

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.17.016

基于CFD的地下污水厂无风管式通风系统效果模拟

李洋洋¹, 彭文峰², 雷琳慧³, 蔡磊³, 王宗平³, 万承君³

(1. 中交城乡建设规划设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 3. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 地下污水厂传统风管式通风系统结构复杂、风管占用空间大,无风管式通风系统作为一种新型通风方式,可以减少风管建设,降低箱体埋深,具有广阔的应用空间。以河北某地下污水厂作为研究对象,通过建立模型分析了风管式通风系统和无风管式通风系统在换气次数为4、6、8和10次/h工况下气流组织、空气龄分布等方面的优劣。结果表明,无风管式通风系统在不同工况下表现出气流组织更加稳定、空气龄更小的优势,通风换气效果更好。相同工况下,无风管式通风系统分布在各监测点的风速均大于风管式通风系统,各监测点整体风速差值在0.2 m/s左右,风管式通风系统空气龄大部分在500 s以上,无风管式通风系统空气龄均可维持在200 s以下。

关键词: 地下污水处理厂; 无风管式通风系统; 活塞流; 计算流体力学(CFD)

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)17-0104-07

Simulation Effect of Ductless Ventilation System in Underground Wastewater Treatment Plants Based on CFD

LI Yang-yang¹, PENG Wen-feng², LEI Lin-hui³, CAI Lei³, WANG Zong-ping³,
WAN Cheng-jun³

(1. CCCC Urban-Rural Construction Planning Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, China;
2. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, China; 3. School of Environmental
Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The traditional duct ventilation system of underground wastewater treatment plants features a complex structure and occupies a considerable space with the duct. As a novel ventilation mode, the duct less ventilation system can curtail the construction of the duct, decrease the buried depth of the box, and possesses a wide application space. Taking an underground wastewater treatment plant in Hebei Province as the research subject, a model was constructed to analyze the advantages and disadvantages of the air flow organization and the air age distribution of the traditional duct ventilation system and the ductless ventilation system under the conditions of 4 times, 6 times, 8 times, and 10 times air changes per hour. The ductless ventilation system demonstrated the merits of a more stable air flow organization and a shorter air age under diverse working conditions, and the ventilation performance was superior. Under the same working condition, the wind speed of the ductless ventilation system distributed

基金项目: 中国交通建设股份有限公司科技研发项目(2020-ZJKJ-10)

通信作者: 万承君 E-mail: 1958074933@qq.com

at each monitoring point was higher than that of the duct ventilation system, and the overall wind speed difference at each measuring point was approximately 0.2 m/s. The air age of the duct ventilation system was mostly above 500 seconds, while that of the ductless ventilation system could be maintained below 200 seconds.

Key words: underground wastewater treatment plant; ductless ventilation system; piston flow; computational fluid dynamics (CFD)

随着我国城市化进程的推进,城镇居民生活和工业发展产生了大量污水,对水环境造成巨大压力。污水处理厂作为净化污水的重要基础设施,近年来其数量在我国呈逐年增长的趋势^[1]。但是,传统地上污水处理厂在运行过程中会产生臭气,如处置不当会诱发严重的邻避效应。地下污水厂作为一种新的污水厂建造形式,具有占地和邻避效应均小的特点,自2010年广州市建造了我国第一座全地下式污水处理厂——京溪污水处理厂以后,其受到了全国各地的青睐。

地下污水厂处理车间大多设置在地下封闭空间内部,地下空气流动条件差,单纯采用自然通风无法满足排出厂房内部污浊空气的需求,需要采用一定措施进行辅助通风^[2]。目前地下污水厂常用的通风方式有风管式机械通风、风管式机械通风+自然通风(联合通风)和无风管式机械通风。

无风管式机械通风是一种形式新颖的地下厂房通风方式,其原理是利用送、排风风机产生气流,从而在地下厂房大空间内部形成类似活塞流动来实现排出厂房内部污染物的机械通风技术^[3]。无风管式通风方式无需安装大量的风管,有效避免了风管安装占用大量空间、风管与梁交叉的问题,降低了净高和埋深,节省工程投资。大型无风管式通风系统需要运用计算流体力学(CFD)进行模拟,以保证设计运行效果。韩枫等人^[4]模拟了传统风管式通风系统在地下污水厂的应用情况,发现在风管回风口处气流组织较好,能基本满足通风换气需求。白小平等人^[5]采用数值模拟分析了地下污水厂污泥脱水机房除臭通风系统运行时臭气的扩散规律,有效指导了风管式新风系统风口的分布。王飞^[6]利用CFD数值模拟软件研究了无风管式通风系统在地下停车场的应用,结果表明无风管式通风系统在设计、效果、运行维护方面都具有一定优势。

综上,数值模拟研究的应用范围十分广泛,但

对于无风管式通风系统应用于地下污水厂的研究还比较少。因此,笔者借助CFD数值模拟工具,将无风管式机械通风方式和风管式机械通风方式应用于地下污水厂的通风效果进行对比,旨在为地下污水厂通风系统设计提供参考。

1 项目概况

1.1 工程概况

以河北某地下污水处理厂为研究对象,其一期处理规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计形式为三层式结构,即地下一层为操作层,地下二层为水处理构筑物层,地面是景观公园^[7]。该地下污水厂为全地下式箱体结构,箱体尺寸为 $115 \text{ m} \times 116 \text{ m} \times 4.3 \text{ m}$,箱体两侧有与地上连接的通道。地下箱体涵盖了具有各种功能的构筑物,如图1所示。地下一层除操作层(建筑定义为构筑物)外,还布置了除臭设施、除臭风机房等工艺车间,预处理车间、变配电间等电气用房,以及汽车主通道。操作层内部梁下净高4 m。厂内部正常生产状态下空气相对清洁,但有少量臭气从预处理车间逸出。地下二层设有生物反应池、二沉池、紫外消毒池、消防水池等各类工艺水池。工艺水池均加装盖板,为土建结构密闭水池,并加装除臭风管,将有害有味气体抽走集中处理。

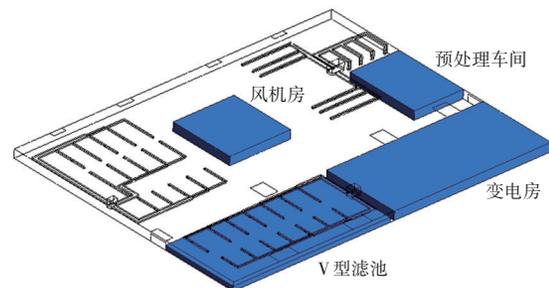


图1 地下污水厂操作层平面示意

Fig.1 Schematic diagram of operation floor of underground wastewater treatment plant

地下箱体操作层面积约为 $11\,340 \text{ m}^2$,高度为4.3 m,在操作层形成了层高低、空间大的扁平空

间。其中,北侧为生物反应池、二沉池区域,其上部为操作层的扁平大空间,约为 $12\,967.4\text{ m}^2$ (约占总面积的74.5%),建筑物占比很小,正常工作状态下污染物浓度较低;西南侧为工艺及电气辅助用房,该区域空间相对较小;西北侧主要为V型滤池,池顶高于地下一层地坪 2 m 。

1.2 通风系统

通风系统主要服务于水池构筑物上部的操作层区域、工艺配套车间及电气设备用房、行车通道、地下二层管廊等空气相对清洁的区域;排风通过地面风井直接排放,并与地面绿化结合满足景观要求;除臭系统主要服务于易产生有害性气体的工艺池体、污水水面至构筑物盖板的密闭空间、储泥池等区域,将各构筑物处理池加盖板密封并进行负压抽吸,通过管道收集系统将臭气集中收集至生物除臭或化学除臭装置,经处理达标后排放至排气竖井内,最终在高空排放^[8]。

地下污水处理厂地下箱体大空间尺寸为 $150.0\text{ m}\times 116.0\text{ m}\times 4.3\text{ m}$ 。内部均匀布置结构柱约234根,结构柱尺寸相对整个厂房空间较小,对地下厂房空气流动影响小,可忽略其影响^[9]。去除梁板占有空间,流通空间高度约为 3.8 m 。操作层内部有直通室外地面的1条主车道,两侧与大气直接相通。

该地下污水处理厂采用自然通风+机械通风相结合的联合通风方式,地面设置有10个采光通风井,进行采光和输入新鲜空气,地下一层内部均匀分布铝制风管,风管汇合于排风井,排风井内部装有大功率风机,抽吸污浊空气并通过3个排风井送至室外,如图2所示。

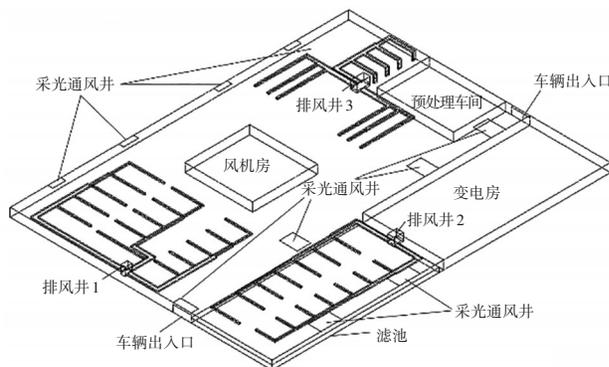


图2 风管式通风系统示意

Fig.2 Schematic diagram of current traditional duct ventilation system

为分析无风管活瓣式通风系统在实际工程

中的应用效果,在软件中建模,将通风方式改造为无风管式通风系统,在地下矩形箱体两侧短边设置静压孔板,通过地面风井送风至静压孔板,静压孔板可将空气整流,因此可将进风口视为均匀的进风口^[10]。在中部顶端设置8个出风口,出风口内部安装排风机,当送、排风机运行时,形成“两侧送风,中间出风”的气流组织方式。此外,由于无风管通风方式无需风管,地下箱体可省去建设风管的空间,层高可降低约 0.5 m ,即降至 3.3 m ,具体通风系统设计如图3所示。

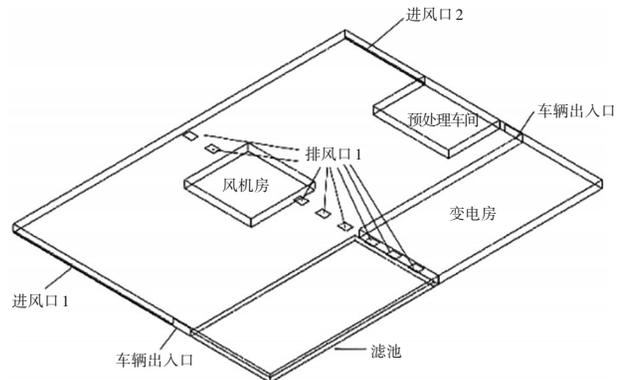


图3 无风管式通风系统示意

Fig.3 Schematic diagram of ductless ventilation system

2 数学模型的建立

采用三维计算流体力学模型对风管式与无风管式通风系统地下厂房内部气流进行模拟,其中采用standard $k-\varepsilon$ 模型进行分析,流速和压强耦合采用SIMPLE算法进行分析^[11-12]。

2.1 网格划分

采用商用软件FLUENT建立原尺寸的操作层模型,选用六面体网格对计算域进行网格离散处理,对两种通风方式的模型均采用FLUENT Meshing划分网格,在风口与各构筑物交界处进行局部加密处理,保障获得更加精密的实验数据。风管式通风系统网格划分数量为 3.77×10^6 ,无风管式通风系统网格划分数量为 3.45×10^6 。

为了验证网格的独立性,对风管式通风系统模型四种不同网格数量的计算结果进行了对比,并用测量结果进行校核,四种网格的数量分别为 1.70×10^6 、 2.50×10^6 、 3.77×10^6 、 5.00×10^6 。图4显示了人员常走巡视路线之一——监测线 $x=18\text{ m}$ 上各测点模拟值与测量值的对比结果。从图4可以发现,当网格数量达到 3.77×10^6 以后,网格数量并没有对计

算精度产生明显提升,故 3.77×10^6 网格数量既可以保障运算效果又不会对计算机造成较大负担,因此采用 3.77×10^6 网格数量进行后续研究。

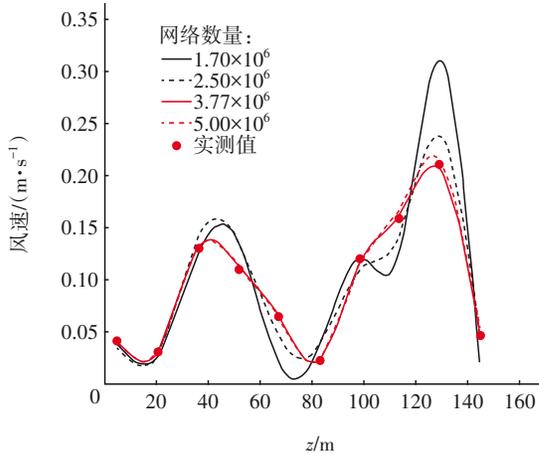


图4 网格独立性检验

Fig.4 Grid independence testing

2.2 边界条件

为保障地下厂房内部及时更新空气,保障室内环境清洁,根据《城镇地下式污水处理厂技术规程》(T/CECS 729—2020),正常运行工况下,换气次数不得少于6次/h^[13]。此外,还模拟了换气次数为4、8、10次/h的工况,形成一定的换气次数梯度,对比分析两种通风方式在不同工况下的性能效果。两种通风方式边界条件设置见表1和表2。

表1 风管式通风方式的边界条件

Tab.1 Boundary condition of duct ventilation system

项目	4次/h	6次/h	8次/h	10次/h
排风井1速度边界/($m \cdot s^{-1}$)	3.30	4.95	6.60	8.25
排风井2速度边界/($m \cdot s^{-1}$)	1.15	1.72	2.30	2.87
排风井3速度边界/($m \cdot s^{-1}$)	0.82	1.24	1.65	2.06
采光通风井压力边界/Pa	0	0	0	0
车辆出入口压力边界/Pa	0	0	0	0

表2 无风管式通风方式的边界条件

Tab.2 Boundary condition of ductless ventilation system

项目	4次/h	6次/h	8次/h	10次/h
送风口1速度边界/($m \cdot s^{-1}$)	0.59	0.88	1.17	1.47
送风口2速度边界/($m \cdot s^{-1}$)	1.18	1.77	2.36	2.96
排风口1速度边界/($m \cdot s^{-1}$)	0.44	0.66	0.88	1.10
车辆出入口压力边界/Pa	0	0	0	0

2.3 模型验证

为保障结果的可靠性,在该地下污水厂实地测量了通风系统运行时的实际风速:采用手持式热线

风速仪测量,测量高度为1.5 m,每个点位测量三组取平均值,共测量30个点位作为模拟值校核依据。表3显示了网格数量为 3.77×10^6 时监测线 $x=18$ m上各监测点位模拟值与实测值的情况。可以看出,各点位误差均控制在10%以内,表明该模型拟合较好,可以应用。

表3 模拟风速与实测风速结果

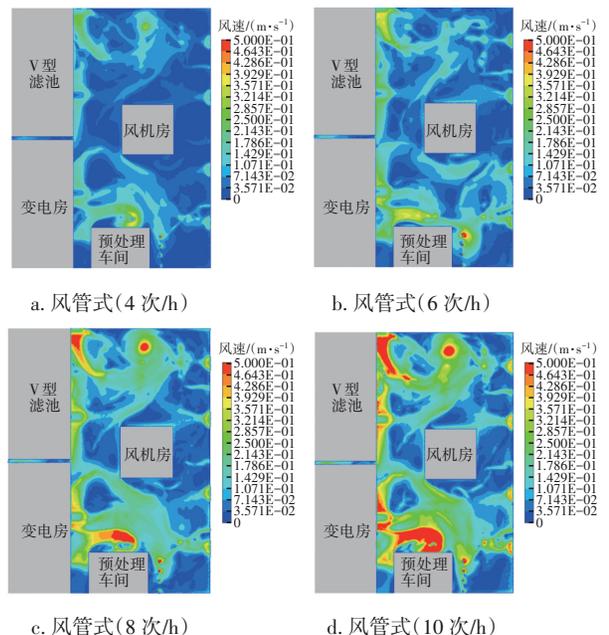
Tab.3 Results of simulated wind speed and measured wind speed

序号	模拟值/($m \cdot s^{-1}$)	实测值/($m \cdot s^{-1}$)	误差/%
1	0.042	0.041	2.659
2	0.033	0.031	5.161
3	0.131	0.130	1.131
4	0.114	0.110	3.282
5	0.065	0.065	0.631
6	0.023	0.023	1.348
7	0.116	0.120	3.033
8	0.162	0.160	1.356
9	0.207	0.210	1.648
10	0.047	0.047	0.596

3 结果与讨论

3.1 风速分布

1.5 m高度处平面是人体呼吸平面,故此平面是衡量通风系统工作是否良好的重要表征平面^[14]。图5显示了风管式通风系统和无风管式通风系统换气次数为4、6、8、10次/h工况下1.5 m高度平面处风速的模拟值。



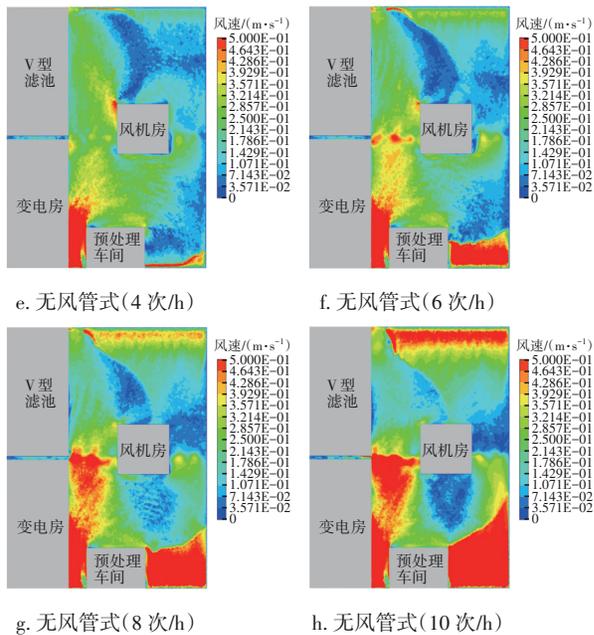


图 5 风管式和无风管式通风系统在 1.5 m 平面处的风速
Fig.5 Wind speed of duct and ductless ventilation systems at 1.5 m plane

从图 5 可以看出,相比于风管式通风系统,无风管式通风系统的气流组织更加稳定、均匀,其靠近送风口处的速度衰减比较快,离开送风口 30 m 后趋于稳定。由风速的变化可以看出,此种通风方式在空间内部产生了比较均匀、稳定的活塞流,在风机房附近空气流动因风机房的干扰而受影响较大,出风口设置在箱体中部顶端,两侧的气流均通过出风口排出,故气流在接近出风口时,速度上升比较快。风管式通风系统有赖于风管的均匀布置,室内空气自风内经风管到排风井排出室外,从模拟结果可以看出,风管式通风系统气流组织比较混乱,风速不稳定,在整个流体空间内部分布不均匀,越靠近排风井的位置,风速越大,换气效果越好,而在风管末梢,空气流动性较差。

在地下厂房内部选取了两条监测线,监测线位于人员巡视活动较为频繁的路线,提取出两条监测线(A、B)的风速值进行对比,两条监测线平行于地下箱体的长边,监测线 A、B 的 x 坐标分别为 $x=18\text{ m}$ 、 $x=56\text{ m}$,其 y 坐标均为 $y=1.5\text{ m}$,即 1.5 m 高度平面。监测线 A、B 在地下厂房内部的相对位置如图 6 所示。

图 7 为监测线 A、B 的风速分布。可以看出,随着换气次数从 4 次/h 增加到 10 次/h,风管式和无风管式通风系统地下厂房进、出口的风速均增大,内

部各点的风速也均增大,增加换气次数有利于快速通风换气。从图 7(a)可知,在靠近排风井位置的抽风口风速大于远离排风井位置抽风口的风速,风速范围为 0~0.25 m/s。

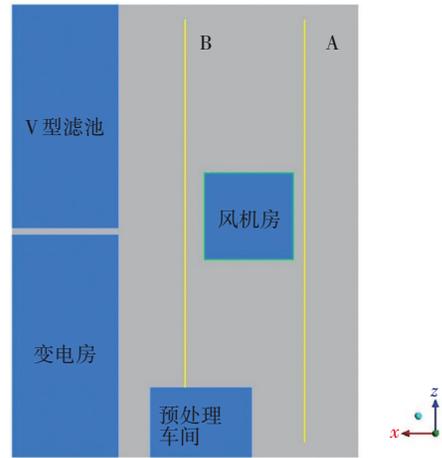


图 6 监测线 A、B 的位置

Fig.6 Location of monitoring lines A and B

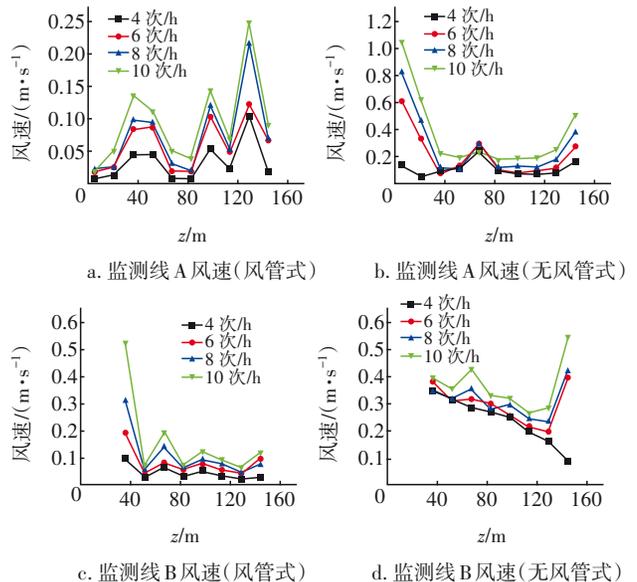


图 7 监测线 A、B 的风速分布

Fig.7 Wind speed distribution of monitoring lines A and B

从图 7(b)可以看出,两端是靠近进风口的位置,风速较大,且呈逐步减小的趋势,中部由于设置了排风井,故风速在中部时略有上升,在进风口和排风井之间形成了稳定的流动。还可以发现,在同换气次数条件下,无风管式通风系统分布在各监测点的风速均大于风管式通风系统,整体各监测点风速差值在 0.2 m/s 左右。

3.2 空气龄分布

空气龄是指空气质点从进入房间至到达室内

某点所经历的时间,反映了室内空气的新鲜程度,它可以综合衡量房间的通风换气效果,是评价室内空气品质的重要指标,空气龄越小,说明通风换气效果越好。图8为风管式和无风管式通风系统在1.5 m高度平面处的空气龄。

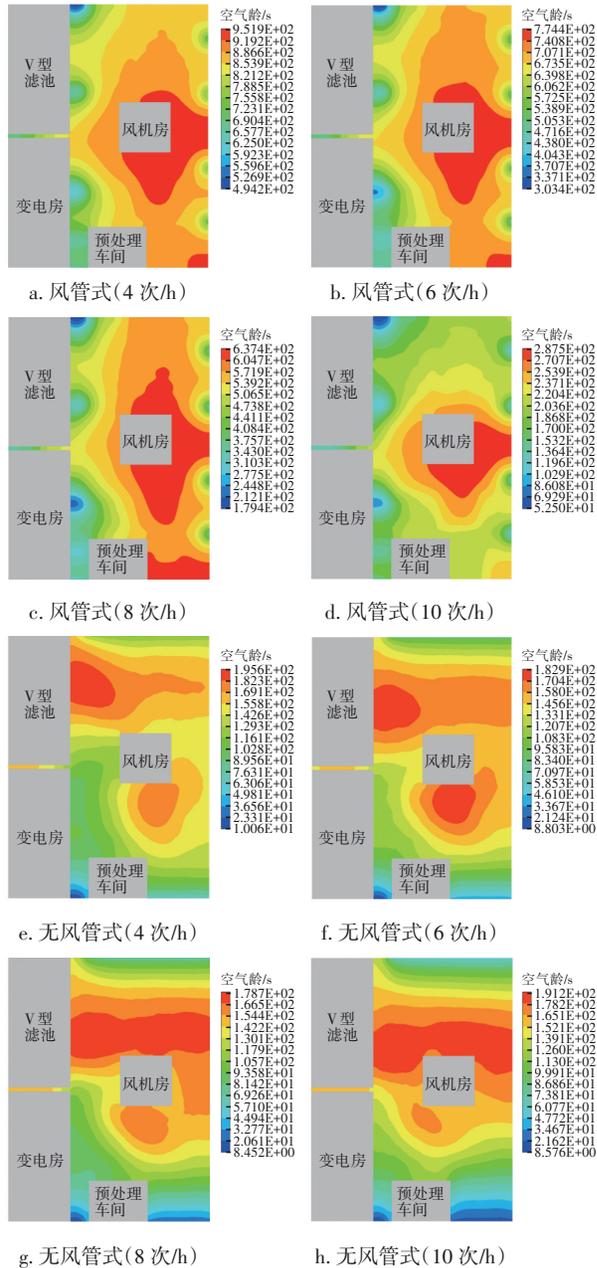


图8 风管式与无风管式通风系统在1.5 m平面处的空气龄
Fig.8 Air age of duct and ductless ventilation systems at 1.5 m plane

从图8可以发现,采用无风管式通风系统的地下厂房空气龄要明显小于风管式通风系统的。采用风管式通风系统时,除10次/h换气次数外,空气龄大部分区域在500 s以上,且空气龄最大的区域在

风机房附近。采用无风管式通风系统时,空气龄均可维持在200 s以下。随着换气次数的增加,两种通风系统的空气龄均减小。

4 结论

① 风管式和无风管式通风系统的通风效果都随着换气次数增加,风速呈现增大趋势,无风管式通风系统在不同工况下的风速整体上比风管式通风系统风速大。

② 风管式和无风管式通风系统的通风效果都随着换气次数的增加空气龄呈减小趋势,风管式通风系统空气龄大部分在500 s以上,无风管式通风系统空气龄均可维持在200 s以下。

③ 无风管式通风系统在地下污水厂具有气流组织更好、通风效率更高等优点。此外,因为无需布置大量风管,相比风管式通风系统,水平活塞流无风管通风系统具有投资少、效果佳等优点。

参考文献:

- [1] 李国金,李霞,郭淑琴,等. 地下式污水处理厂发展历程及工程设计注意要点[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8): 161-165.
LI Guojin, LI Xia, GUO Shuqin, *et al.* Development history and engineering design essentials of underground wastewater treatment plant [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(8): 161-165(in Chinese).
- [2] 龚云娇. 全地下式市政污水处理厂的设计和应用分析[J]. 工程技术研究, 2021, 6(2): 86-87.
GONG Yunjiao. Design and application analysis of fully underground municipal sewage treatment plant [J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(2): 86-87(in Chinese).
- [3] 杨一烽,杜炯,张欣. 国内地下式污水处理厂的发展现状和关键技术分析[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 101-106, 117.
YANG Yifeng, DU Jiong, ZHANG Xin. Development status and key technology analysis of underground wastewater treatment plants (UWWTPs) at home [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 101-106, 117(in Chinese).
- [4] 韩枫,周文和,王佳,等. 某地下污水处理厂通风气流组织数值分析[J]. 绿色科技, 2022, 24(14): 259-262.
HAN Feng, ZHOU Wenhe, WANG Jia, *et al.* Numerical analysis of ventilation airflow organization in

- an underground sewage treatment plant [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2022, 24(14): 259-262 (in Chinese).
- [5] 白小平,白玉华,徐强,等. 基于仿真模拟埋地式污水厂除臭通风系统的研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2022(8): 108-110, 128.
BAI Xiaoping, BAI Yuhua, XU Qiang, *et al.* Research on deodorization and ventilation system of buried wastewater treatment plant based on simulation [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2022(8): 108-110, 128(in Chinese).
- [6] 王飞. 地下车库无风管诱导通风系统的应用及数值模拟分析[D]. 西安:长安大学, 2015.
WANG Fei. The Adhibition of Non-ducted Fan Induction System in Underground Parking Garage and Numerical Simulation Analysis [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015(in Chinese).
- [7] 刘世德,王泽明,刘茜,等. 地下式污水处理厂关键节点及设计对策[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(S1): 215-220.
LIU Shide, WANG Zeming, LIU Qian, *et al.* Key nodes and design countermeasures for underground sewage treatment plants [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(S1): 215-220(in Chinese).
- [8] 林培真,宋旭,祝雅杰,等. 地下污水处理厂除臭工程设计问题探讨[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(16): 50-54.
LIN Peizhen, SONG Xu, ZHU Yajie, *et al.* Discussion on deodorization project design of underground wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(16): 50-54(in Chinese).
- [9] 苏晗辰,董磊,张欣,等. 地下污水处理厂大空间水平活塞流无风管通风系统实验与模拟研究[J]. *暖通空调*, 2022, 52(9): 15-20, 160.
SU Hanchen, DONG Lei, ZHANG Xin, *et al.* Experimental and numerical simulation of horizontal piston flow ductless ventilation system in large space of underground sewage treatment plants [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2022, 52(9): 15-20, 160 (in Chinese).
- [10] 严辉. 贴附通风静压箱的结构优化及出风均匀性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2022.
YAN Hui. Structural Optimization and Outlet Flow Uniformity Study of Wall Attached Ventilation Plenum Chamber [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022(in Chinese).
- [11] YAN C C, XUE X, WANG S W, *et al.* A novel air-conditioning system for proactive power demand response to smart grid [J]. *Energy Procedia*, 2014, 61: 25-28.
- [12] CUI B R, GAO D C, WANG S W, *et al.* Effectiveness and life-cycle cost-benefit analysis of active cold storages for building demand management for smart grid applications [J]. *Applied Energy*, 2015, 147: 523-535.
- [13] 董磊,张欣,杨一烽. 《城镇地下式污水处理厂技术规范》要点简析[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(16): 14-20.
DONG Lei, ZHANG Xin, YANG Yifeng. Synopsis of key points for technical specification for urban underground wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(16): 14-20(in Chinese).
- [14] 王雷. 多区域空气流动下建筑物内污染物扩散研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022.
WANG Lei. The Contaminant Dispersal Research in Building with Multizone Air Flow [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022(in Chinese).

作者简介:李洋洋(1988-),男,陕西宝鸡人,大学本科,高级工程师,主要从事城镇燃气及综合管廊工程设计研究工作。

E-mail: 327031600@qq.com

收稿日期: 2023-09-06

修回日期: 2024-01-30

(编辑:任莹莹)