

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.10.006

市政污泥耦合燃煤电厂发电关键因素分析与展望

Analysis and prospect of key factors affecting the coupling of municipal sludge combustion and coal-fired power plants

陈全喜¹, 付江涛^{2*}
CHEN Quanxi¹, FU Jiangtao^{2*}

(1. 武汉天和技术股份有限公司, 武汉 430010; 2. 江汉大学 a. 精细爆破国家重点实验室; b. 爆破工程湖北省重点实验室; c. 湖北(武汉)爆炸与爆破技术研究院, 武汉 430056)

(1. Wuhan Tianhe Technology Company limited, Wuhan 430010, China; 2. a. State key Lab of Precision Blasting; b. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering; c. Hubei (Wuhan) Institute of Explosion Science and Blasting Technology, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

摘要:分析市政污泥耦合燃煤电厂发电的政策形势和应用现状,总结市政污泥耦合燃煤电厂发电工艺流程中的关键因素,包括含水率、热值、含砂率、污泥干化和耦合焚烧过程中重金属、二噁英等污染物的产生和抑制方法,并对比各种市政污泥深度脱水及干化工艺的优缺点。对煤粉锅炉和循环流化床锅炉耦合市政污泥的技术路线进行对比,进而分析了耦合污泥对不同炉型发电工艺的影响。研究结果表明:为更好地实施市政污泥耦合燃煤发电项目,应减少污泥中的含砂量,降低干化设备和锅炉设备的磨损;同时对耦合燃烧产生的飞灰和炉渣进行实时监测和治理,减少二次污染;创新协调水务企业、燃煤发电企业、电网企业和政府关系,保证项目技术经济性。

关键词:市政污泥;污泥耦合发电;二噁英;污泥直接掺烧;耦合掺烧;循环流化床锅炉

中图分类号:TK 6

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2021)10-0050-11

Abstract: By analyzing the policies and application status of municipal sludge combustion technology coupled with coal-fired power plants, the key factors affecting the co-combustion technology can be summarized as water content, calorific value, sand content, sludge drying and suppression methods for heavy metals, dioxins and other pollutants generated from the co-combustion process. The advantages and disadvantages of various deep dehydration and drying processes for municipal sludge are compared. The technical routes of municipal sludge combustion respectively coupled with pulverized coal boilers and circulating fluidized bed boilers are compared, and the influences of sludge' coupling on different boilers' power generation processes are analyzed. The results show that, to implement the projects of municipal sewage sludge combustion coupled with coal-fired power plants effectively, the sand content in sludge should be reduced in order to alleviate the wear of drying equipment and boilers. Meanwhile, the fly ash and slag produced from the co-combustion should be monitored and treated to control the secondary pollution. Furthermore, innovative cooperation relationship should be built between water services companied, coal-fired power plants, power grid enterprises and government sectors, to ensure the technical and economic performances of the projects.

Keywords: municipal sludge; power generation coupling sludge combustion; dioxins; co-combustion of dried sludge; circulating fluidized bed boiler

0 引言

随着我国城市化进程的高速发展,城市污水处理能力不断提升,市政污泥的产出量也随之迅速增

长。2020年,我国市政污泥产出总量60~90 Mt/年,且呈逐年上升趋势。城市污水处理必须由“重水轻泥”向“泥水并重”模式转变,并需新增污泥无害化处理规模22 Mt/年^[1-2](以含水率80%的湿污泥计)。目前,我国的市政污泥无害化处理率较低,常规的土地利用、卫生填埋、建材利用、堆肥、焚烧等处理方式已经不能满足日益严苛的环境保护政策要求。

市政污泥的主要成分包括大量的水分及有机物质、砂砾、重金属、盐类、难降解物质、病原微生物、寄生虫卵等,处置不当会对环境造成二次污染。《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》^[3]中指出,污泥焚烧与协同处理技术为市政污泥“稳定化、减量化、无害化、资源化”的有效方法,具有污泥处理能力大、稳定性强、适应性强、系统效率高等独特优势。2017—2018 年,国家能源局和环境保护部联合密集发文^[4-5],为燃煤电厂耦合市政污泥发电提供政策支持,并在全国范围内批准了 29 个市政污泥耦合发电示范项目。目前,各示范项目正处于实施阶段,探索燃煤电厂耦合市政污泥发电技术中的关键影响因素十分必要。

1 市政污泥的特性

陈大元等^[6]对比分析不同市政污泥和不同动力煤种,认为污泥的全水分如果降低至 40% 以下,其特性基本与国内年轻褐煤接近,但挥发分明显偏高。干化污泥整体上属于低热值、高挥发分、高水分、高灰分、严重结渣燃料。

1.1 含水率

市政污泥产生于城市污水处理厂生产过程中,污泥中含有大量的水分。水分存在的形式可分为自由水、间隙水、吸附水和结合水。自由水存在于污泥颗粒之间,占总水分的 65%~85%;间隙水存在于污泥颗粒与微生物细胞间的裂纹及楔形毛细管内,占总水分的 15%~25%;吸附水存在于污泥颗粒的表面,被表面张力所吸附;结合水存在于污泥颗粒和微生物细胞内^[7-8]。典型的城市污水处理厂生产过程中,各工艺段产生的污泥含水率^[9-10]见表 1。

由表 1 中数据可见,市政污水处理厂生产中的

表 1 城市污水处理厂不同工艺段污泥含水率
Tab. 1 Water content in sludge from different links of the municipal waste water treatment plant %

污泥类型		含水率
栅渣		80
沉渣		60
浮渣		95~97
腐殖污泥		96~98
初沉池污泥		95~97
混凝污泥		93
活性污泥	空气曝气	98~99
	纯氧曝气	96~98
生物滴滤池污泥	慢速滤池	93
	快速滤池	97
厌氧消化污泥	初沉池污泥	85~90
	活性污泥	90~94

每一个工艺段产生的污泥含水率都极高。而市政污泥耦合燃煤电厂发电,主要是利用市政污泥中所含的热值。含水率的高低,将会直接影响单位质量污泥的热值,从而影响市政污泥耦合发电的效率。

1.2 热值

市政污泥中含有的有机质是生物法处理污水过程中微生物新陈代谢的产物,也是污泥热值的主要来源。由于污泥中含有大量的水分,污泥的热值与污泥含水率密切相关。图 1 为污泥干物质热值为 21 MJ/kg 且温度为 10 ℃ 时,污泥热值与含水率之间的关系^[10]。

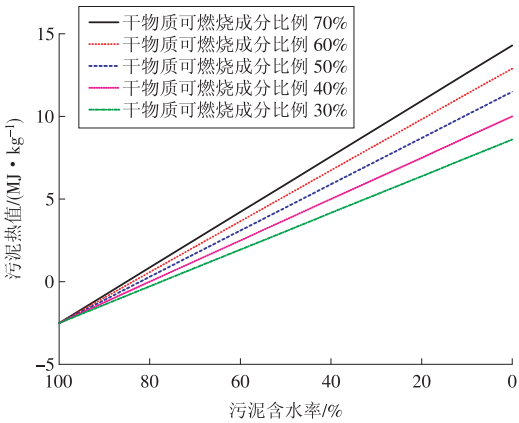


图 1 污泥热值与含水率关系

Fig. 1 Relationship between sludge calorific value and water content

由图 1 可见,污泥的热值随着含水率的降低和干物质可燃烧成分比例的上升呈上升趋势。因此,污泥耦合燃煤电厂发电时,电厂会希望污泥的含水率越低越好。但是一般市政污水处理厂产出的污泥含水率都在 80% 左右,要降低污泥含水率就需进行干化处理。而污泥干化工艺的运行成本将直接关系到污泥耦合发电项目的经济效益。

Magdziarz 等^[11]对比分析了来自波兰某污水处理厂的干化市政污泥与当地煤矿所产煤炭的热值和主要元素含量,见表 2。

由表 2 中数值可见,当干化市政污泥的含水率

表 2 干化市政污泥与煤的元素分析

Tab. 2 Element analysis on dried municipal sludge and coal

指标	干化市政污泥	煤
含水率/%	5.3	7.8
灰分/%	33.0	4.9
$\omega(\text{C})/\%$	28.9	64.2
$\omega(\text{H})/\%$	4.4	4.6
$\omega(\text{N})/\%$	4.1	2.2
$\omega(\text{O})/\%$	20.2	22.2
热值/(MJ·kg ⁻¹)	12.83	23.53

为 5.3% 时,其氢元素和煤相当,但其碳的质量分数和热值远低于煤。表 2 中干化市政污泥的热值与图 1 中的数值接近。

为防止污泥耦合燃煤发电产生的烟气中酸性物质低于露点导致酸析出后腐蚀烟道和设备,锅炉的排烟温度都高于酸的露点^[12],一般在 100℃ 以上。污泥耦合到燃煤电厂燃烧后,其中的水分将转化成蒸汽混合到烟气中,这些蒸汽含有气化潜热,其热量来源于煤和污泥的燃烧。只有当污泥燃烧产生的热量大于污泥中的水分转变成蒸汽所需的能量时,其超出部分的热量才有可能被利用而发电。对于干物质低位热值为 8.374 MJ/kg 的污泥,当其水分达到 76.9% 时,燃烧污泥产生的热量刚好可以使其中的水分完全蒸发^[9]。若污泥含水率稍高就无法实现自持燃烧,需要添加辅助燃料。文献[3]中也提出,若将含水率为 80% 的市政污泥干化到含水率 40% 入炉焚烧,污泥干化机和焚烧炉的热效率以 85% 计,则只有污泥干基质低位热值达到约 13.510 MJ/kg 时,才不需要辅助燃料,从而达到自持燃烧。陈莉佳等^[13]也提出,采用“污泥脱水干化至含水率 40%+污泥焚烧”工艺路线较“污泥脱水至含水率 80%+污泥干化焚烧”和“污泥深度脱水至含水率 60%+污泥干化焚烧”工艺路线,碳排放量更低,能耗更低。马盟等^[14]建议耦合燃煤电厂发电的市政污泥的含水率应在 30%~35%。针对不同的污泥耦合发电项目,项目方应根据自身情况,充分利用项目各方资源和条件,设计合理的污泥含水率,优化污泥热值含量。

1.3 含砂率

市政污泥中的砂砾在污泥耦合燃煤电厂发电时是一个极易被忽略的问题。砂砾由于硬度高,无论是在污泥干化工艺中,还是混入燃料在炉膛中燃烧时,都会由于与受热面频繁接触,导致干化设备和锅炉受热面产生磨损,从而损坏设备,造成导热介质泄漏、增大设备维护量、降低设备利用小时数、增加运行成本等问题。

戴晓虎等^[15]在调研我国污水处理厂污泥含砂特性及其成因时指出,现阶段我国市政污泥普遍存在含砂量高、污泥处理设备磨损严重、处理成本高等问题。王建伟等^[16]在调研青岛市 5 个典型城市污水处理厂的含砂率后,分析得出以工业废水为主的污水处理厂产出的污泥中含砂率为 22%~44%,而以生活污水为主的污水处理厂产出的污泥含砂率为 10%~15%。各污水处理厂污泥中无机砂质颗粒成分基本相同,主要为淡黄色硅质无机砂质颗粒和黑色磁性无机砂质颗粒,但其成分比例及形态差异较

大。由于污泥中的硅质砂砾和黑色磁性砂砾的熔点较高,进入污泥干化设备和锅炉炉膛中很难熔化,因此污泥耦合发电工艺流程中砂砾极易与设备产生摩擦,而造成设备损坏。李文兴等^[17]在温州市东片污水厂 240 t/d 污泥集中干化焚烧项目实践中,多次提到由于污泥含粉砂量偏高,导致空心桨叶干化设备磨损加剧、叶片漏蒸汽等问题,故障率高。为应对污泥中砂砾对设备的负面影响,对砂循环系统、冷渣器和振动筛进行技术改造。经测定,上海石洞口污泥干化焚烧项目,污泥干基的含砂率达到了 22.4%,而在欧洲此数值仅为 6.0%~8.0%。高含砂量的污泥在高速流化状态下,会对干化设备和锅炉设备造成很大程度磨损,并多次出现干化机导热油泄漏情况。

鉴于我国污泥高含砂率的现状,为减少污泥干化设备和耦合燃烧发电设备的磨损,提高设备利用小时数,应从 2 个方面着手。其一,从污水收集源头采取过滤措施;其二,提高污水处理厂的除砂效率,在进行污泥干化和耦合燃烧发电前,应对污泥进一步除砂。

1.4 污泥耦合工艺中的污染物

市政污泥耦合燃煤电厂燃烧发电后,由于污泥中含有重金属、有机物等污染物质,会产生重金属和二噁英污染,同时增加灰飞和炉渣量。

1.4.1 重金属及碱金属

市政污泥中重金属以无机物和有机物中的重金属这 2 种形式存在,后者主要是微生物代谢富集重金属后形成的^[18]。当污泥与煤耦合进行燃烧后,会以 2 种形式排放,一种是以灰飞形式排放至大气中,一种是以炉渣形式排放。由于一般市政污泥的灰分较动力用煤大,因此耦合市政污泥燃烧后的烟气灰分会增加,同时会增加对锅炉受热面的磨损,缩短设备使用寿命。灰分高会减缓火焰传播速度,导致点火延迟,燃烧温度也会下降,燃烧稳定性变差,甚至造成锅炉灭火。市政污泥耦合燃烧后,炉渣量有所增加,应调整锅炉排渣频率。

Miller 等^[19]对比分析了波兰 Krakow 地区的煤和瑞典 Himmerfjardsverket 地区干化市政污泥中重金属的成分分析,见表 3。

对表 3 中数据进行分析可以看出,市政污泥中大部分中重金属元素含量要远高于动力煤,其中重金属将主要以飞灰和炉渣的形式排放。为预防重金属二次污染,应采取严格措施进行飞灰和炉渣的环保处置。分析结果表明,重金属 Cd 和 Hg 主要存在于耦合燃烧后的烟气中,而 Cr, Cu, Ni 和 Zn 等重金属在炉渣中的含量会随着市政污泥掺烧比例的

表 3 干化市政污泥与煤的重金属成分分析

Tab. 3 Heavy metals analyses on dried municipal sludge and coal

元素	干化市政污泥	煤
As	38.00±0.50	1.83±0.54
Ba	266±49	376±74
Cd	2.30±1.70	0.21±0.07
Cr	143±30	24±2
Co	9.6±2.3	6.0±1.1
Cu	283±45	25±3
Hg	0.850±0.130	0.058
Ni	51.0±14.0	17.3±3.0
Mn	396±66	176±9
Pb	32±8	34±4
Sb	3.30±1.00	1.67±0.38
Se	<1.3	2.4±0.8
Sr	120±19	85±7
Ti	2 743.00±38.00	0.33±0.08
Zn	556±90	43±10

增加而增加。

市政污泥中含有碱金属,其在燃烧时会增加锅炉受热面腐蚀和结焦的风险^[20-22],导致焚烧炉检修频率和检修工作量明显提高,连续焚烧作业时间缩短,停炉定修时间增加。掺烧污泥后导致锅炉结焦加剧始终是一个突出问题。因此,应考虑如何减少污泥耦合燃料燃烧过程中的结焦情况,同时应定量分析烟气及炉渣组分,以判断耦合污泥燃烧后,对锅炉燃烧和大气环境产生的影响。

1.4.2 二噁英

具有二噁英活性的卤代芳烃化合物统称为二噁英类似物。二噁英类物质的生成条件包括:含苯环的化合物(苯、酚等);含 Cl 元素的化合物(HCl, Cl₂ 等);反应催化剂(Fe, Cu 等);反应温度在 300~600 ℃。由以上条件可知,市政污泥中含有的重金属、有机物和 Cl⁻,在污泥耦合至锅炉中进行燃烧时,

满足产生二噁英的条件。二噁英类物质的熔点及沸点高,常温下是固体,不溶于水,易溶于 CCl₄。二噁英类物质在环境中稳定性高,生物降解性迟缓,在低温下稳定存在,一般加热到 800 ℃才会降解。而要大量破坏二噁英类物质,焚烧温度则需要超过 1 000 ℃,且一旦冷却又可重新合成^[23]。

根据二噁英产生的条件,宜将污泥耦合燃烧温度控制在 800 ℃以上。循环流化床(CFB)锅炉及煤粉锅炉的炉膛燃烧温度都远高于 800 ℃,且燃料在炉内停留时间远大于 2.0 s,为二噁英的燃烧分解提供了充足的时间。曾多等^[24]在重庆市进行燃煤耦合污泥发电实践中,对二噁英采用“3T+E”原则进行控制,即采用对燃烧温度(Temperature)、停留时间(Time)、紊流程度(Turbulence)和过量空气量(Excess)4 种因素进行控制,可有效控制污泥耦合燃煤燃烧过程中二噁英的生成。

2 市政污泥干化方法

提高市政污泥热值最直接的方法是降低污泥的含水率。目前,对污水处理厂产出的 80% 含水率污泥脱水方法包括深度脱水和热干化方法,后者根据污泥与热源的接触方式,可分为直接干化和间接干化 2 种方式。

2.1 污泥深度脱水工艺

污泥中所含的水分可以分为自由水、间隙水、污泥固体颗粒表面的吸附水和细胞内的结合水。其中前两者可以通过机械压滤等方法脱除,而后两者则需要经过深度脱水才能脱除,主要通过降解污泥固体颗粒外胞外聚合物(EPS)实现。经过深度脱水处理后,污泥的含水率可由 80% 下降至 60% 左右。He 等^[25]解释了 EPS 的降解原理,如图 2 所示。通过物理、化学和生物方法使细胞裂解分离出部分污泥固体颗粒表面的吸附水和细胞内的结合水,同时 EPS 有机絮体会被分解成总有机碳。

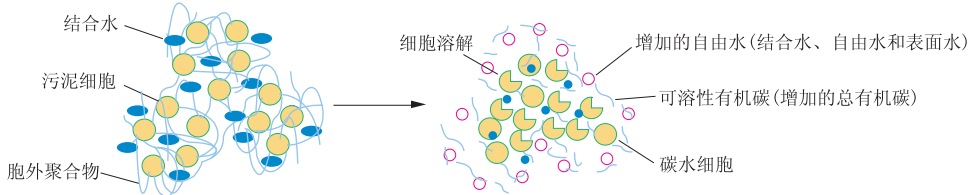


图 2 污泥固体颗粒胞外聚合物降解原理

Fig. 2 Degradation principle of the extracellular polymeric substances of the sludge solid particles

部分深度脱水工艺需向污泥中投加石灰等碱类药剂,脱水过程中并不能完全将 Ca²⁺去除,因此脱水后污泥中 Ca²⁺的含量增加。应对耦合污泥后燃料的燃烧特性影响进行研究,以免对燃煤电厂运行造

成负面影响。陈丹丹等^[26]通过研究发现化学预处理方法对改善污泥脱水性能有较好的效果,在污泥絮凝方面有很大的优势。其中酸处理对污泥脱水能力和脱水速率提升较明显。而高级氧化法脱水

效果又优于酸碱法,处理后污泥含水率可降低到 52% 左右,脱水速率提升 50%~90%。相比之下,高级氧化法投资成本和运行成本都较高。甄广印等^[27]总结了高级氧化法对污泥深度脱水的强化作用,使用臭氧和 Fenton 法强化污泥脱水效果,但此类方法普遍存在工艺复杂、能耗高、投资大等问题。

2.2 污泥干化工艺

2.2.1 直接干化工艺

直接干化工艺一般采用高温热介质直接与污泥接触,如火力发电厂空气预热器前的高温烟气,烟气温度在 350 ℃ 左右。芮延年^[28]通过旋翼式沸腾干燥法对污泥进行无害化处理,采用 600 ℃ 的热风供热,系统具有热质效率高、污泥被强制流态化、系统设备小等特点。但由于高温气体直接与污泥接触,导致污泥中的有机物被气化产生大量异味尾气,同时产生大量水蒸气。因此需设置复杂的尾气处理系统,以保证系统达到环保要求。某厂家的旋翼式沸腾污泥干化系统如图 3 所示,采用热风炉为干化系统供热风,也可将电厂高温烟气作为热源。

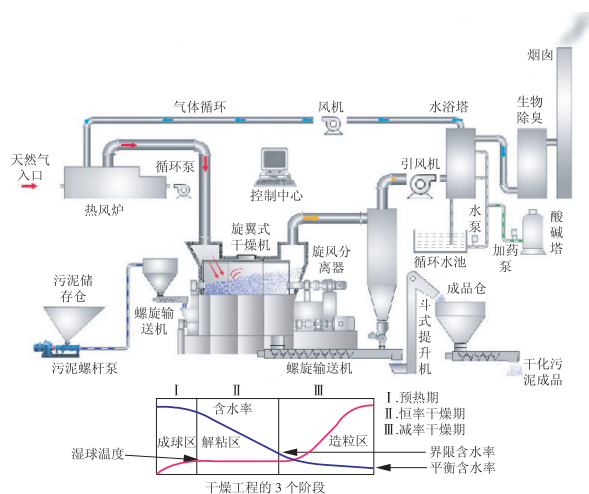


图 3 旋翼式沸腾污泥干燥系统

Fig. 3 Rotor boiling sludge drying system

干燥可分为预热期、恒率干燥期和减率干燥期 3 个阶段。汪翠萍等^[29]采用喷雾干燥方法干化污泥,将 500 ℃ 的高温烟气喷入污泥后,烟气温度在 0.5 s 内迅速降低到 100 ℃ 以下,热利用率高达 80% 以上。干化工艺后的尾气经过合理的处理,均可满足环保要求。苑宏英等^[30]采用太阳能产生的高温气体对污泥仅喷雾热干化。随着喷入量增加,冷凝水中磷酸盐质量分数基本不变,氨氮呈下降趋势;干化后污泥溶出的阴阳离子变化趋势相同,且随着含水率的升高,呈现增大趋势;冷凝水中的阴阳离子呈现先上升后下降的趋势;干化后污泥中的重金属除镉之外其余略有增加。

2009 年,华电集团滕州新源热电有限公司对污泥进行掺烧处理发电实践,实现城市污泥的无害化、资源化处理。该项目充分利用电厂烟气余热,采用旋翼式沸腾污泥直接干化工艺(160 ℃ 烟气干化,1 500 ℃ 焚烧),开创了国内 100 MW 以上机组污泥焚烧处理的先例。

2.2.2 间接干化工艺

间接干化工艺中热介质将热能传递给受热面,由受热面再传递给污泥。热介质包括饱和蒸汽、导热油和热风等。已经实现工程应用的大型间接干化设备包括:空心桨叶干化设备、圆盘干化设备和薄层干化设备等。林莉峰等^[31]在上海竹园污泥干化焚烧工程中,采用 6 台 4 轴空心桨叶式干燥机,单台换热面积为 200 m²,处理 600 t/d 含水率约 80% 的市政污泥。针对国内污泥含砂量较高的情况,在桨叶表面喷涂碳化硅涂层增强受热面的耐磨性能。空心桨叶污泥干化系统如图 4 所示。

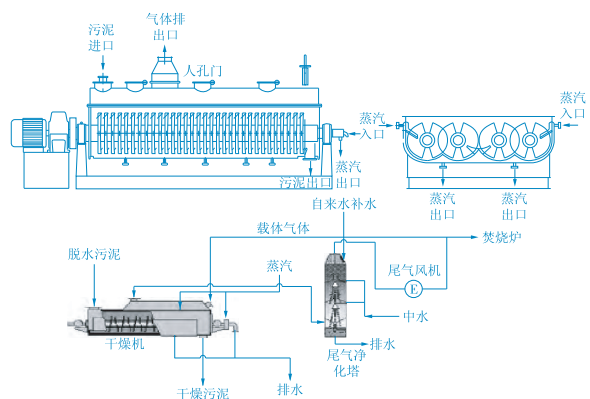


图 4 空心桨叶污泥干燥设备

Fig. 4 Hollow paddle sludge drying equipment

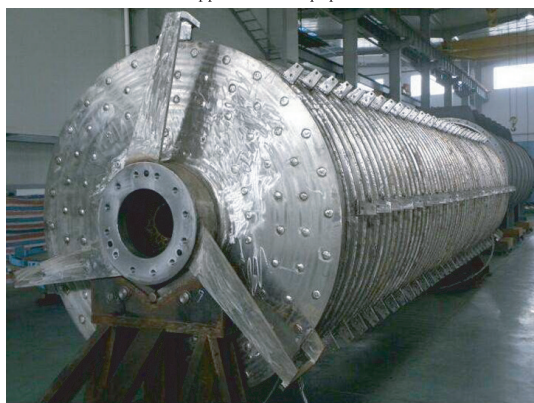
对比图 3 和图 4 可见,直接干化和间接干化系统最大的区别是前者的尾气处理装置较多、流程较长、操作相对复杂,而后者由于热源温度一般较低(150 ℃),与污泥接触后产生的挥发性有机物及水蒸气量较前者少,因此污泥干化后尾气的处理设备相对简单。王沈兵等^[32]探讨了桨叶式污泥干化设备的若干问题,主轴和壳体以及疏水系统的设计充分考虑湿污泥干化过程中的腐蚀及磨损、脱水量大等特性,通过优化设计及加工工艺,桨叶式污泥干化设备将更加适应市场对于黏度高、流动性差、腐蚀性突出和磨损严重的污泥干化需求。

程刚等^[33]对圆盘干燥技术进行了详细介绍,应用于市政污泥干化的圆盘干燥器换热面积可达到 400 m²,单台污泥处理量为 100 t/d。同样针对国内市政污泥含砂率高的特点,设备与污泥接触面也强化了防磨涂层。圆盘污泥干化设备如图 5 所示,该设备可根据客户需求调整成品污泥的含水率(10%~

40%不等),具有设备占地面积小,能耗相对空心桨叶设备略低,设备年利用小时数较高等特点。耿震等^[34]在设计圆盘式污泥干化系统时,通过圆盘干燥方法将 80% 含水率的市政污泥半干化至含水率 40%,然后耦合至电厂发电。圆盘干燥方法在市政污泥干化领域应用前景广阔。



a 设备外观
a Appearance of equipment



b 内部结构
b Internal structure

图5 圆盘污泥干燥设备

Fig. 5 Disc sludge drying equipment

薄层污泥干化设备结构如图6所示。龚旭等^[35]在上海青浦区污泥干化厂采用了薄层干化设备对 200 t/d 市政污泥进行干化后耦合发电厂发电,项目取得良好效果。毛梦梅等^[36]通过研究薄层干化设备干化市政污泥的特性,发现污泥干化过程中会有少量的有机物分解,导致干化后的污泥有机物挥发分略有降低。随着干化的进行,污泥的含水率下降,干化效率逐渐降低。在深圳市上洋污泥焚烧项目中,薄层干化设备也得到了成功应用^[37]。

严俊泉等^[38]创新地提出将薄层干化和带式干化相耦合的两段式污泥干化工艺,污泥经过该工艺处理后的含水率可下降至 15% 左右。工艺系统具有安全可靠、节能低耗、出泥含水率可调等特点。但带式干化工艺占地面积较大,导致该组合工艺流程长、操作较为复杂。

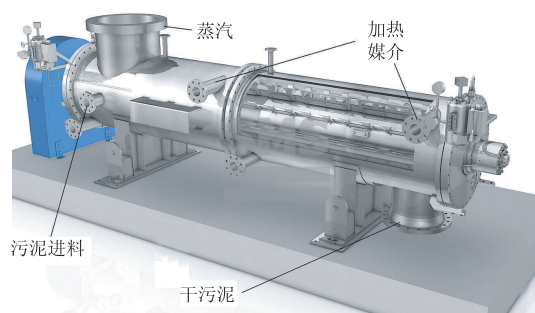


图6 薄层污泥干化设备

Fig. 6 Thin layer sludge drying equipment

2.2.3 3种市政污泥耦合发电工艺对比

曾多等^[24]和陈大元等^[6]总结对比了污泥直接焚烧、直接干化和间接干化耦合燃煤电厂发电的技术经济特点,见表4。

3 不同炉型的市政污泥耦合发电方法

目前燃煤电厂广泛使用的是煤粉锅炉和 CFB 锅炉。其中煤粉锅炉普遍适配 300 MW, 600 MW 和 1 000 MW 机组。CFB 燃烧技术是近 20 年发展起来的新一代燃烧技术,在煤种适应性、变负荷能力及控制污染物排放方面具有独特优势。目前,300 MW 规模及以下已有成熟使用 CFB 锅炉的案例,600 MW 规模的电厂使用 CFB 锅炉也在积极研发和实践中。国家能源集团陕西彬长发电有限公司新建 600 MW CFB 锅炉 1 台,目前正处于前期研发和实施准备阶段。CFB 锅炉技术的发展为污泥耦合燃煤电厂发电提供了新的机遇和挑战。煤粉锅炉和 CFB 锅炉耦合市政污泥发电工艺流程如图 7 所示。由图 7 可见,采用煤粉炉耦合市政污泥工艺,经过干化后的污泥需与煤粉一同进入磨煤机,混合均匀后喷入锅炉炉膛内燃烧。而采用 CFB 锅炉耦合市政污泥工艺,污泥直接通过活塞泵泵入锅炉炉膛内燃烧。

3.1 煤粉锅炉

王雪等^[39]在研究了市政污泥掺烧对煤粉锅炉的影响后发现,20% 含水率污泥掺烧后对锅炉炉膛温度影响较小,随着污泥掺烧比例的增加,锅炉燃烧效率下降。由于污泥所含碳分和硫分均低于动力煤,燃烧后烟尘含量和 SO₂ 质量分数降低。李峰等^[40]研究了上海某机组煤粉锅炉中掺烧 60% 含水率市政污泥,结果表明,燃料中污泥掺烧比例达到 7.30%,各设备运转正常,燃烧稳定,污染排放达到环保要求,掺烧污泥后锅炉效率下降了约 0.34%。魏林清^[41]在 220 t/h 蒸发量的煤粉锅炉中分别选取 40 MW 和 50 MW 两种典型负荷条件下,掺烧 10%, 20%, 30% 和 35% 含水率为 40% 的半干化市政污泥。结果表明,污泥掺配后的煤质与原锅炉设计煤

表 4 市政污泥耦合燃煤电厂发电技术经济性对比

Tab. 4 Technical and economic performances of the coupling of municipal sludge combustion and coal-fired power plants

项目	污泥直接掺烧	直接干化耦合掺烧	间接干化耦合掺烧
干化热源	无要求	锅炉空气预热器前高温烟气、低温排烟或人造热风	电厂饱和蒸汽、导热油、热空气
工艺流程	湿污泥直接输送至煤场,与煤混合后进入破碎机(循化流化床)或磨煤机(煤粉炉)。工艺流程相对简单、可靠	污泥干化工艺相对复杂,尾气处理工艺复杂,热源选择较灵活。干化污泥直接送入磨煤机或煤场	间接干化装置要求较高,需防止蒸汽凝结水污染。干化污泥直接送入磨煤机或煤场
技术优势	(1)技术最直接、简单; (2)投资少、建设快、运行成本低; (3)避免产生恶臭气体; (4)利用锅炉污染物脱除系统可完全满足污泥掺烧后的排放标准	(1)降低干化过程中污泥爆炸的风险; (2)炉膛高温环境可消解污泥中有害物质和干化过程中产生的废气; (3)利用锅炉污染物脱除系统可完全满足污泥掺烧后的排放标准	(1)污泥掺烧量可调、实现规模化应用; (2)炉膛高温环境可消解污泥中有害物质和干化过程中产生的废气; (3)利用锅炉污染物脱除系统可完全满足污泥掺烧后的排放标准
存在问题	掺烧污泥量较少;易出现由于掺混不均导致制粉系统堵塞或者干燥出力不足;湿污泥露天堆放或长时间堆放可能会散发臭气,造成掺混环境恶劣	掺烧污泥量介于直掺和间接干化之间;抽取高温烟气会对锅炉热效率产生负面影响;需设置完善的尾气处理系统	系统较复杂;需设置完善的干化尾气处理系统
专用设备	湿污泥储存仓,液压输送设备,槽罐车	污泥直接干化装置,储存仓	污泥间接干化装置,储存仓
入炉污泥	含水率 80%,热值较低	含水率 10%~40% 可调,热值较高	含水率 10%~40% 可调,热值较高
环保排放	炉床温度较低,可能产生二噁英,环保风险高	污泥中随水分蒸发携带的 H_2S 、 NH_3 、 CH_4 和 C_2H_6S 、水蒸气等废气,需完善的尾气处理设施	污泥干化过程中,水分冷凝后残余的不凝气可以使用送风机送入炉膛中进行焚烧,但会降低锅炉效率
适用炉型	CFB 锅炉、回转窑	适用于绝大部分锅炉	适用于绝大部分锅炉
初期投资	低	中等	较高
运行费用	低	中等	高

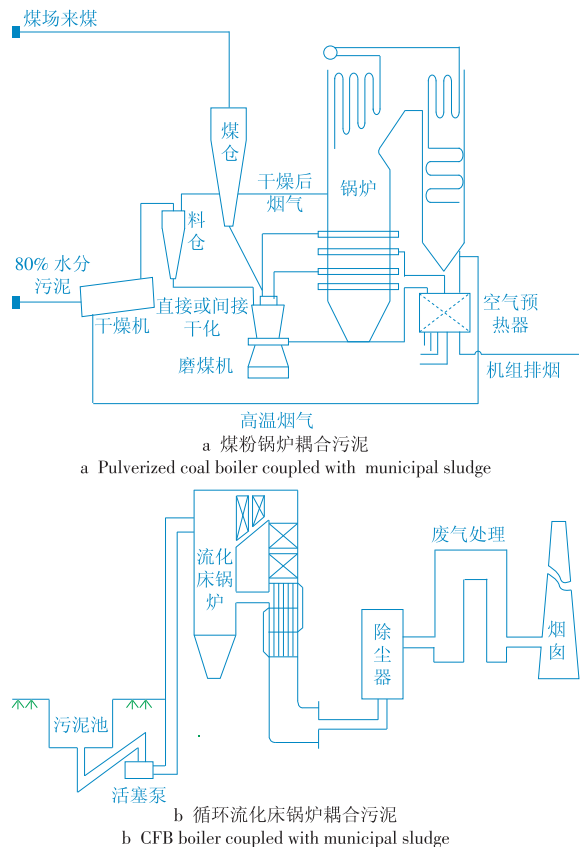


图 7 不同锅炉耦合市政污泥工艺流程

Fig. 7 Combustion processes of municipal sludge coupled with different types of boilers

质相比,水分、灰分、挥发成分增加,发热量和碳含量有所降低,总体说来煤质虽稍有下降但相差不大。根据污泥含水率变化确定污泥掺烧最佳比例,

污泥耦合至煤粉锅炉掺烧,对原煤输送系统及锅炉燃烧稳定性影响很小。

Tan 等^[42]对 100 MW 煤粉锅炉中掺烧市政污泥进行模拟并对比现场试验数据,结果表明掺烧 10% 质量分数以内的市政污泥,掺烧效果较好。降低污泥的含水率有利于提升掺烧效果,但当含水率降至 40% 以下后,对掺烧效果的提升能力有限。当掺烧比例在 20% 时,NO_x 的排放量仍可达到环保标准,但当比例高于 10% 时,混合燃料的着火性逐渐下降,同时可能会影响点火性能和火焰稳定性。市政污泥的掺烧会增加锅炉的维护成本,但对发电企业而言会产生可观的经济效益。Deng 等^[43]对煤粉炉中掺烧市政污泥后的飞灰和重金属迁移特性进行了分析,结果表明,随着市政污泥与煤粉的混合燃烧,会形成新的化合物成分飞灰。矿物分析显示透辉石、钙长石和铁共晶的形成可以降低煤与污泥混合的灰熔温度,尖晶石和莫来石的形成可以提高混合物的灰熔温度。

3.2 CFB 锅炉

杨叙军^[44]在 2007 年对市政污泥耦合至 CFB 锅炉进行了有益的尝试,处理市政污泥规模为 400 t/d,污泥掺烧量控制在 50% 以内时,技术经济效益较好。朱化军等^[45]利用 CFB 锅炉进行协同焚烧验证研究,发现污泥掺烧比例不高于 40% 时 CFB 锅炉可稳定运行,烟气排放达标,粉煤灰重金属含量低于国家农用粉煤灰标准。当锅炉炉膛温度达到 850 ℃

以上时,能够较为彻底地将有机物转化 CO_2 ,并有效遏制二噁英的合成。但因湿污泥进入炉膛焚烧会降低炉膛温度,造成末端空气预热器腐蚀,大量水分蒸发会造成烟气量增加,从而导致烟气流速增加,进一步加剧炉体和水冷壁管磨损,因此将市政污泥耦合至CFB锅炉前,应对锅炉相关部件进行适应性改造。邱旻昊^[46]在苏州江远热电掺烧苏州吴忠区市政污泥,建议80%含水率市政污泥的掺烧量小于10%,烟气中 SO_2 等污染物排放指标满足国家环保标准。

相比煤粉炉耦合市政污泥燃烧发电,CFB锅炉具有其独特的优势^[47-48]。

(1)适应性强。CFB燃烧稳定,炉内温度场均匀,特别适合焚烧高水分、低热值的劣质燃料。以市政污泥为辅助燃料可显著降低运行成本。

(2)焚烧效率高。由于炉内气体和固体、固体和固体之间的强烈混合,使污泥与灼热的床料直接接触,增大了污泥的热解率。

(3)烟气排放性能好。由于CFB采用低温(850~950℃)及分级燃烧,限制了热力型 NO_x 的形成。在CFB中加入合适的吸附剂(如石灰石),可大大降低 SO_2 和 HCl 的排放。在稀相区喷尿素或氨水可进行炉内脱氮,保证 NO_x 、 SO_2 和 HCl 的排放浓度符合环保要求。

(4)CFB锅炉的结构简单,设有机械传动部件,故障少,建造费用低。

(5)空气过剩系数降低,能耗更低。

Shao等^[49]对CFB锅炉掺烧市政污泥后重金属和有机污染物的排放特性进行了研究,结果表明,炉渣和飞灰中重金属质量分数的分布呈相同趋势,即 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{V} > \text{Cd} > \text{Co}$ 。其中Co和Cu在炉渣中为典型污染物,Pb和Zn则更多地存在于飞灰中。多环芳烃等有机污染物随着污泥的掺烧量增加而显著增加。脂肪族有机污染物主要存在于飞灰中。

Hartman等^[50]在CFB锅炉中掺烧干化市政污泥,对 NO_x 的含量、重金属富集进行了研究,结果表明,烟气中CO的质量分数与 NO_x 的质量分数密切相关,CO质量分数越低, NO_x 的质量分数将越高。炉渣和飞灰中富集了丰富的Hg,Cd,Zn,Cu,Cr,Ni,Pb和其他微量元素。

Miller等^[19]也指出,CFB以固有对劣质燃料的优异适应性,针对市政污泥作为燃料飞灰量大的特点,其具有较好的耦合燃烧优势。

3.3 污泥耦合发电对工艺设备的影响

根据污泥的特性,耦合至燃煤电厂发电中会对

发电工艺设备造成如下负面影响^[51-54]。

(1)掺烧污泥后烟气流速和所含灰分增加,会加大受锅炉热面的磨损率。

(2)燃料含水率增加,导致磨煤机出力下降、能耗上升。建议污泥掺混比例应以混合燃料总含水率不超过9%~10%为限。

(3)燃料含水率过高可能会造成磨煤机进口部位燃料堆积,甚至导致给煤系统堵塞。

(4)污泥的添加影响锅炉辅机的选择,当煤中添加20%的污泥时,所需的空气量降低15%。

(5)煤的灰熔点温度要高于纯污泥的灰熔点温度。随着配比中污泥比例的提高,灰分的4个特征温度依次降低。

4 展望与建议

市政污泥耦合燃煤电厂发电技术在我国已经有10余年的研究和实践,多种类型的污泥干化设备和锅炉焚烧设备投入使用并稳定运行,积累了丰富的工程应用经验,验证了该工艺的可靠性。随着我国现阶段供给侧的改革,煤电行业明显处于过剩状态。随着城市化进程的不断加快,污泥围城的情况将日益严重。如何将二者有机地结合在一起,在盘活城市周边的燃煤电厂资产的同时又可以解决城市的环保问题,这将是一个双赢的选择,市场前景广阔。在市政污泥耦合燃煤发电厂项目实施过程中,提出以下建议。

(1)因地制宜,根据燃煤电厂和污泥产地周边的资源状况,选择合理优化的工艺,研究最佳的污泥干化度和燃料增加量平衡点。

(2)充分考虑到污泥中含砂率对干化设备和锅炉设备的负面影响,尽量减少原污泥中的含砂量。同时,应促进污泥干化设备受热面、锅炉受热面耐磨材料的研发和使用。

(3)污泥耦合焚烧后,对产生的废气和废渣进行实时监测和治理,以满足日趋严格的环保标准。

(4)研究合理的污泥耦合焚烧发电的政策优惠机制,如增加燃煤电厂的计划发电量、或者电网以优质电价收购污泥耦合的发电量等。

(5)建议各地政府在协调水务企业、燃煤发电企业、电网企业和政府关系上进行创新,避免项目建成后出现停摆现象。

参考文献:

- [1]国家发展改革委,住房城乡建设部.关于印发《“十三五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》的通知:发改环

- 资[2016]2849号[A/OL].(2017-01-22)[2021-06-30].
https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201701/t20170122_962224.html?code=&state=123.
- [2]张杰.污泥资源化有望成为行业发展趋势[N].中国环境报,2016-10-11(10).
- [3]国家发展改革委,住房城乡建设部.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:建科[2011]34号[A/OL].(2011-03-14)[2021-06-30].http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201103/t20110330_203014.html.
- [4]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:国能发电力[2017]75号[A/OL].(2017-11-27)[2021-06-30].http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201712/t20171204_3065.htm.
- [5]国家能源局,环境保护部.关于燃煤耦合生物质发电技改试点项目建设的通知:国能发电力[2018]53号[A/OL].(2018-06-26)[2021-06-30].<http://hbdrc.hebei.gov.cn/common/ueditor/jsp/upload/20180810/67791533889757526.pdf>.
- [6]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.
- [7]VESILIND P A, HSU C C. Limits of sludge dewaterability [J]. Water Science and Technology, 1997, 36(11): 87-91.
- [8]ZHEN G Y, LU X Q, WANG B Y, et al. Enhanced dewatering characteristics of waste activated sludge with Fenton pretreatment: Effectiveness and statistical optimization [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014, 8(2): 267-276.
- [9]刘亮,张翠珍.污泥燃烧热解特性及其焚烧技术[M].长沙:中南大学出版社,2006.
- [10]王罗春,李雄,赵由才.污泥干化与焚烧技术[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [11]MAGDZIARZ A, WILK M. Thermogravimetric study of biomass, municipal sewage sludge and coal combustion [J]. Energy Conversion and Management, 2013(75): 425-430.
- [12]贾明生,凌长明.烟气酸露点温度的影响因素及其计算方法[J].工业锅炉,2003,82(6):31-35.
JIA Mingsheng, LING Changming. Factors of affecting the flue gas acid dew point temperature and its way of calculation [J]. Industrial Boiler, 2003, (82)6: 31-35.
- [13]陈莉佳,许天明,卢宇飞.市政污泥脱水—干化—焚烧不同工艺路线碳排放分析[J].净水技术,2019,38(S1):155-159.
CHEN Lijia, XU taiming, LU Yufei. Analysion carbon emission form different dewatering-drying-incineration process of municpal sludge [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(S1): 155-159.
- [14]马盟,赵雅旋.污泥干化耦合燃煤发电技术研究[J].化学工程与装备,2018(11):325-327.
- [15]戴晓虎,赵玉欣,沙超,等.我国污水处理厂污泥含砂特征及成因调研[J].给水排水,2014,40(S1):75-79.
DAI Xiaohu, ZHAO Yuxin, SHA Chao, et al. Investigation on the status and causes of sludge sand content of wastewater treatment plants in China [J]. Water and Wastewater Engineering, 2014, 40(S1): 75-79.
- [16]王建伟,廖足良,毕学军,等.典型城市污水处理厂污泥无机质含量及含砂率分析[J].环境工程,2013,31(S1):321-324.
WANG Jianwei, LIAO Zuliang, BI Xuejun, et al. The analysis of the inorganic content and sand content in sludge from typical municipal wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(S1): 321-324.
- [17]李文兴,郑秋鹏,廖建胜,等.温州市污泥干化焚烧处理工程技术改造[J].中国给水排水,2017,33(2):90-95.
LI Wenxing, ZHENG Qiujuan, LIAO Jiansheng, et al. Technical transformation of sludge drying and incineration treatment project in Wenzhou city [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 90-95.
- [18]周吉奎,刘勇,刘牡丹,等.市政污泥中重金属赋存状态及生物有效性[J].有色金属科学与工程,2017,8(3):99-102.
ZHOU Jikui, LIU Yong, LIU Mudan, et al. Study on occurrence state and bioavailability of heavy metals in municipal sludge [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(3): 99-102.
- [19]MILLER B B, KANDIYOTI R, DUGWELL D R. Trace element behavior during co-combustion of sewage sludge with Polish coal [J]. Energy & Fuels, 2004, 18(4): 1093-1103.
- [20]张宏亮,赵莹,程桂石,等.生物质锅炉中碱金属氯化物迁移规律及对炉内结焦的影响[J].中国特种设备安全,2004,31(12):57-61.
ZHANG Hongliang, ZHAO Ying, CHENG Guishi, et al. Study on the migration of alkali metal chloride and the influence to agglomeration in biomass boiler [J]. China Special Equipment Safety, 2004, 31(12): 57-61.
- [21]高建生,祁清福,卢红玲,等.关于锅炉掺烧高挥发分、易结焦烟煤调试的探讨[J].中国电力(技术版),2012(7):50-53.
GAO Jiansheng, QI Qingfu, LU Hongling, et al. Discussion on boiler blending combustion of high volatile content and coking coal [J]. China Electric Power(Technology Edition), 2012(7): 50-53.
- [22]卢红玲.350 MW 超临界锅炉结焦原因分析及处理[J].中国电力(技术版),2016(6):52-55.
LU Hongling. Analysis of the coke reason and handling in 350MW supercritical pressure boiler [J]. China Electric Power(Technology Edition), 2016(6): 52-55.
- [23]张萍萍,沈东君.垃圾焚烧过程中二噁英的控制方法[J].环境与发展,2019,31(7):59,63.
ZHANG Pingping, SHEN Dongjun. Control method of dioxins in waste incineration [J]. Environment and Development, 2019, 31(7): 59, 63.

- [24]曾多,于常春.燃煤耦合污泥发电技术探讨[J].重庆高等专科学校学报,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.
- [25]HE D Q, WANG L F, JIANG H. et al. A fenton-like process for the enhanced activated sludge dewatering [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 272: 128-134.
- [26]陈丹丹, 窦昱昊, 卢平, 等. 污泥深度脱水技术研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(10): 4722-4746.
CHEN Dandan, DOU Yuhao, LU Ping, et al. A review on sludge deep dewatering technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(10): 4722-4746.
- [27]甄广印, 吴太朴, 陆雪琴, 等. 高级氧化污泥深度脱水技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1108-1113, 1119.
ZHEN Guangyin, WU Taipu, LU Xueqin, et al. A review on advanced oxidation processes for enhancing sewage sludge dewatering [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(9): 1108-1113, 1119.
- [28]芮延年. 旋翼式沸腾干燥法污泥无害化处理技术[J]. 苏州大学学报(工科版), 2008, 28(4): 1-5.
RUI Yannian. Sludge innocent treatment technology of rotor fluidization desiccation [J]. Journal of Soochow University (Engineering Science Edition), 2008, 28(4): 1-5.
- [29]汪翠萍, 俞其林, 高志永, 等. 600 t/d 新型污泥喷雾干化-焚烧示范工程污染物去除效果[J]. 环境工程学报, 2013, 7(8): 3196-3202.
WANG Cuiping, YU Qilin, GAO Zhiyong, et al. Pollutant removal of a new spray drying/incineration demonstration project with capacity of 600 t/d for sludge treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(8): 3196-3202.
- [30]苑宏英, 刘文渊, 汤韬, 等. 污泥喷雾热干化特性[J]. 化工进展, 2015, 34(4): 1139-1142, 1170.
YUAN Hongying, LIU Wenyuan, TANG Tao, et al. Performance of sprayed sludge drying [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(4): 1139-1142, 1170.
- [31]林莉峰, 王丽花. 上海市竹园污泥干化焚烧工程设计及试运行总结[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 15-21.
- [32]王沈兵, 李霞, 刘得隼. 桨叶式污泥干化机若干问题探讨[J]. 节能, 2017, 36(12): 37-39.
- [33]程刚, 杜杰, 陶国建. 圆盘污泥干化技术及工程应用介绍[J]. 水工业市场, 2011(12): 65-67.
- [34]耿震, 许敏. 一种圆盘式污泥干化系统工艺设计实例[J]. 给水排水, 2015, 41(10): 55-57.
- [35]龚旭, 王贤, 张敏. 污泥处置之道-污泥干化协同发电技术[J]. 净水技术, 2016, 35(S1): 75-77.
GONG Xu, WANG Xian, ZHANG Min. A method of sludge treatment-technology of sludge drying synergized with power generation [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(S1): 75-77.
- [36]毛梦梅, 戴勇. 市政污泥干化特性研究[J]. 资源节约与环保, 2016(4): 151-152.
- [37]邱锐. 深圳市污泥干化焚烧工艺运行成本分析[J]. 给水排水, 2014, 40(8): 30-32.
- [38]严俊泉, 袁刚. “两段法”污泥干化工艺的应用探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(6): 47-51.
YAN Junquan, YUAN Gang. Discussion on application of two-stage sludge drying technology [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 47-51.
- [39]王雪, 李多松. 污泥掺烧技术在煤粉炉上应用的试验研究[J]. 电力环境保护, 2007, 23(2): 61-62.
WANG Xue, LI Duosong. Experimental research on the mixing combustion technique of pulverized coal with mud [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2007, 23(2): 61-62.
- [40]李峰, 龚文斌. 塔式锅炉掺烧含水率 60% 污泥耦合发电技术试验研究[J]. 锅炉技术, 2017, 50(5): 31-36.
LI Feng, GONG Wenbin. Experimental study on coupling power generation technology of tower boiler mixed with 60% moisture sludge [J]. Boiler Technology, 2017, 50(5): 31-36.
- [41]魏林清. 煤粉锅炉污泥掺烧技术的试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2008, 26(8): 9-12.
- [42]TAN P, MA L, XIA J, et al. Co-firing sludge in a pulverized coal-fired utility boiler: Combustion characteristics and economic impacts [J]. Energy, 2017(119): 392-399.
- [43]DENG C Y, ZHANG C, TAN P, et al. The melting and transformation characteristics of minerals during co-combustion of coal with different sludges [J]. Energy & Fuels, 2015, 29(10): 6758-6767.
- [44]杨叙军. 循环床锅炉掺烧污水处理厂污泥的研究[J]. 江苏锅炉, 2007(1): 11-12.
- [45]朱化军, 徐俊, 刘伟京, 等. 市政污泥热电厂循环流化床协同焚烧技术验证研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3101-3107.
ZHU H J, XU J, LIU W J, et al. Validation of municipal sludge incineration in circulation fluidized bed boiler from a thermal power plant [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(12): 3101-3107.
- [46]邱旻昊. 循环流化床焚烧城市污水处理厂污泥的探讨[J]. 污染防治技术, 2013, 26(4): 44-46.
QIU Minhao. Discussion on circulating fluidized bed incineration of municipal sewage sludge [J]. Pollution Control Technology, 2013, 26(4): 44-46.
- [47]卢啸风. 大型循环流化床锅炉设备与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [48]韩义, 张奇月, 王研凯, 等. 基于 BP 神经网络的 300 MW 循环流化床机组出力预测[J]. 华电技术, 2020, 42(12): 1-6.
HAN Yi, ZHANG Qiyue, WANG Yankai, et al. Performance

- prediction on a 300 MW CFB based on BP neural network [J]. Huadian Technology, 2020, 42(12): 1-6.
- [49] SHAO J G, YAN R, CHEN H P, et al. Emission characteristics of heavy metals and organic pollutants from the combustion of sewage sludge in a fluidized bed combustor [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(4): 2278-2283.
- [50] HARTMAN M, SVOBODA K, POHORELY M, et al. Combustion of dried sewage sludge in a fluidized-bed reactor [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005(44): 3432-3441.
- [51] 吴浪, 李畅. 掺烧污泥对电厂锅炉的影响[J]. 锅炉制造, 2014(5): 14-17.
WU Lang, LI Chang. The influence of mixed incineration of sludge in power plant boiler [J]. Boiler Manufacturing, 2014(5): 14-17.
- [52] 芮新红, 周强泰, 张宁生, 等. 煤粉锅炉掺污泥燃烧的计算和分析[J]. 江苏电机工程, 2003, 22(6): 24-26.
RUI Xinhong, ZHOU Qiangtai, ZHANG Ningsheng, et al. Calculation and analysis of coal burning with sludge-added in pulverized-fuel boiler [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2003, 22(6): 24-26.
- [53] 李磊, 乔琳, 刘振生, 等. 燃煤电厂湿法脱硫污泥处置与固化技术研究进展[J]. 华电技术, 2020, 42(3): 72-77.
LI Lei, QIAO Lin, LIU Zhensheng, et al. Progress in research on the treatment and solidification of wet desulfurized sludge in coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(3): 72-77.
- [54] 吴剑, 戚永义. 污泥掺烧对燃煤锅炉机组的影响[J]. 电力学报, 2012, 27(4): 338-341.
WU Jian, QI Yongyi. Analysis on the boiler unit of co-incineration with sludge in the pulverized coal power plant [J]. Journal of Electric Power, 2012, 27(4): 338-341.

(本文责编: 惠忻)

作者简介:

陈全喜(1981—), 男, 湖北武汉人, 工程师, 从事节能环保方面的研究(E-mail: 13476082827@163.com)。

付江涛*(1977—), 男, 湖北石首人, 高级工程师, 从事节能环保方面的研究(E-mail: jt_flyer@163.com)。