

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.04.022

# 低温真空脱水干化技术在深圳污泥处理中的应用

邵志刚<sup>1</sup>, 石富生<sup>2</sup>, 古凌艳<sup>3</sup>

(1. 深圳市固戍水质净化有限公司, 广东 深圳 518030; 2. 深圳市坪山区深水水环境有限公司, 广东 深圳 518030; 3. 深圳市利源水务设计咨询有限公司, 广东 深圳 518030)

**摘要:** 深圳市某大型水质净化厂首次引进污泥低温真空脱水干化技术,已运行一年有余。根据对该技术相关数据的持续监测,分析总结了该技术在出泥含水率、干化效率、滤液含固率、设备故障率及运行成本方面的特点。从运行数据分析来看,低温真空脱水干化技术具有能耗及药耗较低、污泥干化效果好、环境友好等优势,但维修成本较高。

**关键词:** 污泥干化; 水质净化厂; 低温真空脱水干化; 干化效率

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)04-0131-06

## Application of Low-temperature Vacuum Dewatering and Drying Technology in Sludge Treatment in Shenzhen

SHAO Zhi-gang<sup>1</sup>, SHI Fu-sheng<sup>2</sup>, GU Ling-yan<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Gushu Wastewater Treatment Co. Ltd., Shenzhen 518030, China; 2. Shenzhen Pingshan District Shenshui Water Environment Co. Ltd., Shenzhen 518030, China; 3. Shenzhen Liyuan Water Design & Consulting Co. Ltd., Shenzhen 518030, China)

**Abstract:** A large-scale water purification plant in Shenzhen has introduced low-temperature vacuum dewatering and drying technology and has operated for over a year. According to the continuing monitoring of the technology data, the characteristics of sludge moisture content, drying efficiency, solid content of filtrate, equipment failure rate and running cost were analyzed and summarized. From the analysis of operational data, it can be seen that the low-temperature vacuum dewatering and drying technology has the advantages of low energy and chemical consumption, good sludge drying effect, environmentally friendly and so on. However, the technology has high maintenance costs.

**Key words:** sludge drying; water purification plant; low-temperature vacuum dewatering and drying technology; drying efficiency

### 1 深圳市污泥处置情况

据统计,我国当前市政污泥产量已超过 $6\,000\times 10^4$  t/a(以污泥含水率为80%计),且每年仍以约10%的增速增加,预计2025年将超过 $8\,000\times 10^4$  t<sup>[1-2]</sup>,可见,污泥处理处置压力巨大。2022年,深圳市总计运行水质净化厂42家,污水总处理规模为

$705.9\times 10^4$  m<sup>3</sup>/d,污泥产量为 $222\times 10^4$  t(折合污泥含水率为80%),平均污泥产率系数为2.14 tDS/10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。深圳市新建水质净化厂的出泥含水率统一要求达到40%以下,可以说是对水质净化厂出泥含水率要求最为严苛的城市之一。

深圳市目前采用的污泥干化技术主要有:微波

调理+板框压榨、板框压榨+低温冷凝干化、板框压榨+圆盘干化、热水解+板框压榨、低温真空脱水干化等。

各种污泥干化技术应用比例见图1。

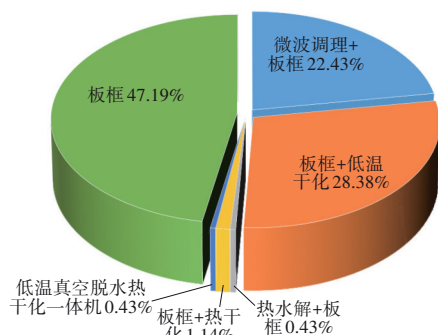


图1 污泥干化技术在深圳市的应用比例

Fig.1 Sludge drying technology applying proportion in Shenzhen

## 2 低温真空脱水干化技术应用实例

2022年,深圳某大型水质净化厂引入低温真空脱水干化技术。该水质净化厂设计规模为 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用可切换的多段AO工艺,出水各项指标

执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准IV类标准(总氮除外),出泥含水率需达到40%以下。该厂设计进、出水水质见表1。

表1 某水质净化厂设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of a WWTP  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	SS
设计进水	260	150	35	45	5	200
设计出水	≤30	≤6	≤1.5	≤10	≤0.3	≤8

污泥处理采用重力浓缩→机械浓缩→污泥调理→低温真空脱水干化→干料输送→干料仓工艺,污泥在低温真空脱水干化一体机内直接完成脱水与干化至含水率40%以下后外运至电厂/水泥厂进行无害化处置。低温真空脱水干化成套技术利用环境压强减小、水沸点降低的原理,通过真空系统将腔室内的气压降低,从而使腔室内污泥中水的沸点降低,同时通过滤板对腔室内污泥进行加热。在加热至 $50^\circ\text{C}$ 左右时,污泥中水分便会沸腾汽化,从污泥中分离出来<sup>[3]</sup>。低温真空脱水干化系统工艺流程见图2。

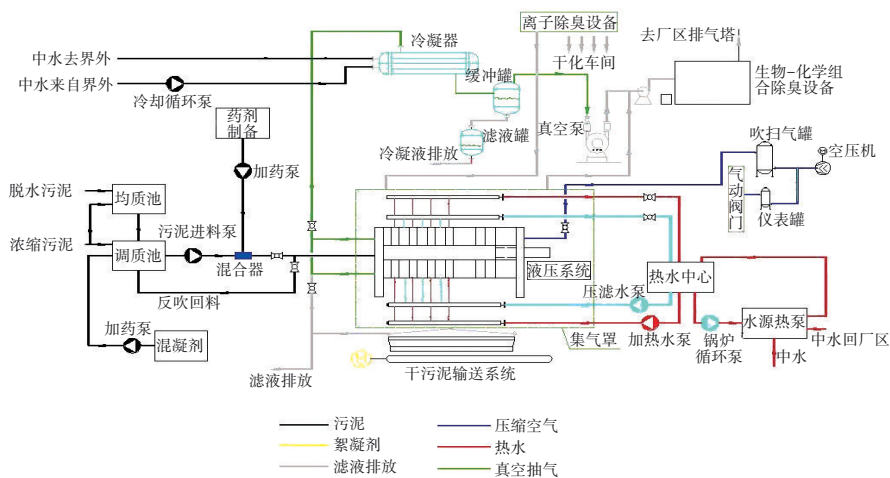


图2 低温真空脱水干化系统工艺流程

Fig.2 Process flow diagram of low-temperature vacuum dewatering and drying system

低温真空脱水干化系统在撇水池通过重力沉降方式将含水率为99.2%的原泥浓缩至含水率98.5%,然后通过转鼓浓缩机的离心浓缩作用,并加入一定量的助凝剂PAM,将含水率进一步降至97.5%。随后污泥进入污泥调理池,加入PAC调理,再进入低温真空干化机,投加PAM后加热及抽真空进行污泥干化,形成含水率40%以下的泥饼外运处置<sup>[4-7]</sup>。

## 3 低温真空脱水干化技术应用研究

### 3.1 工艺运行总体情况

该水质净化厂低温真空脱水干化系统配套设备可根据产泥量动态调整系统产能。自2022年10月正式运行以来,该低温真空脱水干化系统已稳定运行超过17个月,总处理污泥量达12 455 t/d,平均出泥含水率约37.63%。正式运行以来月均处理污泥量、进入低温真空脱水干化一体机的污泥浓度及

平均出泥含水率见图 3。

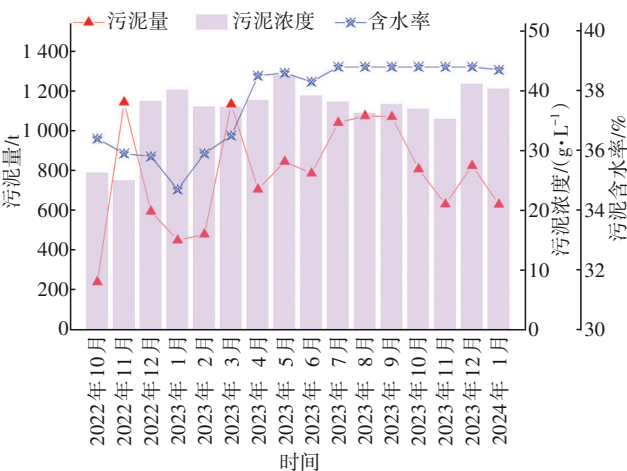


图3 低温真空脱水干化系统污泥处理量、污泥浓度及含水率统计

Fig.3 Sludge treatment capacity, MLSS and moisture content of low-temperature vacuum dewatering and drying system

随着运行时间的增加,该水质净化厂已积累了较多运行经验。自 2023 年 4 月以后,出泥含水率逐步稳定在 37% 左右,并且随进泥浓度和污泥量变化的幅度并不明显,达到了较好的生产运行状态。

污泥脱水系统设计干污泥量为 45 t/d (即含水率 40% 的污泥处理量为 75 t/d),干化主机采用低温真空脱水干化设计方案,设计采用 5 台低温真空脱水干化一体机(4 用 1 备),单台设计出泥量(污泥含水率 40%)为 18.75 t/d。该系统为批次运行,单批次运行时间约 6 h。当污泥生产需求较少时,只在夜间进行生产,以充分利用谷期低电价政策。低温真空脱水干化系统设备清单见表 2。

表2 低温真空脱水干化系统设备清单

Tab.2 Equipment list of low-temperature vacuum dewatering and drying system

项目	设备	参数	数量
污泥浓缩系统	转鼓浓缩机	$Q=100\text{ m}^3/\text{h}$	4 台
	污泥切割机	$Q=100\text{ m}^3/\text{h}, P=3.0\text{ kW}$	4 台
	浓缩机进泥泵	$Q=100\text{ m}^3/\text{h}, H=0.3\text{ MPa}, P=22\text{ kW}$	4 台
污泥调质系统	调质池搅拌机	$D1\ 727\text{ mm}, P=5.5\text{ kW}$	3 台
主机系统	低温真空脱水干化一体机	过滤面积: $800\text{ m}^2$ , $P=22\text{ kW}$	5 套
进料系统	污泥进料泵	$Q=90\text{ m}^3/\text{h}, H=1\text{ MPa}, P=37\text{ kW}$	5 台
加药系统	絮凝剂配制装置	$8\ 000\text{ L/h}$	3 台

续表 2(Continued)			
项目	设备	参数	数量
热水系统	絮凝剂加药泵	$Q=5\text{ m}^3/\text{h}, H=0.2\text{ MPa}, P=2.2\text{ kW}$	9 台
	混凝剂加药泵	$Q=6.3\text{ m}^3/\text{h}, H=200\text{ kPa}, P=1.5\text{ kW}$	2 台
	热泵	制热量 $1\ 690\text{ kW}$	3 台
	热水箱	$V=58.5\text{ m}^3$	2 套
	热水循环泵	$Q=300\text{ m}^3/\text{h}, H=160\text{ kPa}, P=18.5\text{ kW}$	3 台
真空冷却系统	加热泵	$Q=300\text{ m}^3/\text{h}, H=160\text{ kPa}, P=18.5\text{ kW}$	5 台
	压榨泵	$Q=42\text{ m}^3/\text{h}, H=1.01\text{ MPa}, P=18.5\text{ kW}$	5 台
	真空泵	$Q=51\text{ m}^3/\text{min}, H=15\text{ kPa}, P=75\text{ kW}$	5 台
	冷凝器	换热面积 $240\text{ m}^2$	5 台
	缓冲罐	$0.8\text{ m}^3$	5 台
空压系统	冷凝液储罐	$1.5\text{ m}^3$	5 台
	冷却水泵	$Q=200\text{ m}^3/\text{h}, H=350\text{ kPa}$	4 台
	螺杆式空压机	$H=1.05\text{ MPa}, Q=3.11\text{ m}^3/\text{min}, P=22\text{ kW}$	2 台
	压缩空气储罐	$12\text{ m}^3, 1.05\text{ MPa}$	2 台
	压缩空气储罐	$3\text{ m}^3, 1.05\text{ MPa}$	1 台
污泥输送系统	螺旋输送机	$20\text{ m}^3/\text{h}, P=2\times 11\text{ kW}$	5 台
	破碎螺旋	$20\text{ t/h}, P=11\text{ kW}$	5 台
	一级刮板输送机	$20\text{ t/h}, P=11\text{ kW}$	2 台
	二级刮板输送机	$20\text{ t/h}, P=15\text{ kW}$	2 台
	三级刮板输送机	$20\text{ t/h}, P=7.5\text{ kW}$	2 台
除臭系统	除臭风机	$Q=40\ 000\text{ m}^3/\text{h}, P=90\text{ kW}$	3 台
离子送风系统	离子送风风机	$Q=30\ 000\text{ m}^3/\text{h}, P=18.5\text{ kW}$	1 套

3.2 污泥脱水效果

3.2.1 滤液含固率及滤板含水率统计分析

为检验低温真空脱水干化一体机截留污泥的效果及滤液含固率对生化系统的影响,首先随机挑选 2 台主机(1#和 5#)取样,每台主机取 4 个样(进料阶段 1~3 和压榨阶段)检测滤液 SS 浓度,取样地点为滤液井。进料阶段 1 为进料开始后 5 min;进料阶段 2 为进料流量开始降低至初始进料量的 50% 时;进料阶段 3 为进料即将结束时;压榨阶段为压榨开始 5 min 后。经检测,估算得批次滤液所含固体量(即一体机每批次压滤流失的干泥)平均约为批次绝干污泥量的 0.66%。滤液检测结果见表 3。滤液 SS 检测结果表明,低温真空脱水干化一体机截留污泥效果较佳,滤液含固率很低,滤液回到生化系统不会对出水水质造成明显影响。

表3 低温真空脱水干化一体机滤液含固率试验统计  
Tab.3 Solid content experiment statistics of low-temperature vacuum dewatering and drying system

主机 编号	批次 绝干 量/t	批次 进料 量/m <sup>3</sup>	取滤液 时间点	滤液 SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	批次滤液含固量		滤液 情况		
					质量/ kg	与批次绝干 量比值/%			
1#	2.79	68.4	进料阶段 1	307	均值 284	19.41	0.70	浅褐 色不 透明 液体	
			进料阶段 2	371					
			进料阶段 3	219					
			压榨阶段	238					
5#	2.86	75.2	进料阶段 1	262	均值 239	17.99	0.63		
			进料阶段 2	308					
			进料阶段 3	180					
			压榨阶段	207					
平均						18.70	0.66		

随后,继续选择这两台主机,在加热 110 min、真空干化 120 min 后,取泥饼样检测含水率。取样点选中间滤板和进料端滤板,滤板的取样位置为靠近中心孔 1/3 处和靠近滤板边沿孔 1/3 处,取样点位置的选定主要是为了分析不同部位泥饼的干化效果,以便进行针对性的改进。含水率检测结果见表 4。

表4 低温真空脱水干化一体机滤板含水率试验统计  
Tab.4 Water content experiment statistics of low-temperature vacuum dewatering and drying system

主机 编号	批次绝 干量/t	滤板 位置	取样位置	泥饼厚 度/mm	干泥 形状	含水率/%	
						单次	平均
1#	3.03	中间 滤板	中心孔 1/3	17	块状	39.25	39.2
			滤板边 1/3	15		39.14	
		进料端 滤板	中心孔 1/3	18		40.42	
			滤板边 1/3	15		37.88	
5#	3.10	中间 滤板	中心孔 1/3	16		36.56	38.3
			滤板边 1/3	16		38.44	
		进料端 滤板	中心孔 1/3	17		41.05	
			滤板边 1/3	16		37.07	
平均							38.7

经检测,进料端滤板干泥含水率略高于 40% (分别为 41.05%、40.42%),主要为滤板中部区域的泥块。进泥段滤板中部的泥块含水率较高的原因主要是进料端靠近进料泵,压力大,进料量较大,且系统由中心孔进泥,中心孔附近位置的泥饼较厚,干化较为困难。目前从设备角度暂时无法进行改造以降低进料端中心孔附近的泥饼含水率,但干泥整体平均含水率为 38.7%(<40%),符合出泥标准。

### 3.2.2 干化效率统计分析

统计该水质净化厂单位电量的脱水量,作为低

温真空脱水干化技术干化效率的代表值。同时,对不同有机质含量(VSS/MLSS)条件下的干化效率变化情况进行对比,具体见图 4。

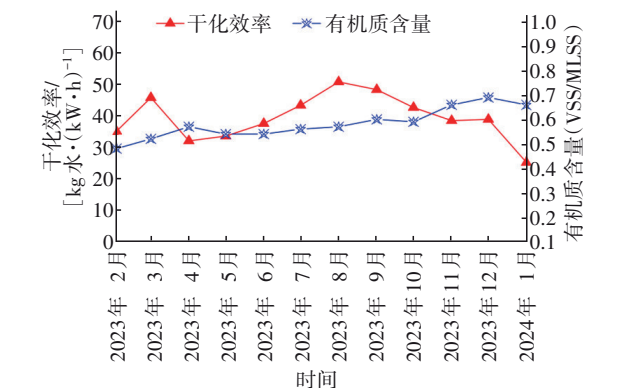


图4 低温真空脱水干化系统干化效率统计分析  
Fig.4 Drying efficiency statistical analysis of low-temperature vacuum dewatering and drying system

众所周知,污泥中有机质含量越高,其脱水越困难。由图 4 可以看出,有机质含量的变化与干化效率基本处于反比状态,即有机质含量越高,干化效率越低。特别是在进水浓度较高的旱季,该现象更为明显。雨季有机质含量约 0.55,而旱季最高时有机质含量达 0.69 左右,有机质含量较雨季时提高近 25%。因此,干化效率从雨季的 50.88 kg 水/(kW·h)降至 25.12 kg 水/(kW·h),干化效率降低了 50.6%。

### 3.2.3 设备故障统计分析

将污泥脱水车间的设备根据重要程度分为 A、B、C 类,A 类为关键性生产设备,故障后将产能造成 20% 以上的影响;B 类为对实际生产影响较轻设备,故障后对产能造成的影响<20%;C 类设备对实际生产无影响。同时,创新性地将设备故障等级分为一、二、三级,一级故障对产能造成的影响>50%;二级故障对产能造成的影响为 20%~50%;三级故障对产能造成的影响<20%。将设备进行分类及设备故障分级后,能更加直观地了解污泥脱水车间设备的故障情况以及对生产的影响程度,便于管理人员根据设备的实际情况执行不同的维护保养计划、安排备品备件数量及制定日常巡检制度。

污泥脱水车间采用三级巡检制度,一级巡检由运行班组成员每 4 h 执行一次,二级巡检由维修班组成员每天执行一次,三级巡检由工程师每周执行一次。相关巡检工单均由智慧运维管控平台自动



生成、按时下发。运行人员、维修人员及工程师收到巡检工单后,在规定时间内携带巡检手机,通过现场扫码对照巡检标准逐项完成巡检工作。

根据统计数据,2022年11月—2023年6月该厂污泥脱水车间平均实际维修时间约18.4 h/月。低温真空脱水干化一体机运行天数为240 d,运行时长为28 800 h,维修总时长为463 h,故障率为1.6%,设备保障率为94%,维修等待时间比例为80%,实际维修时间约11.6 h/月(平均每台2.3 h)。

低温真空脱水干化一体机故障维修状况统计见表5。

表 5 低温真空脱水干化一体机故障维修状况统计

Tab.5 Statistics of fault maintenance of low-temperature vacuum dewatering and drying system

故障分类	设备分类	故障次数	污泥车间维修总时长/h	一体机维修时长/h	维修总时长占运行时长的比例/%
三级故障	A	22	289	145	6.30
	B	26	1 345	150	
	C	9	181	0.5	
二级故障	B	1	168	168	0.58

从表5可以看出,低温真空脱水干化一体机维修等待时间较长,约占维修总时长的80%。究其原因,主要是水质净化厂刚投产运行不久,设备的备品备件库尚未完善。因低温真空干化一体机运行仅一年有余,暂未出现影响产能>50%的一级故障。

3.2.4 运行成本统计分析

低温真空脱水干化系统的污泥处理总成本中主要包含电费、药费和维修费,污泥脱水车间用水均由水质净化厂尾水回用系统供应,因此不产生水耗成本<sup>[8-9]</sup>。经统计,2022年10月—2023年6月该污泥处理系统电费为397元/tDS,药剂费为272元/tDS,维修费为244元/tDS,合计913元/tDS。因板框压榨和干化在一体机中同步完成,板框机的滤布等耗材要求耐高温,因此耗材的维修和更换成本较高,更换频次也更高,折合单位绝干污泥的维修成本较高。

3.2.5 长期运行效果统计分析

该低温真空脱水干化系统目前已稳定运行1年有余,干化泥饼含水率较为稳定,电耗和药耗也处于合理范围。2023年1月—10月的运行数据见表6。

表 6 2023年低温真空脱水干化系统运行数据统计

Tab.6 Operational data statistics of low-temperature vacuum dewatering and drying system in 2023

时间	绝干污泥产量/t	电耗/(kW·h)	PAC/t	PAM/t
2023年1月	269	188 500	59.4	0.99
2023年2月	288	221 200	73.8	1.40
2023年3月	663	396 600	159.6	3.10
2023年4月	423	330 700	134.9	2.42
2023年5月	507	338 300	137.8	2.51
2023年6月	471	308 700	120.3	2.01
2023年7月	623	361 000	163.9	2.38
2023年8月	644	335 500	157.7	2.07
2023年9月	641	336 200	156.1	2.15
2023年10月	484	294 700	137.8	1.56

4 结论

① 低温真空脱水干化系统污泥干化效果较好,干化后的泥饼含水率可以稳定达到40%以下,满足水质净化厂的泥饼含水率要求。

② 因污泥脱水和干化在低温真空脱水干化一体机里同步完成,并且为抽真空负压运行,因此不会产生大量粉尘和气态污染物,工作环境好,臭味少,安全性高。

③ 低温真空脱水干化一体机滤液含固率很低,滤液回流至水质净化厂进水泵房后,不会对进水水质造成冲击。

④ 低温真空脱水干化一体机故障率较低,生产保障率较高,运行稳定高效,但维修维护成本较高。

⑤ 因板框压榨和干化在一体机中同步完成,板框机的滤布等耗材要求耐高温,因此维修和更换成本较高,折合单位绝干污泥的维修成本较高。

⑥ 低温真空脱水干化一体机的总体干化效率处于较高水平,但随污泥有机质浓度变化而变化。在有机质浓度高的旱季,干化效率显著下降。

参考文献:

[1] 戴晓虎,侯立安,章林伟,等. 我国城镇污泥安全处置与资源化研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 145-153.  
DAI Xiaohu, HOU Li'an, ZHANG Linwei, et al. Safe disposal and resource recovery of urban sewage sludge in

- China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 145-153(in Chinese).
- [2] 陈涛,徐汝民,汪军,等. 市政污泥脱水技术分析[J]. 安徽化工,2023,49(5):126-129.
- CHEN Tao, XU Rumin, WANG Jun, *et al.* Technical analysis of municipal sludge dewatering [J]. Anhui Chemical Industry, 2023, 49(5): 126-129(in Chinese).
- [3] 程昶,倪明辉,曲献伟. 污泥低温真空脱水干化成套技术的设计探讨[J]. 工业用水与废水, 2016, 47(1): 73-76.
- CHENG Chang, NI Minghui, QU Xianwei. Discussion on design of sludge low-temperature vacuum drying packaged technology [J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(1): 73-76(in Chinese).
- [4] 王首都. 集约化低温真空干化技术在嘉定某污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 91-95.
- WANG Shoudu. Application of intensive low-temperature vacuum dewatering and drying technology in a sewage treatment plant in Jiading [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 91-95(in Chinese).
- [5] 李亮,史慧婷. 污泥低温真空脱水干化工艺的工程应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(12): 71-74.
- LI Liang, SHI Huiting. Application of sludge dewatering by low-temperature vacuum dewatering technology [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(12): 71-74(in Chinese).
- [6] 李拓,陈贻龙. 广州鳌头污水处理厂污泥干化工艺设计[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 42-46.
- LI Tuo, CHEN Yilong. Technological process design of sludge drying project of Aotou wastewater treatment plant in Guangzhou [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(7): 42-46(in Chinese).
- [7] 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.
- LI Chunjiang, JIANG Shunqi, CHEN Lijia, *et al.* Application of low-temperature vacuum dewatering and drying technology and equipment in sludge dewatering and drying process of medium and small sized municipal sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s1): 160-162, 203(in Chinese).
- [8] 曹晓哲,林莉峰,胡维杰. 碳中和背景下污泥干化焚烧工程的热平衡和节能降耗研究[J]. 给水排水, 2022, 48(7): 51-56.
- CAO Xiaozhe, LIN Lifeng, HU Weijie. Study on energy saving and consumption reduction of sludge drying incineration project under the background of carbon neutralization [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(7): 51-56(in Chinese).
- [9] 王丽花,吕国钧,王飞,等. 污泥干化焚烧系统的节能降耗研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 29-36.
- WANG Lihua, LÜ Guojun, WANG Fei, *et al.* Research on energy saving and consumption reduction of sludge drying and incineration system [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(4): 29-36(in Chinese).
- 作者简介:邵志刚(1980—),男,江苏常熟人,硕士,工程师,主要从事水质净化厂污水和污泥处理设备的研究和运营管理工作。
- E-mail: 18935522@qq.com
- 收稿日期:2024-04-17
- 修回日期:2024-06-03

(编辑:衣春敏)

**加快推进重要生态系统保护和修复重大工程**