

设计经验

石洞口污水处理厂污泥干化焚烧二期工程工艺要点解析

胡维杰, 周友飞, 陈汝超, 邱凤翔, 金则陈
(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

摘要: 石洞口污水处理厂污泥处理二期工程采用“离心脱水+干化+单独焚烧”的工艺路线。污泥处理设施与污水工程位于同一厂区内,集约化污水、污泥厂区的布置方式体现了“泥水同步”的理念。污泥干化工艺设计中,综合设备运行的稳定性、安全性等多方面因素,确定干化污泥含水率为30%;二期工程在国内首次采用半干污泥地下接收坑的形式对外厂半干污泥进行接收、储存和混合。作为片区污泥处理的托底工程,为有效应对检修、应急故障等各种不利工况的发生,二期工程设置有2条污泥干化线及3条焚烧线,着力实现片区污泥全量、稳定、高效的处理处置。

关键词: 石洞口污水处理厂; 污泥干化焚烧; 工艺设计要点

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)16-0041-07

Analysis of Process Design of the Sludge Drying and Incineration Project Phase II in Shidongkou WWTP

HU Wei-jie, ZHOU You-fei, CHEN Ru-chao, QIU Feng-xiang, JIN Ze-chen
(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In the sludge treatment phase II project of Shidongkou wastewater treatment plant, the technology of “centrifugal dehydration + drying + separate incineration” was adopted. The sludge treatment facilities and wastewater treatment projects were located in the same plant area. This intensive layout reflected the concept of “synchronous treatment of sludge and water”. In the drying process design, the water content of the dried sludge was determined to be 30% based on the stability, safety and other factors of equipment operation. For the first time in China, in the sludge drying and incineration project phase II, the semi-dried sludge underground receiving pit was adopted for the reception, storage and mixing of semi-dried sludge from other plants. As the basis supporting project for the region's sludge treatment, two sludge drying lines and three incineration lines were set up in the project phase II in order to effectively deal with the various adverse working conditions such as maintenance and emergency failure, and to achieve the whole, stable and efficient treatment and disposal of the region's sludge.

Key words: Shidongkou WWTP; sludge drying and incineration; key points of process design

作为上海市中心城三大污水处理片区之一,石洞口片区始终致力于污水厂污泥干化焚烧工艺的实践和探索。继石洞口污水处理厂污泥处理工程(干化焚烧一期工程)及石洞口污水处理厂污泥处理改

扩建工程之后,片区又进行了污泥二期工程建设。二期工程作为石洞口片区污泥处理的托底工程,是为解决片区增量污泥的出路问题而提出的。2017年底,石洞口污水处理厂完成出水水质一级A提

标,干基污泥量由 60 tDS/d 增加至 80 tDS/d;同时,片区泰和污水处理厂(近期为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,远期为 $55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)即将建成投运,产生的污泥也将送至石洞口污水厂进行焚烧处理。石洞口污水处理厂现状及在建污泥干化焚烧设施^[1]处理能力缺口较大,已经不能满足片区增量污泥的处理需求。因此,污

泥处理二期工程建设是解决石洞口区域污泥出路的迫切需要。

1 污泥量及工程规模

石洞口区域现状有石洞口、吴淞和桃浦三座污水处理厂,另有泰和污水厂正在建设中,区域污泥量分析见表 1。

表 1 石洞口区域污泥量分析

Tab. 1 Sludge volume analysis in Shidongkou area

tDS · d⁻¹

项 目	近期 (2020 年)	远期 (2040 年)	污泥量具体分析
石洞口厂	80	80	a. 提标改造前污泥量 60 tDS/d; b. 提标改造后污泥量 80 tDS/d,污泥量增加 20 tDS/d
泰和厂	96	110	a. 近期规模 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,污泥量 96 tDS/d; b. 远期规模 $55 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,污泥量 110 tDS/d; c. 鉴于区域内近期雨污混接改造和面源污染控制还不完善,近期污泥量计算中纳入了该部分面源污染引起的增量污泥
吴淞厂	8.8	8.8	a. 拟在出水一级 B 基础上提标至一级 A; b. 现状一级 B 出水污泥量为 8.2 tDS/d; c. 提标改造后污泥量为 8.8 tDS/d
桃浦厂	—	—	桃浦厂功能调整
区域泥量总计	184.8	198.8	石洞口厂 + 泰和厂 + 吴淞厂
污泥改扩建工程处理规模	72	72	处理石洞口厂提标改造前的污泥量和吴淞厂提标后的污泥量
二期工程处理规模	112.8	126.8	石洞口区域污泥总量减去改扩建工程污泥处理量

基于上述外部边界条件的变化,在建石洞口污泥处理改扩建工程的处理对象由原先的石洞口、吴淞、桃浦三座污水处理厂污泥调整为石洞口厂污泥和吴淞厂提标后污泥,如表 2 所示;污泥二期工程的处理对象为石洞口厂提标增量污泥和泰和厂污泥,如表 3 所示。

表 2 在建石洞口污泥改扩建工程污泥量调整

Tab. 2 Adjustment of sludge volume for the Shidongkou sludge treatment upgrading project

tDS · d⁻¹

项目	石洞口厂 污泥	吴淞厂 污泥	桃浦厂 污泥	合计
原设计污泥处理量	60	5.5	6.5	72
调整后污泥处理量	60 ~ 63.2	8.8	0	68.8 ~ 72

表 3 不同服务年限下污泥二期工程规模

Tab. 3 Scale of sludge project phase II under different service life

tDS · d⁻¹

服务年限	工程规模
2020 年	112.8 ~ 116
2040 年	126.8 ~ 130

基于近远期污泥处理量分析,本工程建设方案有二:一是按远期 2040 年污泥量一次性建设污泥处理设施;二是分期建设,本次新建规模按 2020 年考

虑,之后按远期 2040 年增量污泥新建污泥处理设施。

由于污泥干化焚烧项目的特殊性,同一区域分期实施的可操作性较差,且总投资较高;此外,本工程作为石洞口片区的污泥处理托底工程,建设规模应综合考虑远期污泥处理量,并适当留有一定余量,增强片区污泥处理系统全局的稳定性。由此,石洞口污水处理厂污泥处理二期工程的建设规模确定为 128 tDS/d,按远期规模一次建成。

2 总体设计

2.1 工艺方案

本工程污泥处理采用“离心脱水 + 干化 + 单独焚烧”的工艺路线。处理对象为石洞口本厂污泥和泰和厂污泥。石洞口本厂的提标增量污泥从现状污泥调蓄池泵送至本工程新建储泥池,经过新建污泥脱水单元处理降至含水率约 80%,脱水污泥经干化后进入焚烧单元处理。泰和污水厂的污泥在其本厂内进行浓缩脱水干化处理,含水率降至 40% 以下,而后车运至本工程半干污泥接收坑,经“抓斗 + 链板输送”的方案输送至焚烧单元处理。二期工程工艺流程见图 1。

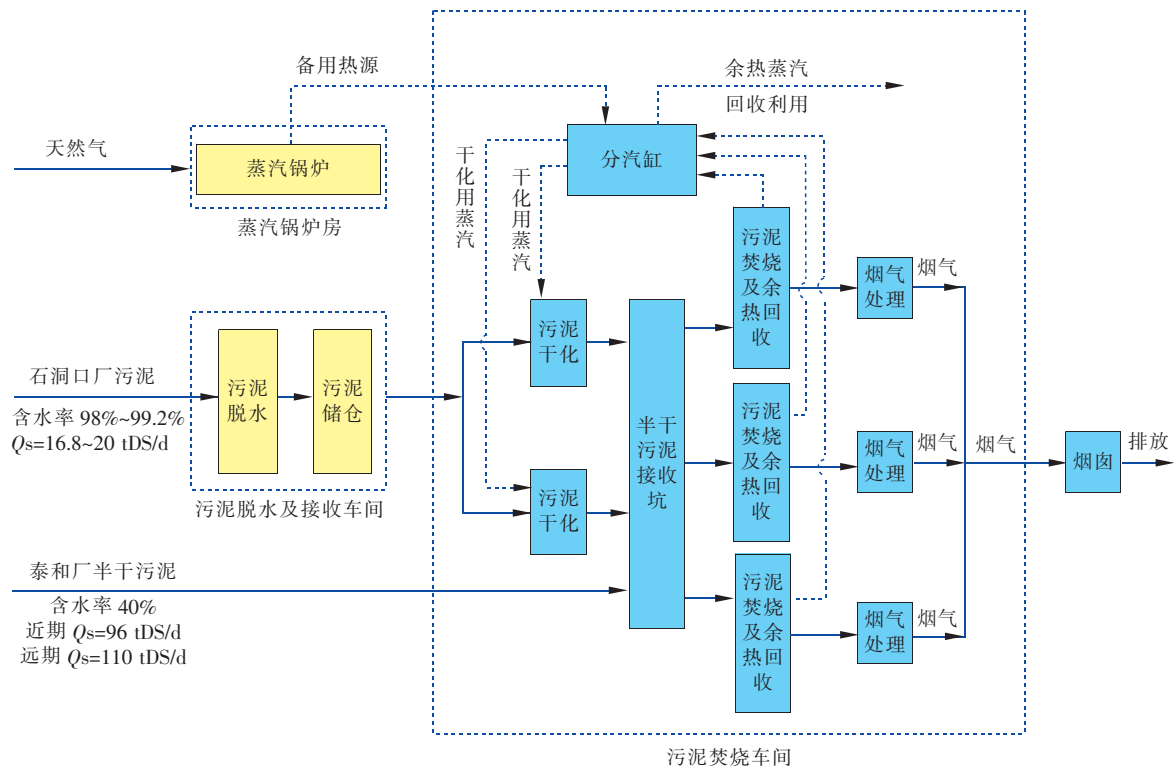


图 1 石洞口污水处理厂污泥处理二期工程工艺流程

Fig. 1 Flow chart of sludge project phase II in Shidongkou WWTP

污泥干化采用桨叶式工艺,以蒸汽为热媒,天然气为外加热源。本厂半干污泥和外来半干污泥采用地下接收坑混合方案。污泥焚烧采用鼓泡式流化床工艺。

焚烧烟气净化系统采用“SNCR + 静电除尘 + 干式反应器 + 布袋除尘 + 湿式脱酸 + 烟气再热 + 物理吸附”处理工艺。臭气处理采用离子法、生物法、化

学洗涤、活性炭吸附、植物液喷淋等组合工艺。余热锅炉产生的蒸汽在满足本工程污泥干化热源用量后,优先用作污泥处理改扩建工程的污泥干化补充热源,剩余余热蒸汽用作石洞口污水处理厂污水深度处理段加热热源。

基于污泥量的分析,本工程近、远期污泥处理主要工艺单元处理量见表 4。

表 4 污泥二期工程近、远期主要工艺单元处理量

Tab. 4 Treatment capacity of the main process units in the short term and long term for the sludge project phase II

项目	近期处理量/(tDS · d ⁻¹)		远期处理量/(tDS · d ⁻¹)		进泥含水率/%	出泥含水率/%
脱水	16.8 ~ 20(石洞口厂)		16.8 ~ 20(石洞口厂)		98 ~ 99.2	80
热干化	16.8 ~ 20(石洞口厂)		16.8 ~ 20(石洞口厂)		80	30
焚烧	112.8 ~ 116	96(泰和厂)	126.8 ~ 130	110(泰和厂)	约 40	—
		16.8 ~ 20(石洞口厂)		16.8 ~ 20(石洞口厂)		

2.2 厂址选择与厂平布置

① 厂址选择

根据石洞口污水厂现状情况,可供本次污泥处理工程使用的用地主要为如图 2 所示的选址一和选址二。选址二与污水厂及污泥处理改扩建工程处于同一地块,给排水、热源等可构成一个整体,是二期工程首先考虑的厂址选择。但该区域为三角形用

地,扣除河道规划蓝线退界距离后可用地面积约 1.97 hm²,难以满足工程用地需求;外厂污泥需车运穿越现状污水厂送至本工程,运输条件受限,较难实现;场地紧张,涉及巡视、检修、安全、消防等需要的空间难以兼顾,运行条件较差;且该区域目前被污泥处理改扩建工程用于大临及材料堆场,工程实施进度易受改扩建工程的影响。与之相比,选址一不存

在上述问题,该厂址具有土地利用率高、与周边河道及道路退界条件好、建成后运行管理条件较优、建设进度不受相关工程影响等优点。

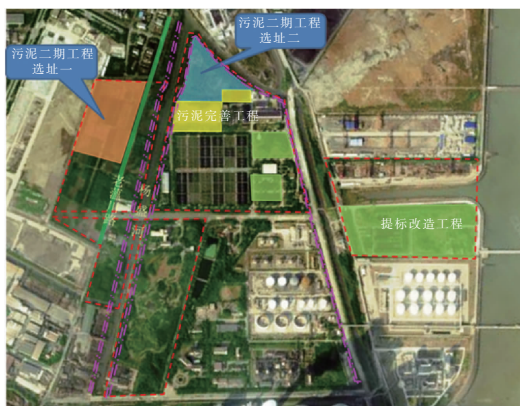


图2 污泥处理二期工程厂址选择

Fig. 2 Site selection for the sludge project phase II

综合上述比较,污泥二期工程选址于厂址一,污水、污泥处理工程位于同一污水处理厂内,集约化污水、污泥厂区的布置方式真正体现了“泥水同步”的理念,方便污水、污泥处理系统的集中调度管理。同时,厂址二可作为石洞口污水厂及污泥处理区除臭提标及灰渣资源化利用的预留用地,将能实现石洞口污水厂水、泥、气治理的全面升级改造。

② 厂平布置

二期工程厂区总平面布置见图3,厂区按照污泥处理的不同环节进行分区布置,生产区和配套区用道路及绿化隔开。场地内交通组织简洁清晰,内部道路布置顺畅便捷,人流、车流、服务流线相互独立,互不干扰,满足了交通组织的高效率要求,交通流线转换简单、明确。

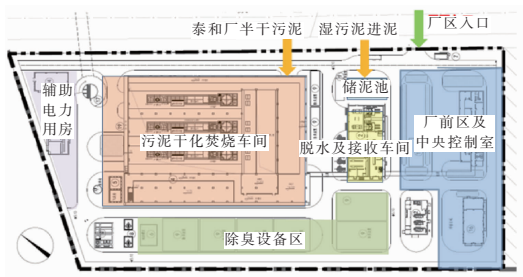


图3 污泥处理二期工程厂区平面布置

Fig. 3 Layout of the sludge project phase II

3 工艺设计要点问题解析

3.1 干化污泥含水率的确定

污泥干化焚烧设计追求的核心目标是以最少的

能量消耗实现污泥的彻底减量化和无害化处理。在工艺设计时,应通过能量平衡计算,确定最佳入炉污泥含水率,以求在污泥焚烧产生的余热蒸汽量的基础上,补充最少的外来热量来满足污泥干化所需的能量,同时保证焚烧炉的稳定运行。

污泥二期工程设计中对不同入炉污泥含水率的情况进行综合对比分析,其中脱水污泥含水率取值80%,入炉污泥含水率按取 $\leq 10\%$ 、 $30\% \sim 40\%$ 、 $\geq 60\%$ 三种工况进行对比分析。

当入炉污泥含水率 $\leq 10\%$ 时,入炉含固率高,导致单位干化能耗高,总能量损失也越大。同时,干燥机磨损较严重,长期运行安全性会受到影响,且对焚烧炉和锅炉的设备制造要求将提高,会影响设备的使用寿命。此外,由于污泥干化程度过高,在系统中易产生粉尘,存在自燃的可能性,所以全干化系统要求完全密闭的惰性环境,系统内要密切控制氧含量、粉尘浓度、温度、污泥散发的可燃性气体,在储存和运输过程中同样要保持惰性环境。因此,不推荐入炉含水率 $\leq 10\%$ 。

污泥含水率在60%左右理论上在焚烧炉中能维持自燃,此时的外加热源量小。但是,60%含水率是基于理论计算得出的结果,而实际运行中,污泥含水率及污泥热值的波动会导致系统整体热量及各单元热量的大幅变化,从而使得“入炉含水率60%左右外加热源最小”的工程实际指导意义不高。而入炉含水率较高,可能存在热值较低无法自持燃烧的情况,为此需扩大干化设备规模,显然,这种方法既不科学也不经济。此外,入炉含水率 $> 60\%$ 时,烟气水分含量高,进料量和烟气量也较大,焚烧和烟气处理设备体积庞大。烟气中水分含量高也会影响袋式除尘器的布袋材质和使用寿命。综上所述,不推荐入炉含水率 $\geq 60\%$ 。

入炉污泥含水率取 $30\% \sim 40\%$ 时,能量利用率较高,干燥机选择类型较多,焚烧炉设备体积居中,焚烧效率较好。在储存和运输过程中占用空间较小,均衡干化、焚烧和烟气处理系统规模,应对各种工况能力较强,应用实例也较多。故本工程干化焚烧系统的入炉含水率为 $30\% \sim 40\%$ 。

实际运行中为有效应对污泥热值的波动,入炉污泥含水率应能在较大范围内调整,工程采用污泥混合入炉方案,即部分污泥经干化处理含水率降至约30%,而后与含水率80%的脱水污泥按一定比例

混合,混合后的污泥含水率为 30% ~ 40%,进焚烧炉焚烧。通过将干燥机排出的污泥的含水率控制在 30% 左右,不仅能够避免因高黏性的污泥引起的干燥机及输送机的故障,还能实现应对污泥性状波动的干燥焚烧工程的灵活的运行操作性。

3.2 半干污泥的接收、储存

① 方案比选

本工程所需要处理的泰和污水厂半干污泥(含水率为 40%),近期干基量为 96 tDS/d,占工程污泥

处理总量的 75% 左右;远期干基量为 120 tDS/d,占工程污泥处理总量的 94% 左右。外接污泥量大,能否进行稳定的接收、输送是本工程的关键之一。

针对半干污泥接收方式主要存在以下两个方案。方案一:“地下接收坑 + 抓斗 + 螺旋输送”方案;方案二:“接收仓 + 刮板提升机 + 地上污泥料仓 + 刮板提升机 + 螺旋输送”方案。

两种方案的综合比选分析见表 5。最终选择采用方案一。

表 5 半干污泥接收、储运方案比选分析

Tab. 5 Comparison of semi-dry sludge receiving, storage and transportation schemes

比选内容	方案一:“地下接收坑 + 抓斗”方案	方案二:“常规接收仓 + 刮板提升机”方案	备注
运行稳定性	运行稳定,技术成熟	运行稳定,但如果出现结块、堵塞现象后,清理比较困难	方案一优
输送量	一次抓取物料量较大(5 ~ 10 t/次),通过 1 台抓斗即可满足所有焚烧线的处理量	输送量可根据焚烧需求调节,可连续进行物料输送	两方案均可满足要求
自动化程度	自动化程度较低,抓斗的操作由人工控制;进料仓料位与抓斗配合依赖人工监控	可实现自动连续物料输送	方案二优
人员投入	需要设置专人对抓斗进行控制	不需设置专人	方案二优
混合特性	若外来物料出现干湿不均、结块等现象时,可通过抓斗进行一定程度的混合以均匀物料	自动进料,不能混合	方案一优
设备检修	设备可靠,能长期稳定运行,无需大修	停机后需要进行检修和清理	方案一优
配套设备	系统简单;抓斗抓取范围存在死角,需要配合装载机机械将物料堆形状进行调整以适应抓斗抓取;接收仓兼顾物料储存功能	系统相对复杂;需要专设储存料仓,并配套螺旋输送等设备	方案一优
桥架、结块问题	可根据焚烧炉焚烧量的需求,抓取一定量的干化污泥放入进料仓,进料仓物料量适中,停留时间较短,不易产生“桥架”、“结块”等现象	含水率 40% 左右的半干污泥处于黏滞过渡区,储存料仓容积大,自重较大,污泥储存时间较长,较易产生“桥架”、“结块”等现象,清理难度大,对连续生产不利	方案一优
臭气控制	需要对地下接收坑大空间进行除臭,保持大空间微负压,确保臭气不外逸	需要对接接收仓和干污泥输送设备进行除臭,除臭风量相对小,但是由于干污泥输送设备需要频繁检修和打开,臭气泄漏较难控制	方案一优
输送过程漏料	抓取物料为干污泥,在抓取过程中,存在少量漏料现象,但基本都是漏在接收坑内,不会影响厂区环境	干污泥密闭输送,输送设备实际运行中频繁检修会导致较多漏料	方案一优

② 工艺系统设计

近远期泰和污水厂半干泥量分别为 96 和 110 tDS/d,堆积密度按 0.7 t/m³ 计,近远期分别合计约 229 和 262 m³/d。考虑泰和污水厂半干污泥一周左右的储存时间,本工程设半干污泥接收坑 1 座,有效容积约 2 000 m³。干污泥接收间位于污泥焚烧车间南侧,和半干污泥接收坑采用实体墙进行隔断,半干污泥接收坑设置半干污泥抓斗,直接将污泥提升至焚烧炉干污泥缓冲仓所在高度,之后通过螺旋输送机将污泥送至焚烧炉内。半干污泥接收系统工艺流程见图 4。

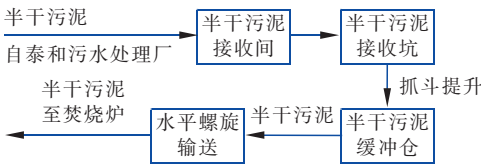


图 4 半干污泥接收系统工艺流程

Fig. 4 Flow chart of semi-dry sludge receiving system

3.3 半干污泥的混合

为了使污泥在流化床里能稳定焚烧,并形成合理的温度分布,避免本厂与泰和厂半干污泥不同热值、泥性等因素带来焚烧不稳定现象,入炉前须对本

厂和泰和厂半干污泥进行混合。根据本工程流程设计,可对其进行混合的方案包括:

① 方案一:半干污泥地下接收坑内混合方案;

② 方案二:半干污泥地下接收坑进料缓冲仓内混合方案;

③ 方案三:入炉前进料缓冲仓内混合方案。

三个方案在运行稳定性、设备检修、配套设备等方面没有明显的差异。方案二和方案三是被动混合模式,其混合环节依次减少,混合效果依次降低,存在混合不均匀的风险。方案一中石洞口本厂干化污泥直接入地下接收坑,通过抓斗与泰和厂半干污泥进行初步混合;混合后由抓斗抓取至进料缓冲仓,在缓冲仓内物料因重力在下滑过程中再次进行混合,至进料螺旋,此处设置进料缓冲仓和进料螺旋输送机,物料再次通过进料缓冲仓与进料螺旋输送机得以比较充分的混合,入炉焚烧。本方案不需要专设混合搅拌机,且本厂与泰和厂的半干污泥可通过三个环节混合,入炉前混合较为均匀。因此,本工程中泰和厂半干污泥和本厂半干污泥采用地下接收坑内混合方案。

3.4 污泥干化线数量

本工程作为石洞口片区污泥处理托底工程需考虑任何一条污泥干化线发生应急故障时,所设的备用干化线的蒸发能力能满足蒸发量缺口。片区污泥处理工程干化线设置见表6。

表6 污泥处理工程干化线设置

Tab.6 Drying line setting for the sludge treatment project

项 目	干化线数量/条	单线蒸发量/ ($t \cdot h^{-1}$)	备用情况
污泥改扩建工程 现有改造线	1	4.7	无备用
污泥改扩建工程 扩容新建线	2	5.0	无备用
污泥处理 二期工程	2	5.0	考虑片区整体协同,设置1条干化 处理备用线

石洞口污泥处理改扩建工程现有改造线和扩容新建线的污泥干化系统均未设置备用设施,当改扩建工程现有改造线污泥干化系统应急故障时,干化系统蒸发量缺口为4.7 t/h。二期工程设置一条干化处理备用线,备用干化线蒸发能力为5 t/h,可以用来处理改扩建工程现有改造线应急故障工况下的脱水污泥。当改扩建工程扩容新建线中1条污泥干

化线应急故障时,污泥干化系统蒸发量缺口为5 t/h,二期工程备用干化线可以用来处理改扩建工程扩容新建线应急故障下的脱水污泥。

应急工况下污泥处理改扩建工程的脱水污泥可以通过车运的方式运输至二期工程湿污泥接收间,经污泥干化系统干化后送至焚烧炉焚烧处理。另外,若泰和污水厂来泥为含水率80%的脱水污泥,可通过脱水污泥接收储运系统输送至污泥干化系统,按污泥干化系统设备配置能处理约20 tDS/d的泰和污水厂含水率80%的脱水污泥。

3.5 污泥焚烧线数量

针对2条污泥焚烧线和3条污泥焚烧线的对比见表7。

表7 污泥二期工程焚烧线设置数量对比

Tab.7 Comparison of the number of incineration lines for the sludge project phase II

项 目	3条污泥焚烧线	2条污泥焚烧线
单台焚烧炉处理能力/ ($tDS \cdot d^{-1}$)	57	86
单线故障检修期间 污 泥 处 理 能 力/ ($tDS \cdot d^{-1}$)	114	86
单线故障期间污泥 处 理 能 力 缺 口/ ($tDS \cdot d^{-1}$)	近期:4.7; 远期:14	近期:32.7; 远期:42
近期1个月检修期 间无法全量处理的 半干污泥量	约313 m ³ 半干 污泥(含水率为 40%)	约2180 m ³ 半干 污泥(含水率为 40%)
远期1个月检修期 间无法全量处理的 半干污泥量	约1097 m ³ 半干 污泥(含水率为 40%)	约3290 m ³ 半干 污泥(含水率为 40%)

本工程共设置3条污泥焚烧线,如果减少污泥焚烧线条数,进一步扩大单台焚烧炉的处理能力,将会带来以下问题:

① 地下半干污泥接收坑需要扩大容积,相应增加构筑物占地面积。鉴于泰和厂未设置半干污泥储存设施,单线焚烧炉故障检修期间,本工程需要接收、存储大量的半干污泥。若采用2条污泥焚烧处理线,为了保证半干污泥储存的安全性和长时间储存后输送处理的可靠性,用于接收储存泰和厂半干污泥的地下污泥接收坑需要扩大容积,相应增加构筑物占地面积。

② 焚烧炉无法全量处理半干污泥接收坑产生的臭气,需要设置半干污泥接收坑专用除臭设施,增加除臭设施占地面积。原有设计方案中半干污泥接

收坑的臭气全量作为焚烧炉的助燃空气,无需设置专用除臭设备。

③ 半干污泥的大规模接收、存储会带来臭气扩散、粉尘爆炸等运行风险。鉴于泰和厂半干污泥的特殊性,若采用2条污泥焚烧线,单线故障期间大规模接收、卸料和储存过程中会散发大量的臭气和粉尘,导致运行期间的臭气和粉尘控制难度增加,带来臭气扩散和粉尘爆炸的风险。

④ 焚烧处理线减少会降低工程的备用性,影响石洞口片区的污泥协同处理能力,降低整个污泥处理系统的安全性。

4 结语

为解决石洞口片区增量污泥的出路问题,提出建设石洞口污水处理厂污泥处理二期工程。二期工程作为石洞口片区污泥处理的托底工程,充分考虑了片区污泥处理的整体协同,以实现片区污水厂污泥全量、高效、稳定的处理处置。

① 基于片区污水厂近远期污泥产量分析,调整在建石洞口污泥处理改扩建工程污泥处理对象,确定污泥二期工程处理对象为石洞口厂提标增量污泥和泰和厂污泥,工程按远期规模(128 tDS/d)一次建成。

② 二期工程污泥处理采用“离心脱水+干化+单独焚烧”的工艺技术路线。污水、污泥处理工程位于同一厂区内,集约化污水、污泥厂区的布置方式真正体现了“泥水同步”的理念。

③ 通过详细的物料能量平衡计算,同时综合设备运行的稳定性、安全性等多方面因素,确定干化污泥含水率为30%。

④ 通过设置半干污泥地下接收坑对外来泰和厂半干污泥进行接收、储存,并在接收坑内对本厂半干污泥和外来半干污泥进行充分混合。

⑤ 基于片区污泥处理的统一考虑,二期工程污泥设置2条污泥干化线及3条焚烧线,有效应对检修、应急故障等各种不利工况的发生。

参考文献:

- [1] 朱晟远,王丽花,林莉峰. 石洞口污泥处理完善工程设计要点分析[J]. 给水排水,2017,43(6):14-19.
Zhu Shengyuan, Wang Lihua, Lin Lifeng. Introduction to the process design of Shidongkou sludge treatment upgrading project[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017,43(6):14-19(in Chinese).



作者简介:胡维杰(1972—),男,浙江慈溪人,本科,教授级高工,注册设备(给水排水)工程师,注册咨询工程师,研究方向为污水处理及污泥处理等。

E-mail: huweijie@smedi.com

收稿日期:2018-11-27

实施国家节水行动,建设节水型社会