

低温真空脱水干化技术在污泥脱水中的应用

文 / 程 昶 大洲设计咨询集团有限公司第一分公司

摘要：随着国家经济的飞速发展和技术水平的显著提高，我国在环境保护与资源回收方面取得了令人瞩目的成就。特别是在污泥处理这一领域，人们已经意识到仅仅依靠传统的卫生填埋方式来处理日益增长的污泥问题，不仅效率低下，而且对环境造成极大的压力和污染。因此，污泥的干化、焚烧以及资源化利用成了行业内追求可持续发展的重要方向。低温真空脱水干化技术巧妙地运用了水沸点随压强减小而降低的特点，通过对压滤机腔室抽真空，使得污泥中水分加快汽化，从而实现污泥脱水干化。某工业园污水处理厂便是采用了该技术的典型案例之一，通过采用低温真空脱水干化成套设备，该厂成功地在一套设备内部实现了污泥干化的目的，并且出泥含水率控制在40%内。

关键词：污泥；低温真空；脱水干化；成套技术；含水率

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.10.110

引言

过去国内的城镇污水处理厂在处理污泥的技术手段上相对较为落后。大多数情况下，采用的是带式压滤机或离心脱水机来实现污泥的脱水。在经历处理后，通常情况下，污泥的含水率大约80%，污泥往往被当作生活垃圾与其他类型的废弃物一起混合，进行土地填埋工作。然而，自2009年以来，随着《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》（GB/T23485-2009）的颁布和实施，对污泥处置的要求发生了变化。这项新规定明确指出，将污泥与生活垃圾混合用于填埋的做法需要调整。根据这一标准，污泥必须保持较低的含水率即低于60%。

在众多的升级改造方案中，采用板框压滤机成了较为普遍采用的方法之一。尽管这一方案能够有效地将污泥含水率降至60%，但需要消耗大量的无机药剂，显然不是一种可持续的解决方案。

国家发改委、住建部、生态环境部联合颁布的《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》指出，有序推进污泥焚烧处理。含重金属和难以生化降解的有毒有害有机物的污泥，应优先采用集中或协同焚烧方式处理。污泥单独焚烧时，鼓励采用干化和焚烧联用，通过优化设计，采用高效节能设备和余热利用技术等手段，提高污泥热能利用效率。某污水处理厂就是一个典型案例。该厂所处地区的污水主要以工业废水为主，因此污泥的土地利用存在较大风险。为了解决这一问题并确保污泥得到妥善处理，该厂经过充分调研和比较，最终决定采用低温真空脱水干化成套技术进行污泥处理，将污泥在厂内进行脱水干化，为后续协同焚烧创造条件。

一、低温真空脱水干化成套技术概述

（一）技术原理

低温真空脱水干化成套技术是一项集高效、环保与经济于一体的先进技术，利用环境压强对水沸点影响的原理，实现对污泥进行快速而彻底的干化处理。该技术核心在于真空系统的运作，通过不断地降低腔室内的气压，使得污泥中蕴含的水分得以迅速蒸发，在温度达到约50℃时，水分开始沸腾并汽化，将水分从黏稠的污泥基质中有效分离出来^[1]。

（二）系统组成

低温真空脱水干化成套技术，作为一种高效的废物处理手段，其设备系统由九大子系统构成，首先是主机系统，是脱水设备的核心，由机架、过滤机构等组成，是污泥压榨脱水场所；接着是污泥调质系统，通过投加絮凝药剂，改善污泥脱水性能、提高后续处理效率；然后进料系统根据预设参数自动调节进入设备的污泥量，保证充足的原料供应；压滤系统则在真空条件下对物料进行有效的压缩和过滤，去除多余水分；空压系统为污泥吹脱和气动阀门提供气源；加热系统则负责将物料加热至适宜的温度，促进脱水过程；真空系统将真空泵抽吸出来的汽水混合物进行冷却；最后，控制系统集成所有子系统的控制功能，通过自动化管理确保整个过程的精确和稳定运行。

低温真空脱水干化成套设备系统组成见图1。

（三）工艺过程

含水率达97%至98%的浓缩污泥首先进入污泥调质池，投加絮凝剂后进行调理后，采用进料螺杆泵将污泥输送到低温真空脱水干化成套设备的密封腔室内。进料泵以恒定的压力推动污泥，使得大部分分离水分得以迅速挤压出来。随着进料操作的完成，压滤水泵的启动开始发挥作用。在高压的推动下，泥饼中水分从腔室内被挤出，这一步骤破坏了污泥颗粒之间形成的所谓“拱桥”，从而使滤饼变得更为紧密结实。同时，残留于污泥颗粒间缝隙中的水分也被挤出体外，这样做不仅降低了滤饼的水分含量，还提高了脱水效率。

随着压榨过程的结束，接下来开始低温真空脱水干化系统的核心环节即加热与真空。热水或蒸汽输送至加热板与隔膜板之间，对腔室内的污泥进行加热处理。与此同时，真空泵的开启则确保了整个腔室内部产生负压，这一负压状态能够降低水的沸点。在污泥中，多余的水分在高温蒸汽的作用下沸腾并汽化，最终被真空泵抽出。汽水混合物经过冷凝器，汽水得以分离，实现对液态水的定期排放，而尾气，在经过净化和处理程序之后，安全排出，确保整个过程的环保和可持续性。

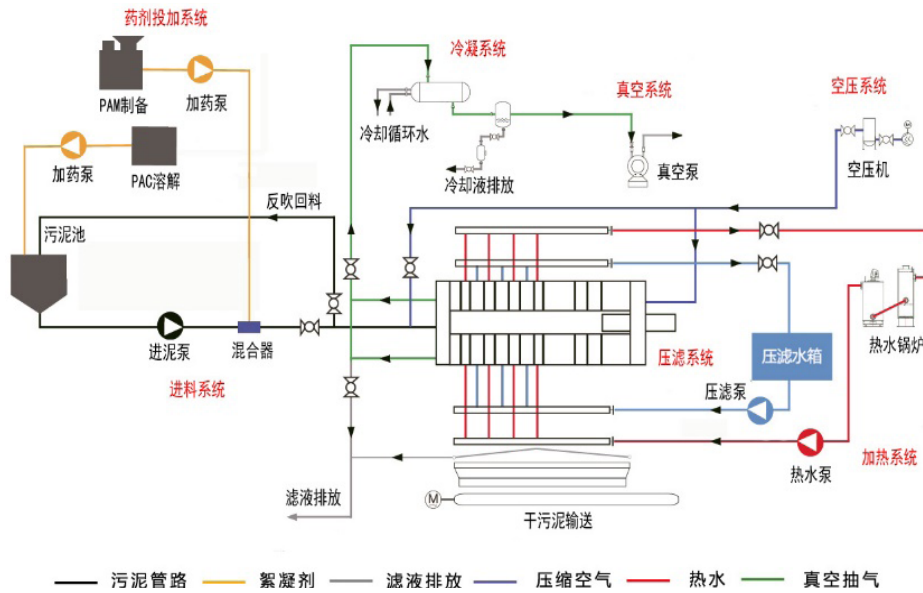


图1 - 低温真空脱水干化成套设备系统组成

经过多个复杂的处理步骤后，污泥的含水率降至40%以下，大幅度减少了污泥量。这一结果不仅符合环保要求，更是满足了减量化的目标，即尽可能地减少污泥数量，降低环境负担。整个脱水干化过程的持续时间一般在4.0到4.5小时之间，具体时间取决于设备的设计和运行条件^[2]。

二、工程应用

(一) 工程概况

某工业园污水处理厂设计处理规模为1.0万m³/d，采用预处理+二级生化处理+深度处理工艺，污水厂出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中的一级A标准。污泥处理采用重力浓缩+低温真空脱水干化成套设备，经脱水处理后，污泥含水率降至40%以下，随后运送至附近海螺水泥池进行协同焚烧，实现资源回收和能源利用。污泥处理及处置工艺流程详见图2。

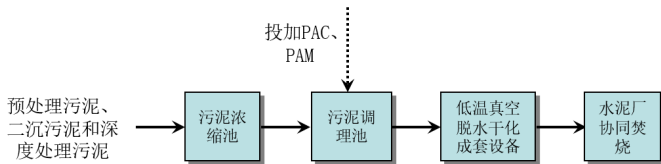


图2 - 污水处理工艺流程图

(二) 主要处理设备及设计参数

1. 污泥设计处理量

本工程的污泥主要包括两个部分：沉淀池中产生的化学污泥和二沉池中生成的活性污泥。经过的计算与分析，得出每天大约2100kg的干污泥产量，这些污泥的含水率分布在99.2%至99.4%之间^[3]。

2. 污泥浓缩池

预处理污泥、二沉污泥和深度处理污泥同时进入污泥浓缩池，污泥浓缩池采用重力式结构设计，能够以高达18.58kg/m²·d的固体负荷处理污泥，池体直径达到

12.0m，同时池内安装一台悬挂式中心传动浓缩机。

3. 污泥调质系统

污泥调质池的设计旨在满足高效、精准的物料处理需求。本工程设置两座有效容积为55m³的污泥调质池。每个池子内部都配备有一台立式搅拌机，其功率高达7.5kW，确保搅拌过程中的动力强劲与稳定性。在污泥调质过程中，采用两种关键药剂，即PAC和PAM。对于PAC来说，设计最大投加量为5%DS，对于PAM，其设计最大投加量为0.3%DS。

4. 低温真空脱水干化成套设备系统

(1) 主机系统

主机系统，即带加热系统的板框压滤机，其过滤面积采取板框压滤机计算公式，如下^[4]：

$$A = \frac{Q_s}{q \cdot t} \text{ (m}^2\text{)}$$

式中：A——压滤脱水面积，m²

Q_s——每次脱水的污泥量（进泥量），m³

q——压滤脱水负荷，m³/m²·h

t——每次脱水时间，h

在深入研究和实践压滤脱水过程时，将其脱水负荷定为0.035m³/m²·h。为了确保系统的稳定运行和效率，设定每天4个工作周期的工作模式，每个工作周期大约持续4小时。据此推算，需要的压滤面积应该是178m²，因此，选用一台200m²具备加热装置的板框压滤机。

(2) 进料系统

进料泵进料过程是通过变频技术实现的。随着压力的逐渐增加，进料量会相应减少。这种机制能够保证在不影响物料质量的前提下，持续优化材料的流动性。当达到预设的进料压力上限时，进料泵将停止运作，此时物料已经完成输送任务。在本工程的设计中，设计进料时间定为1小时，以满足连续稳定的供应需求。同时，为了应对可能出现的压力，系统预设最高压力位为

0.9MPa, 这一设定有助于保障设备的安全运行。此外, 进料螺杆泵最大流量设计为 35m³/h, 功率为 22kW。

(3) 压滤系统

随着进料结束, 即将进入压滤阶段。在本工程中, 为了确保处理效率与效果的最大化, 设定压滤时间为 1.5h, 压滤水泵设计流量达到 25m³/h, 同时配备有 1.2MPa 的压力, 功率为 15kW。

(4) 空压系统

在污水处理的工业流程中, 空气压缩系统扮演着至关重要的角色。该系统所提供的压缩空气, 不仅用于实现污泥吹脱工序的高效运作, 而且还为气动阀门等关键设备提供了必要的气源。在本工程中, 设定吹脱风量为 2m³/min, 压力范围为 0.8-1.0MPa。基于此, 选择空压机。为了存储吹脱空气和气动阀空气, 设置两个空气储罐, 其中一个容积为 4m³ 的吹脱空气储罐, 另一个容积为 3m³ 的气动阀空气储罐。此外, 还有一台冷干机用于干燥这些压缩空气, 以防止因湿气过多而导致的设备损坏或性能下降。

(5) 加热系统

加热系统的核心部分包括锅炉和热水泵等, 天然气作为燃料, 不仅提供了必要的热量来源, 而且还确保了操作的高效与环保。热水温度控制在 90℃ 范围内, 这是确保滤饼均匀受热, 以达到最佳干燥效果。为了实现最佳的干燥效率, 热干化阶段的设计时间设定为 1.5h。此外, 为了维持系统的稳定性和安全性, 系统真空压力设定为 15kpa, 锅炉的设计裕度系数为 1.2。此外, 为了确保设备的可靠性和效率, 选用 30 万 kcal/h 的燃气热水锅炉作为主要的热来源。热水泵作为循环泵的角色, 负责将热水从加热容器中抽送至需要加热的区域, 以确保整个系统的顺畅运作。其设计流量被定在 120-140m³/h, 并且具有 25m 的设计扬程, 电机的功率为 15kW。

(6) 真空系统

真空系统设计用于提供标准的真空压力环境, 即 15kpa, 真空泵流量为 23m³/min, 功率为 37kW。

(7) 冷凝系统

在冷凝系统中, 冷凝器扮演着至关重要的角色, 不仅负责将热量从制冷剂中释放出来以降低系统温度, 而且还起到了防止过冷液体结冰的作用。因此, 选择合适的换热面积是设计高效冷凝系统的第一步。在本工程中, 冷凝器换热面积选择 60m², 此外, 为了保证系统的稳定性和可靠性, 冷却水循环泵的流量选为 50m³/h。缓冲罐的选择则基于其容量和潜在的热交换能力, 采用 0.8m³ 的缓冲罐, 冷凝液储罐的容积为 0.50m³。

(8) 控制系统

在控制系统的设计中, 采用将电气设备的控制接线集中管理的策略, 这样做的好处是可以减少现场的布线工作量, 同时也便于日后的维护和检修工作。具体来说, 部分电气设备如电动机、变压器等的控制接线设计在动力配电柜内, 这样一来, 一旦发生故障或需要进行维修, 技术人员只需打开对应的配电柜, 就能迅速找到并修复问题。与此同时, 考虑到设备种类繁多, 为了进一步提

高操作的灵活性和便捷性, 一些单体设备如烘干机、蒸发器则在现场设立独立的控制箱。这样的设计既保证了每一台设备的独立性, 又能确保它们能够与主控制柜之间无缝连接, 共同为整个系统的正常运行提供支持。

三、运行成本分析

本工程所涉及的低温真空脱水干化成套设备, 在其日常运作过程中需消耗大量水资源来维持设备正常运行, 包括但不限于循环水、电力、药剂、天然气资源等。基于上述基础计算, 以 2000kgDS/d 的处理规模进行计算, 那么该成套设备的日常运行成本将会相当可观。详细的运行成本数据可参考表 1。

表 1- 运行成本表

种类	每日消耗量	单价	成本(元/天)
水	10t	1.3 元 /t	13
电	560kwh	0.8522 元 /kwh	477
PAC	100.0kg (按 5% 计)	2 元 /kg	200
PAM	6.0kg (按 3% 计)	30 元 /kg	180
天然气	288Nm ³	3 元 /Nm ³	864
总成本			1734

说明:

(1) 根据本项目的设计规划, 在近期内确保脱水干化出泥的含水率控制在 60% 以下, 以满足项目的基本要求和环保标准。同时, 具备出泥含水率 40% 的能力。因此, 在核算成本时, 所使用的数据将严格限定在 40% 的出泥含水率范围内。

(2) 在对污泥处理过程进行成本核算时, 成本主要为日处理 2000kgDS/d 污泥的全部费用。根据当前行业内普遍接受的做法, 若含水率为 80% 的污泥需进行脱水干化处理, 那么这一处理步骤所产生的成本大约是 173.4 元 / 吨。

(3) 在成本分析中, 天然气的比重相对较高, 若能引进效率更低但价格更为经济实惠的燃料来源, 比如低品位能源, 那么运营成本将有望大幅降低。

结语

综上所述, 污泥低温真空脱水干化成套技术具有显著的优势和广阔的应用前景。在设计过程中, 应充分考虑技术原理、特点和要求, 优化各个环节的设计, 以实现高效、稳定、经济的运行。同时, 结合实际应用案例不断总结经验, 推动该技术的进一步发展和完善。

参考文献

- [1] 李春江, 江顺启, 陈莉佳, 等. 低温真空脱水干化成套技术装备在中小型城镇污水厂污泥脱水干化中的应用 [J]. 净水技术, 2019, 38(S1): 160-162+203.
- [2] 张宇. 低温真空脱水干化技术在大型地埋式污水厂中的应用 [J]. 天津建设科技, 2021, 31(04): 61-63.
- [3] 许大明, 曲献伟, 李春江. 污泥低温真空脱水干化一体化技术装备在大型浅埋式地下污水处理厂的应用与评价 [J]. 中国市政工程, 2020, (04): 44-46+50+102.
- [4] 许余亮. 用于低温真空脱水干化成套设备的污泥进料螺杆泵优化设计 [J]. 城市道桥与防洪, 2019, (03): 121-123+16.