

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 08. 018

萧山4 000 t/d污泥集中焚烧处理项目实践

孟鑫¹, 陈伟², 陈柏校³

(1. 杭州萧山环境投资发展有限公司, 浙江 杭州 311200; 2. 杭州蓝成环保能源有限公司, 浙江 杭州 311200; 3. 杭州国泰环保科技股份有限公司, 浙江 杭州 311200)

摘 要: 萧山4 000 t/d污泥集中焚烧处理项目针对污水厂污泥处理难题,通过深度脱水与焚烧发电相结合的方式处理污泥。深度脱水工艺采用化学调理和机械压滤的脱水方式,不同含水率的污泥通过一次压滤脱水就能达到焚烧要求。脱水干化后的污泥含水率降至45%~50%,与质量比为10%的煤混合后,送入循环流化床锅炉进行焚烧。与普通燃煤电厂掺烧污泥相比,本项目泥煤配比有重大突破,污泥焚烧量有很大的提高,入炉焚烧处理污泥达1 800 t/d(含水率45%)。污泥燃烧的余热用于发电,实现了污泥能量转化和净能量输出。烟气处理系统配置石灰石-石膏湿法脱硫、静电除尘、布袋除尘、低氮燃烧等技术措施,烟气排放指标长期稳定优于欧盟2010排放标准。

关键词: 污泥焚烧; 深度脱水; 循环流化床锅炉

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)08-0127-06

Practice of Xiaoshan 4 000 t/d Centralized Sludge Incineration Project

MENG Xin¹, CHEN Wei², CHEN Bai-xiao³

(1. Hangzhou Xiaoshan Environmental Investment Development Co. Ltd., Hangzhou 311200, China; 2. Hangzhou Lancheng Environmental Protection Energy Co. Ltd., Hangzhou 311200, China; 3. Hangzhou Guotai Environmental Protection Technology Co. Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: In view of the difficult issues of sludge treatment in a wastewater treatment plant, Xiaoshan 4 000 t/d centralized sludge was treated by the combination of deep dewatering, incineration and power generation. Chemical conditioning and mechanical pressure filtration are adopted in the process of deep dewatering, and the sludge with various moistures can be dewatered to meet the requirement of incineration by the single dewatering process. After dewatering, the sludge moisture was reduced to 45%~50%. After mixing with coal of 10% weight, the sludge was sent to the circulating fluidized bed boiler for incineration. Compared with common coal-fueled power plants, the sludge-to-coal ratio is much higher, thus the sludge incineration capacity has been greatly improved as high as 1 800 t of sludge (moisture 45%) every day. The waste heat of sludge combustion is used for power generation, thus realizing energy conversion and net energy output. The flue gas treatment system is equipped with limestone-gypsum wet desulfurization, electrostatic dust removal, baghouse dust removal, low nitrogen combustion, and other technical measures, thus the gas emission stably outperforms the Directive of EU2010/75/EC in a long run.

Key words: municipal sludge incineration; deep dewatering of sludge; circulating fluidized bed boiler

1 项目概况

杭州市萧山区先后采用卫生填埋、污泥制砖、深度脱水干化等方式处理污泥,在当时发挥了积极、应急的作用。近些年来,随着萧山区污水处理量增加,污泥量大幅增加,周边县市的污水厂也陷入“污泥围城”窘境,杭州地区亟需寻找满足“环保、量大、彻底”要求的新方法。2014年萧山水务集团启动了4 000 t/d污泥处理工程项目,2018年初进入生产调试,至今已安全稳定运行3年多。

该污泥处理工程项目总用地面积3.98 hm²,投资概算4.709 2亿元,建设1套4 000 t/d湿泥(含水率80%)深度脱水系统,3台次高温次高压循环流化床污泥焚烧炉,单台锅炉干泥(含水率45%)焚烧处理能力为600 t/d,蒸发量48.8 t/h,设计单台锅炉年运行时间6 500 h,2台N15-4.9次高温次高压凝汽式汽轮发电机组,配置多重烟气脱硫脱硝除尘设施,确保烟气达标排放。

2 处理工艺

该项目处理对象为城市污水厂产生的污泥、印染纺织企业的预处理污泥等,属于一般固体废弃物的污泥。污泥处理项目分深度脱水、干泥焚烧、烟气处理、蒸汽发电四个工艺环节。污泥脱水干化通过药剂调理和机械压滤方式完成,焚烧炉采用次高温次高压循环流化床锅炉。工艺流程见图1。本项目工艺有别于喷雾干化焚烧工艺^[1],后者是将脱水污泥通过雾化喷嘴形成滴雾后与高温烟气并流接触达到干化,然后在回转式焚烧炉进行焚烧。

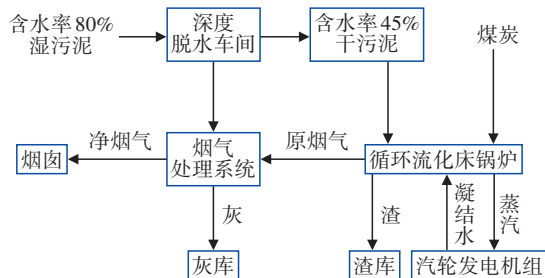


图1 污泥处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sludge treatment process

2.1 深度脱水

为了提高脱水机械生产能力、降低运行能耗、改善污泥脱水性能,采用化学方式对污泥颗粒进行调理和改性,使得颗粒表面的吸附水、毛细孔道的束缚水及部分微生物的胞内水转变成自由水,再投

加一定量的絮凝剂进行压滤,实现污泥深度脱水。化学调理-机械压滤深度脱水工艺需要添加调理药剂和改性药剂,选择的药剂既要有利于脱水,又要减少污泥热值损失^[2],尤其是外加药剂不能超量。

污泥深度脱水系统由污泥接收、调理改性、压滤脱水和废气吸收净化等四个单元组成,如图2所示。

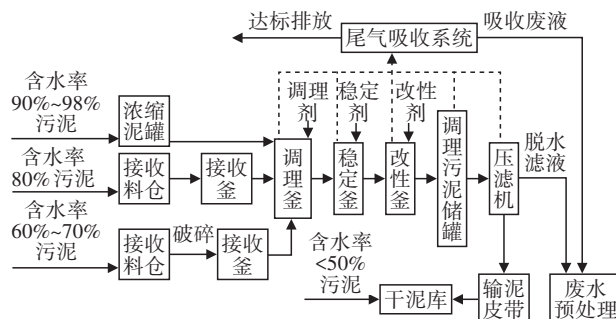


图2 深度脱水工艺流程

Fig.2 Deep dewatering process

通过汽车驳运的污泥进厂后倒入污泥接收料仓,经过加药调理、改性等环节后泵入厢式隔膜压滤机,经压滤脱水为含水率45%左右的干泥,最后由输送机送入干污泥棚堆放。为广泛接收周边地区不同含水率的污泥,该项目设置90%~98%含水率的浓缩污泥接收装置,毗邻的污水厂均质池污泥可以直接泵送到浓缩泥罐;60%~70%含水率的污泥先破碎再深度脱水;如果含水率已经达到50%以下,则可以直接卸于干泥库。该系统共配置38台厢式隔膜压滤机(单台滤板尺寸1 500 mm×1 500 mm,过滤面积500 m²),可以在常温低压(<0.6 MPa)条件下完成污泥的高干脱水。

污泥接收料仓和反应釜为基本密闭空间,脱水压滤机通过加罩封闭,这些空间通过负压抽吸收集废气,并采用多重化学吸收法处理废气;干泥库采用负压运行,恶臭气体经过一次风风口收集后,送入焚烧炉进行焚烧处理。脱水滤液是废水的主要来源,其COD浓度1 000~1 500 mg/L,氨氮150~200 mg/L,其他废水还有脱硫废水、尾气吸收系统废水、生活污水等,共同输送至废水预处理站。废水预处理站设计规模为5 000 m³/d,采用AAO处理工艺,预处理达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)三级标准后排入邻近的污水处理厂集中处理。

设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	BOD ₅	COD	SS	NH ₃ -N
进水水质	700	1 500	400	200
出水标准	300	500	200	35

mg·L⁻¹

2.2 干泥焚烧

根据德国的污泥焚烧经验,污泥焚烧温度需维持在850~950℃,低于850℃时焚烧不充分,不利于抑制二噁英产生;温度高于950℃时,会产生高温烧结现象。为了维持该温度区间,当污泥干基低位热值低于4 500 kJ/kg时,必须添加辅助燃料或将进风空气预热至500℃以上^[2]。据统计,德国22座污泥单独焚烧项目共有19座使用了包括天然气、厌氧消化沼气、燃油、丙烷、煤在内的各种辅助燃料^[3]。萧山周边污泥有机质含量高低不一,污泥深度脱水后湿基低位热值为1 670~4 340 kJ/kg,远低于维持正常焚烧温度所需热值。因此,该项目设计了以煤作为辅助燃料的污泥焚烧系统,设计入炉干污泥湿基低位热值4 186 kJ/kg,粒径<20 mm,掺煤比在10%左右,随污泥热值变化而变化。

常用污泥单独焚烧炉有流化床焚烧炉和多级炉排焚烧炉两种。其中多级炉排焚烧炉的空气过剩系数通常为1.5~2.0;而流化床焚烧炉混合效果好、炉内热分布均匀,空气过剩系数通常为1.2~1.5,相比多级炉排焚烧炉能耗明显降低。目前,德国污泥单独焚烧项目中,82%以上采用流化床焚烧炉^[3]。美国的污泥焚烧项目也以多层炉排炉和流化床焚烧炉为主,其占比分别为70%和30%。其中,多层炉排炉从20世纪60年代开始就已经应用于污泥焚烧,但由于建设和运行成本较高,从2000年后开始新建项目基本以流化床焚烧炉为主。因此,该项目也采用流化床焚烧炉。

该工程设计脱水干化处理污泥(含水率80%)133×10⁴ t/a,焚烧处理干污泥(入炉量)48×10⁴ t/a,选用3台循环流化床锅炉,每台锅炉设计焚烧干污泥量为600 t/d,锅炉的设计综合热值为5 860 kJ/kg,污泥的热值变化范围为1 250~4 180 kJ/kg,锅炉蒸发量为48.8 t/h,锅炉热效率为77.8%。每台锅炉配炉前污泥仓2座,共储存约5 h的污泥量,配炉前煤仓2座,共储存约13 h的煤量。质量占比90%的干泥经过破碎、计量,由输泥皮带送入炉前泥仓,再由给泥

机送入锅炉炉膛燃烧,质量占比10%的辅助燃料煤也同步送入炉膛。为实现污泥高比例焚烧,要改进循环流化床焚烧炉,合理设置进料口位置,优化一、二次风配比,保障低热值泥料能迅速点燃并稳定燃烧。燃烧空气分为一、二次风;一次风经过空气预热器加热至290℃后,由炉膛底部风室进入燃烧室参与燃烧,二次风经过空气预热器加热至308℃后,从炉膛侧墙分级送入炉内燃烧。

污泥和煤燃烧所产生的高温烟气携带大量床料经炉顶转向,通过高温旋风分离器进行气固分离。锅炉高效旋风分离器分离出来的较粗颗粒的高温物料通过返料器,沿回料管返回锅炉中,循环再燃,形成物料的循环回路。分离后含少量飞灰的烟气进入水平烟道、炉后竖井,对布置其中的高温过热器、低温过热器、省煤器、空气预热器进行放热。根据烟气量为95 420 m³/h(标准状态下)、烟气含水量为20.83%、含硫量为2.5%~3.0%推算,省煤器酸露点温度为146℃,末级空预器烟气温度降至161℃左右,经烟气净化后通过60 m高的烟囱排入大气。

该项目定制的循环流化床锅炉比较适合焚烧污泥。循环流化床炉膛内有大量高温湍流状态的床料,床层温度不会因为投加的干泥燃料明显降低,燃料适用性广,燃料燃烧充分、彻底,燃烧效率高。相较于鼓泡流化床锅炉,循环流化床锅炉适用于不同灰熔点的泥与煤混合协同焚烧,能焚烧水分高、热值低且不稳定的污泥,且污泥处理量大。该项目循环流化床完全由国内自主研发,相对国外品牌的锅炉,性价比优势明显。

2.3 烟气处理

该项目烟气处理执行《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)。项目执行中充分考虑技术提升空间和先进性、适度超前的内在要求,设计标准不仅满足环评批复要求,也满足欧盟2010排放标准、《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011),部分指标已经达到燃煤电厂超净排放指标。该项目烟气排放主要设计指标:颗粒物≤5 mg/m³, SO₂≤30 mg/m³, NO_x≤80 mg/m³, HCl≤10 mg/m³, CO≤70 mg/m³, 二噁英类≤0.1 ngTEQ/m³, 汞及其化合物(以Hg计)≤0.05 mg/m³, 镉、铊及其化合物(以Cd+Tl计)≤0.1 mg/m³, 锑、砷、铅、铬、铜、锰、镍及其化合物(以Sb+As+Pb+Cr+Cu+Mn+Ni计)≤1.0 mg/m³。

锅炉出口初始粉尘设计浓度为 51 g/m^3 左右,除尘采用一级静电+活性炭喷射+布袋+湿式电除尘器三级除尘方式。一级静电除尘器粉尘去除率约80%,布袋除尘器后粉尘浓度在 20 mg/m^3 以下,湿式电除尘器出口粉尘浓度在 5 mg/m^3 以下。干灰由气力输灰系统集中送至灰库暂存。

脱硫系统以石灰石-石膏湿法脱硫为主,钠碱法脱硫和炉内干法脱硫为辅助手段,可保证烟囱出口 SO_2 含量低于 30 mg/m^3 。

通过控制焚烧炉中下部及炉出口处的炉温,减少 NO_x 的产生;另外,通过脱水干泥进炉后的水分蒸发降温与还原性成分降低炉内高温段 NO_x 含量,实现锅炉低氮燃烧。结合选择性非催化还原反应(SNCR)脱硝技术,保证空预器出口 NO_x 的排放浓度控制在 80 mg/m^3 以下,同时预留选择性催化还原反应(SCR)脱硝的空间,作为日后提标改造备用。污泥堆放、处理过程中产生的 NH_3 、 H_2S 等执行《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)二级标准。

2.4 蒸汽发电

该工程主蒸汽压力为 5.3 MPa ,温度为 $485\text{ }^\circ\text{C}$ 。主蒸汽系统采用集中母管制,锅炉产出的主蒸汽先接入主蒸汽母管,再从主蒸汽母管上接出2路至汽轮机进口,选用2台凝汽式汽轮机,额定功率 15 MW ,额定进汽压力 4.9 MPa ,额定进汽温度 $470\text{ }^\circ\text{C}$,额定进汽量 63.1 t/h ,额定背压 4.9 kPa ,配置2台汽轮发电机,额定功率 15 MW ,额定转速 $3\,000\text{ r/min}$,出线电压 $10\,500\text{ V}$ 。锅炉出口蒸汽量 129.94 t/h ,汽机进汽量 126.04 t/h ,设计全年发电量为 $195\times 10^6\text{ kW}\cdot\text{h}$,全厂年供电量为 $140.4\times 10^6\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

3 运行情况

3.1 经营状况

该项目目前处于满负荷运行状态,投运至2020年底已累计处理污泥 $328\times 10^4\text{ t}$ (含水率80%),总发电量 $445\times 10^6\text{ kW}\cdot\text{h}$,其中约20%电量企业自用,剩余电量并入国家电网。项目接收包括杭州主城区在内的周边污水厂的污泥,不设置污泥含水率和热值要求,不同含水率和热值的污泥处置费不同,含水率60%~70%的污泥处置价最高,平均处置单价约 300 元/t ,上网电价为 $0.65\text{ 元/(kW}\cdot\text{h)}$ 。污泥费收入占总收入的80%,电费收入占20%。该项目不仅解决了“污泥围城”难题,而且连续两年实现盈

利,取得了社会效益和经济效益“双丰收”^[4]。

3.2 污泥脱水

污泥深度脱水采用杭州国泰环保公司专利技术,不同来源、不同热值的污泥通过螺旋输送机进入污泥接收釜,通过投加包括结合水转化剂、污泥稳定化药剂、污泥改性剂在内的污泥调理药剂并使之充分混合均匀,调控活性污泥微生物胞外渗透压释放结合水,并同步构建脱水骨架及出水通道,从而提升污泥脱水性能。该技术可最大限度保持微生物细胞结构的完整性,以利于后续的资源化综合利用。脱水后污泥呈块状,不与滤布粘连,在自身重力作用下落入下方泥斗,经皮带输送机输送至干泥库。在干泥库内,不同来源的脱水干泥经破碎混合后,制成直径 $<20\text{ mm}$ 的适合流化床焚烧的颗粒化燃料。

目前接收的污泥覆盖城市生活污水污泥、工业废水污泥、企业污水预处理后产生的压榨污泥(含水率65%~75%)、市政管网淤积污泥等多个类别,来源于几十家污水处理厂,污泥调理药剂种类及投加量随着这些不同来源污泥含水率、成分、种类等变化而适时调整,总投加量(以干物质计)约为含水率80%污泥的1.0%~8.0%。污泥深度脱水系统总耗电为 $15\text{ kW}\cdot\text{h/t}$ 泥(80%含水率)。

3.3 煤泥掺比

该项目建设主要目的是“减量化、资源化、无害化”处理污水厂污泥,为迎合市场需求,更广泛接纳处理各类污水厂污泥(属于一般固废的污泥),对进厂污泥的热值不做硬性规定。污泥是主要焚烧对象,煤炭作为辅助燃料,目的是保持炉膛温度不会由于污泥种类、品质变化而降低^[5]。入炉干污泥的热值对掺煤量影响很大,根据实际运行数据分析,当干污泥湿基低位热值为 $1\,670\sim 1\,880\text{ kJ/kg}$ 时,掺煤比约11.3%,当干污泥湿基低位热值为 $2\,500\sim 2\,926\text{ kJ/kg}$ 时,掺煤比约10.5%,当干污泥湿基低位热值 $>3\,344\text{ kJ/kg}$ 时,掺煤比 $<10\%$ 。图3显示了2#锅炉某个季度连续90 d的炉膛出口温度及床温变化情况,低掺煤比的运行条件能确保锅炉平均床温稳定控制在 $910\sim 950\text{ }^\circ\text{C}$,炉膛出口温度稳定在 $850\sim 890\text{ }^\circ\text{C}$ 。

由于污泥的燃料特性有别于燃煤,电厂协同焚烧污泥存在锅炉效率降低、锅炉结焦、烟气达标排放、运行调度等风险,污泥掺烧量越大风险越大,因

而国内外电厂协同焚烧污泥的掺泥比一般低于5%。2021年4月上海市发布了《燃煤耦合污泥电厂大气污染物排放标准》(DB 31/1291—2021),明确限定燃煤耦合污泥发电锅炉的污泥掺烧率不应该大于5%。以上海上电漕泾发电有限公司2×1 000 MW超超临界机组掺烧城镇污水处理厂污泥为例,该厂最大掺烧 10×10^4 t/a含水率60%的城镇污水处理厂污泥,掺烧污泥比例不高于5%。

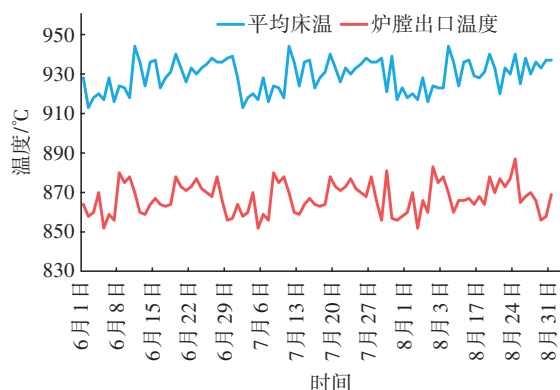


图3 炉膛温度

Fig.3 Furnace temperature

燃煤耦合污泥发电项目主要功能是发电,兼顾处理少量污泥,解决一些迫在眉睫的污泥难题。该项目每年处理 133×10^4 t污泥(含水率80%),只需掺烧10%左右的煤,主要功能是处理污泥,单体污泥处理量远大于普通燃煤耦合污泥电厂,锅炉设计、烟气处理环节都是以污泥为特定对象定制设计、定制设备,余热用于发电,发电是副产品。

3.4 锅炉腐蚀

单台锅炉运行时间都已累计超过20 000 h,运行期间锅炉末级空预器出口温度为155~165 °C,停炉例行检修期间跟踪分析锅炉腐蚀情况,锅炉水冷壁、低温过热器、中温过热器、高温过热器的壁厚减薄率每年分别为1.18%、1.13%、1.13%、1.72%。低温段空预器会被酸腐蚀,数年后出现少量末级空预管破损漏风,可以在例行检修时更换破损空预管,使用搪瓷管空预器能更好地解决这个问题。污泥成分的复杂以及外加调理剂对锅炉腐蚀、运行结焦的影响完全可控可解决,2020年3台锅炉全年累计运行时间分别为7 613、7 684、7 959 h,远大于设计运行时间(6 500 h),证实了生产运行的可靠性和稳定性。

3.5 烟气排放

实测锅炉出口的原烟气指标比设计预测的污染物浓度要低,保证了后续烟气处理主要指标超低排放。比如,实测1#锅炉出口粉尘浓度为10~15 g/m^3 。再如,仅依靠低氮燃烧控制技术, NO_x 在120~150 mg/m^3 区间波动,投加SNCR脱硝后, NO_x 达标率得到可靠保障。实测烟气总排口中二噁英类最大为0.013 ngTEQ/m^3 ,远低于欧盟2010排放标准和GB 18485—2014标准限值(0.1 ngTEQ/m^3)要求。烟气中氯化氢、汞、镉、铅及其化合物的排放浓度均在GB 18485—2014标准限值的1/10以下。一氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、颗粒物等烟气污染物在多重可靠的防治措施之下,也优于欧盟2010排放标准。

图4是8月期间1#锅炉的烟气污染物排放浓度情况, SO_2 为11.67~24.69 mg/m^3 , NO_x 为24.01~48.66 mg/m^3 ,CO为26.25~55.40 mg/m^3 ,颗粒物为0.39~4.51 mg/m^3 。

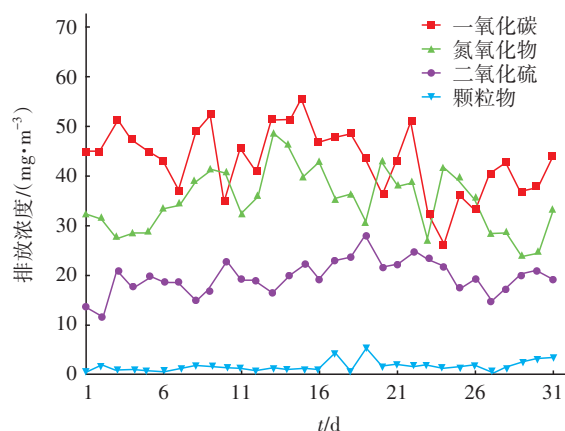


图4 烟气排放浓度

Fig.4 Emission concentration of flue gas

3.6 灰渣属性

污泥焚烧产生的灰和渣都没有明确的标准和属性界定,环评报告要求对灰、渣是否属于危险废物进行属性鉴定。灰、渣的产生率与入炉污泥的灰分含量高度关联,炉灰产生率约为15%,炉渣产生率约2%。该项目烟气在850~950 °C的炉膛中实际停留时间超过4 s,炉渣热灼减率 $\leq 2\%$ 。基于以上有利的技术条件,第三方检测机构对炉灰、炉渣连续随机取样分析结果:炉灰的二噁英类毒性物质含量最大值为0.037 $\mu\text{gTEQ}/\text{kg}$,远低于《危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别》(GB 5085.6—2007)中的标准限值(15 $\mu\text{gTEQ}/\text{kg}$),浸出毒性、急性毒性和腐

蚀性监测浓度均不在危险废物鉴定标准的限值范围内。经过鉴定,该项目的灰和渣都属于一般固体废物,与其他污泥焚烧项目的飞灰鉴定结果一致^[6],可以作为混凝土搅拌站、制砖厂、水泥厂的建材原料。

3.7 污水处理

该项目外来污泥以含水率低于50%的干泥为主,故压滤废水量比预期少,实际废水预处理平均处理量<1 500 m³/d。压滤废水的COD和氨氮浓度较高,通过废水处理池进水端的缓冲池进行水质调节和水量缓冲。2021年3月—5月,缓冲池出口COD浓度约1 000~1 500 mg/L,均值为1 047 mg/L,氨氮为150~200 mg/L,均值为130 mg/L,通过AO处理工艺,出水COD浓度均值为244 mg/L,氨氮均值为4.45 mg/L,SS均值为97 mg/L,预处理后水质达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)三级标准后排入邻近的污水处理厂集中处理。

4 结语

① 萧山区4 000 t/d污泥处理项目取得成功,实践证明采用焚烧方式处理污泥,技术可靠、污泥处理彻底、单位面积处理量大、处理过程环保经济,污泥处理量越大,规模效益越显著。建议在一些大城市集中力量建一个日处理几千吨级的污泥集中处理项目,覆盖周边约100 km范围的污泥,打破“一个水务公司一个污泥项目”“一个污水厂一个污泥去向”的零散处置模式,污泥集中处理,可形成良好的社会效益和规模经济效益。

② 目前,污泥处理通常被认为是污水处理工作的延伸,一些污泥处置的建设主体不一,各地的上级主管单位也不同,在项目审批、运行过程中,各方对政策、技术标准的解读不一,不利于项目建设运营。宜尽早出台一些污泥处理成熟工艺的行业标准 and 规范。

③ 污泥焚烧的灰渣利用非常依赖建筑行业,市场需求波动很大,灰渣出路是污泥焚烧运行的制约因素。建议政府和建材行业引导、出台一些灰渣利用的扶持政策和技术指南,开发灰渣利用的新品种、新渠道,就近消化灰渣,行业协同,物尽其用。

参考文献:

[1] 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 (in Chinese).

[2] 叶方清. 污泥深度脱水协同垃圾焚烧生产性试验研究[J]. 中国给水排水,2018,34(15):110-115.

YE Fangqing. Sludge deep dewatering and co-incineration with municipal solid waste [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (15): 110-115 (in Chinese).

[3] SCHNELL M, HORST T, QUICKER P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263 (21): 110367.

[4] 郝晓地,陈奇,李季,等. 污泥干化焚烧乃污泥处理/处置终极方式[J]. 中国给水排水,2019,35(4):35-42.

HAO Xiaodi, CHEN Qi, LI Ji, *et al.* Ultimate approach to handle excess sludge: incineration and drying [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (4): 35-42 (in Chinese).

[5] 生骏,胡维杰. 半干污泥焚烧工程设计分析及探讨[J]. 中国给水排水,2020,36(6):45-49.

SHENG Jun, HU Weijie. Analysis and discussion on semi-dry municipal sludge incineration project design [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (6): 45-49 (in Chinese).

[6] 廖建胜,李文兴,单跃,等. 温州市污泥集中干化焚烧厂工程设计与调试[J]. 中国给水排水,2016,32(22):73-77.

LIAO Jiansheng, LI Wenxing, SHAN Yue, *et al.* Project design and commissioning of Wenzhou sludge centralized drying and incineration plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (22): 73-77 (in Chinese).

作者简介:孟鑫(1975—),男,浙江杭州人,本科,高级工程师,主要从事污水处理、污泥处理相关工作。

E-mail:40027266@qq.com

收稿日期:2021-07-02

修回日期:2021-08-15

(编辑:衣春敏)