

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.07.017

海滨城市综合管廊通风降湿系统适应性模拟研究

许云骅¹, 丛北华², 邹丽³, 李贤斌⁴, 黄晓莉¹, 倪杨¹,

谢军¹, 庞耕宇¹, 徐率先¹, 张杨¹, 王家华¹, 朱浩川¹

(1. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125; 2. 同济大学 上海防灾
救灾研究所, 上海 200092; 3. 上海同泰火安科技有限公司, 上海 201703; 4. 上海海事
大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 以海滨城市典型综合管廊某通风段作为研究对象,建立适用于综合管廊通风换气、传热传质的三维非稳态数学模型,并分析该段管廊的流场、温度场、湿度分布等。研究发现,通风后管廊内湿度、温度由外部环境的空气状态和管廊的热力环境决定。在廊内高温报警工况下,当外界干球空气温度等于或低于35℃时,采取机械送排风可取得很好的降温效果。当管廊内温度低于外界空气露点温度时,在送风风机入口、低温壁面处易形成水珠/水雾,应予以关注。

关键词: 海滨城市; 综合管廊; 通风降湿; 模拟

中图分类号: TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)07-0109-07

Simulation of Ventilation and Dehumidification System Adaptability of Utility Tunnel in Coastal City

XU Yun-hua¹, CONG Bei-hua², ZOU Li³, LI Xian-bin⁴, HUANG Xiao-li¹,

NI Yang¹, XIE Jun¹, PANG Geng-yu¹, XU Shuai-xian¹, ZHANG Yang¹,

WANG Jia-hua¹, ZHU Hao-chuan¹

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Tongtai Fire & Security Technology Co. Ltd., Shanghai 201703, China; 4. School of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A three-dimensional unsteady mathematical model for ventilation, heat and mass transfer of a ventilation section of a utility tunnel built in a coastal city was established, and the flow field, temperature and humidity distribution of the section of the utility tunnel were analyzed. After ventilation, the humidity and temperature were determined by ambient air state and thermal environment in the utility tunnel. In the case of high temperature alarm in the utility tunnel, mechanical ventilation could achieve a good cooling performance when the ambient air dry-bulb temperature was equal to or below 35℃. When the temperature in the utility tunnel was lower than the dew point temperature of the ambient air, water droplets and mist were easily formed at the inlet of the air supply fan and on the surface of low-temperature wall, which should be paid attention to.

Key words: coastal city; utility tunnel; ventilation and dehumidification; simulation

在我国,有不少综合管廊建设在海滨城市的沿海区域,由于其特殊的地理和气候条件,温度和湿度对管廊运维具有重要作用^[1]。由于综合管廊建在地下,受到地下水等因素的影响,导致廊体内空气湿度较大,到夏季会出现结露现象^[2]。滨海地区综合管廊的结露现象更为严重,而且含盐量也较高,非常容易导致综合管廊内电气设备的腐蚀,影响设备的正常运行。此外,为节约投资,除特殊管线外,各类市政管线往往在同一个断面兼并布置,而电力电缆存在超温风险,可能会引发电气火灾^[3-6]。故通过综合管廊内通风设施的顺利运行,保持廊内的温度和湿度平衡,可以实现综合管廊的安全运维^[7]。

目前大多数研究主要关注火灾状况下隧道的通风排烟^[8-10],而分析综合管廊内的通风系统较少,且缺少对正常工况及高温、高湿预警条件下通风情况的研究。笔者利用Fluent数值模拟软件建立三维非稳态数学模型,通过分析综合管廊内各种工况条件下通风过程的流场、温度场及湿度变化情况分析通风效果,旨在为综合管廊的通风设计提供参考。

1 三维非稳态综合管廊模型

1.1 管廊模型

以上海自贸区临港新区某综合管廊综合舱的一段通风段作为模拟对象,如图1所示。该通风段由两防火分区组成(K0+080至K0+460段),全长380 m,宽×高为3.2 m×3.5 m。在K0+280处设常开防火门,且防火门正上方有电动防火阀,其中防火门的宽为0.9 m、高为2.05 m,电动防火阀的宽、高均为0.8 m。防火门上的电动防火阀常开,动作时机是70℃,即达到此温度关闭防火阀。

综合管廊内电缆主要由左侧的通信电缆和右侧的电力电缆组成。由于通信电缆发热量较低,占管廊内部总发热量的比例很小,故模拟时仅考虑电力电缆的发热量(因其发热量较大^[11])。根据设计文件,电力电缆共14根,即图1(a)中右侧第二、三、四层和第五层靠墙的两根电力电缆,其工作电压均为10 kV,其余空心管道为预留安装,不予考虑。该电力电缆沿通风段全线布置,长度为380 m(模拟时不考虑仅在防火门处设置的阻火包)。电力电缆的发热量按式(1)计算,即:

$$q = K\rho_t \frac{nI^2}{S} \quad (1)$$

式中: q 为单位长度电缆发热量; n 为每根电缆的芯数,本研究使用的电缆为3芯电缆; K 为电流参差系数,取0.95; ρ_t 为电缆运行条件下平均温度为60℃时电缆芯的电阻率,为 $0.033 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$; I 为单根电缆计算电流,参照《工业与民用供配电设计手册》取值436 A; S 为电缆芯截面积,为240 mm²。经计算, $q=74.5 \text{ W/m}$ 。

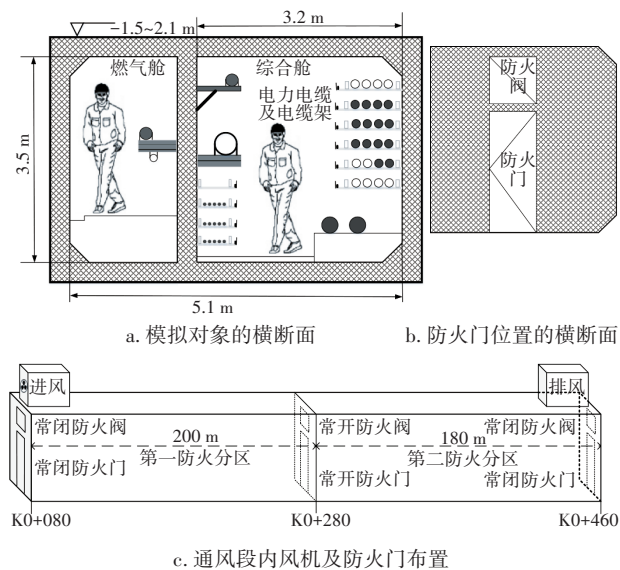


图1 通风段示意

Fig.1 Schematic diagram of ventilation section

送风机、排风机分别位于通风段的头部和尾部,即K0+080.9和K0+459.1处,中心点安装高度为3.9 m,送、排风机的一段范围内(K0+080~083, K0+457~460)管廊净高为4.5 m。通过网格独立性检查,最终采用的网格数为953 350,为达到较好的效果,对风机及电缆附近进行加密处理。

1.2 数学模型

使用风机进行送排风,气流属于典型的射流,忽略送风机前风管及排风机后风管,采用Standard $k-\varepsilon$ 湍流模型计算管廊内正常情况下的通风除湿过程,利用组分输运模型计算多组分流动。湍动能 k 及湍动能耗散速率 ε 通过下式计算:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

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

式中: G_k 为湍动能产生项; G_b 为浮力引起的湍动能产生项; Y_M 为可压缩湍流对整体耗散速率的脉动膨胀贡献; σ_k 及 σ_ε 为湍动能和耗散率的湍流 Prandtl 数。湍流黏度 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ 。模型计算采用的常数: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

各组分间的能量传递计算采用组分输运模型,其输运方程为:

$$\frac{\partial \rho u_j Y_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right] + R_i$$

$$i = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4)$$

式中: R_i 为组分 i 的生成速率; 合成气密度 ρ 按理想气体计算; u_j 为 j 方向速度分量; $D_{i,m}$ 为组分 i 的质量扩散系数; Sc_i 为湍流 Schmidt 数; μ_t 为黏度; Y_i 为组分 i 的质量分数; x_j 为空间方向; N 为组分数。

由于模型中可能发生冷凝蒸发过程,可利用 Mixture 模型模拟两相流动,利用 Lee 模型计算水蒸气的冷凝蒸发过程。

1.3 计算工况与边界条件

综合管廊内送风机利用内外空气交换实现通风和降温除湿。管廊所在地区室外: 夏季温度为 31.2 °C, 湿度为 69%; 冬季温度为 4.2 °C, 湿度为 75%。根据预期通风除湿操作, 设置的工况见表 1。

表1 模拟工况设置

Tab.1 Operating conditions in this simulation

项 目	综合舱初始条件	室外空气条件
平时 工况	1 温度 20 °C, 湿度 96%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
	2 温度 20 °C, 湿度 90%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
	3 温度 20 °C, 湿度 80%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
	4 温度 20 °C, 湿度 60%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
	5 温度 20 °C, 湿度 40%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
	6 温度 20 °C, 湿度 20%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
	7 温度 30 °C, 湿度 80%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
	8 温度 10 °C, 湿度 80%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
高温报 警工况	9 温度 40 °C, 湿度 20%	温度 31.2 °C, 湿度 69%
	10 温度 40 °C, 湿度 20%	温度 4 °C, 湿度 75%
	11 温度 40 °C, 湿度 20%	温度 15 °C, 湿度 70%
	12 温度 40 °C, 湿度 20%	温度 25 °C, 湿度 70%
	13 温度 40 °C, 湿度 20%	温度 35 °C, 湿度 70%

注: 温度均为干球温度, 湿度均为相对湿度。

风机送排风量以 1 h 换气 3 次来设计, 以 1 h 为一个周期。由于海滨城市地下径流条件较好, 管廊壁与土壤换热相对充分, 根据文献[12]中提到的上海地下土壤温度, 得到该综合管廊所处位置的温度为 17.7~19.0 °C。本研究按其平均温度设置壁面边界条件。

2 结果与讨论

2.1 流场分析

综合管廊内空气的流动形态为活塞流。以工况 1 为例, 送、排风机的射流作用使得其附近流场较为复杂。送风口(即室外空气入口处)的送风风速较高, 形成典型射流并引起回流, 如图 2(a) 所示。采用排风机进行抽风, 流速也较高, 如图 2(b) 所示。中段区域更趋向于活塞流, 故流场比较均匀。

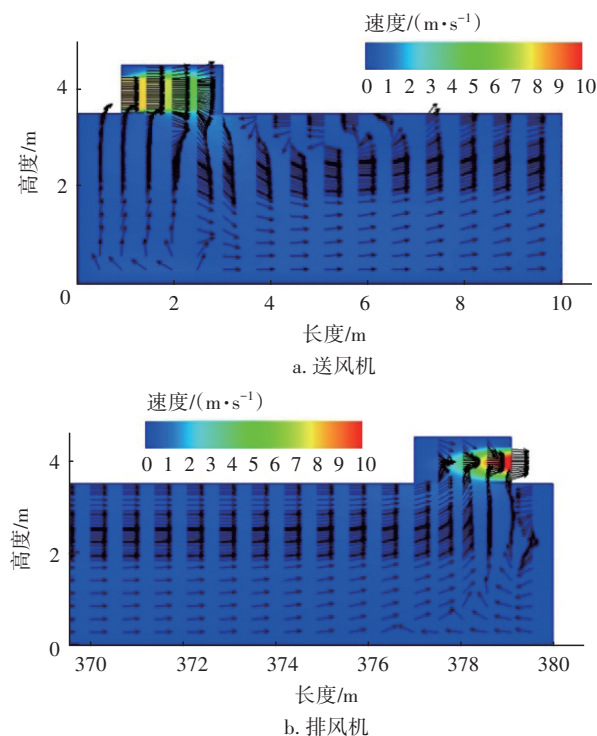


图2 送、排风机附近流场

Fig.2 Flow field near the inlet and exhaust fans

2.2 平时工况

为确保综合管廊内部空气温度不超过 40 °C 同时减少能耗^[9], 平时通风系统采用定时启停控制。

2.2.1 夏季平时工况

临港地区靠近杭州湾, 从已建成管廊的运维情况来看, 高湿度的情况出现次数较多, 主要原因有: ①构造性渗漏, 由于海滨城市地下径流丰富, 如果管廊围护结构出现渗漏, 则有高湿气体、水汽甚至

海水渗漏进管廊,而管廊无法及时将高湿气体及时排出;②构件水蒸发,混凝土、涂料等材料中含有一定水分,管廊建成后这些水分会慢慢蒸发出来;③内外温度和湿度差,如梅雨季等湿度较大的天气条件下,由于扩散、自然对流等空气流动与管廊内发生气体置换,会出现管廊内空气湿度增加的情况,且湿度下降较慢。鉴于上述原因,仿真的初始条件设置为表1的平时工况1。

通风1 h后综合舱内温度分布情况如图3所示。可知,由于外界环境温度高于综合管廊内空气温度,加上电缆产热,因此通风后综合舱内总体温度较初始温度(20℃)有所升高;综合舱两侧及上部气流通过防火门及防火阀时,由于局部阻力的存在,该处除近地面以外的气体温度均有升高;电缆发热导致综合管廊垂直方向上的温度分布为上部温度高于下部,温差接近10℃。

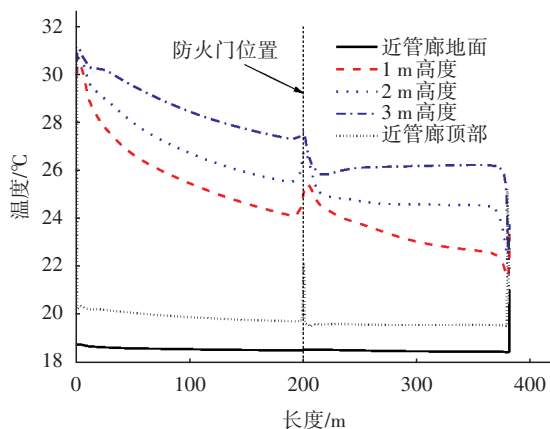


图3 通风1 h后综合舱内的温度分布

Fig.3 Temperature distribution of integrated tank after 1 hour ventilation

取K0+410截面作为考察面,图4为该截面通风1 h后的温度分布情况,可以验证上述结论,且在电缆发热作用下,其上部温度相对另一侧温度稍高,同时由于综合管廊壁的散热,近壁面区域温度较低。

图5为综合管廊综合舱内平均温度和湿度随通风时间的变化。可以看出,开启通风后,管廊内平均温度在1 500 s内由20℃升高至25.5℃左右,后2 100 s基本保持稳定,在此过程中电缆发热,外界环境气体带入热量与综合管廊壁面换热达到平衡状态。湿度在1 500 s内则是先下降后升高,后2 100 s与温度变化类似,保持相对稳定。

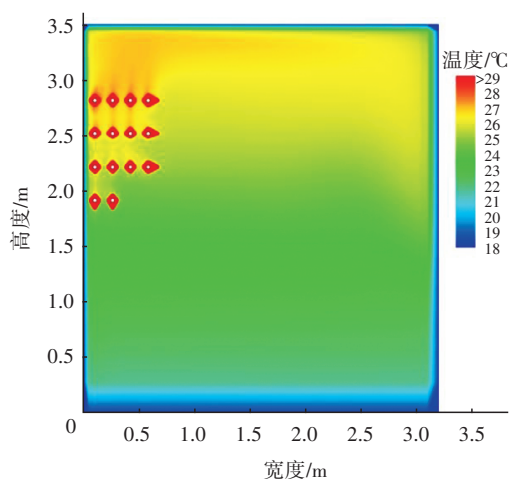


图4 通风1 h后综合舱内K0+410处温度分布

Fig.4 Temperature distribution of integrated tank K0+410 after 1 hour ventilation

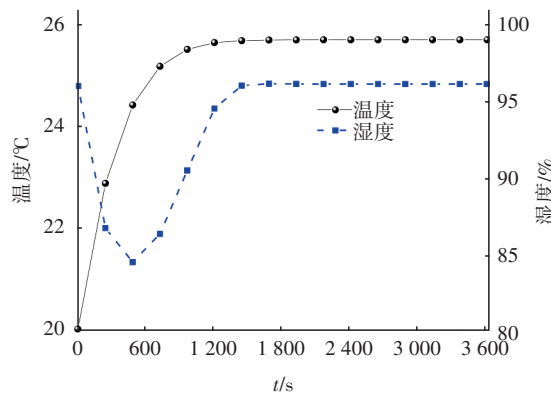


图5 通风过程中管廊内温度和湿度的变化

Fig.5 Change of temperature and humidity with ventilation in tunnel

开始阶段综合管廊内气体在通风和电缆发热双重作用下,温度迅速由20℃升高至24.4℃,因此该阶段即480 s内湿度下降至85%左右。而后由于管廊壁面散热,温度升高减慢,且通风进入的气体水蒸气含量较高,因此湿度又升高至96%左右,管廊被逐渐交换为环境气体。1 500 s后可以认为交换完成,但温度下降至25.5℃,相对湿度从69%升高至96%,此阶段管廊内的气体状态可以认为是通风进入的湿空气被降温至25.5℃。

2.2.2 管廊内相同温度不同湿度工况分析

正常工况时,管廊内相同温度(20℃)和不同湿度(20%~96%)(即工况1~6)条件下,风机开启后温度和湿度的变化如图6所示。由于温度变化曲线较接近且规律相似,在此不再赘述,因此图7仅展示了20%湿度条件下温度的变化规律,与2.2.1节中

96%湿度的温度曲线类似,在1 h内温度逐渐升高至25.5℃左右,且升温速率逐渐降低。

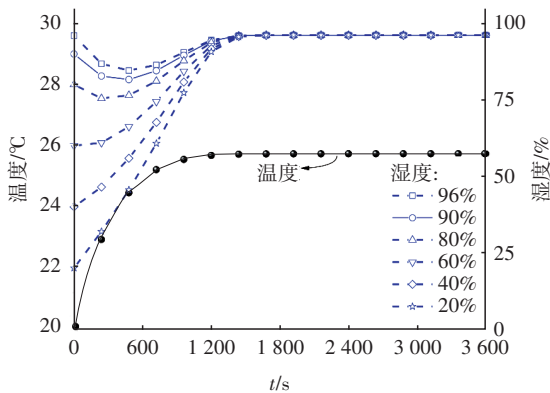


图6 相同温度不同湿度条件下正常工况通风过程温度和湿度的变化

Fig.6 Change of temperature and humidity under normal operating conditions of same temperature and different humidity

从图6可以发现,所有湿度曲线均没有相交,说明湿度也是逐渐变化的,并不会突变,且初始湿度较高的工况在通风过程中相对湿度仍较高,但所有工况在1500 s后均接近96%,即通风后整个管廊内原空气均已完全被交换,在电缆发热和管廊壁散热作用下,环境空气温度仅降低至25.5℃,湿度保持一致。

2.2.3 管廊内不同温度相同湿度工况分析

正常工况时,管廊内相同湿度(80%)不同温度(即工况3、工况7和工况8)条件下,风机开启后温度和湿度的变化如图7所示。综合舱内平均温度经过1 h通风后均在25℃左右,湿度均在96%左右,仅与外部环境条件有关,与管廊内初始状态无关,因此可以认为管廊内空气均已被完全交换,最终空气状态与2.2.2节类似。从图7还可以发现,管廊内初始温度为10℃时其升温速率较20℃快,30℃时则为降温,主要是由不同管廊壁面的散热状态决定的,当管廊内温度低于土壤温度时,热量是由土壤向管廊内部传热,高于土壤温度时,则表现为散热,同时在电缆放热作用下管廊内空气初始温度为10℃时升温速率较快,随着管廊内温度的升高,其升温速率降低。与此对应,由于管廊内平均温度的快速升高,饱和蒸汽压增大,其湿度明显降低。当初始温度为30℃时,由于环境空气湿度较高,管廊内平均温度降低,在通风初期,其湿度升高至接近

饱和状态。

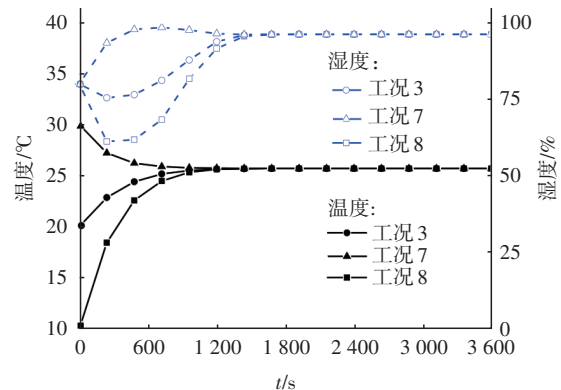


图7 相同湿度不同温度条件下正常工况通风过程温度和湿度的变化

Fig.7 Change of temperature and humidity under normal operating conditions of same humidity and different temperature

需要注意的是,当外部空气湿度接近饱和且管廊内部温度低于外部空气温度时,通风系统的运行并不能降低管廊内部空气的湿度,如需降低湿度则需采用其他除湿措施。

2.3 高温报警工况

本研究中,根据《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015),当管廊内温度升高至40℃时,温度报警控制器即发出报警信号,同时立即联动启动该通风区间的通风设备进行强制换气,当通风系统运行至该通风区间的空气温度 $\leq 35^\circ\text{C}$,并维持30 min以上时,自动关闭通风设备。本研究模拟的通风区间温度已达到40℃(湿度为20%),开启风机进行通风,通过考察通风1 h后的情况来确定是否达到设计要求。

图8展示了高温报警工况时,不同外界环境条件(即工况9~13,包括夏季和冬季典型气候参数温度不同而湿度相同的工况)下管廊综合舱经过通风以后温度和湿度的变化。可以发现,环境空气温度越低,综合舱内平均温度下降越快。当送入的环境空气温度为4、15、25、31.2、35℃时,通风1 h以后的综合舱平均温度分别下降至18.3、21.2、24.0、25.7、26.6℃。

由于温度下降,管廊内湿度升高,相对于温度的变化,湿度的变化更复杂。从图8可以看出,由于湿度相近,因此进入综合舱内的含湿量随环境温度的升高而增大。通风初始阶段湿度变化较剧烈,随

着通风的进行,湿度变化速率逐渐减小,最终工况9~13的湿度分别稳定在96.1%、30.9%、48.2%、75.0%及100%。但是,当环境温度较高、湿度较大(工况13)时,经过1 h的通风,管廊内湿度达到100%,该状态下,温度较低的壁面肯定会有液态水凝结,影响综合管廊的安全运行,这也是海滨城市综合管廊运维的特殊之处,需要足够重视。

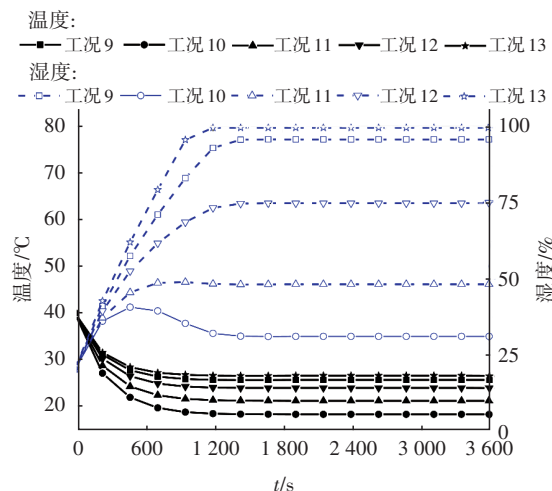


图8 高温报警工况下通风过程综合舱内温度和湿度的变化

Fig.8 Change of temperature and humidity under high temperature alarm operating condition

2.4 冷凝水分析

通风开启时(按平时工况,即室外温度为31.2℃、湿度为69%,管廊内温度为10~30℃、湿度为80%),送风机入口处的湿度会达到100%,如图9(a)所示。在两股气流交汇处发生冷凝,相变过程如图9(b)所示,如果水珠/水雾过多,会造成管廊内电器设备失效或产生其他损失。可以认为当外界环境温度低于管廊内空气的露点或管廊内温度低于环境空气的露点时,均会出现冷凝现象。

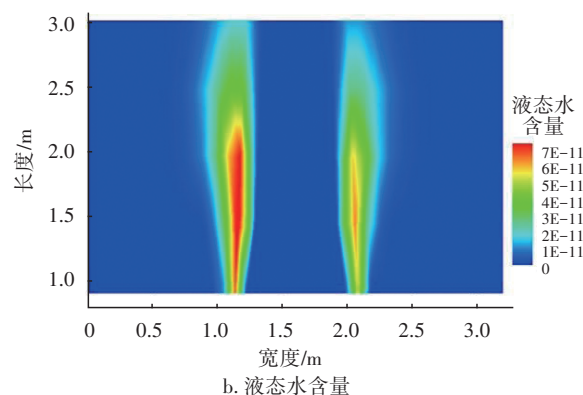
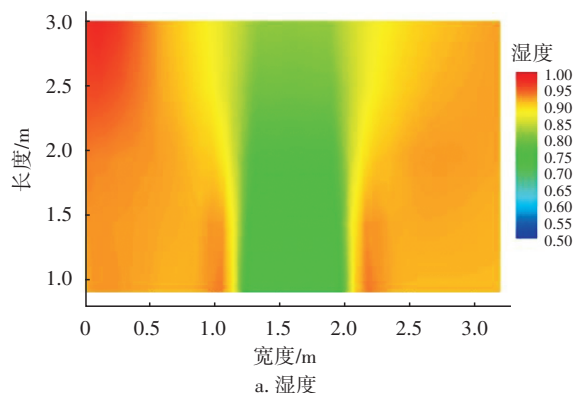


图9 送风机入口中心截面湿度和液态水含量的分布

Fig.9 Distribution of humidity and liquid water volume at cross section of the inlet fan center

当上海地区温度较高、相对湿度较大时,由于管廊壁面散热条件较好,极易在壁面(特别是金属表面)形成液态水,因此建议管廊内设备应做必要的防水防潮处理,必要时应增设除湿装置。

3 结论

① 综合管廊内1 h换气3次的设计要求是合理的。根据模拟结果,在正常工况下该条件能较好地达到通风要求。管廊内气体状态由环境空气状态和管廊内放/散热条件决定,管廊内上部空气温度高于下部空气10℃左右,且上部空间布置电缆侧温度稍高于另一侧。

② 在夏季典型气候条件下,如果管廊壁面散热良好,空气在交换过程中整体温度逐渐升高,最终稳定在25.5℃左右。湿度则与初始状态有关,逐渐稳定至96%。在高温报警工况下,当环境温度为4、15、25、31.2、35℃时,综合舱通风结束时平均温度分别下降至18.3、21.2、24.0、25.7、26.6℃,均能得到很好的降温效果。

③ 在通风过程中管廊内空气含水量必然向外界环境含水量方向变化,当管廊内温度低于外界环境露点时,在送风机入口处、低温壁面处易形成水珠/水雾,运维单位应予以关注。

参考文献:

- [1] 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).

- [2] 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).
- [3] LIANG K, HAO X F, AN W G, *et al.* Study on cable fire spread and smoke temperature distribution in T-shaped utility tunnel [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019, 14: 100433.
- [4] 王秋翠, 魏立明. 城市地下管廊的火灾危险识别与预警系统研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2019, 36(1): 82-86.
WANG Qiucui, WEI Liming. Research on fire hazard identification and early warning system of urban underground pipe gallery [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2019, 36(1): 82-86 (in Chinese).
- [5] 寇殿良, 袁建平, 陈雪梅. 高压细水雾灭火系统在综合管廊中的应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 72-75.
KOU Dianliang, YUAN Jianping, CHEN Xuemei. Application of high-pressure water mist fire extinguishing system in utility tunnel [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 72-75 (in Chinese).
- [6] 杨永斌. 火源位置对城市地下综合管廊电力舱火灾蔓延的影响研究[J]. 武警学院学报, 2018, 34(2): 14-19.
YANG Yongbin. Study on effect of fire source location on fire spread in cable cabin of urban underground utility tunnels [J]. Journal of the Armed Police Academy, 2018, 34(2): 14-19 (in Chinese).
- [7] 武晓飞. 浅析城市地下综合管廊通风系统[J]. 山西建筑, 2018, 44(24):101-102.
WU Xiaofei. Analysis on ventilation system of the utility underground tunnel [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(24):101-102 (in Chinese).
- [8] 邹丽, 丛北华, 李贤斌. 长大隧道细水雾降温技术的仿真研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2019, 41(2):124-129.
ZOU Li, CONG Beihua, LI Xianbin. Simulation study on cooling technology of water mist in long tunnel [J]. Journal of WUT (Information & Management Engineering), 2019, 41(2):124-129 (in Chinese).
- [9] 邱永海, 楼波, 许建红, 等. 火源与排烟口布置对隧道火灾排烟影响的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3):51-55.
QIU Yonghai, LOU Bo, XU Jianhong, *et al.* Numerical simulated study of the impact of smoke vent and fire source location on the exhaust emission in case of the tunnel fire [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3):51-55 (in Chinese).
- [10] 张恒, 张俊儒, 周水强, 等. 特长隧道风仓接力通风关键参数及其效果研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3):795-803.
ZHANG Heng, ZHANG Junru, ZHOU Shuiqiang, *et al.* Deciding and determination of the key parameters of the relay ventilation based on the air cabin and its effect in the ultra-long tunnel [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(3):795-803 (in Chinese).
- [11] 王淼, 刘刚, 甘长德. 电缆隧道通风流速对内部高温区影响的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(11): 51-54.
WANG Miao, LIU Gang, GAN Changde. Influence of ventilation velocity in cable tunnel on high temperature zone in tunnel [J]. Building Energy & Environment, 2018, 37(11):51-54 (in Chinese).
- [12] 王万忠. 上海地区浅层地温变化规律特征分析[J]. 上海国土资源, 2013, 34(3): 77-80.
WANG Wanzhong. Temperature variations in shallow geothermal fields in the Shanghai area [J]. Shanghai Land & Resources, 2013, 34(3): 77-80 (in Chinese).

作者简介:许云骅(1990-),男,上海人,大学本科,工程师,主要研究方向为市政给排水工程和综合管廊规划、设计及BIM技术应用。

E-mail:tomxuyunhua@163.com

收稿日期:2021-02-08

修回日期:2021-04-12

(编辑:任莹莹)