

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.009

顺义区污泥干化焚烧处理工程工艺设计

李彪, 周欣, 高波, 韩正平, 门延涛
(中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 北京市顺义区污水处理产生的污泥中部分成分含量不达标,不适用于混合填埋、土地改良、园林绿化以及农用,且热值偏低,焚烧处理时需添加辅助燃料。顺义区污泥处理工程(一期)处理规模 400 t/d,采用“热干化+焚烧”工艺,设置 5 台 100 t/d 的空心桨叶干化机及 2 台 135 t/d 的流化床锅炉,烟气净化系统采用“SNCR+半干脱酸塔+活性炭吸附+袋式除尘器+湿法脱酸塔+湿式静电除尘器+防白烟”工艺,以达到《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)的要求。该项目的试运行结果表明,主要烟气排放数据可以满足要求,同时,也反映出同类项目需在设计阶段重点关注的问题:将容易产生臭气的设备集中布置并充分设置吸风口,以达到有效控制臭气的目的;通过加大输送设备选型参数、缩短输送距离、控制污泥含水率等措施,确保半干污泥输送系统的通畅性;在条件允许的情况下尽量选取锅炉房作为补充蒸汽的热源,进而节约生产成本。经测算,天然气消耗量是影响运行成本的主要因素。

关键词: 市政污泥; 热干化; 焚烧

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0063-06

Design of Sludge Drying Incineration Treatment Process in Shunyi District

LI Biao, ZHOU Xin, GAO Bo, HAN Zheng-ping, MEN Yan-tao

(North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: Municipal sludge in Shunyi District, Beijing City is not suitable for mixed landfill, land improvement, landscaping and agricultural use, and its calorific value is low, so auxiliary fuel should be added in incineration treatment. The treatment capacity of Shunyi District sludge treatment project (phase I) is 400 t/d, and the process is thermal drying and incineration. There are five hollow blade dryers with treatment capacity of 100 t/d and two fluidized bed boilers with treatment capacity of 135 t/d. The flue gas purification system consists of SNCR, semi-dry deacidification tower, activated carbon adsorption, bag filter, wet deacidification tower, wet electrostatic precipitator and anti-white smoke device, and the exhaust is required to meet *Standard for Pollution Control on the Municipal Solid Waste Incineration* (GB 18485 - 2014). The trial operational results of the project showed that the main flue gas emission data could meet the discharge requirements. Meanwhile, it also reflected several problems that similar projects should pay attention to in the design stage: equipments which were easy to produce odor were arranged centrally and the suction outlet was fully set to achieve the purpose of effective odor control; the smoothness of semi-dry sludge conveying system was properly maintained by increasing parameters of transportation equipment, shortening the transportation distance and controlling sludge water

content; if the conditions permitted, boiler room should be selected as far as possible to supplement the heat source of steam, so as to save operational cost. It was estimated that natural gas consumption was the main factor affecting the operational cost.

Key words: municipal sludge; thermal drying; incineration

1 项目概况

顺义区某污泥处理工程位于北京市顺义区杨镇,总规模为679 t/d,其中一期工程处理规模为400 t/d(含水率80%),用地面积2.36 hm²(35.4亩),采用“热干化+焚烧”处理工艺,配置5台100 t/d空心桨叶干燥机及2条135 t/d的焚烧线,工程建设投资约为1.95亿元。

该项目于2018年5月开工建设,并于2020年8月进入调试运行阶段。

2 泥质特性

经调研,顺义区现有7座在运行的污水处理厂,选取区内最具代表性的污水处理厂进行泥质成分检测。

检测结果中污泥燃烧特性如表1所示,污泥中重金属含量如表2所示。

表1 污泥燃烧特性

Tab.1 Combustion characteristics of sludge

项 目	空气干燥基	收到基	干基	干燥无灰基
水分/%	—	82.2	—	—
工业分析/%	水分	5.36	—	—
	灰分	48.16	8.87	49.83
	挥发分	44.53	8.38	47.05
	固定碳	2.95	0.55	3.12
高位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	10.40	—	10.99	—
低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)	9.587	-0.064	10.188	—
全硫/%	0.61	0.11	0.64	—
元素分析/%	碳	23.35	4.39	24.67
	氢	3.36	0.63	3.55
	氮	3.87	0.73	4.09
	氧	16.29	3.06	17.21
	氯	0.154	—	—

表2 污泥中重金属含量

Tab.2 Heavy metal content in sludge

项 目	测定值	《城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》(GB/T 24600—2009)	《城镇污水处理厂污泥处置 园林绿化用泥质》(GB/T 23486—2009)	《城镇污水处理厂污泥处置 农用泥质》(CJ /T 309—2009) (B 级)	《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》(GB/T 23485—2009)	《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)	是否符合规范要求	
pH 值	7.72	5.5 ~ 6.5	6.5 ~ 10	5.5 ~ 7.8	5.5 ~ 9	5.5 ~ 10	5 ~ 10	√
含水率/%	82.2	< 65	< 65	< 40	≤60	< 65 (混合填埋) < 45 (填埋覆土 添加剂)	< 80 (干化焚烧; 助燃焚烧) < 50 (自持焚烧)	×
总铬/(mg · kg ⁻¹)	71.5	< 600	< 1 000	< 1 000	< 1 000	< 1 000	—	√
总铜/(mg · kg ⁻¹)	138	< 800	< 1 500	< 1 500	< 1 500	< 1 500	—	√
总锌/(mg · kg ⁻¹)	927	< 2 000	< 4 000	< 4 000	< 3 000	< 4 000	—	√
总铅/(mg · kg ⁻¹)	7.77	< 300	< 1 000	< 1 000	< 1 000	< 1 000	—	√
总镉/(mg · kg ⁻¹)	1.55	< 5	< 20	< 20	< 15	< 20	—	√
总镍/(mg · kg ⁻¹)	96.4	< 100	< 200	< 200	< 200	< 200	—	√
总砷/(mg · kg ⁻¹)	0.044	< 75	< 75	< 75	< 75	< 75	—	√
总汞/(mg · kg ⁻¹)	1.59	< 5	< 15	< 15	< 15	< 25	—	√
总氰化物/ (mg · kg ⁻¹)	1.16	< 10	< 10	—	—	< 10	—	√
挥发酚/ (mg · kg ⁻¹)	2.55	< 40	< 40	—	—	< 40	—	√
细菌总数/ (MPN · kg ⁻¹ 干污泥)	3.5 × 10 ⁷	< 10 ⁸	< 10 ⁸	—	—	—	—	√
矿物油/ (mg · kg ⁻¹)	5 × 10 ³	< 3 000	< 3 000	< 3 000	< 3 000	< 3 000	—	×

由检测结果可以看出,该区域污泥具有以下四个特点:①碳含量及热值偏低,选择焚烧处理工艺时需添加辅助燃料;②污泥重金属含量基本满足现行资源化利用标准的要求,但矿物油含量不满足标准的要求,不能用于土地改良、园林绿化以及农用;③含水率、矿物油含量均不能达到污泥混合填埋的标准要求,需要进一步处理后才能进行混合填埋或者作为填埋覆土添加料使用;④含水率略高于《城镇

污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》的要求,可能是由于取样的随机性造成的,因此,进行焚烧处理时需要将污泥含水率进行限制。

3 处理工艺比选

《城镇污水处理厂污泥处置 分类》(GB/T 23484—2009)将污泥处置方法分为四类:土地利用、污泥填埋、建材利用、污泥焚烧^[1-2],几种工艺对比见表 3。

表 3 主要污泥处理工艺对比

Tab.3 Comparison of main sludge disposal processes

项目	土地利用	污泥填埋	建材利用	污泥焚烧
前提条件	①含有较高的植物所必需的营养成分; ②有毒有害物质含量不得超过国家规定的污泥农用标准; ③经过较严格的无害化处理	满足《城镇污水处理厂污泥处置 混合填埋用泥质》(GB/T 23485—2009)要求	①需先进行干化或焚烧处理; ②干化污泥应对污泥的成分做适当调整,使其成分与制砖黏土的化学成分相当	满足《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)的要求
优点	资源化利用率的有力手段	①成本低; ②操作简单直接; ③见效快	资源化利用效果显著	①技术成熟,成功案例较多; ②减量化明显; ③彻底消灭病菌,可利用净化系统控制烟气污染物排放,无害化效果好; ④炉渣可进行建材利用,实现资源化
缺点	①重金属等污染物成分不易控制; ②有机肥料出路问题	①易造成二次污染; ②减量化不明显,占用土地资源较多; ③仅可作为一种过渡处理方式	需进行干化或焚烧处理,干化后的污泥还需要对污泥的成分做适当调整	建设及运行成本高

由表 3 可知,对比其他几种处理方法,污泥焚烧作为一种最彻底的处理方式,具有无害化、减量化效果明显的特点,考虑到北京市现有其他类型的处理方式面临着资源化产品出路难寻以及可填埋库容逐渐减少的问题,该工程选择了污泥焚烧作为最终的处理方案。

同时,为降低运行成本,有效利用焚烧余热,在焚烧系统前设置了污泥热干化系统。

4 工艺设计

4.1 污泥热值

相关文献^[3]指出,中国城市污水厂脱水污泥干基低位热值(以下简称“干基热值”)范围为 5 844 ~ 19 303 kJ/kg,均值为 11 850 kJ/kg。其中北京清河污水处理厂污泥干基热值为 14 705 kJ/kg,北京威嘉污水处理厂污泥干基热值为 13 125 kJ/kg。

结合以上内容,考虑到污泥自持稳定燃烧的最低热值为 3 350 ~ 4 000 kJ/kg^[4],该项目接纳污泥干基热值范围为 7 256 ~ 15 000 kJ/kg,即入炉污泥热值为 3 350 ~ 7 996 kJ/kg。

计算公式^[5]如下:

$$Q_{\text{net,ar}} = Q_{\text{net,d}} \times \frac{100 - M_{\text{ar}}}{100} - b \times M_{\text{ar}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{net,ar}}$ 为收到基低位发热量, kJ/kg; $Q_{\text{net,d}}$ 为干基低位发热量, kJ/kg; M_{ar} 为收到基水分含量,该项目以 40% 计; b 为系数, 25.1。

污泥泥质检测报告显示,污泥干基热值为 10 188 kJ/kg,符合本项目接纳污泥的热值要求。

4.2 工艺流程

该工程采用热干化后焚烧的方式处理污泥。湿污泥首先由运输车辆卸入污泥接收仓,再通过污泥输送设备送至污泥储存仓,仓内污泥被送至干化机干化,干化后污泥通过半干污泥输送系统送入污泥焚烧炉焚烧处理。

焚烧产生的过热蒸汽作为污泥干化机热源,产生的炉渣经渣车外运至相关单位进行资源化利用,产生的飞灰采用水泥固化螯合稳定化相结合的技术进行处理后进入填埋场填埋。

全厂主要由污泥接收与储存系统、污泥干化系统、半干污泥焚烧系统、烟气处理系统等组成,工艺流程见图 1。

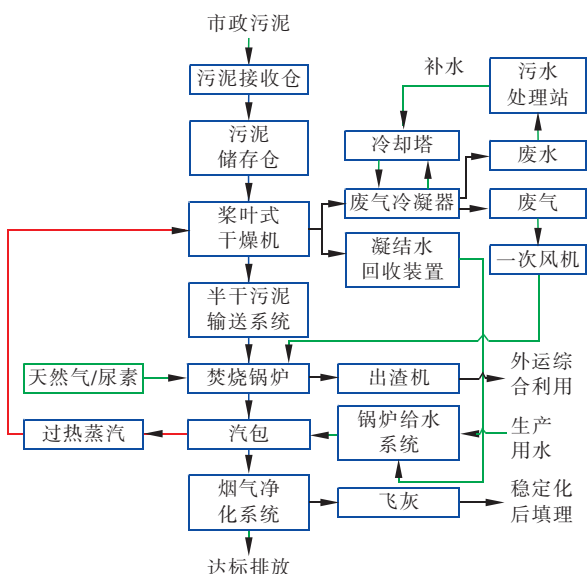


图1 污泥干化焚烧系统流程

Fig. 1 Flow chart of sludge drying and incineration system

4.3 污泥接收与储存系统

市政污泥由密闭污泥运输车运入厂区进行地磅称重后倒入有效容积为 40 m^3 的污泥接收仓,再由两台 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 的偏心螺杆泵送至3台 370 m^3 的污泥储存仓内储存,约可储存3 d的泥量,由仓下设置的5台(4用1备) $12 \text{ m}^3/\text{h}$ 偏心螺杆泵将污泥送入干化机的进口。

4.4 污泥干化系统

干化系统核心设备为5台 100 t/d (4用1备)的空心桨叶式干化机,通过蒸汽实现夹套传导间接加热,干燥产生的臭气送入焚烧炉焚烧处理。

干化机对含水率80%的污泥进行干化,干化热源为从锅炉引来的蒸汽,蒸汽分别进入干化机主轴和筒体夹套对干化机内污泥进行间接干化;干化后产生的蒸汽冷凝水送至焚烧间内的给水箱回用。干化后污泥(含水率40%)通过半干污泥输送系统送入污泥焚烧炉焚烧处理,干化后产生的尾气经汽水分离后,冷凝液体送入厂内污水处理站进行处理,少量不凝尾气送入锅炉内进行焚烧处理,整个过程中干化机物料侧处于负压状态,以避免污泥干化过程中的臭气对环境产生影响。

4.5 污泥焚烧系统

污泥焚烧系统设置2条 135 t/d (1用1备)的焚烧线,核心设备为流化床锅炉。其蒸汽参数: 18 t/h , 0.7 MPa , $200 \text{ }^\circ\text{C}$,为干化系统提供蒸汽热源。

锅炉炉膛部分为绝热炉膛和水冷壁,尾部烟道布置了对流管束、过热器、省煤器、空气预热器,焚烧后烟气经锅炉受热面换热后进入烟气处理系统。系统采用“3T+E”技术控制二噁英生成:保证炉内燃烧温度控制在 $850 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$,有利于有机物完全分解;烟气在该温度区间停留时间大于 2 s ;通过两层二次风的切向旋转促进炉内气体湍流,进而增强换热;取用较高的过量空气系数,确保污泥完全燃烧。

4.6 烟气净化系统

该项目烟气排放需满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)的要求,采用“选择性非催化脱 NO_x 工艺(SNCR)+半干脱酸塔+活性炭吸附+袋式除尘器+湿法脱酸塔+湿式静电除尘器+防白烟”的烟气净化工艺。

烟气在炉内进行SNCR脱硝后,进入半干塔,烟气中的酸性气体 HCl 、 HF 、 SO_2 与喷入的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行中和反应后被去除;烟气经半干塔脱酸处理后,随喷入的活性炭一起进入布袋除尘器进行除尘,与此同时烟气中的二噁英、重金属等污染物被捕捉;之后湿法脱酸塔对烟气进行进一步脱酸处理,湿式静电除尘器对烟气内的粉尘进行二次除尘,最终经过防白烟系统后由引风机加压送入烟囱排向大气。

5 整体运行效果

调试试运行期间(2020年9月),系统运行较为稳定,湿污泥储存及输送系统较为通畅,干化机出力及焚烧炉的焚烧能力均能满足生产需求。

鉴于烟气排放为环保类项目需重点关注的问题,烟气在线监测系统对烟尘、 SO_2 、 NO_x 、 HCl 、 CO 五项污染物排放情况进行记录,结果见表4。

表4 烟气污染物实测数据及排放标准对比

Tab. 4 Comparison of measured data and emission standards of flue gas pollutants $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

项目	国标 GB 18485—2014	数据 (一)	数据 (二)
烟尘	20	13.2	10.6
SO_2	80	18.2	29.4
NO_x	250	157.2	52.8
HCl	50	18.8	25.6
CO	80	7.3	6.8
Hg	0.05	—	—
Cd + Tl	0.1	—	—
Pb 等其他重金属	1.0	—	—
二噁英等	0.1	—	—

可见,各指标排放浓度满足国标要求,说明该项

目的烟气净化系统较为可靠。

项目目前处于调试运行阶段,重金属、二噁英等污染物尚未检测,因此不能对全部污染物的排放数据进行对比分析。但该项目在常规生活垃圾焚烧发电项目烟气净化工艺基础上增加了湿法洗涤及湿式静电除尘工艺,加之污泥焚烧产生的二噁英浓度较低^[6],预计该项目可全面达标排放。

6 主要经济技术指标

该项目工程建设投资约为1.95亿元,其中土建费用约为0.9万元,设备及安装费用约为1.05亿元。

表5 主要动力及物料消耗成本分析

Tab.5 Cost analysis of main power and material consumption

项 目	能源			物料						
	水	电	天然气	絮凝剂	氯酸钠	Ca(OH) ₂	螯合剂	消泡剂	阻垢剂	其他
消耗	715 kg/t	45 kW·h/t	25.2 m ³ /t	1.4 kg/t	0.5 kg/t	6.8 kg/t	0.4 kg/t	0.03 kg/t	0.18 kg/t	
成本/(元·t ⁻¹)	2.5	43.8	94.6	3.0	5.1	10.5	8.5	2.2	2.7	6.3
比例/%	1.4	24.5	52.8	1.7	2.9	5.8	4.7	1.2	1.5	3.5

7 工艺设计探讨

此类项目的工艺设计主要需注意三点问题:臭气控制、半干污泥输送以及补充汽源方案的确定。

7.1 关于臭气控制

该工程利用臭气收集系统将容易产生臭味空间气体收集,再由风机送至焚烧系统作为助燃空气焚烧处理,同时,设置活性炭除臭系统作为备用除臭设备。这种方式充分利用了“热干化+焚烧”处理方式的工艺特点,节省了占地、投资以及运营成本。

在工艺设备布置方面,需考虑全密封设计,将污泥接收、储仓、输送、干化等各系统均布置于室内,在体现集约化设计理念、节省占地空间、缩短物料输送距离、方便生产管理的同时,有利于控制臭气。

对于容易产生臭气的区域,如卸料区、半干污泥输送系统以及运行工况不稳定的干化区,在厂房布置方面,应本着集中布置的原则,尽可能将释放源影响的区域缩小,同时,在臭气收集系统设计时应加大空间通风次数,并对半干污泥输送系统增加局部排风点。

对于容易产生臭气的物料,如湿污泥、半干污泥、干化后产生的污水,均应采用密闭输送,避免设备密封不严、利用排水沟收集干化污水等情况。

但实际运行过程中,整套系统不能满负荷运行时,由于助燃风机未能达到额定工况,车间就会出现臭气逸散的情况。因此,在设计阶段需要计算出焚

相比在上海、深圳^[7]等地已投运的同类项目,工程建设费用相对较低。

经测算,在设计工况下,污泥处理成本约为323元/t。主要动力消耗为水、电、天然气,主要物料消耗为烟气净化及污水处理工段的絮凝剂、氯酸钠、Ca(OH)₂、螯合剂等。具体成本分析见表5。从表5可看出,天然气成本为94.6元/t,占到总成本的29.3%,占到能源物料消耗成本的52.8%,是影响污泥处理成本的第一要素。因此,原始污泥热值将直接影响此类项目的处理成本。

烧线各种运行工况下的风量平衡,进而应对很可能出现的进泥量波动的情况,确定备用除臭设备启动的时机,确保臭气不外逸。

7.2 关于半干污泥输送

半干污泥由于其自身形态及黏度的原因,容易在输送过程中产生堵塞、粘连的现象。该项目在调试过程中出现过由于污泥堵塞造成设备故障的情况,因此,半干污泥输送系统的通畅与否至关重要。

在设计角度上,应从三个方面避免以上问题:①输送设备选型参数适当考虑余量,并选用较好品牌及材质的设备;②尽量缩短物料输送距离,尤其是垂直提升的输送距离;③输送设备转接处的溜槽截面尺寸及倾斜角度需要适当加大^[8]。

另外,根据调试经验,污泥干化至含水率达30%~35%以后,半干污泥的输送情况得到了明显改善,主要原因是黏度降低和输送量减少。因此,建议在设计过程中,结合污泥热值及形态情况,将污泥干化程度对黏滞性及输送系统的影响,作为一个重点内容进行研究。

7.3 关于补充汽源

经计算,额定工况下,锅炉仅依靠污泥焚烧产生的蒸汽量无法达到干化工段需要的蒸汽量,即无法实现自平衡,不足部分蒸汽需投加天然气进行补充。该工程由于场地限制原因,直接将天然气投加到焚烧炉进行补燃。以污泥干基热值10 188 kJ/kg计

算,需补充蒸汽4.5 t/h,补充天然气420 m³/h(天然气热值以35 564 kJ/m³计)。

由于污泥焚烧炉比燃气锅炉热效率低,势必造成一定的能源浪费。若单独另建燃气锅炉房作为补充汽源,则1 h可节省天然气约32.6 m³,但对于前期泥质情况的调研、建设用地空间、整套系统的控制又提出了更高的要求。

污泥干基热值约为16 736 kJ/kg以上时,系统不需要添加任何辅助燃料,这一热值条件对于我国大多数污水处理厂来说都是较难达到的^[7],因此,在占地空间限制较小的情况下,推荐采用单独建设锅炉房的方式进行蒸汽补充。

8 结语

① 结合顺义区的具体情况,选择“热干化+焚烧”作为污泥的处理工艺,可解决顺义区污泥的出路问题,实现污泥的无害化、减量化处理。

② 项目工程建设费用约1.95亿元,投资较为合理;运行过程中影响成本的主要因素是辅助燃料的消耗。

③ 在设计过程中应重点关注除臭控制、半干污泥输送系统通畅性保障及补充汽源来源等内容。

参考文献:

- [1] 孙建升,叶雅丽,郑兴灿,等. 昆明市污水处理厂污泥处理工艺的研究与探讨[J]. 中国给水排水,2020,36(18):108-112.
SUN Jiansheng, YE Yali, ZHENG Xingcan, *et al.* Research and discussion on the sludge disposal technology of Kunming WWTPs[J]. China Water & Wastewater, 2020,36(18):108-112(in Chinese).
- [2] 程振敏,包松考,顾坚,等. 干化焚烧工艺用于温州市城市污水处理厂污泥处置[J]. 中国给水排水,2012,28(22):95-98.
CHENG Zhenmin, BAO Songkao, GU Jian, *et al.* Application of drying and incineration process to disposal of sludge from municipal wastewater plants in Wenzhou[J]. China Water & Wastewater,2012,28(22):95-98(in Chinese).
- [3] 蔡璐,陈同斌,高定,等. 中国大中型城市的城市污泥热值分析[J]. 中国给水排水,2010,26(15):106-108.
CAI Lu, CHEN Tongbin, GAO Ding, *et al.* Investigation on calorific value of sewage sludges in large and middle cities of China[J]. China Water & Wastewater,2010,26(15):106-108(in Chinese).
- [4] 彭小军,孙向军,傅传运. 鼓泡流化床焚烧炉污泥干化焚烧处理特性及能耗研究[J]. 工业锅炉,2011(2):13-16.
PENG Xiaojun, SUN Xiangjun, FU Chuanyun. Study on characteristics of sludge dry & incinerating and energy consumption in bubbling FB incinerator[J]. Industrial Boiler,2011(2):13-16(in Chinese).
- [5] 中国石油和化学工业联合会. 锅炉房设计工艺计算规定:HG/T 20680—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
China Petroleum and Chemical Industry Federation. Code for Process Calculation of Boiler Plant Design: HG/T 20680-2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2011(in Chinese).
- [6] 王飞,朱小玲,李博,等. 污泥干化焚烧过程中污染物排放的研究[J]. 给水排水,2011,37(5):22-26.
WANG Fei, ZHU Xiaoling, LI Bo, *et al.* Study on the pollutants emission in sludge drying and incineration[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011,37(5):22-26(in Chinese).
- [7] 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.
QIU Rui. Analysis on the cost of the sludge drying and incineration process in Shenzhen City[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(8):30-32(in Chinese).
- [8] 宣建岚,杨明远,欧如清,等. 污泥干化焚烧输送系统的优化改造研究[J]. 环境科学与管理,2015,40(4):20-22.
XUAN Jianlan, YANG Mingyuan, OU Ruqing, *et al.* Optimization and reformation transportation system for sludge drying and incineration[J]. Environment Science and Management,2015,40(4):20-22(in Chinese).

作者简介:李彪(1986-),男,河北宁晋人,硕士,工程师,主要从事污泥处理等固废处置类项目设计工作。

E-mail:84915503@qq.com

收稿日期:2021-01-27

修回日期:2021-02-09

(编辑:孔红春)