

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.23.014

泡沫发生器数值模拟优化及其阻隔异味物质的效果

陈智翀, 李秋月, 顾昊, 潘涛, 令狐珊珊, 陈秀荣
(华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: 泡沫喷施覆盖技术是解决水体底泥清淤臭气释放、阻隔污水厂面源臭气逸散、控制土壤修复异味的一种新方法。然而以往的参数设计使得泡沫发生器对于高黏度泡沫液难以形成均质的泡沫。以射流式泡沫发生器为基础,设置2 mm孔径的出口多孔网,利用数值模拟进行优化设计。分布云图表明,进气压力对气液混合效果影响不大;气液比为6:1时,气液混合效果明显提高,边缘液相占比为22.5%;进一步调整喉管长度为180 mm,射流出的泡沫混合更加均匀,边缘液相占比提高至44.1%。优化后的泡沫发生器可以实现气液两相充分混合,气液均质泡沫从出口流出,对典型臭气成分如二甲基二硫醚、硫化氢、氨气的阻隔效果均大于95%,污染物逸散量分别降低66.5%、65.8%、40.2%。

关键词: 异味物质; 泡沫发生器; 气液比; 喉管长度; FLUENT; 数值模拟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)23-0088-07

Numerical Simulation Optimization of Foam Generator and Its Application in Blocking Odorous Substances

CHEN Zhi-chong, LI Qiu-yue, GU Hao, PAN Tao, LINGHU Shan-shan,
CHEN Xiu-rong

(School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Foam spray technology has been applied to control odorous substances releasing from sediment in water bodies, contaminated soil, and non-point sources in sewage treatment plants. However, the previous design of the foam generator was difficult to form homogeneous foam for high-viscosity foaming liquid. In this study, numerical simulation was used to optimize the design of the jet foam generator with a 2 mm aperture outlet porous network. The distribution cloud diagram showed that the inlet pressure has little influence on the gas-liquid mixing effect. But, the proportion of the edge liquid phase increased to 22.5% showed that the gas-liquid mixing effect was obviously improved, when the gas-liquid ratio was 6:1. By further adjusting the length of the throat to 180 mm, the foam produced was mixed more evenly, and the proportion of the edge liquid phase was increased to 44.1%. The optimized foam generator could release thoroughly mixing of the gas phase and the liquid phase, then the homogeneous foam flew out of the outlet. And the foam could block 95% of dimethyl disulfide, hydrogen sulfide, and ammonia, which were typical odorous substances, and the emission amount of pollutants

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1806104)

通信作者: 陈秀荣 E-mail: xrchen@mail.ecust.edu.cn

decreased by 66.5%, 65.8%, and 40.2% respectively.

Key words: odorous substance; foam generator; gas-liquid ratio; throat length; FLUENT; numerical simulation

恶臭物质散发是环境治理伴生的污染问题,如河道清淤时的底泥暴露面、污水厂中剩余污泥处理处置环节和受到污染的水面产生的硫化氢、氨气等逸散,以及农药场地土壤修复扰动过程中二甲基二硫醚、对二甲苯的挥发等^[1]。通过喷施泡沫材料对异味物质进行控制是一种较为新颖的解决方法^[2],从液体转化为泡沫后能提高10%~75%的去除效果^[3]。但是,早期离子表面活性剂泡沫材料,如十二烷基硫酸钠抑制异味污染的同时本身也会留下污染,这使得绿色无污染的蛋白质基水性泡沫得到更多的重视^[4]。利用泡沫发生器制备泡沫相对便捷,适合于大面积使用,泡沫液的黏度、表面张力等特性影响着泡沫发生器管中气相和液相的混合^[5]。阻隔异味的泡沫材料需要高稳定性维持效果,通常是在蛋白质泡沫液中添加其他物质,以增加泡沫液黏度^[6]。然而,蛋白质泡沫液黏度的提高也会降低发泡能力^[7],泡沫发生器的气液参数、发泡结构等需要适当调整以保证泡沫质量。

泡沫发生器的发泡过程是由发泡剂溶液通过文丘里管喉部后的高速度紊流流动,高压气体由进气管进入,与发泡剂经充分搅拌后形成气泡体,最终从出口处流出泡沫,因而可以通过模拟流体优化泡沫发生器^[8]。罗佳琪等^[9]模拟黏度为20 mPa·s的发泡液,得出了最佳液相流量。按照发泡结构的不同可分为网式、孔隙式与挡板式泡沫发生器^[10]。刘宏生等^[11]研发了一种可调孔隙介质的泡沫发生器,其能实现特定场合、特定发泡剂的均匀高效喷施,但孔隙式泡沫发生器由于填充介质的存在,易造成内部结构堵塞。张维薇^[12]基于FLUENT对挡板式泡沫发生器的流场进行了分析,当管路倾角范围在85°~90°时产生泡沫流量最大且稳定性好,但挡板式泡沫发生器由于挡板阻力较大,容易造成出口泡沫能量不足。网式泡沫发生器^[13]通过压力气体将射流发泡基液体均匀地吹散到发泡网上形成连续泡沫,相比之下,其阻力较小,不易堵塞,更加适合高黏度蛋白质发泡液的泡沫喷施。

目前基于流体力学的计算方法,网式结构射流

泡沫发生器数值模拟研究较多关注黏度较小的流体^[14],而对应用于面源臭气阻隔的较高黏度蛋白质发泡液的研究较少。为此,通过改变气液两相流量与压力、喉管长度,结合分析喉管以及出口处液相分布云图,优化得到较高黏度蛋白质基水性泡沫最佳泡沫喷施参数和结构,并通过将泡沫喷施在模拟污染污泥上,验证其阻隔效果。

1 几何模型建立与网格划分

1.1 模型建立

射流式泡沫发生器借鉴射流曝气器^[15]进行设计,应用的泡沫液参数:黏度<3 000 mPa·s,表面张力为17.5~40 mN/m, Zeta电位为12~25 mV,密度为950~1 050 kg/m³,含固率<5%。利用SOLIDWORKS建模,在扩散管截面沿着中心均匀设置57个直径为2 mm、深度为1 mm的孔,形成多孔网状结构,其几何结构模型如图1所示。

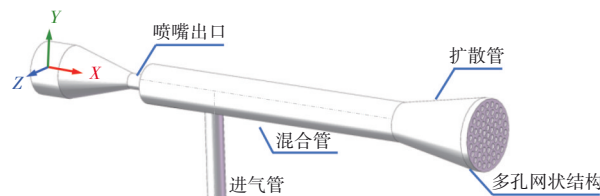


图1 射流多孔式泡沫发生器几何结构示意图

Fig.1 Geometrical structure of jet porous foam generator

1.2 网格划分

将构建好的几何模型导入ICEM,采用混合网格对泡沫发生器内部流域进行网格划分,对主体结构采用结构化网格来划分,对扩散管出口的多孔网状结构采用非结构化网格来划分。其中,结构化网格采用两次O型剖分,数量为258 116个,其整体网格质量为0.45;非结构网格全局尺寸设置为1 mm,网格数量为125 775个,网格质量为0.35。

1.3 求解过程

利用FLUENT求解,设置Y轴方向重力加速度,采用基于压力的、绝对速度公式、瞬态时间求解器^[16]。采用Mixture模型^[17]对气、液流两相混合进行模拟,设置主相为液相,第二相为气相,气相和液相边界都为速度入口。结合现有泡沫喷施设备工作

参数,设置进气管压力为0.8 MPa,进气流量为10 m³/h;设置进液压力为0.5 MPa,进液流量为1 m³/h,且液相中混有2%的空气。选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,采用标准壁面函数(SWF)进行近壁处理。对此瞬态流数值模拟^[18],速度压力耦合采用Coupled方式,空间离散化梯度采用Least Squares Cell Based,压力采用PRESTO!的方式,动量、体积分数、湍流动能均采用First Order Upwind。设置收敛的绝对标准为 1×10^{-7} 。采用从all-zone计算的标准初始化,参考系相对于单元区域,时步数量设置为1 000步,时间步长设置为0.001 s,最大迭代数为20,以此进行数值模拟计算。通过建立 $Z=0$ 的等值面来分析气泵输送型射流式泡沫发生器的气液两相流速度、压力、流线分布、相分布。

1.4 异味物质阻隔率测定

模拟污泥按照土水质量比为1:1混合,再将含有二甲基二硫醚、硫化氢、氨水的混合溶液加入模拟污泥中,混合均匀后最终形成模拟异味污泥,同时采集污泥上方空气并测定此时阻隔前异味物质浓度,喷施泡沫后每隔一段时间采样并测定空气中异味物质浓度,异味物质阻隔率计算公式如下:

$$w = 1 - \frac{C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: w 为异味物质阻隔率,%; C_t 为 t 时刻异味物质浓度,mg/m³; C_0 为阻隔前异味物质浓度,mg/m³。

2 气液两相流量与压力的优化

2.1 不同进气压力下的气液混合效果

保持进液压力、速度与进气速度不变,改变进气压力分别为0.2、0.5、0.8 MPa并进行数值模拟。在上述进气压力下,两相最大速度分别为30.65、30.66、30.65 m/s。在单纯改变进气压力的条件下,射流液体在喉管内主要集中在底部,并基本沿着多孔网状结构的中心位置流出,说明此网状结构对气液混合有很大的促进作用。但是,在其他操作条件不变的情况下,单纯改变进气压力对整体的液体射流与气液混合影响不大。

2.2 不同入口气液比下的气液混合效果

泡沫发生器的另一个关键操作参数为气相和液相的入口速度,在宏观上表现为气液两相的入口气液比。保持进气压力为0.8 MPa与进液压力为0.5 MPa不变,同时保持进气速度不变,即保持进气流量始终为10 m³/h(进气速度为24.561 m/s),改变

进液流量为1、1.25、1.67、2.5、5 m³/h(相应的进液速度为0.306、0.382、0.510、0.765、1.530 m/s),此时两相的入口气液比为10:1、8:1、6:1、4:1、2:1。

通过 $Z=0$ 的等值面分析不同入口气液比下的液相分布。当气液比为10:1时,射流液体流速较低,动能明显不足,自身的流动受高压空气的影响较大,在靠近进气管一侧几乎没有液体流动,气、液混合不均匀。当气液比为8:1和6:1时,射流液体流经气液交汇处时,受竖直向上的高压气体影响开始分散流动,液体基本充满整个喉管。特别是在气液比为6:1时,气体对液体的分散作用更为明显,此时的液体分散在整个扩散管,最终经多孔网状结构加强气液混合作用后流出。当气液比为4:1和2:1时,液体流速较大,克服管道内能量损失后仍然能保持水平直射的状态,几乎没有与空气混合,基本保持着射流喷嘴入射前的两相含量,即含2%空气。

多孔网状结构对强化气液混合有很大的促进作用,但射流液体流速越大,强化气液混合作用越不明显,气液比为2:1时出口截面上仍有局部位置没有液体流出。在气液比为8:1、6:1和4:1的液相云图中,明显存在射流速度朝着竖直方向偏斜的情况。此现象的主要原因是射流液体的原动能消耗殆尽,又受重力影响,两者的合速度从水平方向开始偏移。由数值模拟结果可知,为了更好地实现气液混合,在保持此泡沫发生器结构不变的情况下,宜优先采用8:1和6:1的入口气液比。

在确定优选的两相入口气液比下,观察多孔网状结构出口截面液相分布,进一步确定最优气液比。其液相分布云图如图2所示。在气液比为8:1的条件下,射流液体经多孔网状结构的碰撞作用后,在出口截面仍然存在着液相分布不均的问题。射流液体主要集中在截面中心与上下两边,在截面左右两侧只有很少的射流液体存在,即在此条件下,射流液体无法从整个截面均匀流出,此时的气液混合效果必定不好。当气液比为6:1时,由于射流液体流速的提高,射流液体动能增大,在克服管内能量损失的情况下,受气体碰撞及相互作用影响较小,液相在出口截面分布不均的问题得到很大改善,整个截面都有射流液体流出。在截面中心部分液相占比较高,能达到73.5%,中心以外液相占比降低。总体而言,在气液比为6:1的情况下气液混合效果最好。

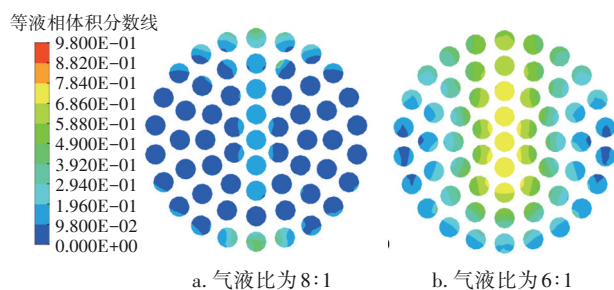


图2 不同气液比下泡沫发生器出口截面液相分布云图

Fig.2 Distribution cloud images of liquid phase at the outlet section of the foam generator with different inlet air-liquid ratios

2.3 不同入口气液比下泡沫的异味物质阻隔率

在不同入口气液比的条件下,泡沫阻隔异味物质的效果也有很大差异。当气液比为2:1和4:1时,泡沫中由于气体含量较少,形成的泡沫更加接近浆液状态,与数值模拟结果相同,因此泡沫能够形成阻挡异味物质逸散的阻隔层厚度会更薄(见图3),尤其是对氨气的影响最大,相比气液比为6:1时的最高阻隔率,气液比为2:1时的阻隔率下降了15.8%。对于气液比为8:1和10:1而言,三种物质的阻隔率与气液比为6:1时相差不大,平均相差0.63%,可能的原因是当气液比达到一定值后,管内混合已经能够形成含有足够气体的泡沫,出口截留面的差异在于出口泡沫均匀度,当喷施一定厚度的泡沫后总体上的阻隔效果并不会受到影响。

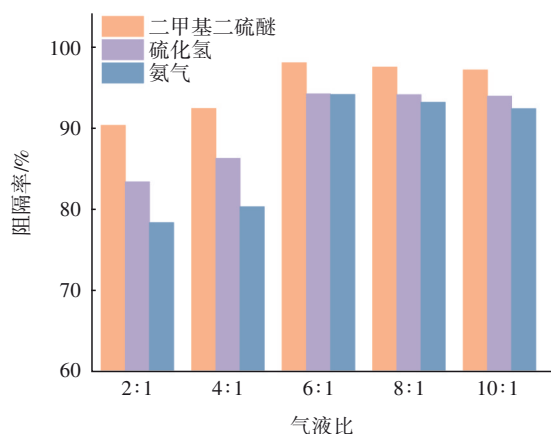


图3 不同入口气液比下的异味物质阻隔率

Fig.3 Blocking rate of odorous substances under different inlet gas-liquid ratios

3 喉管长度的结构参数优化

3.1 不同喉管长度下的混合效果

在前述的泡沫发生器操作参数模拟中,气液比为6:1时气液混合效果最好,但射流液体主要集中在

在中心部分,其占比达73.5%,而边缘的平均液相占比为22.5%,其截面液相出口需要进一步优化,以达到均匀流出的效果。分析认为,可通过改变泡沫发生器结构参数以达到优化目的,其中最关键的结构参数为泡沫发生器的喉管长度。此前设计的喉管长度为220 mm,喉管过长,会出现射流液体动能不足的问题;喉管过短,射流液体会沿着中心水平射出,这两种情况都会造成气液混合效果极差。因此,保持进气压力为0.8 MPa与进液压力为0.5 MPa不变,改变喉管长度分别为220、200、180、160、140 mm,以6:1的入口气液比进行数值模拟,得到Z等值面液相分布如图4所示。

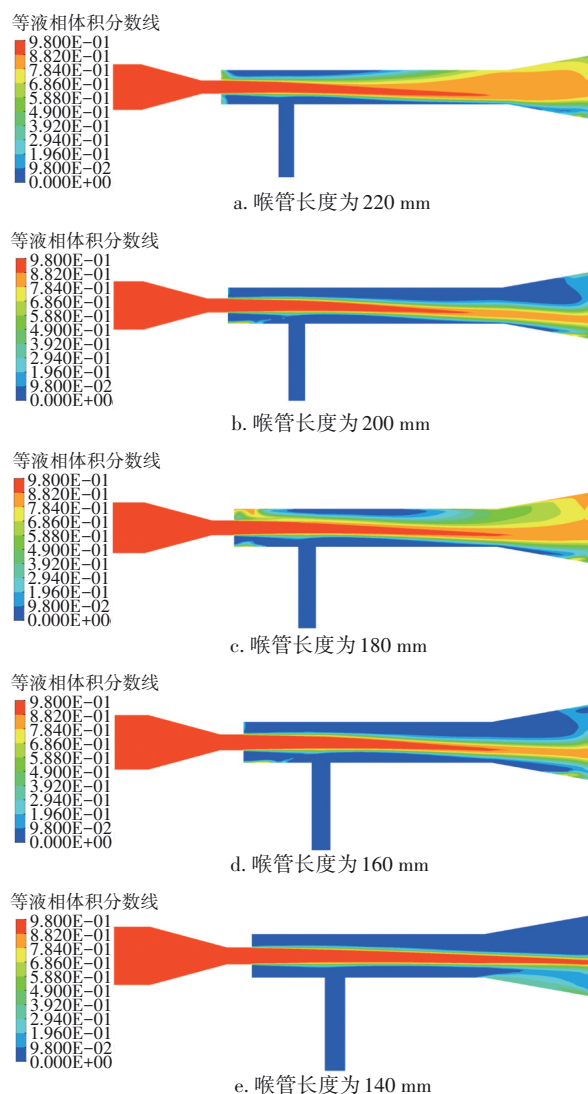


图4 不同喉管长度下泡沫发生器液相云图

Fig.4 Liquid phase cloud images of foam generator under different throat lengths

由图4可知,当喉管长度为220 mm时,扩散管

附近的液体射流速度较小,射流液体总体动能较小,受高压气体的影响较大,此时高压气体对液体的分散作用较强,与多孔网状结构的碰壁作用一起致使射流液体分散充满整个扩散管。当喉管长度减小时,射流液体阻力损失减小,在扩散管附近的射流液体动能增大,此时的射流液体受高压气体的影响较小,特别是喉管长度为140 mm时,靠近中心的射流液体仍然能保持原有的速度经过多孔网状结构。在这种情况下,射流液体部分水平直射流出,气液混合作用不明显。当喉管长度为160、180、200 mm时,出口截面处的液体速度明显小于射流喷嘴的出口速度。在这个过程中,射流液体水平直射作用较小,其出口截面速度同时取决于高压气体的相互作用和出口截面多孔结构的碰撞作用,两者的共同作用使射流液体尽可能地分散于整个出口空间。

多孔网状结构出口截面液相分布如图5所示。喉管长度为140 mm时,效果非常差,因此不再考虑。通过对多孔网状结构出口截面的液相分布云图进行分析,结合出口截面中心处与边缘的平均液相占比数值模拟结果,可以进一步判断射流液体均匀流出的情况。

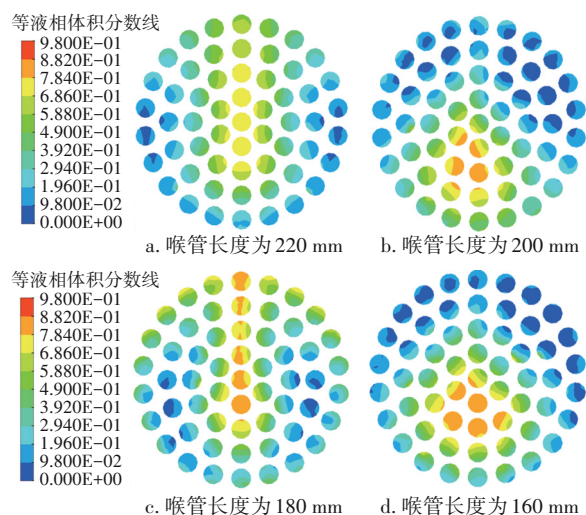


图5 不同喉管长度下泡沫发生器出口截面液相云图

Fig.5 Liquid phase cloud images at the outlet section of foam generator with different throat lengths

当喉管长度为220、200、180、160、140 mm时,中心处液相占比分别为73.5%、63.7%、78.4%、83.3%、92.5%,边缘处液相占比分别为22.5%、21.3%、44.1%、19.7%、11.3%,占比差分别为

51.0%、42.4%、34.3%、63.6%、81.2%。可见,喉管长度减小,会导致中心处的液相占比增大,多孔网状结构截面出口速度增大,射流液体的水平直射作用更加明显。喉管长度对出口截面的边缘液相占比影响也很大,喉管较长时,高压气体的作用与出口网状结构的碰撞作用共同影响了射流液体的分散,在喉管长度为180 mm时,边缘处的液相占比高达44.1%,中心处的液相占比与边缘处的液相占比差值为34.3%,在整个多孔网状结构出口截面处的液相分布较为均匀。当喉管长度继续减小为140 mm时,射流液体在边缘处的液相占比仅为11.3%,但其占比差高达81.2%,出口液相分布极其不均匀。从模拟结果可知,在喉管长度为180 mm的情况下,中心处的液相占比与边缘处的液相占比相差最小,此时的射流液体经多孔网状结构流出后更为均匀。

3.2 不同喉管长度下的异味物质阻隔率

不同喉管长度下的异味物质阻隔率见图6。

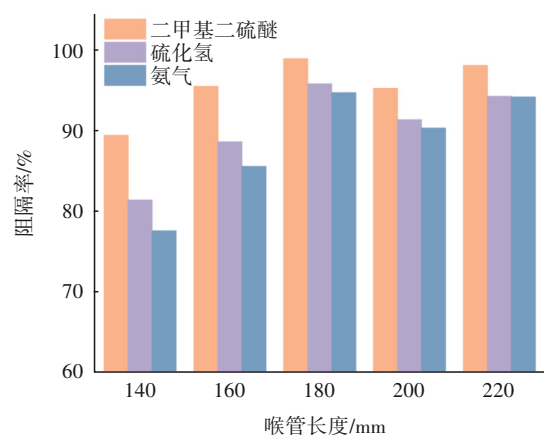


图6 不同喉管长度下的异味物质阻隔率

Fig.6 Blocking rate of odorous substances under different throat lengths

在气液比较合适的情况下,喉管长度影响着气液交互混合过程的激烈程度,在140 mm喉管长度下,制备的泡沫阻隔异味物质的效果下降极其显著,二甲基二硫醚、硫化氢、氨气阻隔率较180 mm分别降低了9.5%、14.4%、17.2%;喉管长度继续增加至200 mm和220 mm,射流液体在出口末端的影响效果逐渐削弱,泡沫混合效果又降低,形成的泡沫在极为短暂的停留时间下衰退,阻隔效果平均下降了2.58%,是气液比影响泡沫阻隔异味物质效率的4倍。

4 泡沫发生器优化设计验证

通过数值模拟获得了最佳气液混合效果的操作参数:进气压力为0.8 MPa,进液压力为0.5 MPa,气体流量为10 m³/h,液体流量为1.67 m³/h,气液比为6:1,喉管长度为180 mm。此泡沫发生器可将较高黏度蛋白质泡沫液均匀喷施,实现气液两相充分混合,形成质地绵密的泡沫,无流体流动。将制备的泡沫覆盖在模拟污泥上,监测24 h内逸散出的异味物质,二甲基二硫醚、硫化氢、氨气的初始浓度分别为6.916、1.52、76.1 mg/m³。如图7所示,优化前的阻隔效果不理想,除了二甲基二硫醚在24 h内的阻隔率>95%,硫化氢和氨气均未达到,氨气最低值达到了90.2%,上方空气污染物逸散严重。喷施经优化设计的泡沫发生器制备的泡沫后,阻隔效果均达到了95%以上,平均阻隔率提升1.85%,污染物逸散量分别降低66.5%、65.8%、40.2%,并且异味物质逸散减缓,说明泡沫阻隔效果提高。

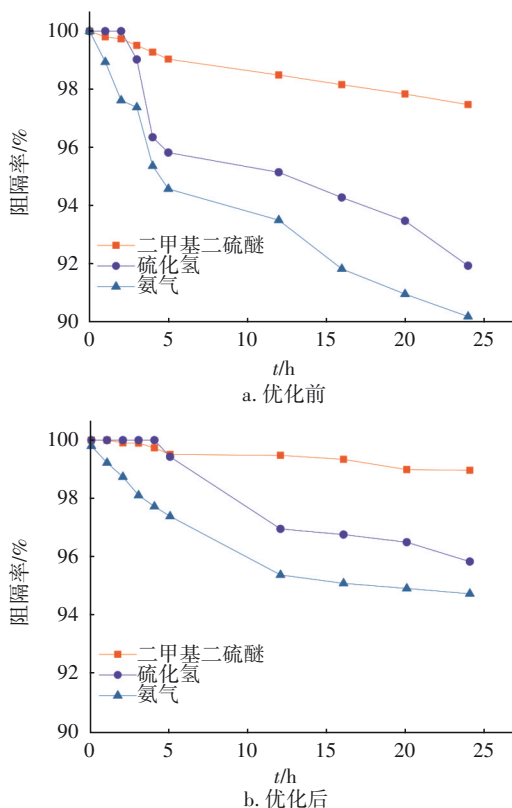


图7 泡沫发生器优化前后对异味物质的阻隔率

Fig.7 Blocking rate of odorous substances before and after foam generator optimization

5 结论

① 在扩散管出口连接直径为2 mm的多孔网

状结构可以增强气液混合强度。仅改变进气压力,对整体的液体射流与气液混合影响不大。然而,随着气液比减小,在喉管内的射流效果明显,异味物质阻隔率显著降低。在气液比为6:1时,气液混合效果最好,异味物质阻隔效果最佳,均大于94%,且出口截面液相分布较为均匀。射流液体主要集中在中心部分,其占比为73.5%,而边缘的平均液相占比为22.5%。

② 保持进气、进液压力不变,以6:1的入口气液比进液进气,喉管长度为180 mm时,射流液体经多孔网状结构流出后更为均匀,此时边缘处的液相占比高达44.1%,中心处的液相占比与边缘处的液相占比差值为34.3%,异味物质阻隔率均大于95%。

③ 应用最优泡沫发生器制备的泡沫均匀绵密,对污泥中污染物的阻隔效果超过95%,平均阻隔率提升1.85%,二甲基二硫醚、硫化氢、氨气逸散量分别降低66.5%、65.8%、40.2%。

参考文献:

- [1] 东东,赵珊,郭学彬,等. 典型污泥高级厌氧消化工艺中恶臭物质的分布特征[J]. 中国给水排水, 2021, 37(21): 7-12.
DONG Dong, ZHAO Shan, GUO Xuebin, et al. Distribution characteristics of odorants in typical sludge advanced anaerobic digestion process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(21): 7-12 (in Chinese).
- [2] WANG X W, CHEN J J. Evaluation of foam surfactant for foam-flushing technique in remediation of DDT-contaminated soil using data envelopment analysis method [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22(4): 2994-3003.
- [3] 刘相良,李英杰,赵健艾,等. 表面活性剂泡沫强化修复污染土壤研究进展[J]. 化学通报, 2017, 80(12): 1116-1122.
LIU Xiangliang, LI Yingjie, ZHAO Jian' ai, et al. Research progress of enhanced remediation of contaminated soil with surfactant foam [J]. Chemical Bulletin, 2017, 80(12): 1116-1122 (in Chinese).
- [4] LI H, LE BRUN A P, AGYEI D, et al. Stabilizing and destabilizing protein surfactant-based foams in the presence of a chemical surfactant: effect of adsorption kinetics [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 462: 56-63.
- [5] WANG Q X, LI J X. Numerical simulation study on flow

- field inside foam generator based on FLUENT [J]. Mining & Processing Equipment, 2014, 42(11):94-97.
- [6] 姜松, 王路明, 冯扣宝. 混凝土用蛋白质发泡剂的复配改性研究[J]. 功能材料, 2015, 46(9): 9056-9061.
- JIANG Song, WANG Luming, FENG Koubao. Study on compound modification of protein foaming agent for concrete [J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(9): 9056-9061(in Chinese).
- [7] JIANG Q X, BISMARCK A. A perspective: is viscosity the key to open the next door for foam templating? [J]. Reactive and Functional Polymers, 2021, 162:104877.
- [8] 王和堂. 自吸空气-发泡剂旋流产泡机理及抑尘技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014.
- WANG Hetang. Study on Mechanism and Dust Suppression Technology of Self-priming Air-foaming Agent Spinning Foam [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014(in Chinese).
- [9] 罗佳琪, 李忠帅, 刘承婷. 高效泡沫发生器流动规律研究与结构优选[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(17): 11-12.
- LUO Jiaqi, LI Zhongshuai, LIU Chengting. Study on flow characteristics and structure optimization of high efficiency foam generator [J]. China Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality, 2018, 38(17): 11-12 (in Chinese).
- [10] 李兵泉, 武萍妹, 王伟, 等. 高效泡沫发生器的研制与应用[J]. 石油天然气学报, 2013, 35(3): 322-323.
- LI Bingquan, WU Pingmei, WANG Wei, *et al.* Development and application of efficient foam generator [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2013, 35(3): 322-323(in Chinese).
- [11] 刘宏生, 杨莉, 许关利, 等. 一种可调孔隙介质的泡沫发生器: 201236686[P]. 2008-04-16.
- LIU Hongsheng, YANG Li, XU Guanli, *et al.* An Adjustable Foam Generator for Porous Media: 201236686[P]. 2008-04-16(in Chinese).
- [12] 张维薇. 多级挡板扰流泡沫发生器流场分析及实验研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2019.
- ZHANG Weiwei. Flow Field Analysis and Experimental Research of Multistage Baffle Foam Generator [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019 (in Chinese).
- [13] 陆新晓. 防治大空间煤炭自燃的泡沫高效制备技术及应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.
- LU Xinxiao. Research on Foam Efficient Preparation Technology and Application for Preventing Spontaneous Combustion of Large Space Coal [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016 (in Chinese).
- [14] 李家丞, 栾伯川. 射流式泡沫发生器内部流场的数值模拟[J]. 辽宁化工, 2017, 46(9): 920-922, 925.
- LI Jiacheng, LUAN Bochuan. Numerical simulation of internal flow field of jet foam generator [J]. Liaoning Chemical Industry, 2017, 46(9): 920-922, 925 (in Chinese).
- [15] ZHU Y, CAI W, WEN C, *et al.* Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5/6): 898-905.
- [16] 唐家鹏. Ansys Fluent 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- TANG Jiapeng. Ansys Fluent 16.0 Super Study Manual [M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2016 (in Chinese).
- [17] 黄旋, 姜乃斌, 齐欢欢. 管束间两相流的流场及流动特性计算方法研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(Z2): 138-141.
- HUANG Xuan, JIANG Naibin, QI Huanhuan. Study on flow field and flow characteristics calculation method of two-phase flow between tube bundles [J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36 (Z2): 138-141 (in Chinese).
- [18] HASHEMI-TILEHNOEE M, SAHEBI N, DOGONCHI A S, *et al.* Simulation of the dynamic behavior of a rectangular single-phase natural circulation vertical loop with asymmetric heater[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 139: 974-981.
- 作者简介:**陈智翀(1998-),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向为生物质基泡沫异味物质阻隔。
- E-mail:**1214433907@qq.com
- 收稿日期:**2022-07-01
- 修回日期:**2022-08-10

(编辑:李德强)