

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.13.016

污泥高压无热深度脱水干化技术研究及工程应用

蓝佳明¹, 彭书传¹, 赵军², 高寒², 周其胤²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽美自然环境科技有限公司, 安徽 六安 237000)

摘要: 针对市政污泥,对污泥高压无热深度脱水干化技术的设备性能和工程应用效果进行了分析,得到了最佳运行参数。结果表明,在高压压榨装置液压系统运行压力为14 MPa、污泥摊铺总厚度为2 cm、装置压榨时间为4 h的条件下,可将污泥含水率从80%左右降低至45%左右;将微风干化仓污泥摊铺厚度控制在3 cm时,1 h后含水率可降至40%。以安徽省六安市某污水厂为例,污泥处理规模为30 t/d的工程应用结果表明,相比传统热干化脱水技术,污泥高压无热深度脱水干化技术运行成本降低40%以上,且全过程无热处理,达到了节能减排目的,响应了国家“双碳”战略。

关键词: 污泥; 深度脱水干化; 高压; 含水率; 无热处理; 工程应用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)13-0110-05

Research and Engineering Application of High-pressure Non-thermal Deep Dewatering and Drying Technology for Sludge

Lan Jiaming¹, Peng Shuchuan¹, Zhao Jun², Gao Han², Zhou Qiyin²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Beauty Natural Environment Technology Co. Ltd., Lu'an 237000, China)

Abstract: The equipment performance and engineering application effects of the high-pressure non-thermal deep dewatering and drying technology for municipal sludge were analyzed, and the optimal operating parameters were obtained. The results showed that when the hydraulic system operating pressure of the high-pressure pressing device was controlled at 14 MPa, the total sludge spreading thickness was 2 cm, and the pressing time was 4 hours, the sludge moisture content could be reduced from about 80% to about 45%. When the sludge spreading thickness in the breeze drying silo was controlled at 3 cm, the moisture content could be reduced to 40% after 1 hour. Taking a sewage treatment plant in Lu'an City, Anhui Province as an example, the engineering application results treating 30 t/d of sludge showed that compared with traditional thermal drying and dewatering technology, the operating cost of this high-pressure non-thermal deep dewatering and drying technology was reduced by more than 40%. Moreover, there was non-thermal treatment throughout the entire process, achieving the goal of energy conservation and emission reduction, and responding to the national “dual carbon” strategy.

Keywords: sludge; deep dewatering and drying; high pressure; moisture content; non-thermal treatment; engineering application

通信作者: 彭书传 E-mail: pengshuchuan@hfut.edu.cn

由于市政污水处理量逐渐增加,产生的污泥也日益增多。市政污泥含水率高,这严重制约了污泥的输送和后续处置^[1]。目前,污水厂使用常规脱水设备处理污泥后,污泥含水率仍有 80% 左右,污泥减量化程度有限。因此,研发新型污泥深度脱水技术、进一步降低污泥含水率已成为行业追求目标。热干化技术是目前市场上污泥深度脱水的主流技术之一,但其存在燃料消耗大、运行成本高等问题^[2-3],且在污泥热处理过程中会产生污染气体,对人体健康会产生很大影响^[4]。为减少燃料使用量并提高污泥脱水效率,研发出了污泥高压无热深度脱水干化技术,其设备由高压压榨装置和微风干化仓组成,高压压榨装置液压系统运行压力最高可达 15 MPa,能最大限度地挤压出污泥中的水分。微风干化仓对压榨完成后的污泥进行风干,不使用热源,避免了消耗燃料和产生污染气体,具有节能减排、安全环保等特点。

1 材料和方法

1.1 试验装置

污泥高压无热深度脱水干化装置如图 1 所示。高压压榨装置型号为 MC075-YZ01,钢制材料,规格为 1 m×1 m×3 m,压榨面积为 0.75 m×0.75 m;微风干化仓型号为 MC30-WFC01,不锈钢制材料,规格为 2 m×6 m×4 m,半密封仓体,一侧带有风机,风速为 0.3 m/s,另一侧为通风口;滤布采用丙纶材质,织物经纱密度为 11 根/英寸(1 英寸=0.025 4 m),纬纱密度为 19 根/英寸;液压油泵的系统压力为 13~15 MPa;输送机长为 7 m,带宽为 1 m。

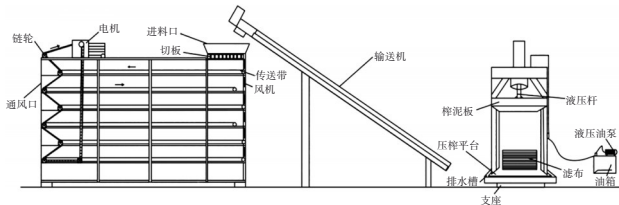


图 1 污泥高压无热深度脱水干化装置示意

Fig.1 Schematic diagram of high-pressure non-thermal deep dewatering and drying equipment for sludge

1.2 试验原料和仪器

试验原料取自安徽省六安市某污水处理厂经絮凝叠螺脱水后的污泥,其性质如下:pH 为 7.21,含水率为 80.41%,有机物含量为 42.78%,COD 为 110.84 mg/L。试验仪器主要包括电热恒温鼓风干

燥箱、电子天平、pH 计、马福炉等。

1.3 试验方法

1.3.1 污泥压榨试验

经滤布包裹后的污泥放入压榨平台,通过压机重压后,挤出污泥中的水分,以出泥含水率为指标,以液压系统运行压力、污泥摊铺总厚度、装置压榨时间为影响因素,选出各因素的较佳范围进行正交试验。表 1 为 $L_9(3^4)$ 试验因素水平设计情况,每组试验重复三次,结果取平均值。

表 1 试验因素水平情况

Tab.1 Test factor level

水平	液压系统运行压力 (A)/MPa	污泥摊铺总厚度 (B)/cm	装置压榨 时间(C)/h
1	13	1	3
2	14	2	4
3	15	3	5

1.3.2 污泥干化试验

压榨结束后的污泥由输送机送至微风干化仓,污泥由进料口进入仓体,经过切板切片后落入下方行走传送带上,传送带不断向下输送,并利用风机实现对污泥的风干。设置污泥摊铺厚度为 3 cm,分别采用室内自然风干、室外自然风干、微风干化仓风干三种方式进行试验,其中室内自然风干、室外自然风干都采用相同规格(2 m×6 m×4 m)的半密封式仓体进行试验,研究不同风干方式下出泥含水率变化情况。采用微风干化仓干化时,设置污泥摊铺厚度分别为 3、5、10 cm,研究不同摊铺厚度下出泥含水率变化情况。压榨试验和干化试验以及工程应用的出泥含水率都采用重量法测定。

2 结果与讨论

2.1 污泥压榨试验

2.1.1 液压系统运行压力对脱水性能的影响

将污泥摊铺总厚度控制在 2 cm、装置压榨时间控制在 4 h,考察液压系统运行压力对污泥压榨机出泥含水率的影响。结果表明,当液压系统运行压力分别为 11、12、13、14、15 MPa 时,出泥含水率分别为 60.11%、55.17%、48.37%、44.84%、45.53%。可以看出,增加液压系统运行压力会改变出泥含水率,当施加 11~14 MPa 运行压力时,随着运行压力的增加,出泥含水率快速降低,之后将运行压力增加至 15 MPa,出泥含水率不再降低反而略有上升。出现这种现象可能是因为过高的压力使污泥孔隙比快

速降低,部分污泥形成更加密实的泥饼,堵塞输水通道,使得脱水能力变差甚至阻止脱水^[5-6]。当液压系统运行压力在13~15 MPa时,出泥含水率较低,污泥压榨效果较好。

2.1.2 污泥摊铺总厚度对脱水性能的影响

控制液压系统运行压力为14 MPa、装置压榨时间为4 h,分析不同污泥摊铺总厚度对出泥含水率的影响。结果表明,当污泥摊铺总厚度分别为1、2、3、4、5 cm时,出泥含水率分别为45.34%、45.67%、46.70%、50.21%、55.47%。可以发现,污泥压榨机出泥含水率与污泥摊铺总厚度呈线性正相关。当厚度为1 cm时,出泥含水率最低,继续增加厚度,出泥含水率缓慢增大,当厚度超过3 cm后,出泥含水率增长速度变快且数值较大。推测原因是当厚度在3 cm以上,在污泥压榨过程中,较厚的污泥厚度使污泥内部颗粒之间排水路径的连通性降低,曲折度增加,使脱水变困难^[7-9]。当污泥摊铺总厚度为1~3 cm时,出泥含水率较低。

2.1.3 装置压榨时间对脱水性能的影响

保持液压系统运行压力为14 MPa、污泥摊铺总厚度为2 cm,分析压榨时间对出泥含水率的影响。结果表明,当压榨时间分别为1、2、3、4、5 h时,出泥含水率分别为63.56%、57.21%、49.36%、44.43%、44.22%。可见,随着装置压榨时间的延长,出泥含水率呈现不断下降并且最后趋于稳定的现象。当装置压榨时间从4 h提高到5 h时,出泥含水率基本没有变化。这可能是随着装置压榨时间的增加,污泥颗粒被挤压致密,过滤阻力增大,导致脱水速度变慢^[10]。当装置压榨时间在3~5 h时,出泥含水率较低。

2.2 正交试验结果极差分析

正交试验结果见表2,极差分析结果见表3。可知,在极差分析中,极差 R 越大,影响程度也越大,所以影响程度排序为: $C>A>B$,即装置压榨时间>液压系统运行压力>污泥摊铺总厚度。通过分析各参数因子 k 值发现,出泥含水率最小的压榨机运行参数组合为 $A_2B_1C_3$ 。但在污泥摊铺总厚度因素中, k_1 略低于 k_2 ,从生产效率和经济成本的角度来看,厚度为1 cm会比2 cm消耗更多的滤布,生产效率降低,成本增加,因此可认为污泥摊铺总厚度为2 cm是该因子的最佳水平。在装置压榨时间因子中, k_2 略高于 k_3 ,从效率和能耗角度看,过长的压榨时间会减少污

泥处理量并增加能耗,因此可以认为装置压榨时间为4 h是该因子的最佳水平。综合考虑后,确定最佳组合为: $A_2B_2C_2$,即液压系统运行压力为14 MPa、污泥摊铺总厚度为2 cm、装置压榨时间为4 h。

表2 正交试验结果

Tab.2 Orthogonal test results

试验编号	液压系统运行压力(A)/MPa	污泥摊铺总厚度(B)/cm	装置压榨时间(C)/h	出泥含水率/%
1	13	1	3	52.47
2	13	2	4	48.55
3	13	3	5	48.75
4	14	1	4	45.26
5	14	2	5	44.73
6	14	3	3	51.68
7	15	1	5	45.87
8	15	2	3	50.97
9	15	3	4	47.21

表3 极差分析结果

Tab.3 Range analysis results %

项目	液压系统运行压力(A)	污泥摊铺总厚度(B)	装置压榨时间(C)
K_1	149.77	143.60	155.12
K_2	141.67	144.25	141.02
K_3	144.05	147.64	139.35
k_1	49.92	47.87	51.71
k_2	47.22	48.08	47.01
k_3	48.02	49.21	46.45
R	2.70	1.35	5.26

2.3 污泥干化试验

2.3.1 不同风干方式下污泥干化试验结果

不同风干方式下出泥含水率的变化如图2所示。可以看出,三种不同风干方式下出泥含水率明显不同。在污泥摊铺厚度为3 cm的条件下,微风干化仓的干化效果最好,出泥含水率从45%降低至40%用时约1 h,降低至20%用时约8 h。室外自然风干效果次之,出泥含水率降低至40%约3 h,降低至20%约22 h,由于试验在夏天进行,室外温度较高,通风条件好,室外自然风干效果也较好。室内自然风干效果较差,含水率下降速度缓慢,且在风干后期(20~25 h)出现含水率上升情况,可能是因为室内通风差,相对湿度大,污泥出现返潮现象。综上所述,通风条件越好,污泥干化效果就越好,且微风干化仓的干化效果明显优于室内外自然风干效

果,因此在实际工程中可选择使用微风干化仓进行污泥干化处理。

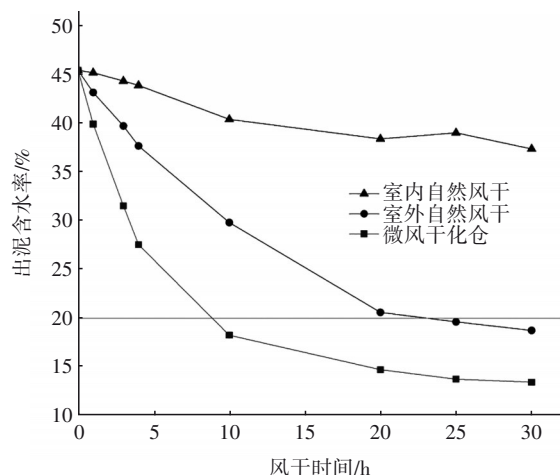


图2 不同风干方式下出泥含水率的变化

Fig.2 Change in moisture content of sludge under different air drying methods

2.3.2 不同摊铺厚度下污泥干化试验结果

不同摊铺厚度下出泥含水率的变化如图3所示。

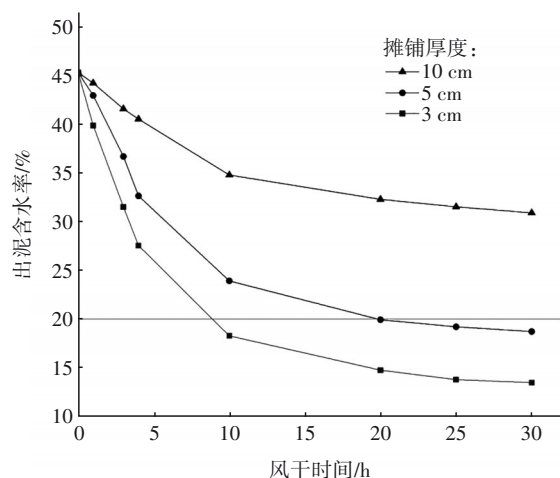


图3 不同摊铺厚度下出泥含水率的变化

Fig.3 Change in moisture content of sludge under different spreading thicknesses

由图3可知,使用微风干化仓进行污泥干化时,不同摊铺厚度下出泥含水率具有明显差异。当污泥摊铺厚度为3 cm时,干化效果最好,出泥含水率从45%降低至40%用时约1 h,降低至20%用时约8 h。当污泥摊铺厚度为10 cm时,出泥含水率降低至40%左右用时约4.5 h,30 h后出泥含水率下降至32%左右,干化效果较差。当污泥摊铺厚度从3 cm增加到10 cm时,出泥含水率下降速度变慢,干化效

果变差,可能是污泥厚度过高,污泥内部水分蒸发路径较长,使污泥风干速度降低。在实际应用中,选择污泥摊铺厚度为3 cm即可。

2.4 工程应用

2.4.1 项目简介

以安徽省六安市某污水厂为例,该厂污水处理规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,日产污泥约30 t(污泥含水率为80%),要求处理后污泥含水率降低至40%以下,然后进入垃圾发电厂焚烧发电。根据前期试验得到高压无热深度脱水干化技术最佳参数后,使用同一型号设备和配套系统对厂内污泥进行深度脱水干化。项目稳定运行一年后,经脱水干化的污泥含水率都稳定在40%以下,全过程在生产车间内完成,且自动连续运行。

2.4.2 工艺流程和主要设备参数

将初步脱水后的污泥输送至布泥机,布泥机将污泥均匀摊铺到装填平台,经滤布包裹后,由输送机送至高压无热深度脱水干化设备。主要设备包括4台有轴螺旋输送机,功率为5.5 kW;2台无轴螺旋输送机,功率为7.5 kW;2台布泥机,功率为3 kW;2套装填平台,功率为2.25 kW;8台高压压榨装置,单台高压压榨装置的污泥处理量为3 762 kg/d(污泥含水率为80%),液压系统运行压力为14 MPa,污泥摊铺总厚度为2 cm,装置压榨时间为4 h,功率为0.75 kW;1套微风干化仓,摊铺厚度为3 cm,停留时间为1 h,功率为10 kW。

2.4.3 投资及运行成本计算

本工程投资成本主要由土建费、设备费和其他费用构成,总计约为2 421万元。运行成本主要包括电力费、絮凝药剂费、人工费。整套设备运行时间为16 h/d,电价按1元/(kW·h)计,总费用为1 016元/d。絮凝药剂量为32 kg/d,按单价25元/kg计,总费用为800元/d。人工费按6人次/d计,单价为280元/d,总费用为1 680元/d。折算成1 t含水率为80%的污泥,其电力费为33.9元/d,药剂费为26.7元/d,人工费为56.0元/d,直接运行成本为116.6元/d,相比热干化技术(运行成本>200元/d),本技术运行成本可降低40%以上。

3 结论

① 以高压压榨装置出泥含水率为研究对象,采用单因素试验分析了出泥含水率随液压系统运

行压力、污泥摊铺总厚度、装置压榨时间的变化趋势,并确定正交试验范围,最后通过正交试验得到压榨机运行参数影响程度大小和最优组合。正交试验结果表明,三者的影响程度排序为装置压榨时间>液压系统运行压力>污泥摊铺总厚度,三者最优组合如下:液压系统运行压力为14 MPa,污泥摊铺总厚度为2 cm,装置压榨时间为4 h。采用微风干化仓对压榨后污泥进行风干,1 h后出泥含水率可以从45%降至40%,有较好的实际应用价值,且微风干化仓污泥摊铺厚度为3 cm时,干化效果最好。

② 以安徽省六安市某污水处理厂工程应用为例,通过运行效果和经济效益分析,相比热干化技术,本工艺全程无热处理,运行成本降低40%以上,验证了污泥高压无热深度脱水干化技术处理市政污泥的可行性,并且该技术具有较好的经济效益和减排效果。

参考文献:

- [1] Xia T, Zhang X, Chen D J, et al. Effects of ceramsite derived from sewage sludge combined with the O_3 - $FeCl_3$ /PAM process on the dewatering of waste-activated sludge and investigation of dewatering mechanisms [J]. Water Science and Technology, 2023, 88(2): 367-380.
- [2] 严俊泉, 袁刚. “两段法”污泥干化工艺的应用探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(6): 47-51.
Yan Junquan, Yuan Gang. Discussion on application of two-stage sludge drying technology [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 47-51 (in Chinese).
- [3] 姚尚安, 孙同华, 瞿赞, 等. 污泥深度机械脱水的优化研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(3): 126-131.
Yao Shang'an, Sun Tonghua, Qu Zan, et al. Optimization research of mechanical dewatering of sludge with high pressure [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(3): 126-131 (in Chinese).
- [4] 彭雅, 袁进, 周印羲, 等. 污泥热干化的研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(2): 453-457.
Peng Ya, Yuan Jin, Zhou Yinxi, et al. Research progress in thermal drying of sludge [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(2): 453-457 (in Chinese).
- [5] 谢元华, 杨岱恩, 白冰, 等. 高压喷射撞击流破解剩余污泥的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(12): 1790-1796.
Xie Yuanhua, Yang Dai'en, Bai Bing, et al. Study on excess sludge disintegration by high pressure jet impingement stream [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(12): 1790-1796 (in Chinese).
- [6] 戴财胜, 彭颖, 黄陈宇, 等. 基于半焦的城市污泥调质与机械压滤脱水[J]. 环境工程, 2021, 39(2): 131-135.
Dai Caisheng, Peng Ying, Huang Chenyu, et al. Conditioning and mechanical filter press dewatering of municipal sludge with the use of semi-coke [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(2): 131-135 (in Chinese).
- [7] Han C, Xie H P, Bai B, et al. Influence of some key parameters on the efficiency of flocculation-solidification-filter press combined method for sustainable treatment of waste mud slurry [J]. Sustainability, 2023, 15(21): 15658.
- [8] 刘锐, 徐强, 郭松杰, 等. PAC调理剂对全自动板框压滤机污泥深度脱水的影响[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 158-162.
Liu Rui, Xu Qiang, Guo Songjie, et al. Effect of PAC conditioner on deep sludge decoating by automatic filter press [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 158-162 (in Chinese).
- [9] 于沛然. 活性污泥深度脱水过程的跨尺度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
Yu Peiran. The Cross-scale Study on Deep Dewatering of Activated Sludge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [10] Rao B Q, Su X Y, Lu X L, et al. Ultrahigh pressure filtration dewatering of municipal sludge based on microwave pretreatment [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 247: 588-595.

作者简介: 蓝佳明(2000—), 男, 浙江丽水人, 硕士研究生, 主要研究方向为市政污泥处理处置与资源化利用。

E-mail: 1751733413@qq.com

收稿日期: 2025-05-06

修回日期: 2025-06-26

(编辑: 任莹莹)