 重金属及二噁英排放影响

现阶段由于我国工业园区存在工业污水偷排、与生活污水混排等违法现象,导致城镇污泥中有害重金属含量较高,而污泥中重金属在掺烧过程中可能导致燃煤机组重金属排放超标。另外污泥中氯元素含量相对较高,也可能导致二噁英(PCDD/Fs)超标。我国城市污泥中重金属含量统计^[54]见表10,可知部分重金属(如Zn、Cr和Pb等)含量较高。

表10 我国城市污泥中重金属含量^[54]Table 10 Concentration of heavy metals in municipal sludge in China^[54]

重金属	最小值	中位值	最大值	算术平均值	标准差
As	0.78	19.90	269.00	25.20	26.80
Cd	0.04	1.74	999.00	18.20	109.00
Cr	20.00	85.30	6 365.00	259.00	714.00
Cu	51.00	223.00	9 592.00	499.00	1 131.00
Hg	0.04	2.18	17.50	3.18	3.13
Ni	16.40	46.20	6 206.00	167.00	719.00
Pb	3.60	83.60	1 022.00	112.00	134.00
Zn	217.00	1 025.00	30 098.00	2 089.00	3 819.00

其中,易挥发性重金属会吸附在飞灰上被布袋除尘器捕集或随烟气排入大气,而不易挥发的重金属通常会富集在炉渣中。刘蕴芳等^[55]研究发现Pb、Cu、Cr和Ni等重金属燃烧过程中大部分会残留在焚烧灰渣中,Zn和Cd等重金属部分残留在焚烧灰渣中,而As、Hg和Se等易挥发性重金属则主要富集在烟气中;掺烧污泥后,焚烧底渣中重金属含量相比原煤有所升高,而烟气中Hg质量浓度上升约30%,Pb质量浓度为原煤的4.3~4.8倍,但烟气中

重金属浓度仍满足现行国家标准。曾多等^[48]对比分析某电厂污泥掺烧后,混煤与原煤中重金属含量,发现污泥掺烧比例为10%时,对燃煤机组的重金属达标排放无明显影响。二噁英生成控制措施一般包括源头控制、燃烧控制和末端控制3种方式。对于源头控制应尽可能选择氯含量较低的污泥,并控制对二噁英生成有催化效果的金属化合物(如CuCl₂和ZnCl₂)^[56]。通过提高燃烧温度至850℃以上、保证停留时间大于2s等燃烧控制手段可降低二噁英

生成量。针对防治低温尾部烟道处二噁英再合成的末端控制,可采取烟气急冷和飞灰高效脱除等手段尽可能防止二噁英再合成。

在燃煤耦合污泥焚烧发电技术污染物控制方面,我国尚未出台相应的排放标准文件,而现行的GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》对于污泥焚烧的特性污染物(如二噁英)缺乏相关控制要求,部分工程项目实施过程中采用GB 18485—2014《生活垃圾焚烧控制标准》作为有关排放标准^[57]。因此,亟需有关部门出台燃煤耦合污泥焚烧发电技术污染物排放的统一标准,有利于燃煤耦合污泥焚烧发电技术的长远发展。

表 11 我国典型燃煤耦合污泥焚烧工程案例技术参数对比^[47]

Table 11 Comparison of technical parameters of typical co-combustion projects of coal with sludge in China^[47]

项目	浙能长兴电厂	浙能嘉兴电厂	南京化学工业园热电厂	常熟发电厂	苏州热电厂	白马发电厂	
建设单位	浙能	浙能	华润	华润	华能	国能	
锅炉参数	种类	煤粉炉	煤粉炉	煤粉炉	循环流化床	循环流化床	
	容量/MW	4×330	2×330+4×660+2×1 000	3×650	2×330	630	600
	参数	亚临界	亚临界/超临界/超超临界	超临界	亚临界	亚临界	亚临界
	类型	纯凝	纯凝	供热发电	热电联产	热电联产	热电联产
建设规模/(t·d ⁻¹)	2×100	2×125	3×100	9×100	2×100	2×100	
项目投资/万元	6 264	4 508	6 319	15 452	5 600	—	
年消纳量/万 t	6.7	8.3	10.0	30.0	7.3	7.8	
污泥入炉含水率/%	30	40	30	30	60	60	
干化技术	圆盘干化机	圆盘干化机	圆盘干化机	圆盘干化机	—	—	
干化热源	饱和蒸气	辅助蒸气	饱和蒸气	饱和蒸气	—	—	
掺混比/%	1~2	2~3	3~8	2.66	—	≤6	
处置成本/(元·t ⁻¹)	180	160	—	—	—	—	

4 结语及展望

1) 燃煤耦合污泥焚烧发电需要对现有机组设备进行改造,而设备投资成本和维护成本较高成为限制燃煤耦合污泥焚烧技术发展的重要因素,尚需政府层面的政策扶持。另外,污泥耦合焚烧部分的发电补贴标准需要国家政策的进一步明确和细化。

2) 燃煤耦合污泥焚烧过程中的污染物排放标准有待完善,亟需针对污泥种类、入炉含水率、掺混比等工艺参数制定统一污染物排放计算标准,尤其是二噁英、重金属等污染物。另外,燃煤耦合污泥焚烧过程中碳减排计算也需尽快制定相应标准,从而促进该技术的落地推广。

3) 现有燃煤耦合污泥焚烧发电工程的掺混比较低,如何在保证高效率燃烧和低污染排放等前提下提高污泥耦合焚烧处置量是未来耦合焚烧技术的

3 燃煤耦合污泥焚烧工程案例分析

我国燃煤耦合污泥工程典型案例对比见表 11,其中多个焚烧案例入选国家能源局首批“燃煤耦合生物质发电技改试点项目”^[5]。现有经验表明,污泥掺混比小于 10%时,掺烧发电对机组稳定性影响很小,污染物均在排放限值内。浙江浙能嘉兴电厂 2011 年投产的燃煤耦合污泥发电一期工程,采用圆盘式干化机将湿污泥(80%)干化至含水率 40%后贮存于干化污泥仓,干化尾气冷凝后的不可凝气体经送风机送至燃煤锅炉焚烧。该项目在 2011—2019 年累计处置湿污泥 35 余万 t,环境效益和工程示范效果良好。

重要研究方向。

4) 燃煤耦合污泥焚烧产生的飞灰和底渣具有资源化利用的潜力,尤其是污泥中磷元素、重金属元素含量较高,但目前国内针对燃煤耦合污泥焚烧灰渣的资源化利用研究较为缺乏。

参考文献(References):

- [1] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. 北京: (2021-10-26) [2022-01-10]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [2] YU Shiwei, WEI Yiming, GUO Haixiang, et al. Carbon emission coefficient measurement of the coal-to-power energy chain in China [J]. Applied Energy, 2014, 114: 290-300.
- [3] JIANG Kai, ASHWORTH Peta, ZHANG Shiyi, et al. China's carbon capture, utilization and storage (CCUS) policy: A critical review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 119: 109601.

- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡统计年鉴—2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [5] 国家能源局. 国家能源局环境保护部关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知[EB/OL]. (2017-11-27) [2022-01-10]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201712/t20171204_3065.htm.
- [6] 张成, 朱天宇, 殷立宝, 等. 100 MW 燃煤锅炉污泥掺烧试验与数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(2): 114-123.
ZHANG Cheng, ZHU Tianyu, YIN Libao, et al. Field test and numerical simulation for co-combustion of sludge in a 100 MW coal fired boiler[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(2): 114-123.
- [7] 范世岩, 周顺文, 刘雁飞. 浅谈湿污泥干化处置与燃煤机组耦合发电技术[J]. 锅炉制造, 2019(5): 12-14.
FAN Shiyan, ZHOU Shunwen, LIU Yanfei. Talking about the drying of wet sludge and coupling power generation technology of coal-fired unit[J]. Boiler Manufacturing, 2019(5): 12-14.
- [8] 邓文义. 污泥间接式干化机理及处置过程中污染物排放特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [9] CHEN Jiacong, XIE Candie, LIU Jingyong, et al. Co-combustion of sewage sludge and coffee grounds under increased O₂/CO₂ atmospheres: Thermodynamic characteristics, kinetics and artificial neural network modeling[J]. Bioresource Technology, 2018, 250: 230-238.
- [10] NIU Shibo, CHEN Meiqian, LI Yang, et al. Evaluation on the oxy-fuel combustion behavior of dried sewage sludge[J]. Fuel, 2016, 178: 129-138.
- [11] HE Qihui, XIE Dong, XU Renfu, et al. The utilization of sewage sludge by blending with coal water slurry[J]. Fuel, 2015, 159: 40-44.
- [12] DONG Hao, JIANG Xuguang, LYU Guojun, et al. Co-combustion of tannery sludge in a commercial circulating fluidized bed boiler[J]. Waste Management, 2015, 46: 227-233.
- [13] 陈大元, 王志超, 李宇航, 等. 燃煤机组耦合污泥发电技术[J]. 热力发电, 2019, 48(4): 15-20.
CHEN Dayuan, WANG Zhichao, LI Yuhang, et al. Sludge-coupled power generation technology in coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(4): 15-20.
- [14] 岳勇, 陈雷, 姚强, 等. 燃煤锅炉颗粒物粒径分布和痕量元素富集特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 74-79.
YUE Yong, CHEN Lei, YAO Qiang, et al. Experimental study on characteristics of particulate matter size distribution and trace elements enrichment in emissions from a pulverized coal-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 74-79.
- [15] DENG Shuanghui, TAN Houzhang, WEI Bo, et al. Investigation on combustion performance and ash fusion characteristics of Zhundong coal co-combustion with coal gangue[J]. Fuel, 2021, 294: 120555.
- [16] 陈文迪. 污泥在流化床内的燃烧特性及高效焚烧处理处置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [17] LIN Yan, LIAO Yanfen, YU Zhaosheng, et al. A study on co-pyrolysis of bagasse and sewage sludge using TG-FTIR and Py-GC/MS[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 151: 190-198.
- [18] WANG Liang, SKJEVRAK Geir, HUSTAD Johan E, et al. Effects of sewage sludge and marble sludge addition on slag characteristics during wood waste pellets combustion[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(12): 5775-5785.
- [19] ZHANG Xiaopei, ZHANG Cheng, LI Xin, et al. A two-step process for sewage sludge treatment: Hydrothermal treatment of sludge and catalytic hydrothermal gasification of its derived liquid[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 180: 67-74.
- [20] LUO Liqun, LI Keyao, FU Weng, et al. Preparation, characteristics and mechanisms of the composite sintered bricks produced from shale, sewage sludge, coal gangue powder and iron ore tailings [J]. Construction and Building Materials, 2020, 232: 117250.
- [21] DAI Shifeng, REN Deyi, CHOU Chenlin, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 94: 3-21.
- [22] 范艳辉, 范凉娟, 齐彪, 等. 聚合氯化铝(PAC)改善污泥脱水性能的研究[J]. 环保科技, 2012, 18(1): 34-37.
FAN Yanhui, FAN Liangjuan, QI Biao, et al. Study on polyaluminum chloride (PAC) improving sludge dewatering ability [J]. Environmental Protection and Technology, 2012, 18(1): 34-37.
- [23] 寇成贵, 崔丰元. 聚合硫酸铁对污泥脱水性能研究[J]. 环境科学与管理, 2015 40(3): 67-70.
KOU Chenggui, CUI Fengyuan. Effects of PFS on sludge dewatering [J]. Environmental Science and Management, 40(3): 67-70.
- [24] CHEN Wendi, WANG Fei, KANHAR Altaf Hussain. Sludge acts as a catalyst for coal during the co-combustion process investigated by thermogravimetric analysis[J]. Energies, 2017, 10(12): 1993.
- [25] 郭淑琴, 孙孝然. 几种国外城市污水处理厂污泥干化技术及设备介绍[J]. 给水排水, 2004, 30(6): 34-37.
GUO Shuqin, SUN Xiaoran. Introduction of sludge drying technology and equipment of several foreign urban sewage treatment plants [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(6): 34-37.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于印发城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)的通知[EB/OL]. (2011-03-14) [2022-03-04]. http://www.gov.cn/zwggk/2011-03/30/content_1834616.htm.
- [27] 严建华, 王飞, 池涌, 等. 污泥无害化能源化热处置技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [28] LI Bo, WANG Fei, CHI Yong, et al. Adhesion and cohesion characteristics of sewage sludge during drying [J]. Drying Technology, 2014, 32(13): 1598-1607.
- [29] 李博. 污泥高效干化方法及干化焚烧系统的优化运行研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [30] 刘亚军, 王爱春, 邓文义. 市政污泥热力干化过程中黏滞特性研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(6): 2378-2385.
LIU Yajun, WANG Aichun, DENG Wenyi. Progress in sticky char-

- acteristics of sewage sludge during thermal drying process [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37 (6): 2378-2385.
- [31] PEETERS Bart, DEWIL Raf, VERNIMMEN Luc, et al. Addition of polyaluminiumchloride (PACI) to waste activated sludge to mitigate the negative effects of its sticky phase in dewatering-drying operations [J]. Water Research, 2013, 47 (11) : 3600-3609.
- [32] LI Huan, ZOU Shuxin, LI Chenchen. Liming pretreatment reduces sludge build-up on the dryer wall during thermal drying [J]. Drying Technology: An International Journal, 2012, 30 (14) : 1563-1569.
- [33] 肖文平. 城市污泥干化与焚烧技术研究 [D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [34] DENG Wenyi, YAN Jianhua, LI Xiaodong, et al. Emission characteristics of volatile compounds during sludges drying process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162 (1) : 186-192.
- [35] TSOTSAS E, KWAPINSKA M, SAAGE G. Modeling of contact dryers [J]. Drying Technology, 2007, 25 (7/8) : 1377-1391.
- [36] MILHÉ Mathieu, CHARLOU Christophe, SAUCEAU Martial, et al. Modeling of sewage sludge flow in a continuous paddle dryer [J]. Drying Technology, 2015, 33 (9) : 1061-1067.
- [37] DENG Wenyi, YAN Jianhua, LI Xiaodong, et al. Measurement and simulation of the contact drying of sewage sludge in a Naratype paddle dryer [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64 (24) : 5117-5124.
- [38] SAHNI Ekneet Kaur, CHAUDHURI Bodhisattwa. Contact drying: A review of experimental and mechanistic modeling approaches [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2012, 434 (1/2) : 334-348.
- [39] METZGER Thomas, KWAPINSKA Marzena, PEGLOW Mirko, et al. Modern modelling methods in drying [J]. Transport in Porous Media, 2007, 66 (1) : 103-120.
- [40] MILHÉ Mathieu, SAUCEAU Martial, ARLABOSSE Patricia. Modeling of a continuous sewage sludge paddle dryer by coupling Markov chains with penetration theory [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40 (19/20) : 8201-8216.
- [41] CHEN Shaoqing, WANG Fei, MILHÉ Mathieu, et al. Experimental and theoretical research on agitated contact drying of sewage sludge in a continuous paddle dryer [J]. Drying Technology, 2016, 34 (16) : 1979-1990.
- [42] LYU Lukai, CHEN Shaoqing, WANG Fei. Two dimensional modeling of sewage sludge flow in a double-axis continuous paddle dryer [J]. Waste Management, 2021, 124 : 63-71.
- [43] 陈全喜, 付江涛. 市政污泥耦合燃煤电厂发电关键因素分析与展望 [J]. 华电技术, 2021, 43 (10) : 50-60.
CHEN Quanxi, FU Jiangtao. Analysis and prospect of key factors affecting the coupling of municipal sludge combustion and coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (10) : 50-60.
- [44] 胡远丰. 城市污泥耦合燃煤发电技术现状及发展趋势 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2019 (17) : 150-152.
HU Yuanfeng. Status and development of co-combustion technology of municipal sludge in coal-fired power plants [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019 (17) : 150-152.
- [45] 王一坤, 柳宏刚, 周凌云, 等. 烟气抽取位置对抽烟气干化污泥耦合发电机组的影响 [J]. 热力发电, 2021, 50 (2) : 43-48.
WANG Yikun, LIU Honggang, ZHOU Lingyu, et al. Effects of flue gas extraction position on sludge-coal blending combustion generation units [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50 (2) : 43-48.
- [46] 高太振. 污泥在大型燃煤电厂中干化掺烧处理的应用 [J]. 企业技术开发, 2013, 32 (4) : 42-43.
GAO Taizhen. Sludge drying and blending application in large coal-fired power plant [J]. Technological Development of Enterprise, 2013, 32 (4) : 42-43.
- [47] 刘政艳, 郑新梅, 章严韬. 燃煤电厂掺烧市政污泥工程大气污染分析 [J]. 环境影响评价, 2017, 39 (6) : 34-38.
LIU Zhengyan, ZHENG Xinmei, ZHANG Yantao. Analysis and research on air pollution of municipal sludge and coal co-firing power plants [J]. Environmental Impact Assessment, 2017, 39 (6) : 34-38.
- [48] 曾多, 于常春. 燃煤耦合污泥发电技术探讨 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2019, 24 (1) : 21-25.
ZENG Duo, YU Changchun. A study on the coal-fired coupling sludge power generation technology [J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 2019, 24 (1) : 21-25.
- [49] 刘永付, 王飞, 吴奇, 等. 大型燃煤电站锅炉协同处置污泥的试验研究 [J]. 能源工程, 2013 (6) : 64-69.
LIU Yongfu, WANG Fei, WU Qi, et al. Experimental study of sludge disposal in a large coal-fired power plant [J]. Energy Engineering, 2013 (6) : 64-69.
- [50] 黄伟, 林英红, 罗子丰, 等. 燃煤电厂污泥掺烧技术及其研究进展 [J]. 上海电力大学学报, 2021, 37 (1) : 1-4, 22.
HUANG Wei, LIN Yinghong, LUO Zifeng, et al. Progress on research and technology of sludge blending combustion in coal-fired power plants [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37 (1) : 1-4, 22.
- [51] 岳峻峰, 邹磊, 张恩先. 燃煤电厂掺烧污泥的影响及制粉系统优化分析 [J]. 化工管理, 2019 (1) : 69-71.
YUE Junfeng, ZOU Lei, ZHANG Enxian. Research status of coal and sewage sludge blending combustion in power plant [J]. Chemical Enterprise Management, 2019 (1) : 69-71.
- [52] 童敏, 封羽涛, 罗永浩. 城市污泥掺煤混烧特性及污染物排放研究 [J]. 环境工程, 2018, 36 (3) : 133-137.
TONG Min, FENG Yutao, LUO Yonghao. Study on co-combustion characteristics and pollutants emission of municipal sludge and coal [J]. Environmental Engineering, 2018, 36 (3) : 133-137.
- [53] 李凡, 赵小盼, 乔晓磊, 等. 某 600 MW 煤粉锅炉掺混污泥 NO_x 排放特性数值模拟研究 [J]. 电站系统工程, 2021, 37 (4) : 7-11.
LI Fan, ZHAO Xiaopan, QIAO Xiaolei, et al. Numerical simulation on NO_x emission characteristics of pulverized coal with sludge in a 600 MW coal-fired boiler [J]. Power System Engineering, 2021, 37 (4) : 7-11.

- [54] CHEN H, YAN S, YE Z, et al. Utilization of urban sewage sludge: Chinese perspectives [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(5): 1454-1463.
- [55] 刘蕴芳, 滕建标, 苏耀明, 等. 煤粉炉掺烧干化污泥的污染物排放研究[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(11): 4969-4976.
LIU Yunfang, TENG Jianbiao, SU Yaoming, et al. Research on pollutants emitted from dried sludge blending combustion in coal-powder boiler [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(11): 4969-4976.
- [56] 张梦玫, 李晓东, 陈彤. 氯化铜催化二噁英生成实验及指纹特性分析[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(8): 2735-2746.
ZHANG Mengmei, LI Xiaodong, CHEN Tong. Copper chloride catalyzed PCDD/F-formation: Experiments and PCDD/F-signatures [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(8): 2735-2746.
- [57] 张传秀. 电厂燃煤锅炉掺烧污水厂污泥存在的问题与思考[J]. *上海节能*, 2020(1): 18-22.
ZHANG Chuanxiu. Problems and thoughts on co-firing of sludge in the coal-fired power plant [J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2020(1): 18-22.