

磁热干化隔膜压滤一体化技术应用于市政污泥脱水干化的工程实践

吴 威, 曹儒耀, 吕志辉, 邬锦威, 李达文, 袁增立
(第一环保(深圳)股份有限公司, 深圳 518047)

摘 要: 剩余污泥的妥善处理成为城市污水厂持续稳定运行的重要保障, 污泥减量是城市污水处理系统提升运行效能的一个重要方面。因此, 开发适合我国污泥泥质特征的污泥处理处置与资源化技术意义重大。磁热干化隔膜压滤一体化技术将电磁加热、板框压滤、真空强化耦合能够在—个处理过程将市政污泥含水率从 98% 直接降至 40%。以南方污水处理厂为例, 处理污泥 35 t/d (折算到 80% 含水率) 的应用实践结果表明, 磁热干化隔膜压滤一体化技术系统简单可靠, 占地面积小; 无需二段式热干化, 减少设备投资。相较于采用普通板框压滤机处理污泥, 污水处理厂污泥项目运营节约 81.6 万元/年, 而且解决了污泥出路问题, 从节能环保角度实现经济效益和环境效益的双赢。

关键词: 市政污泥; 脱水干化; 板框压滤; 电磁加热; 真空强化; 应用实践

中图分类号: X52

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202307030

Engineering application of integrated magnetic thermal drying and membrane pressure filtration technology in municipal sludge dehydration and drying

WU Wei, CAO Ruyao, LYU Zhihui, WU Jinwei, LI Dawen, YUAN Zengli
(First Environmental Protection (Shenzhen) Co., LTD., Shenzhen 518047, China)

Abstract: Proper treatment of residual sludge the guarantee for sustainable and stable operation of urban sewage plants, and sludge reduction is an important aspect of improving the operation efficiency of urban sewage treatment systems. Developing sludge treatment and recycling technology suitable for sludge characteristics in China is essential. The integrated technology of magnetic thermal drying diaphragm filtration can reduce the moisture content of municipal sludge directly from 98% to 40% in one treatment process by electromagnetic heating, plate and frame filtration, and vacuum strengthening coupling. Taking a sewage plant in South China as an example, the application results of treating sludge 35t/d (80% moisture content) showed that the magnetic thermal drying membrane filtration integrated technology system was reliable, and occupied a small area. Two-stage heat drying was not required, resulting in reduced equipment investment. Compared with the use of ordinary plate and frame filter press to treat sludge, the operation of the sewage plant sludge project saved 816,000 yuan/year, solved the problem of sludge outlet, and realized a win-win situation of economic and environmental benefits from the perspective of energy conservation and environmental protection.

Keywords: municipal sludge; dehydration and drying; plate and frame press filtration; electromagnetic heating; vacuum strengthening; application practice

CLC number: X52

活性污泥法是目前城市污水处理的主流工艺, 剩余污泥是活性污泥法处理污水的产物之一。剩余污泥中含有大量的水分、挥发性物质、病原体、寄生虫卵、重金属、盐类及某些难分解的有机物, 体积庞大, 易腐化发臭。近 20 年来, 我国污水处理

厂建设速度和覆盖率显著提高, 剩余污泥产量随着城市污水处理厂的兴建和投入使用而逐年增加。2021 年年末, 污水处理厂处理能力为 2.1 亿 m³/d^[1], 按此估算产生湿污泥量约为 20 万 t/d, 到 2025 年, 全国新增污泥(含水率 80% 的湿污泥)无害化处置

收稿日期: 2023-04-14

基金项目: 深圳市科技计划技术攻关面上项目(JSGG20210802152541011); 深圳市可持续发展科技专项(双碳专项)(KCXST20221021111406014)

作者简介: 吴 威(1977—), 硕士、工程师。研究方向: 固废污染控制。E-mail: 13828800781@139.com

通信作者: 曹儒耀(1987—), 工程师。研究方向: 固废污染控制。E-mail: caoruyao@dyhb.cn

引用格式: 吴 威, 曹儒耀, 吕志辉, 等. 磁热干化隔膜压滤一体化技术应用于市政污泥脱水干化的工程实践[J]. 环境保护科学, 2023, 49(4): 21-25.

设施规模不少于 2 万 t/d, 城市污泥无害化处置率达到 90% 以上, 地级及以上城市达到 95% 以上^[2-3]。剩余污泥的妥善处理成为城市污水厂持续稳定运行的重要保障, 污泥减量也是城市污水处理系统提升运行效能的一个重要方面。

协同焚烧处理因其效率高、减量率高, 是我国目前污泥处理处置的主流技术。协同焚烧需先对污泥进行干化预处理, 降低含水率, 提升热值。机械脱水和热干化是我国污泥干化的主要技术选择, 通过污泥脱水和其后的热介质加热, 脱除污泥中水分并进一步干化。目前, 工程应用较多的市政污泥脱水及干化处理的方式为板框压滤和热泵干化, 形成板框压滤+热泵干化+外运协同焚烧的技术路线。该技术路线经两步处理可以较好地实现市政污泥的脱水和干化, 但由于设备结构和工作原理的限制, 存在占地面积较大, 能量利用效率需要进一步提高的局限。因应这一技术需求, 我们将电磁加热、板框压滤、真空强化耦合, 开发了“磁热干化隔膜压滤一体化技术”, 并开展了应用实践。

1 技术原理和工艺流程

1.1 技术原理

磁热干化隔膜压滤一体化技术的基本原理是将电磁加热与板框压滤结合, 并辅以真空强化, 可以一步实现污泥脱水和干化^[4], 提升污泥干化效率。电磁加热的原理是利用电磁感应将电能转换成热能, 实现加热。电磁加热需要在高频交变电作用下, 高频电流流过线圈产生高速变化的交变磁场, 磁力线作用在导磁性材料上使其表面产生无数小的电磁涡流, 通过电磁涡流碰撞使材料表面本身高速发热, 从而达到加热的目的, 故也称电磁涡流加热^[5], 见图 1。本项目研究团队完成了电磁涡流加热线圈布置在高分子复合材料中并压铸封装成型生产电磁加热滤板的研发, 形成了型号化产品, 见图 2。左图为上进料 1500 型电磁加热滤板, 外形尺寸 1 650 mm×1 500 mm×80 mm, 过滤面积 3.72 m², 发热功率 4.8 kW; 右图为中进料 1250 型电磁加热滤板, 外形尺寸 1 250 mm×1 250 mm×75 mm, 过滤面积 2.65 m², 发热功率 3.5 kW。将电磁加热滤板替换到板框压滤机中, 即可实现电磁加热与板框压滤的结合。在电磁涡流加热污泥的同时对压滤室抽真空, 控制真空度在 -80 ~ -90 kPa 区间, 水的沸

点只有 60° ~ 40°, 促进污泥滤饼中毛细水、内部结合水^[6]以汽水混合物方式进一步排出, 达到强化脱水和干化的目的。在加热过程中, 通过传感器反馈, 同时采用 4 ~ 20 mA 模拟量控制与外部信号控制与 PLC 对接; 通过操作盘控制监视数据, 控制频率、电流、磁场及滤室真空度从而控制型腔内温度最终达到污泥脱水和干化的要求。

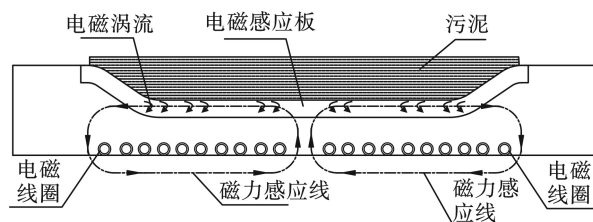


图 1 电磁加热原理图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic heating



1250 加热滤板图

1500 加热滤板图

图 2 加热滤板产品

Fig. 2 Heating filter plate products

1.2 工艺流程

磁热干化隔膜压滤一体化技术的工艺过程主要分为污泥进料、隔膜压滤、吹气穿流和真空辅助磁热干化 4 个阶段。(1)污泥进料: 污泥经调理后, 难祛除的结合水充分释放为自由水, 随后通过进料泵进入密封滤室, 利用泵压使大量自由水通过滤布排出, 直至污泥充满滤室。(2)隔膜压滤阶段: 通过高压水产生的压榨力, 使滤饼压滤, 将残留在污泥颗粒间的自由水挤出, 最大限度地降低滤饼水分。(3)吹气穿流阶段: 利用压缩空气强气流吹扫进行穿流置换, 进一步驱除滤饼中的自由水。(4)真空辅助磁热干化阶段: 磁热板通电后, 加热腔室内的滤饼, 同时开启真空系统, 使腔室内形成负压, 在真空环境的作用下, 滤饼中难祛除的结合水不断汽化沸腾^[7]排出, 经过冷凝器实现汽水分离, 液态水排至污水处理系统, 尾气经净化处理后达标排放。真空辅助磁热干化是该技术的重要创新点, 也是显著降低污泥含水率重要阶段, 毛细水、表面吸附水、

内部结合水在这一阶段得到明显脱除。我们的实践表明磁热干化隔膜压滤一体化技术可将污泥含水率从 98% 降至 40%，其不同工艺阶段降低污泥含水率的进程，见图 3。

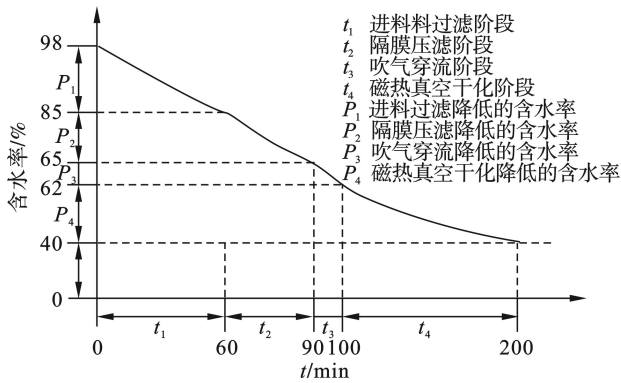


图 3 不同工艺阶段降低污泥含水率的进程
Fig. 3 The process of reducing sludge moisture content in different process stages

2 应用案例分析

2.1 案例简介

南方某城市市政污水处理站，设计处理规模 5 万 t/d，最大处理水量 6.5 万 t/d，污水站执行《城镇

污水处理厂污染物排放标准：GB 18918—2002》一级 A 标准。污泥脱水间，原设计采用 2 台套离心机进行剩余污泥减量处理，污水站污泥特性等，见表 1。

表 1 污水站污泥特性			
Table 1 Sludge characteristics of sewage station			
污泥类型	含水率/%	有机质（占干基比例）/%	状态
浓缩机出泥	96 ~ 98	45 ~ 55	流态
离心出泥	78 ~ 82		塑态

由于离心机处理后污泥运输过程中容易抛洒滴漏，污泥处置单位接收意愿低，给污水处理厂正常运行带来很大压力，并根据当地的环保要求，剩余污泥如运往电厂掺烧发电需达到污泥脱水后含水率 $\leq 40\%$ 。结合现场情况，预选了市场上主要工艺路线进行对比，见表 2。综合考虑，该项目污泥处理采用“浓缩+磁热干化隔膜压滤一体化技术”的技术路线，设计处理污水站每天产生约 35 t (80% 含水率) 污泥，处理后出泥含水率 $\leq 40\%$ 。项目于 2021 年 11 月投入运营，实现了污泥减量化、稳定化和无害化。处理后污泥运往电厂掺烧发电，实现了污泥无害化处置。

表 2 污泥减量处理主要工艺路线对比								
Table 2 Comparison of main process routes of sludge reduction treatment								
工艺	进泥要求 含水/%	处理后出泥 含水/%	处理后污 泥状态	设备占 地面积	设备投资/ 万元·t ⁻¹	臭气量	粉尘	污泥处 置难度
普通板框压滤机脱水	95 ~ 98	65	块状	较小	10	较小	较小	需二次处理；难
离心机脱水+二次干化	95 ~ 98	40	粉状	较大	25	较大	较大	电厂接收；易
磁热干化隔膜压滤干化	95 ~ 98	40	颗粒状	一般	15	较小	较小	电厂接收；易

2.2 实际工艺和主要设计参数

实施过程中，采用两台 FST-1250/200 型号磁

热干化隔膜压滤设备及配套系统。设计参数，见表 3，配套设备参数，见表 4，系统工艺流程，见图 4。

表 3 项目主要设计参数											
Table 3 Main design parameters of the project											
污泥处理量	1个批次运行 时间/min	进泥含 水率/%	剩余污 泥量/t·d ⁻¹	剩余污泥 含水率/%	占地 /m ²	处理工艺	控制系统	电源/V	装机 功率/kW	运行 功率/kW	运行方式
35 t·d ⁻¹ (按80%含水率 计算)	200	95 ~ 98	≤11.6	≤40	265	浓缩+磁热 干化隔膜压 滤一体化 技术	触摸屏+ PLC可 编程控 制器+ 上位机	380	<300	<200	2条独立生产线， 序批式，24 h·d ⁻¹

2.3 运行条件优化

磁热干化隔膜压滤一体化技术在项目运营过程中根据现场工况做了运行条件的优化。(1)在管

道输送过程中添加 PAM 药剂，加快污泥颗粒浓缩沉淀^[9]，并且连续运行。(2)采用高低压泵进料，压滤机空腔采用低压快速进料填充滤腔，达到一定压

力后低压泵效率降低,切换至高压泵进料即进一步填充滤腔,同时施加压力加快污泥过滤脱水。(3)滤布边框增加密封条,加大板框之间密封,在加热真空过程中保持滤腔真空度,减低泥饼加热稳定,加

快泥饼水分排出。(4)在滤腔内设置温度传感器、真空管道上设置负压传感器,监控内部温度及滤腔真空度,利用 PLC 控制电磁控制器与真空泵匹配运行,节约了污泥干化所消耗电能。

表 4 污泥处理项目主要配套设备

Table 4 The main supporting equipments of sludge treatment project

设备名称	规格参数	单位	数量
反洗泵	$Q=14\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, $H=60\text{ m}$, $N=7.5\text{ kW}$	台	1
调理罐	有效容积 30 m^3 , PE, 搅拌器SUS304, 5.5 kW	台	2
调理剂加药箱	搅拌机碳钢衬塑, 叶轮直径 500 mm , 功率 1.5 kW	台	2
调理剂加药泵	额定流量 $1\,200\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, 最大压力 0.35 MPa , 0.75 kW	台	1
高压进料泵	流量 $30\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 扬程 120 m , 功率 15 kW	个	2
磁热干化隔膜压滤设备	FST-1250/200型, 滤板尺寸 $1\,250\text{ mm}\times 1\,250\text{ mm}$, 过滤面积 200 m^2 , $N=11\text{ kW}$	套	2
真空泵	$Q=2.0\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, -93 kPa , $N=22\text{ kW}$	台	1
空压机	$Q=2\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, $N=15\text{ kW}$, $P=0.8\text{ MPa}$	台	1
冷干机	$Q=20\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, $N=0.5\text{ kW}$	个	1
储气罐	$V=2\text{ m}^3$, 1.0 MPa	个	2
空压机	$Q=1\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, $N=15\text{ kW}$, $P=1.6\text{ MPa}$	台	1
储气罐	$V=1\text{ m}^3$, 1.6 MPa	个	1
真空罐	$V=1\text{ m}^3$	台	1
电磁控制系统及电控系统	$Q=200\text{ kW}$	套	1

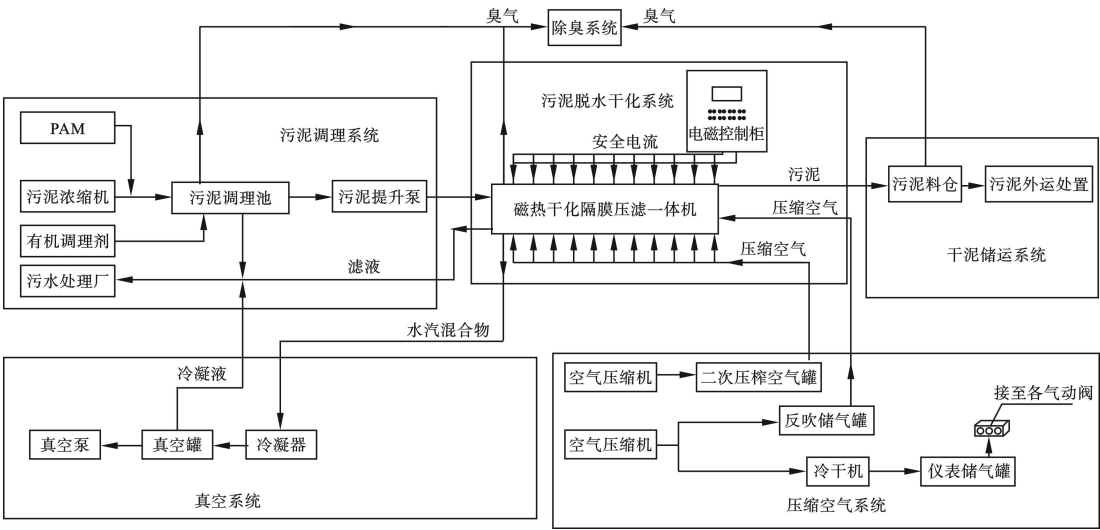


图 4 工艺流程

Fig. 4 Process flow chart

2.4 系统运行分析

在运行的项目上,与传统直接板框压滤脱水、热干化等工艺技术相比,磁热干化隔膜压滤一体化技术在占地、能耗、投资等多方面皆有显著优势。(1)污泥进料、压滤、电磁加热干化耦合融为一体,系统简单可靠,占地面积小。污泥含水率一次性从 92%~98%脱水干化至 40% 以下,体积减量超过 97%,大幅降低了运输成本。外运协同焚烧发电,实现了污泥资源化利用。(2)采用电磁涡流加热污泥和辅助真空干化耦合,直接加热泥饼,无需外来热

源。工作过程结合传感器、PLC 控制,污泥干化消耗能量是直接干化蒸发的 60%。(3)污泥脱水干化一段式完成,无需二段式热干化,减少设备投资。

2.5 费用分析

项目处理污泥 35 t/d(折算到 80% 含水率),脱水后污泥稳定在 40% 以下,运行成本费用,见表 5。

在南方区域,污泥处置费用与其含水相关,对应电厂收取处置费 40% 含水率污泥 280 元/t, 60% 含水污泥处置费用 380 元/t^[10]。基于本项目污泥脱水干化的运行费用,与同等规模的普通板框压滤机

脱水和脱水+二次干化技术路线作了对比分析,见表 6。对比分析表明,项目采用磁热干化隔膜压滤干化相比较采用普通板框压滤机处理污泥,不仅每天成本支出减少 2 235.9 元,按年 365 d 计算,污泥项目运营节约 81.6 万元,而且解决污泥出路问题,实现了污泥减量化、稳定化和无害化。

表 5 污泥处理项目的运行费用
Table 5 Operating costs of sludge treatment projects

费用名称		使用量	单价	费用/元·d ⁻¹	费用/元·t ⁻¹
有机调理药剂		1 400 kg·d ⁻¹	0.63 元·kg ⁻¹	882.00	25.20
絮凝剂		10.5 kg·d ⁻¹	26 元·kg ⁻¹	273.0	7.80
电费		4 550 kW·h·d ⁻¹	0.65 元·kW·h ⁻¹	2 957.5	84.50
自来水		10.0 t·d ⁻¹	3 元·t ⁻¹	30.0	0.86
人工		5 人	平均 8 000 元·(人·月) ⁻¹	1 333.0	38.10
日常检修维护费	滤布更换	296 块·年 ⁻¹	200 元·块 ⁻¹	179.4	5.10
	常规维护		50 000 元·块 ⁻¹	151.5	4.30
直接运行成本合计				5 806.4	165.86

注：费用按平均每天处理 35 t 含水 80% 污泥计算。

表 6 不同污泥脱水干化技术路线运行费用对比分析
Table 6 Comparative analysis of operating costs of different sludge dewatering and drying technical routes

工艺	污泥处理量 (80% 含水) / t·d ⁻¹	出泥含 水/%	剩余污泥 重量/t·d ⁻¹	运营费/ 元·t ⁻¹	运输费(按 150 km 计算)	污泥外运处置费用	支出成本/ 元·d ⁻¹
普通板框压滤机脱水	35	65	20.00	约 95.00	A×20 t·d ⁻¹ =3 600 元	20 t×300 元/t=6 000 元	12 925.0
脱水+二次干化	35	40	11.67	约 210.00	A×11.67 t·d ⁻¹ =2 100 元	11.6 t×240 元/t=2 784 元	12 234.0
磁热干化隔膜压滤干化	35	40	11.67	约 165.86	A×11.67 t·d ⁻¹ =2 100 元	11.6 t×240 元/t=2 784 元	10 689.1

注：A 为 1.2 元·(t·km)⁻¹×150 km；剩余污泥重量为脱水干化后需外运处置的干泥重量。

3 结论与展望

市政污泥的妥善处理是城市污水厂持续稳定运行的重要保障。项目以南方某市政污水处理站为例,经过项目稳定运行,验证了磁热干化隔膜压滤一体化技术在工艺配套、技术指标各方面可行,能够实现一步将污泥从 92%~98% 脱水干化至 40% 以下。有效解决污泥脱水难,无法资源化利用等环节,助推我国污泥处理领域新的技术发展。

目前,研究团队的工作集中在对已进行生产性应用的“磁热干化隔膜压滤一体化技术”进行技术迭代和升级。主要进行:(1)电磁加热隔膜压滤设备滤板和滤布的进一步优化设计和材料替代;(2)电磁加热隔膜压滤设备的自动化智能化控制技术研究;(3)现有压滤设备增加电磁加热干化功能的升级改造技术研究。力争通过污泥处理,打通污水处理最后一环——污泥无害化、减量化、资源化利用,助力“双碳”背景下的低碳用能技术发展。

参考文献

[1] 住房和城乡建设部. 2021 年中国城市建设状况公告 [EB/OL]

[2023-07-10]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/index.html>.

[2] 国家发展改革委, 住房和城乡建设部, 生态环境部. 关于印发《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》的通知_国务院部门文件[EB/OL] [2023-07-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-09/28/content_5713319.htm.

[3] 国家发展改革委, 住房和城乡建设部. 关于印发《“十四五”城镇污水处理及资源化利用发展规划》的通知 [EB/OL] [2023-07-12]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202106/t20210611_1283168.html.

[4] 李辉, 吴晓芙, 蒋龙波, 等. 城市污泥脱水干化技术进展[J]. 环境工程, 2014, 32(11): 102-107.

[5] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[6] 阮晓阳. 污泥处理处置与资源化利用途径[J]. 化学工程与装备, 2022(10): 227-228.

[7] 关晓燕, 孔繁仲, 杨景芳, 等. 去除淬火油中水分方法的研究[J]. 金属热处理, 2003(12): 50-53.

[8] 陈全喜, 付江涛. 市政污泥耦合燃煤电厂发电关键因素分析与展望[J]. 华电技术, 2021, 43(10): 50-60.

[9] 刘玉忠, 顾瑞环. 城市污水处理厂剩余污泥浓缩脱水试验研究[J]. 河南科学, 2008(4): 475-477.

[10] 黄坚. 燃煤电厂耦合污泥焚烧中干化系统的方案分析[J]. 上海节能, 2022(4): 517-522.