

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.009

燃煤机组掺烧城市污泥发电的干化工艺对比

颜莹莹^{1,2}, 黄荣敏¹, 王保龙^{1,2}, 郭科赶^{1,2}, 黄盛鹏^{1,2}, 刘向磊^{1,2},
成浩科¹, 陈雨柔^{1,2}

(1. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430014; 2. 六安市三峡智慧水管家有限公司, 安徽 六安 237005)

摘要: 在政策的驱动下,近年来利用火电厂协同处置污泥的项目逐渐增多,污泥火电厂协同焚烧已经成为国内污泥处置的重要方式之一。污水处理厂外运的湿污泥含水率一般为80%,低位热值仅为100~200 kJ/kg,如果直接送入电厂燃煤锅炉燃烧,将使炉膛温度降低,锅炉效率大幅下降,影响锅炉正常燃烧,因此将湿污泥干化至40%含水率以下,提高污泥热值后进行掺烧是比较合理的掺烧方式。目前,燃煤电厂掺烧污泥的干化方式主要有烟气直接干化法、蒸汽间接干化法和低温带式直接干化法。其中,烟气直接干化法投资和运行成本较低,但污泥掺烧比例不能太高,否则需抽取的烟气量较大,可能对锅炉热力系统产生影响,造成汽温不足。因此,该工艺的选取需要结合机组热力计算综合确定。蒸汽间接干化法的系统较为复杂,投资和运行成本较高,但对锅炉运行影响较小,可以布置较大规模的污泥干化掺烧系统。低温余热干化法的投资成本较高,运行成本较低,对系统的排烟量和排烟温度的依赖程度较高,污泥掺烧比例不能太高,因此,该工艺的选取也需要结合机组热力计算综合确定。

关键词: 污泥电厂掺烧; 直接干化; 间接干化; 污泥处置

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0053-06

Comparison of Drying Processes of Coal-fired Generating Units Mixed with Municipal Sludge

YAN Ying-ying^{1,2}, HUANG Rong-min¹, WANG Bao-long^{1,2}, GUO Ke-gan^{1,2},
HUANG Sheng-peng^{1,2}, LIU Xiang-lei^{1,2}, CHENG Hao-ke¹, CHEN Yu-rou^{1,2}

(1. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430014, China; 2. Lu'an Three Gorges Smart Water Management Co. Ltd., Lu'an 237005, China)

Abstract: Driven by policies, in recent years, the use of thermal power plants for sludge co-processing has gradually increased. Co-incineration of sludge in thermal power plants has become one of the important methods of domestic sludge disposal. The moisture content of the wet sludge transported by sewage treatment plants is generally about 80%, and its low calorific value is only 100~200 kJ/kg. If the wet sludge is directly sent to the coal-fired boiler of the power plant for combustion, it will reduce the furnace temperature and the boiler efficiency, and affect the normal combustion of the boiler. Therefore, it is more reasonable to dry the wet sludge to water content below 40% to improve the calorific value of the

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1908700)

通信作者: 颜莹莹 E-mail: yanyingying2018@163.com

sludge before co-incineration. At present, the drying methods of mixed-combustion sludge in coal-fired power plants mainly include direct flue gas drying, indirect steam drying, and low-temperature belt direct drying. Among them, the investment and operation cost of the direct flue gas drying method is low, but the sludge blending ratio should be controlled. Otherwise, a large amount of flue gas needs to be extracted, which may affect the boiler thermal system, leading to an insufficient steam temperature. Therefore, the selection of the process needs to be comprehensively determined by combining the thermal calculation of the unit. The system of the indirect steam drying method is complicated with high investment and operation costs, but it has little influence on the operation of the boiler. A larger scale sludge drying and co-burning system can be set up. The low-temperature waste heat drying method has higher investment costs, lower operating costs, and a higher degree of dependence on the exhaust volume and temperature of the system, and the proportion of sludge blending should not be too high. Therefore, the process selection also needs to be combined with the thermal calculation of the unit.

Key words: mixed burning of sludge in thermal power plant; direct drying; indirect drying; sludge disposal

污泥在工业窑炉中进行掺烧处置已经成为当前污泥处置的重要补充方式,在国内以燃煤电厂掺烧污泥为主。从政策层面,我国对污泥进行火电厂掺烧处置持鼓励态度。《城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)》(以下简称《指南》)将污泥电厂掺烧作为推荐方式之一。《指南》中提到:采用火电厂协同处置,既可以利用火电厂余热作为干化热源,又可以利用火电厂已有的焚烧和尾气处理设备,节省投资和运行成本。在具备条件的地区,鼓励污泥在火力发电厂锅炉中与煤混合焚烧。《电力发展“十三五”规划(2016—2020)》鼓励多元化能源利用,因地制宜试点示范,开展燃煤与生物质耦合发电、燃煤与光热耦合发电示范与应用。在京津冀、长三角、珠三角布局一批燃煤与污泥耦合发电示范项目。《关于推进燃煤与生物质耦合发电的指导意见》鼓励、支持污泥耦合发电项目,并给予政策补贴。《关于调整完善资源综合利用产品及劳务增值税政策的通知》对垃圾处理、污泥处理处置劳务免征增值税。《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),旨在发挥世界最大清洁高效煤电体系的技术领先优势,依托现役煤电高效发电系统和污染物集中治理设施,构筑城乡生态环保平台,兜底消纳农林废弃残余物、生活垃圾以及污水处理厂、水体污泥等生物质资源,破解秸秆田间直焚、污泥垃圾围城等社会治理难题,促进电力行业

特别是煤电的低碳清洁发展。

从污泥火电厂掺烧项目实践的角度看,我国目前已有数十家燃煤电厂开展了污泥协同焚烧工作,还有一些燃煤电厂正在筹建污泥协同焚烧项目。

为了进一步促进电厂协同处置有机废弃物,2018年6月,国家能源局、生态环境部联合发布《关于燃煤耦合生物质发电技改试点项目建设的通知》,确定技改项目试点共计84个,其中包括29个污泥火电厂协同焚烧项目。

在严峻的环保压力下,目前新增的污泥焚烧项目超过70%采用协同焚烧的方式,其中火电厂协同焚烧占比接近50%,已经成为目前国内污泥处置的主要方式之一。在政策鼓励和电厂转型的双重驱动下,未来一段时间内污泥火电厂协同焚烧处置的项目还将持续增加。

1 污泥火电厂掺烧的适宜含水率

污水处理厂外运的湿污泥含水率一般为80%,低位热值仅为100~200 kJ/kg,如果直接送入锅炉燃烧,可以借助锅炉的高温环境将污泥中的有机病原体杀死,实现污泥无害化、减量化处理,但由于湿污泥含水率较高,热值太低,直接掺烧将使炉膛温度降低,锅炉效率大幅下降,从而影响锅炉的正常运行。因此,将湿污泥干化,提高污泥热值后进行掺烧是比较合理的掺烧方式。

典型污泥及干化污泥与典型煤种的煤质参数对比见表1。从表1可以看出,湿污泥的含水率一般

为 80%,低位发热量较低,甚至为负值;干化污泥水分降低,热值显著升高,当污泥含水率降至 40% 以下时,基本与国内年轻褐煤接近。干化污泥整体属于高灰分、高挥发分、低热值燃料。

表 1 典型污泥、干污泥与典型煤种的煤质参数对比
Tab.1 Comparison of coal quality parameters among typical sludge, dried sludge and typical coal

项目	污泥 1	污泥 2	干污泥 1	干污泥 2	宝清年轻褐煤
收到基水分/%	82.34	79.30	40	20	50
收到基灰分/%	9.86	11.75	32.19	41.95	12.20
干燥无灰基挥发分/%	90.67	93.94	92.00	87.05	62.88
收到基碳/%	3.05	4.48	17.58	19.63	25.28
收到基氢/%	0.32	0.70	2.09	3.32	2.22
收到基氧/%	3.67	2.97	6.33	11.19	9.80
收到基氮/%	0.54	0.69	1.58	3.21	0.24
收到基硫/%	0.22	0.12	0.23	0.70	0.26
低位发热量/(kJ·kg ⁻¹)	-430	-310	5 060	7 280	8 830
干燥基热量/(kJ·kg ⁻¹)	9 230	8 080	10 101	9 730	

此外,污泥具有粘滞特性,这是指污泥聚集黏附在材料接触表面的现象。大量的研究表明,当污泥含水率降至 40%~60% 时,污泥呈现粘滞状态,因此这一区间通常称为污泥的“粘滞区”^[1]。在粘滞区内,污泥具有很强的黏附-结团能力,两者的存在使污泥在火电厂协同掺烧时产生两个问题:一是污泥料仓架桥卸料不畅;二是磨煤机运行效率下降。但是当污泥含水率<40% 时,其粘滞性会显著下降^[2]。

综合以上两方面考虑,污泥火电厂协同掺烧的含水率宜低于 40%。同时,污泥干化至含水率为 40% 左右时,干化机型式的选择范围也较大^[3]。

目前,燃煤电厂掺烧污泥的干化方式主要有烟气直接干化法、蒸汽间接干化法和低温带式直接干化法,本研究将根据调研数据,对这几种干化方式进行技术经济分析和比较。

2 烟气直接干化工艺

2.1 工艺描述

来自污水处理厂含水率为 80% 的污泥通过汽车送到电厂污泥干化车间的地下湿污泥储存仓,由污泥螺杆泵送入回转筒干燥机或旋翼式干燥机。采用锅炉高温低氧烟气作为热源对污泥进行干化,干化后的污泥通过料仓送入磨煤机与煤掺混。干

化后的尾气(含污泥蒸发的水分以及恶臭气体)通过独立管道送入锅炉炉膛上部燃烧或尾部污染物处理系统。整个干化过程在封闭负压状态下进行,具体工艺流程见图 1。

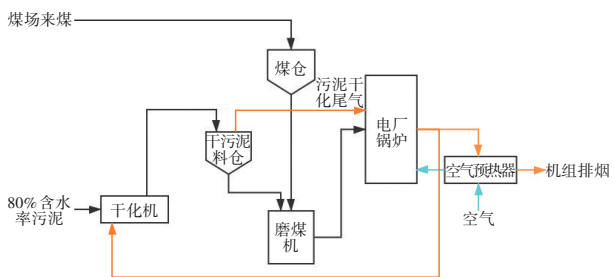


图 1 烟气直接干化污泥掺烧工艺流程
Fig.1 Flow chart of flue gas direct drying sludge and blending combustion process

2.2 干化参数和工艺特性

烟气干化工艺主要的热量来自于锅炉中的中温烟气。以规模为 100 t/d、含水率为 80% 的湿污泥处理为例,烟气直接干化(干燥方式为破碎回转滚筒式)主要参数如表 2 所示。

表 2 烟气直接干化工艺主要参数
Tab.2 Main parameters of direct flue gas drying process

项目	干化污泥含水率/%	初始干燥烟气温度/℃	干燥后烟气温度/℃	污泥初始温度/℃	干燥烟气用量/(10 ⁴ m ³ ·h ⁻¹)
数值	35	350	110	20	2.5

利用热烟气干燥 100 t/d 的湿污泥,需要抽取锅炉空预器入口烟气约 2.5×10⁴ m³/h,通过核算,单台 350 MW 机组锅炉在 70% 额定工况下,烟气量约 70×10⁴ m³/h,抽取烟气量占空预器入口总烟气量的 3.57%。抽取的烟气不再经过空预器参与换热,对锅炉性能(如锅炉效率)会产生一定影响。

此方案中污泥掺烧比例不能太高,否则需抽取的烟气量较大,可能对锅炉热力系统产生影响,造成汽温不足^[4]。因此,该工艺的选取需要结合机组热力计算综合确定。此外,干化设备不能距电厂锅炉主系统太远,否则烟气管道系统庞大,占地空间大,不利于设备布置。

目前,华能莱芜电厂、华能临沂电厂、华电潍坊电厂等均采用该技术掺烧一定比例的污泥,整体上运行较为稳定,未出现影响机组安全稳定运行的情况。

2.3 运行成本分析

按照日处理 100 t 污泥计算,污泥含水率从 80% 干化至 35%,运行成本约为 143.5 元/t,具体见表 3。

表 3 烟气直接干化工艺运行费用

Tab.3 Operating cost of direct flue gas drying process

项目		数值
电费	单位原泥耗电量/(kW·h·t ⁻¹)	50
	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.35
	单位原泥用电成本/(元·t ⁻¹)	17.5
原泥设备维护成本/(元·t ⁻¹)		19
人工费	职工定员/人	10
	年工资及福利费/(万元·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)	10
	单位人工成本/(元·t ⁻¹)	27
消耗高温烟气折合费用/(元·t ⁻¹)		80
合计/(元·t ⁻¹)		143.5

3 蒸汽间接干化工艺

3.1 工艺描述

来自污水处理厂含水率为 80% 的污泥通过汽车送到电厂污泥干化车间地下湿污泥储存仓,由污泥输送泵送入间接式蒸汽干化机(如圆盘干化机或桨叶干化机),污泥在干化机内与热源间接换热,整个干化过程是在封闭负压状态下进行,干燥后的污泥经封闭式传送带运往干燥棚,与原煤混合后通过输煤皮带输送至煤仓,随原煤一同进入磨煤机研磨后再送入炉膛燃烧。

采用机组汽轮机抽汽作为污泥干化热源,经减温减压调节后在污泥干化设备内与污泥间接接触换热,蒸汽放热变为凝结水后返回机组汽水系统,污泥干化后经过降温进入污泥干化仓送至煤场或上煤皮带与煤掺混后送入制粉系统。污泥干化过程中产生的废气经除尘器除去大部分固体颗粒,再进入冷凝器与冷却水换热,不凝结废气经风机送入锅炉焚烧,凝结废水送入污水处理厂进行处理后达标排放^[5]。蒸汽间接干化污泥掺烧工艺流程见图 2。

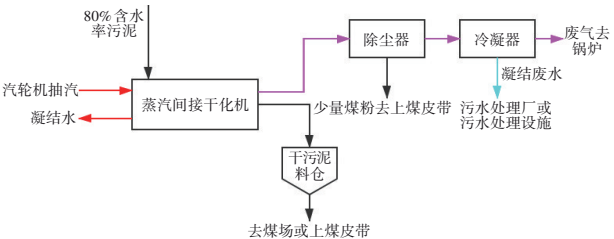


图 2 蒸汽间接干化污泥掺烧工艺流程

Fig.2 Flow chart of steam indirect drying sludge and blending combustion process

3.2 干化参数和工艺特性

蒸汽干化工艺主要利用蒸汽的相变潜热进行加热,采用电厂的低压辅助蒸汽,并减温减压成饱和蒸汽后再利用。以规模为 100 t/d、含水率为 80% 的湿污泥处理为例,蒸汽间接干化(干燥方式为圆盘干化或桨叶干化)主要参数如表 4 所示。

表 4 蒸汽间接干化工艺运行参数

Tab.4 Main parameters of steam indirect drying

项目	干化污泥含水率/%	干燥蒸汽压力/MPa	干燥蒸汽温度/℃	污泥进料温度/℃	干燥后热水温度/℃	干化所需蒸汽量/(t·h ⁻¹)
数值	35	0.6	250	20	80	21.16

蒸汽间接干化掺烧污泥工艺的主要优点:①设备布置较为灵活,不受发电机组的影响,但需要考虑蒸汽管道的布置;②对锅炉运行的影响低于烟气直接干化法;③可以布置较大规模的污泥干化掺烧系统。该工艺的主要缺点是干化系统较为复杂,投资和运行维护成本较高。目前,华润电力(常熟)有限公司、南京华润热电有限公司等都采用了该技术掺烧污泥,运行情况整体较好。

3.3 运行成本分析

按照日处理 100 t 污泥计算,含水率从 80% 干化至 35%,运行成本约为 202.57 元/t,具体成本如表 5 所示。

表 5 蒸汽间接干化工艺运行费用

Tab.5 Operating cost of indirect steam drying process

项目		数值
电费	单位原泥耗电量/(kW·h·t ⁻¹)	50
	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.35
	单位原泥用电成本(以 80% 含水率计)/(元·t ⁻¹)	17.5
单位原泥设备维护费/(元·t ⁻¹)		29
人工费用	职工定员/人	10
	年工资及福利费/(万元·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)	10
	单位人工成本/(元·t ⁻¹)	27
蒸汽费用	单位污泥消耗蒸汽量/(t·t ⁻¹)	0.85
	蒸汽单价/(元·t ⁻¹)	150
	单位污泥消耗蒸汽费用/(元·t ⁻¹)	127
污水处理费用	污水处理费单价/(元·t ⁻¹)	3
	单位污泥污水量/(t·t ⁻¹)	0.69
	单位污泥污水处理费用/(元·t ⁻¹)	2.07
合计/(元·t ⁻¹)		202.57

4 低温带式直接干化工艺

低温带式直接干化工艺主要分为低温余热技

术和低温热泵技术。由于电厂具有较为丰富的余热资源,污泥电厂掺烧的低温干化工艺一般采用低温余热技术。

4.1 工艺描述

污泥低温余热技术是将烟气通过热回收系统将水加热至 90℃,然后 90℃ 的热水通过热交换系统对机体的空气进行加热并得到干燥的 50~70℃ 的热空气,干燥的热空气通过循环风机由下而上经过干燥机网带,然后与平铺在传送网带上成型的污泥进行充分的热交换,当干燥的热空气穿过两层或三层污泥网带后,将转换成湿度>40%、温度为 40~60℃ 的潮湿热空气。潮湿的热空气通过风机循环穿过蒸发器,与其内 28℃ 左右的冷却水进行热交换,潮湿的热空气达到露点温度后,水蒸气凝结成水排出。干燥的热空气再次与 90℃ 的热水进行热交换并反复循环,整个过程中循环空气是在密闭的空间内运行,几乎不向外排放废气。具体工艺流程

如图 3 所示。

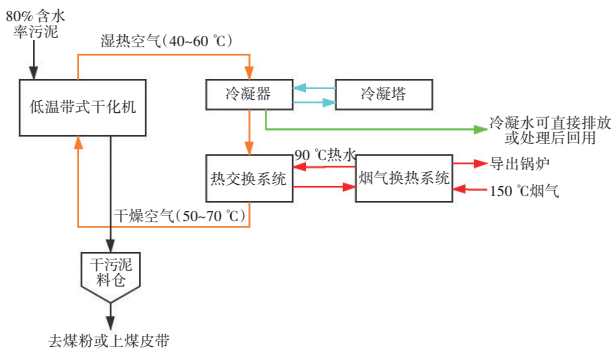


图 3 低温余热干化工艺流程

Fig.3 Flow chart of low temperature waste heat drying process

4.2 干化参数和工艺特性

低温余热技术主要利用锅炉空预器出口排烟的余热对污泥进行干化。以规模为 100 t/d、初始含水率为 80% 的湿污泥处理为例,低温余热干化工艺的主要参数如表 6 所示。

表 6 低温余热干化工艺参数

Tab.6 Main parameters of low temperature waste heat drying process

项目	干化污泥含水率/%	79~90℃循环水用量/(m ³ ·t ⁻¹)	33~45℃冷却水用量/(m ³ ·t ⁻¹)	初始干化烟气温/℃	干化后烟气温/℃	干化烟气用量/(10 ⁴ m ³ ·h ⁻¹)
数值	35	15	35	130	110	30

利用锅炉排烟余热干燥 100 t/d 的湿污泥,需要抽取锅炉空预器出口烟气约 30×10⁴ m³/h,通过核算,单台 350 MW 机组锅炉在 75% 热耗率验收工况下,烟气量约 70×10⁴ m³/h,抽取烟气量占空预器入口总烟气量的 42.86%,会对锅炉效率产生一定影响。因此,该工艺的选取需要结合机组热力计算综合确定。

低温余热干化工艺的主要优点:①采用全封闭化设计,与间接干化工艺相比,无需复杂的尾气处理装置;②干化温度低,冷凝水处置简单,一般可满足纳管标准,直接排放;③模块化结构设计,安装和运行较为简单。该工艺的主要缺点主要体现在两方面:①受限于余热资源量,污泥处理规模不能太大;②干化温度低,干化效率低于烟气直接干化和蒸汽间接干化,因此低温干化机设备占地面积较大,整体设备投资较高。

目前,该技术主要应用于部分小型燃煤电厂的污泥处置项目,污泥日处理量均在 100 t 以下。

4.3 运行成本分析

按照污泥日处理规模为 100 t、初始含水率为

80%、减重后污泥的含水率为 35% 计算,具体运行成本为 84 元/t,如表 7 所示。

表 7 低温余热干化运行费用

Tab.7 Operating cost of low temperature waste heat drying process

项目		数值
电费	单位原泥耗电量/(kW·h·t ⁻¹)	60
	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.35
	单位原泥用电成本(以 80% 含水率计)/(元·t ⁻¹)	21
单位原泥设备维护费成本/(元·t ⁻¹)		30
人工费	职工定员/人	10
	年工资及福利费/(万元·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)	10
	单位人工成本/(元·t ⁻¹)	27
循环水费用/(元·t ⁻¹)		6
合计/(元·t ⁻¹)		84

低温余热干化技术采用锅炉排烟余热对污泥进行干化,而该部分余热实际上不计入电厂回收的热量,因此该处未考虑余热的折合成本费用。但实际运行中,由于烟气用量较大,实现的难度较高。

5 不同干化工艺投资运行成本对比

如果按照日处理污泥量为 100 t、含水率从 80%

降至35%进行测算,上述三种干化工艺投资费用及运营成本如表8所示。如果处理规模较大,实际投资费用能有所降低。

表8 不同干化工艺的投资和运行费用

Tab.8 Investment and operating cost of different drying process

干化工艺	烟气直接干化	蒸汽间接干化	低温余热干化
处理规模/(t·d ⁻¹)	100	100	100
投资单价/(万元·t ⁻¹)	20	30	30
投资费用/万元	2 000	3 000	3 000
运行成本/(元·t ⁻¹ 湿泥)	143.5	202.57	84

其中低温余热技术采用锅炉排烟,考虑到该技术需要较大的烟气量,同时锅炉低负荷时排烟温度和排烟量可能无法满足污泥干化需求,需要借助蒸汽或热泵等技术,运行成本还会相应大幅升高。

6 结论

污泥干化脱水至40%以下,可作为低热值的燃料,并通过燃煤电站锅炉掺烧进行无害化处置。目前,常用的燃煤电厂污泥干化方法主要有烟气直接干化法、蒸汽间接干化法和低温余热干化法。其中,烟气直接干化法的投资和运行成本较低,但污泥掺烧比例不能太高,否则需抽取的烟气量较大,可能对锅炉热力系统产生影响,造成汽温不足。因此,该工艺的选取需要结合机组热力计算综合确定。蒸汽间接干化法的系统较为复杂,投资和运行成本较高,但对锅炉运行的影响较小,可以布置较大规模的污泥干化掺烧系统。低温余热干化法的投资成本较高,运行成本较低,对系统的排烟量和排烟温度的依赖程度较高,污泥掺烧比例不能太高,因此,该工艺的选取也需要结合机组热力计算综合确定。

以上三种污泥干化方式各有利弊,需结合项目的实际情况进行选择。此外,目前国内也涌现出如利用烟气余热的污泥低温干化技术等“以废治废”的工艺路线,将电厂的余热资源进一步开发利用,

为污泥火电厂协同焚烧的处置路径提供了新的思路。

参考文献:

- [1] LI B, WANG F, CHI Y, *et al.* Adhesion and cohesion characteristics of sewage sludge during drying [J]. *Drying Technology*, 2014, 32(13):1598-1607.
- [2] 王磊. 市政污泥脱水干化及粘滞特性变化规律研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
WANG Lei. Study on the Change Rules of the Dehydration, Drying and Viscous Properties of Municipal Sludge [D]. Shanghai: Donghua University, 2018(in Chinese).
- [3] 卢骏营. 入炉污泥含水率对污泥干化焚烧工艺影响研究[J]. *能源研究与信息*, 2016, 32(2):75-79.
LU Junying. Investigation on the influence of moisture content on the sludge drying and incineration [J]. *Energy Research and Information*, 2016, 32(2):75-79 (in Chinese).
- [4] 王一坤, 邓磊, 柳宏刚, 等. 湿污泥掺烧量对抽烟气干化污泥耦合发电机组影响[J]. *热力发电*, 2020, 49(11):47-54.
WANG Yikun, DENG Lei, LIU Honggang, *et al.* Effects of wet sludge amount on sludge-coal co-combustion generation unit using extracted flue gas to heat sludge [J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(11):47-54(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).

作者简介: 颜莹莹(1982-), 男, 福建泉州人, 硕士, 高级工程师, 从事污泥处理工程设计及研究工作。

E-mail: yanyingying2018@163.com

收稿日期: 2020-12-07

修回日期: 2020-12-29

(编辑: 丁彩娟)