

强化生物滴滤技术深度治理大型城镇污水处理厂恶臭气体

鞠庆玲, 刘启凯, 冯 润
(西原环保(上海)股份有限公司, 上海 201204)

摘要: 为了解决城镇污水处理厂恶臭污染日益严峻,以及常规除臭技术难以深度去除产生的恶臭气体的问题,以市政污水处理厂调配水井收集的 H_2S 为研究对象,研究了一种添加微生物活性促进剂的一体化生物滴滤塔除臭技术,探究其工艺影响因素,并在大量研究数据的基础上,提出相关设计参数指导建议。结果表明:1)当进口臭气风量为 $3\ 000\ m^3/h$,进口处 H_2S 的质量浓度为 $152\sim 304\ mg/m^3$ 时,空床停留时间仅为 $8.6\ s$,强化生物滴滤塔的 H_2S 去除率可达 99.9% ,脱硫负荷(以 H_2S 计)可达 $62\ g/(m^3\cdot h)$ 以上;2)强化生物滴滤塔添加生物促进剂可以缩短微生物驯化周期约 60% ,并在极低的 pH 条件 ($pH\leq 1.5$) 下长期稳定运行;3)以城镇污水处理厂臭气进口处 H_2S 的质量浓度为 $180\ mg/m^3$ 为例,设计空床停留时间(empty bed residence time, EBRT)为 $17\ s$,强化生物滴滤塔 H_2S 去除率可达 99.9% ,设备整体占地面积及体积均可减少 $30\%\sim 50\%$,为生物滴滤技术的实际应用提供参考价值。

关键词: 生物滴滤塔; 生物除臭; 空床停留时间; 微生物活性促进剂; 城镇污水处理厂; 硫化氢
中图分类号: X 512 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-0037(2023)12-1368-07
doi: 10.11936/bjutxb2023070035

Strengthening Biotrickling Technology for Deep Treatment of Odor Gas in Large Urban Sewage Treatment Plants

JU Qingling, LIU Qikai, FENG Run
(Nishihara Environment Protection (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201204, China)

Abstract: To solve the problem that the odor pollution of urban sewage treatment plants is becoming more and more serious and the conventional deodorization technology is difficult to remove the malodorous gas, an integrated biotrickling filter with a microbial activity promoter was used to treat H_2S from a municipal wastewater treatment plant. The treatment performance was studied, and the influencing factors of the process were also investigated. Based on a large amount of research data, relevant design parameters guidance suggestions were put forward. Results show that when the imported odor air volume is $3\ 000\ m^3/h$ and the imported H_2S concentration is in the range of $152\sim 304\ mg/m^3$, the empty bed residence time (EBRT) is only $8.6\ s$, the H_2S removal rate of the enhanced biotrickling filter tower can reach 99.9% , and the deodorization load (as H_2S) can reach up to $62\ g/(m^3\cdot h)$ and above. The enhanced biotrickling filter with biological promoters can shorten the acclimation period of microorganisms by about 60% and operate stably for a long time at very low pH ($pH\leq 1.5$). Taking an urban sewage treatment plant with an imported H_2S concentration of $180\ mg/m^3$ as an example, the H_2S removal rate of the enhanced biotrickling filter can reach 99.9% when the EBRT is designed only for $17\ s$. The overall

收稿日期: 2023-07-26; 修回日期: 2023-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170114)

作者简介: 鞠庆玲(1976—), 女, 高级工程师, 主要从事恶臭气体处理技术方面的研究, E-mail: trorange@126.com。

area and volume of the equipment can be also reduced by 30% - 50%, which provides a reference value for the practical application of biotrickling technology.

Key words: biotrickling filter; biological deodorization; empty bed residence time; microbial activity promoter; urban sewage treatment plant; hydrogen sulfide

近年来,随着城乡基础设施建设的完善,城镇污水处理厂的数量与日俱增。截至2021年,全国城市污水处理厂已有2827座,污水处理率达97.89%^[1]。城镇污水处理厂在运行过程中会释放出大量的恶臭物质,这些物质成分复杂,具有易挥发性、腐蚀性和刺激性强等特点,严重影响污水处理厂工作人员以及周围人们的身体健康,居民环境受到严重的威胁^[2-5]。其中,恶臭物质排放质量浓度相对较高的单元为预处理工段(例如格栅和初沉池等)、厌氧工段及污泥处理工段^[6-9],并且主要恶臭物质为硫化氢(H_2S),因为其气味阈值较低,所以对周围环境的影响十分严重^[10]。因此,随着人们对环境质量和身体健康的日益关注,高效恶臭控制技术需求尤为迫切。

恶臭污染物治理工艺主要可以分为物理法、化学法及生物法。与其他恶臭治理方法相比,生物法具有成本低、二次污染小、工艺条件温和、生态友好等优势,因此成为城镇污水处理厂中最为广泛应用的恶臭治理技术,并且生物法对 H_2S 的处理效率极高,一般能够达到90%以上^[11-16]。然而,生物法通常存在设备体积及占地面积较大、微生物驯化时间较长的问题,并且在长期运行过程当中,生物填料会由于填料层压实而影响处理效果^[17-18]。同时,近年恶臭污染物排放标准大幅度提高,常规生物技术已经无法满足目前的深度除臭需求。

针对以上恶臭处理过程中存在的问题,本研究在前期开发的炭质填料高效生物滴滤技术的基础上,通过塔体结构模块化优化设计和添加自主研发的微生物活性促进剂的方式开发了一种强化生物滴滤塔,大大减小了设备体积和占地面积,并以华东地区某大型城镇污水处理厂预处理工段的恶臭气体为处理对象进行了试验研究,通过监测对除臭效率、运行工况规律、运行能耗等参数进行了总结分析,为强化生物滴滤塔处理城镇污水厂恶臭污染的实际应用提供理论指导与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 项目概况

华东地区某大型城镇污水处理厂因提标改造,

需对各污水处理构筑物产生的恶臭污染物进行脱臭处理,以满足相应的地方大气污染物排放标准。污水处理厂的工作流程见图1,本研究从调配水井处使用风机将恶臭气体引入试验装置,其 H_2S 的质量浓度较高,一般维持在 $152 \sim 304 \text{ mg/m}^3$,最高可达 759 mg/m^3 。

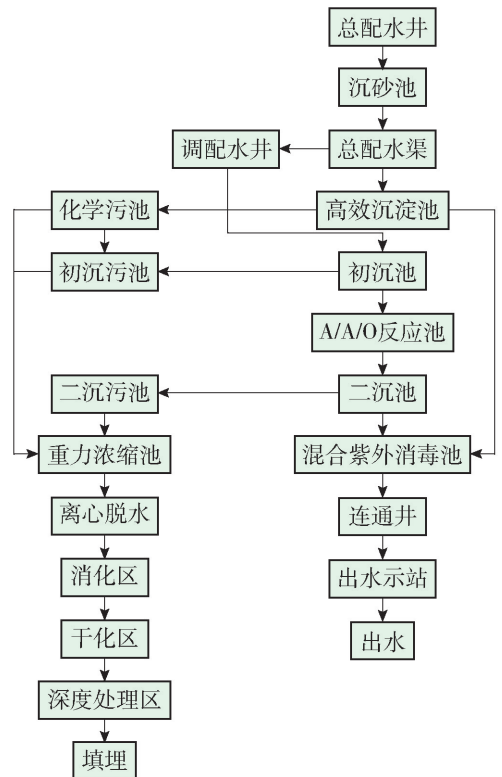


图1 污水处理厂工艺流程及恶臭进气源

Fig. 1 Process flow chart and odor intake source of sewage treatment plant

1.2 试验装置及方法

本试验通过在污水处理厂现有除臭装置进风管处增设旁路,引出一定风量臭气至试验系统进行脱臭处理。试验装置共分为试验塔和对照塔2套,试验装置规格相同,试验塔则是在运行过程中添加了由尿素、铁盐,以及腐植酸与氮、磷、钾和中微量元素螯合而组成并按照一定比例配制而成的微生物活性促进剂。单座塔体规格为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,内置2座水箱。其中第1层填料循环喷淋液流入与其连通的水箱;第2层填料内的循环喷淋液经过竖直导流管

进入另一座水箱。第1层与第2层喷淋水经过这2座相互隔离的水箱。臭气经过第1层填料后穿过正中间的布气器,再经过第2层填料后排出。第1层循环喷淋液经喷头喷洒在第1层填料后经重力作用汇入连通的水箱,然后再经水泵的提升作用由水箱再次进入喷淋管道循环往复;第2层循环喷淋液喷洒在第2层填料后,在导流管的作用下汇入另一座密闭水箱中。塔体中间的布气器可以将第2层的循环喷淋液和臭气分开。试验初期,以厂区污水处理工段中的活性污泥对填料层进行微生物接种。运行过程中,微生物活性促进剂需要在设备启动阶段和运行阶段持续定量添加,添加频率与设备补排水频率同步,即在排水后将微生物活性促进剂添加至设备中。除试验塔单独添加微生物活性促进剂外,其他运行参数相同,2套设备同步运行,进口处臭气风量为 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 。

塔体设备实物图和检测采样口示意图2,对照塔与试验塔均设置2层炭质生物填料层,上下2层循环喷淋系统独立运行。试验塔和对照塔分别设有进口取样口和6个不同厚度层取样口,该6个出口检测口均匀布置在塔体的不同高度,试验以 H_2S 为特征污染物,通过检测不同位置的 H_2S 质量浓度以探究填料层内 H_2S 的去除规律。 H_2S 的质量浓度采用手动气体采集泵(型号GV-100S)通入气体检测管检测,同时,试验过程中采用pH在线仪表(Eco-Sens系列)对循环喷淋水的pH指标和温度进行实时监测。

2 结果与讨论

2.1 生物滴滤塔的启动

试验装置运行启动期,微生物驯化期间 H_2S 进出口的质量浓度及去除率变化情况见图3。当进口处 H_2S 的质量浓度不变的情况下, H_2S 去除率处于稳定状态即认为装置启动完成。由图3中 H_2S 进出口的质量浓度及去除率变化曲线可以明显看出,对照塔共计耗时23 d完成微生物驯化过程, H_2S 去除情况达到稳定状态,而试验塔仅耗时9 d即达到稳定效果,试验塔整体微生物驯化周期远远短于对照塔。

在环境温度较低($10\ ^\circ\text{C}$ 以内)的工况条件下,生物滴滤塔微生物驯化周期相对较长且污染物处理效果相对较差。Wu等^[19]探究了在 $-1\sim 10\ ^\circ\text{C}$ 条件下生物滤塔对 H_2S 的去除效果,研究表明,当空床停留时间(empty bed residence time,



(a) 实物

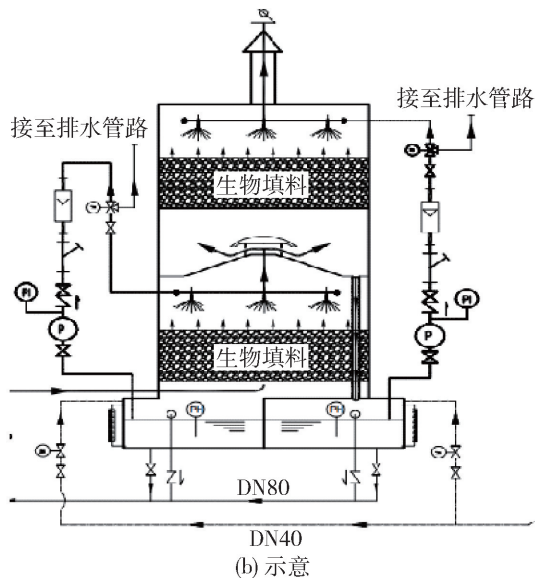


图2 塔体设备实物和示意

Fig.2 Schematic diagram of the section and the location of sampling port of control tower and test tower

EBRT)为13 s时, H_2S 的去除效率波动较大,在启动期的处理效果最低仅为51%,当运行温度较高时, H_2S 的处理效果较好。本研究通过添加自主研发的微生物活性促进剂,可以有效提升处理装置中活性污泥的微生物的活性,加快微生物生长繁殖进程,提升生物滴滤塔的处理效率。试验结果证明试验塔中微生物驯化周期显著缩短,可在恶劣工况条件下迅速实现生物滴滤塔对 H_2S 气体的高效处理。

2.2 处理工况对恶臭处理效果的影响

试验过程中,对照塔与试验塔除进口取样口外,在塔体不同位置均匀设置了6个取样口,分别对应

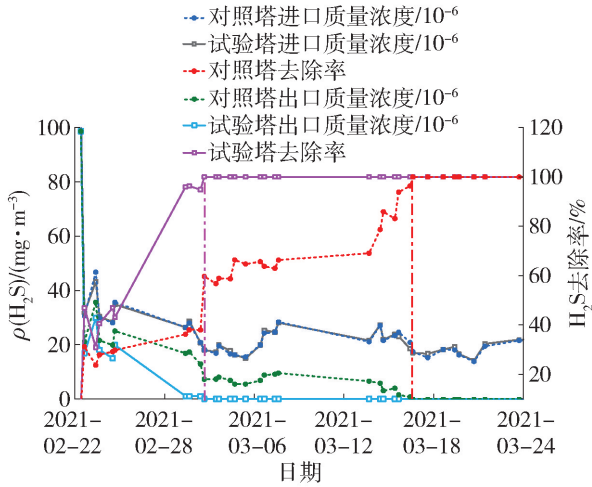
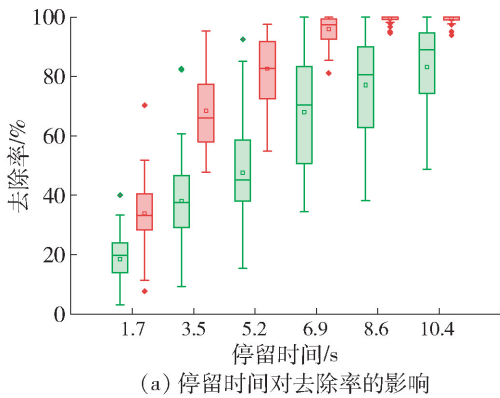
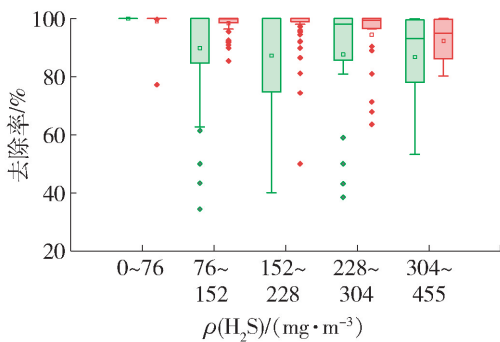


图 3 微生物驯化期间 H₂S 的质量浓度及去除率变化
Fig. 3 Variation of the concentration and removal rate of H₂S during microbial domestication

不同的 EBRT。图 4 显示了在进口处相同 $\rho(\text{H}_2\text{S})$ 的条件下(稳定运行阶段), 对照塔与试验塔对 H₂S 去除率随 EBRT 变化规律, 以及 EBRT = 6.9 s 条件下对照塔与试验塔去除率随进口处 $\rho(\text{H}_2\text{S})$ 的变化规律。



(a) 停留时间对去除率的影响



(b) 进气浓度对去除率的影响

■ 对照塔 ■ 试验塔

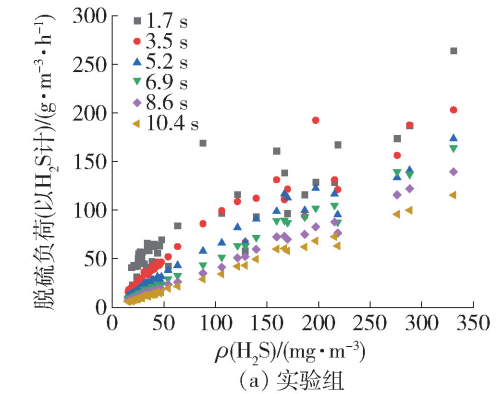
图 4 不同工况条件对 H₂S 去除率的影响

Fig. 4 Effect of operating conditions on removal efficiency of H₂S

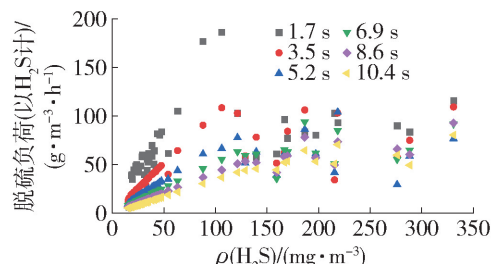
由图 4 可见, 随着 EBRT 的增加, 对照塔与试验塔的 H₂S 去除率均呈现上升趋势, 且在相同条件下, 试验塔的 H₂S 去除率始终高于对照塔, 结果表明, 在相同工况条件下, 添加微生物活性促进剂后生物滴滤塔对 H₂S 的处理能力显著提高。在进口处 $\rho(\text{H}_2\text{S})$ 为 93 ~ 332 mg/m³ 水平条件下, EBRT 为 8.6 s, 对照塔 H₂S 的平均去除率为 77.10%, 试验塔 H₂S 的平均去除率超过 99.43%。由此可以看出, 在添加微生物活性促进剂后, H₂S 的去除效果有了明显的提升。Ben Jaber 等^[20] 探究了不同营养液添加条件下硫化氢、二甲基二硫醚和乙硫醇的处理效果, 研究结果表明, 随着营养液含量的增加, 乙硫醇的去除率从 80% 增加到 100%, 营养液对微生物活性的提高有着显著的促进作用。

2.3 脱硫负荷情况对比

图 5(a) (b) 分别显示了当进口处 $\rho(\text{H}_2\text{S})$ 为 15 ~ 334 mg/m³ 时, 不同 EBRT 条件下, 对照塔与试验塔脱硫负荷(以 H₂S 计)随进口 $\rho(\text{H}_2\text{S})$ 变化情况。同时, 当 EBRT 分别为 6.9、8.6、10.4 s 时, 对进口处 $\rho(\text{H}_2\text{S})$ 与脱硫负荷关系曲线进行线性拟合, 其结果见表 1。



(a) 实验组



(b) 对照组

图 5 不同 EBRT 条件下进口 $\rho(\text{H}_2\text{S})$ 与脱硫负荷关系

Fig. 5 Relationship between the inlet concentration and desulfurization load under different EBRT

表1 不同EBRT条件下进口处 H_2S 的质量浓度与脱硫负荷关系曲线线性拟合结果对比Table 1 Comparison of linear fitting results of the relationship between inlet H_2S concentration and desulfurization load under different EBRT conditions

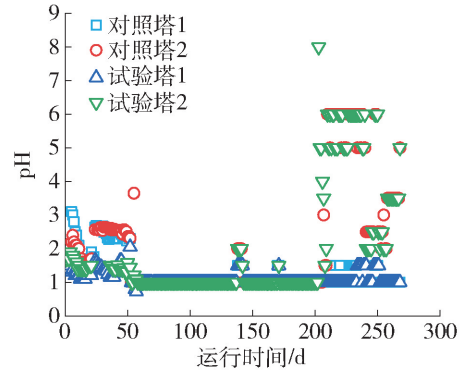
项目	拟合方程			相关性系数 R^2		
	$t=6.9\text{ s}$	$t=8.6\text{ s}$	$t=10.4\text{ s}$	$t=6.9\text{ s}$	$t=8.6\text{ s}$	$t=10.4\text{ s}$
对照塔	$y=0.399x+10.351$	$y=0.399x+6.371$	$y=0.364x+4.663$	0.808	0.904	0.916
试验塔	$y=0.737x+1.477$	$y=0.626x+0.204$	$y=0.516x+0.205$	0.991	0.994	0.994

由图5可以看出,对于单一对照塔或试验塔,在不同EBRT条件下,进口处 $\rho(H_2S)$ 与脱硫负荷间均呈现一定的正比关系,随EBRT的延长,脱硫负荷整体呈现下降的趋势,而脱硫负荷与进口处 $\rho(H_2S)$ 的线性度增加。结合表1数据,当 $\rho(H_2S)$ 为 $15\sim 334\text{ mg/m}^3$,EBRT $>6.9\text{ s}$ 时,试验塔线性相关系数 R^2 均高于0.99,而对照塔的线性相关系数 R^2 相对较低。试验塔的进口处 $\rho(H_2S)$ 与脱硫负荷间的线性关系明显优于对照塔,整体线性度高、离散程度低,同时结合图3可以看出,试验塔的去除效果和稳定性都优于对照塔,且在相同 $\rho(H_2S)$ 条件下,试验塔的脱硫负荷显著高于对照塔。结果表明,微生物活性促进剂能够有效提高生物滴滤塔脱硫负荷,且整体运行更为稳定。

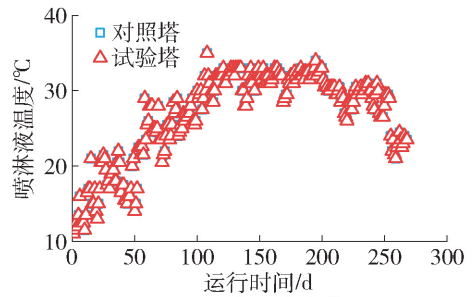
2.4 pH及温度变化情况

试验运行过程中对对照塔及试验塔循环喷淋水的pH和温度进行监测,其变化情况如图6所示。从微生物驯化周期至系统稳定运行,生物塔循环喷淋水pH整体呈现明显的先下降后逐渐稳定的趋势,最终保持在pH为 $1.0\sim 1.5$,在极端酸性环境条件下可以实现 H_2S 的高效去除,这是由于硫氧化菌为一种嗜酸菌,能够在酸性条件下将 H_2S 转化为其他价态的硫元素。

对比对照塔与试验塔的循环喷淋水pH变化情况,运行过程中,试验塔的循环喷淋水pH始终低于对照塔,且试验塔pH变化趋于稳定速度明显快于对照塔。与此同时,生物滤塔下层喷淋液(喷淋灌1)比上层喷淋液(喷淋灌2)的pH要更低一些,结合图4可以看出,下层生物滴滤塔对 H_2S 的去除占比更大,转化的 H_2S 也更多一些,因此pH也更低。对比结果表明在相同工况条件下,微生物活性促进剂可以显著提升除臭微生物的极端酸性环境适应能力,加快其驯化和生长繁殖进程,提高恶臭污染物处理能力。此外,生物滴滤塔运行过程中无需额外添加化学试剂调节系统pH,减少了大量化学药剂的消耗。



(a) 喷淋液pH变化



(b) 运行温度变化

图6 运行过程中pH及温度变化情况

Fig. 6 Variation of pH value and temperature during the process

3 设计参数指导意见

3.1 EBRT设计建议

为了对比2座生物滴滤装置的处理稳定性,采用统计学概率进行了数据处理与对比。通过试验数据统计得到对比塔(或试验塔)在进口处不同 $\rho(H_2S)$ 条件下完全去除 H_2S 的概率值,见图7。图7显示了稳定运行时, $\rho(H_2S)$ 和EBRT工况条件的改变对生物滴滤塔去除效率的影响。试验塔和对照塔在不同EBRT条件下实现 H_2S 完全去除的概率分布占比情况,抽样误差为 $\pm 5\%$,置信水平为95%。

从单一对照塔或试验塔来看,进口处 $\rho(H_2S)$ 越高,所需的最短EBRT越长。对比对照塔与试验塔的数据可知,在相同进口质量浓度的条件下,试验塔在相对更短的EBRT内实现 H_2S 完全去除的概率显

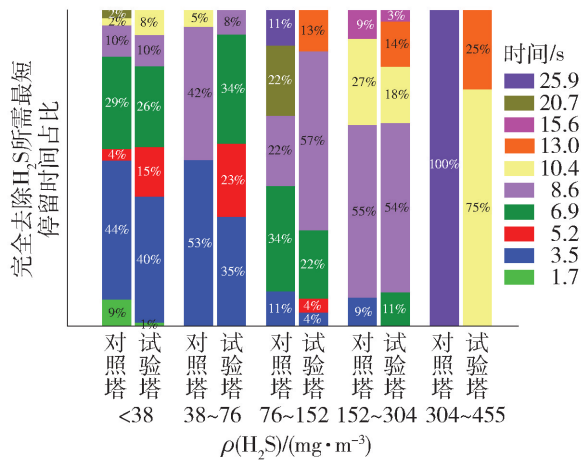


图 7 不同 EBRT 条件下进口处不同 $\rho(H_2S)$ 实现 H_2S 完全去除概率分布

Fig. 7 Probability distribution of complete removal of H_2S with different inlet H_2S concentration ranges under different EBRT conditions

著提高。当进口处 $\rho(H_2S) = 152 \text{ mg/m}^3$ 时, 试验塔在 EBRT 为 13 s 就可以将 H_2S 完全处理, 而对照塔只有不到 70% 概率完全处理。

基于大量现场试验数据, 并考虑 30% 的安全系数, 表 2 给出进口处不同 $\rho(H_2S)$ 范围条件下, 生物滴滤塔的 EBRT 工作工况的设计建议。强化生物滴滤技术可以显著缩短实现 H_2S 完全去除所需最短 EBRT, 即除臭设备整体占地面积及体积的减小。因此, 添加微生物活性促进剂能够显著降低除臭设备的基础投资, 在工程应用上具有重大的实际意义。

表 2 不同进口 H_2S 质量浓度范围所需最短 EBRT 设计建议

Table 2 Suggestions on the design of the minimum EBRT required for different ranges of inlet H_2S concentration

$\rho(H_2S)/$ ($mg \cdot m^{-3}$)	最短 EBRT/s		建议 EBRT/s	
	对照塔	试验塔	对照塔	试验塔
<math>< 38</math>	3.5 ~ 6.9	3.5 ~ 6.9	9	5
$38 \sim 76$	3.5 ~ 8.6	3.5 ~ 6.9	11	8
$76 \sim 152$	6.9 ~ 20.7	6.9 ~ 13	25	13
$152 \sim 304$	20.7 ~ 25.9	8.6 ~ 13	30	17
> 304	25.9	10.4 ~ 13	34	20

3.2 运维成本及效益分析

以城镇污水处理厂臭气风量 $15\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, 进口处 $\rho(H_2S) = 180 \text{ mg/m}^3$ 为例, 设计 EBRT 为 17 s, 强

化生物滴滤塔 H_2S 去除率可达 99.9%, 即 H_2S 年处理量可达 23.89 t (1 a 以 365 d 计)。且强化生物滴滤塔由于其大幅度缩短的 EBRT, 设备整体占地面积及体积均可减少 30% ~ 50%。相同生物除臭设备尺寸条件下, 强化生物滴滤塔脱硫量显著增大。

设备运行过程中可采用城镇污水处理厂回用的处理水作为循环喷淋水, 产生的少量废水可直接排入污水处理系统, 提高了水资源利用率, 减少水资源的消耗, 进而节约了此部分的运行费用。运行过程中的费用基本为电费及微生物活性促进剂药剂费, 在上述工况条件下, 运行电费约为 25 万元/a (以工业用电 1 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$), 运行系数 0.85 计), 微生物活性促进剂药剂费约为 1.98 万元/a。若采用化学法处理上述恶臭气体, 除运行电费外, 还需额外消耗质量分数为 30% NaOH 溶液约 127 kg/d, 以市场价 1.5 元/kg 计, 仅化学药剂费用达 6.95 万元/a。

因此, 在相同城镇污水处理厂恶臭污染工况条件下, 采用强化生物滴滤塔进行脱臭处理节能降耗效果明显, 具有极高的经济及环境效益。

4 结论

1) 当进口处臭气风量为 $3\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, $\rho(H_2S)$ 为 $152 \sim 304 \text{ mg/m}^3$, 添加微生物活性促进剂的强化生物滴滤塔 EBRT 仅为 8.6 s 时, H_2S 去除率即可达 99.9%, 脱硫负荷达 $62 \text{ g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 以上。

2) 强化生物滴滤塔缩短了恶臭处理过程反应器的启动周期, 微生物驯化周期缩短约 60%。同时保证了在极低的 pH 条件 ($\text{pH} \leq 1.5$) 下长期稳定运行, 节约化学药剂消耗。

3) 强化生物滴滤塔能够实现 H_2S 的深度处理, 并且缩短 H_2S 完全去除时的 EBRT, 可使设备整体占地面积及体积减少 30% ~ 50%, 改善了传统生物处理法占地面积较大的问题, 实现了除臭装置小型化的目标。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2021 年城乡建设统计年鉴 (2022-10-12) [EB/OL]. [2023-08-20]. <https://www.mohurd.gov.cn/ess/?ty=a&query=%E5%B9%B4%E9%89%B4&ukl=&uka=&ukf=%E5%B9%B4%E9%89%B4&ukt=&sl=&ts=&te=&upg=1>

[2] LIU J W, KANG X Y, LIU X L, et al. Simultaneous removal of bioaerosols, odors and volatile organic

- compounds from a wastewater treatment plant by a full-scale integrated reactor [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 144 (12): 2-14.
- [3] REN B M, ZHAO Y Q, LYCZKO, N, et al. Current status and outlook of odor removal technologies in wastewater treatment plant [J]. *Waste & Biomass Valorization*, 2019, 10 (6): 1443-1458.
- [4] LEWKOWSKA P, CIESLIK B, DYMERSKI T, et al. Characteristics of odors emitted from municipal wastewater treatment plant and methods for their identification and deodorization techniques [J]. *Environmental Research*, 2016, 151 (11): 573-586.
- [5] 努娜, 邱楠, 程琳. VO₃/锐钛矿 TiO₂(101)面 NH₃ 选择催化还原 NO 反应机理 DFT 研究[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(3): 217-224.
- NU N, QIU N, CHENG L. DFT study on the mechanism of NH₃ selective catalytic reduction of NO on VO₃/ Anatase TiO₂ (101) surface [J]. *Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 42(3): 217-224. (in Chinese)
- [6] LIU Z Y. Urban sewage treatment odor gas release characteristics and regional differences [J/OL]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 21: 101190 [2023-09-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186420314905>.
- [7] GEBICKI J, BYLIŃSKI H, NAMIENIK J. Measurement techniques for assessing the olfactory impact of municipal sewage treatment plants[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 188(1): 1-15.
- [8] BYLIŃSKI H, BARCZAK R J, GEBICKI J, et al. Monitoring of odors emitted from stabilized dewatered sludge subjected to aging using proton transfer reaction-mass spectrometry [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(1): 5500-5513.
- [9] 薛勇刚, 章婷婷, 戴晓虎, 等. 南方城市污水处理厂恶臭污染源调查与分析[J]. *给水排水*, 2014, 50(9): 28-32.
- XUE Y G, ZHANG T T, DAI X H, et al. Municipal wastewater treatment plant odor source survey and analysis in South China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 50(9): 28-32. (in Chinese)
- [10] DINER F, DINER F K, SAR D, et al. Dispersion modeling and air quality measurements to evaluate the odor impact of a wastewater treatment plant in zmir - ScienceDirect [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, 11(12): 2119-2125.
- [11] ESTRADA J M, KRAAKMAN N, MUNOZ R, et al. A comparative analysis of odour treatment technologies in wastewater treatment plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(3): 1100-1106.
- [12] TALAIEKHOZANI A, BAGHERI M, GOLI A, et al. An overview of principles of odor production, emission, and control methods in wastewater collection and treatment systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170(4): 186-206.
- [13] HAO W, YAN H, YUE Q, et al. Recent progress and perspectives in biotrickling filters for VOCs and odorous gases treatment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 222(9): 409-419.
- [14] QIU X, DESHUSSES M A. Performance of a monolith biotrickling filter treating high concentrations of H₂S from mimic biogas and elemental sulfur plugging control using pigging[J]. *Chemosphere*, 2017, 186: 790-797.
- [15] BINDRA N, DUBEY B, DUTTA A. Technological and life cycle assessment of organics processing odour control technologies [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 527/528(9): 401-412.
- [16] MUDLIAR S, GIRI B, PADOLEY K, et al. Bioreactors for treatment of VOCs and odours-a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(5): 1039-1054.
- [17] 娄阁, 陈思. 三维针织/机织混合聚氨酯基复合材料的压缩性能研究. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(3): 252-256.
- LOU G, CHEN S. Study on compression properties of three-dimensional knitted/woven hybrid polyurethane matrix composites [J]. *Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 42(3): 252-256. (in Chinese)
- [18] HAN M F, WANG C, YANG N Y, et al. Performance enhancement of a biofilter with pH buffering and filter bed supporting material in removal of chlorobenzene [J/OL]. *Chemosphere*, 2020, 251: 126358 [2023-09-13]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126358>.
- [19] WU D, HOU J Q, WANG X F, et al. Biological removal of high concentration of hydrogen sulfide at low temperature in a compost-based biofilter [J]. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2021, 24(4): 565-572.
- [20] BEN JABER M, ANET B, AMRANE A, et al. Impact of nutrients supply and pH changes on the elimination of hydrogen sulfide, dimethyl disulfide and ethanethiol by biofiltration [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 258: 420-426.