

污泥厌氧消化池设备选型和管路布置要点

侯 盾¹, 周夏海^{2*}, 李佳璐¹, 南亚坤¹

(1. 宝航环境修复有限公司, 北京 100012; 2. 苏伊士水务工程有限责任公司, 北京 100026)

摘 要: 厌氧消化是我国解决污泥处理处置的一条重要技术路线,从国内现有污泥消化项目的整体运行情况看,却不是乐观。除了泥质的客观因素外,工艺设计、设备选型优化对于提升消化系统整体功能同样有潜可挖。对消化池设备和仪表的配置及选型进行系统性地说明,针对大型厌氧消化池的管道设计,提出消化池内外管路和管路之间连接阀门布置的方式。借助多功能阀门组的设置,满足从调试快速启动到后期稳定运行的多种工况要求。就消化池实际运行中经常遇到的泡沫、浮渣等问题,选择相应的辅助非标设备并对这些设备的功能和设置方式进行描述,以期对后期厌氧消化池的设计、设备选型和运行提供技术借鉴。

关键词: 厌氧消化; 污泥消化池; 污泥管路布置; 消化池设备

中图分类号: S216.4; X703; X705 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-1166(2022)02-0032-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022020032

Key Points of Equipment Selection and Piping Layout for Sludge Anaerobic Digestion Tanks / HOU Dun¹, ZHOU Xia-hai^{2*}, LI Jia-lu¹, NAN Ya-kun¹ / (1. Baohang Environment Co Ltd, Beijing 100012, China; 2. Suez Water Treatment Infrastructure, Beijing 100026, China)

Abstract: Anaerobic digestion process is one of the most important technology for sludge treatment in China. However, the operation of existing sludge digestion projects is not doing very well. Despite of sludge quality, there is also a high potentiality to improve the efficiency of the digestion system by optimization of design and equipment selection. In this study, the selection and configuration of digestion equipment and the instruments were systematically illustrated. The arrangements of piping inside and outside the digester as well as the valves between the pipes were proposed for the piping design of large-sized anaerobic digestion tanks. With the help of the multi-functional valve group, it could satisfy the various requirements under different working conditions from the fast start-up to later stable operation period. Meanwhile, with regard to the foam and scum issues frequently encountered during the operation, the function and layout of related auxiliary non-standard equipment were also described as to provide the technical references for the design, equipment selection and the operation of anaerobic sludge digestion system in the future.

Key words: anaerobic digestion; sludge digestion tank; sludge piping layout; digester equipment

随着经济发展和人民生活水平提高,我国城镇污水和污泥的产量逐年快速增长,截至 2019 年底,全国县市级以上污水处理厂产生污泥量达到 1303 万 t(干泥)^[1]。从污染物的转化看,水中约 30% ~ 50% 的 COD 转入了污泥中,着眼于污染物减排角度,污泥处理处置是污水处理的重要补充环节^[2]。

污泥处理处置技术工艺的选择都是紧扣四化:稳定化、减量化、无害化、资源化。厌氧消化具有耗能低,能源提取量大,同时有一定杀菌的作用,污泥四化方面表现出色,在欧美发达国家得到了广泛关

注,特别是欧盟,对厌氧消化最为推崇,并将其作为污泥稳定化最主流的技术之一^[3]。

我国人口众多,资源和能源相对短缺,采用厌氧消化技术进行污泥资源化、能源化的做法符合我国国情。国家陆续发布了一系列政策鼓励该技术的研究和应用^[4]。2000 年,多部门联合发布的《城市污水处理及污染防治技术政策》中 5.2 条规定:“日处理能力在 10 万 m³ 以上的污水二级处理设施产生的污泥,宜采取厌氧消化工艺进行处理,产生的沼气应综合利用^[5]。”

收稿日期: 2021-08-31 修回日期: 2021-10-20

作者简介: 侯 盾(1969-),男,浙江临海人,硕士,主要从事工矿企业污染治理(土壤修复和地下水治理等)以及污泥治理相关的技术研究和工程实施等工作, E-mail: houdun@baohangenv.com

通信作者: 周夏海, E-mail: xiahai.zhou@suez.com

但截至 2019 年底,我国仅有近 60 座污水厂配套建设了污泥厌氧消化系统,不到全国县市级以上污水处理厂数量(共计 4140 座^[1])的 2%,且总体运行状况不尽乐观,可以运行的仅 20 余座^[2]。虽然国内污水厂污泥普遍存在有机质含量低、含砂量大等客观因素,但同时也存在工艺设计、设备选型和运行上的不足,这些都是可以通过技术、管理等综合手段解决的。包括广为诟病的国内污泥含砂量大、有机质含量低的问题,也可通过改善污水厂预处理段沉砂效果、提升消化进泥除砂/渣预处理效率等措施,使消化处理效果得到明显改善。北京小红门及上海白龙港污水厂的实践已证明了这点^[6-7]。

无论从未来更严峻的节能减排形势,还是从资源化等折合的经济性能来看,厌氧消化都将是我国解决污泥处理处置难题的一条重要技术路线。总体来看,目前国内外消化技术的研究主要集中在如何改善污泥的厌氧消化性能,以提高有机物去除率和沼气产率,其中对有机废料与污泥协同处理以及消化预处理技术方面的研究较多^[4, 8]。但国内污泥厌氧消化工程案例少,消化设计和运行还在摸索之中,设计和设备选型优化对于提升消化系统整体功能同样有潜可挖。

消化池作为厌氧消化工艺的核心单元,其设计

和设备选择显得尤为关键。国内消化池设计更注重搅拌效果、停留时间、池内温度、进料泥质等相对宏观的方面,对于消化实际运行中遇到的泡沫、浮渣、排砂等问题,以及在设计的细节上,如管道布置、相关辅助设备的设置与选型等,相对关注不够。本文旨在通过多个大型市政污泥厌氧消化项目在设计、安装和运行中积累的经验,以华东某大型市政污泥厌氧消化项目为例,对消化池的工艺设计进行梳理,总结消化池污泥管路布置方式、设备仪表选用以及辅助非标设备选择等内容,为今后消化池的设计和选型提供借鉴。

1 案例工程厌氧消化池简介

本案例工程位于华东地区,其消化工艺采用单级中温 35°C 厌氧消化。消化池采用卵形、双向有粘结钢筋砼结构,共 8 座,远期拟增至 10 座,单池容积 12400 m³。池体最大处直径 25 m,池体总高 45.56 m,地上部分 32.26 m,地下埋深 13.30 m。所有消化池共用一个大型地下管廊,管廊中除了布置所有进出消化池的工艺管线和阀门之外,还设置了服务各池的进泥泵、循环泵、换热器及公用的消泡/冲洗水恒压装置。消化工艺具体的设计参数见表 1。

表 1 污泥厌氧消化工艺主要设计参数

项 目	主要参数	备注
系统总进泥量/(kgDS·d ⁻¹)	203795/268240	近期/远期
系统总进泥量/(m ³ ·d ⁻¹)	4076/5365	近期/远期
设计进泥含水率/%	95	—
设计进泥有机物含量/%	化学/初沉/剩余污泥;55/60/60	VSS/SS
设计进泥有机负荷/(kgVSS·m ⁻³ ·d ⁻¹)	1.21	—
污泥停留时间/d	24.3	—
设计沼气产气率/(Nm ³ ·kg ⁻¹ VSS _{deg})	0.8~1.0	—
设计沼气产量/(Nm ³ ·d ⁻¹)	44512	—
有机酸浓度/(mg·L ⁻¹)	50~500	—
总碱度/(mg·L ⁻¹)	2000~3750 以上	CaCO ₃ 计
pH 值	6.8~7.8	—

2 消化池搅拌设备

大型消化池的搅拌器主要采用机械搅拌和沼气搅拌两类。机械搅拌器有导流筒螺旋桨搅拌和大桨叶搅拌两种类型。沼气搅拌则分为固定搅拌和悬挂搅拌两种模式。在对比了已经投入使用的 16 座

10000 m³ 机械搅拌消化池和 2 座 8500 m³ 沼气搅拌消化池的基础上,表 2 给出了大型消化池两种主要搅拌方式的比较。

两种机械搅拌类型中,大桨叶慢速搅拌的厌氧消化池内,物料在水平方向上与搅拌器同向转动,消化池内同时存在轴向和径向两个方向的运动,在竖

直和水平方向都存在混合作用, 整个消化池内流场速度分布较为均匀^[9], 同时耗能少, 国内大型柱型

表2 大中型污泥厌氧消化池搅拌方式的比较

项目	机械搅拌	沼气搅拌
适用池型	适用于高径比大, 流态好的池型, 用于直径大且高径比小的池型, 易存在搅拌死角	适合于各种池形, 对于平底或底部锥度较缓的池型更能显示出其优点
搅拌能耗	视搅拌器类型不同低或较低 $1 \sim 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$	较高, $4 \sim 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$
维护与检修	设备少, 日常维护简单, 但顶入式中心搅拌器故障时, 需放空消化池, 维护费用较高	沼气压缩机维护稍复杂, 但对于悬挂喷杆式搅拌可进行在线维护和检修, 方便灵活, 费用较低
运行方式	相对单一, 但导流筒式搅拌机可正反转, 实现不同搅拌流态	沼气搅拌分组设置, 根据需要, 进行不同的组合, 方式较灵活
配套管路	不需要	需配套压缩沼气搅拌管及电动/气动阀门, 系统复杂
搅拌混合性能	柱型池易存搅拌死区, 但卵型池, 混合均匀, 搅拌强度大, 效果好	搅拌管多根设置, 可顾及各区域, 适合大容积、小高径比的柱型池

消化池中有较多应用, 如北京高碑店、青岛麦岛厌氧消化均采用了该搅拌方式。

导流筒螺旋桨搅拌器在消化池中心安装导流筒, 当螺旋桨旋转时, 不断将筒内污泥提升到泥面或压向池底, 形成循环搅拌。搅拌器组成简单、操作容易、维修量小, 能够有效地消除浮渣层, 特别适用于卵形消化池^[10]。导流筒流量以日翻腾搅拌 6 ~ 10 次考虑, 筒内污泥流速一般选用 $0.3 \sim 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 国内石家庄桥东、济宁、武汉三金潭、青岛李村河、南昌青山湖、重庆鸡冠石/唐家沱等消化项目均采用了该种搅拌方式。

案例工程采用大型钢筋砼卵形消化池, 结构和受力条件好, 池形具有利于混合搅拌的工艺优点。底部面积小, 易于底部沉淀物的排除, 污泥液面小, 利于排渣, 该池形搅拌能量要求低, 特别适合采用带有导流筒的螺旋桨搅拌器。该工程采用的螺旋桨搅拌器, 叶轮为不锈钢 316 材质, 直径 780 mm, 导流筒内壁直径 900 mm, 最窄处直径 800 mm, 叶轮与筒壁设计间隙 10 mm。导流筒材料选用 GGG 球墨铸铁, 连接法兰一体化浇筑成型, 禁止使用焊接法兰的形式。搅拌器转速 423 rpm, 输送流量 $6120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 轴功率为 44 kW, 折合单位体积搅拌功率约 $3.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, 配套电机功率 58 kW。设备本身带有自动润滑装置和轴承温度报警装置。采用三级密封, 能够在运行时将消化池内部外部环境完全隔离。

3 消化池管道的设置

消化池涉及的管道包括消化进泥管、排泥管、上清液排放管、污泥循环管和沼气出气管等, 管道布置及设计的要点在于各种管道在进出消化池的位置应尽可能相对集中, 这样便于在各管道之间设置必要

的连通管及相应的阀门组, 在消化池启动、正常运行、日常维护及故障排除时, 通过阀门的切换, 可以实现不同的工艺目的。

3.1 消化池进泥管路

消化池进泥管路与消化池进泥方式密切相关。对于大型消化池, 必须考虑连续进泥和间歇进泥两种模式, 管路尺寸和进泥泵能力需要按照间歇进泥的情况进行选型, 按照连续进泥的条件进行复核。

正常运行状态下, 消化池进泥口位于消化池顶部, 如图 1 所示。新鲜污泥由进泥螺杆泵泵出, 首先与消化池循环污泥混合, 经过换热器加热后, 通过消化池管廊竖井, 抵达消化池顶部进入池内。

消化池间歇进泥时的流量较连续进泥大 3 ~ 4 倍, 泵的能力按间歇运行选择, 须具有流量可调功能。考虑到消化进泥含固率为 3% ~ 6%, 螺杆泵转速可选择 200 ~ 300 rpm, 不必过小。同时考虑到国内污泥含砂量普遍较高, 泵投运后磨损大, 流量下降严重, 泵选型时应考虑 30% ~ 50% 的裕量。

某些特定条件下, 通过阀门切换, 可以实现消化池中部或底部进泥。比如: 在消化池初期启动阶段, 池内污泥浓度低, 且大多集中在底部区域, 此时消化池进泥位置可以从顶部切换至中部进泥。污泥循环泵将底部的污泥抽出, 与进泥混合并加热后, 从消化池中部投入, 不断重复循环(见图 2)。这样可以实现在污泥搅拌器无法启用时, 对消化池底部空间的污泥进行混合, 创造有利于污泥驯化及生长的环境, 为后期污泥增殖提供良好的条件。当消化池内污泥浓度增加到 1.5% 以上时, 适时启动搅拌器, 并将进泥切换至正常运行方式。另外, 污泥中含有砂子, 因为密度大, 会在消化池底部富集, 存在板结的倾向。可以不定期通过切换阀组, 利用中部出泥, 底部进泥

的方式,对底部区域进行松动,疏散泥砂的密实度,如图3所示。

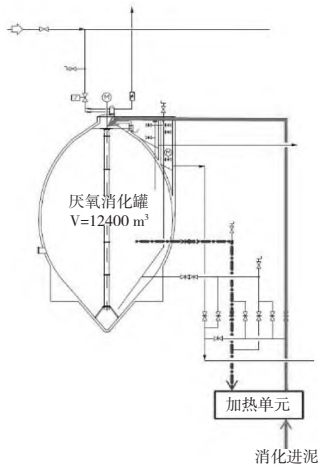


图1 消化池顶部进泥方式

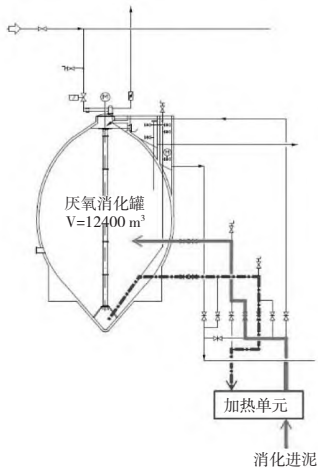


图2 消化池中部进泥方式

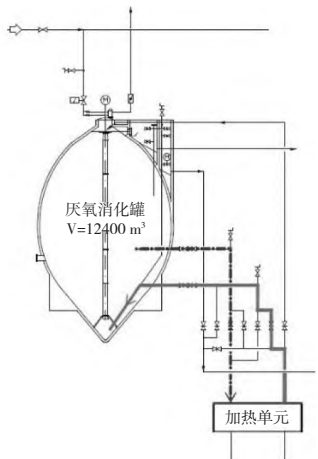


图3 消化池底部反冲方式

3.2 消化池排泥管路(污泥上升管)

部分中小型消化池的排泥采用底部直排,这种

排泥方式阀门开度小、流速大,排放过程难以控制。大型消化池的液位与厂区排泥管之间有 30 ~ 40 m 的高差,如采用底部直排,情况将更严重。同时排泥中带有部分砂砾,会高速冲刷排放阀的密封,磨损大,使用数月就需要更换阀板和阀座。因此对于大型消化池,应设置污泥上升排放管,采用溢流方式排放污泥。顶部进泥的同时,将底部污泥通过污泥上升管顶出消化池,排入污泥槽内(见图4),实现进泥和出泥的自动平衡。上升管排放口的形式可做成可调弯头或套筒阀式(见图5),用于精确控制池内液位,满足搅拌器的相应要求等。

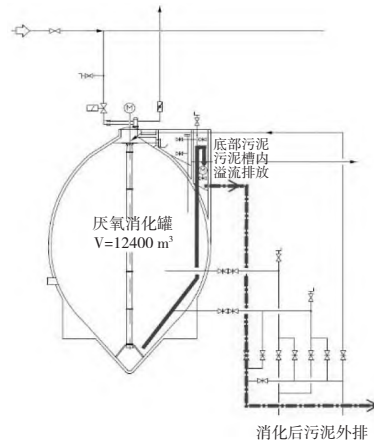
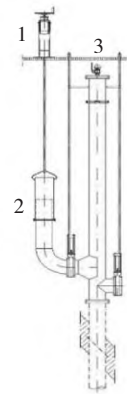


图4 消化池顶部排泥管路



1. 启闭机; 2. 套筒阀; 3. 冲洗接口

图5 消化池排泥管示意图

3.3 消化池上清液排放管(紧急溢流管)

消化池出泥管发生堵塞时,池内的液位会不断上升。如果污泥无法排出,会造成污泥通过安全阀大量溢出消化池的事故。为了预防此类事故,目前大型消化池顶部均设置有紧急溢流管,该管兼具上清液排放功能,采用下进上排的方式,溢流主管顶部不封闭,下部进口需深入液位以下 3 ~ 4 m,避免池

内沼气外泄。在溢流管排放管路上设置带有阀门的可调排料管,用于精确调节溢流液位。一旦出现消化池内液位由于故障快速上升,到达溢流液位时,池内污泥可以立即排出池体,避免出现池顶喷泥的事故。

正常情况下,消化池内部为完全混合状态,顶部和底部污泥浓度相差相对较小。但是在某些特殊情况下,例如调试期间或系统恢复期间,上清液浓度非常低,工艺上需采用溢流管进行消化池正常排液时,先将溢流排放高度调整为正常设计液位,同时需要考虑不同浓度排液的去向,例如,排液含固率超过1%情况下,可排至浓缩池进行浓缩。否则上清液排放到厂区下水管道,排液浓度过低会干扰浓缩池的正常运行。

为了实现两种排放方式,消化池顶部设有两个相互独立的槽室,即污泥槽和浮渣槽。污泥上升管设置在污泥槽内,浮渣门及紧急溢流管设置在浮渣槽内。紧急溢流管上设2个分支管,两者在同一高程,一个出口设在浮渣槽内,另一个出口从浮渣槽跨越到污泥槽,均用于排放上清液时使用(见图6)。



图6 带有可调弯头的紧急溢流管

3.4 消化池污泥外排管和上清液(浮渣液)外排管

消化池出料外排下降管分为两根,一根为上清液下降管,与浮渣槽相连,用于排放含固较少的上清液,排放目的地为全厂下水管网。另外一根为污泥

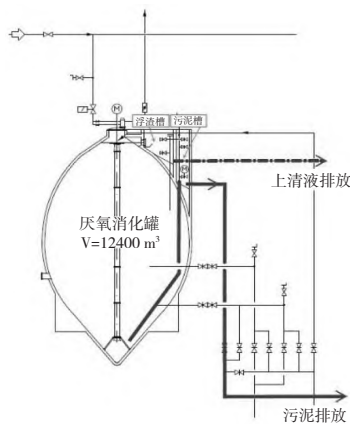


图7 消化池底部排泥和顶部排渣

排放管,用于排放消化污泥,排放地点为脱水系统之前的浓缩池。消化池正常的排料如图7所示。

在实际运行中,如果需要排放消化池不同位置的污泥,可以通过切换阀门实现。例如,底部含砂较多污泥的强制排放(见图8)。

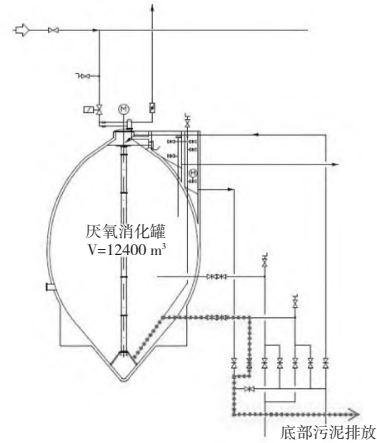


图8 消化池底部压力排泥

消化池污泥管路布置避免出现锐角形式,管路弯曲半径应当大于 $3d$ 。出消化池管路上的第一道阀门为双保险起见,建议串接两道闸阀。为了防止消化池与附属构筑物不均匀沉降对管路带来的负面影响,双闸阀后再安装双向型伸缩节。

大型厌氧消化项目池数较多时,宜在各消化池之间设置直通连接管,这样在系统启动阶段包括停运恢复时,会有更多的选择和调节保障手段。

管路设计需特别注意的是,污泥管的布置要严格避免存在相对高点的情形,因为管中污泥的产气会在相对高点聚集,造成气堵,堵塞管路。而沼气管则相反,在管路设计时要考虑一定的坡度,同时尽可能避免管路中存在相对低点。冷凝水会在低点处汇集,如果不能及时排出,会堵塞气路,严重时还会造成消化池内气压异常升高,甚至破坏消化池顶部的土建结构,导致重大事故。

4 消化池相关仪表

消化池仪表选择时需要考虑消化池运行的特点,例如消化池会出现浮渣层和泡沫层、消化池出口沼气压力低,一般仅有不到 0.5 m 的水头、消化池搅拌均匀程度对于池内的生物活性有重要影响等。消化池仪表种类不多,包括温度计、压力计、液位计、泡沫探测等,其选择必须满足防爆要求。

由于消化池运行时,经常产生泡沫,因此不宜在

池顶安装超声波或雷达液位计等监测池内液位。通常情况下,宜在池体底部安装静压液位计。考虑到池内液面上部为微正压区域,应安装池顶气室的沼气压力变送器,以便对静压液位计测得的液位进行修正。

由于消化池沼气产气压力低,沼气流量计不应选择压损较大的涡街流量计,而选择压损小,耐腐蚀耐湿气能力强的热质流量计。

为了了解消化池的搅拌效果,可以在消化池上下池壁设置2个温度变送器,通过测量消化池内部温度,间接体现搅拌效果。为了消除空气传导对测量带来的不利影响,温度变送器需要安装在带有导热油的套管内。

池顶安装的沼气压力/温度变送器和电容式泡沫探头物位开关均在防爆区内,需要配置电流安全栅对去往仪表的用电进行过滤,过大的电流会被隔离,防止出现火花。

5 消化池辅助非标设备

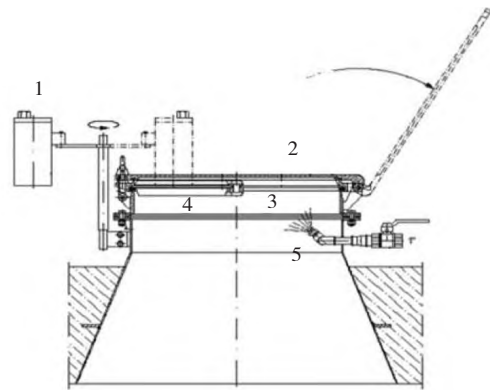
厌氧消化是一个系统工程,同时涉爆涉毒。工艺上,如果配置多座小型消化池(通常 3000 m³ 以下),其中一座消化池停运或重启,不会对系统带来显著影响,也不会产生大量的额外费用,因此小型消化池配置的附属设备较为简单。但是大型消化池,一座污水厂仅会设置数座,单池容量大,通常超过 8000 m³,如果其中 1 座消化池停用,可能造成前后关联系统的大量调整。因此大型消化池的运行必须稳定可靠,重视每个细节,对于实际运行过程中不可避免的浮渣、泡沫、沉砂、压力波动等扰动,在设计及设备选择上必须具备相应的应对措施。

5.1 观察窗

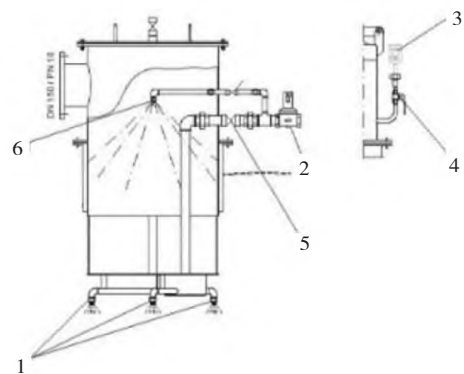
为了及时发现运行中出现的浮渣及泡沫,消化池顶应设置观察窗(见图 9)。在考虑防腐的同时,需要特别注意观察窗启闭时不能碰撞出现火花。通常情况下宜采用铜制窗架及有机玻璃窗体,需要时可以接入高压冲洗水进行清洁刮刷。观察窗自带盖子,防止阳光直射可能带来的不利影响。

5.2 消泡器

消泡器安装在消化池顶部,与沼气出气集气罩合为一体(见图 10),用于消除可能进入沼气管的泡沫。自动消泡装置由泡沫探头、电磁阀、高压水喷淋系统组成。另外,还可辅以手动高压水喷射器方式进行手动消泡。消泡水的压力宜选定在 3~4 bar,喷嘴的水流形式采用实心锥式,喷射角选择为 60°~90°,可同时兼顾喷射的力度及喷淋的范围。



1. 观察灯; 2. 黄铜顶盖; 3. 有机玻璃观察窗; 4. 雨刷; 5. 清洗喷头
图 9 消化池观察窗

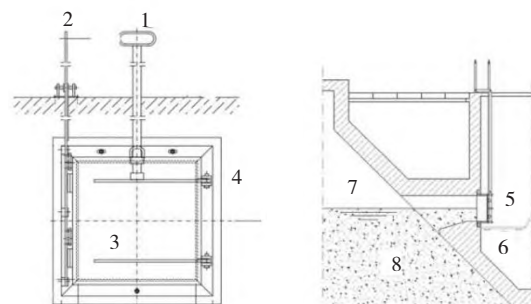


1. 喷嘴; 2. 进水电磁阀; 3. 压力传感器; 4. 仪表手阀; 5. 止回阀; 6. 顶部喷头
图 10 消化池喷淋消泡器

消泡器高压喷淋水进水管上同时预留外来消泡剂的接口,方便必要时接入。消泡剂应选择高效易生物降解的类型。

5.3 浮渣排放装置

当浮渣层较厚时,需采用直接排放的方式,通过浮渣排放门,排放至消化池之外。浮渣排放门的结构如图 11 所示。



1. 闸门把手; 2. 快开连杆; 3. 浮渣门; 4. 浮渣门铰链; 5. 浮渣门; 6. 浮渣格栅; 7. 消化池顶部空间; 8. 浮渣层
图 11 浮渣排放门的结构

与普通闸门采用上下行进方式不同,消化池专用的浮渣排放门采用侧开方式,可以实现速开速闭。闸门通过侧向铰链实现闸门水平外开,另一边通过杠杆压条将闸门门板推向门框的密封条,并且通过门框上的楔形块进行加压,实现门框和门板的完全密封。

以 700 mm × 700 mm 排放门为例,普通闸门需要 60 ~ 90 秒达到完全开启,闸门上的堰上水头通常只有几厘米,因为流速慢,表层浮渣很难被水流带出,排渣效果差;而侧装排放门仅用 1 秒即可完全开启,排放水头可达 70 cm,大大提高了消化池的排渣速度和排渣效果(见图 12)。

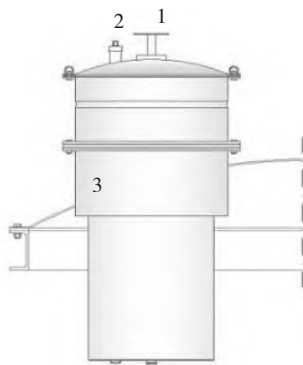
浮渣排放完毕后,专用浮渣排放门 1 ~ 2 秒即可关闭到位,这样能大大减少消化池内外联通的风险,提高安全性。



图 12 浮渣排放门/格栅及排渣实况

5.4 安全阀

消化池须配备正负压安全阀(见图 13),安全阀的开启压力为 $+/-60$ mbar。安全阀可以采用机械型安全阀或者水力型安全阀。考虑到消化池顶部的沼气中含有一定的杂质,有堵塞机械式安全阀的风险,因此推荐选用水力型安全阀。当消化池内的压力超限,安全阀触发,阀内水排出,消化池内部与大气联通,反之亦然。



1. 注水口; 2. 水封液位指示器; 3. 安全阀预埋件

图 13 消化池安全阀

6 结论

文章对比了消化池不同形式搅拌器的特点,指

出大型卵形污泥消化池选用导流筒螺旋桨搅拌器是最佳的选择,且配套导流筒和固定法兰需要一体化铸造成型。

针对消化池设计运行中经常会出现的进泥负荷过低、不当排泥方式造成经常检修及未考虑管路堵塞消除措施造成池顶溢泥等情况,提出了一套消化池管路布置方法,包括污泥上升管,溢流排泥管、上清液排放管兼顾紧急溢流和低含固排液。布置方法中设置的中部污泥循环管用于少含砂污泥循环以减少对换热器设备的磨损等。消化池底部管路推荐安装联通管和多功能阀组,以方便调试和运行中实现多种不同的工艺目的。

为了保证大型消化池的稳定连续运行,避免出现频繁清池重启的情况,应当特别重视消化池的排渣、消泡、排砂工作,正确选择消化池附属设备,包括观察窗、消泡装置、浮渣排放门和安全阀等。目前辅助设备的设置在德国已有数十年的使用业绩,国内包括案例工程在内的多个项目的工程实践证明消化池附属设备是可靠和有效的。

本文以工程运行经验介绍与分析为主,科学性有待进一步研究探讨。

参考文献:

- [1] 胡子健. 中国城乡建设统计年鉴—2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021
- [2] 李雄伟, 李俊, 李冲, 等. 我国污泥处理处置技术应用现状及发展趋势探讨 [J]. 中国给水排水, 2016, 32(16): 26 - 30 + 35.
- [3] Kelessidis A, Stasinakis A S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries [J]. Waste Management, 2012, 32(6): 1186 - 1195.
- [4] 李琳. 污泥厌氧消化技术发展应用现状及趋势 [J]. 中国环保产业, 2013, (08): 57 - 60.
- [5] 建设部, 国家环境保护总局, 科技部. 城市污水处理及污染防治技术政策 [J]. 环境保护, 2000(09): 8 - 9.
- [6] 蒋玲燕. 污水处理厂污泥厌氧消化优化设计与运行探讨 [J]. 给水排水, 2015, 51(02): 32 - 35.
- [7] 王涛, 王鑫洁. 污泥厌氧消化技术现状及应注意的问题 [J]. 中国环保产业, 2013, (05): 49 - 54 + 58.
- [8] 王海东, 张文存, 王丽莉, 等. 污泥厌氧消化预处理技术综述 [J]. 应用化工, 2021, 50(07): 1973 - 1977.
- [9] 芦汉超. 机械搅拌厌氧消化池流态研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [10] 陈永祥, 伍军, 石亚军, 等. 卵形消化池的工艺设计 [J]. 工业用水与废水, 2004, (03): 46 - 48.