

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.020

# 高压带机+低温干化工艺用于污泥深度脱水

阮燕霞<sup>1</sup>, 杨文文<sup>1</sup>, 魏宏斌<sup>2</sup>

(1. 上海中耀环保实业有限公司, 上海 200092; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 通过现场试验对比研究污泥进泥性状、含水率以及出泥含水率对低温干化设备单位时间除水量的影响,并在此基础上研究了联用工艺(进泥含水率约80%)的运行费用、单位功率除水量(SMER)、设备初投资和污泥处理量等。试验结果表明,高压带机能够降低低温干化段的进泥含水率和改良污泥孔隙率,使低温干化单位时间除水量和SMER分别提高7.2%和5.0%以上。技术经济分析结果表明,联用工艺最多可节约运行费用33.4%以上,设备投资最高可降低30.3%以上,且随着低温干化段出泥含水率的提高,节约效益更加显著。对于既有项目,通过增设高压带机(连续污泥深度脱水设备)最高可提升200%的污泥处理量。“高压带机+低温干化”联用工艺与直接低温干化相比,在设备运行效率、运行费用、设备初投资和污泥处理量4个方面均有较大优势。

**关键词:** 污泥深度脱水; 高压带机; 低温干化; 污泥含水率

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0119-06

## Application of High-pressure Belt Filter and Low Temperature Sludge Dryer System in Sludge Deep Dewatering

RUAN Yan-xia<sup>1</sup>, YANG Wen-wen<sup>1</sup>, WEI Hong-bin<sup>2</sup>

(1. Shanghai Zhongyao Environment Protection Industry Co. Ltd., Shanghai 200092, China;  
2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Influences of sludge property, moisture content of inlet sludge and outlet sludge moisture content on the specific moisture extraction of low temperature sludge dryer have been experimentally studied. On this basis, the operating costs, the specific moisture evaporation rate (SMER), initial investment and sludge treatment capacity of the combined process (about 80% moisture content of inlet sludge) were discussed. The experiment results show that the high-pressure belt can reduce the inlet sludge moisture content and improve the sludge porosity in low temperature sludge dryer section, and increase specific moisture extraction and SMER by above 7.2% and 5.0%, respectively. The results of technical and economic analysis show that the combined process can save operating costs and initial investment by over 33.4% and 30.3%, respectively, which could be more significant with the increase of the outlet sludge moisture content in the low temperature drying section. The sludge treatment capacity of the excited project could be doubled by adding high-pressure belt continuous sludge deep dewatering equipment. Therefore, the combination of high-pressure belt filter for continuous deep dewatering and low temperature sludge dryer system has notably advantages on operating efficiency, operating costs, initial

investment and sludge processing capacity, compared with using low-temperature sludge dryer technology separately.

**Key words:** sludge advanced dewatering; high-pressure belt filter; low temperature sludge dryer; sludge moisture content

目前,污泥的最终处置方式对污泥的含水率和pH等指标均有严格要求。国内污泥最终处置相关标准一般要求污泥含水率为40%~60%、pH为5~10。高压带机采用最经济的机械脱水技术<sup>[1]</sup>,基本不增加污泥绝干量<sup>[2]</sup>,满足pH达到处置的中性要求,可将新建项目含水率95%~99%的污泥或改造项目含水率80%左右的污泥降至含水率为70%以下。低温干化技术可在不使用任何化学药剂的前提下,将污泥含水率一次性降至20%以下,但其能耗高、烘干时间长、占地面积大<sup>[3]</sup>。为克服直接使用低温干化技术的缺点,通过项目现场试验和数据分析探究“高压带机+低温干化”联用工艺的技术和经济优势,为联用工艺的应用提供数据支撑。

### 1 “高压带机+低温干化”联用工艺

高压带机成套工艺技术是针对国内污泥处理处置现状及需求开发的污泥减量、稳定化技术。该技术先将污泥调理剂与含水率为80%左右的污泥混合,对污泥进行调理,再采用高压带机进行压滤处理,处理后污泥的含水率可从约80%降至70%以下,既可使污泥含水率进一步降低,同时70%的含水率又可确保污泥易造粒成型且不易出现粉化现象。

低温干化技术则是利用湿空气原理和传热传质原理,将加热器产生的热量用于加热循环空气,加热后的高温低湿循环空气用于污泥烘干,冷却器的冷量则用于冷凝循环空气中的水蒸气,在实现循环空气冷热闭式传热传质循环的同时也实现了污泥干化。

“高压带机+低温干化”联用工艺将高压带机技术设计成低温干化的前处理工艺,在不添加生石灰等改性剂前提下,可将含水率为95%~99%(新建项目)或80%左右(改造项目)的污泥降至含水率为70%后再进入低温干化设备,经切条造粒后干化,最终将出泥含水率降至10%~60%(可调),污泥绝干量基本不增加,污泥干基热值高,pH呈中性,最终污泥的处置路径更宽泛。

### 2 联用工艺试验研究

谢蕴江等<sup>[4]</sup>发现当干化温度为80℃时,干化后污泥含水率的变化会影响低温干化阶段的干燥速率和干燥效率,同时干化设备进泥含水率也会影响低温干化的效率<sup>[5]</sup>。为探究“高压带机+低温干化”联用工艺的技术和经济优势,以上海某污水处理厂剩余污泥为试验对象,先分析低温干化设备进泥和出泥含水率对干化效率的影响,再基于试验数据讨论联用工艺的技术经济优势。

该污水处理厂处理规模为 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,污泥脱水采用一级浓缩带式脱水机—“高压带机+低温干化”联用工艺处理路线,一级浓缩带式脱水机带宽2.5 m,出泥量2.28 t/h,出泥含水率为80%,高压带机带宽为1.5 m,出泥含水率为70%,热泵型低温干化机标准除水量为400 kg/h,稳定运行时出泥含水率为60%。在试验期间,整套工艺的处理泥量可根据试验要求任意变化,从而达到不同出泥含水率要求。

试验分5组进行,在保证低温干化设备内部污泥平铺厚度和干燥温度相同的条件下,分别测试低温干化机进泥含水率为70%,其出泥含水率分别为60%、50%、40%、30%,以及进泥含水率为80%、出泥含水率为50%时的单位时间除水量、单位功率除水量(Specific Moisture Evaporation Rate, SMER)等。含水率测试采用卤素水分测定仪,其产地为常州。

试验过程中,污泥低温干化机稳定运行1 h后,在机组冷凝出水口接取冷凝水样本,每次取样持续时间为60 s,每个样本间隔300 s,共取5个冷凝水样本,一天的总除水量计算见式(1),机组运行时所消耗的总有功功率按式(2)计算,污泥低温干化机的SMER按式(3)计算。

$$G = 288 \times \sum_{i=1}^5 G_{li} \quad (1)$$

式中: $G$ 为总除水量,kg/d; $G_{li}$ 为第*i*组冷凝水样本的质量,kg/d, $i=1,2,3,4,5$ 。

$$N = E/T \times 3600 \quad (2)$$

式中: $N$ 为消耗有功功率,kW; $E$ 为取样期间机

组运行所消耗的总电量, kW·h;  $T$  为取样的总时间, s。

$$SMER=G/(24\times N) \tag{3}$$

试验参数控制和分组见表1。

表1 试验参数控制和分组

Tab.1 Control and grouping of experiment parameters

试验组名	低温干化进泥含水率/%	低温干化出泥含水率/%	低温干化送风温度/℃	低温干化污泥堆放高度/cm	数据组数
A	70	60	70	10	5
B	70	50	70	10	5
C	70	40	70	10	5
D	70	30	70	10	5
E	80	50	70	10	5

2.1 低温干化机出泥含水率的影响

低温干化机出泥含水率对其单位时间除水量和SMER的影响见图1。出泥含水率越低,单位时间除水量越低,SMER也越低。出泥含水率为30%时的单位时间除水量相对于出泥含水率60%时的单位时间除水量下降了9.5%,SMER下降了8.4%。

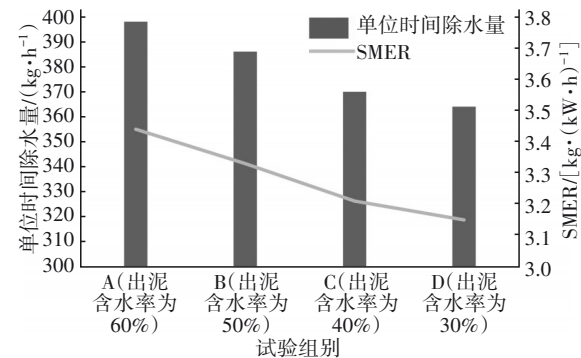


图1 不同出泥含水率时低温干化设备的单位时间除水量和SMER

Fig.1 Water removal per unit time and SMER of low temperature drying equipment at different sludge moisture content

上述试验数据表明,随着低温干化设备出泥含水率的降低,低温干化设备单位时间除水量和SMER均有下降。一方面是因为低温干化机造粒后,颗粒状污泥内部的水分蒸发,传质阻力较大;另一方面,随着干化的持续进行,若进一步降低污泥含水率,需将污泥结合水和内部水蒸发,两方面均需要更多的能量输入。因此在实际工程中,对于干

化出泥含水率的选择,一方面考虑实际工艺需求(如后段工艺要求等);另一方面,从干化效率角度确定出泥含水率,对整体工艺的能耗有重要影响。

2.2 高压带机和进泥含水率的影响

主要对比低温干化机处理一级浓缩带式压滤机出泥(含水率80%)和高压带机出泥(含水率70%)时的单位时间除水量和SMER。在试验中,保证两组试验污泥出泥含水率一致(均为50%),同时保证污泥堆放高度和送风温度两个变量一致。试验结果如图2所示。采用高压带机处理后,低温干化设备单位时间除水量从360 kg/h提升至386 kg/h,提升了7.2%;SMER从3.2 kg/(kW·h)提升至3.3 kg/(kW·h),即经过高压带机处理后,低温干化设备干化效率有一定程度的提升(提升5.0%)。

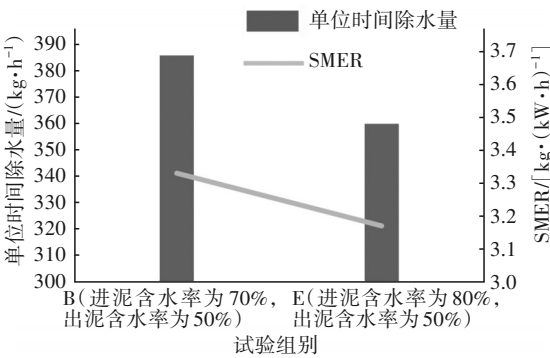
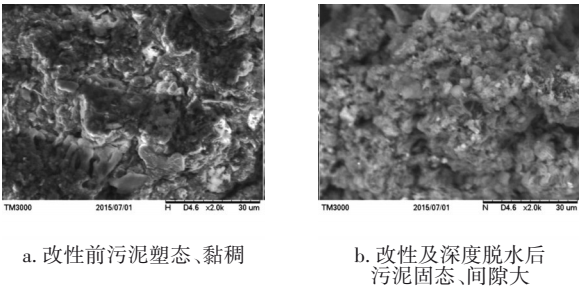


图2 低温干化设备不同进泥含水率的单位时间除水量和SMER

Fig.2 Water removal per unit time and SMER of low temperature drying equipment with different moisture content of inlet sludge

Cai等<sup>[6]</sup>的研究结果亦表明,污泥含水率的降低和污泥孔隙率的提高均可以提高干化效率。市政污泥经过一级浓缩带式脱水机脱水后含水率为80%左右,电镜扫描图<sup>[7]</sup>见图3。



a. 改性前污泥塑态、黏稠  
b. 改性及深度脱水后污泥固态、间隙大

图3 改性深度脱水前后的污泥扫描电镜图

Fig.3 Scanning electron microscope graph before and after sludge modification and deep dewatering



由图3可知,污泥呈塑态且黏稠,污泥内部结构相对紧密。而经过混合改性及高压带机脱水后,污泥含水率降至70%左右,压滤后的泥饼为固态且呈多孔状,污泥孔隙率增大。因此,污泥经过高压带机处理后,低温干化段的单位时间除水量和SMER均有不同程度提高。

综上所述,“高压带机+低温干化”联用工艺一方面降低了低温干化设备进泥含水率,另一方面提高了污泥孔隙率,最终提高了低温干化的单位时间除水量及SMER。

### 3 联用工艺技术经济分析

通过试验研究发现,“高压带机+低温干化”联用工艺相对于直接采用低温干化,低温干化阶段的单位时间除水量和SMER均有提升。以该污水处理厂剩余污泥作为研究对象,首先对比联用工艺和直接低温干化工艺的整体运行费用及能效,再对两种工艺的设备总投资进行比较,全面讨论两种方案的技术经济性。

因污泥最终处置方式不同,对污泥含水率要求不尽相同,故将讨论不同出泥含水率情况下(系统进泥含水率均为80%,最终出泥含水率分别为60%、50%、40%、30%),两种工艺路线的运行费用、SMER、设备初投资和污泥处理量情况。

两种工艺路线的基本运行参数对比见表2。

表2 “高压带机+低温干化”联用工艺与单独低温干化基本运行参数

Tab.2 Basic operation parameters of combined process of high pressure belt filter and low temperature sludge dryer and single low temperature dryer

项目	“高压带机+低温干化”联用工艺	单独低温干化
污泥处理量/( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ )	2 280	2 280
污泥平均含水率/%	80	80
投加固体药剂质量/( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ )	15(污泥含水率80%)	0
高压带机脱水后污泥含水率/%	70	
高压带机单位污泥耗电量/( $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$ )	5.0	
电价/[元·( $\text{kW}\cdot\text{h}$ ) $^{-1}$ ]	0.7	0.7
固化剂单价/(元· $\text{kg}^{-1}$ )	2.8	2.8
人工费/(元· $\text{t}^{-1}$ 污泥)	22	12
耗材费/(元· $\text{t}^{-1}$ 污泥)	4	1.4

表2给出了两种不同工艺路线的运行参数,在此参数基础上进行对比分析。其中,运行费用由电费、药剂费、人工费和耗材费构成。不同工艺的初投资为同等污泥量和场地情况下的设备总投资(以污泥含水率80%为基础),同时为了便于阅读比较对总投资进行无量纲处理,即初投资当量=实际设备总投资/当量因子,各不同工况下当量因子为同一数值。另外,为了对比污泥处理量变化,对污泥量亦进行无量纲处理,方式与总投资方法相同,不再赘述。

#### 3.1 联用工艺的运行费用和能源利用效率

图4给出了不同出泥含水率情况下,每吨含水率80%污泥的运行费用情况。总体而言,与直接低温干化相比,联用工艺运行费用在不同出泥含水率要求下均有不同程度的降低,最高可降低33.4%,最低也可降低26.6%。

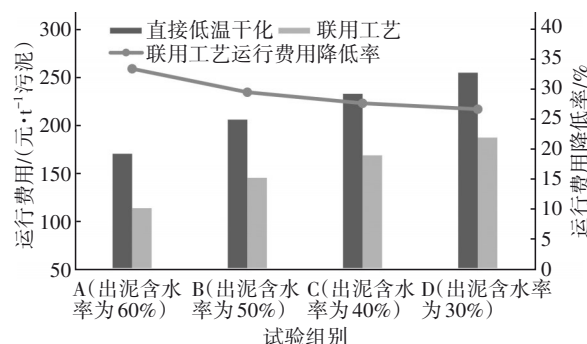


图4 不同出泥含水率条件下联用工艺和直接采用低温干化运行费用对比

Fig.4 Comparisons between the operating costs of the combination system and single low temperature dryer

从图4还可看出,联用工艺运行费用降低率随着最终出泥含水率的提高而提高。

为了量化分析上述结果,将不同出泥含水率条件下联用工艺中高压带机和低温干化单位时间除水量进行对比分析(见图5)。从图5可以看出,出泥含水率越低,低温干化除水量越高,以至超过高压带机除水量。在进泥含水率为70%、出泥含水率为40%时,两者的除水量相等。就运行费用而言,出泥含水率越高,联用工艺中运行费用相对高的低温干化阶段除水量占比越低,整体工艺的运行费用越低;另一方面,出泥含水率越低,联用工艺和直接低温干化工艺运行费用逐步增加,但是直接干化工艺运行费用增加的绝对量大于联用工艺。

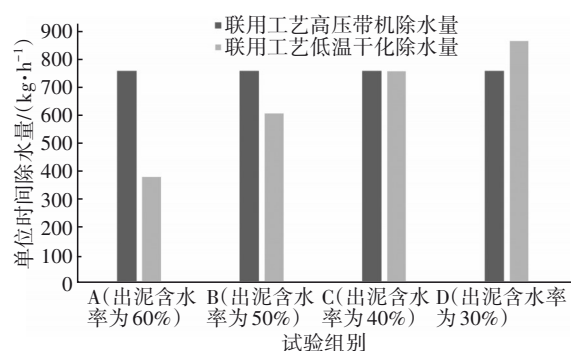


图5 不同出泥含水率时联用工艺高压带机除水量和低温干化除水量

Fig.5 Water removal capacity of high pressure belt filter and low temperature dryer in combined process under different sludge moisture content

### 3.2 联用工艺和直接低温干化的初投资比较

图6给出了不同出泥含水率要求情况下,采用联用工艺和直接低温干化的设备初投资对比。

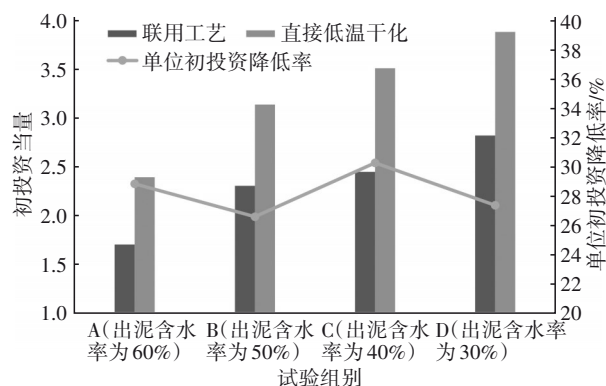


图6 不同出泥含水率时联用工艺和直接低温干化的设备初投资当量

Fig.6 Comparison of initial equivalent investment of the combined process and direct low temperature dryer

相比于直接低温干化,联用工艺的设备初投资明显降低,最高降幅可达30.3%,联用工艺中采用高压带机对污泥进行机械脱水预处理,使污泥含水率从80%降至70%,对于同一项目而言,一方面降低了低温干化设备选型规格,即降低了干化设备初投资;另一方面高压带机作为纯机械脱水设备,其吨泥投资较低温干化机更低,从而使“高压带机+低温干化”联用工艺设备初投资显著降低。

### 3.3 联用工艺改造现有直接低温干化项目的潜力

根据住房和城乡建设部统计年鉴,我国年均污水量不断增加,污泥产量也不断增加,提高污泥处理能力非常关键,因此讨论对直接低温干化含水率

80%污泥的既有项目进行升级改造很有意义。

在现有低温干化机前端增设高压带机后,不同出泥含水率条件下整个系统的污泥处理量变化如图7所示。

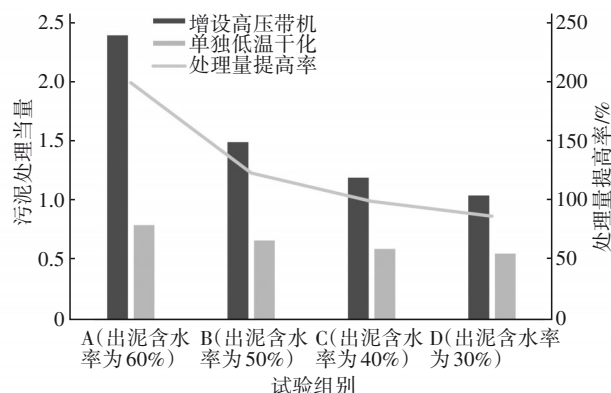


图7 在现有低温干化机前端增设高压带机前后不同出泥含水率时污泥处理当量对比

Fig.7 Comparison of sludge treatment equivalents at different sludge moisture content before and after adding high pressure belt filter at the front of the existing low temperature dryer

由图7可知,增设高压带机设备后,当出泥含水率分别为60%、50%、40%和30%时,污泥处理量分别提升200%、124%、100%和88%。因此,高压带机能够显著提升直接采用低温干化工艺项目的污泥处理量。

## 4 结论

首先通过现场试验研究了低温干化设备单位时间除水量和SMER的影响因素,分析了“高压带机+低温干化”联用工艺的技术优势,再从设备运行费用、设备初投资、污泥处理量等角度分析了联用工艺的经济优势,得出以下主要结论:

① 进泥含水率为80%时,相比于直接低温干化工艺,联用工艺可将低温干化阶段的单位时间除水量提高7.2%以上,低温干化设备SMER提高5.0%以上。

② 与直接采用低温干化工艺相比,联用工艺最高可将整体工艺运行费用和设备初投资分别降低33.4%和30.3%。

③ 对于直接采用低温干化的现有项目,增设高压带机可使整个工艺污泥处理量提升200%左右。

## 参考文献:

- [1] 史骏. 城市污水污泥处理处置系统的技术经济分析与评价(上)[J]. 给水排水, 2009, 35(8): 32-35.  
SHI Jun. Cost-effectiveness analysis and evaluation on the municipal wastewater sludge treatment and disposal system (I)[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(8): 32-35(in Chinese).
- [2] 姚杰. 污泥深度脱水关键技术研究及应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(23): 153-157.  
YAO Jie. Study and application of key technology for advanced sludge dewatering [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(23): 153-157(in Chinese).
- [3] YUAN G, CHU K. Heat pump drying of industrial wastewater sludge [J]. Water Practice and Technology, 2020, 15(2): 404-415.
- [4] 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).
- [5] 郑龙. 污泥低温干燥的实验研究及动力学分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
ZHENG Long. Experimental Study and Kinetic Analysis of Sludge Drying at Low Temperature [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [6] CAI Z L, MA X Q, QING X, *et al.* Drying kinetics and characteristics of sewage sludge/rice straw mixture [J]. Drying Technology, 2015, 33(12): 1500-1509.
- [7] 李建, 阮燕霞, 陈良才, 等. 粉煤灰改性-高压带式连续脱水设备用于污泥减量[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 105-109.  
LI Jian, RUAN Yanxia, CHEN Liangcai, *et al.* Application of high pressure belt filter dewatering equipment modified by fly ash in municipal sludge reduction [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(14): 105-109(in Chinese).

作者简介: 阮燕霞(1990- ), 女, 江苏丹阳人, 硕士, 工程师, 主要从事污泥处理处置技术研发及实际应用工作。

E-mail: ruanyanxia@tongjizy.com

收稿日期: 2023-07-17

修回日期: 2023-08-11

(编辑: 衣春敏)

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命