

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.008

夏季综合管廊水信舱空气参数实测及结露问题分析

邵传民¹, 雷文君¹, 徐颖², 王建伟³, 田贯三¹

(1. 山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 3. 济宁太白湖新区建设局, 山东 济宁 272002)

摘要: 综合管廊作为相对封闭的地下空间,室内空气参数的变化对管廊内管道及构件存在一定的影响。因此,掌握管廊内空气参数的变化规律非常必要。对某综合管廊水信舱一个标准通风区间内的夏季空气参数和管道表面温度进行现场测试,并对管道表面结露现象进行分析。结果表明,水信舱内CO、CO₂浓度较稳定且处于规定范围内,不会危及运维人员健康;舱内平均空气流速为0.1 m/s,空气流动性较差;舱内空气温度为23.5~24.8℃,相对湿度保持在89.5%以上;舱内空气露点温度较高,给水和中水管道表面均存在结露。为防止结露,给出了加强舱室通风和在管道外表面增加保温层的建议,以期综合管廊运行维护和相关设计规范修订提供数据支撑。

关键词: 综合管廊; 水信舱; 环境参数; 现场测试; 表面温度; 结露

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0053-07

Measurement of Air Parameters and Analysis of Condensation Issues within Water and Electricity Information Cabin of a Utility Tunnel during the Summer

TAI Chuan-min¹, LEI Wen-jun¹, XU Ying², WANG Jian-wei³, TIAN Guan-san¹

(1. Department of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan

250101, China; 3. Construction Bureau of Taibai Lake New Area in Jining, Jining 272002,

China)

Abstract: As a relatively enclosed underground space, variations in indoor air parameters impact the pipes and components inside utility tunnels. Therefore, mastering the variation in air parameters inside utility tunnels is necessary. Field tests were conducted on both the air parameters and surface temperatures of the pipelines during standard ventilation interval in a water and electricity information cabin of the utility tunnel in summer, and the phenomenon of condensation on the pipeline surface was analyzed. The results show that CO and CO₂ concentrations in the cabin were stable and all within the acceptable range, which will not endanger the health of maintainers. The air circulation within the cabin is poor, with an average air velocity of only 0.1 m/s. The air temperature in the cabin varies between 23.5℃ and 24.8℃, and the relative humidity remains above 89.5%. The dew point temperature of the air inside the cabin is relatively high, leading to condensation on the surfaces of the water supply and reclaimed

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805001-5); 山东建筑大学博士科研基金资助项目(X24016); 山东省高等学校青年创新团队发展计划项目(鲁教〔2021〕51号)

通信作者: 雷文君 E-mail: leiwenjun@sdjzu.edu.cn

water pipelines. Suggestions are given to strengthen the ventilation of the cabin and to add an insulation layer on the outer surface of the pipe to prevent condensation. The results of this study are expected to provide data support for the operation and maintenance of utility tunnels and for the revision of relevant design specifications.

Key words: utility tunnel; water and electricity information cabin; environmental parameters; field tests; surface temperature; condensation

近年来,我国城市地下空间建设方兴未艾^[1],城市地下综合管廊可容纳两类及以上城市工程管线^[2],是保障城市运行的重要基础设施和“生命线”^[3]。我国高度重视并不断推进城市地下综合管廊建设^[4]。据统计,截至2018年我国建成地下综合管廊总长度已超过7 000 km,居世界首位^[5]。作为相对封闭的地下空间,室内空气参数对综合管廊内各类市政管线的安全运行和运维人员身体的影响是一个值得关注的问题。

国内外很多专家学者对综合管廊内的空气参数展开了研究^[6-19],但主要集中在采用数值模拟方法对综合管廊尤其是电力舱的速度场、温湿度的变化情况的讨论分析,缺少对综合管廊内空气参数现场测试的研究,尤其缺乏水信舱内空气参数的数据。水信舱内主要布设给水管道、中水管道和通信电缆,与电力舱相比,发热量较低。此外,我国城市地下管廊建设尚处于探索阶段,相关标准和设计规范缺乏实测数据。因此,对济宁市某水信舱内的空气环境参数,以及给水和中水管道表面温度进行了现场测试,对管道表面结露现象进行了探讨和分析,并给出了防止结露的建议。

1 综合管廊概况

选择山东省济宁市某综合管廊水信舱进行测试。该段综合管廊为南北走向,全长4.5 km,矩形双舱结构,分别为水信舱和电力舱,断面尺寸分别为2.5 m×2.5 m、2.0 m×2.5 m。水信舱内敷设给水管道(DN700)、中水管道(DN200)和通信电缆,具体布置形式如图1所示。综合管廊敷设于道路中间绿化带下,管廊顶部覆土厚度约2.25 m。综合管廊每间隔200 m左右设一个通风区间,两端分别设置一个进风口和一个排风口,相邻两个通风区间共用一个进风亭或排风亭。综合管廊采用自然通风和机械通风相结合方式,进风口不设通风机,排风口设2台通风机,平时1用1备,事故时2台全开。选取水

信舱一个通风区间作为研究对象,如图1中标记的蓝线所示。该综合管廊于2014年4月建成并正式投入运营。目前,综合管廊内部已出现金属管卡、支架锈蚀和温湿度等传感器失效的情况。

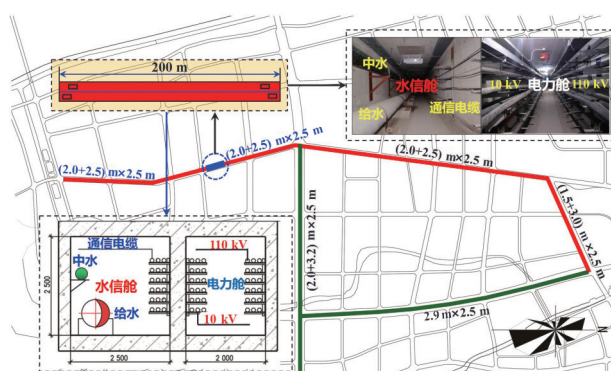


图1 综合管廊平面布置及其断面示意

Fig.1 Layout plan and section diagram of utility tunnel

2 测试方法

2.1 测点布置

水信舱内部共设3个测试断面(A、B、C断面),测点布置如图2所示。A、C断面距离进风口、排风口均为4.5 m。B断面位于水信舱中心,距离A、C断面均为89.5 m。A、C断面分别设置5个环境参数测点(测定指标为温度、湿度、CO、CO₂)和6个表面温度测点,环境参数测点均匀布置,距离侧壁、底板和顶板均为0.30 m,测点间距为0.95 m,表面温度测点分别设置在给水管道和中水管道顶部、底部和中间位置。除环境参数测点和表面温度测点外,B断面设置一个风速测点,位于水信舱垂直居中位置,距离相邻空气测点分别为0.30 m和0.65 m。取上述测点的平均值作为测试结果。为避免室外测点遭到人为破坏,将其设置于综合管廊管理处院内,距离进风口约35 m,距地面高度为1.5 m。

测试中使用的测量仪器性能参数如表1所示。采用TSI 7545室内空气质量检测仪(以下简称TSI 7545)对空气温度、湿度、CO和CO₂进行数据采

集,露点温度则由 TSI 7545 根据温度、湿度计算得出。风速测量采用 TSI 9545 风量风速仪(以下简称 TSI 9545),测量精度为±0.015 m/s。给(中)水管道表面温度测量采用 JTNT-A 型多通道热电偶测温仪,测量精度为±0.5℃。

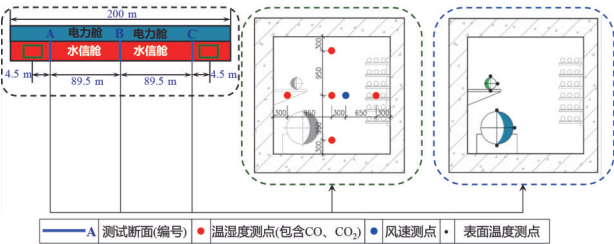


图2 测点布置示意

Fig.2 Layout of measurement points

表 1 测量仪器性能参数

Tab.1 Performance parameter of measuring instruments

测试参数	测量设备	测量范围	精度
温度/℃	TSI 7545 室内空气质量检测仪	0~60	±0.6
湿度/%		5~95	3.0
CO ₂ /%		0~0.5	3.0
CO/(mg·m ⁻³)		0~572.5	3.0
风速/(m·s ⁻¹)	TSI 9545 风量风速仪	0~30	±0.015
表面温度/℃	JTNT-A 型多通道热电偶测温仪	-50~120	±0.5

2.2 测试方案

测试时间为 8 月 12 日 09:00—13 日 09:00。测试期间,天气晴朗无降雨,室外空气温度为 22.2~32.7℃,相对湿度为 20.2%~94.6%,风速为 0~2.5 m/s。TSI 7545、TSI 9545 均每隔 5 min 记录一次空气温度、湿度、露点温度、CO、CO₂ 和风速,多通道热电偶测温仪每隔 4.0 h 记录一次给水、中水管道表面温度。

2.3 误差分析

不同测试位置测量数据的算术平均值($\bar{x}$)的计算见下式:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$
 (1)

式中: x_i 为直接测量值; n 为测量次数。

温度、相对湿度、CO、CO₂ 等测量参数的标准偏差 $\sigma^{[14]}$ 计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$
 (2)

直接测量参数的相对标准偏差(RSD)计算公式

如下:

$$RSD = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$
 (3)

将测试数据代入式(3),计算得出水信舱空气温度、相对湿度、CO、CO₂、风速、表面温度的 RSD 最大分别为 4.9%、3.5%、2.9%、3.9%、4.7%、3.7%,均满足精度小于 5% 的要求。

3 测试结果及分析

3.1 CO、CO₂ 浓度分析

水信舱测试断面 CO、CO₂ 浓度变化曲线如图 3 和图 4 所示。

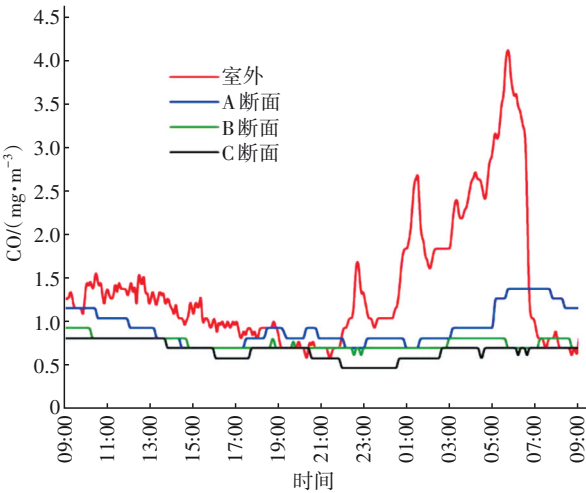


图3 水信舱 CO 浓度变化

Fig.3 CO concentration change in water and electricity information cabin

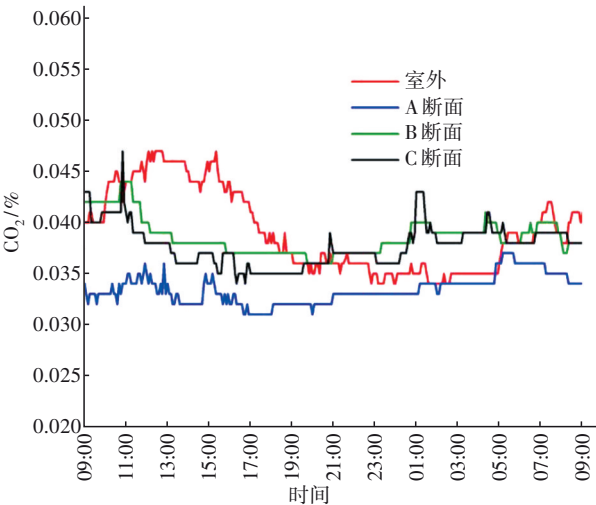


图4 水信舱 CO₂ 浓度变化

Fig.4 CO₂ concentration change in water and electricity information cabin

由图 3 可知,测试期间,室外空气 CO 为 0.57~

4. 12 mg/m^3 ;水信舱内3个测试断面处CO浓度均较低,变化幅度较小,保持在 1.7 mg/m^3 以下,远远低于《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2022)中的CO指标限值(10 mg/m^3)。

由图4可以看出,测试期间室外空气 CO_2 为 $0.034\% \sim 0.047\%$,水信舱内 CO_2 为 $0.031\% \sim 0.047\%$,水信舱内 CO_2 浓度与室外相差不大,低于GB/T 18883—2022中的 CO_2 指标限值(0.10%)。

综上,水信舱内CO和 CO_2 浓度均处于正常范围内,不会对运维人员的健康造成影响。

3.2 风速及温湿度分析

3.2.1 风速分析

连续监测记录了水信舱内风速的变化,结果如图5所示。

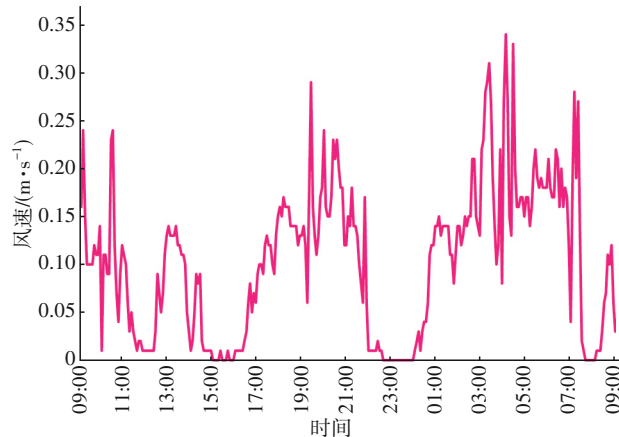


图5 水信舱风速变化

Fig.5 Wind velocity change in water and electricity information cabin

由图5可以看出,水信舱内最大风速为 0.34 m/s ,最小风速为 0 m/s ,平均风速为 0.10 m/s 。舱内风速随时间的变化是随机的,没有规律性。舱内大约有45%的时间风速都小于 0.10 m/s ,其中风速为 0 m/s 的时间占比约为10%。这说明自然通风条件下,舱内空气的流动可能主要受到室外风速的影响,导致风速较小,空气流动性差。

3.2.2 温湿度分析

水信舱内温度、湿度变化分别见图6、7。

从图6可以看出,水信舱内空气温度为 $23.5 \sim 24.8^\circ\text{C}$,较为稳定,基本不受室外环境影响;白天,舱内空气温度比室外空气低近 10°C ;夜晚,舱内空气温度稍高于室外空气温度,最高约 2°C 。这是因为所测试的管廊位于地下 2.25 m 处,围护结构均为

土壤,而土壤具有较大的热惰性,再加上舱内空气的流动性较差,舱内空气与室外空气之间的热量交换较少,因此舱内空气温度较为稳定,不受室外空气温度变化的影响。此外,与电力舱相比,水信舱内通信电缆发热量较少,对舱内温度的影响也不大。

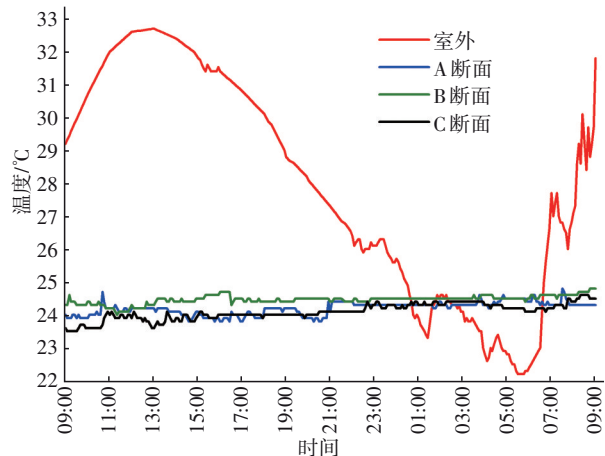


图6 水信舱温度变化

Fig.6 Air temperature change in water and electricity information cabin

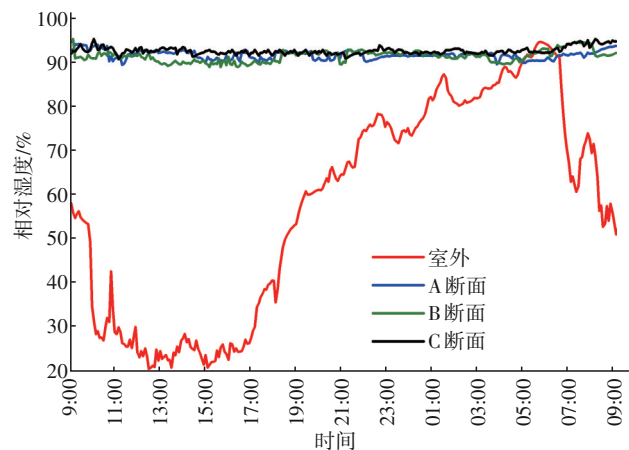


图7 水信舱相对湿度变化

Fig.7 Relative humidity change in water and electricity information cabin

从图7可以看出,舱内空气相对湿度变化较为稳定,与室外空气相对湿度的变化不一致。舱内相对湿度较高,接近饱和,在 $89.5\% \sim 95.3\%$ 之间变化,与文献[10]和[11]结果具有一致性。舱内相对湿度较高可能由3方面原因引起:①综合管廊建在地下,受地下水等因素的影响^[8],廊体内空气相对湿度较大;②舱室内空气流动性较差,与室外空气之间的湿交换较少,舱内空气湿度不断升高;③在含

湿量相同的情况下,空气的相对湿度随着空气温度的升高而降低,但是水信舱内的空气温度较为稳定,最高温度仅比最低温度高 1.3°C ,这也导致舱内相对湿度较为稳定且数值较高。

3.3 给(中)水管道表面温度及结露成因分析

根据对综合管廊运行情况的观察,综合管廊目前采用自然通风而非机械通风,而且空气流速较低。此外,济宁市自然资源和规划局(市林业局)提供的地下水位资料显示,地下水位埋深 $>12\text{ m}$,远低于综合管廊底板。另外,综合管廊本体防水较好,未发现渗水问题。因此,研究中不再对上述因素展开分析和讨论。

通过现场实测,给水和中水管道的表面温度较稳定,给水管道表面温度为 $22.2\sim 22.7^{\circ}\text{C}$,中水管道表面温度为 $23.1\sim 23.7^{\circ}\text{C}$ 。现场调研发现,给水管道表面结露严重,中水管道底部出现结露现象(见图8)。

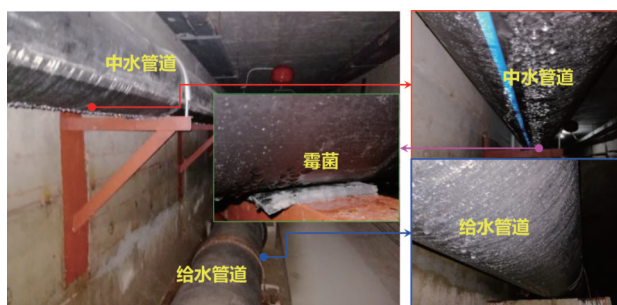


图8 水信舱给(中)水管道表面结露现象

Fig.8 Condensation phenomenon on the surface of supply water (reclaimed water) pipeline

根据结露机理可知,物体表面温度低于空气露点温度表示在物体表面有结露的可能,反之,则表示物体表面不结露。因此,可依据水信舱给(中)水管道表面温度与空气露点温度判断其结露的可能性。当空气中水汽含量不变时,在气压保持不变的情况下,使空气冷却达到饱和时的温度称为露点温度。现场实测得到的水信舱内空气露点温度和管道表面温度对比如图9所示。

由图9可看出,水信舱空气露点温度为 $22.1\sim 23.7^{\circ}\text{C}$,露点温度相对较高。给水管道表面温度均低于空气露点温度;大部分时间内中水管道表面温度均略高于空气露点温度,但在个别时间段,其表面温度仍会低于空气露点温度。因此,给水和中水管道表面均出现了结露(见图8)。

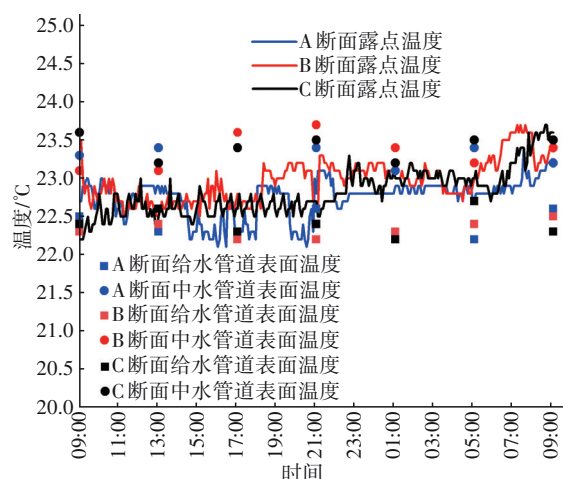


图9 水信舱给(中)水管道表面温度与露点温度对比

Fig.9 Comparison of surface temperature and dew temperature of supply water (reclaimed water) pipeline

此外,在一些城市的供水系统中,供水水源通常采用地下水和深层水库水,此类水源水温较低,空气中的水蒸气在水信舱内给水管道表面的结露会更为严重。目前,对全国各地水信舱的调研发现,舱内给水管道表面均产生了不同程度的结露现象,其危害不容忽视^[8,20]:①凝结水锈蚀金属管道和支吊架,会引起重大安全隐患和经济损失;②凝结水诱发霉菌等微生物滋生(见图8),导致卫生条件变差,不利于运维人员的身体健康。Wu等^[10]对南京某综合管廊空气中的真菌进行了定性和定量研究,发现三个舱室的真菌浓度分别为931、895、729 CFU/ m^3 ,超过室内空气中真菌的建议低阈值水平($500\text{ CFU}/\text{m}^3$)。

因此,为防止水信舱空气中的水蒸气在给水、中水管道及管道附属设备表面凝结,有必要采取相应的解决措施。但是,《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)、《室外给水设计标准》(GB 50013—2018)和《城镇污水再生利用工程设计规范》(GB 50335—2016)均未给出综合管廊内给(中)水管道防结露设计的相关规定。

4 防结露措施探讨

为防止水信舱空气中的水蒸气在管道及管道附属设备表面上凝结,可以从结露的机理入手采取降低露点温度或提高管道表面温度的措施。

① 开启机械通风系统

建议水信舱夏季开启机械通风,增大舱内空气流动的速度,实现与室外空气之间的热湿交换,达

到提高室内空气温度和降低空气湿度的目的,从而降低露点温度。《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)规定管廊内上限温度为40℃,正常通风换气次数不应小于2次/h,这一规定是否满足降低露点所需的风量还需进一步探讨。

② 管道外表面增设保温层

管道表面温度与输送介质温度密切相关,但提高介质温度并不现实。建议对水信舱内给水和中水管道外表面增设保温层,以降低管道表面的传热效率,减少低温介质与空气的热交换,从而提高管道外壁温度至露点以上。从热力学原理看,空气水汽含量不变时,环境温度升高会使饱和蒸汽压升高,空气持水能力增强,更难饱和;而露点温度仅由水汽含量决定,与环境温度无关。保温层通过提升管道外壁温度至露点以上,可从根本上避免结露。

以上两种措施均能实现防止水信舱给水和中水管道及管道附属设备表面结露的目的,但是措施①会增加管廊的运行费用,措施②虽会增加管廊的初投资,但可节省风机电能的消耗。建议修订综合管廊的相关规范时,增加水信舱内给水和中水管道宜加设保温层的条文及说明。管廊运行管理部门可根据实际情况,选择其中一种较为适用的措施。

5 结论

对济宁市某综合管廊水信舱内空气参数和给(中)水管道表面温度进行了现场测试,分析管道表面结露现象,并给出了相应的解决措施,主要结论如下:

① 水信舱内空气中的CO、CO₂浓度较小,且分别保持在1.7 mg/m³、0.050%以下,不会对运维人员的健康造成影响。

② 自然通风时,水信舱内风速为0~0.34 m/s,且风速低于0.1 m/s的持续时间较长,空气流动性差;水信舱内部温湿度相对稳定,基本不受室外环境的影响;舱室内外空气温差近10.0℃,相对湿度较高,接近饱和。

③ 水信舱内空气露点温度较高,在22.1~23.7℃之间,给水管道和中水管道表面温度均低于露点温度,且出现了结露。

④ 为防止结露,提出了加强机械通风和管道外表面增设保温层的技术措施,可为相关规范的修订提供参考。

参考文献:

- [1] QIAO Y K, PENG F L, SABRI S, *et al.* Low carbon effects of urban underground space [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 45: 451–459.
- [2] 王璐. 我国城市地下综合管廊的发展研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
WANG Lu. Research on the Development of Urban Underground Utility Tunnel in China [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018 (in Chinese).
- [3] 王长祥, 屈凯, 李云飘, 等. 国外综合管廊建设概览[J]. *特种结构*, 2019, 36(4): 49–57.
WANG Changxiang, QU Kai, LI Yunpiao, *et al.* Introduction of foreign utility tunnel construction [J]. *Special Structures*, 2019, 36(4): 49–57 (in Chinese).
- [4] TAI C M, TIAN G S, LEI W J. Measurement of indoor environmental parameters and analysis of the condensation phenomenon in urban utility tunnels [J]. *Indoor and Built Environment*, 2022, 31 (4): 1091–1106.
- [5] YANG C, PENG F L, XU K, *et al.* Feasibility study on the geothermal utility tunnel system [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 46: 101445.
- [6] 国玉山, 于秋燕, 赵兴海, 等. 城市综合管廊通风系统关键技术研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2022, 41 (7): 80–84.
GUO Yushan, YU Qiuyan, ZHAO Xinghai, *et al.* Resistance analysis of ventilation system of utility tunnel [J]. *Building Energy & Environment*, 2022, 41 (7): 80–84 (in Chinese).
- [7] 郑轶丽, 谢鲁, 曾小云. 成都地下综合管廊复合型集约化总体设计[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(2): 72–78.
ZHENG Yili, XIE Lu, ZENG Xiaoyun. General design of composite intensive underground urban utility tunnel in Chengdu [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(2): 72–78 (in Chinese).
- [8] 王亮, 宋翠翠, 杨敬德, 等. 苏州地区地下综合管廊余湿分析[J]. *建筑技术*, 2020, 51(12): 1507–1510.
WANG Liang, SONG Cuicui, YANG Jingde, *et al.* Dehumidification load analysis of urban utility tunnel in Suzhou [J]. *Architecture Technology*, 2020, 51 (12): 1507–1510 (in Chinese).
- [9] 赵丹阳. 下穿河流复杂环境下管廊施工技术[J]. *建筑机械*, 2018(4): 95–98.
ZHAO Danyang. Construction technology of pipe corridor under river complex environment [J]. *Construction Machinery*, 2018 (4): 95–98 (in Chinese).

- [10] WU D M, ZHANG Y, LI A G, *et al.* Indoor airborne fungal levels in selected comprehensive compartments of the urban utility tunnel in Nanjing, Southeast China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101723.
- [11] 许云骅, 丛北华, 邹丽, 等. 海滨城市综合管廊通风降湿系统适应性模拟研究[J]. *中国给水排水*, 2022, 38 (7): 109–115.
- XU Yunhua, CONG Beihua, ZOU Li, *et al.* Simulation of ventilation and dehumidification system adaptability of utility tunnel in coastal city [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(7): 109–115 (in Chinese).
- [12] 王烁焱. 长距离综合管廊电缆舱局部通风方法及换热效果研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- WANG Shuoyan. Research on Local Ventilation Method and Heat Exchange Effect of Cable Cabins in the Long-distance Utility Tunnel [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023 (in Chinese).
- [13] 田思楠. 城市综合管廊电力舱传热及通风特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2022.
- TIAN Sinan. Study on Heat Transfer and Ventilation Characteristics of Cable Compartments in Urban Utility Tunnels [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022 (in Chinese).
- [14] 赵忠梁. 渠县黄花大道综合管廊通风设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37 (10): 79–82, 88.
- ZHAO Zhongliang. Design for ventilation of Huanghua avenue utility tunnel in Qu County [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (10): 79–82, 88 (in Chinese).
- [15] 常银宗, 吴雪, 查颖. 地下综合管廊通风设计中若干问题探讨[J]. *中国给水排水*, 2019, 35 (22): 71–75.
- CHANG Yinzong, WU Xue, ZHA Ying. Discussion on some problems in ventilation design of underground utility tunnel [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (22): 71–75 (in Chinese).
- [16] 陈健, 相坤, 李磊, 等. 带支线结构管廊风量分布规律研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23 (4): 1154–1160.
- CHEN Jian, XIANG Kun, LI Lei, *et al.* Research on air volume distribution law of urban utility tunnel with branch line structure [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23 (4): 1154–1160 (in Chinese).
- [17] 赵光辉. 基于断面风速对地下综合管廊电力舱通风研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- ZHAO Guanghui. Study on Ventilation of Power Compartment in Underground Utility Tunnel Based on Cross-section Wind Speed [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023 (in Chinese).
- [18] YOO J O, KIM J S. A numerical study of the effects of the ventilation velocity on the thermal characteristics in underground utility tunnel [J]. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 2017, 19(1): 29–39.
- [19] YOON D W, SEONG N C, SHIN D C, *et al.* A study on determining dew condensation at the underground utility tunnel using simulation [J]. *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, 2014, 21: 1014–1022.
- [20] 沈鑫. 城市综合管廊防结露问题探讨[J]. *现代建筑电气*, 2018, 9(5): 16–19.
- SHEN Xin. Discussion on problems of anti condensation in urban utility tunnel [J]. *Modern Architecture Electric*, 2018, 9(5): 16–19 (in Chinese).

作者简介: 郇传民(1987–), 男, 山东菏泽人, 博士, 讲师, 工程师, 主要研究方向为城市地下综合管廊热湿环境控制。

E-mail: taichuanmin@126.com

收稿日期: 2023-07-26

修回日期: 2023-12-19

(编辑: 丁彩娟)