

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.16.012

# 白龙港污水厂污泥流化床干化系统设计与研究

张冬凌

(上海市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘要:** 污泥干化是污水处理厂市政污泥处理处置过程中的一个重要环节。白龙港污水处理厂作为亚洲规模最大的污水处理厂,已建成并成功运行了国内首座污泥厌氧消化+干化处理工程,以及目前全世界规模最大的污泥单独干化焚烧项目,均采用流化床干化工艺对污泥进行干化。工程应用中,流化床干化处理能力均可满足设计要求,并可充分实现与污泥消化系统及污泥焚烧系统的有机结合。干化热源、系统换热方式的选择充分考虑了不同衔接工艺的特点,节约了能源和资源消耗。流化床干化系统能够安全、稳定运行,干化系统产生的冷凝水、载气等得到妥善处置,臭气污染物得到控制。

**关键词:** 白龙港污水处理厂; 污泥处理处置; 污泥干化; 流化床干化

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)16-0071-06

## Design and Study of Fluidized Bed Sludge Drying System in Bailonggang Wastewater Treatment Plant

ZHANG Dong-ling

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Sludge drying is an important step in the process of municipal sludge treatment and disposal in wastewater treatment plants (WWTPs). As the largest WWTP in Asia, Bailonggang WWTP has built and successfully operated the first sludge anaerobic digestion and drying project in China and the largest single sludge drying incineration project in the world. For both projects, fluidized bed drying process was selected for drying sludge. In engineering application, the capacity of fluidized bed system met the design requirements, and fully realized the combination with sludge digestion system and sludge incineration system. The selection of drying heat source and system heat-exchange mode fully considered the characteristics of different connection processes and saved energy and resource consumption. The fluidized bed drying system operated safely and stably. The condensate and carrier gas produced by the drying system were properly disposed, and the odorous pollutants were effectively controlled.

**Key words:** Bailonggang WWTP; sludge treatment and disposal; sludge drying; fluidized bed drying

### 1 概述

白龙港污水处理厂作为亚洲规模最大的污水处理厂,设计规模 $280 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,提标完成后出水水

质将达到GB 18918—2002的一级A标准。白龙港污水处理厂污泥处理区主要包括白龙港污泥消化干化处理工程、白龙港污泥预处理应急工程,以及

基金项目:上海市科委基金资助项目(20230730100)

白龙港污泥干化焚烧处理工程,其中污泥消化干化处理工程、污泥干化焚烧处理工程均采用了污泥流化床干化工艺。

白龙港污泥消化干化处理工程设计规模为204 tDS/d,采用了污泥浓缩+中温厌氧消化+离心脱水+部分脱水污泥流化床干化的工艺流程。其中,污泥干化设施设计规模60 tDS/d,采用流化床干化工艺,于2011年12月通过功能保证验收<sup>[1]</sup>。项目利用厌氧消化剩余沼气满足热干化能源需要,在国内首次成功实现污泥消化系统+污泥干化系统的联合运行。污泥消化干化处理工程干化车间外观见图1。



图1 白龙港污泥消化干化处理工程干化车间

Fig.1 Drying workshop of Bailonggang sludge anaerobic digestion & drying project

白龙港污泥干化焚烧处理工程设计规模为486 tDS/d,采用了污泥脱水+干化+焚烧+烟气处理的工艺流程。其中,对现有污泥干化设施进行现状利用,干化后车运至新建焚烧系统进行处理。新建污泥干化设施设计规模378 tDS/d,采用流化床干化工艺,为目前全世界规模最大的污泥单独干化焚烧项目,利用污泥焚烧所产生的热量进行污泥干化。污泥干化焚烧处理工程车间外观见图2。



图2 白龙港污泥干化焚烧处理工程干化焚烧车间

Fig.2 Drying and incineration workshop of Bailonggang sludge drying & incineration project

白龙港污水处理厂污泥干化系统主要技术指标见表1。

表1 污泥干化系统主要技术指标

Tab.1 Main indices of sludge drying systems

项目	污泥消化干化处理工程	污泥干化焚烧处理工程
项目整体工艺	污泥浓缩+中温厌氧消化+离心脱水+流化床干化	离心脱水+流化床干化+焚烧+烟气处理
干化线数量/条	3	9
设计规模/(tDS·d <sup>-1</sup> )	60	378
单线蒸发能力/(kg·h <sup>-1</sup> )	2 830	9 600
进泥含水率/%	约76~78	约78~80
出泥含水率/%	10	10
后续处置出路	厂内车运至污泥干化焚烧处理工程焚烧处置	进入焚烧设施处置

白龙港污泥干化焚烧处理工程充分考虑了与污泥消化干化处理工程的衔接。厂内各类污泥(包括初沉污泥、剩余污泥、化学污泥,部分经消化)在储泥池中充分混合、脱水后进入消化干化处理工程或干化焚烧处理工程的流化床干化系统。作为干化污泥的后续处置设施,干化焚烧处理工程焚烧系统设有多个投料口,可同时满足干污泥(含水率10%)、湿污泥(含水率80%)及外来接收污泥(含本厂污泥消化干化工程干化污泥、虹桥污水厂干化污泥)的投料,焚烧炉设计入炉含水率为30%~60%<sup>[2]</sup>。

污泥干化焚烧处理工程总体工艺流程见图3。

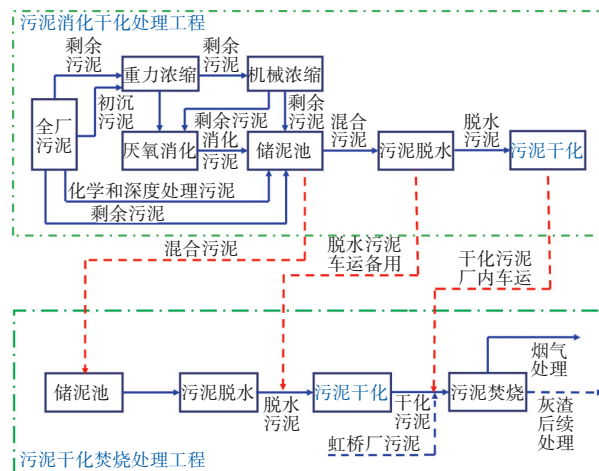


图3 总体工艺流程

Fig.3 Overall process flow diagram

## 2 流化床干化工艺特点

流化床干化工艺在白龙港污水处理厂、石洞口污水处理厂等多座污水处理厂中均有较为成熟的应用。早期相关研究报道中对流化床干化系统的特点作了详细介绍<sup>[3-5]</sup>,主要包括:系统密闭,循环载气管路可实现自惰性;可靠性高,系统稳定运行时间长;经处理的全干污泥颗粒安全卫生标准高;可实现全自动运行,对运行人员数量要求低。

此外,结合工程的实际情况,流化床干化在以下几方面具有较好的适应性:

① 设备占地面积小。白龙港厂内两座污泥工程均存在用地十分紧张、高度受限等难点。与其他常见的干化技术相比,在同等的场地条件下,流化床干化设备处理量大,总体需配置生产线数量少。因而,流化床干化工艺对于场地条件紧张的项目具有较好的适应性。

② 机械故障风险低。受制于场地原因,白龙港污泥干化焚烧处理工程设备分布于两个地块中,给运行检修带来难度。流化床干化机本体内无机械传动部件,正常工况下无需机械维修,安全可靠。

③ 对进泥含水率波动适应性较好。白龙港污水厂前端污泥来源多、范围广。流化床干化工艺能够适应湿污泥特性的变化波动,无需随湿污泥特性进行运行参数调整。

## 3 流化床系统设计

### 3.1 污泥进料系统

含水率约80%的脱水污泥由污泥泵送至污泥进料仓。料仓底部配备进泥螺杆泵,根据干化机运行负荷、载气出口温度、流化床床压等参数控制螺杆泵的进料量,将湿污泥输送至干化机给料分配器。

由于污泥消化干化工程后端不设焚烧设施,因此在进料系统中另单独设置一组污泥螺杆泵,将脱水污泥直接与干化系统产生的干颗粒(含水率约10%)进行混合。混合后的污泥含水率约30%,可有效减少卸料、外运过程中污泥颗粒及粉尘的外逸。

### 3.2 流化床干化系统

干燥机内由底部至顶部分别设有带配气板的风箱、热交换器及抽气罩。风箱将流化载气均匀分布在干燥机内,使干污泥颗粒维持均匀的悬浮状态;湿污泥进入干化机后,由给料分配器迅速切碎

并与干颗粒混合,换热管束中的热媒与湿污泥进行充分热交换,水分迅速蒸发至污泥含固率达到90%以上<sup>[3]</sup>。污泥干化后由床层的料位差来控制卸料量,通过卸料阀进入冷却系统进行冷却。对两个工程而言,流化床干化系统的设计原理总体保持一致。

### 3.3 冷却系统

冷却系统的主要作用如下:①通过冷却螺旋将干化机出口的干颗粒温度由约85℃冷却至45℃以下,以防止温度过高等产生的焖烧;②通过尾气洗涤塔及除雾器对干化尾气进行洗涤、冷凝。

污泥消化干化处理工程中,冷却螺旋用水及尾气洗涤用水均采用现状厂区中水,从而节省了自来水的耗量。在污泥干化焚烧处理工程中,由于单独设置了生产用水增压系统,因此冷却螺旋冷却水采用自来水循环利用的方式。

### 3.4 循环载气系统

两个工程的循环载气均由一台引风机及一台鼓风机提供,并根据变频器及文丘里管对风量进行调节。载气风量的大小决定了干颗粒在干化机中的流化状态,在干化机启动及预热过程中(湿污泥投料前)风量的设定略低于设计值,以减少床料在流化过程中磨损形成的过细粉尘进入后续系统的情况。

结合污泥消化干化处理工程早期运行情况,在污泥干化焚烧处理工程中单独设置了风机房,以减少运行中车间内的臭气、噪声。此外,长时间运行下风机中不可避免地可能会产生少量凝结废水的聚积。针对这一问题,在干化焚烧工程的设计中,风机额外考虑了凝结水排放措施,该部分含恶臭气味的凝结废水通过设水封的专管进行排放。

### 3.5 冷凝系统

载气经旋风分离器后,在载气冷凝器内进行洗涤、冷凝。洗涤后的气体由85℃左右冷却至55~60℃左右,出口气体中含有的微小水珠进入汽水分离器进行分离,洗涤冷却后的气体再循环到干燥机内循环使用。

结合不同工程的干化处理规模,冷凝系统洗涤用水的选择存在差异。污泥消化干化处理工程中,冷凝系统采用直接换热的方式进行载气洗涤,工艺路线较为简单。洗涤水采用现状厂区中水,耗量约120 m<sup>3</sup>/tDS,经载气洗涤后的废水重新回到污水处



理厂前端污水处理设施进行处理。污泥干化焚烧处理工程中,则采用间接换热的方式,利用冷却塔和换热器对载气洗涤水进行换热。通过这种方式,系统的补水量、排放量大幅减少,补水耗量仅为直接换热的3%~5%,排放量仅为6%~8%(包含载气中带出的蒸发水量)。相比于直接换热,尽管间接换热工艺在运行中需对相关辅助设施(软水制备系统等)进行定期维护,但中水消耗及喷淋废水的产生量大幅度减少。在干化设施规模较大时,采用间接换热可以减少洗涤废水对污水处理设施的冲击。

干化冷凝废水具有温度高、异味大的特点,直接排入污水管网后会对厂区环境造成一定影响。干化冷凝废水污染物浓度较高,以污泥干化焚烧处理工程为例,干化冷凝废水的COD浓度约725~974 mg/L,总氮浓度约196~232 mg/L。在该工程的设计中,采用密闭的专管将洗涤水排入前端储泥池中与污泥进行充分混合,不直接纳入厂区污水管网。此部分水量与污泥脱水滤液混合均匀后,泵送至污水厂前端处理设施进行进一步处理。通过上述方案,可有效降低干化冷凝废水造成的臭气影响。

### 3.6 粉尘输送系统

流化载气中的粉尘通过旋风分离器进行捕集后进入粉尘仓,并通过螺旋输送至下一级子系统。与流化床内的干污泥颗粒不同,粉尘的粒径尺寸过细,无法继续作为流化床料使用,在非密闭环境中又极易逸散。

在污泥消化干化处理工程中,粉尘通过与脱水污泥返混后,重新进入流化床进行干化,在系统内部形成了循环;而在污泥干化焚烧处理工程中,粉尘与干化机产出的干污泥颗粒进行均匀混合,通过螺旋输送至焚烧系统直接焚烧。两种处理路线均结合自身系统特点对这一副产物进行了妥善处理,且设计中均注重了系统的密闭性,考虑了物料混合的均匀程度,确保系统得以稳定运行。

### 3.7 干污泥输送系统

经过产品冷却后的干化污泥通过螺旋输送至干污泥料仓。根据项目后续处理处置路线的不同,干污泥输送系统的设计存在一定差异。

污泥消化干化处理工程中,通过返混装置将污泥含水率由10%调节至30%后通过污泥车外运,减缓了卸料、运输过程中的粉尘扩散。在干化焚烧处理工程建成后,消化干化工程的干污泥产品将被运

至干污泥接收仓后进行焚烧处理。干化焚烧处理工程中,含水率约10%的干污泥颗粒则直接通过多级螺旋输送机密闭输送,至焚烧炉前干污泥缓存仓直接焚烧处理。

流化床干化工艺流程见图4。

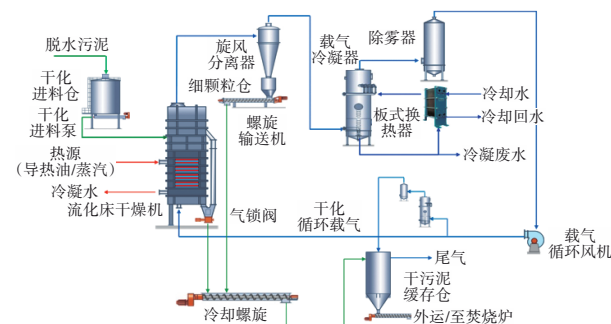


图4 白龙港污泥干化焚烧工程流化床干化工艺流程

Fig.4 Flow chart of fluidized bed drying process in Bailonggang sludge drying & incineration project

## 4 流化床干化运行分析

### 4.1 热源及热媒分析

白龙港污泥消化干化处理工程中,干化系统通过与厌氧消化系统的有机结合,将脱硫净化后的沼气用作燃料,利用产生的热量对导热油进行加热。导热油通过循环泵在流化床干燥机及导热油锅炉间循环,约250℃的导热油进入热交换管束,与流化床内的湿污泥进行换热。导热油锅炉亦可使用天然气为燃料,作为存在热量缺口时的补充。

白龙港污泥干化焚烧处理工程中,干化系统所需热量则由污泥焚烧系统产生的蒸汽提供,热媒为1.6 MPa、约202℃的饱和蒸汽。蒸汽通过干燥机内的热交换管束传热至流化床内,所产生的凝结水通过凝结水罐收集,在约130℃的温度下由泵送回至焚烧汽水系统。当存在热量缺口时,不足部分由天然气辅助锅炉产生蒸汽提供。

两个工程干化系统的热源分析见表2。

热媒的选择充分考虑了干化系统前后的工艺路线及项目可用的热源。污泥消化干化处理工程出于对剩余沼气进行利用的考虑,干化系统采用导热油供热,形成闭式循环系统,能够有效降低热散失及能耗<sup>[3]</sup>。由于采用油泵输送,相比于蒸汽,导热油工艺路线简单,具有更高的稳定性。对于污泥干化焚烧处理工程,选择蒸汽作为热媒能直接与焚烧系统产生的蒸汽热源进行对接,充分利用蒸汽冷凝

产生的潜热对污泥进行干化,与导热油相比有更好的匹配性。

表2 污泥干化系统热源分析

Tab.2 Heat source analysis of sludge drying system

项 目	污泥消化干化处理工程	污泥干化焚烧处理工程
热源	沼气(厌氧消化系统)	蒸汽(焚烧系统)
补充热源	天然气	天然气
热媒	导热油	蒸汽
进、出口 温度/℃	250、160	202、130
输送方式	油泵输送	1.6 MPa带压
热量利用 方式	利用导热油温差显热	利用蒸汽冷凝产生潜热

此外,蒸汽作为热媒时在运行中仅需补充少量水,而导热油长期使用存在劣化的问题,日常需补给、更换。采用蒸汽作为热媒仅需对管道进行日常维护,工作量较小;而采用导热油时,除输送管道外,对储运设备(如储油罐、输送泵等)定期检修也有一定要求。因此,对于具有一定规模的污泥干化设施,与污泥单独焚烧处置结合、选用蒸汽作为热媒时,具有运行成本低、检修维护工作量低的特点,同时也对焚烧蒸汽系统参数控制的稳定性提出了更高的要求。

采用不同热媒的情况下,两项目干化系统对紧急工况下的停车与保护均具有较好的适应性。污泥消化干化处理工程中,在停车状态下导热油泵立即停止对干燥机提供热量,即使无冷却系统,换热管束内有限的油量也不会显著提高流化床内的温度。对于污泥干化焚烧处理工程,在紧急工况下通过截止阀关停控制,使蒸汽管与流化床干燥机进行隔离;同时,系统通过锅炉的安全阀提供蒸汽压力保护。

## 4.2 臭气控制分析

在污泥干化车间,流化床干化机整体采用密闭性设备。常规的臭气来源主要包含以下几个方面:①污泥储存。包括湿污泥料仓、干污泥缓存仓等。②污泥输送。包括干燥机给料口及卸料口、螺旋输送机、斗提机等。③干化副产物。包括干化不凝载气、冷凝废水等。④可能出现的设备磨损等。如干化风机、板式换热器。

流化床干化装置在正常情况下维持密封状态。针对臭气源特点,污泥消化干化处理工程采用化学

洗涤+生物除臭处理工艺对干化载气中的废气以及料仓、卸料口等处产生的废气进行除臭处理。在此基础上,污泥干化焚烧处理工程结合工艺路线、车间及管道布置、设备等对干化臭气控制进行以下优化:

① 结合焚烧系统,部分载气中不凝气体作为助燃空气送至焚烧炉处理。应急工况下,仍进行收集并经由除臭装置处理。

② 板式换热器与载气循环风机布置于单独、封闭的房间,从而与主体车间进行隔断,防止在清洗、检修过程中臭气外逸,并设置单独的抽气系统。

③ 在消化干化处理工程中,干化产生的冷凝水由预埋地下排水管排放至污水管网。在实际运行过程中,由于此部分污水具有温度高、臭气浓度大等特点,因而进入污水管网后易产生臭气外泄。在后期污泥干化焚烧处理工程中,冷凝废水由冷凝水泵的压力侧排出,并通过专管排放至前端储泥池进行混合,不直接进入污水管网。

④ 减少设备密封性带来的臭气问题。干化机上部结构主体法兰采用现场焊接;载气循环风机接口处采用不锈钢软连接,而非橡胶垫片,避免更换时产生的污染物残留等。

⑤ 在污泥料仓、输送设备接口处等重点位置设置臭气收集管道,干化车间整体采用离子送风除臭+生物滤池+化学洗涤+活性炭吸附除臭工艺。

## 4.3 含氧量控制分析

为防止干化污泥颗粒发生内燃甚至爆炸事故,保证系统的安全可靠运行,流化床干化内部通常采用低含氧条件<sup>[4]</sup>,即含氧量<8%(体积分数,正常工况下一一般为1%~3%)。根据流化床干化系统的设计原理及运行经验,流化床内部呈微负压状态,载气形成密闭循环,在此过程中气密性良好时系统可实现自我惰化。同时,在载气风管内设置在线氧含量监测仪,并与相应系统进行安全联锁。

随着运行时间增加,机械传动部件的磨损加剧,可能导致密封性不同程度失效,从而存在系统含氧量增高的风险<sup>[5]</sup>。污泥消化干化处理工程设有注氮系统,在此基础上,污泥干化焚烧处理工程增设了氮气制备系统及氮气储罐等设备。上述设备能够稳定地向系统中补充氮气,在设备启动前通过惰化程序将氧含量降低至3%以下,并能在紧急情况下向干化机补充氮气,确保设备安全运行。

相似地,对于干污泥储仓的设计,均要求其维持在微过压状态,以防止空气进入干污泥存储系统<sup>[3]</sup>。污泥干化焚烧处理工程的干污泥缓存仓能够同时接收氮气以及循环载气中的不凝废气。在干化机正常运行期间,当不凝废气量较少时,制氮系统将产生氮气注入干污泥缓存仓以使其仍维持在300~500 Pa的压力。

## 5 结语

污泥干化处理已成为污水处理厂污泥处理处置过程中一个重要环节。白龙港污水处理厂污泥消化干化处理工程采用的流化床干化系统运行至今性能稳定、情况良好。在此基础上,污泥干化焚烧处理工程结合工艺路线,因地制宜地针对流化床干化系统的设计、热源选择、臭气控制、含氧量控制等采取了有效的优化措施。目前,污泥干化焚烧处理工程也已建成投运,其中的流化床干化系统运行稳定,并充分实现了与焚烧系统的衔接,各系统处理能力满足设计要求。白龙港污水厂内流化床干化设施的实施、运行为污泥干化处理技术路线提供了宝贵的设计及运行经验,同时为国内其他市政污泥处理处置项目提供了重要参考。

## 参考文献:

- [1] 胡维杰. 上海市白龙港污泥处理工程工艺设计及技术特点[J]. 中国给水排水, 2011, 27(18): 40-45.
- HU Weijie. Process design and key technical features of Shanghai Bailonggang sludge treatment project [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(18): 40-45 (in Chinese).
- [2] 胡维杰, 邱凤翔, 卢骏营. 上海市白龙港污泥干化焚

烧工程工艺设计与思考[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 54-58.

HU Weijie, QIU Fengxiang, LU Junying. Process design and consideration of Shanghai Bailonggang sludge drying and incineration project [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 54-58 (in Chinese).

- [3] 胡维杰. 白龙港污水厂污泥热干化系统的工艺设计及其特点[J]. 工业水处理, 2013, 33(10): 92-94.

HU Weijie. Process design and characteristics of sludge thermal drying system in Bailonggang sludge treatment plant [J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(10): 92-94 (in Chinese).

- [4] 李建勇, 童飞, 周丕仁, 等. 流化床污泥干化器循环系统产生可燃气体和粉尘原因分析与防治对策[J]. 城市道桥与防洪, 2013(6): 133-135.

LI Jianyong, TONG Fei, ZHOU Piren, et al. Cause analysis and preventive countermeasure on combustible gas and dust produced from circulating system of fluidized bed sludge dryer [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(6): 133-135 (in Chinese).

- [5] 陆峥嵘. 白龙港污水处理厂污泥热干化系统的运行分析[J]. 城市道桥与防洪, 2018(5): 170-172.

LU Zhengrong. Analysis on operation of sludge heat drying system in Bailonggang wastewater treatment plant [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(5): 170-172 (in Chinese).

作者简介: 张冬凌(1992-), 男, 上海人, 硕士, 工程师, 研究方向为污水处理及污泥处理等。

E-mail: zhangdongling@smedi.com

收稿日期: 2021-05-04

修回日期: 2021-05-29

(编辑: 孔红春)

治理水土流失 建设美丽中国