

污水泵站格栅间排风口布局及气流组织优化数值研究

朱冬雪, 谷朋阳, 褚红燕, 林福建, 鹿世化

(南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 污水泵站格栅间恶臭气体的扩散严重影响周围居民的身体健康和人居环境. 运用 Fluent 软件对格栅间不同送风口送风状态下室内的气流组织进行数值模拟, 并考虑在格栅开口有污染物不断释放的条件下, 分析送风系统对污染物扩散的影响, 找寻一种用于格栅间排风系统的最优通风方式. 研究表明, 现有的送风方式均会引起格栅内气流组织的剧烈扰动, 造成格栅内二次污染. 在所有送风口共同作用下, 室内污染物 NH_3 的扩散强度大于 H_2S , 送风系统对室内污染物的扩散产生更大的负面影响. 与自由流出口相对的送风口送风方式对室内气流组织的干扰小, 送风路径中污染物较少, 对保持室内新风非常有利.

[关键词] 污水泵站, 排风口布局, 气流组织, 数值模拟

[中图分类号] TU834 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)02-0043-07

Numerical Study on the Layout of Air Exhaust Vents and Airflow Organization Optimization in the Sewage Pumping Station

Zhu Dongxue, Gu Pengyang, Chu Hongyan, Lin Fujian, Lu Shihua

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The spread of malodorous gas in the grid of the sewage pumping station has a serious effect on the health and living environment of the surrounding residents. The Fluent software is used to simulate the airflow in the air supply state of the air supply port between the grilles and consider the opening in the grille. Under the condition of continuous release of pollutants, the influence of the air supply system on the diffusion of pollutants is analyzed, and an optimal ventilation method for the exhaust system in the grille is found. The research shows that the existing air supply method causes the disturbance of the airflow in the grille, causing secondary pollution in the grille. Under the joint action of all air outlets, the diffusion intensity of indoor pollutant NH_3 is greater than H_2S . The air supply system has a greater negative impact on the diffusion of indoor pollutants. The air supply mode of the air outlet opposite to the free air outlet has less interference to the indoor airflow organization, and the less pollutants in the air supply path are very beneficial to keep the indoor fresh air.

Key words: sewage pumping station, exhaust vent layout, airflow organization, numerical simulation

随着城市化进程的推进,城市污水的排放量随着城市人口数量的快速增长而上升.与此同时,城市中污水泵站建设的数量也随之增加,居民小区与工厂之间的距离不断缩短.近年来,城市污水泵站产生的恶臭气体和其他空气污染成为人们日益关注的问题,这不仅是一个生态问题,也是一个社会问题^[1].城市污水再处理可以减少异味的排放,但往往被人们忽略.

一些研究学者对于市民投诉较多的城市污染问题做了相关研究^[2-4].黄丽丽等^[5]实验探究了恶臭气体中最主要的致臭物质为硫化氢和甲醇. Wu 等^[6]在污水处理厂的污水出水口不同部位监测挥发性有机化合物;在多个采样点采集空气样品,用气相色谱法测定挥发性有机化合物含量;在各季排出的污水中鉴定出挥发性有机物 VOCs 中以丙酮、异丙醇(IPA)和二甲基硫化物(DMS)为主要排放种类,最大排放浓度分别为 400.4、22.8 和 641.2 nL/L. Saral 等^[7]研究分析出污水泵站产生的气体以硫化氢、二氯甲烷和苯系物为主,还有一些烯烃及芳香烃衍生物^[8-9].青木真等^[10]研究了污水泵站各个处理单元产生的恶臭物质的浓度与成分

收稿日期:2018-05-24.

基金项目:江苏省高校自然科学基金(16KJB120002)、国家自然科学基金青年基金(61603194).

通讯联系人:鹿世化,博士,副教授,研究方向:工业通风及空调工程. E-mail:lushihua@njnu.edu.cn

都是不同的. Kangas J 等^[11]在 16 个芬兰城市污水处理厂和 18 个泵站的大气中采样检测,分析出大气中含有氨、甲烷、硫化氢和甲硫醇;进一步实验表明,在正常操作条件下,硫化物从 <0.07 到 $53 \mu\text{g/L}$ 变化,在污泥压榨机中浓度最高;泵站大气中硫化物蒸汽从 0.07 到 $0.5 \mu\text{g/L}$;除此之外,氨($0.007\sim 3.5 \mu\text{g/L}$)和甲烷($0.7\sim 18 \mu\text{g/L}$)的存在证实了恶臭气体厌氧来源的假设. 宫庆超^[12]调查研究分析出恶臭气体会通过接触、呼吸以及水和食物等途径进入人体内而引起呼吸系统、循环系统、消化系统、内分泌系统及精神系统等疾病,长期受到恶臭的刺激会引起人的感觉疲劳,甚至还影响人体内的肝、肾和心血管的生理功能,使工作效率降低,判断力和记忆力减弱等. 另外,王灿等^[13]研究发现污水中存在的 H_2S 可以扩散到污水表面或进入空气层,与其中的溶解氧相结合,在硫酸菌的作用下被氧化为硫酸,使混凝土或铸铁结构受到腐蚀,不仅影响美观,也降低了构筑物的牢固性;进一步实验表明,高浓度的含硫、含氮的恶臭物质还会抑制硝化反应的进行,使污水脱氮效果变差. Frenchen^[14]对城市污水处理厂不同污染源处的恶臭散发率进行了调查研究,发现城市污水处理厂的污泥处理区与污水进水区产生的恶臭气体在臭气量和排放强度上均高于其他处理单元. 由于废水处理不当对环境造成的负面影响以及日益严格的环境保护要求,必须寻求改进的废水处理技术. 研究人员也一直在寻找不需要化学物质的前提下去除废水中磷化物的新方法.

以上研究学者主要对污水泵站污染物的主要成分和危害进行了深入的研究. 除此之外,欧盟成员国在限制异味排放和除臭方面的研究也越来越多^[15-16]. 一些学者更深入地研究了有效控制污染物扩散的方法,优化泵房的气流组织,给周围居民提供一个清洁美好的生活环境. Carlina Alfonsin 等^[17]基于对生物周期的研究进而分析采用不同的生物除臭法对污水处理厂进行恶臭处理. Mamta Tomar 等^[18]研究了过氧化氢、次氯酸钠、次氯酸钙、亚铁和三价铁盐对溶解在废水中的硫化氢的影响,为污水处理网络建立了有效的气味控制系统,从带有压力管道的主泵站的入口结构收集废水样品,并在受控的实验室条件下单独和组合添加化学品前后分析溶解的硫化物和 pH,找到合适的化学药剂来消除废水中的硫化氢. Arthur G 等^[19]介绍了预测、预防和控制整个污水处理系统程序的开发,包括一系列链接算法,该程序能够对污水处理系统进行数学建模,以预测在确定位置污水中硫化物的形成,该模型应用于广泛的污水处理系统,可为 665 000 人口提供服务. Lewkowska 等^[20]阐述了城市污水处理厂区域的恶臭排放特征,包括污泥处理、机械和生物处理设施. 由于污水处理的生物技术(如污泥相关工艺)可产生导致气味的化合物^[21-23],如控制不当,污水泵站会严重影响城市环境和周围居民健康^[24]. 王强等^[25]通过实验探究出通风系统不仅能优化泵站内的气流组织,还能延长设备使用寿命,进一步提升泵站节能效率. 张燕云等^[26]利用 Fluent 软件研究养猪场恶臭源扩散规律,分析了养猪场对周围环境的影响,从而确定养猪场恶臭防护距离.

基于污水泵站恶臭气体大量的调查研究,为了解决恶臭气体给周围居民的人居环境带来的危害问题,一些研究人员采用化学法、物理法、生物沉降法等对污水进行处理除臭,但成本较高,需耗费大量的人力物力进行实验检测,并不能保证泵房内空气快速流动,室内空气品质未得到明显改善. 为了解决这些问题,本文在上述通风系统研究的基础上做出一些改善,选择常州某污水泵站作为研究对象,运用 Fluent 软件对格栅间不同送风口下的气流组织进行数值模拟,通过对格栅内速度流线图、 H_2S 和 NH_3 不同时刻的组分图分析得出,采用正对自由流出口的送风口进行送风,其余的地方不设置送风口,这样的送风口布局带来的除臭效果最佳,不仅为室内提供了新风,还解决了恶臭气体对周围居民造成的严重危害.

1 格栅间的概况

污水泵站格栅主要用于拦截并粉碎污水中存在的各种垃圾,若不能对污水泵站的恶臭气体进行妥善处理,污水泵站将会成为周边居民生活的一个持续的恶臭污染源,对周围居民的身体健康造成严重的影响. 本文通过对常州某污水泵站的实地考察研究,采用三维建模软件 Solidworks 模拟出三维污水泵站格栅间的模型. 格栅由一组平行的金属栅条、格栅柜和清渣耙 3 部分组成,安装在污水处理厂的端部,位于泵房的西侧. 格栅间内设竖直送风管 3 根,向格栅间送入新鲜空气,排除由于长期堆积各种垃圾产生的恶臭气体. 其轴测图如图 1 所示.

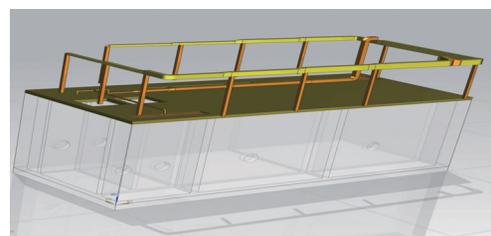


图 1 格栅间轴测图

Fig. 1 Axonometric view of the grid

2 格栅间数值模拟

2.1 数学模型

在构建数学模型前,需要假设:室内空气做低速、不可压缩流动,密度为定值;室内空气的流动为稳态湍流流动;格栅排气罩作为面污染源均匀稳定地向周围散发恶臭气体,源强恒定;模型顶部开口为送风口,且送入的新风中不含 H_2S 与 NH_3 , 数学模型中包括基本控制方程、湍流模型方程、组分扩散方程。

2.1.1 基本控制方程

基本控制方程组包括质量守恒方程(又称连续方程)、动量守恒方程和能量守恒方程^[27]。其中,质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; u_j 为速度分量。

微分形式的动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + f_i, \quad (2)$$

式中, u_i 为速度分量; p 为压力; ν 为气体的运动学黏度; f_i 为单位质量的体积力。

微分形式的能量方程为:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_T, \quad (3)$$

式中, T 为温度; k 为气体的热传导系数; c_p 为定压比热, S_T 为热项。

2.1.2 湍流模型方程

湍流模型方程包括 k 方程和 ε 方程。其中, k 方程为精确方程, ε 方程为由经验公式导出的方程。湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \quad (5)$$

式中, μ 为动力黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数; G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项,且有 $G_k = \mu_t S^2$, 其中 $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 。

2.1.3 组分扩散方程

组分输运方程通过第 i 种物质的对流扩散方程来预估每种物质的质量分数 Y_i , 组分输运方程采用的通用形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho V Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i, \quad (6)$$

式中, Y_i 为第 i 种组分的质量分数; V 为气体的运动黏度; R_i 为第 i 种组分由于化学反应的净生成率; \mathbf{J}_i 为第 i 种组分的扩散通量; S_i 为第 i 种组分离散相及由用户自定义的源项所导致的额外产生速率。

2.2 物理模型与边界条件

为方便模型的网格划分,需对物理模型进行必要的简化。本文格栅间长 9.6 m、宽为 3.9 m, 内设的 3 根送风管均贴着房间左端;每个送风管设置 3 个送风口,均设为速度入口,每个入口为长 1.2 m、宽 0.4 m 的长条形。在格栅间右端设置一条长 1.2 m 的开口为自由流出口。当池内充满臭气时,此处认为初始条件为池内 H_2S 气体流体体积函数 VOF 为 1, 即池内充满 H_2S , 送入的新风中不含有 H_2S 。为方便分析,将 3 根送风管排列的边设置为 Y 轴,邻边设置为 X 轴,格栅间几何尺寸及边界条件如图 2 所示。

为比较了解格栅间送风方式对整个格栅臭气排除的效果,需对现有送风方式下的气流组织进行计算。将计算步长设置为 0.01 s, 将首次计算终止最大次数设置为 2 500(即 25 s), 单次收敛的最大计算次数

设置为 85 次,计算显示,以上设置可较好地完成计算任务.

2.3 网格划分

本文采用了结构化网格分块的方式处理,采用了由点到线、由线到面、由面到体的划分方法.为验证网格无关性假设,分别创建了 3 种疏密程度不同的四面体,控制其他参量保持不变,其节点数分别为 119 140、170 328、219 167,分别将其称为网格 1、网格 2、网格 3.经计算发现,3 种工况的实验结果基本吻合,网格 1 虽比网格 2 计算时间少 1 h 左右,网格 2 却比网格 1 精度高 3.6%;网格 3 虽比网格 2 精度高 2.3%,但计算时间比网格 2 多 2 h.综合对比发现,网格 2 在精度和计算量方面均优于网格 1 和网格 3,故选择网格 2 进行数值模拟分析.网格划分处理好后,由 ICEM 导出 .msh 文件.启动 Fluent 软件,选择三维单精度求解器,读入 .msh 文件检查网格,无 warning 显示,则为有效网格.图 3 为格栅间网格划分的拓扑结构分块图、网格整体图和局部加密图.

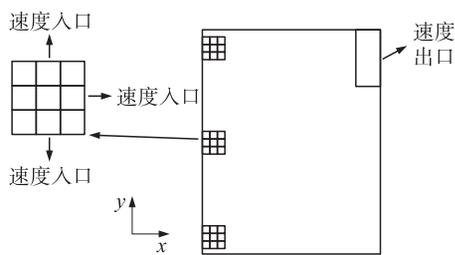


图 2 格栅间物理模型
Fig. 2 Physical model of the grid

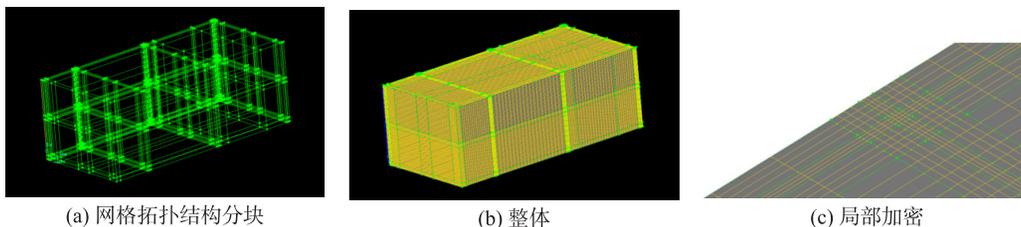


图 3 格栅间网格划分
Fig. 3 Grid division of the grid

3 计算结果与分析

3.1 出风口流线图

利用 Fluent 软件读取 Gambit 输出的 .msh 文件并进行求解,显示的计算结果为各出风口的流线图.格栅间共有 3 根送风管、9 组送风口,沿 Y 轴方向分别编号为 1-3、4-6、7-8(由于 9 号风管出风口与墙壁距离太近,忽略不计).由图 4 可以看出,除送风口 8 出风直接吹向门之外,其他各风口都在格栅内造成较大的气流干扰,考虑到格栅和格栅开口都是污染物源,气流会导致二次气流,类似于工业通风里的“二次扬尘”,会加重室内臭气流动和污染.

3.2 H₂S 和 NH₃ 的组分图

对各个出风口气流流线图分析可知,格栅排风方式 1-7 风口送风时会在格栅内造成较大的气流干扰,从而加重室内臭气流动和污染.二次气流使得污染物的扩散,对人体造成伤害.取 X = 300 平面得到不同时刻 H₂S 的组分分布图,由图可以看出,H₂S 在一开始(0.1 s 时)迅速扩散,3.5 s 时已经扩散到人体呼吸区最高度,即可认为:在几个送风口同时作用下,格栅间气流以很快的速度将污染物扩散到超过人体呼吸区的高度,并在室内进一步扩散.送风口虽然给室内带来了新风,但其通风方式使气流在格栅内造成大量的扰动,加重了室内臭气的流动,反而给室内工作人员带来更剧烈的臭气刺激.不同时刻 H₂S 组分图如图 5 所示.

NH₃ 也是格栅间主要的致臭物质之一,研究格栅内 NH₃ 的组分在不同时间的分布,可进一步论证格栅间现有送风方式的优劣.图 6 给出不同时刻 X = 300 平面的 NH₃ 组分分布图,气流对于该污染物的扩散与 H₂S 类似,但其扩散速度和面积要大于 H₂S.

现有送风口的送风气流加强了污染物的扩散,污染物很快扩散到超过人体呼吸区的高度,这不利于室内的卫生条件.图 7 中的(1)和(2)为 H₂S 不同时刻的逐时分布图,(3)和(4)为 NH₃ 不同时刻的逐时分布图.

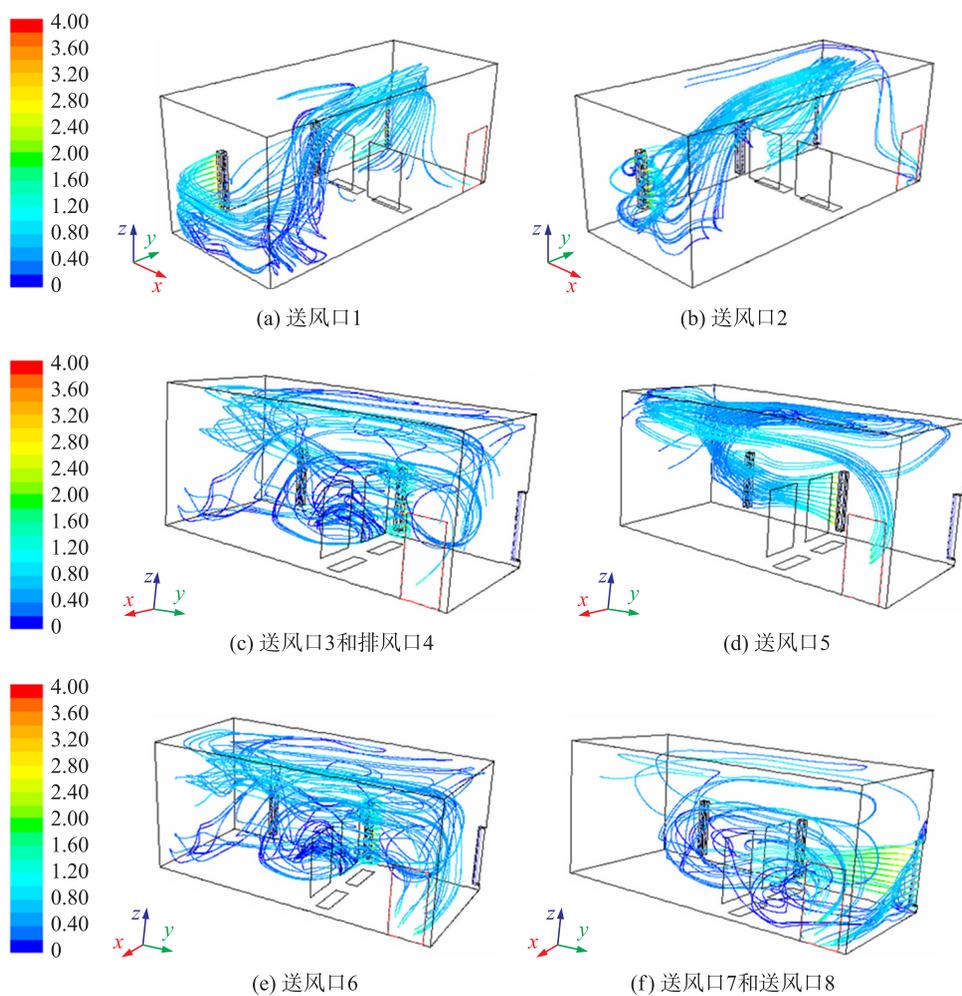


图 4 各出风口流线图

Fig. 4 Flow diagram of each outlet

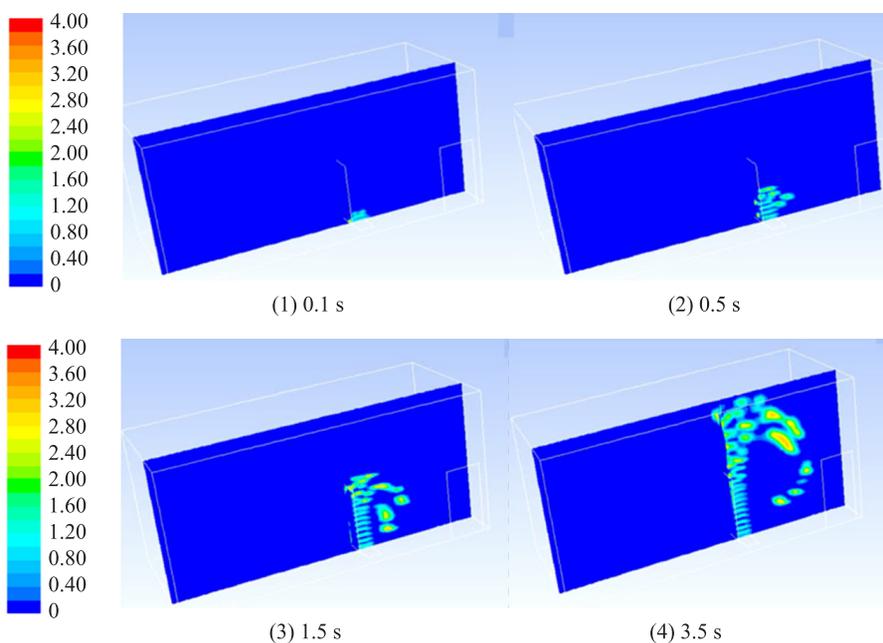


图 5 $X=300$ 平面不同时刻 H_2S 组分图

Fig. 5 Composition of H_2S at different times in the $X=300$ plane

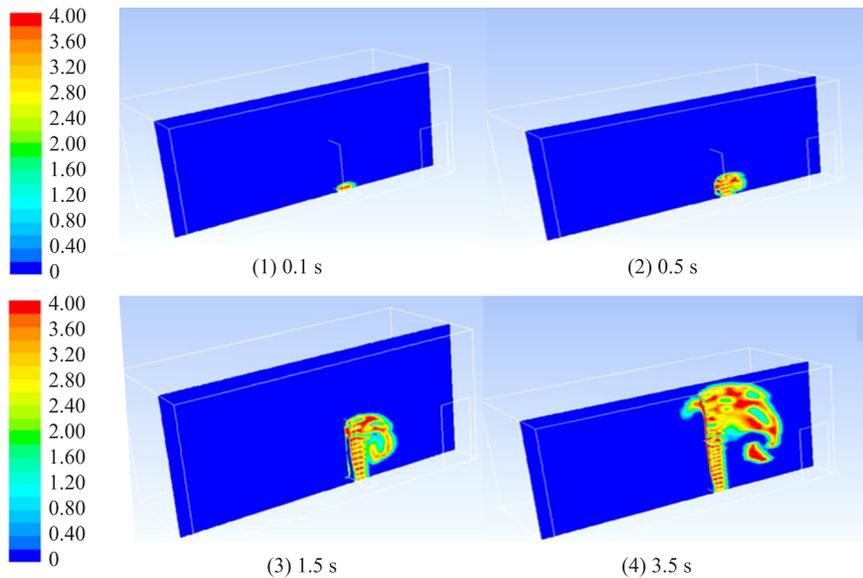


图 6 $X=300$ 平面不同时刻 NH_3 组分图

Fig. 6 Composition of NH_3 at different times in the $X=300$ plane

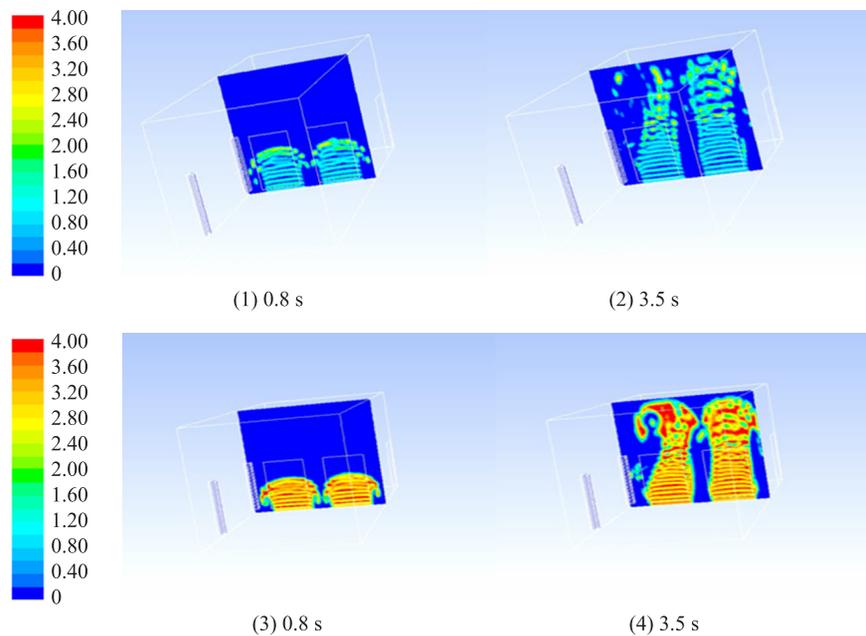


图 7 $Y=560$ 平面处 H_2S 和 NH_3 的逐时分布图

Fig. 7 Time-dependent distribution of H_2S and NH_3 at $Y=560$ plane

4 结语

本文运用 Fluent 软件对现有格栅间不同送风口送风气流进行数值模拟. 在考虑格栅开口有污染物不断释放的条件下,通过各个出风口的流线图可以得出以下结论:

(1) 送风口 1 至送风口 7 在格栅内造成较大的气流干扰,从而加重室内臭气流动和污染.

(2) 在几个送风口共同作用下,室内臭气扩散对人体健康带来更大危害,从 NH_3 和 H_2S 的不同平面不同时刻组分图可以看出, NH_3 在格栅间以更快的速度扩散到超过人体呼吸区的高度,其扩散速度和面积要大于 H_2S .

(3) 共同送风口虽然给室内带来了更多的新风,但其通风方式使得气流在格栅内造成大量的扰动,加重了室内臭气的流动,反而给室内工作人员带来更剧烈的臭气刺激.

[参考文献] (References)

- [1] AATAMILA M, VERKASALO P K, KORHONEN M J, et al. Odour annoyance and physical symptoms among residents living near waste treatment centres[J]. *Environ Res*, 2011, 111: 164–170.
- [2] SIRONI S, CAPELLI L, ENTOLA C, et al. Odour emission factors for assessment and prediction of Italian MSW landfills odour impact[J]. *Atmos Environ*, 2005, 39: 5387–5394.
- [3] DINCER F, ODABASI M, MUEZZINOGLU A, et al. Chemical characterization of odorous gases at a landfill site by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *J Chromatogr*, 2006, 1122: 222–229.
- [4] YING D, CHUANYU C, BIN H, et al. Characterization and control of odorous gases at a landfill site: a case study in Hangzhou, China[J]. *Waste Manag*, 2012, 32: 317–326.
- [5] 黄丽丽, 宁晓宇, 刘博, 等. 天津市中心城区污水泵站恶臭排放特征研究[J]. *环境科技*, 2015(2): 17–20.
HUANG L L, NING X Y, LIU B, et al. Research on odor emission characteristics of sewage pumping stations in central district of Tianjin[J]. *Environmental science and technology*, 2015(2): 17–20. (in Chinese)
- [6] WU B Z, FENG T Z, SREE U, et al. Sampling and analysis of volatile organics emitted from wastewater treatment plant and drain system of an industrial science park[J]. *Analytica chimica acta*, 2006, 576(1): 100–111.
- [7] SHON Z H, KIM K H, JEON E C, et al. Photochemistry of reduced sulfur compounds in a landfill environment[J]. *Atmos Environ*, 2005, 39: 4803–4814.
- [8] TAGARIS E, SOTIROPOULOU R E P, PILINIS C, et al. A methodology to estimate odors around landfill sites; the use of methane as an odor index and its utility in landfill siting[J]. *J Air Waste Manage Assoc*, 2012, 53: 629–634.
- [9] GALLEGO E, PERALES J F, ROCA F J, et al. Surface emission determination of volatile organic compounds (VOC) from a closed industrial waste landfill using a self-designed static flux chamber[J]. *Sci Tot Environ*, 2014, 470: 587–599.
- [10] SHINICHI A, HIROYUKI S, DAIYA B. Analysis of odor compounds in sewerage process water and deodor methods[J]. *Journal of Japan society on water environmental*, 2004, 27(10): 643–649.
- [11] KANGAS J, NEVALAINEN A, MANNINEN A, et al. Ammonia, hydrogen sulphide and methyl mercaptides in finnish municipal sewage plants and pumping stations[J]. *Science of the total environment*, 1986, 57: 49–55.
- [12] 宫庆超. 城市区域性污水泵站挥发性物质健康风险评价方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
GONG Q C. Study on health risk assessment of volatile substances emitted from urban wastewater pump stations[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [13] 王灿, 胡洪营, 席劲瑛. 城市污水处理厂恶臭污染及其评价体系[J]. *给水排水*, 2005, 31(9): 15–19.
WANG C, HU H Y, XI J Y. Odor pollution and evaluation system in municipal wastewater treatment plant[J]. *Water & wastewater engineering*, 2005, 31(9): 15–19. (in Chinese)
- [14] FRENCHEN F B. Odor emission inventory of Germany wastewater treatment plants-odour flow rates and odour emission capacity[J]. *Wat Sci Tech*, 2004, 50(4): 139–146.
- [15] KIM H, LEE H, CHOI E, et al. 2014. Characterization of odor emission from alternating aerobic and anoxic activated sludge systems using real-time total reduced sulfur analyzer[J]. *Chemosphere*, 2014, 117: 394–401.
- [16] PAULINA L, BARTŁOMIEJ C, TOMASZ D, et al. Characteristics of odors emitted from municipal wastewater treatment plant and methods for their identification and deodorization techniques[J]. *Environmental research*, 2016, 151: 573–586.
- [17] CAROLINA A, LEBRERO R, ESTRADA J M, et al. Selection of odour removal technologies in wastewater treatment plants: a guideline based on life cycle assessment[J]. *Journal of environmental management*, 2015, 149(149): 77–84.
- [18] MAMTA T, TAMAMA H, ABDULLAH A. Evaluation of chemicals to control the generation of malodorous hydrogen sulfide in waste water[J]. *Water research*, 1994, 28: 2545–2552.
- [19] ARTHUR G B, ALISON J V, KEVIN G B. Avoiding the problems of septic sewage[J]. *Water science and technology*, 1998, 37(1): 223–231.
- [20] 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]. *Environ Res*, 2016, 151: 573–586.
- [21] LEBRERO R, RANGEL M G L, MUNOZ R. Characterization and biofiltration of a real odorous emission from wastewater treatment plant sludge[J]. *J Environ Manag*, 2013, 116: 50–57.
- [22] 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]. *J Environ Manag*, 2016, 170: 186–206.

(下转第 81 页)

[参考文献] (References)

- [1] 王璐瑶. 基于 RFID 技术的实体档案管理研究[J]. 机电兵船档案,2018(2):39-41.
WANG L Y. Research on entity archive management based on RFID technology[J]. Electromechanical ship file,2018(2):39-41.(in Chinese)
- [2] 秦荪榛. 基于物联网技术的档案馆实时自动盘库控制系统[D]. 南京:南京师范大学,2014.
QIN S Z. Archives real-time automatic library control system based on internet of things technology[D]. Nanjing:Nanjing Normal University,2014.(in Chinese)
- [3] 郭盛威. 鱼眼图像视频校正方法研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2017.
GUO S W. Fisheye image video correction method research[D]. Wuhan:Wuhan Institute of Technology,2017.(in Chinese)
- [4] 冯为嘉,张宝峰,曹作良. 基于鱼镜头的全方位视觉参数标定与畸变矫正[J]. 天津大学学报,2011,44(5):417-424.
FENG W J,ZHANG B F,CAO Z L. Omni-directional vision parameter calibration and rectification based on fisheye lens[J]. Journal of Tianjin university,2011,44(5):417-424.(in Chinese)
- [5] 朱安娜. 基于卷积神经网络的场景文本定位及多方向字符识别研究[D]. 武汉:华中科技大学,2016.
ZHU A N. Research on convolution neural network-based scene text detection and multi-orientational character recognition [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2016.(in Chinese)
- [6] 余承波. 基于支持向量机(SVM)的车牌识别[D]. 淮南:安徽理工大学,2018.
YU C B. License plate recognition based on support vector machine(SVM)[D]. Huainan:Anhui University of Science and Technology,2018.(in Chinese)
- [7] 靳涛,张永爱. TensorFlow 平台下基于深度学习的数字识别[J]. 信息技术与网络安全,2018,37(4):74-78.
JIN T,ZHANG Y A. Digital recognition based on deep learning in Tensor Flow platform[J]. Information technology and network security,2018,37(4):74-78.(in Chinese)
- [8] 张立. 基于卷积神经网络的车牌字符识别方法研究[D]. 镇江:江苏大学,2015.
ZHANG L. Research of license plate recognition based on convolutional neural network[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2015.(in Chinese).

[责任编辑:严海琳]

(上接第 49 页)

- [23] LIU N,GONG C,JIANG J,et al. Controlling odors from sewage sludge using ultrasound coupled with Fenton oxidation[J]. J Environ Manag,2016,181:124-128.
- [24] TOLEDOM M,GUTIÉRREZ C,SILES J A,et al. Full-scale composting of sewage sludge and market waste:stability monitoring and odor dispersion modeling[J]. Environmental research,2018(167):739-750.
- [25] 王强,邢秀强. 污水泵站通风设计探讨[J]. 工业安全与环保,2001,27(7):17-19.
WANG Q,XING X Q. An approach of ventilation design for sewage pump house[J]. Industrial safety and environmental protection,2001,27(7):17-19.(in Chinese)
- [26] 张燕云,宋从波,刘茂,等. 基于 Fluent 的养猪场恶臭风险分析及应用[J]. 安全与环境学报,2015,15(1):293-296.
ZHANG Y Y,SONG C B,LIU M,et al. Analysis of stench risk and application based on the software Fluent in the piggery [J]. Journal of safety and environment,2015,15(1):293-296.(in Chinese)
- [27] 于燕玲. 污水隧道纵向通风 CFD 仿真模拟与试验研究[D]. 天津:天津大学,2006.
YU Y L. CFD analog simulation and experiment study on longitudinal ventilation of sewer tunnel[D]. Tianjin:Tianjin University,2006.(in Chinese)

[责任编辑:严海琳]