

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.015

密闭式气体循环污泥热干化技术性能分析

朱有法¹, 邓 龙², 刘 威², 吴 敏², 饶宾期²

(1. 浙江诺曼环保工程技术有限公司, 浙江 杭州 311201; 2. 中国计量大学 机电工程学
院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 针对目前污泥含水量高且干化效率低的问题,设计了一种密闭式污泥热干化装置。对含水率为55%~64%的污泥进行了连续一个月的干燥测试。首先对污泥进行采样,分析污泥泥质参数;在此基础上进行主要参数测试,包括湿泥含水率、干泥含水率、进出干湿泥总量、单位能耗脱水量、冷凝水总量和冷凝水成分。结果表明,板框压滤后湿泥平均含水率为63.26%,经低温干化后的污泥含水率平均达到27.06%,且去除1 m³的水仅需耗电298 kW·h。该装置能有效减小污泥体积,降低污泥处置成本。

关键词: 污泥; 密闭式; 低温热干化; 含水率; 单位能耗脱水量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0100-04

Analysis on Closed Gas Circulating Sludge Thermal Drying Technology

ZHU You-fa¹, DENG Long², LIU Wei², WU Min², RAO Bin-qi²

(1. Zhejiang Norman Environmental Engineering Technology Co. Ltd., Hangzhou 311201, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A closed sludge thermal drying device was designed to solve the problems of high sludge moisture content and low drying efficiency. The sludge with moisture content of 55%~64% was dried for a month. Firstly, the sludge was sampled and its parameters were analyzed. On this basis, the main parameters were tested, including moisture content of wet sludge, moisture content of dry sludge, total amount of wet and dry sludge in and out, dehydration per unit energy consumption, total amount of condensate and condensate composition. The average moisture content of wet sludge after plate and frame pressure filtration was 63.26%, while the average moisture content of sludge after low-temperature drying reached 27.06%, and only 298 kW·h of electricity was consumed to remove 1 m³ of water. The device can effectively reduce the volume of sludge and the operational cost of sludge disposal.

Key words: sludge; closed type; low-temperature thermal drying; moisture content; dehydration per unit energy consumption

基金项目: 浙江省万人计划科技创新领军人才项目(2021R52056); 国家自然科学基金资助面上项目(51878635、51876196); 浙江省自然科学基金资助重点项目(LZ23E080001); 浙江省自然科学基金资助杰青项目(LR19E060001); 金华市重大科技计划项目(2022-1-014); 湖州市公益计划项目(2018GZ26)

通信作者: 饶宾期 E-mail: raobinqi@cjlu.edu.cn

随着工业化进程加快以及城镇人口数量的急速增长,我国城镇污水产量也在以惊人的速度增加^[1]。污泥是一种复杂的混合物,其内部含有大量的有机物、细菌、致病微生物和重金属等有毒有害物质,一般占污水体积的0.3%~0.5%,可见对污泥进行合理处置势在必行,但目前的污泥处理成本很高^[2]。污泥减量化是解决我国庞大剩余污泥的重要途径。目前,污泥减量化的方法有浓缩、消化、脱水、干化及焚烧等。其中污泥脱水技术包括压滤式脱水、离心式脱水和叠螺式脱水等^[3]。但是机械式的脱水存在能耗大、泥饼含水率高、脱水前需要进行污泥调理、过程复杂、运行费用过高等问题。污泥热干化技术是针对污泥高度脱水的工艺或设备,其是对污泥脱水之后的进一步减量化处理,通过传热介质直接或间接地对污泥进行加热,使污泥中的水分绝大部分或者全部以水蒸气的形式分离出来。经过热干化处理后,污泥含水率大幅降低,可进行焚烧,从而实现污泥资源的有效利用,并且达到了减量化和无害化的目的^[4]。污泥热干化是公认的绿色环保技术,随着我国对节能环保要求的日益提高,低温干化技术会有巨大发展。

1 材料与方法

1.1 热干化装置

密闭式污泥热干化装置由热泵循环系统、网带干燥系统、风机系统、自制控制系统及进出料系统组成,如图1所示。

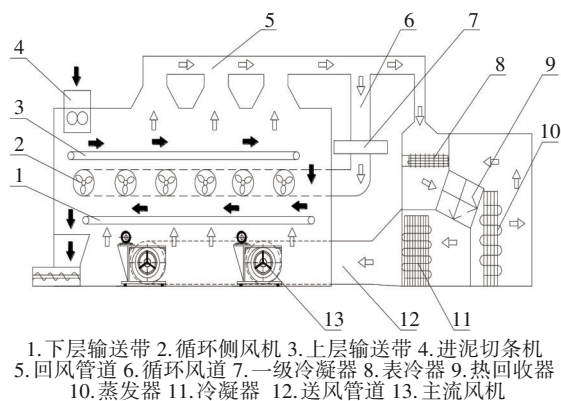


图1 热干化装置结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of thermal drying device

热泵循环系统由压缩机、冷凝器、蒸发器、膨胀阀、冷媒、热回收器、主流风机、循环侧风机、水换热器和管路等组成,根据每台污泥处理设备每小时脱

水200 kg计算选型,压缩机采用国际品牌压缩机,蒸发器和冷凝器根据总换热换冷量进行设计,冷凝器的换热面积为550 m²,蒸发器的换热面积为380 m²。制冷剂选用安全环保型的R34a,该制冷剂主要用于高温环境下的空调系统和热泵等。网带干燥系统包含物料输送网带及保温干燥箱,上、下两层输送网带布置在保温箱内部,保温箱侧面设有循环风道。进料系统及出料系统包含温湿度计、电表、压力表、信号线、进泥切条机、干泥出口等。风机选用耐高温和耐腐蚀的离心风机,风量范围为5 000~8 000 m³/h。

1.2 实验流程

首先,开启热泵预热,采用65~80℃热空气通过管道进入干燥箱使得箱内温度升高,同时耐高温主风机开始工作,新风在干燥箱内部循环,由热泵系统通过送风口进入网带热干燥箱内,将内部空气加热成送风温度为65~80℃的热干空气;然后,开启网带输送系统,开始进料,污泥挤压成型后进入干燥箱内的网带上,条状污泥平铺在上层输送网带上,使其与热空气接触,通过传热介质进行换热,将污泥中的水分蒸发,热干空气由下层网带往上循环,使污泥内部含湿量逐步提升,产生潮湿空气,经过除尘布袋过滤后,高湿中温空气经过回风口时一分为二,一部分进入热回收器中进行等湿降温,经过蒸发器后温度降低到湿空气的机器露点以下,析出大量水分,变为低温低湿的空气,紧接着低温低湿的空气再次进入热回收器中进行一次升温,之后经过冷凝器进行二次升温加热,重新加热为65~80℃的热干空气;另一部分通过循环风道经过一级冷凝器,中温高湿空气在冷凝器中被等湿加热,再经过循环风机到达一层输送网带下方。两部分的高温空气重新汇合,在主风机的作用下,在干燥箱与热泵之间往复循环。

1.3 检测方法

在热干化装置处理量为50 t/d的前提下,进行将含水率为55%~64%的污泥干化到30%以下实验,并测定污泥泥质、干湿污泥量、进料量、干湿污泥含水率、析出冷凝水量和耗电量等参数,确定这些参数与干燥效率及单位能耗脱水量的关系。同时检测析出冷凝水的成分,使其能够满足污水水质排放标准。污泥含水率采用水分分析仪检测;析出冷凝水量由排水体积确定,使用流量计测量;干、湿

污泥进出量由电子秤测量;耗电量采用电表进行读数;污泥泥质、冷凝水成分主要分析总氮、氨氮、总磷、COD、SS等指标。干燥效果采用干燥效率及干燥后的污泥含水率进行评价,采用单位能耗脱水量评价能耗情况。干燥效率为单位时间里析出的冷凝水量。单位能耗脱水量为每消耗1 kW·h电量所能脱除的冷凝水质量,单位能耗脱水量越大,干燥效率越高,脱水效果越好,性能越优越。

2 结果与讨论

2.1 污泥泥质分析

进行测试前,检测污泥泥质,选取5组同板框压滤污泥和干化后污泥作为样品,检测结果见表1。不同阶段污泥照片如图2所示。

表1 污泥泥质情况

Tab.1 Properties of sludge

项 目	含水率/%		有机质含量/%		热值/(kJ·kg ⁻¹)	
	热干化 出泥	板框出 泥	热干化 出泥	板框出 泥	热干化 出泥	板框出 泥
样品1	23.13	58.29	43.27	42.82	9 552	8 780
样品2	25.67	66.19	43.58	42.51	9 343	8 466
样品3	30.42	65.41	43.98	42.92	9 356	9 025
样品4	27.57	62.30	41.40	40.58	8 680	8 179
样品5	28.51	64.10	39.00	38.50	7 849	7 072
均值	27.06	63.26	42.25	41.47	8 956	8 304



a. 板框压滤出来的污泥



b. 干化机中的污泥



c. 热干化后的干泥

图2 不同阶段污泥照片

Fig.2 Photos of sludge in different stages

通过表1和图2可以看出,采用板框压滤后污泥平均含水率为63.26%,经过低温干化处理后的污泥含水率平均值达到27.06%,热干化后污泥的泥性及颗粒状态非常明显,细小粉尘较少,满足后

期焚烧系统处置的要求。从检测结果来看,热干化污泥含水率在30%以下时,热值与有机质含量成正比,热值与含水率成反比,即有机质含量越高热值就越高,含水率越低则热值越高。还可以发现,经低温干化后的污泥有机质含量与板框压滤得到的有机质含量基本持平;相比于板框压滤得到的污泥热值,热干化后的污泥热值更高,即可提供的热量更多。

2.2 泥量分析

经计算,进入密闭式污泥热干化装置湿泥的含水率为60%~70%,经过干燥以后的干泥含水率为20%~30%。2018年10月4日—22日连续24 h运行数据表明,湿泥的平均含水率为63.26%,经过约85 min的低温干化处理以后,干泥的平均含水率为27.06%,达到设计要求,即干化到30%以下,满足现场实际工况的使用要求。图3为干泥量和湿泥量的变化。2018年10月4日—9日为装置运行前期的适应阶段;2018年10月10日—22日,装置运行稳定,但该阶段干泥量和湿泥量有所波动,这是由于随着设备运行时间的延长,湿污泥中的杂物以及干化过程中粉尘的积累对除尘布袋产生了影响,同时对污泥切条系统、风道等也均有不同程度的影响。该波动的出现属于正常现象,操作设备需要严格按照“干化机设备操作规程”执行,以确保干化机内部及各系统保持稳定状态。

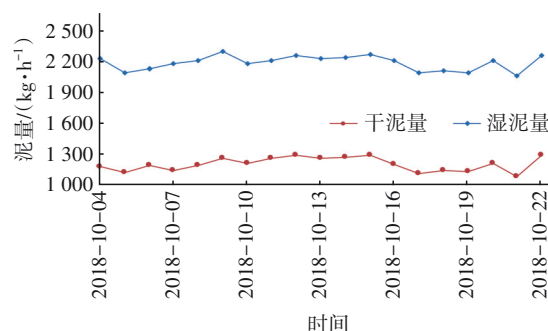


图3 干泥量和湿泥量的变化

Fig.3 Change of the amount of dry and wet sludge

图4反映了冷凝水析出的实际值和脱水量之间存在的差异。热泵经过长时间运行以后,空气的相对含湿度有所提高,能够容纳水蒸气的能力下降。另外,由于热泵的机器露点与实际环境之间存在一定的差异,导致空气能够容纳的污泥所蒸发出来的水分存在差异。

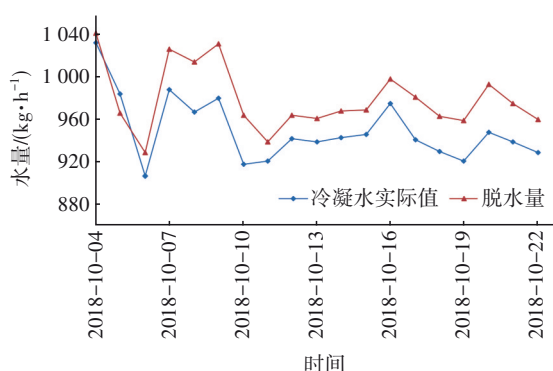


图4 冷凝水析出量与脱水量的变化

Fig.4 Change of condensate precipitation and dehydration

2.3 冷凝水成分分析

对装置排出的冷凝水进行成分分析,结果表明其含氮量为48.32 mg/L、氨氮为37.72 mg/L、总磷为0.3 mg/L、COD为152 mg/L、SS为6 mg/L。使用该装置处理其他几家市政污水处理厂产生的污泥,并测试热干化过程中冷凝水的成分,结果表明,检测结果与本研究有所区别,COD平均在50 mg/L以下,甚至更低达到25 mg/L以下。这是因为每座污水处理厂的工艺不同,因此处理后污泥的成分也会有所不同。

2.4 能耗及经济成本分析

图5为装置的单位能耗脱水情况。

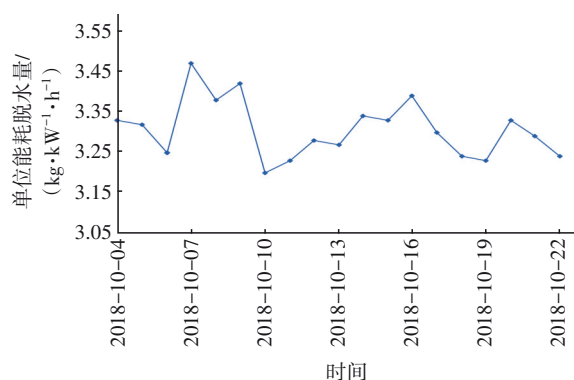


图5 装置的单位能耗脱水情况

Fig.5 Dehydration per unit energy consumption of device

由图5可以看出,单位能耗脱水量最低为3.2 kg/(kW·h),最高能达到3.47 kg/(kW·h)。按单位能耗脱水量平均为3.32 kg/(kW·h)计算,将1 t含水率为63.26%的湿泥干化到含水率为27.06%,脱除1 m³的水耗电约298 kW·h,成本约为193.7元(1 kW·h的电费按0.65元计算),折算成原污水成本为0.023元(按照将热干化脱除1 m³水分与处理得到1 m³可排放污水成本进行折算,处理污水量为19×

10⁴ m³/d)。

3 结论

密闭式污泥热干化装置的热回收器将回风中的热量回收利用,使热量能够高效利用。通过循环风道增加湿热空气与污泥的接触时间,增大湿热空气的相对湿度,提高干化效率,更加节能。干燥过程中,湿热空气都是在密闭的空间内进行循环,不对外排放臭气和废料,因此更加环保。脱除1 m³水需要耗电298 kW·h,成本约为193.7元,折算成原污水的成本为0.023元,相比其他干燥方式具有更大的经济潜力。

参考文献:

- [1] DENG W Y, YIN A D, MA J C, *et al.* Investigation of NO conversion by different types of sewage sludge chars under low temperature [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 209: 236-244.
- [2] 郑泰山,蔡川,黄宋义,等. 污泥深度机械脱水技术及设备的比较分析[J]. *机电工程技术*, 2018, 47(3): 109-112.
ZHENG Taishan, CAI Chuan, HUANG Songyi, *et al.* Comparison and analysis of sludge deep mechanical dewatering technology and equipment [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2018, 47(3): 109-112 (in Chinese).
- [3] 徐振佳,张雪英,周俊,等. 城市污水厂剩余污泥脱水技术综述[J]. *净水技术*, 2018, 37(2): 38-44.
XU Zhenjia, ZHANG Xueying, ZHOU Jun, *et al.* Technical review of dewatering process for excess sludge of municipal sewage plant [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(2): 38-44 (in Chinese).
- [4] 李博. 污泥高效干化方法及干化焚烧系统的优化运行研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
LI Bo. Study on Efficient Sludge Drying Method and Optimal Energy Efficiency of Drying-incineration Combined System [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese).

作者简介:朱有法(1972-),男,浙江杭州人,硕士,高级经济师,主要研究方向为污泥深度脱水、烘干干化设备及工艺的设计与开发。

E-mail: 185630978@qq.com

收稿日期:2022-09-12

修回日期:2022-12-03

(编辑:任莹莹)