

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.16.013

用于市政污泥深度脱水的隔膜压滤机系统设计要点

熊顺华¹, 罗宏伟¹, 黄皓¹, 郑国林², 张力桢³, 呼晓明⁴

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 常州市溧阳生态环境局, 江苏 溧阳 213300; 3. 中建生态环境集团有限公司, 北京 100044; 4. 南京索益盟环保科技有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 用于市政污泥深度脱水的隔膜压滤机系统复杂,设备多,对运行控制要求高,前期设计是否合理直接影响到该系统的正常运行。针对一些项目的压滤机系统运行过程中存在的进料时间长、处理效率低、泥饼含水率高等问题,根据该系统的工作原理和性能特点,通过现场调查,从设计和运行角度对进料污泥含水率、污泥调理效果、过滤和压榨压力等关键影响因素进行了全面研究和分析,归纳总结了污泥调理、进料和压榨等环节的设计要点,并对压滤机选型、污泥浓缩形式、调理池设计、进料泵选型及安装和压榨等提出建议,可为类似项目的设计和运行提供借鉴。

关键词: 深度脱水; 隔膜压滤机系统; 市政污泥; 污泥调理; 进料系统; 压榨系统

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)16-0077-06

Design Considerations for the Diaphragm Filter Press System Aimed at Achieving Deep Dewatering of Municipal Sludge

XIONG Shun-hua¹, LUO Hong-wei¹, HUANG Hao¹, ZHENG Guo-lin²,
ZHANG Li-zhen³, HU Xiao-ming⁴

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Bureau of Ecology and Environment of Changzhou Liyang, Liyang 213300, China; 3. China Construction Eco-Environmental Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 4. Nanjing SReMOL Environmental Technology Co. Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The diaphragm filter press system utilized for the deep dewatering of municipal sludge is intricate, involving much equipment and requiring meticulous operational control. The initial design plays a crucial role in ensuring smooth system operation. Addressing issues such as prolonged feeding time, low treatment efficiency, and elevated moisture content in the mud cake during the operation, a comprehensive study and analysis are conducted. This examination encompasses design and operational aspects, leveraging insights from the system's working principles and performance characteristics gathered through field investigations. Key influencing factors including incoming sludge moisture content, sludge conditioning effectiveness, filtration and pressing pressure are thoroughly examined. The study focuses on critical aspects including sludge conditioning, feeding process, and pressing procedure are summarized while recommendations regarding filter press type selection, sludge concentration form determination, conditioning tank design optimization, feed pump selection and installation, pressing

system. These proposals are intended to serve as valuable references for the design and operation of similar projects in the future.

Key words: deep dewatering; the diaphragm filter press system; municipal sludge; sludge conditioning; feeding system; pressing system

1 污泥深度脱水现状及存在问题

污泥深度脱水是指对含水率较高的污泥进行调节预处理(即污泥调理),改善污泥脱水性能,再进行压滤脱水,使污泥含水率降至 60% 以下(甚至 50% 以下)。用于市政污泥深度脱水的压滤机一般有板框压滤机、厢式压滤机、隔膜压滤机三种,与普通厢式或板框式压滤机相比,隔膜压滤机最大的优点是当压滤机进泥结束后,将高压流体介质注入滤板与隔膜板之间,隔膜板鼓起后对泥饼进行二次挤压,进一步降低泥饼的含水率。隔膜压滤机过滤泥饼含水率比其他种类压滤机低 10%~15%,降低了泥饼的后期处置成本。

市政污泥深度脱水效果受到多种因素的影响,如调理后的污泥性质及含水率、过滤压力、压榨压力、泥饼厚度及泥饼的含水率要求等;由于压滤机种类繁多,相关规范和设计手册无法给出统一的设计标准,故工程中多根据设备供货商提供的经验参数进行设计。为此,从实际情况出发,针对隔膜压滤机系统存在的处理效率低、泥饼含水率高等问题,重点从压滤机选型、污泥调理系统、进料系统、压榨系统等方面进行分析,并从设计角度提出解决

问题的方法。

2 隔膜压滤机系统设计要点

正常情况下,隔膜压滤机每个批次的运行时间因压滤机面积的不同而有所不同,随着压滤机过滤面积的增大而增加,运行时间一般为 3.5~4.5 h,分为调理、进料、压榨、反吹、卸料五个步骤,其中调理 45~90 min,进料 2.5~3.5 h,压榨 40~60 min,反吹 40~45 s,卸料 30~40 min。因污泥调理可在上一个批次压榨和卸料期间完成,故调理时间不计入每个批次运行时间。

2.1 隔膜压滤机选型

影响压滤机过滤效果的主要因素有过滤面积、过滤速度和过滤压力,而过滤速度取决于过滤压力和污泥调理效果。

2.1.1 过滤面积计算与选择

① 过滤面积计算

隔膜压滤机滤室容积的大小决定了压滤机每个批次的处理量。根据市政项目中隔膜压滤机常用型号,列举了国内某压滤机生产厂商的隔膜压滤机过滤面积为 150~800 m² 主要机型的技术参数,具体见表 1。

表 1 隔膜压滤机常用型号技术参数

Tab.1 Technical parameters for commonly used models of the diaphragm filter press

过滤面积/m ²	滤室数量/个	滤板规格/(mm×mm)	压榨前滤饼厚度/mm	滤室容积/m ³	外形尺寸/mm			整机质量/t	电机功率/kW
					总长	宽	高		
150	58	1 250×1 250	40	3.00	7 880	1 930	1 620	13.62	5.5
200	78			4.05	9 400			15.32	
250	96			5.02	10 770			17.02	
300	78	1 500×1 500	40	6.04	11 100	2 400	1 880	31.45	11
400	104			8.07	13 270			34.90	
500	128			9.96	15 270			38.20	
600	116	1 500×2 000	40	11.96	14 470	2 400	2 400	40.90	11
800	156			16.08	17 810			48.30	

以表 1 中过滤面积为 200 m² 的隔膜压滤机为例,对其处理能力进行测算。过滤面积为 200 m² 的压滤机,滤室容积为 4.05 m³,压榨后滤室的充盈量(即滤饼体积占滤室容积的比例)一般为 55%~

65%,如按 60% 取值则压榨后泥饼的体积为 2.43 m³,压榨后的污泥含水率一般为 50%~60%,计算取 60%,而 60% 含水率的污泥密度取 1.20 g/cm³,故压榨后泥饼的质量为 2.92 t,绝干污泥质量(含调理药

剂产生的绝干质量)为1.17 t。调理药剂采用三氯化铁、石灰和PAM,投加量按绝干污泥总质量的15%计,则进入污泥调理系统的绝干污泥量(不含调理药剂质量)约0.99 t。滤室容积与过滤面积基本呈线性关系,故可近似认为每200 m²的过滤面积一个批次可以处理1.0 t左右的绝干污泥。由于污泥性质的差异,调理药剂投加的种类和数量有所不同,且不同生产厂商的压滤机设备参数略有差异,故上述压滤机处理能力计算仅供参考,设计人员进行隔膜压滤机设备选型时可参考上述方法进行测算。

② 压滤机选型

根据表1中压滤机的技术参数,滤板的规格和滤室的数量决定了压滤机的容积,也就是压滤机的处理能力。当滤板规格相同时,压滤机的宽度和高度相同,其滤饼厚度、电机功率也相同,虽然不同过滤面积的机型其总长度、设备质量有所区别,但是区别不大,如过滤面积为250 m²的机型比过滤面积为200 m²的机型设备总长度仅增加了1.37 m,质量增加1.7 t,但是处理能力却提高了25%左右;由于压滤机滤板规格不变,配套的进料、压榨、洗布、吹风系统将不变,故整个压滤机系统的费用增加主要体现在压滤机主机上,但该部分费用增加非常有限。对过滤面积分别为200、250 m²的压滤机系统设备费用进行对比,结果见表2。

表2 不同型号压滤机设备费用对比

Tab.2 Comparison of cost for various types of the filter press equipment

压滤机过滤面积/m ²	压滤机主机费用/万元	压滤机配套设备费用/万元	总费用/万元
200	45	148	193
250	55	148	203
注: 配套设备含进料泵、压榨泵、压榨水箱、洗布泵、洗布水箱、空压机、储气罐、冷干机、泥饼输送机、调理池搅拌机、三氯化铁投加系统、石灰投加系统、PAM投加系统,以及配套管路阀门系统、配电自控系统、仪表系统、安装调试服务等。			

综上,在压滤机选型时,如滤板规格相同,可根据处理需求、现场建设条件、投资预算等条件综合考虑是否选择同等滤板规格中过滤面积偏大的机型,以提高污泥处理系统的处理能力,并应对水量、水质波动导致泥量增加的问题。

2.1.2 过滤压力的选择

压滤机的主要工作原理是通过压力的控制和调节实现过滤功能。在一定范围内,过滤压力越大,过滤速度越快,压滤机的过滤效率也就越高,但同时也带来一定的负面作用:过滤速度越快,从过滤区带走的残渣越多,过滤效果越差,同时还会造成进料泵能耗较高,经济性较差。当压滤机滤室内泥饼生成对滤板的阻力达到进料泵进料压力时,压滤机达到进料平衡点,将无法再进料。如果选择较小的进料压力,压滤机将会过早地达到进料平衡点,导致进料不足;如果选择过大的进料压力,虽然进料量得到保证,但设备购置费用和能耗将大幅增加。当进料压力在1.0 MPa以下时,进料量与进料压力基本呈正相关关系,其相关曲线在1.0 MPa时出现拐点,随后变得较为平缓,效率大幅降低。因此,用于市政污泥深度脱水的隔膜压滤机的进料压力多为0.8~2.0 MPa,在保证处理效率和效果的前提下,为降低能耗,一般选用1.2 MPa或1.6 MPa,此时压滤机的过滤压力与进料泵较匹配。

2.2 污泥调理系统设计

污泥调理是污泥深度脱水的关键环节和核心技术,污泥深度脱水项目的成败很大程度上取决于污泥调理的效果。污泥调理方法主要包括生物法、化学法和物理法^[1]。

2.2.1 污泥调理药剂的选择与投加

① 药剂种类

目前,用于市政污泥调理的化学调理法是通过投加无机盐调理和有机高分子絮凝剂调理。

常用的无机盐调理药剂主要为三氯化铁+石灰、聚合氯化铝(PAC)、聚合氯化铝铁(PAFC)、聚合硅酸铝铁(PSAF)、聚合硫酸铁(PSF)等^[2]。三氯化铁+石灰因调理效果佳、脱水效果好而应用广泛,但是干基增加较多(一般为20%),污泥热值低,不利于泥饼的焚烧处置;其他调理药剂因干基增加少(<10%)、污泥热值高也得到普遍采用。

常用的有机高分子絮凝剂为聚丙烯酰胺(PAM)。PAM按照其所带电荷可分为阳离子型、阴离子型和非离子型三大类,一般阳离子型用于有机物含量较高的污泥调理,如市政生活污水处理厂产生的污泥,而对于给水厂产生的无机污泥,则阳离子型和阴离子型都适用,但阳离子型絮凝剂价格较高,所以目前给水厂污泥调理多采用阴离子型。

② 深度脱水药剂投加种类及投加量

为达到深度脱水的目的,污泥调理时除了投加有机高分子絮凝剂(PAM)外,通常还需要投加无机盐调理药剂如三氯化铁和石灰,三种药剂的投加顺序依次为三氯化铁、石灰、PAM。

三氯化铁投加量一般为绝干污泥质量的3%~6%^[3],石灰投加量一般为绝干污泥质量的6%~15%,PAM的投加量一般为绝干污泥质量的0.3%~0.5%。为减小投加系统的规模,三氯化铁投加浓度一般为30%;石灰采用固体投加;PAM投加浓度较低(0.1%左右)时效果较好,但是过低的配制浓度会导致庞大的制备及投加系统,故实际工程中PAM配制浓度一般控制在0.3%~0.5%,在加药泵后稀释至0.1%进行投加。

③ 加药时间

调理药剂宜采取搅拌时同步投加的方式,加药泵的规模应保证在絮凝完成设定的时间点前完成投加,加药时长一般控制在5~30 min。

2.2.2 调理池设计

① 调理池池型选择

为保证搅拌均匀,调理池平面宜为正方形;且因投加PAM和三氯化铁后,污泥黏稠度增加,搅拌难度大,故调理池平面尺寸不宜过大,一般控制在6.0 m×6.0 m以内。

② 调理池池容计算

单格调理池的有效池容不应小于单套压滤机一个批次的进泥量,调理池进泥含水率以95%~97%为宜。

以一台过滤面积为200 m²的隔膜压滤机为例,一个批次处理的绝干污泥质量(含调理药剂产生的绝干污泥质量)为1.17 t,如不考虑调理前后污泥含水率的变化,则进入调理池不同含水率污泥所对应的调理池最小有效容积如表3所示。

表3 调理池最小有效容积计算结果

Tab.3 Calculation results of the minimum effective volume of conditioning tank

一次进料的绝干 污泥质量/t	进入调理 池的污泥 含水率/%	调理完成后的 污泥密度/ (g·cm ⁻³)	调理池最小 有效容积/m ³
1.17	98	1.020	57.2
1.17	97	1.025	37.9
1.17	95	1.035	22.5

由表3可以看出,因压滤机每个批次处理的绝干污泥量是固定的,所以进入调理池的污泥含水率越高,所需调理池的容积越大。考虑到调理池的进泥浓度受上游浓缩工艺、运行模式等因素的影响,污泥含水率存在一定的不确定性,设计时可根据实际情况在理论计算的基础上适当考虑一定的富余量,防止出现因进泥浓度波动造成调理池设计池容偏小而无法满足压滤机一个批次进料量的情况。

③ 调理池的数量

当压滤机数量较少(≤2台)时,一般采用“一对一”设计,即一格调理池对应一台压滤机,且不应少于2格。当压滤机数量较多(>2台)时,如采用“一对一”设计,则会造成调理池数量较多;此时可错开多台压滤机的调理、进料时间,即在一台压滤机第一批进料完成后,对应的调理池处于空置状态时开始进泥,而无需等到压滤机压榨和卸料都完成后再进泥,可通过压滤机运行程序的设定和气动阀门的切换来实现多台压滤机的错时进料,合理确定调理池的数量。

④ 调理池进泥泵选型

为减少批次间压滤机的等待时间,提高系统运行效率,调理池宜采用压力流进泥方式,且配置的进泥泵设计流量较大;一般情况下,调理池进泥的同时即开始投加调理药剂,而污泥调理的时间一般为1 h,故调理池进泥泵的规模宜满足0.2~0.5 h内将调理池注满的条件。

⑤ 搅拌机选型及搅拌时间

调理池的搅拌强度和搅拌时间是决定絮凝效果的关键。为保证絮凝效果,搅拌机可参照给水处理中絮凝阶段的搅拌器参数进行设计,速度梯度值 G 一般取20~70 s⁻¹;投加调理药剂后,絮凝时间以15~30 min为宜。

2.3 进料系统

2.3.1 进料污泥含水率的影响分析

① 对污泥体积的影响

一般情况下,当污泥的含水率 $p>65\%$ 时,污泥的体积(V)、质量(W)与所含固体物浓度(C)之间的关系如下:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{100 - p_2}{100 - p_1} = \frac{C_2}{C_1} \quad (1)$$

根据式(1)计算,当污泥的含水率由98%降低至97%时,污泥的体积可减少33.3%。故进入隔膜

压滤机的污泥含水率不宜过高。这是因为过高的污泥含水率不仅增加了污泥调理构筑物的尺寸,使调理难度加大,同时若需在规定时间内(一个批次进料时间为3.5~4.5 h)完成进料,还需增加污泥进料泵的流量,使得进料泵尺寸及设备功率增加,进而增大进料泵的占地和电耗等。

② 对滤饼、滤液含固率和滤布堵塞的影响

压滤机的进料浓度和污泥含水率直接相关,进料含水率低,进料浓度就高。在压滤机进料阶段,与浓度低的污泥相比,高浓度污泥的含固率高,滤饼形成的速度更快。当进料浓度低时,细小颗粒容易穿过或堵塞滤板的孔眼;当进料浓度较高时,将会有更多的颗粒接近或达到过滤介质的孔眼,由于颗粒间的相互干扰作用,绝大部分颗粒不能进入孔眼而在其上形成拱架桥,有利于滤板的孔眼在较长时间内不被堵塞。进料浓度越低,滤饼水分越高,可见进料浓度对滤饼含水率的影响非常明显。

为缩短压滤机的压滤周期、提高处理效率、减少滤板堵塞概率、提高进料浓度,进入压滤机的污泥含水率一般控制在95%~97%。

2.3.2 进料泵型式的选择

隔膜压滤机进料泵的进料压力高达1.2 MPa,目前工程中较多采用螺杆泵或柱塞泵,两种泵的优、缺点对比见表4。

表4 螺杆泵和柱塞泵的优、缺点对比

Tab.4 Comparison of advantages and disadvantages between screw pump and piston pump

项目	螺杆泵	柱塞泵
构造原理	回转式容积泵	往复式容积泵
适用环境	中低压	中高压
噪声	小	大
占地	大	略小
工作压力/MPa	0.6~1.2	1.0~4.0
对输送介质的适应性	一般	好
寿命/a	0.5~1.5	3~5
运行稳定性	磨损后,压力下降明显	磨损后,压力下降不明显
驱动方式	电机驱动	液压驱动
工作效率	进料后期工作效率低	进料全过程保持高效率
维修难易程度	相对简单	麻烦
造价	低	略高

由表4可知,螺杆泵噪声小,造价低,但占地大,定子易磨损,更换费用高;柱塞泵噪声大,造价略高,但性能稳定,寿命长,且与隔膜压滤机配套使用时无需设置两种型号的进料泵(螺杆泵一般采用高、低压泵进料),工作效率高。

2.3.3 进料泵的流量和压力

隔膜压滤机进料泵的压力与隔膜压滤机的过滤压力相匹配,一般为0.8~1.5 MPa。市政项目中,进料泵的压力一般选1.2 MPa或1.6 MPa。在压滤初期,滤室内的滤饼厚度不大,滤饼的阻力较小,脱水速度快,通常选用低扬程、大流量的泵;随着滤饼厚度的增加,阻力不断增大,压滤速度下降,此时应选用高扬程、小流量的泵。

考虑到进料泵定子的磨损,设计选泵时扬程宜放大10%~20%,并配备变频,运行初期通过变频控制达到压滤机所需的过滤压力。

2.3.4 进料泵的安装高度

在实际工程中,进料泵输送的介质含有大量颗粒杂物或者黏度高、密度大,导致其实际自吸高度通常达不到理论自吸高度(3.0~6.0 m),故工程设计中,一般不考虑进料泵的吸程,将其安装在较低位置,即保证调理池低液位时仍能满足自灌的条件。

2.3.5 前端污泥浓缩形式的建议

在市政污水处理工程中,剩余污泥的含水率一般为98.8%~99.4%;在市政给水处理工程中,沉淀池排泥水的含水率一般为99.5%~99.8%。在实际工程中,经重力浓缩后的市政污泥含水率一般为97%~98%,难以达到97%以下。故建议有条件时采用机械浓缩方式^[4],一方面可大大降低浓缩后的污泥含水率(一般可达95%~96%),从而大幅降低后续污泥调理和压滤机进料单元的规模;另一方面由于机械浓缩停留时间短、设备占地小,可有效节约土地资源。

2.4 压榨系统

过滤完成后,泥饼的含水率一般可达到65%~75%,此时通过压榨系统对泥饼进行二次挤压,进一步降低泥饼的含水率,使泥饼含水率最终达到60%以下。压榨系统须考虑压榨介质及其用量、压榨压力等参数,这些参数受滤室容积、滤饼体积、滤饼脱水速率、隔膜材质和操作安全等因素影响。在市政项目中,压榨介质一般为水。

① 压榨压力及压榨泵

市政污泥深度脱水一般采用高于进料压力的压榨压力,常规选择较多的过滤压力为1.2 MPa、压榨压力为1.6 MPa,可大大缩短整个过滤周期。由于压榨所需压力较高,工程中一般采用柱塞泵。

② 压榨水量

以1台过滤面积200 m²的压滤机为例,滤室容积为4.05 m³,压榨后滤室的充盈量取60%,压榨后泥饼的体积为2.43 m³,故压榨水所占的体积为1.62 m³。压榨水箱的有效容积除考虑多台压滤机同时工作时所需压榨水量外,还需考虑压滤机进料孔和压榨水管路的容积。

③ 压榨时间

进料结束后关闭进料阀门、开启压榨阀门和压榨水泵,系统进入压榨状态,待压榨压力升高到1.6 MPa后进入压榨保压状态,压榨保压结束后压榨完成。整个压榨时长一般为40~60 min。

④ 压榨后的泥饼厚度

压榨前的滤饼厚度为40 mm,按上述充盈量进行理论计算,压榨后的滤饼厚度应为24 mm,工程中正常压榨后的泥饼厚度一般为22~24 mm,实际运行可根据最终泥饼的厚度和含水率判定污泥的调理、过滤及压榨效果,以便对运行模式做出调整。

3 结论

① 隔膜压滤机进料浓度对污泥调理系统和压滤机进料系统的规模和深度脱水的效果影响较大,进料的最佳含水率为95%~97%。

② 污泥调理投加的药剂种类、投加量、搅拌强度和搅拌时间等对调理效果均有较大的影响,应根据污泥性质、后续处置要求等通过试验进行确定。

③ 优化压滤机选型、选取合理的进料系统和压榨系统设计等可有效缩短压滤机系统的批次时间,提高处理效率,降低泥饼含水率。

参考文献:

- [1] 魏振. 污泥深度脱水分析和全自动压滤机应用实践[J]. 广州化工, 2023, 51(2): 183-184, 199.
WEI Zhen. Analysis of sludge deep dewatering and application practice of automatic filter press [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51(2): 183-184, 199(in Chinese).
- [2] 高珊, 朱晓辉, 张一凡, 等. 基于板框压滤机的污泥深度脱水影响因素研究[J]. 广东化工, 2022, 49(21): 171-173, 179.
GAO Shan, ZHU Xiaohui, ZHANG Yifan, et al. Study on the influencing factors of sludge depth dewatering based on plate and frame filter press [J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(21): 171-173, 179(in Chinese).
- [3] 刘锐, 徐强, 郭松杰, 等. PAC调理剂对全自动板框压滤机污泥深度脱水的影响[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 158-162.
LIU Rui, XU Qiang, GUO Songjie, et al. Effect of PAC conditioner on deep sludge decoating by automatic filter press [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 158-162(in Chinese).
- [4] 杨胜鑫, 何嘉辉. 某污水处理厂污泥深度脱水工艺的探讨与设计[J]. 城市道桥与防洪, 2023(3): 129-132, 21.
YANG Shengxin, HE Jiahui. Discussion and design of sludge advanced dewatering process for a wastewater treatment plant [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2023(3): 129-132, 21(in Chinese).

作者简介:熊顺华(1979—),男,江苏溧阳人,学士,高级工程师,第八设计院院长,长期从事市政给水排水工程设计和咨询工作,曾多次荣获国家、省、市勘察设计和咨询等奖项。

E-mail:1767107807@qq.com

收稿日期:2023-05-24

修回日期:2024-03-12

(编辑:丁彩娟)