

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.08.020

污水厂污泥连续高速碳化及资源化全链条实证研究

朱羽廷^{1,2}, 余斌³, 何婷⁴

(1. 同济大学建筑设计研究院<集团>有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学 环境科学与工程
学院, 上海 200092; 3. 武汉普乐环境技术有限公司, 湖北 武汉 430000; 4. 鄂州市
河道堤防保护中心, 湖北 鄂州 436000)

摘要: 以鄂州市污泥碳化项目为例,介绍了连续高速碳化技术的原理、工艺设计、处理效果及运行管理经验。该工艺分为污泥接收、储存、干化、碳化、粉尘收集、热量回收、尾气处理和碳化产品冷却及储存共7个单元,通过干馏气燃烧释放850℃高温烟气作为热源进行干化,可实现85%的污泥减量化率,产品碳化物可实现制砖资源化利用;碳化系统运行中不仅提供自身的能量,还可以输出多余能量供给干燥段,降低了污泥处理对传统能源的依赖度;系统设计时充分考虑了调节能力,设置合理冗余量并采用合适的污泥输送方式等以保证运行顺畅,在进泥含水率波动(80%~85%)和有机质含量不断提升的情况下均可实现稳定运行,具有良好的适应和调整能力,为我国解决市政污水厂污泥问题提供了新思路 and 全链条实证示范。

关键词: 污水厂污泥; 高速碳化; 污泥资源化; 全链条实证

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)08-0127-06

Full Chain Empirical Study on Continuous High-speed Carbonization and Recycling of Sewage Sludge

ZHU Yu-ting^{1,2}, YU Bin³, HE Ting⁴

(1. Tongji Architectural Design <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Pro-Envi Tech Co. Ltd., Wuhan 430000, China; 4. Ezhou River Dike Protection Center, Ezhou 436000, China)

Abstract: Taking the Ezhou sludge carbonization project as an example, this paper expounds on the principle, process design, treatment effect, and operation management experience of continuous high-speed carbonization technology. The process is divided into 7 units including sludge receiving, storage, drying, carbonization, dust collection, heat recovery, tail gas treatment, carbonized product cooling and storage. The 850℃ high-temperature flue gas released by the combustion of retort gas is used as the heat source for drying, which can reduce sludge by 85%, and the product carbide can be used as a resource for making brick. The carbonation system can provide not only its own energy, but also excess energy for the drying section, reducing the dependence of sludge treatment on traditional energy. The system design fully considers the regulation capacity, sets reasonable redundancy and adopts appropriate sludge transportation mode to ensure smooth operation. It can achieve stable operation under the condition

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201300)

通信作者: 朱羽廷 E-mail: 15021248600@126.com

of fluctuation of sludge moisture content (80%–85%) and continuous improvement of organic matter. It has good adaptability and regulation capacity, and provides a new idea and full chain empirical study for solving the sludge problem of municipal sewage plants in China.

Key words: sewage sludge; high-speed; carbonization; sludge recycling; full chain empirical study

随着国家对环保行业要求的不断提高,市政污水行业的治理重心正由“重水轻泥”向“泥水并重”转变。同时,我国的污泥产量持续高速增长,预计2025年污泥产量将达到 $7\,538 \times 10^4$ t(污泥含水率按80%计)^[1]。现有的污泥处理方式主要包括浓缩、脱水、干化、厌氧消化、好氧发酵等,最终消纳方式有土地利用、填埋、焚烧以及建材利用等^[2]。脱水后的污泥主要处理路径包括:深度脱水后进入填埋、热干化处理后再后续利用、好氧/厌氧处理后进入土地利用等^[3]。在现有的污泥处理处置技术中,污泥碳化技术具有彻底的无害化、明显的减量化效果以及实证可行的资源化途径,是污泥处理处置的一种发展方向。

以湖北省鄂州市污泥碳化工程项目为例,详细阐述了污泥连续高速碳化技术的原理、工艺设计、运行效果及相关运行管理经验,可为我国解决市政污水厂污泥处理处置问题提供新的思路 and 全链条实证示范。

1 项目概况

鄂州市污泥碳化项目设计规模为60 t/d(污泥含水率按80%计),占地约1 400 m²,主要负责处理处置鄂州城区、樊口和花湖等3座污水厂产生的污泥,其中鄂州城市污水厂的污泥量约占75%。该工程引进日本巴工业污泥连续高速碳化技术,利用中德财政合作促进贷款进行投资建设,总投资约为476万欧元。

2 污泥连续高速碳化工艺

2.1 工艺概述

污泥连续高速碳化技术是在低氧条件下裂解干化污泥中的有机物,产生挥发性可燃气,并将可燃气体燃烧产生高温烟气回送至干化工段制备干化污泥的工艺过程。整体工艺分为污泥接收存储、污泥干燥、污泥碳化、热量回收、尾气处理、碳化产品冷却及储存、烟气处理等子系统,可以实现连续进料出料,经过快速高温反应可大幅减少污泥的

体积与质量,产生的烟气等经过处理可以满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)。

工艺流程如图1所示。

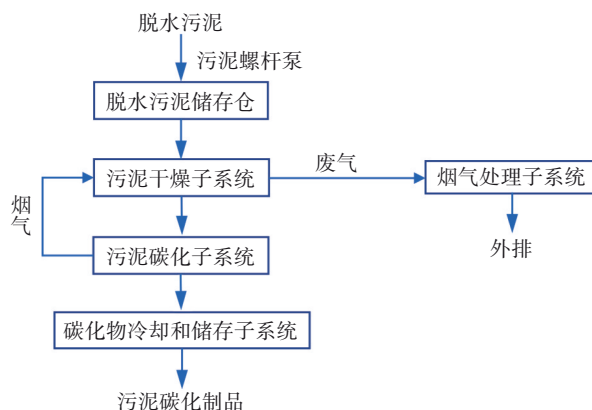


图1 污泥连续高速碳化及资源化工艺流程

Fig.1 Process flow chart of continuous high-speed carbonization and recycling of sludge

2.2 各工艺段设计

该污泥碳化项目共分7个工艺段,分别是污泥接收和储存、干化、碳化、粉尘收集、热量回收、尾气处理和碳化产品冷却及储存单元,回转滚筒干燥机和开孔管多段螺旋碳化炉为核心设备。

污泥连续高速碳化处理流程如图2所示。

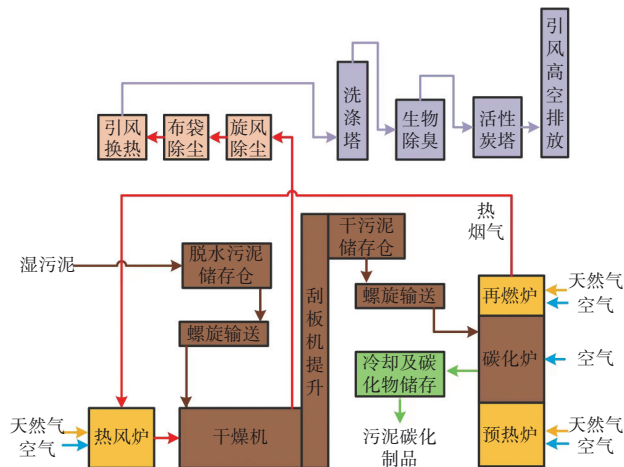


图2 污泥连续高速碳化工艺流程

Fig.2 Sludge continuous high-speed carbonization process

各构筑物平面布置如图3所示。

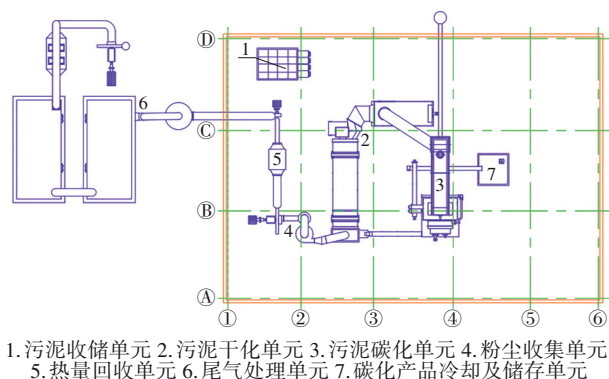


图3 构筑物布置

Fig.3 Structure layout

① 污泥接收和存储单元

设有1座角型地下污泥接收料仓,满足污泥运输车卸料的要求,通过螺杆泵将脱水污泥送入脱水污泥储仓。该储仓有效容积为40 m³。

② 污泥干化单元

干化采用回转式圆筒干燥机,1套,直径2.08 m,利用污泥碳化过程产生的可燃性干馏气体燃烧产生的850℃高温热烟气作为热源进行顺流式直接干化。设计最大进泥含水率为85%,出泥含水率为30%。当污泥碳化过程产生的可燃性干馏气体燃烧产生的热量不足以提供污泥干燥所需热量时,启动热风炉为干燥机提供热量。

③ 污泥碳化单元

碳化单元尺寸2.6 m×1.6 m×4.05 m,由上而下依次为再燃炉、碳化炉和预热炉。预热炉烟气温度控制在650℃,为碳化反应启动阶段提供所需温度。碳化炉采用外热式6段螺旋输送机首尾相接竖式排列,干化污泥进入碳化炉后由上而下依次通过6段螺旋,与加热烟气不直接接触。干馏气体析出后在螺旋输送机外燃烧,并进入再燃炉后进一步燃烧,保持850℃以上停留2 s,随后进入干燥机。

④ 粉尘收集单元

高温烟气经过干化直接换热后容易裹挟干污泥粉尘。粉尘收集单元采用1级旋风+1级布袋除尘方式,被分离收集的粉尘回送至干化污泥刮板输送机,与干化污泥混合后输送到干化污泥储仓,参与碳化反应。

⑤ 热量回收单元

采用热管式气气热交换器,利用除尘后尾气余

温将燃烧空气预热到75℃以上供各燃烧器使用,从而减少天然气消耗。

⑥ 尾气处理单元

设计采用“碱洗降温塔+生物除臭+活性炭吸附”进行处理。碱洗降温塔不仅对尾气中的酸性气体污染物有较高的去除率,同时可降低废气温度至40℃,为生物除臭滤池中的微生物提供良好的生存、降解环境。降温后尾气通过生物除臭系统进一步降解有机气体污染物,最后通过椰壳活性炭吸附塔吸附无法生物降解的污染物质后排出。

⑦ 碳化产品冷却及储存单元

经过碳化处理后的产品温度约300~400℃,通过水冷夹套螺旋输送机降温至50℃以下,储存在碳化污泥储仓内,定期外运进行资源化利用。

3 运行效果

该工程于2015年9月投入试运行,2016年3月通过环保验收,2017年正式进入委托商业运营,已连续稳定运行5年有余。目前实际处理污泥量约58~61 t/d,污泥有机质和热值随着污水厂提质增效工作的开展而逐渐提升(污泥泥质变化见表1),其中有机质提升了19.0%,热值提高了39.86%,效果显著。

表1 污泥泥质变化

Tab.1 Change of sludge quality

测试时间	含水率/%	有机质/%	灰分/%	氧弹热值/(kJ·kg ⁻¹)
2017年2月	80.9	38.2	60.9	9 132
2021年4月	80.4	42.9	56.1	10 902
2022年2月	82.1	57.2	42.8	12 772

3.1 污泥处理效果

污泥经连续高速污泥碳化系统处理后,最终形成粒径为1~5 mm黑色粒状生物炭。生物炭经过高温灼烧,已将病原菌、细菌、虫卵等杀死,最终产物无臭味,实现了污泥的稳定化,为碳化产品进一步资源化利用提供了条件。

粒状碳化物具有密度小、孔隙多、比表面积大、脱色除臭性能及微生物附着性良好、湿润时可吸附污泥体30%~40%的水分以及不易变质等特点。对碳化产品进行溶出实验,检测数据如表2所示,检测结果均未超过标准限值;同时对碳化产品进行重金属离子含量分析,也均未超过《城镇污水处理厂污泥泥质》(CJ 247—2007)的控制项目限值。

表2 碳化产品溶出实验结果

Tab.2 Dissolution test results of carbonized products

mg·L⁻¹

项目	检测结果	《城镇污水处理厂污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)
铅	<0.01	≤5
镉	<0.01	≤1
氰化物	<0.1	≤5
六价铬	<0.05	≤5(总铬≤15)
汞	<0.000 5	≤0.1
烷基汞	<0.000 5	不得检出
砷	<0.01	≤5

3.2 烟气处理效果

尾气采用在线监控,近一个月的各项指标排放浓度数据及相应标准中的污染物限值如图4所示,均满足《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014),其中颗粒物、NO_x及SO₂浓度远低于标准限值,二噁英的排放浓度为0.067 mgTEQ/m³,低于标准限值(0.1 mgTEQ/m³)。

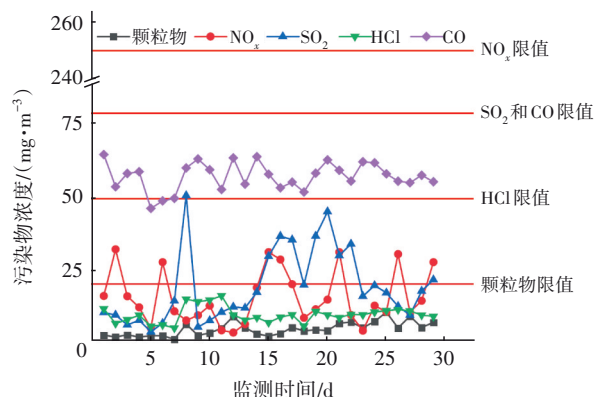


图4 尾气排放检测数据及污染物限值

Fig.4 Exhaust emission detection data and pollutant limits

3.3 碳化产品资源化利用效果

该项目产生碳化产品约8 t/d,污泥减量率>85%。初期以园林绿化土壤改良应用为主,但受园林绿化项目施工周期及季节性影响,产品资源化利用量不稳定。为此,该项目积极开拓新的资源化利用途径,经过试验筛选,目前碳化产品主要运至砖厂替代部分原料制作免烧混凝土砖,所制产品包括人行道砖、草坪砖等。免烧混凝土砖区别于烧结砖,其无焙烧过程,碳化产品经热解后已性质稳定,相较于干化污泥,更适合免烧砖制作,不会导致成品砖出现霉变等现象。免烧混凝土砖采用水泥、集料为主要原料,其中集料包括细集料(中砂和石屑)

和粗集料(5~10 mm 机轧碎石),碳化产品主要替代细集料,掺混比例为5%~25%。此外,为进一步提高碳化产品利用价值,该项目正积极探索将碳化产品破碎筛分后作为污泥脱水骨架剂使用,从已进行的小试和板框上机试验来看,效果良好,可替代约50%以上原骨架剂,从而实现污泥的循环资源化利用,以及经济价值的进一步提升。

4 项目总结

4.1 经济技术分析

直接运行成本受污泥有机质含量、含水率等不同影响,天然气单耗约为标准状态下55~65 m³/t泥,污泥处理燃料费用为165~195元/t;电单耗约60~65 kW·h/t泥,污泥处理电费为48~52元/t;水洗和冷却用水采用污水处理厂中水,不计水费;总计污泥的直接运行费用为213~247元/t。与深圳市上洋污泥焚烧厂运行费用312.57元/t(水6.99元/t、电120元/t、天然气136.24元/t、药剂49.34元/t)、脱水污泥耗水1.90 m³/t、耗电150 kW·h/t、耗天然气40 m³/t相比^[4],鄂州项目具有较高的经济可行性。

4.2 运行管理

该项目引入日本技术,是国内最早设计并进入商业化运行的碳化项目之一。通过多年的运行,对系统和运行中所遇到的问题有了更深刻的认识,通过总结和思考这些问题所积累的丰富经验,可为后续碳化项目提供借鉴。

① 系统热量消耗分布

系统由干化和碳化两大核心工艺段构成,干化段蒸发水分,是系统最大的热量消耗单元,碳化单元除蒸发污泥剩余水分外,同时热解产生干馏气体并燃烧,是系统的热量输出单元之一。

以30%含水率干燥污泥进入碳化炉为例,剩余水分蒸发及污泥显热上升共需热量755 101.2 kJ/h,而干馏气体燃烧能提供热量8 064 kJ/kgDS,系统绝干污泥处理量500 kg/h,即能提供热量4 032 000 kJ/h,远高于碳化炉自身所需热量。因此,在碳化炉正常运行时,预热炉停止工作,并输出多余热量供干燥段使用,干燥所需热量不足的部分由热风炉补充。

② 系统调节能力设计

近年来,系统在进泥含水率波动(80%~85%)和污泥有机质不断提升(38%→57%)的情况下,均实现稳定运行,表现出良好的适应及调整能力。

接收污泥采用带式脱水,受设备和操作水平影响,污泥含水率存在波动,而有机质含量逐年上升,黏性增大,干燥难度加大。此时,碳化单元干馏气体量增大,所需热量减小,而干燥单元所需热量增大。为保证各单元热量需求以及烟气平衡,该项目设计有预热炉、再燃炉、热风炉三座独立加热炉和调节措施,使各段供热负荷均可独立调整,这样才能维持系统各控制点的工艺温度处在稳定范围之内。同时,可保证系统在一定范围内适应污泥性质变化。

③ 输送投料

污泥具有黏度高、流动性差等特点,属于高固相流体。污泥输送投料系统能否保持连续稳定运行,直接关系整个项目的运行稳定性。污泥输送方式共涉及螺杆泵、螺旋输送和刮板机三种。

a. 螺杆泵。采用螺杆泵将脱水污泥送入脱水污泥储仓,实际运行中需将脱水污泥含水率控制在78%以上。由于该泵为间歇运行,且出口至脱水污泥储仓为“Z”字型密封管道,输送距离较长,长时间停运时,管道内污泥易板结,产生的沼气使管内压力升高,存在爆管风险。因此,在出泥压力稳定性要求不高的场合,可考虑采用柱塞泵,该类型泵对污泥含水率和纤维杂质具有更佳的耐受性,更低的日常维护工作量和成本。输送管道方面,建议在高有机物含量污泥或环境温度高的地区,增设泄压措施,长时间停运时,应将管道内的污泥排空,消除安全隐患。

b. 螺旋输送。投泥量通过脱水污泥储仓下方四轴螺旋输送机控制,由于螺旋上方污泥储仓容积过大,使得控制投泥量存在储仓泥位和螺旋转速两个变量,给实际生产操作带来不便。因此,对于控制系统污泥投入量的关键输送设备,其上方储仓容积不宜设计过大,满足2~4 h处理量即可。

c. 刮板输送。干燥污泥采用“Z”字型刮板输送方式,当干燥污泥含水率高、黏性大时,易附着在链条与壳体间的间隙,并不断堆积压实,造成刮板机过电流保护,甚至拉断链条。因此,当采用刮板输送污泥时,应严格控制污泥的含水率不大于30%,并定期检查链条伸长及磨损情况。

④ 烟风系统

从运行来看,干燥工艺段稳定运行是整个干化碳化系统稳定运行的关键,而影响干燥效果的因

素,除温度、停留时间外,烟气流速也是重要因素之一,控制烟气流速的措施包括调整供热量和烟气循环量。因此,在设计烟风系统时应充分考虑循环烟气流速,同时烟风系统设备均按最大风量120%选型,留有足够冗余。

⑤ 系统能耗

系统主要能耗为天然气耗和电耗,合计占总运行成本的60%~70%,其中天然气占80%~90%,天然气消耗量受脱水污泥含水率和有机质含量影响。

a. 含水率对能耗的影响。脱水污泥在相同有机质含量、不同含水率时,干化碳化系统的天然气消耗如图5所示。

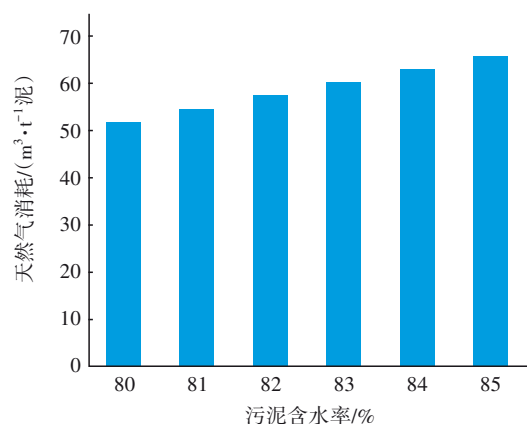


图5 脱水污泥含水率对干化碳化系统天然气消耗的影响

Fig.5 Effect of moisture content of dewatered sludge on natural gas consumption in drying and carbonization system

从图5可知,脱水污泥含水率每提高1%,吨泥气耗平均上升2.85 m³。另据测算,若将系统进泥含水率由80%降至60%,干化碳化系统天然气耗可降低50%,显著降低系统运行成本。对燃料价格敏感地区,可通过机械脱水方式降低进入干化碳化系统的污泥含水率。

b. 有机质含量对能耗的影响。脱水污泥(80%含水率)在不同有机质含量时,干化碳化系统的天然气消耗如图6所示。

从图6可知,脱水污泥有机质含量每提高5%,气耗平均下降5.1 m³/t。因此,对于污泥有机质含量高的地区,采用干化碳化工艺具有更低的气耗和成本优势。

综上,脱水污泥含水率和有机质含量均是项目能耗的关键因素。由于日常运行中含水率波动更

频繁,因此对项目运行能耗影响也更大,是日常运行管理的重点监控指标。

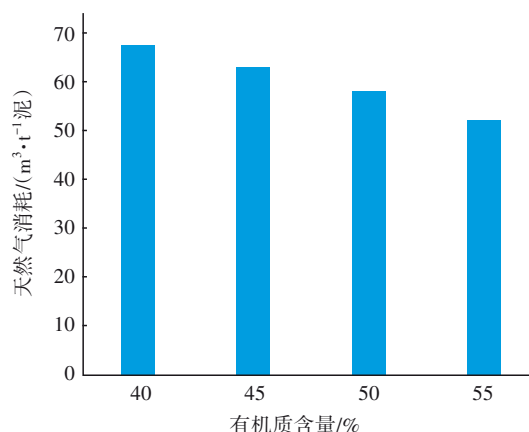


图6 不同脱水污泥有机质含量对干化碳化系统天然气消耗的影响

Fig.6 Effect of different organic matter content of dewatered sludge on natural gas consumption in drying and carbonization system

⑥ 技术规范 and 排放标准

目前,国内污泥碳化技术还缺乏统一的指导性技术规范和专门性标准,仅有个别省份如安徽、湖南在各自地方标准中提出了部分标准和要求,造成现阶段碳化技术标准不一,系统完备程度不一,设备良莠不齐,市场竞争混乱,各地方环保部门执法也无统一标准可依。如尾气排放标准,国内有的执行《生活垃圾焚烧污染物控制标准》(GB 18485—2014),有的执行《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996),还有的执行《工业窑炉污染排放标准》(GB 9078—1996)。同样碳化产品方面,日本采用测量碳化物中H/C原子数比、精炼度等指标来评价碳化产品的碳化度,而国内目前还没有相关碳化产品评价标准,相关标准的缺失不利于碳化产品进一步资源化利用,提高产品价值。因此,建议从行业和技术顶层出发,尽快出台污泥碳化技术导则、碳化项目建设标准、碳化产品评价标准等指导性文件和标准,从而推动碳化技术健康可持续发展。

5 结论

鄂州市污泥处理项目(60 t/d)通过应用污泥连续高速碳化技术,建成了污泥处理及资源化的全链条实证示范。该技术减量化率高(可达85%以上),

污泥稳定化效果好,产品碳化物可代替部分原料运至砖厂制作免烧混凝土砖,资源化利用充分,运行成本较低,具有较高的经济可行性,为我国解决市政污水厂污泥问题提供了新的思路和示范;在系统设计时应考虑充分,完备系统设计,设置合理冗余量,有针对性地选用污泥运输方式等,可为后续碳化项目提供借鉴。

参考文献:

- [1] 赵发敏, 李兴杰, 冯楠, 等. 污泥处理处置技术的应用研究及进展[J]. 有色冶金节能, 2021, 37(6): 50-54.
ZHAO Famin, LI Xingjie, FENG Nan, *et al.* Research and progress on application of sludge treatment & disposal technology [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2021, 37(6): 50-54 (in Chinese).
- [2] 李雪怡, 梁远, 方小锋, 等. 北京市污泥处理处置现状总结分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 38-42.
LI Xueyi, LIANG Yuan, FANG Xiaofeng, *et al.* Summarization and analysis of sludge treatment and disposal in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 38-42 (in Chinese).
- [3] 王琳, 李德彬, 刘子为, 等. 污泥处理处置路径碳排放分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2404-2412.
WANG Lin, LI Debin, LIU Ziwei, *et al.* Analysis on carbon emission from sludge treatment and disposal [J]. China Environmental Science, 2022, 42(5): 2404-2412 (in Chinese).
- [4] 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).

作者简介:朱羽廷(1986—),男,江苏常熟人,在读工程博士,高级工程师,主要研究方向为污泥处理与资源化。

E-mail: 15021248600@126.com

收稿日期:2022-03-10

修回日期:2022-06-29

(编辑:衣春敏)