

综合管廊电缆舱基于射流风机的局部通风方法研究

王烁焱¹, 尹海国¹, 邓鑫², 康云飞¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安西热锅炉环保工程有限公司, 陕西 西安 710061)

摘要: 地下综合管廊长建设里程需求, 廊内增设防火门使其电缆舱内的通风散热问题变得十分严峻. 长度越长, 管廊温度会逐渐升高, 防火门增加会在管廊角落等狭小空间形成高温聚集区, 均会阻碍管廊散热. 采用局部通风的手段, 目的是以较小的风量排除温度异常点, 降低管廊全局通风换气量. 运用数值模拟结合实验验证的手段对常规电缆舱与局部通风电缆舱在不同边界条件下进行比较, 分析了局部通风策略的降温规律. 结果表明: 在同一总风量比例下增加换气次数可以强化风机控制区域的换热效果, 且由于管廊总风量会与风机局部风量相互影响, 一味增加总风量比例并不能明显改善管廊内温度分布. 利用局部通风方法, 电缆舱内降温幅度进一步增大, 在局部区域会比常规电缆舱温度低 2.58 °C. 局部通风方法能以较小的风量冷量达到与常规工况相似的降温效果, 具备一定的节能优势.

关键词: 地下管廊; 射流风机; 局部通风; 防火门; 数值模拟

中图分类号: TU990.3; TU994; TU962

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0268-08

Study on local ventilation method of cable compartment in utility tunnel based on jet fan

WANG Shuoyan¹, YIN Haiguo¹, DENG Xin², KANG Yunfei¹

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Xi'an West Heat Boiler Environmental Protection Engineering Co., Ltd., Xi'an 710061, China)

Abstract: The long construction mileage demand of the utility tunnel, and the addition of fire compartments in the tunnel makes the ventilation and heat dissipation problem in the cable compartment very serious. The longer the length, the temperature of the tunnel will gradually rise, and the increase of the fire door will form a high temperature gathering area in a small space such as the corner of the tunnel, which will hinder the heat dissipation of the utility tunnel. The purpose of local ventilation is to eliminate temperature anomalies with a small air volume and reduce the overall ventilation volume of the utility tunnel. In this paper, numerical simulation combined with experimental verification is used to compare the conventional cable compartments with the local ventilation cable compartments under different boundary conditions, and the cooling law of local ventilation strategy is analyzed. The results show that increasing the number of air changes under the same total air volume can strengthen the heat dissipation in the fan-controlled area, the total air volume of the tunnel will interact with the local fan air volume, and changing the total air volume does not significantly improve the heat exchange. By using local ventilation methods, the temperature reduction in the cable compartments is further increased, and the temperature in the local area will be 2.58 °C lower than that in conventional cable compartments. The local ventilation method can achieve a cooling effect similar to that of conventional working conditions with a small air volume and has certain advantages in energy saving.

Key words: utility tunnel; jet fan; local ventilation; fire compartment; numerical simulation

《城市综合管廊工程技术规范》^[1]规定每 200 米设置一个防火区间, 通风区间应与防火区间重合. 但由于目前跨河穿山建设的工程需求, 管廊通风

区间加长, 出现单个通风分区内有防火门设置的现象^[2]. 在综合管廊日常运行过程中, 通信电缆舱内不间断散热, 需要长时间保持大风量通风, 运

收稿日期: 2023-02-17

修回日期: 2024-03-17

基金项目: 陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2022-005); 国家重点研发计划项目子课题(2019YFC0605105)

第一作者: 王烁焱(1998—), 男, 博士生, 主要从事建筑围护结构热工性能提升研究. E-mail: wangshuoyan@xauat.edu.cn

通信作者: 尹海国(1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事建筑通风空调气流组织、室内空气质量研究. E-mail: yinhaiguo@xauat.edu.cn

行管理费用远高于其余舱室^[3]. 而通风区间加长和增设防火门这两个新特征更会加大综合管廊等隧道型建筑的通风换热压力, 增加火灾发生风险, 降低管廊内设施寿命^[4].

针对综合管廊长度的研究中, 李哲等^[5]研究发现, 综合管廊内温度会随着其距离加长而不断变高. 周游等^[6]指出, 通风距离的增长, 综合管廊电缆舱降温效果会减弱, 出现局部温度过高的现象. 另一方面, 针对综合管廊防火门的研究较少, 却有部分学者发现了管廊内结构与狭小空间对其通风散热的影响. 比如, 韦岩等^[7]提出, 管廊的高度较大上部区域散热较差, 高度较小时不利于电缆间区域的散热. 杨霁虹^[8]发现靠近排风口处和电缆与侧壁及舱顶角落处的狭小空间会形成高温空气的聚集区. Wang 等^[9]研究指出管廊入口段气流涡流和出口段气流上升可显著降低电缆温度, 此处涡流产生的原因是因为电缆对空气的阻塞作用.

上述研究已证明, 综合管廊内在局部区域采用加速气流或增加涡流的手段可以在一定程度上降低电缆温度, 缓解温度聚集现象. 若能采用局部通风的手段, 结合长距离管廊内防火门的降温效果, 针对管廊后半段高温区域以及一些狭小空间的高温聚集进行通风控制, 就可将局部的高换热压力转移到管廊全局, 达到降低全局换气次数的目的^[10], 从而就可以实现综合管廊内节能降耗的目的, 显著提升管廊运行经济性. 公路隧道的局部通风研究也证明了局部通风的可行性以及射流风机设置的优势^[11-13].

在选择研究方法时, 研究人员由于安全问题通常无法对地下管廊进行实地测试, 考虑到建立全尺寸实验装置的成本很高, 所以经常采用缩尺实验^[14-15]结合数值模拟^[16-17]的方式进行研究. 比如 Li 等^[18]对管廊通风系统进行实地测试, 运用数值模拟的方法对比了不同截面的风速分布, 缩尺模型实验也证实了模拟误差在 10% 以内. Costantino 等^[19]做了公路隧道 1/50 的缩尺实验与全尺寸 CFD 模拟实验, 通过相似性理论搭建了实验, 证明了其数值模拟的合理性. Cheng 等^[20]利用 CFD 技术探索家禽圈舍隧道通风的优化, 模拟结果与实测结果非常吻合, 差异远低于 10% 的阈值. 同样, Du 等^[21]采用 CFD 技术来研究室内空气动力学、温度分布和相对湿度, 模拟与实验结果吻合度较高. Yang 等^[22]采用 CFD 软件 FLUENT 对隧道的通风流体力学进行数值模拟和深入分析, 优化通风策略.

综上, 本文将通过数值模拟结合实验验证的

方法, 建立常规管廊电缆舱与局部通风管廊电缆舱两类数值模型. 比较两者在不同换气次数、不同壁面温度和不同总风量比例情况下速度场与温度场区别, 最终采用三类温度评价标准分析局部通风策略的优劣.

1 数值模拟与实验验证

1.1 物理模型

基于西安某段 330 kV 专用电力电缆管廊, 管廊内径 3 m, 外径 3.5 m. 其通风方式为机械进风 + 自然排风, 进排风口均为 1 m × 1 m 的直入式矩形风口. 管廊埋深深度根据所处地理位置的不同在 3~25 m 范围内波动, 每两百米设置一个的防火区间, 其余尺寸参数如图 1(a) 所示. 管廊壁面材料使用混凝土, 管廊中流体为普通空气, 物理性质如表 1 所示:

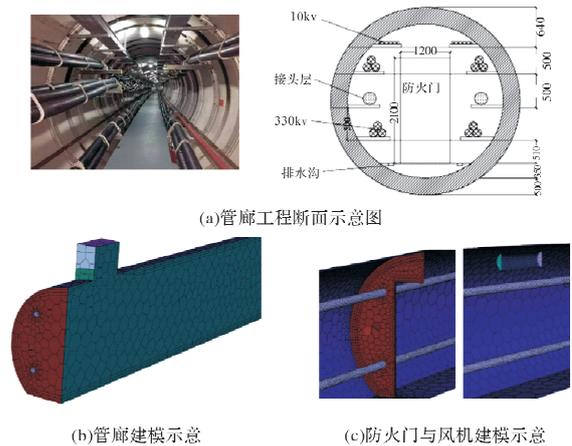


图 1 物理模型与网格划分

Fig. 1 Physical modelling and meshing

表 1 管廊主要材料物性参数

Tab. 1 Physical properties of the main materials in the tunnel

材料	密度/kg · m ⁻³	比热容 J/kg · K ⁻¹	导热系数 W/m · K ⁻¹
混凝土	2 500	920	1.74
电缆	920	2 300	0.3
空气	1.12	1 013	0.025 96

根据物理模型, 使用 ANSYS Fluent 21 的 SIMPLICE 算法进行求解, 考虑热浮升力, 使用 Boussinesq 假设. 建模方式选用 Fluent Meshing, 为非结构网格. 壁面函数选用 Scable Wall Functions, Y^+ 控制在 30~300 之间, 其计算公式如式 (1) 所示. 计算收敛准则设置为湍流项残差值小于 10^{-4} , 能量项残差值小于 10^{-6} . 具体网格划分见图 1(b) 与图 1(c).

$$y^+ = u^* y/v \quad (1)$$

式中： y^+ 为判断近壁面湍流状态的无量纲函数； u^* 为最近壁面处的摩擦速度，m/s； y 为到壁面的距离，m； ν 为流体的局部运动粘度， m^2/s 。

此工程所使用电缆为 64/110 kV 交联聚乙烯铝护套电缆，三根叠放。考虑到建模与计算难度，将 3 根 110 kV 简化为 1 根 330 kV 电缆，电缆外层厚度不变。

1.2 数值模拟边界条件

管廊通风方式为“机械进风+自然排风”，进风口为速度进口 (Velocity-inlet)，相对压力为 0 Pa。排风口处设置为自由出流 (Outflow)。本文意在研究最不利工况，进风温度选取西安市夏季室外平均计算温度 $32.3\text{ }^\circ\text{C}$ [23]，考虑西安的地温曲线 [24]，将管廊壁面条件分为浅埋、中埋、深埋，温度分别为 $32.2\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $23.6\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 。射流风机直径设置为管廊内径的 10%，为 0.3 m。风机分为入口段与出口段，总长为 1 m。管廊在 2 次/h 换气次数下，进口速度为 1.87 m/s，后续风量与换气次数变化以此为基准。局部风机进出口设置为内部面 (interior)，风机轮轴面设置为内部风扇边界 (fan)，将出风速度转化为压力进行赋值。电缆表面为热源边界，电缆舱室的余热量按照管廊舱室内设计敷设的所有规格电缆散热量的总和计算。电缆散热量需按照设计载流量与电缆截面积计算确定，由载流电缆芯的热损失求出，计算公式如下所示 [25]。

$$P_R = nI^2 \rho_c L / S \quad (2)$$

式中： P_R 为电缆的热损失功率，W； n 为电缆芯数；

I 为电缆计算负荷电流，A； S 为电缆芯截面积， mm^2 ； L 为电缆长度，m； ρ_c 为电缆运行时平均温度下的电缆芯电阻率。

$$\rho_c = \rho_0 (1 + at) \quad (3)$$

式中： ρ_0 为在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的电阻率， $\Omega\text{ mm}^2/m$ ，纯铜在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的电阻率为 $0.0165\Omega\text{ mm}^2/m$ ； a 为电阻温度系数， $1/^\circ\text{C}$ ，铜取 0.00393； t 为电缆运行平均温度， $^\circ\text{C}$ 。

$$P = K \sum_1^N P_R \quad (4)$$

式中： P 为总热损失功率，W； K 为电流参差系数，取 0.85~0.95，电缆根数少的时候取最大值，本研究为三根电缆，取中间值 0.9。最终将电缆散热量总结为表 2：

表 2 电缆参数及散热量
Tab. 2 Cable parameters and heat dissipation

电缆近似 外径/mm	简化后外 径/mm	电压等 级/KV	散热量 /W·m ⁻²
118.4	151.5	330	168.71

1.3 实验数据验证

搭建了 1:25 缩尺模型实验台对进行验证，测点布置如图 2 所示。缩尺模型直径为 140 mm，长度 8 m，材料为透明亚克力板，入口风机与局部风机为可调轴流风机，风速测试仪器是多功能气流测量仪 SWEMA3000，温度测试仪器为 Keithley daq6510。

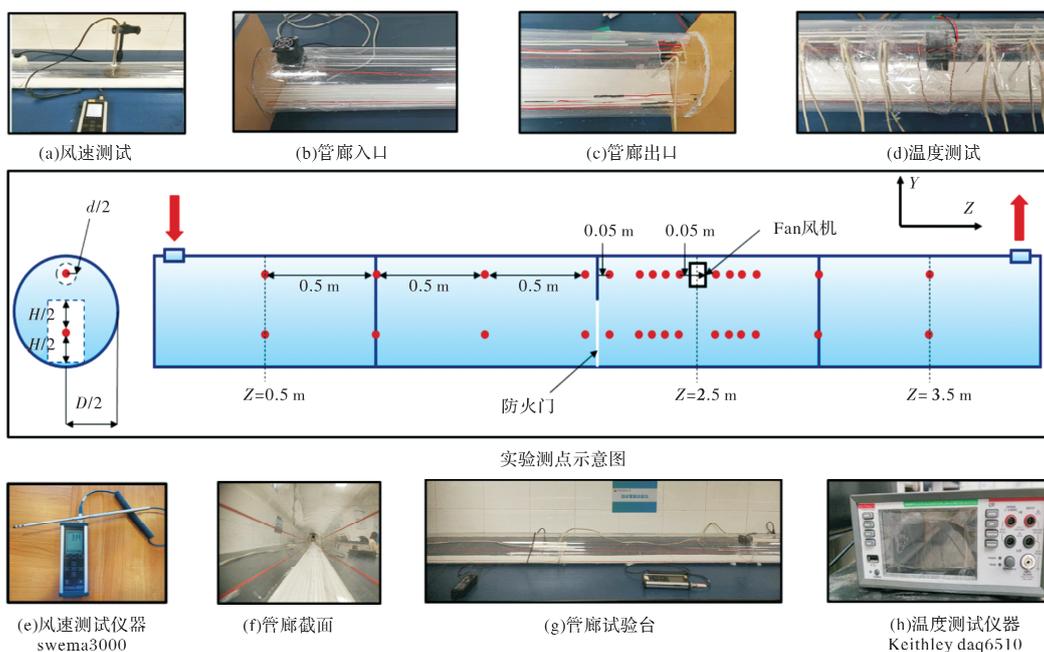


图 2 实验平台及测点分布

Fig. 2 Experimental platform and measurement point

因为本文主要研究的是射流风机处的速度与温度变化, 取上部测点进行多湍流模型与实验结果验证, 具体结果见图 3.

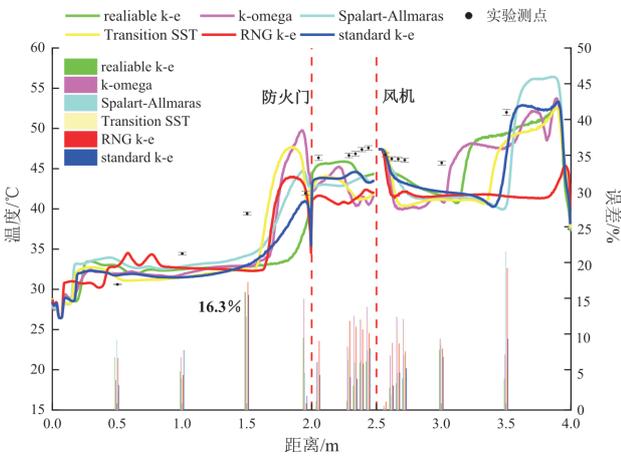


图 3 数值模拟与实验数据对比

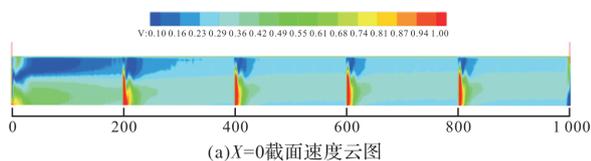
Fig. 3 Data comparison between numerical simulation and experiment

由图 3 可知, 防火门前出现温度峰值, 此处为温度聚集区. 3.5 m 处的温度峰值是因为管廊内温度会随着距离增长而不断增加, 2.5~3 m 处的相对低温区域是因为局部射流风机强化了此区域的对流换热. 在射流的初始段实验结果与模拟结果相差较小, 而在测点 3 处出现了较大偏差. 推测是因为边界条件取了壁面平均温度, 模拟计算高估了此处的散热效果, 实际中管廊壁面温度会高于设定值, 导致此处温度不能快速散失. 其余各点除 Spalart-Allmaras 与 RNG $k-\epsilon$ 模型, 其余模型的误差基本在 15% 以下, 其中 reliable $k-\epsilon$ 模型误差基本保持在 10% 以下, 误差最大点为测点 3, 达到 16.3%. 由此, 将选用 reliable $k-\epsilon$ 模型作为本研究的湍流模型. 经过网格无关性验证选定网格数量为 420 万.

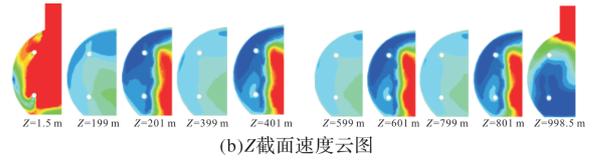
2 模拟结果

2.1 常规管廊热环境分布规律

综合管廊是一种细长型地下建筑物, 通风气流与管壁接触面积大, 接触时间长, 其两者之间的换热是管廊内换热的主要因素. 以常规管廊 2 次换气次数壁温 32.2 °C 为例呈现横纵截面云图, 见图 4, 观察速度与温度规律.



(a) X=0 截面速度云图

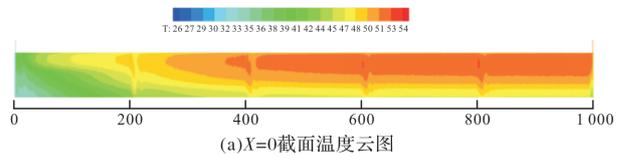


(b) Z 截面速度云图

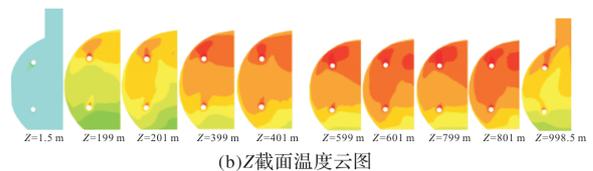
图 4 常规综合管廊截面速度云图 (换气次数 2 次, 壁面温度 32.3 °C)

Fig. 4 Velocity cloud of conventional utility tunnel section (2 air changes, wall temperature 32.3 °C)

如图 4 所示, 气流在 1.5 m 截面处高速通入, 形成剧烈湍流, 随后沿管廊向前运动. 在经过 200、400、600、800 m 处的防火门时, 由于防火门结构的突缩性, 气流的变化具有高度相似性, 都在防火门前 1 m 处就已经呈现受防火门影响的态势, 管廊底部中心区域速度偏高而上部区域受到阻碍速度偏低. 通过防火门后, 气流集中在防火门面积范围内扩散, 整体管廊截面呈现三段式速度分布, 即防火门范围内速度最高, 防火门边缘处速度次之, 四周区域速度最低. 另一方面, 在防火门后的管廊上部区域出现了速度回流区域, 此处速度显著降低, 在管廊入口段也出现了这一现象.



(a) X=0 截面温度云图



(b) Z 截面温度云图

图 5 常规综合管廊截面温度云图 (换气次数 2 次, 壁面温度 32.3 °C)

Fig. 5 Temperature cloud of conventional utility tunnel section (2 air changes, wall temperature 32.3 °C)

观察图 5 发现, 从 200 m 开始, 温度逐渐开始升高, 至 400 m 前已经出现了高温聚集区域. 600 m 及以后区域, 温度已经呈现稳定的层式分布, 上部温度高, 底部温度低. 观察图 5(b), 可以看到防火门的存在并不一定可以降温, 比如 601 m 相比较于 599 m, 由于防火门处气流在防火门后只沿其面积区域扩散, 导致防火门后部分区域速度减小, 其内温度分布甚至不如防火门前.

为了更加细致的总结规律, 将三个壁面温度工况下的管廊截面平均速度与温度进行比较, 结果如图 6 所示.

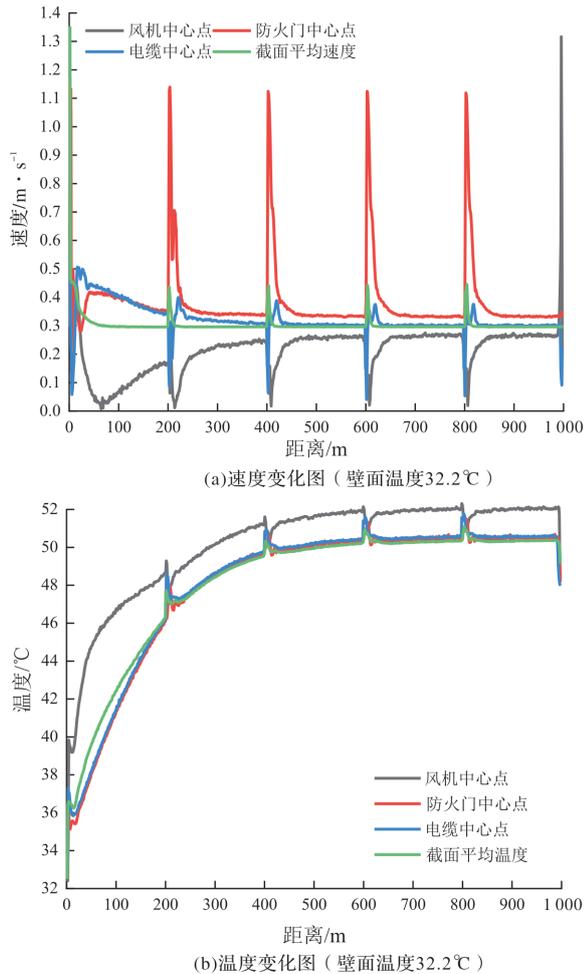


图6 常规综合管廊不同区域及截面平均速度与温度变化图
Fig. 6 Average velocity and temperature variations in different areas and sections of conventional utility tunnels

风机中心点即为后文中 300 m 风机的布置中心点,位于管廊的上部区域.图 6(a)中,管廊入口段风机中心点处速度很低,电缆中心点与防火门中心点处的速度由于其入口特性均较高,随着长度的增加三者速度趋近变化,但仍呈现出明显的上下速度分层,这与前文的云图分析一致.图 6(b)中观察到防火门中心点、电缆中心点和截面平均温度相近,风机中心点由于热空气上浮原理温度较高.在管廊全局都与其余位置保持 2℃ 的温差.

2.2 应用局部通风管廊热环境分布规律

图 7 可以看出加设射流风机,中断了管廊上部区域的高温连续.风机下方呈现三角状的低温区域,风机出风口也有明显的降温趋势,但当脱离射流风机的控制范围时管廊温度又会迅速提升.风机在局部区域有高速回风与送风,在风机周围区域形成了一种循环气流流动,即高速气流从出风口吹出,反向输送到风机回风口,这使得风机出口截面出现明显的涡流现象,进而使风机控制

区域温度有显著降低.

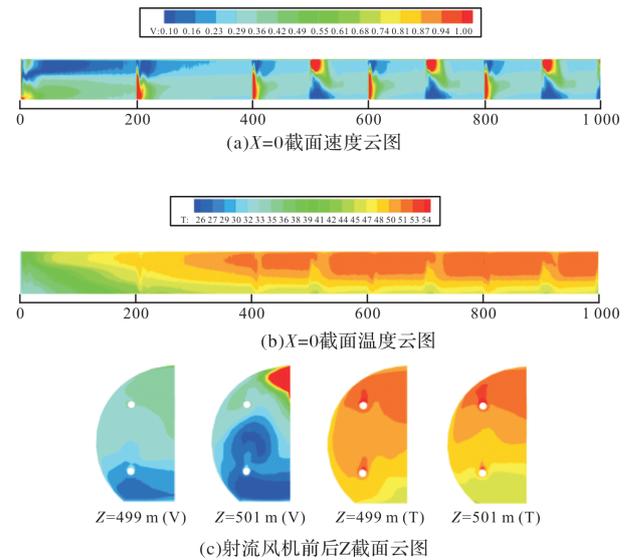


图7 应用局部通风综合管廊截面速度及温度云图
(换气次数 2 次,壁面温度 32.3℃)

Fig. 7 Velocity and temperature cloud of utility tunnel section with local ventilation (2 air changes, wall temperature 32.3℃)

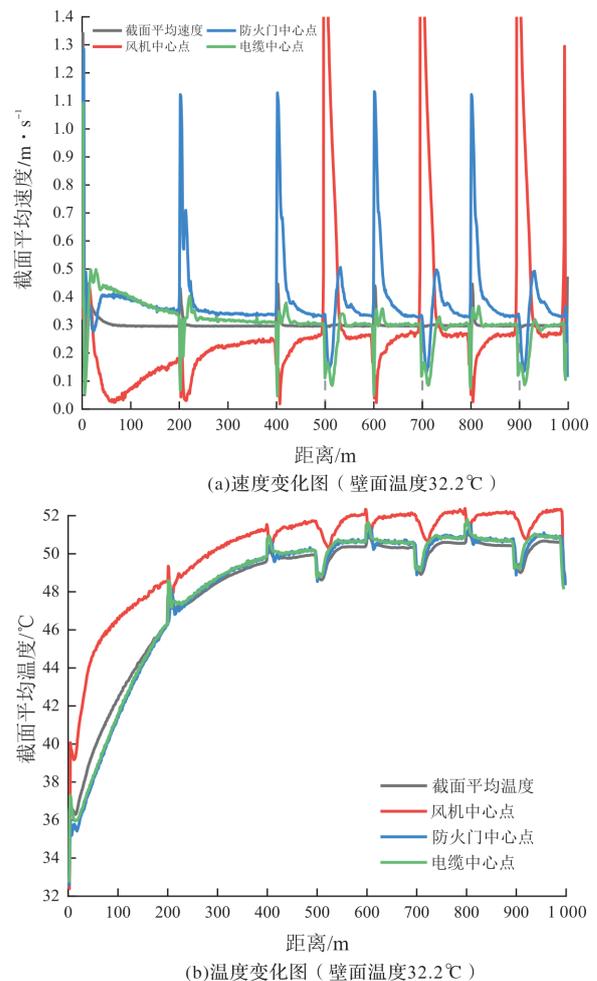


图8 局部通风综合管廊不同区域及截面平均速度与温度变化图
Fig. 8 Average velocity and temperature variations in different areas and sections of utility tunnels with local ventilation

图 8 中风机出口位置用灰虚线标出. 从速度图中可以发现, 风机中心点速度在风机出口猛然增大, 相对应其余位置速度减少, 但管廊平均截面速度是增大的. 温度图中, 管廊上下区域均出现降温现象, 上部区域降温会滞后几米. 这表明下部区域速度的降低并不会影响降温, 速度的降低可能是因为风机引起的气流冲撞, 产生的涡旋会加速换热. 以上规律当壁面温度及换气次数的改变此种规律也存在, 后续直接使用管廊截面平均值进行比较分析.

2.3 综合管廊局部通风效果评价

根据前文的研究, 拓展工况, 在不同换气次数、壁面温度、局部通风风量、总风量比例下进行对比研究, 结果如下:

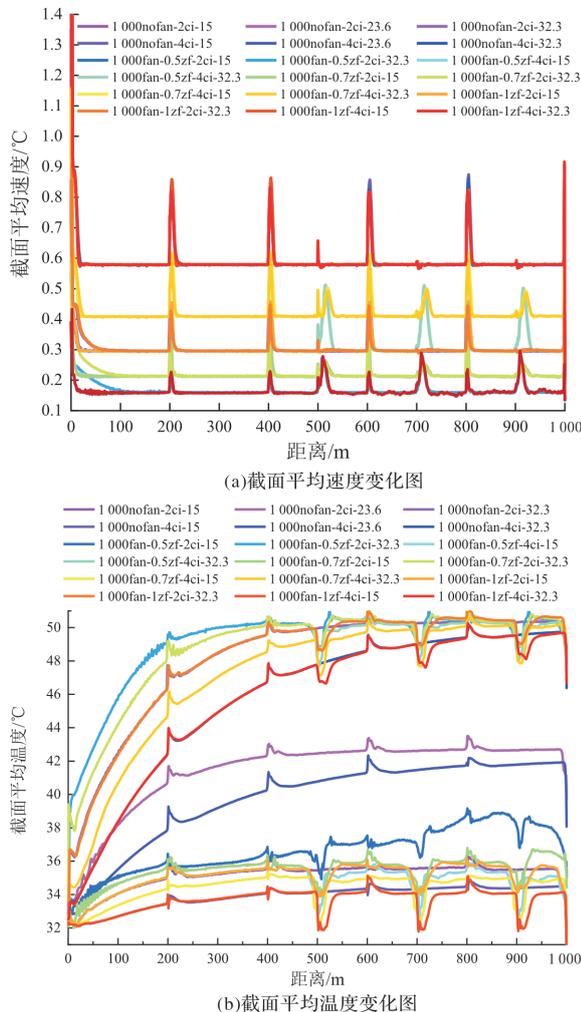


图 9 两类管廊在不同边界条件下速度与温度对比图
 Fig. 9 Comparison of velocities and temperatures between the two types of tunnels under different boundary conditions

图 9(a) 显示了上述各个工况的速度分布. 可以看到整体风速最大的工况为 1 总风量比例 4 次换气次数的工况, 最小的为 0.5 总风量比例 2 次换气次数的工况, 二者全局速度差了 4 倍. 另外, 从局

部射流风机的角度看, 0.5 总风量比例 4 次换气次数下局部风机风速最大, 而 1 总风量比例时两类换气次数下风机风速都很小. 这表明, 全局风量会与风机风量相互影响. 若全局风量过大, 那么就会压制风机风量, 从而影响风机的降温效果. 总风量比例越大, 换气次数越大, 管廊截面平均温度越低. 两种壁面温度下, 温度最低的工况均为 1 总风量比例 4 次换气次数工况. 0.5 总风量比例 2 次换气次数壁温 15 °C 下, 温度自第二个防火门后, 温度出现升高的趋势, 随着距离增加, 管廊内温度不断升高. 管廊壁温对管廊降温有着显著的效果, 根据壁温的不同, 温度曲线呈现三级分化, 温度变化趋势相同, 故缩减工况, 删去壁温 23.6 °C, 具体的温度降低幅度见图 10.

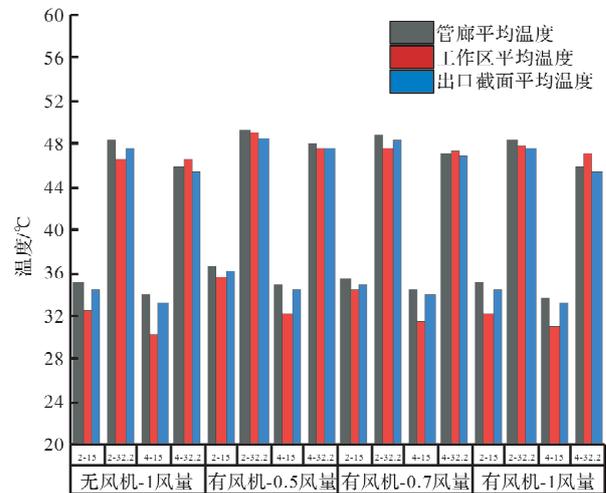


图 10 不同工况下温度评价图
 Fig. 10 Temperature evaluation for different working conditions

图 10 对 12 个工况进行了定量分析, 其中工作区是引入的一个“综合管廊工作区”的概念区域. 其根本理念是囊括检修人员行走与工作区域和电缆布置区域, 在本文的研究中, 工作区大小为: 1.926 210 m³. 如上文规律所述, 换气次数增大一倍, 综合管廊在三种评价标准下, 温度平均降低了 1.53 °C. 而壁面温度由 32.2 °C 降低至 15 °C 时, 温度平均降低了 13.49 °C. 其中, 加风机工况在壁面温度变化时, 1 总风量比例和 0.7 总风量比例的温度降低幅度高于常规工况, 相比常规工况平均降低 0.28 °C 和 0.1 °C. 0.5 总风量比例工况则平均升高 0.03 °C. 这一现象表明了局部通风方式的散热潜力, 仅需常规风量的一半就可近似达到与常规工况相同的换热效果. 并且, 局部通风在局部控制区域有很强的降温效果. 在 1 总风量比例壁面 15 °C 时, 加装射流风机, 可以在相同区域多降

低 2.58 ℃, 这对于处理管廊电缆舱内的电缆接口或者高温聚集区域是十分有利的. 后续研究将继续拓展工况, 加入风机直径, 风速, 安装位置等方面的设置, 确定出局部通风方式的最优设置.

3 结论

本文通过数值模拟结合实验验证的方法, 对 1 000 m 跨防火分区管廊电缆舱进行了局部通风换热研究, 分析了两类电缆舱在不同管廊总风量比例, 管廊壁面温度下的速度温度场及其形成规律, 所得结论如下:

(1) 在综合管廊内设置射流风机是一种行之有效的局部降温方式. 管廊全局风量会与射流风机风量相互影响, 加大全局风量会降低射流风机处换热效率;

(2) 加设射流风机, 会中断电缆舱上部区域的高温连续, 风机下方呈现三角状的局部低温区域. 两类电缆舱之间的最大温差出现在大风量低壁温工况, 此时局部通风电缆舱温度比常规电缆舱温度低 2.58 ℃;

(3) 应用局部通风方法后, 电缆舱内降温幅度增大. 当壁面温度降低时, 1 总风量比例和 0.7 总风量比例的局部通风工况降温幅度大于常规工况, 舱内温度比其平均低 0.28 ℃ 和 0.1 ℃. 而 0.5 总风量比例工况则平均升高 0.03 ℃. 局部通风工况引入风量与冷量远小于常规工况, 却能达到与其相似的降温效果, 这充分体现出局部通风方法的节能优势.

参考文献 References

[1] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 同济大学. 城市综合管廊工程技术规范: GB 50838—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015: 20.
Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Tongji University. Technical code for utility tunnel engineering: GB 50838—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015: 20.

[2] 孙立, 余斌, 杨恒声. 城市地下综合管廊通风设计探讨[J]. 暖通空调, 2018, 48(8): 94-96.
SUN Li, YU Bing, YANG Hengsheng. Discussion on ventilation design of urban utility tunnel[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2018, 48(8): 94-96.

[3] 崔国静, 周庆国, 宋战平. 城市地下综合管廊建设与发展探析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(5): 660-666.
CUI Guojing, ZHOU Qingguo, SONG Zhanping. A-

analysis on construction and development of urban utility tunnel[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(5): 660-666.

[4] 鱼晟睿. 地下超长区间隧道取消中间风井的防排烟系统模式研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3): 379-385.
YU Shengrui. Study on the model of smoke prevention and exhaust system without intermediate wind well in the underground extra-long interval tunnel of urban rail transit[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(3): 379-385.

[5] 李哲, 高楷, 张晨, 等. 综合管廊电力舱温度场的数值模拟研究[J]. 资源节约与环保, 2019(12): 137-140.
LI Zhe, GAO Kai, ZHANG Chen, et al. Numerical simulation study on the temperature field of electric cabin in utility tunnel[J]. Resources Economization & Environment Protection, 2019(12): 137-140.

[6] 周游, 周伟国. 综合管廊电缆舱通风数值模拟研究[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(11): 29-33, 91.
ZHOU You, ZHOU Weiguo. Study on numerical simulation of utility cable tunnel ventilation system[J]. Building Energy & Environment, 2016, 35(11): 29-33, 91.

[7] 韦岩, 谢安生, 洪梦华. 综合管廊电缆舱断面形状对通风影响的研究[J]. 施工技术, 2018, 47(A4): 1436-1439.
WEI Yan, XIE Ansheng, HONG Menghong. Study on the influence of section shape of utility cable tunnel on ventilation[J]. Construction Technology, 2018, 47(A4): 1436-1439.

[8] 杨霁虹. 地下综合管廊电力舱内高温聚集区的通风系统模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
YANG Jihong. Research on ventilation system of high temperature accumulation area in electric cabin of underground integrated pipe gallery[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.

[9] WANG J, LIU X, CHEN S, et al. Reduced-scale model study on cable heat dissipation and airflow distribution of power cabins[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 114068.

[10] 郭对明, 李国清, 侯杰, 等. 基于 FLUENT 的深井掘进巷道局部通风参数优化[J]. 黄金科学技术, 2022, 30(5): 753-763.
GUO Duiming, LI Guoqing, HOU Jie, et al. Optimization of local ventilation parameters of deep mine excavation roadway based on FLUENT[J]. Gold Science and Technology, 2022, 30(5): 753-763.

[11] KUSUI A, VILLAESCUSA E, FUNATSU T. Mechanical behaviour of scaled-down unsupported tunnel

- walls in hard rock under high stress[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2016, 60:30-40.
- [12] 徐志胜, 陶浩文, 王天雄, 等. 隧道曲率半径对空气射流流场特性及升压效率的影响研究[J]. *安全与环境学报*, 2023, 23(2):415-423.
- XU Zhisheng, TAO Haowen, WANG Tianxiong, et al. Experimental study on propagation characteristics of the deflagration flame of coal dust/methane /air in constant volume chamber [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(2):415-423.
- [13] 王万青. 城市隧道射流风机安装技术[J]. *城市建筑空间*, 2022, 29(9): 245-246.
- WANG Wanqing. Installation techniques for jet fans in urban tunnels[J]. *Urban Architectural Space*, 2022, 29(9): 245-246.
- [14] 李方舰, 李婧, 戎贤, 等. 基于 FDS 的公路隧道火灾可逆射流风机通风疏散研究[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(8): 1056-1060.
- LI Fangjian, LI Jing, RONG Xian, et al. Study on ventilation and evacuation of highway tunnel fire reversible jet fan based on FDS[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(8): 1056-1060.
- [15] LEE H, KWAK J, CHOI J, et al. A lab-scale experimental approach to evaluate rheological properties of foam-conditioned soil for EPB shield tunnelling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 128: 104667.
- [16] JANG Y, KIM J, RHO J, et al. The characteristics of ventilated pool fires of Daegok-Sosa subway lines using Model-Scale tunnels and stations[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 121:104321.
- [17] WANG X, SPEARPOINT M, FLEISCHMANN C. Comparison of results from large-scale and small-scale tunnel experiments[J]. *Fire Safety Journal*, 2018, 95: 135-144.
- [18] LI J, LIU W, LI Y F, et al. Scale modelling experiments on the effect of longitudinal ventilation on fire spread and fire properties in tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 130: 104725.
- [19] COSTANTINO A, MUSTO M, ROTONDO G, et al. Numerical analysis for reduced-scale road tunnel model equipped with axial jet fan ventilation system[J]. *Energy Procedia*, 2014, 45: 1146-1154.
- [20] CHENG Q, LI H, RONG L, et al. Using CFD to assess the influence of ceiling deflector design on airflow distribution in hen house with tunnel ventilation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 151: 165-174.
- [21] DU L, YANG C, DOMINY R, et al. Computational fluid dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 159: 1-15.
- [22] YANG S, AI Z, ZHANG C, et al. Study on optimization of tunnel ventilation flow field in long tunnel based on CFD computer simulation technology[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11486.
- [23] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 第二版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- LU Yaoqing. Practical heating and air conditioning design manual[M]. 2nd ed, Beijing: China Construction Industry Press, 2008.
- [24] 刘引鸽, 周欢欢, 胡浩楠, 等. 西安地区土壤浅层温度变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(8): 153-159.
- LIU Yinge, ZHOU Huanhuan, HU Haonan. Characteristics of shallow soil temperature changes in Xi'an area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(8):153-159.
- [25] 张锦鹏. 综合管廊通风换热理论研究[J]. *暖通空调*, 2022, 52(4):146-151.
- ZHANG Jinpeng. Theoretical study on ventilation and heat transfer of utility tunnels[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2022, 52(4):146-151.

(编辑 吴海西)