

污泥电干化设备的工程应用

张 翼, 刘玉轩

中城院(北京)环境科技股份有限公司, 北京

收稿日期: 2025年3月6日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年6月3日

摘 要

随着城镇化进程加快, 污水处理厂污泥产量激增, 传统处置方式面临环境与经济性双重挑战。本文以陕西省某地污泥无害化资源化处理工程为例, 探讨电能驱动的低温干化技术应用。项目采用热泵耦合低温带式干化工艺, 设计规模为280 t/d (含水率80%), 通过电能驱动热泵回收余热, 实现污泥含水率从80%降至40%。运行数据显示, 系统单位能耗为0.25 kWh/kg-H₂O, 综合成本较燃煤干化降低18%。研究表明, 电能作为清洁热源可显著降低碳排放, 为中小型城市污泥处理提供高效低碳解决方案。

关键词

市政污泥, 污泥干化, 电干化

Engineering Application of Sludge Electric Drying Equipment

Yi Zhang, Yuxuan Liu

Zhongcheng Academy (Beijing) Environmental Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Mar. 6th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: Jun. 3rd, 2025

Abstract

With the acceleration of urbanization, the sludge production of sewage treatment plants has increased sharply, and traditional disposal methods face dual challenges of environment and economy. This paper takes the harmless resource treatment project of sludge in a certain place in Shaanxi Province as an example to explore the application of low-temperature drying technology driven by electric energy. The project adopts a heat pump coupled low-temperature belt drying process with a design scale of 280 t/d (water content 80%). The waste heat is recovered by electric energy-driven heat pump to reduce the sludge moisture content from 80% to 40%. Operation data shows that the unit energy consumption of the system is 0.25 kWh/kg-H₂O, and the comprehensive

cost is 18% lower than that of coal-fired drying. Studies have shown that electricity as a clean heat source can significantly reduce carbon emissions and provide an efficient and low-carbon solution for sludge treatment in small and medium-sized cities.

Keywords

Municipal Sludge, Sludge Drying, Electro drying

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 工程背景概述

市政污泥是污水处理的副产物, 富含有机物、重金属及病原体, 若处置不当易引发二次污染[1]。据统计, 我国城镇污泥年产量超 6000 万吨, 但无害化处置率不足 60% [2]。传统处置方式中, 填埋面临土地资源紧张与渗滤液污染风险, 焚烧存在能耗高、尾气处理复杂等问题[3]。污泥干化技术通过热力作用降低含水率, 可提升后续处置效率, 其中低温干化(<100℃)因能效高、臭气排放少备受关注[4]。

热源选择是干化技术核心, 燃煤/燃气虽成本较低, 但碳排放强度高(燃煤: 0.85 kg CO₂/kg H₂O) [5]。电能驱动热泵技术通过逆卡诺循环回收湿热空气余热, 能效比(COP)可达 3.5~4.2, 较电热丝直接加热节能 60%以上[6]。陕西省某地位于秦巴山区, 属南水北调中线工程水源涵养区, 环保要求严格。项目选址毗邻生活垃圾焚烧厂, 干化后污泥(40%含水率)可协同焚烧发电, 形成区域固废处理闭环[7]。本研究结合工程实践, 系统分析电能低温干化的技术经济性, 为同类项目提供参考。

2. 污泥低温电干化原理

污泥的低温电干化主要是利用除湿热泵产生的干燥热空气对干燥室中的污泥进行低温烘干, 湿润气体循环进入冷凝热泵冷凝除湿再产生干燥热空气。

干化单元包括进料柱塞泵和污泥干化机。经过污泥接收单元后污泥被柱塞泵泵入污泥干化机, 污泥进入干化机之后首先被铺陈切条, 以利于后续干化。切条成型的污泥进入干燥室中的网带输送机上, 除湿热泵产生的干燥热空气(温度 ≤ 80℃)进入干燥室对污泥湿料进行烘干, 水分变成水蒸气随气体循环再进入除湿热泵冷凝除湿, 水蒸气冷凝成水排出, 除湿热泵产生干燥热空气再循环。整个过程是一个闭式循环的过程, 无臭气排放。

热干化温度通常为 60℃~100℃, 在此温度下水分以液态或蒸汽形式被蒸发。低温干化系统一般采用封闭式循环系统, 使干化过程中的热量得以回收利用。

3. 污泥干化系统设计

3.1. 设计参数与工艺流程

项目处理规模分两期建设: 一期 150 t/d (含水率 80%), 二期扩展至 280 t/d。污泥来源涵盖区域内 7 座污水处理厂, 有机质含量 45%~55%, 重金属指标满足《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》(GB/T 23485-2009)。工艺流程包括污泥接收单元、干化单元、干料贮存及出料单元、干料返混单元以及冷却循环水单元, 详见图 1:

1. 污泥接收单元是系统的前端环节, 污泥经运输车过磅后倒入滑架卸料仓, 经双轴螺旋搅拌输送机

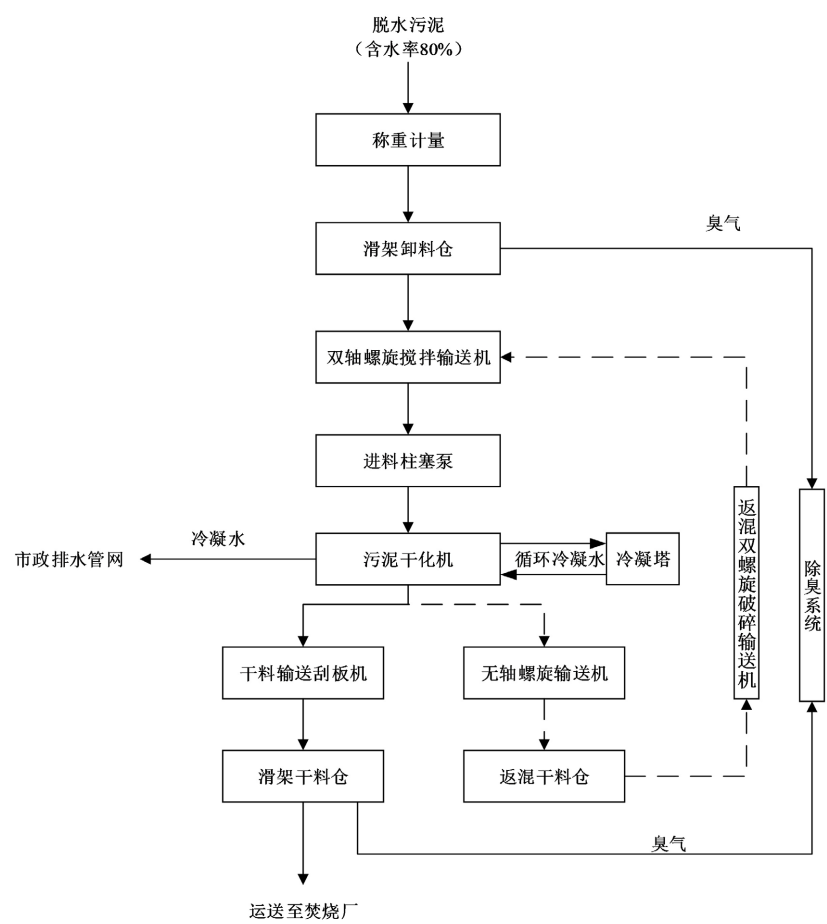
输送至干化单元。该单元配备含水率检测装置, 确保进料污泥含水率满足设计要求(80%), 为后续干化提供稳定物料。

2. 干化单元是系统的核心部分, 包括污泥干化机和进料柱塞泵。湿污泥通过柱塞泵泵入干化机, 经铺陈切条后进入干燥室。切条成型的污泥依靠重力落入缓慢行走的网带上, 热干风从网带底部快速上升, 与污泥充分接触实现干化。湿空气回风进入除湿热泵系统, 通过降温冷凝去除水分, 再经加热升温后循环利用, 实现无尾气排放。干化后污泥含水率降至 40%, 满足后续处置要求。

3. 干料贮存及出料单元由干料刮板输送机、污泥干料仓和双轴螺旋取料机组成。干化后的污泥经刮板输送机进入干料仓, 部分通过返混干料无轴螺旋输送机进入返混干料仓备用。干料仓中的污泥通过双轴螺旋取料机输送至外运车辆, 确保出料连续稳定。

4. 干料返混单元用于调节进料污泥含固率, 保障干化效率。当进料污泥含固率低于 16%时, 返混干料仓中的干料(含水率 40%)通过返混双螺旋破碎输送机进入卸料仓, 与湿污泥充分混合后进入干化单元。该单元有效应对突发情况, 确保系统稳定运行。

5. 冷却水循环单元为干化机提供冷却降温, 由循环水箱、冷却塔及冷却泵组成。冷却水在系统中循环流动, 吸收干化机运行过程中产生的热量, 通过冷却塔散热后重新利用, 实现节能降耗。



— — 注: 干料返混系统仅在干化机进料含固率不满足要求时运行, 返混量视运行情况决定。

Figure 1. Process flow chart
图 1. 工艺流程图

3.2. 关键设备选型

热泵机组: 选用双级压缩高温热泵(制热量 1200 kW), 蒸发温度 25℃/冷凝温度 75℃;
干化主机: 模块化不锈钢网带结构, 分预热、恒速、降速三段, 停留时间 40 min~60 min;
智能控制: PLC 系统实时监测污泥含水率(微波在线检测仪)与热风湿度, 动态调节铺料厚度与风速。

4. 程运行效果

4.1. 能耗与经济性

系统实测电能消耗为 0.25 kWh/kg·H₂O, 折合吨污泥(含水率由 80%降低至 40%)处理电耗 180 kWh。按电价 0.6 元/kWh 计, 直接成本 108 元/t, 较天然气干化(成本约 150 元/t)降低 28%。结合峰谷电价策略(谷电占比 40%), 年运行费用节约超 200 万元。

4.2. 环境效益

干化过程全封闭运行, H₂S、NH₃排放浓度分别<1 mg/m³、5 mg/m³, 满足《恶臭污染物排放标准》(GB 14554-1993)。协同焚烧后灰渣用于建材生产, 实现重金属固化与资源化。全生命周期分析显示, CO₂ 排放强度为 0.12 t/t 污泥, 较燃煤干化减排 76%。

4.3. 稳定性分析

连续监测表明, 系统在污泥有机质波动(40%~60%)、环境温度(-5℃~35℃)变化下, 出泥含水率稳定在 38%~42%, 设备可用率 > 95%。热泵蒸发器定期自动除霜(6 h/次), 未出现结焦堵塞问题。

5. 结论与展望

通过对陕西省某地污泥电干化工程的实际应用分析, 本研究得出以下具体结论:

1. 技术可行性和工艺效果显著

本项目采用热泵耦合低温带式干化工艺, 在温度 ≤80℃的条件下, 通过除湿热泵实现湿空气的循环利用, 成功将污泥含水率从 80%降至 40%。系统采用封闭式循环模式, 干化过程中未产生恶臭气体外排, 满足《恶臭污染物排放标准》(GB 14554-1993)的要求。通过对湿空气的回收和循环利用, 最大程度降低了能耗, 增强了系统的稳定性和连续性。

2. 能耗与经济性明显优于传统干化方式

实测单位能耗为 0.25 kWh/kg·H₂O, 吨污泥处理电耗约为 180 kWh/t, 按电价 0.6 元/kWh 计算, 直接运行成本为 108 元/t。与天然气干化(150 元/t)相比, 直接运行成本降低了 28%。结合谷电占比 40%的峰谷电价策略, 年运行费用节约超过 200 万元, 经济效益显著。

3. 环保效益突出

干化系统实现了全封闭运行, 臭气、粉尘和废气均得到有效控制, 运行过程中 H₂S 和 NH₃排放浓度分别低于 1 mg/m³和 5 mg/m³, 均满足国家环保排放标准。

干化后的污泥(含水率 40%)具备较高的燃烧热值, 可与邻近垃圾焚烧厂进行协同焚烧发电, 灰渣可用于建材生产, 实现污泥的资源化利用和重金属的稳定固化。系统全生命周期 CO₂ 排放强度为 0.12 t/t 污泥, 与燃煤干化(0.85 t/t 污泥)相比, 减排效果达到 76%。

4. 系统运行稳定性和可靠性强

连续监测数据显示, 系统在污泥有机质含量波动(40%~60%)、环境温度(-5℃~35℃)变化的条件下, 出泥含水率稳定在 38%~42%, 设备可用率保持在 95%以上。采用智能化 PLC 控制系统, 动态调节铺料

厚度和风速,保障出料质量的稳定性。热泵蒸发器自动除霜功能(6 小时/次)有效防止系统结焦和堵塞,保障系统长期稳定运行。

参考文献

- [1] 张伟, 李强. 市政污泥处理技术现状与趋势[J]. 环境工程, 2020, 38(3): 45-50.
- [2] 生态环境部. 2021 年中国环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2022.
- [3] 王芳, 等. 污泥热干化技术能耗与经济对比[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15): 89-94.
- [4] 陈刚. 低温干化在污泥处理中的应用进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 112-117.
- [5] IPCC. 气候变化 2021: 自然科学基础[R]. IPCC, 2021.
- [6] 刘洋, 等. 热泵污泥干化系统性能实验研究[J]. 新能源进展, 2022, 10(2): 56-61.
- [7] 陕西省生态环境厅. 陕西省固体废物污染防治规划(2021-2025) [Z]. 2020.