张志强,赵 磊,王佳豪,等.基于 Ventsim 原尺度模拟强化通风前后污水管道内有害气体迁移扩散规律 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):4896-4903.
Zhang Z Q, Zhao L, Wang J H, et al. Prototype Scale Simulation on hazardous gas advection and diffusion affected by enhanced ventilation in sewage networks using Ventsim [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):4896-4903.

基于 Ventsim 原尺度模拟强化通风前后污水管道内有害气体迁移扩散规律

张志强[1,2*],赵 磊[1],王佳豪[1],袁宏林[1],卢金锁[1] (1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西 西安 710055；2.哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要：以西安某生活区污水管网为研究对象,利用 Ventsim 软件模拟预测了污水管道中硫化氢(H_2S)气体在自然和强化通风条件下的迁移扩散规律.结果表明,模拟与实测结果偏差小于 10%,证明了 Ventsim 模拟方法的可靠性.相比于自然通风条件,强化通风作用下管段风速提高了 8.8%,单一设置进气或排气风机有害气体完全排出污水管网需 108 和 105s,同时设置进气和排气风机能够进一步提升有害气体迁移速率,有害气体排出污水管网需 55s,仅设置进气风机会使 H_2S 逸散出检查井小孔.以上研究结果可为预测和控制污水管道中的有害气体以及管道安全运维提供技术方法支持.

关键词：城市污水管道；有害气体；扩散规律；Ventsim；强化通风技术
中图分类号：X506 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)09-4896-08

Prototype Scale Simulation on hazardous gas advection and diffusion affected by enhanced ventilation in sewage networks using Ventsim. ZHANG Zhi-qiang[1,2*], ZHAO Lei[1], WANG Jia-hao[1], YUAN Hong-lin[1], LU Jin-suo[1], (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2.State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150090, China). *China Environmental Science*, 2025, 45(9)：4896~4903

Abstract：This study investigated the advection and diffusion patterns of hydrogen sulfide (H_2S) in a prototype sewer network of a residential area in Xi'an, using Ventsim to simulate both natural and forced ventilation conditions. The results show that the simulated and measured values are within 10% difference, which confirms the reliability of the Ventsim simulation method. Forced ventilation increased the air velocity in sewer pipes by 8.8% compared to natural ventilation conditions. It was further found that utilizing only an intake or exhaust fan required 108s and 105s, respectively to completely expel hazardous gases from the sewage network. Simultaneous operation of both intake and exhaust fans significantly enhanced the migration rate of harmful gases, reducing the expulsion time to 55s. Nevertheless, using only an intake fan may cause H_2S to escape through small openings on manhole covers. These findings provide technical support for predicting and controlling hazardous gases within sanitary sewer networks, contributing to infrastructure safety and operational maintenance.

Key words：urban sewage pipelines；harmful gases；diffusion law；Ventsim；enhanced ventilation technology

城市污水管道是将污废水输送到污水处理厂的重要公共设施,其安全稳定运行与城市生态环境健康和可持续发展潜力密切相关[1].管道相对封闭的厌氧环境有利于硫酸盐还原菌(SRB)增值代谢,产生 H_2S 有毒有害气体[2,4],对混凝土管壁造成腐蚀,当浓度超过 0.1%时会危及运维人员的生命安全[5],同时 H_2S 臭味阈值低,其逸散容易引发恶臭污染事件[6].

在污水拖曳,气压变化作用下,污水管道中有害气体随气流不断迁移,针对有害气体在污水管道中的运动过程,国内外学者进行了相关研究.排水立管中流速较大的污水会导致水流附近气压发生变化,从而对空气产生强烈的抽吸作用[7],新鲜空气通过通气帽和横支管进入管网系统[8],通气量主要受到立管内负压的影响[9].在市政管道跌水井落水过程中吸入的大量气体,对管道气相空间起到加压作用,从而加速管道中气体的迁移过程[10].运行的污水泵能够改变气流运动状态,水泵开启时会使空气受到更大驱动力的作用,使 H_2S 被输送到下游更远处的管道中[11].

收稿日期：2025-02-20
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3203200);国家自然科学基金资助项目(52370100)
* 责任作者, 教授, zzq@xauat.edu.cn

明确污水管道有害气体迁移特性是风险防控重要前提,但管道规模庞大,环境复杂,不利于开展有害气体迁移的实验研究.随着计算机技术的发展,更多的学者开始利用计算流体动力学(CFD)模型开展有害气体迁移研究,EDWIN 等[12]首次将管道气流运动过程视为二维泊肃叶-库埃特流,发现有害气体在管道中的迁移过程主要受到水面和空气接触面积的影响.为了提高污水管道气流运动 CFD 模型预测准确性,WARD 等[13]在全尺寸重力流下水道中将一氧化碳作为示踪气体,通过测量其在流动过程中的相关数据改进了管道通风模型.但 CFD 模型计算量仍较大,参数设置复杂,对管道气体的迁移模拟精确度有待提升,同时 CFD 模型难以模拟大尺度管道范围有害气体迁移过程.

通风可以抑制有害气体生成,同时加速有害气体排放,在管道运维作业中应用较多,以确保工作人员安全,但需要打开井盖放置临时风机,不具有持续性.Lu 等[14]提出了建筑排水立管与市政污水管道直连的直连通风技术,但通风效果易受自然因素影响,且通过立管带入的气体对污水管网通风状态的改善长度有限[15].因此,以直连通风技术为基础,提出了在上下游建筑立管顶部安装风机为气体运动提供驱动力的强化通风技术[16],并通过现场实验和 CFD 模拟验证了其可靠性.但模拟范围尺度较小,只模拟了风机对建筑立管及距离立管 5m 内的检查井中气流的影响,强化通风技术实施前后大范围气体迁移规律尚不清楚,工程价值有限,有待更具体的研究.Ventsim 作为专业三维可视化仿真模拟平台,主要应用于矿井巷道等大尺度管道系统的污染物运移及有害气体扩散模拟[17,19].该软件可实时呈现气体扩散路径的动态演变过程及浓度分布特征,其在大尺度空间模拟方面已证实具有运算效率高,模拟精度可靠的技术优势.但目前该软件在污水管网有害气体迁移模拟领域的应用较少,其模型适用性及模拟精度仍有待实证研究验证.

基于以上背景,本研究引入 Ventsim 模拟软件,模拟污水管道中有害气体的运动迁移过程,以及强化通风作用对有害气体迁移的影响规律.以西安市某生活区附近污水管网系统为原型,建立了原尺度 Ventsim 三维可视化系统模型,利用现场实验验证通风模型的准确性;进一步探究了在自然和强化通风条件下,不同位置和不同浓度有害气体在污水管道中的迁移规律,评估了不同强化通风方式对污水管道内有害气体迁移的影响.本研究结果可为预测污水管道有害气体积聚高危区域和降低运维风险提供新的见解,也为强化通风技术的工程应用提供参考.

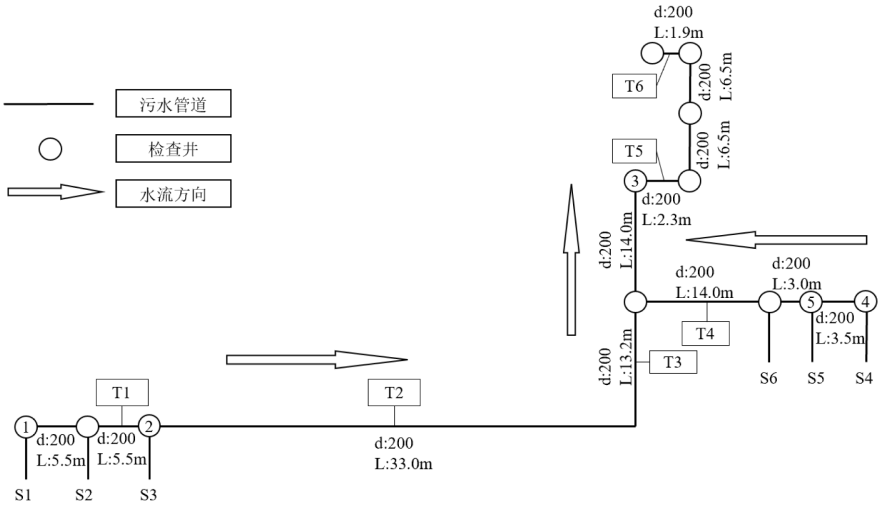


图 1　污水管网建模原型

Fig.1　Schematic of prototype sewer network

S,T,d,L 分别表示污水进口,监测点,管径,管长

1　实验方法

1.1　调研方法

为了保证模拟模型的完整性和代表性,选择西安市某地生活区附近具有支管,干管和主干管的污水管网作为建模原型,管道长度,管径,监测点

位置等详细信息如图 1 所示.使用 Testo435 热线风速仪测量测点 T1~T6 处在 6:00,8:00,14:00,16:00,22:00,24:00 时的风速,将测点在下游检查井出口处略高于污水管道水面的位置处的空气流速作为测点处的空气流速,精度为 0.01m/s;使用比长式二氧化碳检测管,测量污水管道中各测点处的二氧化碳浓度,精度为 0.01%;将 TR-72WF 温湿度记录仪深入到检查井内部测量井内温度,精度为 0.1℃.

1.2 Ventsim 建模方法

根据实测数据利用 Ventsim 软件建立 1:1 模型,如图 2 所示.Ventsim 软件在矿井的应用中通过在矿井入口或出口处设置风机为巷道中的气流运动提供动力,而在污水管道中污水流动时在气液界面产生的同向拖曳力为管道中气流运动提供动力.由于 Ventsim 模型中不支持设置动态水流,因此在各个管段设置一个与气相空间风速一致的“等效风机”[20]替代污水运动对气体的同向牵引效果,“等效风机”的设置方式如图 3 所示.将在各个时间点测量的风速的平均值作为“等效风机”的风速值.该管网系统中污水进口与建筑立管相连(部分未体现),立管高度为 22m,管径 DN100,水力坡度 0.3%,与污水进口 1 相连的建筑立管顶部的风机 1 为进气风机,风向竖直向下,与污水进口 S4 相连的建筑立管顶部的风机 2 为排气风机,风向竖直向上.Ventsim 模拟污水管道充满度为 0.5,气相空间内温度为 20.3℃,风机运行时风速为 3.5m/s,污水管道内部气流设置为“可压缩气流”,气流模拟时考虑自然风压.

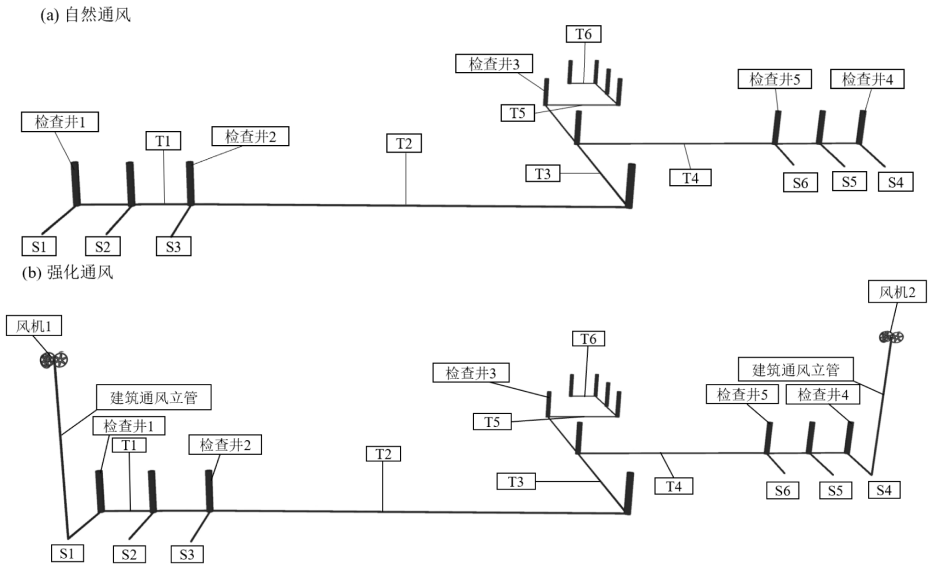


图 2 污水管道自然通风和强化通风 Ventsim 三维仿真模型

Fig.2 3D simulation model for sewage pipeline natural ventilation and enhanced ventilation in Ventsim



图 3 “等效风机”概念

Fig.3 Concept diagram of “equivalent fan”

1.3 模型验证方法

通过现场实验和模拟验证构建的污水管道模型模拟管道内的气流组织规律的可靠性.在实际管道和模型中相同位置设置气体释放源,在一定时间后,比较两者相对应位置的气体浓度变化情况.

首先,在现场实验前需要确定干冰重量与转化成 CO_2 浓度之间的关系.利用恒温水浴锅控制温度在(20.3±0.5)℃(污水管道气相空间温度).放入干冰前,用便携式二氧化碳检测仪(HGA600-CO_2)测量装置内 CO_2 的初始浓度,将装有 80g 干冰的烧杯快速放入水浴锅中并做好密闭处理,每隔 5min 用比长式二氧化碳检测管测量 CO_2 的浓度,在第 30min 时干冰的减少量为 13g,CO_2 浓度为 1%,即 13g 干冰完全升华可以等效浓度为 1%的 CO_2 示踪气体.

其次,进行现场实验.在用便携式二氧化碳检测仪测得下游检查井初始 CO_2 浓度后,将装有能产生 1%CO_2 的干冰的烧杯用绳子悬挂于与 T1 相邻的上游检查井管道入口处(整个过程快速完成,认为干冰质量无变化),待 30min 时用玻璃取样器进行气体取样,缓慢通入比长式二氧化碳检测管,获得管道终点 CO_2 浓度.

最后,进行模拟验证.在 Ventsim 模型中与 T1 所在管段相邻的上游检查井管道入口处设置总浓度为 1%二氧化碳作为产生源进行释放,持续释放 30min 后读取各个监测点的浓度.

1.4　模拟方法

利用在测点 T1~T6 多次测得的空气流速的平均值来校核 Ventsim 模型中“等效风机”的风速,接着以 CO_2 作为示踪气体验证构建的污水管道模型模拟管道内的气流组织规律的可靠性;在自然条件下,在不同位置稳态释放 1×10^{-6} 的 H_2S 气体,强化通风条件下在 S1 处 10s 内线性衰减释放 $10\times10^{-6}H_2S$ 气体.

2　结果与讨论

2.1　实测结果与 Ventsim 模拟结果对比

实测内容主要考察各测点在下游检查井出口处略高于污水管道水面位置处的空气流速及各处 CO_2 浓度,以验证 Ventsim 模型模拟条件设置的准确性以及用于模拟污水管道内有害气体的可行性.在自然条件下,不同测点处实测和模拟空气流速值如图 4(a)所示,“等效风机”风速与实测空气流速结果最大偏差为 9%,两者线性关系(图 4(b))良好,线性回归相关系数 R^2=0.99.在测点 T1~T6 处的 CO_2 浓度如图 4(c)所示,现场实测值和 Ventsim 模型中相对应位置的 CO_2 浓度值偏差最大为 8.5%,两者线性关系(图 4(d))良好,线性回归相关系数 R^2=0.97.因此,模型管道中风速条件设置的较为适宜,用 Ventsim 模型可以较好的模拟污水管道内有害气体的流动扩散规律.

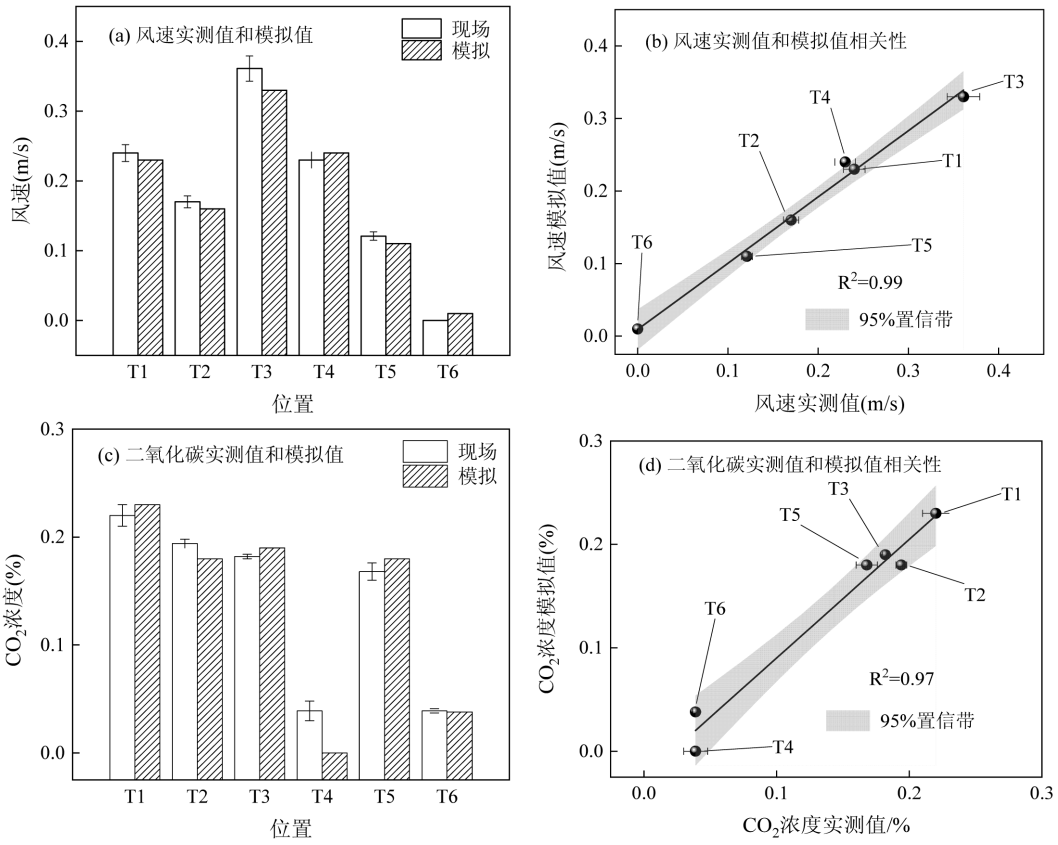


图 4　模型验证

Fig.4　Plot of model validation

2.2　自然条件下污水管道中有害气体迁移规律

通过在模型中设置产生源,模拟实际污水管网中不同位置产生的有害气体在管网中的迁移情况.张二飞等[15]研究表明,在自然条件下,管网中的气体

仅有 6%会从检查井小孔处逸出,因此,本研究在自然条件下不考虑有害气体通过检查井小孔的情况.

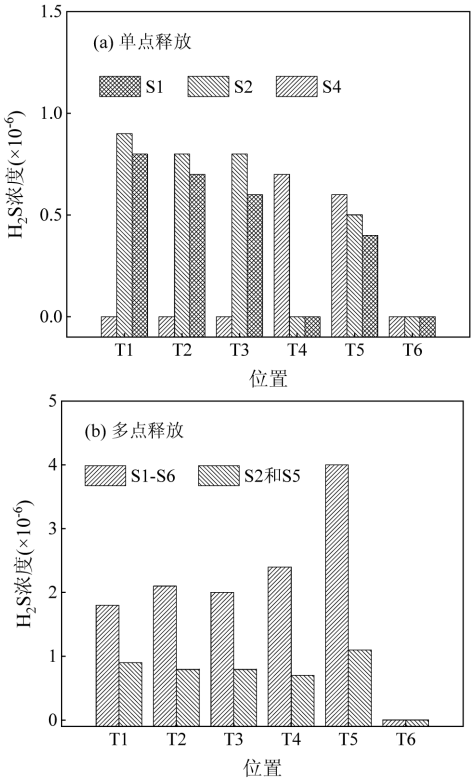


图 5 单点释放和多点释放的有害气体在管网中的迁移

Fig.5 Migration of harmful gases released at a single point and multiple points in the sewer network

图 5 显示了不同产生源位置有害气体的扩散情况.当 H_2S 在污水进口 S1,S2 释放时,右侧测点 T4 不能检测出 H_2S 气体,当在右侧污水进口 S4 释放时,左侧测点 T1,T2 和 T3 不存在 H_2S,这就说明污水进口 S1,S2 处的 H_2S 沿着测点 T1,T3,T5 和 T6 流向下游,而污水进口 S4 处的 H_2S 经过测点 T4,T5 和 T6 所在管段转移到下游.这是因为在自然通风条件下,污水管道中的气体主要受到水流的牵引作用,在同向牵引力的作用下使得有害气体的迁移方向与水流流动方向一致[16].在污水进口 S2 和污水进口 S5 同时设置产生源时,测点 T1,T2 和 T3 处检测出的产生 H_2S 浓度与单独在污水进口 S2 设置 H_2S 时的浓度相同,这也证明了这一点.当产生源从距离下游管段较近的污水进口 S2 移动到距离下游管段较远污水进口 S1 时,测点 T1,T2,T3 和 T5 处的 H_2S 浓度分别降低了 11.1%,12.5%,25.0%,20.0%.在污水进口 S1~S6 同时释放产生源时,各测点检测出的浓度明显比前几种工况高,这是因为不同位置释放的 H_2S 在等效风机的推动力作用下,向下游迁移的 H_2S 大部分累积在与释放位置距离较近的测点处加大有害气体风险.在模拟中,测点 T6 处的检测器没有检测到 H_2S 气体,这可能是测点 T6 与各个产生源距离较远造成的.以上结果表明在有害气体的迁移路径上,某一位置距离产生源越近有害气体浓度就越高.

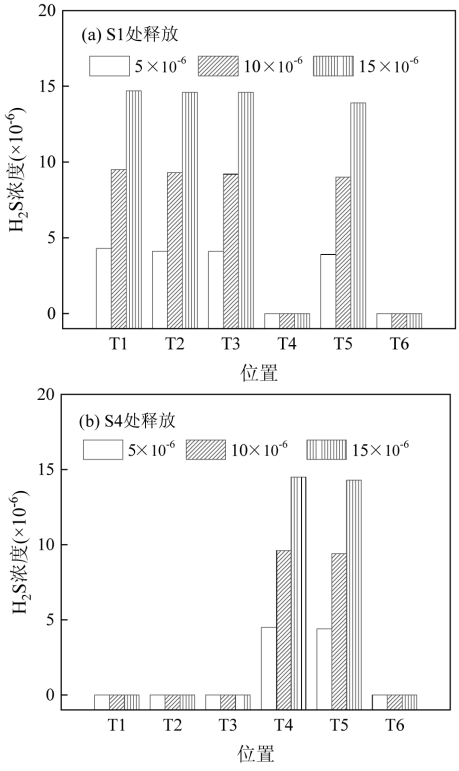


图 6 从 S1 处释放和从 S4 处释放的不同浓度梯度的 H_2S 扩散分布情况

Fig.6 Distribution of H_2S diffusion with different concentration gradients released at S1 and S4

图 6 显示了不同产生源浓度有害气体的扩散情况.在实际污水管网中,有害气体除了产生位置不同外,在相同的位置产生的浓度也会发生变化.同侧产生源位置有害气体的迁移过程类似,因此选择在两侧污水进口 S1,S4 处设置产生浓度梯度为 5×10^{-6}, 10×10^{-6},$15\times10^{-6}$$H_2S$ 的产生源,达到稳态后监测各个测点处的浓度.当在污水进口 S1 产生的 H_2S 浓度从 5×10^{-6} 提高到 10×10^{-6} 时,测点 T1,T2,T3 和 T5 处 H_2S 浓度分别提高了 120.9%, 128.8%, 124.4%, 130.8%.当在污水进口 S1 产生的 H_2S 浓度从 5×10^{-6} 提高到 15×10^{-6} 时,测点 T1,T2,T3 和 T5 中 H_2S 浓度分别提高了 241.9%, 256.1%, 256.1%, 256.4%.当在污水进

口 S4 产生的 H_2S 浓度从 5×10^{-6} 提高到 10×10^{-6} 时,测点 T4 和 T5 处 H_2S 浓度分别提高了 113.3%,113.6%.当在污水进口 S1 产生的 H_2S 浓度从 5×10^{-6} 提高到 15×10^{-6} 时,测点 T4 和 T5 中 H_2S 浓度分别提高了 222.2%,225.0%.以上结果表明在管网系统中提高产生源浓度,扩散路径上的各个位置浓度均相应提高

2.3　建筑立管强化通风条件下有害气体迁移规律

2.3.1　强化通风对管道风速的影响　为了使有害气体能够从产生位置流向下游管段同时不进入污水进口所在的横支管,需要在横支管与污水干管汇流处设置阻气帘幕,阻气帘幕能够阻止不同区域内气体互相迁移但不影响污水流动,形成气相分区.

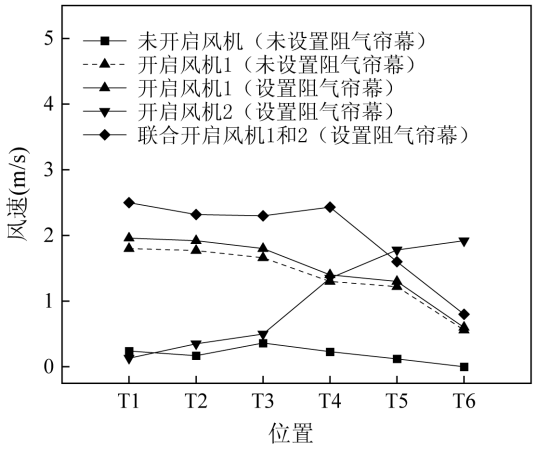


图 7　开启风机前后管段风速变化

Fig.7　Variations in air velocity in the pipe before and after turning on the fan

图 7 显示了不同条件下管道中的风速情况.在开启与污水进口 S1 相连的建筑立管顶端的风机 1 后,设置阻气帘幕时测点 T1~T6 处的风速是不设置阻气帘幕时的 108.8%, 108.4%, 108.4%, 107.6%, 106.5%, 107.1%.这是因为阻气帘幕对气流的阻碍作用,使风机鼓入的气流不再分流至污水进口所在横支管,由此可以看出,在横支管处安装帘幕具有能防止气流分散和增强主干管内的通风风速.开启风机后污水管道中风速明显提升,越靠近风机处的管道风速提升幅度越大.这是因为单一风机无法对距离该风机较远处的管段气相空间的气流产生影响,为了能扩大对管道有害气体的迁移的影响,可以联合设置进气和排气风机.从图中可以看出,相比于风机 1 或风机 2 单独开启,二者同时开启能提高更多管段中的气体流速.

2.3.2　不同的强化通风方式对硫化氢在管网中迁移和扩散的影响　在强化通风时,阻气帘幕将污水管网分为不同的气相区域,开启风机只会影响存在风机的区域,其他区域的有害气体会被隔离开来,此时,在强化通风区域,有害气体会在风机的驱动下更趋向于迁移而不是积聚,因此,在强化通风条件下将有害气体释放方式设置为衰减模式.

通过改变风机运行工况,模拟在不同风机设置情况下污水管道中有害气体的迁移情况.不同风机工况下各管段 H_2S 浓度随通风时间的变化如图 8 所示.当只开启风机 1 后,从图 8a 中可以看出在开启风机后 75s 测点 T4 和 T5 都能检测出 H_2S,此时硫化氢气体随气流在测点 T3 和 T4 的交汇处发生了分流,说明在污水进口 1 处产生的 H_2S 气体有两个扩散路径,一是经过测点 T1,T2,T3,T5 和 T6 流向下游,另一条路径是经过测点 T1,T2,T3,T4 与污水进口 4 相连的建筑立管排出管网,在 H_2S 气体完全进入测点 T6 后,在第 108s 时完全排出管网.

当只开启风机 2 后,从图 8(b)中看出,在 H_2S 气体扩散过程中测点 T5 和 T6 始终没检测出 H_2S,说明在污水进口 S1 处产生的 H_2S 气体只经过测点 T1,T2,T3,T4,与污水进口 S4 相连的建筑立管排出管网,第 25s 时测点 T1 处的 H_2S 浓度降为 0,在第 35s 后测点 T4 出现 H_2S,最后在第 105s 后 H_2S 气体完全从右侧建筑立管排出管网.与只开风机 1 相比,开启风机 2 时的气流组织更具有规律性,有害气体通过一条路径离开管网,这是因为风机鼓气时,污水管道气相空间会出现大于一个大气压值的正压差,而风机抽气时,污水管道中最大负压差不会超过一个大气压值,污水管道内的气体会在抽吸作用下汇集后从同一“出气口”排出,不会出现有害气体乱窜的情况.

当同时开启风机 1 和风机 2 后(图 8(c)),在 H_2S 气体扩散过程中测点 T5 和 T6 始终没检测出硫化氢,说明在污水进口 S1 处产生的 H_2S 气体迁移路径与单独开启风机 2 是一致的,即管段内气流通路径为从左侧建筑立管经过测点 T1,T2,T3 和 T4 到右侧建筑立管,在风机运行第 55s 时 H_2S 气体完全从右侧建筑立管排出管网.这个时间远远低于单独开启风机 1 或风机 2 时 H_2S 完全排出管网的时间.这是因为单侧

设置的风机无法对距离该风机较远处的管段气相空间的气流产生影响,联合设置进气和排气风机可以弥补这一不足,加快了有害气体在管道中的迁移速度.

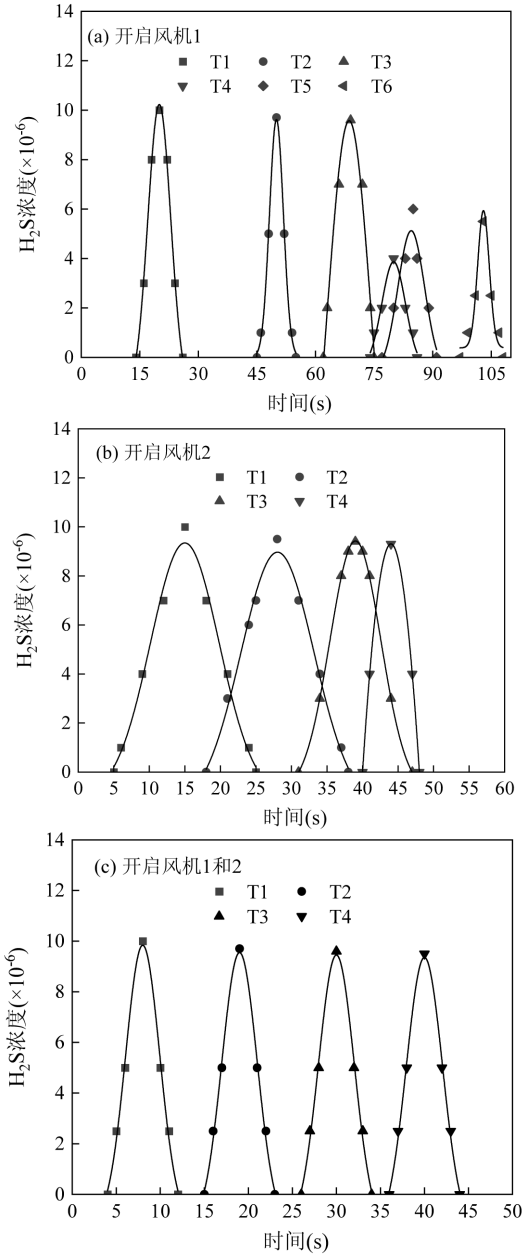


图 8 不同风机开启方式下 H_2S 在管网中的迁移过程

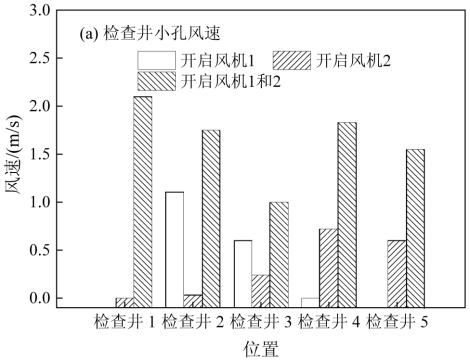
Fig.8 H_2S Migration process in sewer network under different fan operation conditions

在 3 个工况下,开启风机后 H_2S 扩散路径上的管段中的气体浓度呈现先升高后降低的趋势,这是因为风机开启时气流会将上游管段中累积的 H_2S 气体带入下游管段,使下游管段浓度短暂提升,在连续气流的推动作用下,管段内的有害气体将逐渐减少至完全离开该管段,有利于排除管网中的有害气体,降低恶臭污染和保障运维人员人生安全.

2.3.3 强化通风条件下检查井小孔处风速及硫化氢逸散预测 检查井盖小孔是污水管道与外界进行气体交换的潜在通道,特别是在强化通风条件下有害气体更易经过小孔排出[16,20],因此有必要研究在设置风机后检查井小孔处的风量和硫化氢的逸散情况.

由图 9(a)可知,当单独开启风机 1 或风机 2 时,距离风机越近的检查井上的小孔风速越高.在开启风机 1 时,检查井 1 距离风机最近,风速达到 1.4m/s,而靠近右侧建筑立管的 4 号检查井小孔几乎没有气流流出,风速接近于 0.在风机运行的整个过程中,从各检查井小孔溢出的风量总共为 16m^3/h,占全部风量的 5.1%.在开启风机 2 时,检查井风速也表现出距离风机越远,风速越小的规律.当在左右两侧联合设置进气和排气风机时,管网中检查井小孔的风速均相应提高,最高风速可达到 2.15m/s.

管网中的有害气体也随着气流从检查井小孔溢出系统,图 1 显示了在开启风机 1 时污水管道气相空间中的硫化氢向检查井中的扩散情况.由图 9(b)可知,当单独开启风机 1 时,各个检查井中 H_2S 浓度也呈现出与风速相似的规律.随着与风机距离的增加,检查井中 H_2S 浓度越低,靠近风机的检查井 1 处 H_2S 浓度可达到 1.7×10^{-6},而远离风机的检查井 4 和检查井 5 中几乎不能检测处 H_2S 气体.检查井 3 中能检测出 H_2S 也从侧面说明了开启风机 1 时气流到达测点 T3 后发生了分流.当单独设置排气风机和联合设置进气和排气风机时,排气风机的存在使得模型管道内呈现负压,各检查井小孔呈现“进气”状态,因此各检查井没有 H_2S 逸出.



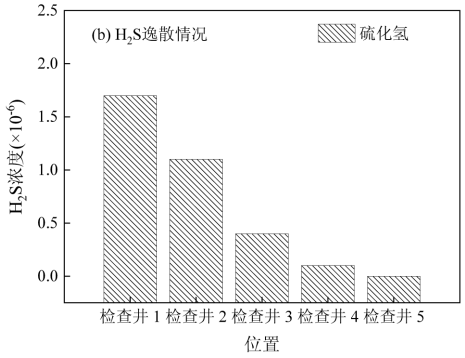


图 9　不同工况下小孔风速和 H_2S 逸散情况

Fig.9　Pickhole air velocity and H_2S emission under different operation conditions

3　结论

3.1　Ventsim 模型模拟与实测污水管道风速和 CO_2 浓度偏差在 10%以内,Ventsim 能够用于模拟污水管道内有害气体迁移运动.

3.2　在自然条件下,H_2S 在污水管道气相空间中沿着水流方向迁移,在管网中的浓度主要受到与产生源的距离和浓度的影响,较低的风速难以将其从管网中排出,容易在管道中聚积.

3.3　强化通风条件下,设置阻气帘幕既可以阻止干管中的有害气体进入进口所在的支管中,又能将干管中的风速提高 8.8%,增强通风效果.开启风机会改变有害气体迁移路径,单一设置进气或排气风机有害气体排出管网时间分别为 108s 和 105s,联合设置仅需 55s.仅单一设置进气风机时才会有 H_2S 逸散出检查井小孔.

参考文献：

[1] 刘　伟,石　烜,徐栋伟,等.流速对污水管道中甲烷与硫化物生成的影响 [J]. 中国环境科学, 2023,43(6):2938−2947.
Liu W, Shi X, Xu D W, et al. Effect of flow velocity on methane and sulfide formation in sewage pipes [J]. China Environmental Science, 2023,43(6):2938−2947.

[2] Cao J, Zhang L, Hong J, et al. Different ferric dosing strategies could result in different control mechanisms of sulfide and methane production in sediments of gravity sewers [J]. Water Research, 2019,164.DOI:10.1016/j.watres.2019.114914.

[3] Jiang G, Sharma K R, Yuan Z. Effects of nitrate dosing on methanogenic activity in a sulfide−producing sewer biofilm reactor [J]. Water Research, 2013b,47(5):1783−1792.

[4] Wu M, Wang T, Wu K, et al. Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: A review of the mechanisms and phenomena [J]. Construction and Building Materials, 2020,239.DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117813.

[5] Salehi R, Chaiprapa T S. Single−/triple−stage biotricklingfilter treating a H_2S−rich biogas stream: statistical analysis of theeffeet of empty bed retention time and liquid recirculation velocity [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2019,69(12):1429−1437.

[6] Sun Y, Terheijne A, Rijnaarts H, et al. The effect of anode potential on electrogenesis, methanogenesis and sulfidogenesis in a simulated sewer condition [J]. Water Research, 2022,226.DOI:10.1016/j.watres. 2022.119229.

[7] 廖足良,张　勤.建筑排水系统气压波动原因剖析 [J]. 给水排水, 1996,(1):39−40.
Liao Z L, Zhang Q. Analysis on the causes of air pressure fluctuation in building drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 1996,(1):39−40.

[8] Cheng C L, Lu W H, Shen M D. An empirical approach: Prediction method of pressure distribution on building vertical drainage stack [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2005,28(2):205−217.

[9] 彭海龙,张　勤,赵世明,等.关于单立管系统通气流量影响因素的试验研究 [J]. 中国给水排水, 2016,32(5):127−30.
Peng H L, Zhang Q, Zhao S M, et al. Experimental study on Influencing Factors of ventilation flow in single riser system [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(5):127−30.

[10] Zhang W M, Asce A M, Zhu Z D, et al. Use of Air Circulation Pipes in Deep Dropshafts for Reducing Air Induction into Sanitary Sewers [J]. Journal of Environmental Engineering, 2016,142(4):04015092.

[11] Qian Y, Zhu Z D, Yue D. Effect of pump operation on headspace air pressure variation in sanitary sewer systems [J]. Journal of Environmental Engineering, 2021,147(3):06021001.

[12] Edwinibonsu S, Steffler P. A physically−based model for computing natural ventilation rate in sanitary sewer atmosphere [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2004,2004(3):788−810.

[13] Ward, Matthew, Corsi, et al. Characterization of natural ventilation in wastewater collection systems [J]. Water Environment Research, 2011, 83(3):265−273.

[14] Lu J S, Zhang E, Li K. Enhancing the ventilation of sewers by using inhaled air in the vertical stack of a building [J]. Water Practice & Technology, 2018,13(3):555−565.

[15] 张二飞,卢金锁.建筑排水立管直接接入污水管网的通风性能分析 [J]. 中国给水排水, 2018,34(17):112−115.
Zhang E F, Lu J S. Improvement of sewer ventilation performance by directly linking with building vertical pipe [J]. China Water & Wastewater, 2018,34(17):112−115.

[16] 袁宏林,樊政鑫,卢金锁,等.污水管道强化通风技术的 CFD 模拟及现场验证 [J]. 环境工程学报, 2022,16(3):1048−1054.
Yuan H L, Fan Z X, Lu J S, Simulation and experimental study on reinforced ventilation of sewage pipelines [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022,16(3):1048−1054.

[17] 肖梦辉,于　涛,常宝孟,等.基于 Ventsim 的复杂矿井火灾数值模拟研究 [J]. 矿业研究与开发, 2021,41(12):129−134.
Xiao M H, Yu T, Chang M B, et al. Numerical simulation study on complex mine fire based on ventsim [J]. Mining Research and Development, 2021,41(12):129−134.

[18] 田晓波.基于矿井三维通风的火灾模拟研究 [J]. 当代化工研究, 2023,(2):141−143.
Tian X B. Study of fire simulation based on three−dimensional ventilation in mines [J]. Modern Chemical Research, 2023,(2):141−143.

[19] 郝海清,蒋曙光,王　凯,等.基于 Ventsim 的矿井运输巷火灾风烟流应急调控技术 [J]. 煤矿安全, 2022,53(9):38−46.
Hao H Q, Jiang S G, Wang K, et al. Emergency control technology of air and smoke flow in mine belt roadway fire based on ventsim software [J]. Safety in Coal Mines, 2022,53(9):38−46.

[20] 周亚鹏.城镇排水系统通风效应分析及增强通风试验研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.
Zhou Y P. Analysis of ventilation effect of urban drainage system and experimental research on enhanced ventilation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.

[21] 刘艳涛,卢金锁,闫帅军.污水检查井盖调研及其预留孔对井内气体组分影响 [J]. 中国给水排水, 2017,33(3):97−101.
Liu Y T, Lu J S, Yan S J. Survey on sewage manhole cover and impact of its reserved holes on gas components in manhole [J]. China Water & Wastewater, 2017,33(3):97−101.

作者简介：张志强(1988−),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士,主要从事城镇排水系统运行风险识别与控制研究.发表论文 70 余篇. zzq@xauat.edu.cn.