

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.05.002

# 污泥低温干化技术及其在饮用水厂的实践

颜亚玮<sup>1,2</sup>, 严嘉明<sup>1</sup>, 黄允河<sup>2,3</sup>, 刘宏远<sup>1,2</sup>, 张刚<sup>4</sup>, 沈东春<sup>4</sup>,  
吴辉<sup>4</sup>

(1. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江工业大学 水工程与应急技术研发中心, 浙江 杭州 310023; 3. 杭州市水务集团有限公司, 浙江 杭州 310014;  
4. 嘉兴市水务集团有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

**摘要:** 针对饮用水厂污泥高含水率问题,对A、B、C三个水厂的热泵低温干化设备运行效果及其结合太阳能工程实例(A水厂)进行了研究,分析了脱水污泥性质等因素对干化效果的影响。结果表明,A、B水厂干化设备的出泥含水率稳定低于55%,除湿能效分别为 $(3.0\pm 0.2)$ 、 $(3.2\pm 0.2)$  kg/(kW·h);C水厂的除湿能效为 $(3.8\pm 0.2)$  kg/(kW·h),高于A、B两水厂,但其低温干化后污泥含水率高于60%,除湿能效高的工程意义不大;聚丙烯酰胺类型和投加量会影响污泥胶黏性,间接影响除湿能效;污泥中粉、黏粒含量及天然有机物会增强污泥的胶黏性;C水厂前序机械脱水单元效果差,造成机械脱水后的自由水含量仍高达183.1%,导致污泥低温干化不充分。A水厂在太阳能供热期间,除湿能效高于8 kg/(kW·h),干化费用降低了75.5%。

**关键词:** 饮用水厂污泥; 低温干化; 太阳能; 热泵; 污泥性质

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)05-0009-07

## Low-temperature Drying Technology and Its Practice in Drinking Water Plants

XIE Ya-wei<sup>1,2</sup>, YAN Jia-ming<sup>1</sup>, HUANG Yun-he<sup>2,3</sup>, LIU Hong-yuan<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Gang<sup>4</sup>, SHEN Dong-chun<sup>4</sup>, WU Hui<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;  
2. Water Engineering and Emergency Technology R&D Center, Zhejiang University of Technology,  
Hangzhou 310023, China; 3. Hangzhou Water Group Co. Ltd., Hangzhou 310014, China;  
4. Jiaxing Water Investment Group Co. Ltd., Jiaxing 314000, China)

**Abstract:** In view of the high water content of drinking water plant sludge, this study investigated the operation effect of heat pump low-temperature drying in A, B and C water plants and its combination with solar energy in A water plant, and analyzed the factors affecting the operation effect of the drying equipment such as the nature of the dewatered sludge. The results showed that the water content of the sludge from the outlet of drying equipment of A and B water plants were stably less than 55%, and its corresponding specific moisture evaporation rate were  $(3.0\pm 0.2)$  kg/(kW·h) and  $(3.2\pm 0.2)$  kg/(kW·h), respectively. The specific moisture evaporation rate in C water plant was  $(3.8\pm 0.2)$  kg/(kW·h), which was higher than that in A and B plants. However, the water content of its low-temperature dried sludge was

基金项目: 浙工大水工程与应急技术研发中心项目(KYY-HX-20230956)

通信作者: 刘宏远 E-mail: lhyzyy@zjut.edu.cn

higher than 60%, and it was not very meaningful to have a high specific moisture evaporation rate. The analysis of sludge properties showed that the choice and dosage of polyacrylamide (PAM) would affect the sludge viscosity, which indirectly affected the specific moisture evaporation rate; dewatered sludge powder, clay particles and adherent natural organic matter would enhance the sludge viscosity, which was not conducive to the improvement of specific moisture evaporation rate. The mechanical dewatering unit in the preliminaries of drying in C water plant exhibited poor effectiveness, resulting in the free water content of sludge after mechanical dewatering remaining as high as 183.1%. This led to inadequate drying of the sludge. During the operation of solar energy merely, the specific moisture evaporation rate of A water plant was higher than 8 kg/(kW·h) and the drying cost could be reduced by 75.5%.

**Key words:** sludge from drinking water plant; low-temperature drying; solar energy; heat pump; sludge property

饮用水厂污泥主要来自滤池反冲洗废水和沉淀(澄清)池排泥水,约占水厂总净水量的2%<sup>[1]</sup>,其中包含砂砾、悬浮物、有机物、细菌及水处理过程中投加的混凝剂等<sup>[2]</sup>。经过浓缩、调节、机械脱水处理后,污泥含水率可降至约75%,质量和体积仍然庞大,不利于后续的填埋、焚烧及资源化利用。鉴于饮用水厂污泥的低危害性<sup>[3]</sup>,目前尚无相应管理或评价标准,参考已有的污泥相关资源化利用标准,污泥含水率宜低于60%;浙江省饮用水厂出厂污泥含水率基本要求控制在60%以下。

热泵低温干化技术可将污泥含水率从75%降至60%以下<sup>[4]</sup>,污泥质量和体积减量超过38%。热泵低温干化技术便于操作,运行安全,但其能耗约为机械脱水的20倍<sup>[5]</sup>,因此研究其他热能辅助热泵供热具有重要的意义。影响污泥热泵低温干化设备运行效果的因素包括外部因素和内部因素,外部因素如空气温度、相对湿度、风速以及空气与物料的接触情况等,内部因素即含水率、胶黏性、尺寸等污泥性质<sup>[6]</sup>。然而,现有的研究及应用主要关注外部因素<sup>[7-10]</sup>,未考虑污泥性质的影响。为此,以浙江省A、B、C三个水厂的热泵低温干化设备为研究对象,分析其除湿能效、出泥含水率,并考察了太阳能供热(A水厂)及污泥性质对除湿能效的影响。

## 1 热泵低温干化技术特点

### 1.1 污泥热泵低温干化原理

热泵低温干化技术基于逆卡诺循环原理,其工作过程主要由三个步骤构成:①冷凝器将周围的空气加热;②热空气在干化室中促进污泥的对流干燥,同时其湿度不断增加;③湿热空气通过蒸发器

降温除湿。随后,干冷空气回到冷凝器加热,重复上述循环过程。而压缩机和膨胀阀通过对制冷剂的加压,实现低温干化设备工作步骤①和③中的高、低温位热能的再生。

### 1.2 污泥性质的影响

脱水污泥(即经过PAM絮凝及机械脱水后的污泥)经造粒后再进行低温干化。脱水污泥性质如胶黏性和含水率会对热泵低温干化效果产生影响。

① 胶黏性。脱水污泥胶黏性增强会导致造粒粒径变大,从而影响内部水分蒸发,降低干化设备除湿能效。影响脱水污泥胶黏性的因素包括可溶性有机物和粒径分布两个方面。其中,可溶性有机物包括腐殖酸(HA)、可溶性微生物产物(SMP)等天然性有机物,以及脱水药剂PAM,这类物质会增加污泥的胶黏性。对于粒径分布而言,脱水污泥的黏粒和粉粒比例越高,其胶黏性就越强<sup>[11]</sup>。

② 含水率。污泥中的水分包括强结合水、弱结合水、自由水。强结合水与污泥颗粒紧密结合,只能通过热干化去除;弱结合水与污泥颗粒相互作用较弱,可通过机械脱水去除一部分或热干化完全去除;自由水与污泥颗粒无相互作用,可由机械脱水完全去除。脱水污泥的含水率受到机械脱水设备的影响,含水率过高即存在自由水,会导致本应由机械脱水设备去除的自由水必须通过后序干化设备完成,造成干化后的含水率达不到预期效果,并且导致热干化设备除湿能效无意义的提高。

## 2 低温干化设备及试验方法

### 2.1 工程概况

以浙江省A、B、C三个水厂的热泵低温干化设

备为研究对象,其中A水厂的低温干化设备具备热泵供热和太阳能供热两种运行方式(见图1),B、C水厂为单独的热泵供热方式。A、B、C水厂的供水规模分别为 $50 \times 10^4$ 、 $15 \times 10^4$ 、 $15 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,A水厂水源为河网水,B、C水厂水源均为水库水,A、B水厂的脱水设备为离心脱水机,C水厂采用多重圆板脱水机。各水厂排泥水及污泥处理流程均为浓缩、PAM调理、机械脱水、刀梳机造粒和(太阳能)热泵低温干化。

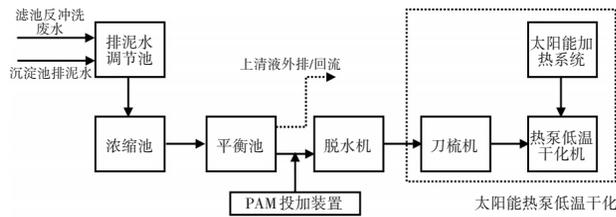


图1 A水厂污泥处理流程

Fig.1 Flow chart of sludge treatment in A water plant

B、C水厂热泵低温干化设备的工作流程见图2。湿热空气首先经过滤袋除尘,以及热回收器、蒸发器降温除湿,温度可降至约35℃;随后回到热回收器预热,并在冷凝器二次加热,温度可升至约75℃;最后进入干化室对污泥对流干燥,空气湿度饱和后重复上述流程。

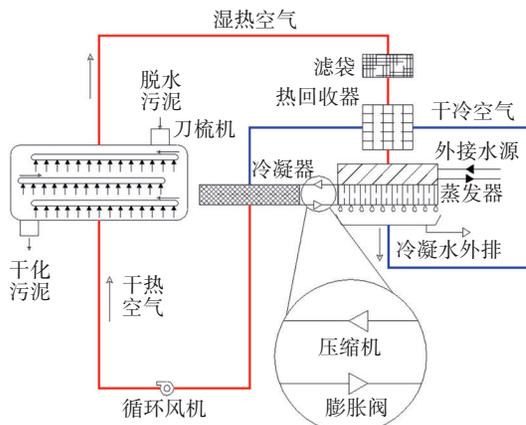


图2 热泵低温干化设备工作流程

Fig.2 Flow chart of heat pump low-temperature drying machine

A水厂太阳能热泵低温干化设备的工作流程见图3。热水箱水温高于85℃,干化循环泵和外接水源开启,热泵系统关闭,湿热空气通过外接低温水源除湿,随后进入干化室中对污泥进行干燥;而太阳能通过提高干化室内空气的温度,促进污泥中水分的快速蒸发。待热水箱水温降至77℃后热泵系

统开启,干化循环泵和外接水源关闭,干化流程与图2一致。

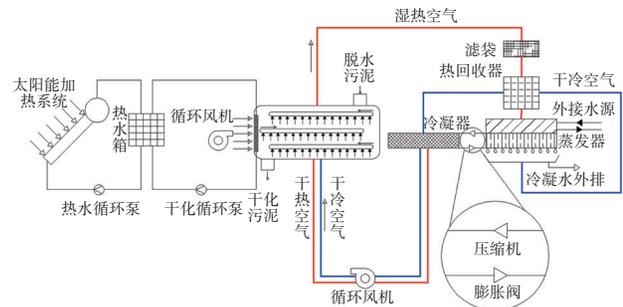


图3 太阳能热泵低温干化设备工作流程

Fig.3 Flow chart of solar heat pump low-temperature drying machine

## 2.2 分析项目及方法

有机质组成采用荧光分光光度计测定;粒径分布采用激光粒度仪(EAST-LAP-W2000H,厦门易仕特)测定;含水率依照《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)烘箱烘干法测定。液限、塑限采用液塑限联合测定仪(LP-100,河北华伟)落锥法测定<sup>[12]</sup>,用干基含水率表示,单位为%。其中,液限对应脱水污泥下沉深度为17 mm时的干基含水率,塑限对应下沉深度为2 mm时的干基含水率。

污泥塑性指数:为脱水污泥液限与塑限的差值,用于反映胶黏程度,其值越大则胶黏性越强。

脱水污泥强、弱结合水与自由水含量<sup>[13]</sup>:强结合水界限对应于塑限值的88.5%,弱结合水界限对应于液限值;脱水污泥干基含水率低于强结合水界限部分为强结合水含量,在强、弱结合水界限之间部分为弱结合水含量,高于弱结合水界限部分为自由水含量。

除湿能效:是指热泵低温干化设备消耗单位电量所去除的水分质量,间隔3 h记录干化机出水累计流量和电表累计数值,累计流量差值与累计用电量差值之商即为除湿能效。

## 3 结果与讨论

### 3.1 低温干化运行状况

#### 3.1.1 热泵低温干化

热泵供热期间,三个水厂低温干化设备的进泥(即造粒后的脱水污泥)、出泥含水率及除湿能效的变化见图4。A、B水厂设备出泥含水率为40%~55%,除湿能效分别为 $(3.0 \pm 0.2)$ 、 $(3.2 \pm 0.2)$  kg/(kW·h);C水厂设备出泥含水率大多为55%~65%,

除湿能效为(3.8±0.2) kg/(kW·h)。

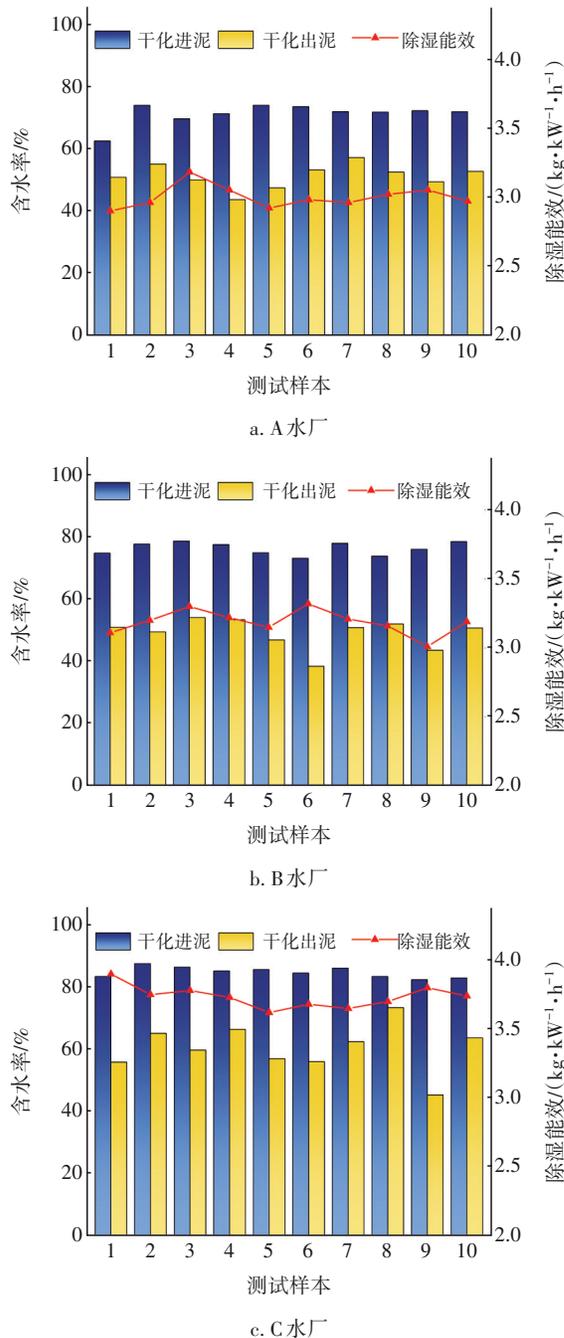


图4 热泵干化期间干化设备进、出泥含水率及除湿能效

Fig.4 Moisture content of inlet and outlet sludge and specific moisture evaporation rate in heat pump drying

除湿能效反映了干化设备的能耗效率<sup>[14]</sup>,C水厂设备除湿能效最高,但污泥含水率会高于60%的设定标准,原因主要为:①C水厂的进泥含水率约为86%,为三水厂最高,其中自由水含量达到了183.1%,而这部分本应由机械脱水去除的自由水将延至低温干化设备脱除,一方面提高了干化设备的

除湿能效,另一方面却造成低温干化工艺能量的浪费及出泥含水率较高。②C水厂干化进泥颗粒粒径最小(见图5),表明其胶黏性最弱,因此单位体积的污泥具有更大的水分汽化表面积,水分更易脱除;而A、B水厂干化进泥的颗粒较大,呈现条状,说明其胶黏性更强,导致抱团结块,阻碍了设备除湿能效的提高。



a. A水厂进泥 b. B水厂进泥 c. C水厂进泥

图5 干化污泥颗粒形态

Fig.5 Shape of dried sludge particle

### 3.1.2 太阳能低温干化

太阳能供热期间,A厂干化设备进、出泥含水率及除湿能效见表1。设备出泥含水率稳定低于55%,且除湿能效可提升至8 kg/(kW·h)以上,相较热泵干化(样本1~10平均值),除湿能效提高了近3倍,节能效果明显。

表1 太阳能干化期间进、出泥含水率及除湿能效

Tab.1 Moisture content of inlet and outlet sludge and specific moisture evaporation rate in solar heat pump drying

样本	太阳能供热时长占比/%	进出泥含水率/%	除湿能效/(kg·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1~10	0	71.20/51.14	2.98
11	77	71.59/36.21	5.39
12	45	72.59/53.99	5.84
13	100	72.08/39.86	8.05
14	100	71.87/44.40	8.81

### 3.2 污泥性质的影响

#### 3.2.1 粒径分布的影响

在水厂机械脱水单元,由于PAM的絮凝作用,脱水污泥中的微粒会团聚,导致无法测得其粒径分布。因此,通过测定水厂污泥平衡池中的排泥水粒径分布间接得到脱水污泥的粒径分布,并根据不同粒径范围进行了粒级划分,结果见表2。其中,黏粒、粉粒、细砂、中砂、粗砂的粒径范围分别为<0.005、0.005~0.075、0.075~0.25、0.25~0.5、0.5~1 mm。由表2可知,三个水厂的排泥水中,小粒径的粉粒+

黏粒含量均较砂粒高,其中C水厂达到了67.9%,而A、B水厂则分别高达95.7%和93.3%。

表2 排泥水粒级分布

Tab.2 Particle size distribution of waste residuals

水厂	粗砂	中砂	细砂	粉粒	黏粒
A	0	0	4.26	94.86	0.88
B	0	0	6.71	89.50	3.79
C	0.02	4.05	28.03	66.43	1.47

A、B、C水厂脱水污泥的塑限和液限分别为239.1%、230.5%、304.3%和328.7%、309.6%、343.3%,A、B水厂脱水污泥塑性指数分别高达89.6%、79.1%,高于C水厂的39.0%。塑性指数的较大差异是由于排泥水经机械脱水后,脱水污泥中的粉粒和黏粒会通过颗粒-水结合力增强污泥的黏

性<sup>[15]</sup>,因此A、B水厂脱水污泥中较高的粉粒+黏粒含量显著提高了污泥的胶黏性,影响其内部水分蒸发,进而制约了低温干化设备除湿能效的提高。

### 3.2.2 天然有机物的影响

脱水污泥中的天然有机物具备吸附黏结特性,种类包括HA、SMP、芳香蛋白等。可通过测定平衡池排泥水中的天然有机物含量间接得到脱水污泥中的含量,结果见图6。可知,A、B水厂排泥水的HA(V区)含量明显高于C水厂,并且A水厂存在SMP(IV区)。经过机械脱水后,HA、SMP会附着在脱水污泥颗粒表面,并使污泥颗粒相互黏结,表现为脱水污泥胶黏性增强。此外,HA、SMP会提高脱水污泥的亲水性,进一步阻碍水分的蒸发及低温干化设备除湿能效的提高。

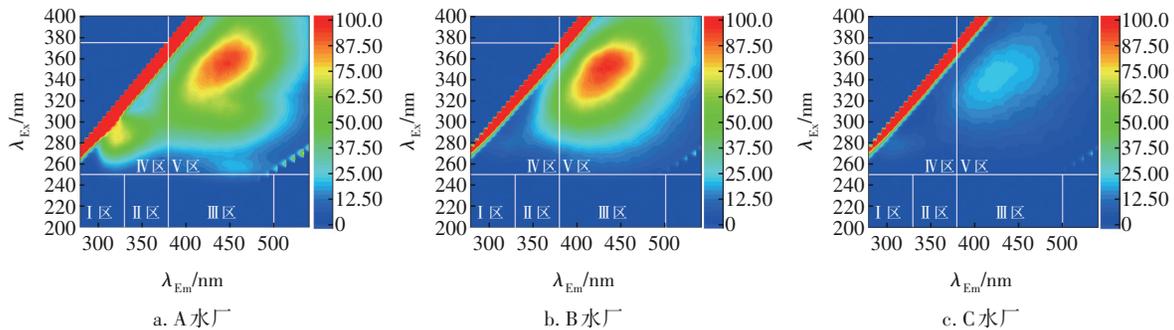


图6 排泥水上清液三维荧光光谱

Fig.6 3D EEMs of supernatant from waste residuals

### 3.2.3 污泥调理药剂的影响

污泥调理药剂包括石灰、酸、高分子絮凝剂、无机混凝剂等,其中高分子絮凝剂PAM广泛应用于污泥调理。PAM为高分子有机聚合物,能够有效提高脱水污泥的胶黏性,从而增加其结构稳定性。而不同PAM的分子质量及分子结构存在较大差异,因此会对脱水污泥胶黏性产生不同程度的影响。

选定5种PAM对A水厂污泥进行试验,其中1#、2#、4#、5#为固体,3#为液体,调理并脱水后的污泥塑性指数见图7(PAM投量以PAM和污泥干基计)。经1#、2#、4#、5#PAM调理后,污泥塑性指数在75%以上,均高于3#PAM,且波动较大,4#、5#甚至高于100%;而经3#PAM调理后,污泥塑性指数保持在60%~70%。5种PAM调理后的污泥形态呈现明显差异,1#、2#、4#、5#PAM调理后的污泥抱团现象明显,胶黏性强;而经3#PAM调理后的污泥颗粒松散,胶黏性较弱。因此,3#PAM更适用于机械脱水前的污泥调

理,有利于提高后序低温干化设备的除湿能效。

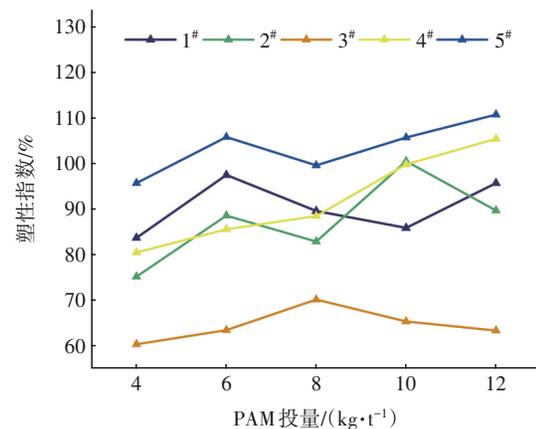


图7 不同PAM调理后的污泥塑性指数

Fig.7 Plasticity index after different PAM conditioning

### 3.2.4 含水率的影响

三个水厂脱水污泥的强、弱结合水及自由水分布情况见表3。C厂脱水污泥的自由水含量高达183.1%,而这部分本应由机械脱水单元去除的自由

水会延至后序低温干化设备去除,不仅造成大量能耗,而且导致低温干化设备出泥含水率高于设定的60%标准。A、B水厂脱水污泥均不含自由水,说明其机械脱水单元已脱除全部自由水及部分弱结合水,低温干化设备主要去除机械脱水设备难以或无法去除的强、弱结合水。综上所述,C水厂应尽可能提高机械脱水单元效率,以降低热泵低温干化设备的负荷,同时保证干化出泥含水率达标。

表3 脱水污泥含水率及水分分布

Tab.3 Moisture content and water distribution of dewatered sludge %

项目	含水率	干基含水率	强结合水	弱结合水	自由水
A水厂	73.1	272.1	211.6	60.5	0
B水厂	75.2	303.2	204.0	99.2	0
C水厂	83.8	517.3	269.2	65.0	183.1

#### 4 投资和运行成本分析

A水厂太阳能和热泵供热的功率分别为65、265 kW,污泥产量为1.98 t/h,干化后产量为1.19 t/h;B水厂供热功率为63 kW,污泥产量为0.38 t/h,干化后产量为0.168 t/h;C水厂供热功率为126 kW,污泥产量为0.78 t/h,干化后产量为0.29 t/h。三个水厂干化设备每天均运行6 h,电价按照0.75元/(kW·h)计,污泥外运费用为220元/t。根据以上数据得到污泥处理处置费用见表4。

表4 设备运行费用及污泥处置费用分析

Tab.4 Analysis of equipment operating and sludge disposal cost

水厂	干化污泥处置费用/(元·d <sup>-1</sup> )	热泵低温干化		太阳能低温干化	
		运行费用/(元·d <sup>-1</sup> )	处理处置总费用/(元·t <sup>-1</sup> )	运行费用/(元·d <sup>-1</sup> )	处理处置总费用/(元·t <sup>-1</sup> )
A	1570.8	1192.5	232.6	292.5	156.8
B	221.8	283.5	221.6	58.5*	122.9*
C	382.8	567.0	202.9	117.0*	106.8*

注:干化污泥处置费用=污泥外运费×干化污泥产量×每日运行时长;热泵低温干化运行费用=热泵功率×运行时长×电费;太阳能低温干化运行费用=太阳能功率×太阳能运行时长×电费;污泥处理处置总费用=(干化污泥处置费用+干化运行费用)/(脱水污泥产量×每日运行时长);\*表示预测值。

由表4可知,A、B、C厂的污泥处理及处置总费用分别为232.6、221.6、202.9元/t。A、B两水厂的

污泥处理及处置总费用较C水厂高,一方面是由于A、B水厂脱水污泥的胶黏性较C水厂强,影响了污泥内部水分的脱除;另一方面是由于A、B水厂低温干化主要去除脱水污泥中的结合水,其脱除较自由水困难,两方面原因共同导致污泥减量不明显。C水厂的最低,然而其干化出泥含水率较A、B水厂高,处理效果较差。

在太阳能供热期间,A水厂的干化运行费用仅为292.5元/d,相较热泵供热的1192.5元/d降低了75.5%,单位处理费用仅有24.6元/t,污泥处理及后续处置总费用仅为156.8元/t,相较热泵的232.6元/t降低了32.6%,相较直接处置的220元/t降低了28.7%。针对B、C水厂无太阳能供热设备现状,若引进太阳能供热设备(投资需追加约8%),预计B、C水厂的除湿能效分别提升至约10、12 kg/(kW·h),脱水污泥处理及后续处置总费用预计可分别降至122.9、106.8元/t,分别降低44.5%、47.4%。

#### 5 结论

① 热泵供热期间,A、B水厂热泵干化设备的除湿能效分别为(3.0±0.2)、(3.2±0.2) kg/(kW·h),出泥含水率稳定低于55%;C水厂除湿能效为(3.8±0.2) kg/(kW·h),但存在干化出泥含水率高于60%设定标准和前序脱水设备效率低的情况,其高除湿能效的工程意义不大。太阳能供热期间,A水厂低温干化设备的除湿能效高于8 kg/(kW·h),干化运行费用可降低75.5%,经济效益明显。此外,建议对太阳能和热泵供热的结合方式继续进行优化,以实现协同运行。

② 天然有机物HA、SMP及粉、黏粒会增强脱水污泥的胶黏性,间接降低热泵干化设备的除湿能效。污泥调理和机械脱水均会影响干化设备运行效果,经3\*PAM调理后,脱水污泥塑性指数仅为60%~70%,有利于除湿能效提高。C水厂脱水污泥的自由水含量高达183.1%,导致后序低温干化不充分及大量能耗,故应改进其机械脱水单元,以降低含水率。

#### 参考文献:

[1] 徐舟影,陈曦,孟发科,等. 给水厂污泥再利用风险分析及其环境应用综述[J]. 给水排水,2023,49(3):140-150.

XU Zhouying, CHEN Xi, MENG Fake, et al. Overview

- of drinking water treatment residue reuse risks and environmental applications [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(3): 140–150 (in Chinese).
- [ 2 ] ZHOU Z W, YANG Y L, LI X, *et al.* Optimized removal of natural organic matter by ultrasound-assisted coagulation of recycling drinking water treatment sludge [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 8: 171–180.
- [ 3 ] 杨晓胤. 自来水厂污泥深度脱水实验研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014: 11–12.  
YANG Xiaoyin. Laboratory and Pilot Studies of Sludge Dewatering in the Ninth Beijing Drinking Water Treatment Plant [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014: 11–12 (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 ] 周文彬, 陈立, 佟斯翰. 污泥低温干化设备在市政污泥脱水中的应用 [J]. *中国高科技*, 2017, 1(12): 69–71.  
ZHOU Wenbin, CHEN Li, TONG Sihan. Application of sludge low temperature drying equipment in municipal sludge dewatering [J]. *China High-tech*, 2017, 1(12): 69–71 (in Chinese).
- [ 6 ] 吴青荣, 张绪坤, 王高敏. 城市污泥低温干化技术研究进展 [J]. *环境工程*, 2017, 35(3): 127–131.  
WU Qingrong, ZHANG Xukun, WANG Gaomin. Advances on low temperature drying technology of municipal sewage sludge [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(3): 127–131 (in Chinese).
- [ 7 ] ZHANG T, YAN Z W, WANG L Y, *et al.* Theoretical analysis and experimental study on a low-temperature heat pump sludge drying system [J]. *Energy*, 2021, 214: 118985.
- [ 8 ] GAUR A S, FITIWI D Z, CURTIS J. Heat pumps and our low-carbon future: a comprehensive review [J]. *Energy Research & Social Science*, 2021, 71: 45–68.
- [ 9 ] 王旭, 任晓芬, 李广焕, 等. 吸收式热泵在污泥低温干化工艺中的应用 [J]. *中国给水排水*, 2023, 39(8): 133–139.  
WANG Xu, REN Xiaofen, LI Guanghuan, *et al.* Application of absorption heat pump in sludge low-temperature drying process [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(8): 133–139 (in Chinese).
- [ 10 ] 区雪连, 郭艳平, 黄冠英, 等. 基于双风道大风量成型的污泥低温干化中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2023, 39(11): 115–121.  
OU Xuelian, GUO Yanping, HUANG Guanying, *et al.* A pilot study on low-temperature sludge drying process based on double air duct and large air volume [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(11): 115–121 (in Chinese).
- [ 11 ] MITCHELL J K, SOGA K. *Fundamentals of Soil Behavior* [M]. 3th ed. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2005: 329–330.
- [ 12 ] 高彦斌, 林木. 一种测定天然粘性土塑性指标和稠度状态的方法: CN104596891A [P]. 2015-01-04.  
GAO Yanbin, LIN Mu. A Method for Determining the Plasticity Index and Consistency State of Natural Cohesive Soil: CN104596891A [P]. 2015-01-04 (in Chinese).
- [ 13 ] 宋玉品. 黄土中结合水对其物理力学特性影响的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018: 59–60.  
SONG Yupin. Influence of Bound Water on Physical and Mechanical Properties of Loess [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018: 59–60 (in Chinese).
- [ 14 ] 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).
- [ 15 ] 曾召田, 潘斌, 吴昱东, 等. 土中结合水对红黏土抗剪强度特性的影响机制 [J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(5): 1565–1572, 1579.  
ZENG Zhaotian, PAN Bin, WU Yudong, *et al.* Influence mechanism of bound water on shear strength characteristics of lateritic clay [J]. 2022, 18(5): 1565–1572, 1579 (in Chinese).

作者简介: 颀亚玮(1988–), 男, 甘肃天水人, 博士, 副教授, 主要从事水处理技术研究。

E-mail: xyw@zjut.edu.cn

收稿日期: 2023-08-16

修回日期: 2023-12-14

(编辑: 李德强)