

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.018

基于双风道大风量成型的污泥低温干化中试研究

区雪连^{1,2}, 郭艳平^{1,3}, 黄冠英³, 黄擎英³, 朱刚利¹, 张豪³,
潘霆峰¹, 马凯¹, 胡珈睿¹

(1. 广东环境保护工程职业学院 广东省固体废物资源化与重金属污染控制工程技术研究中心, 广东 佛山 528216; 2. 广东环院环境工程有限公司, 广东 广州 510665;
3. 广东吉康环境系统科技有限公司, 广东 佛山 528200)

摘要: 针对含水率高或黏性大污泥干化效率低等问题,开展了市政污泥低温干化工艺中试研究,利用双风道大风量成型技术,验证低温干化设备运行的可靠性与适应性,探讨不同运行参数条件下对机组能效的影响。结果表明,该中试机组能够连续稳定运行,当干化温度为55~70℃时,污泥含水率从80%降低至30%以下,机组平均单位能耗除水量可达3.72 kg/(kW·h),处理湿污泥的能耗为192 kW·h/t。

关键词: 低温干化; 双风道; 市政污泥; 能效比

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0115-07

A Pilot Study on Low-temperature Sludge Drying Process Based on Double Air Duct and Large Air Volume

OU Xue-lian^{1,2}, GUO Yan-ping^{1,3}, HUANG Guan-ying³, HUANG Qing-ying³,
ZHU Gang-li¹, ZHANG Hao³, PAN Ting-feng¹, MA Kai¹, HU Jia-rui¹

(1. Guangdong Engineering and Technology Research Center of Solid Waste Resource Recovery and Heavy Metal Pollution Control, Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216, China; 2. Guangdong Huanyuan Environmental Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510665, China; 3. Guangdong Jikang Environmental System Technology Co. Ltd., Foshan 528200, China)

Abstract: Aiming at the low drying efficiency of sludge with high moisture content or high viscosity, a pilot study on municipal sludge low-temperature drying process was carried out. The reliability and adaptability of the low-temperature drying equipment was verified by using double air duct and large air volume technology, and the influence of different operating parameters on the energy efficiency of the unit was discussed. The pilot unit ran continuously and stably. When the drying temperature was between 55℃ and 70℃, the moisture content of the sludge was reduced from 80% to less than 30%. The average unit energy consumption of water removal reached 3.72 kg/(kW·h), and the energy consumption of wet

基金项目: 广东省普通高校青年创新人才类项目(2018GkQNCX144); 广东省教育科学规划课题(高等教育专项)(J290921102210、2021GXJK636); 2020年度佛山市南海区“蓝海人才计划”创新创业团队(第十一批)项目(2030032000911)

通信作者: 郭艳平 E-mail: 64234221@qq.com

sludge treatment was 192 kW·h/t.

Key words: low-temperature drying; double air duct; municipal sludge; energy efficiency ratio

根据《中国生态环境统计年报·2019》显示,2019年全国污水处理厂处理污水 $742.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,产生污泥 $1\,457.6 \times 10^4 \text{ t}$ 。常规污水处理厂的污泥经过机械脱水以后,其含水率依然可以达到80%左右,长期以来的“重水轻泥”导致污泥处理方法不成熟、污泥处置技术相对落后,不能满足当前污泥处理处置需求。

2021年6月,国家发改委、住建部等部门联合印发《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》(发改环资〔2021〕827号),强调“泥水并重”,要求城市污泥无害化处置率达90%以上,并积极推进污泥资源化。然而,市政污泥含水率高、体积庞大、黏度大等现状^[1]均为后续无害化、资源化处理带来巨大的难题。

近年来,污泥的深度干化减量处理在国家政策与市场需求的双引擎下,发展日趋成熟。相比传统热干化技术,污泥低温干化技术利用低品位能源解决污泥干化减量问题,具有高效节能、操作简便、无额外废气粉尘等优点,因此受到污泥处理处置单位的青睐。然而,高含水率与黏性大的污泥切条成型度较差,且成型后容易二次黏连;同时,烘箱网带传输的初成型污泥从上一层网带掉落至下一层网带时,更容易相互挤压变形而再次黏连成团,导致循环风穿透网带组存在困难,大大影响了干化效果,致使能耗升高。

为了克服以上困难,笔者在传统机组工艺的基础上,升级双风道大风量成型技术,有效解决了高含水率与黏性大污泥干化效率低等问题。同时,针对市政污泥不同含水率的出泥要求,验证了低温干化设备运行的可靠性与适应性,以及不同运行参数条件下对机组能效的影响,旨在为生产实践提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 低温干化原理

该设备主要遵循逆卡诺循环原理,通过回收热源加热循环空气,营造热干空气与除湿冷源的湿度梯度环境,产生55~70℃的极干空气,与污泥进行

湿、热交换,将水分蒸发并冷凝后排出,同时回收空气冷凝潜热,形成极干空气循环作用,达到连续密闭脱水的目的。干化过程中能量循环利用,无废热、废气排放。

1.2 双风道大风量成型技术

在主机烘房循环风道上部出风口处设置旁通风道,由循环风机导流一部分循环风,经过旁通风道的回风冷凝器,提高温度和空气饱和状态点,增强其吸湿能力,然后循环送入上两层网带之间。旁通风和主风道循环风汇流后,在密闭空间内形成大风量回风环境,使最上层的污泥快速失水定型,减小成型污泥颗粒表面黏度,同时避免污泥掉落至下一层网带时相互挤压变形而黏连成团。机组通过在线监控和影像识别系统匹配污泥数据库,实现旁通风量自动调节与设备整体的效能优化。中试原理如图1所示。

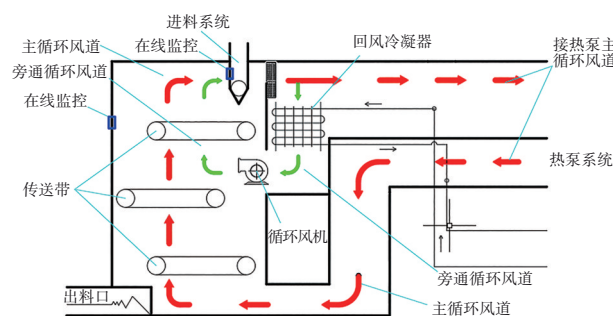


图1 中试原理示意

Fig.1 Schematic diagram of pilot scale test

1.3 中试方案

江苏省某污水处理厂市政污泥的含水率在80%左右,机械脱水方式为带式压滤。中试机组型号为JKFF-2400、风机额定风量为 $6\,960 \text{ m}^3/\text{h}$ 、除水量为 $2\,400 \text{ L/d}$ 、额定功率为31 kW、电源为380 V/50 Hz、制冷剂为R134A。

间歇进泥阶段(工况1~16):启动机组,使其达到预设运行值,送风量分别设置为100%、80%,送风温度分别设置为50、60、70℃,三层铺泥厚度分别为50、40、30 mm,进泥含水率为80%,出泥含水率分别取60%、40%、30%、10%,设置正交条件共16组工

况。待机组状态稳定后,开始进泥,记录进泥量和出泥量,测试1组数据的总进泥量为1 000 kg,待污泥干化完成后停机。

连续进泥阶段(工况17):启动机组,使其达到预设运行值,送风量为80%,送风温度为70℃,三层铺泥厚度分别为50、40、30 mm,进泥含水率为80%,出泥含水率为30%。待机组状态稳定后,开始连续进泥,持续记录进泥量和出泥量,连续运行5 d,每天11 h(现场不具备24 h连续运行条件)。

为保证不同中试条件下,数据测试的准确性和可比性,每组测试数据需达到以下条件:①每测试1组数据,保证总进泥量达到约1 000 kg;②进泥前,提前启动运行机组,使其内部送/回风、温/湿度、风量、风速等达到稳定状态;③开始进泥测试后,需确保出泥含水率至少保持1 h的稳定状态后,才能停机为下一组数据测试做准备。

1.4 分析项目及方法

电参数、送/回风、温/湿度均由机组进行在线采集。含水率采用快速水分仪进行测定。单位能耗除水量(SWER)即为能效比或污泥减重效率。

2 结果与分析

2.1 远程运行数据采集及监控的稳定性和准确性

机组运行稳定后,2021年11月3日—28日共提取12组远程运行数据(电参数、送/回风、温/湿度等),每组数据约19~48万行。结果表明:①机组远程运行数据采集及监控系统具备良好的稳定性。实时数据采集及监控无缺失,历史数据采集及上传的行数无缺失,历史数据采集及上传行数内的数据缺失率为0.8%,远程数据采集的频率为每间隔4~10 s采集1次,对分析数据的稳定性影响不大。由于现场受无线4G网络质量的影响,导致部分上传数据缺失,可改用太网光纤网络连接服务器进一步降低数据缺失率。②机组远程运行数据采集及监控系统具备良好的准确性。本地机组触摸屏采集周期为1次/s,随机调取批量远程采集数据与本地数据进行比对,结果均一致。

2.2 单位能耗除水量的测算

机组0~5 h为进泥时段,2~6 h为出泥时段,运行温度为60℃,送风量为80%,分析出泥目标含水率分别为60%和40%的条件下机组的运行情况,结果如图2所示。从图2(a)可知,机组进泥含水率稳

定在80%左右,运行温度稳定在60℃左右,前期送风湿度随着时间的延长迅速增加,到第2小时稳定在38%左右。第2小时开始出干污泥,由于烘箱网带尚未铺满湿污泥,烘箱内有足够可供交换的能量,因此刚开始的出泥含水率最低,约为16%。之后,随网带上逐步铺满湿污泥,出泥含水率逐渐上升,在第4小时出泥含水率达到60%左右。第5小时进泥结束,网带上残留的湿污泥逐渐减少,出泥含水率不断下降,烘箱内的送风湿度同步随之下降。经核算,从出泥起点到出泥完毕阶段,主机运行所需耗电为122.7 kW·h,用运行过程中所得总冷凝水量499.0 kg除以电耗,得到机组SWER值约为4.07 kg/(kW·h)。

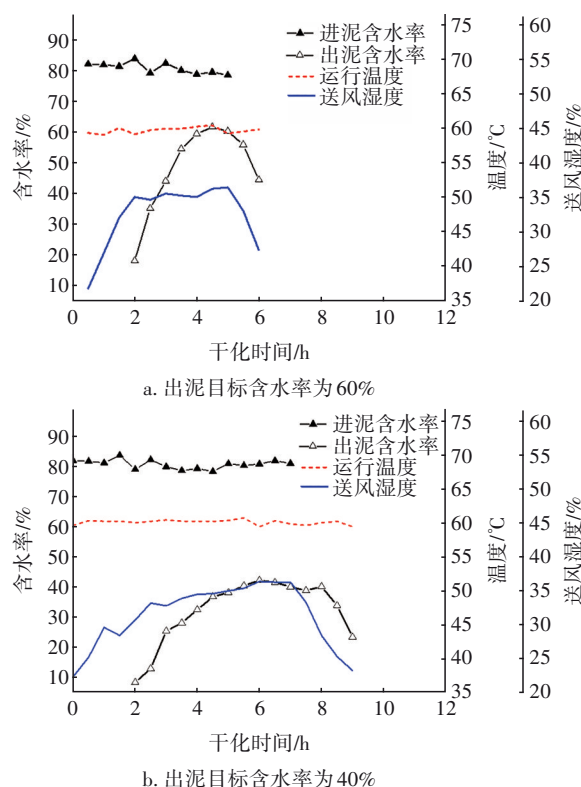


图2 出泥目标含水率分别为60%和40%条件下机组运行情况

Fig.2 Operation datas of the unit under target moisture content of 60% and 40%

当出泥目标含水率为40%时,运行温度和送风湿度的变化曲线与出泥目标含水率为60%的规律类似。从出泥起点(第2小时)到出泥完毕(第9小时)阶段,主机运行所需耗电为187.2 kW·h,所得总冷凝水量为691.9 kg,SWER值约为3.70 kg/(kW·h)。中试采用运行过程中所得总冷凝水量除以主

机运行电耗获得SWER值,此方法考虑了机组单独进出料时的影响,接近且小于稳定阶段机组的SWER值,与实际运行情况更加相符,因此得到的SWER值具有可靠性、准确性与高效性。

2.3 送风温度对干化时间与SWER的影响

在送风量为100%、送风湿度为30%~35%条件下,考察送风温度对干化时间和SWER的影响情况,结果如图3所示。

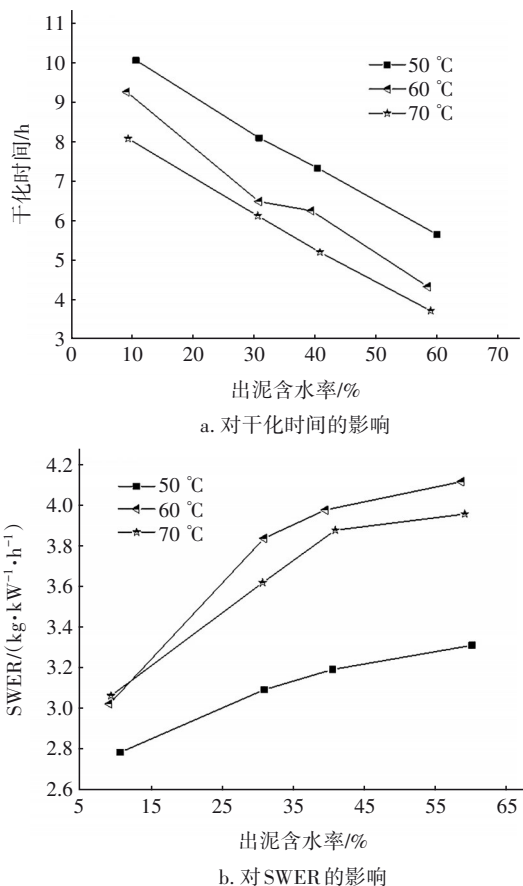


图3 送风温度对干化时间和SWER的影响

Fig.3 Influence of supply air temperature on drying time and SWER

从图3(a)可知,相同送风温度下,出泥含水率越高,所需干化时间越短,且基本呈线性下降。将初始含水率为80%的污泥干化至30%,送风温度为50 °C时需要8.09 h;送风温度为60 °C时需要6.48 h,干化时间缩短了约20%;送风温度为70 °C时需要6.12 h,干化时间较60 °C缩短了5.6%。可见,送风温度升高有利于湿污泥与循环空气的热湿交换,加快了污泥内部水分迁移,但缩短的时长并不显著。张绪坤等^[2]发现,干燥温度越高,干燥速率降低幅度越大;谢蕴江等^[3]认为,温度是影响低温干燥效率的

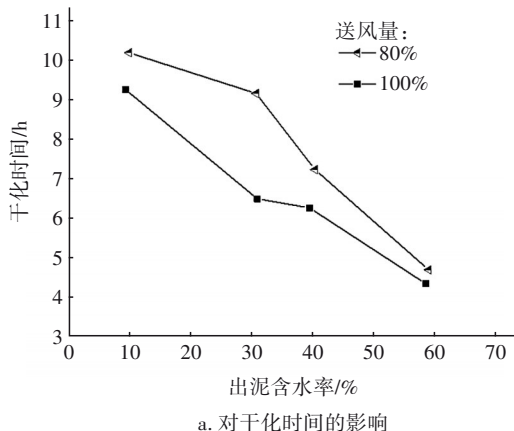
重要因素,与本研究获得的结论基本一致。

图3(b)可以看出,相同送风温度下,出泥含水率越高,机组运行的SWER越大,且呈非线性增长的趋势。相同出泥含水率条件下,机组运行温度为60 °C时SWER最大。这是由于当机组送风温度较低(50 °C)时,所需干化时间较长,不利于能效比的提升;而送风温度较高(70 °C)时,需向污泥烘箱持续提供更多的热量,导致能效比只能接近或低于60 °C运行时的。因此,以机组的SWER情况来看,并非干化的运行温度越高、时间越短越好。此结论与张绪坤等^[2]认为的干燥温度越低、干燥时间越长,则单位能耗越大的观点一致,而与其污泥低温干燥应保持较高温度(90 °C)不完全一致。

由于控制了目标送风湿度范围为30%~35%,更关注风场的湿度梯度变化,以较干的空气穿过高湿污泥颗粒层形成良好的湿度梯度促进引流传质,实现高效脱水。因此,温度提升与干化效率成正比,但随着温度的进一步升高,影响不显著;温度升高与运行能效呈非线性关系,尤其是当运行温度由60 °C升至70 °C时,机组能效比反而下降。

2.4 送风量对干化时间和SWER的影响

在送风温度为60 °C、送风湿度范围为30%~35%条件下,送风量对干化时间和SWER的影响如图4所示。可知,当送风量为100%时,机组运行所需干化时间较送风量为80%均更短,且SWER均更高。送风量的增加提高了热风与污泥表面的热质传递^[2],相同运行条件下,将80%湿污泥干化至30%,送风量为100%与送风量为80%的干化时间相差2.63 h,而SWER相差0.7 $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。周章华^[4]与张绪坤等^[2]发现,热风风量越大,干燥效果越好,与本研究的结论类似。



a. 对干化时间的影响

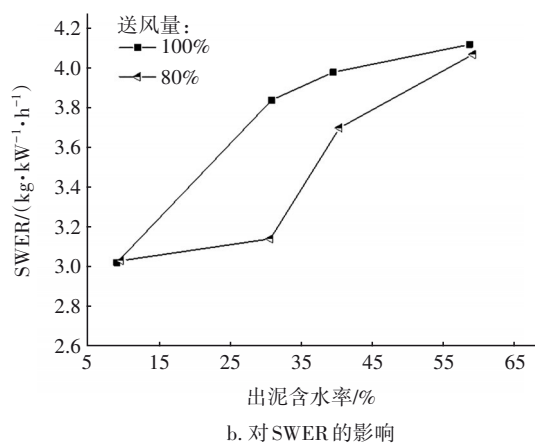


图4 送风量对干化时间和SWER的影响
Fig.4 Influence of supply air volume on drying time and SWER

另外,中试系统具有双风道大风量成型效应。主循环风道的极干空气(湿度为30%~35%)与旁通风道的较干空气(35%~40%)汇流,形成了大风量回风环境与良好的湿度梯度,穿透了最上层网带的高湿污泥,使其快速失去表面水分而定型。这避免了污泥掉落至下一层网带时相互挤压变形而黏连成团,大大提高了脱水效率与能效,与傅伟良等^[1]提出的保持热风一定相对湿度与越小的湿污泥颗粒更有利于热量交换的观点相符。

2.5 机组连续运行性能分析

在目标出泥含水率为30%、目标运行温度为70℃、送风量为100%的条件下,机组连续运行5d,每天运行11h,分析机组的运行性能,结果如图5所示。从图5(a)可以看出,在每天开机1h左右,机组的送风温/湿度均能够达到烘箱内部的预设状态,并且在运行过程中能够保持良好的稳定性,温度偏差保持在±1℃范围内;送风湿度保持在30%~36%之间。初始进湿污泥时,冷负荷值增大,与网带内湿污泥进行热湿交换以后,回风温度降低至57℃左右,而回风湿度升高至55%~60%范围内。且5d内重复运行,送/回风的温/湿度呈现规律性变化,说明系统具有良好的稳定性。从图5(b)可以看出,在机组重复运行较为稳定的状态下,每天出泥含水率的变化规律也较为一致。由于机组启动1h左右达到预设稳定的状态后才开始出泥,启动时间内网带上的湿污泥处于静止等待状态,导致初始出泥的含水率较低。随着系统逐渐稳定,出泥含水率基本维持在27%~35%。

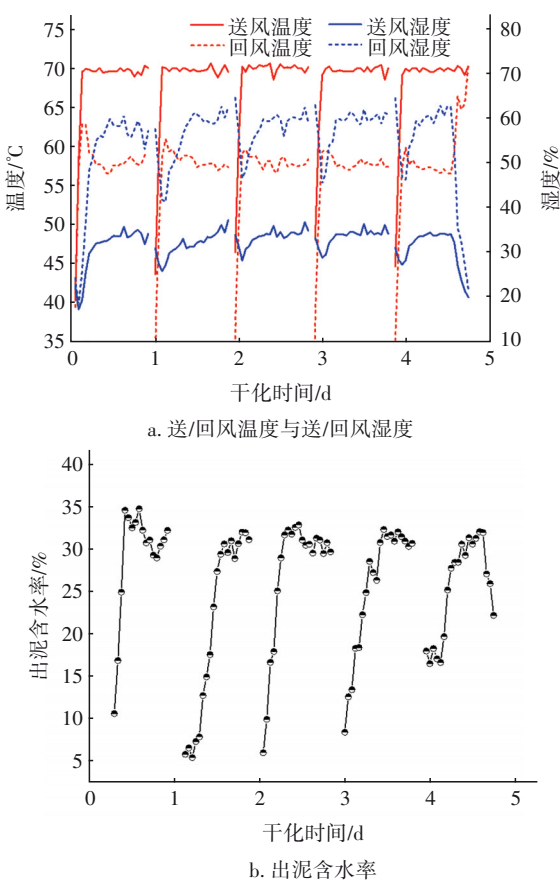


图5 机组连续运行的性能
Fig.5 Performance of the unit in continuous operation

机组连续运行的主要参数见表1。经核算,连续运行试验共处理平均含水率为81.1%的湿污泥8471.3kg,平均出泥含水率为30.9%,得到干污泥2240.0kg,除水6231.3kg,耗电量为1675.2kW·h,平均SWER为3.72kg/(kW·h)。

表1 机组连续运行的主要参数
Tab.1 Main parameters of the unit continuous operation

指 标	参数值	指 标	参数值
干化风量/%	100	出泥量/kg	2 240.0
干化温度目标/℃	70	出泥平均含水率/%	30.9
试验时间/h	53.67	总减少质量/kg	6 231.3
平均干化温度/℃	69.6	耗电量/(kW·h)	1 675.2
进泥量/kg	8 471.3	单位耗电量/(kW·h·h ⁻¹)	32.4
进泥平均含水率/%	81.1	SWER/(kg·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	3.72

2.6 SWER与能耗分析

本研究与其他干化工艺的SWER和能耗对比结果见表2。可知,本研究中,将1t湿污泥从80%干化到30%的能耗为192kW·h,污泥质量降低了

71.4%, SWER为3.72 kg/(kW·h), 与传统单风道机组相比, 本系统的SWER较高。对比文献[5], 处理相同初始含水率与出泥目标的低温干化设备运行5 d后, 将14.98 t含水率约80%的市政污泥干化至30%, 产生的干泥量为3.44 t, 除湿量为11.54 t。经计算, 处理1 t湿污泥的能耗为231.3 kW·h, 平均

SWER为3.33 kg/(kW·h)。而深度脱水技术耦合低温干化工艺^[6]与太阳能辅助热泵干燥^[7]等有辅助能量来源的工艺, 其处理湿污泥的能耗一般较低, 分别为131.7和148.5 kW·h/t, 综述行业内其他低温干化技术处理湿污泥的能耗为250.7~335.0 kW·h/t, SWER为2.45~3.56 kg/(kW·h)。

表2 SWER能耗对比结果

Tab.2 Comparison results of SWER and energy consumption

项目	污泥种类	含水率的变化	干化技术	SWER/(kg·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	能耗/(kW·h·t ⁻¹)
本研究	市政	80%→30%	双风道大风量低温干化	3.72	192
			单风道低温干化	2.70~2.92	212~235
文献[5]	市政	80%→30%	污泥低温干化设备	3.33	231.3
文献[6]	市政	80%→20%	深度脱水+低温干化	—	131.7
文献[7]	市政	65%→45%	太阳能+热泵干燥	2.45	148.5
文献[8]	工业	—	热泵循环风工艺	2.66	250.7
文献[9]	工业	85%→30%	热泵低温干化	3.12	251.4
文献[10]	市政	60%→25%	闭式低温干化系统	3.56	291.0
文献[11]	市政	80%→40%	低温热干化技术(蒸汽)	—	281.2
文献[12]	市政	80%→40%	低温真空脱水干化	—	335.0

注: 能耗为1 t湿污泥的耗电量, 部分文献没有直接给出电量, 则按其成本或电能折算而成。

3 结论

① 该机组远程数据采集及监控系统具备一定的稳定性和准确性。共采集444.7万行数据, 历史数据采集及上传行数无缺失, 历史数据采集及上传行数内的数据个数因无线4G网络质量影响的缺失率为0.8%, 在可控范围内。

② 中试系统中, 出泥含水率和送风温度越高, 所需干化时间越短; 随着送风温度的升高, 机组SWER值出现下降, 当运行温度为60℃左右时, SWER值最优。针对不同出泥含水率, 当送风量为100%时, 污泥干化时间较短、SWER值较大。

③ 机组能连续稳定运行, 烘箱内部送/回风温度波动幅度较小, 送/回风湿度受网带上湿污泥影响在±3%范围内波动。污泥质量减少后能达到目标出泥含水率, 平均SWER值为3.72 kg/(kW·h)。

④ 市政污泥内部束缚水难以完全靠机械力转移出去, 高黏度导致干化过程易成团。根据中试结果可知, 基于湿度梯度、引流传质的双风道大风量成型技术的低温干化工艺非常适合市政污泥深度脱水干化, 且将含水率为80%的湿污泥干化到含水率为30%的能耗为192 kW·h/t, 污泥质量降低了71.4%, 能效比显著。

参考文献:

- [1] 傅伟良, 张城镇, 张绪坤. 污泥热泵低温干化技术优势与问题探讨[J]. 环境工程, 2021, 39(2): 121-124.
FU Weiliang, ZHANG Chengzhen, ZHANG Xukun. Discussion on the existing problems and advantages of heat pump low temperature drying of sludge [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(2): 121-124 (in Chinese).
- [2] 张绪坤, 刘胜平, 吴青荣, 等. 污泥低温干燥动力学特性及干燥参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 216-223.
ZHANG Xukun, LIU Shengping, WU Qingrong, et al. Drying kinetics and parameters optimization of sludge drying at low temperature [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(17): 216-223 (in Chinese).
- [3] 谢蕴江, 吴中华, 吴龙, 等. 城市污水处理厂污泥低温对流干燥动力学特性[J]. 天津科技大学学报, 2012, 27(4): 52-56.
XIE Yunjiang, WU Zhonghua, WU Long, et al. Low-temperature convective drying characteristics of municipal sewage sludge [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2012, 27(4): 52-56 (in Chinese).
- [4] 周章华. 污泥低温干化技术关键影响因素的试验

- [J]. 净水技术, 2020, 39(S2): 60-63.
- ZHOU Zhanghua. Application of sludge low temperature drying technology in a WWTP [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(S2): 60-63(in Chinese).
- [5] 梁华杰, 王杰, 孟建国, 等. 浅析污泥低温干化设备生产运行表现——以某市经济开发区污水处理厂为例[J]. 智能城市, 2019, 5(15): 131-132.
- LIANG Huajie, WANG Jie, MENG Jianguo, *et al.* Analysis on the production and operation performance of low temperature sludge drying equipment—take a sewage treatment plant in an economic development zone of a city as an example [J]. Intelligent City, 2019, 5(15): 131-132(in Chinese).
- [6] 颜莹莹, 孟春霖, 梁远, 等. 连续深度脱水耦合低温干化工艺用于鹰潭污泥污水处理厂[J]. 中国给水排水, 2020, 36(16): 105-110.
- YAN Yingying, MENG Chunlin, LIANG Yuan, *et al.* Continuous deep dewatering coupled with low temperature drying process in Yingtan Sludge Treatment Plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(16): 105-110(in Chinese).
- [7] 饶宾期, 曹黎. 太阳能热泵污泥干燥技术[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 184-188.
- RAO Binqi, CAO Li. Technical research on sludge drying by solar energy and heat pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 184-188(in Chinese).
- [8] 裴锋初, 张立奎. 热泵-循环风工艺干化污泥的传热过程和能耗剖析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, 42(4): 321-326, 403.
- PEI Fengchu, ZHANG Likui. Heat transfer process and energy consumption analysis of heat pump-circulated wind for drying sludge technology [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2020, 42(4): 321-326, 403(in Chinese).
- [9] 张晨航, 王立胜, 池纪军, 等. 浅议热泵低温干化技术在工业污泥减量化中的应用[J]. 工程机械, 2021, 51(11): 83-87.
- ZHANG Chenhang, WANG Lisheng, CHI Jijun, *et al.* Discussion on application of heat pump low-temperature drying technology to industrial sludge reduction [J]. Construction Machinery and Equipment, 2021, 51(11): 83-87(in Chinese).
- [10] 朱有法. 闭式低温污泥干化系统设计[J]. 环境工程, 2019, 37(S1): 757-765.
- ZHU Youfa, Design of closed low temperature sludge drying system [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(S1): 757-765(in Chinese).
- [11] 唐续龙, 石姗姗, 彭孝容. 城市污泥蒸汽干燥和低温热干化技术比较研究[J]. 给水排水, 2020, 46(S1): 193-196.
- TANG Xulong, SHI Shanshan, PENG Xiaorong. Comparative study between steam drying technology and low temperature thermal drying technology of sewage sludge [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(S1): 193-196(in Chinese).
- [12] 李亮, 史慧婷. 污泥低温真空脱水干化工艺的工程应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(12): 71-74.
- LI Liang, SHI Huiting. Application of sludge dewatering by low-temperature vacuum dewatering technology [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12): 71-74(in Chinese).

作者简介: 区雪连(1986-), 女, 广东高要人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为污泥减量化与资源化、水处理技术。

E-mail: 563682866@qq.com

收稿日期: 2022-05-23

修回日期: 2022-09-05

(编辑: 任莹莹)