

污泥干化设备的设计与性能优化探析

肖凯文

(中科航星科技股份有限公司, 山东 青岛 266400)

摘要 污泥具有高含水量、体积大的特点,在污水处理过程中是重要的固体废弃物之一。污泥干化装置利用传热传质的方式以及蒸发水分从而减少污泥的含水量,达到污泥减量化和无害化处理的目的。针对不同的污泥干化装置,研究了其干燥过程中的传热传质规律、设备的形式结构及其能源消耗情况。尤其关注了换热结构、物料输送形式、热利用等方面对于干化过程的影响,结合传热学、流体力学知识,提出了几个重要的设计参数公式以供设备的设计和评价使用参考。优化相关的工艺操作条件、余热再利用等途径能够有效地提升传热能力,降低能耗,从而优化整个污泥干化系统的稳定性,提高经济效益。

关键词 污泥干化; 设备设计; 传热强化; 性能优化; 节能控制

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.036

0 引言

随着城镇污水处理规模扩大,污泥产生量增加,传统填埋或简单处理难以满足环保和资源化需求。污泥干化通过蒸发水分降低含水率,实现减量化,并为焚烧或制砖提供条件。设备结构、传热效果和操作参数影响干化效率和能耗。目前市场设备在热效率、系统稳定性和自动化方面仍需改进,缺乏量化设计,难以达到最优性能。因此,研究设备设计与优化有助于提升效率、降低成本并推进污泥处理技术。

1 污泥干化设备的工作原理与技术类型

1.1 污泥干化过程的基本原理

污泥干化通过热能将污泥中的水分汽化并排出系统,降低污泥含水率,城市污水厂污泥原始含水率为75%~85%,干化后降至10%~30%。干化过程包括热量传递至污泥颗粒使水分蒸发,水汽因温差和浓度差被带走。常见干化温度为80~180℃,间歇式加热设备温度为120~160℃。干化分为加热升温期、等速干燥期(自由水蒸发)和减速干燥期(结合水蒸发)。需调节风速(1.5~3.5 m/s)、物料厚度(20~60 mm)和翻动次数,促进传热和水分转移^[1]。

从设计角度出发,干化过程的总需热量 Q (kW)可通过热量衡算方程进行初步计算:

$$Q = Q_{\text{evap}} + Q_{\text{sludge}} + Q_{\text{loss}} \quad (1)$$

式(1)中, $Q_{\text{evap}} = W \cdot r$ 为水分蒸发所需热量(W 为蒸发水量 kg/s, r 为水的汽化潜热 kJ/kg,约2 250~2 600 kJ/kg); $Q_{\text{sludge}} = m_s \cdot c_{ps} \cdot \Delta T$ 为污泥升温所需热

量(m_s 为绝干污泥质量流量, c_{ps} 为绝干污泥比热容, ΔT 为温升); Q_{loss} 为设备热损失,一般按总热量的5%~10%估算。该计算结果是确定设备换热面积和热源容量的基础。

1.2 常见污泥干化设备类型

常见的污泥干化装置有带式、桨叶式、流化床及转鼓式干化机等,在其中带式干化机由3~5层传送带构成,适用于大中型污水处理厂,其产水量在1.5~3.0 t/h之间;桨叶式干化机采用的是间歇式的加热方式,并利用蒸汽作为载热体,每千克蒸发水量需要消耗大约0.8~1.1 kg蒸汽;流化床干化机利用高速气流使污泥颗粒悬浮起来,气体流速为3~6 m/s左右;而转鼓式干化机则是利用滚筒翻转物料使其进行烘干。不同的机型在性能以及能耗上都是不一样的,在选取时应根据实际情况来选择,如表1所示。

1.3 污泥干化设备的关键技术指标

污泥干化设备性能评价包括处理能力、干化效率、单位能耗和系统可靠性。处理能力为0.5~5.0 t/h。干化效率通过含水量变化衡量,含水量由80%降至20%时,污泥体积减少约60%~70%。单位能耗是关键经济指标,热风干化每蒸发1 kg水耗能3 000~3 500 kJ,间接蒸汽干化为2 600~3 000 kJ,目标是使SEC尽可能接近水的汽化潜热。设备可靠性与温度波动、机械磨损和自动化水平相关,市场设备温度波动可控制在 ± 2 ℃,湿度在 $\pm 3\%$ RH^[2]。以上技术参数为设备设计和优化提供参考。

作者简介:肖凯文(1993-),男,本科,工程师,研究方向:污泥干化系统应用、燃气轮机系统。

表 1 常见污泥干化设备主要运行参数比较

| 设备类型 | 工作温度 (°C) | 处理能力 (t/h) | 蒸发能耗 (kJ/kg 水) | 适用污泥类型 |
|--------|-----------|------------|----------------|-----------|
| 带式干化机 | 120 ~ 180 | 1.5 ~ 3.0 | 3 000 ~ 3 500 | 市政污泥 |
| 桨叶式干化机 | 110 ~ 160 | 1.0 ~ 2.5 | 2 600 ~ 3 000 | 市政 / 工业污泥 |
| 流化床干化机 | 130 ~ 200 | 2.0 ~ 4.0 | 2 800 ~ 3 200 | 颗粒状污泥 |
| 转鼓干化机 | 150 ~ 220 | 2.0 ~ 5.0 | 3 000 ~ 3 400 | 工业污泥 |

2 污泥干化设备的结构与关键技术

2.1 传热结构设计

污泥干化设备中的传热结构决定干化效果和能耗, 传热方法分为直接加热和间接加热。直接加热通过热风对流传热, 温度在 120 ~ 200 °C, 空气量为 8 000 ~ 20 000 m³/h, 能快速蒸发水分, 但热量损失大; 间接加热通过蒸汽或导热油传热, 蒸汽压力为 0.4 ~ 1.0 MPa, 换热面温度为 110 ~ 160 °C。设备设计中的换热面积和热传导路线影响传热效果, 桨叶式干化机的换热面积为 30 ~ 120 m², 污泥层厚度一般为 20 ~ 50 mm, 确保传热系数达到 120 ~ 250 W/(m²·K)。传热结构设计的核心是基于总传热系数 U 的换热面积 A 计算:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_m} \quad (2)$$

式(2)中, Q 为上一节计算得到的总需热量(W), U 为总传热系数(W/(m²·K)), ΔT_m 为换热介质(如蒸汽)与污泥之间的对数平均温差(°C), 而对于桨叶式干化机而言, U 可以在考虑污泥特性和搅拌程度的基础上经公式得到估计, 即 U 可以表示成搅拌速率 n 与污泥含水量 x 的经验表达式。这个过程就是将理论要求转换成实际的物理空间尺寸的过程, 在一定程度上代表了“设计”。

2.2 物料输送与搅拌结构设计

污泥干化存在粘性大、水分含量高及容易结团的特性, 如配置不合适会造成物料分布不均或者结块影响到干化。常采用输送方法有螺旋输送, 转速在 5 ~ 25 r/min 之间, 既运输又搅拌, 避免结团; 桨叶搅拌通过有空腔的桨叶传导热量并搅拌, 间隔 150 ~ 300 mm, 提高热量传递的均匀程度; 转鼓式干化机则是通过滚筒滚动以及抄板提起污泥, 使污泥能够和热风有足够的接触面。合理的设计输送及搅拌机构可以使污泥在 30 ~ 90 min 的时间内进行干燥^[3]。输送机构的功率设计应该考虑物料对设备内壁产生的摩擦力的影响。对于螺旋输送机而言, 估算所消耗的功率 P (kW) 如下式所示:

$$P = \frac{Q_m \cdot (L \cdot \lambda + H)}{367 \cdot \eta} \quad (3)$$

式(3)中, Q_m 表示污泥质量输送量(t/h), L 表示输送水平投影长度(m), λ 表示运行阻力系数(物料有关), H 表示提升高度(m), η 表示传动效率。由此可合理地选择电动机的功率, 防止造成“大马拉小车”的现象, 达到省电的效果。

2.3 排气与废气处理系统设计

在污泥干燥中排出的高温高湿废气, 其中蒸汽含量 20% ~ 40%, 含有氨气、硫化氢以及挥发性有机物等。为了维持真空度、保证干燥的效果, 应该安装有效的抽风机装置, 抽风量有 5 000 ~ 30 000 m³/h, 系统真空度在 -100 ~ -300 Pa 之间, 避免废气外泄和气体流通。废气处理的方法有: 利用冷凝器冷却排气回收蒸汽, 通过生物滤池或者化学洗涤塔去除臭气等, 最后采用活性炭吸附去除余下的有机物等, 合理地设置抽风及净化的设备可以降低有害物质, 改善污泥干燥的环保水平。

对于通风系统, 最主要的是排风机风量的选择 Q_{air} 应该具有及时排出干化过程中产生的水蒸汽的能力, 而风量可以通过对干化装置的质量平衡来进行计算:

$$Q_{air} = \frac{W}{\rho_{air} \cdot (d_{out} - d_{in})} \quad (4)$$

式(4)中, W 表示水分蒸发速率(kg 水/s); ρ_{air} 为空气密度(kg/m³), d_{in} 与 d_{out} 是进入及离开设备的空气含湿量(kg 水/kg 干空气)。这样做的目的是使排风机的设计有依据, 可以有效地保持设备中的湿度分布差, 进而得到合适的干化推动力。

3 污泥干化设备运行性能影响因素分析

3.1 污泥特性对干化效果的影响

污泥的物理性质, 如含水率、颗粒结构和有机物含量, 会影响干化效率。城市污水处理厂污泥初始含水率为 75% ~ 85%, 工业污泥为 60% ~ 80%。含水率越高, 蒸发所需热量越多, 约为 2 250 ~ 2 600 kJ/kg 水。颗粒大小影响干燥性能, 2 ~ 10 mm 颗粒有利于蒸发, 过小则易团聚。有机物含量为 40% ~ 60%, 高温下易挥发产生气体, 需控制温度、风速和搅拌速度确保稳定运行^[4]。从性能分析角度, 干化速率 DR (kg 水/m²·s)

是评价设备性能的关键动态指标,其受污泥特性和操作条件的综合影响可表示为:

$$DR=k_y \cdot (Y_s - Y_g) \quad (5)$$

式(5)中, k_y 为传质系数,是气流速度、温度及污泥物性的函数; Y_s 为污泥表面温度对应的饱和湿含量; Y_g 为气流主体的湿含量。该公式揭示了提高干化速率的途径:增大传质系数(提高风速、加强搅拌等)或增大传质推动力($Y_s - Y_g$) (提高污泥温度、降低环境湿度)。

3.2 温度与气流参数的影响

干化温度影响水分蒸发速度,污泥干化装置的操作温度通常在 90 ~ 180 °C 之间。温度在 120 ~ 150 °C 时,蒸发效果和能源消耗平衡。温度过低减慢蒸发,过高则造成热量流失和设备老化。气体流动对水蒸气散发也有重要作用,风速一般在 1.5 ~ 4.0 m/s 之间,风速过小带不走水蒸气,过大会增加耗电量并散失热量。合理调节温度和风速可使每千克水蒸发能量控制在 2 800 ~ 3 300 kJ/kg,提升能源使用率。气流参数与温度共同决定了系统的热效率 η_{th} ,其定义为蒸发水分所需理论热量与实际输入总热量之比:

$$\eta_{th} = \frac{W_r}{Q_{input}} \times 100\% \quad (6)$$

通过在线监测 W 和 Q_{input} ,可以实时计算热效率,并据此调整运行参数,实现“性能优化”。例如:若发现热效率下降,可能意味着热损失增加或传热效率降低,需检查保温或清理换热面。

3.3 设备运行与控制参数的影响

设备运行参数影响污泥受热均匀性和干燥时间。搅拌装置转速为 5 ~ 20 r/min,适当提高可加快翻动促进传热,但过高加剧磨损。污泥滞留时间 30 ~ 90 分钟,过短含水量不达标,过长降低效率。物料层厚度 20 ~ 60 mm,过厚阻碍水分传递,过薄影响效率。通过调节转速、滞留时间和物料层厚度可改善工作状态。停留时间 τ 与有效长度 L 和输送速度 v 相关: $\tau = L/v$; 连续式干化机可根据 $\tau_{required}$ 反算有效长度 $L = v \cdot \tau_{required}$,为设备尺寸设计核心。

4 污泥干化设备的性能优化与节能技术

4.1 传热效率优化技术

提高污泥干化传热可节能增产,常通过增加换热面积或改变换热方式实现。例如:使用多级换热器、中空桨叶或加强换热管束,将换热面积由 30 ~ 60 m² 增至 80 ~ 150 m²。合理设计导流板和搅拌装置可保持污泥层厚度在 20 ~ 40 mm,降低热阻。强化换热管材

质为不锈钢或合金钢,导热率 15 ~ 25 W/m·K,系统传热系数可达 150 ~ 300 W/(m²·K),提升干燥速度并降低能耗。优化效果可通过总传热系数 U 和单位能耗 SEC 量化。例如:增加扰流装置可将 U 从 200 W/(m²·K) 提升至 250 W/(m²·K),在相同热负荷 Q 和对数平均温差 ΔT_{lm} 下,换热面积 A 可减少 20%,降低投资成本。根据公式 $Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$,提高 U 可提升 Q ,从而增加产能。

4.2 热能回收与节能技术

污泥干化废气温度一般为 80 ~ 120 °C,其中能量可通过余热回收利用于预热空气或污泥。常用设备包括板式、管壳式换热器及热泵,板式换热效率可达 70% ~ 85%。在常规干化中,每蒸发 1 kg 水需热量约 2 800 ~ 3 200 kJ,利用余热可节省约 15% ~ 25% 能量^[5]。

4.3 智能化控制与运行优化

现代污泥干化设备配备多种传感器监测温湿度、压力等,温度量程 0 ~ 300 °C,精度 ± 0.5 °C,湿度精度 $\pm 2\%$ RH,传感器每 1 ~ 5 s 采样反馈主机控制。PLC 或工控机根据实际情况调节风机转速、蒸汽供给量及物料输送速率,实现无人化操作。例如:出料口湿度过大,系统立即增加加热或延长干燥时间,使最终产品含水率 20% ~ 30%,提高效率并保证过程稳定可靠。

5 结束语

污泥干化设备是实现污泥减量化和资源化的重要手段。通过研究不同设备类型及运行因素,结合传热学、流体力学和热力学,对换热面积、输送功率、排风量等参数量化设计,并采用传热强化、余热回收及智能化控制,可显著提高传热效率、降低能耗。适当调节温度、风速和物料滞留时间,有利于改善操作条件和产率。随着节能与自动控制技术发展,污泥干化设备在污泥处理和环境保护中的作用日益突出。

参考文献:

- [1] 林秋明.广州市健康城净水厂污泥干化工程设计[J].中国市政工程,2024(06):68-72,161.
- [2] 林静.高温污水源热泵在市政污泥干化系统中的应用[J].净水技术,2024,43(11):108-115.
- [3] 刘庄泉.青浦污泥干化焚烧项目设计运行分析[J].净水技术,2024,43(S2):192-200.
- [4] 曾喜莉,童国斌,王钊.市政污泥干化过程臭气分质收集处理的工程实例[J].广东化工,2024,51(20):141-143,130.
- [5] 任彦鹏,胡鑫,刘阔,等.污泥热泵低温干化技术的应用前景分析[J].煤炭与化工,2024,47(07):152-156.