

文章编号:1673-9469(2023)01-0096-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.014

通风方式对 T 型综合管廊火灾烟气蔓延的影响

胡楠,肖峻峰*,代长青,胡涛涛,尹诗元

(安徽建筑大学 土木工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要: T 型综合管廊空间狭长且有支路连通的特点,提高了火灾烟气控制难度从而加剧了火灾事故的风险。利用 PyroSim 软件模型模拟不同通风方式对其烟气排放效果,探究了 T 型综合管廊电缆舱的交叉口发生火灾时,进风口、出风口位置及出风风速对舱内烟气蔓延的影响。结果表明,中部进风、左右出风、临界风速为 1.75 m/s 的一进两回通风方案最利于火灾烟气控制,进风口方向适宜作为应急疏散通道,可为 T 型综合管廊的设计提供参考。

关键词: T 型管廊;电缆舱火灾;通风方式;临界风速

中图分类号: X928.7

文献标识码: A

Influence of Ventilation Mode on Fire Smoke Spread of T-shaped Comprehensive Pipe Corridor

HU Nan, XIAO Junfeng*, DAI Changqing, HU Taotao, YIN Shiyuan

(College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Anhui, Hefei 230009, China)

Abstract: The space of T-shaped comprehensive pipe corridor is narrow and long and the branches are connected, which increases the difficulty of fire smoke control and aggravates the risk of fire accidents. The influences of different ventilation modes on smoke emission are simulated by using PyroSim software model, and the influences of the air inlet, outlet position and outlet wind speed on the smoke spread in the cabin are explored when there is a fire at the intersection of T-shaped integrated pipe corridor cable cabin. The results show that the one-in-two-out ventilation mode with central air intake, left and right air outlet and a critical ventilation velocity of 1.75 m/s is the most favorable mode for fire smoke control, and the direction of air inlet is suitable to be used as an emergency evacuation channel, which can provide references for the design of T-shaped comprehensive pipe corridor.

Key words: T-shaped pipe corridor; cable cabin fire; ventilation mode; critical ventilation velocity

城市综合管廊有限的空间和狭长的结构增加了发生火灾事故的风险和火灾烟气控制的难度^[1],加上其中敷设了电力、通信等电缆管线,火灾隐患较大,如果通风排烟不到位,会阻碍抢险救援,也会影响居民生活。特殊形式的综合管廊,如 L 型、U 型、T 型、十字型,其火灾风险和排烟问题更具难度。

鉴于上述火灾的风险、烟气控制的难度和危害,学者们对综合管廊烟气控制开展了大量的研

究。赵永昌等^[2]搭建小尺寸管廊实验平台,得出温度烟气与距离的衰减公式并利用 FDS 软件得到了验证;陶海军等^[3]基于小尺寸实验平台,得出与火源水平方向相距 0.3 m 处,随着高度的不同,烟气温度呈现明显跳跃现象;赵忠梁^[4]给出了四川省渠县黄花大道综合管廊的平时通风、巡检通风、事故通风和火灾后通风设计方案;王振榕等^[5]采用 FDS 仿真,研究了排烟机的换气率对火灾温度及排烟的影响,当换气率大于 11.8 次/h 烟气层可

收稿日期:2022-08-16

基金项目:教育部产学研协同育人项目(202002290033);安徽省自然科学基金资助项目(2108085ME159);安徽省课程思政教学团队项目(2020kcszjtd17);安徽省教育厅高校自然科学基金资助项目(KJ2021JD21);安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2022-YF010)

作者简介:胡楠(1994-),女,安徽池州人,硕士研究生,主要从事建筑火灾防治研究。

* 通讯作者:肖峻峰(1978-),男,湖北大冶人,博士,教授,主要从事矿井瓦斯、煤自燃与粉尘等灾害防治研究。

以保持稳定;Liang^[6]和Yan等^[7]通过计算机模拟研究了T型和L型综合管廊火灾后不同区域的温度分布及火灾蔓延情况,并对交叉口处温度进行深入关注,发现交叉口处温度偏高;安伟光^[8]探究了T型综合管廊火源位置的改变对管廊火灾的影响,并对火源位置的火灾危险性进行了排序。

上述学者对火灾事故中通风排烟的研究,关注到了“一”型综合管廊,而对于特殊形式的综合管廊,要么仅涉及火源位置、温度分布,要么仅分析事故后的通风排烟,未提及事故中的,这也代表了国内研究的现状。因此,本文针对T型综合管廊,利用PyroSim软件,研究通风方式及出风风速对管廊火灾烟气蔓延的影响,分析得出最优的通风方案和应急疏散方向,为同类型狭长综合管廊的火灾通风设计提供参考。

1 综合管廊电缆舱火灾模型

1.1 几何模型

以合肥市高新区某段综合管廊电缆舱为例,利用PyroSim软件建立全尺寸模型。该模型X方向长度为200 m,Y方向长度为100 m,连接部位为90°,截面尺寸为3.2 m×3.6 m(宽×高),管廊电缆舱室左右两侧各为6层10 kV电缆,上下层电缆的间距为0.4 m,底层电缆距模型底的净距为0.18 m,电缆舱的模型如图1所示。

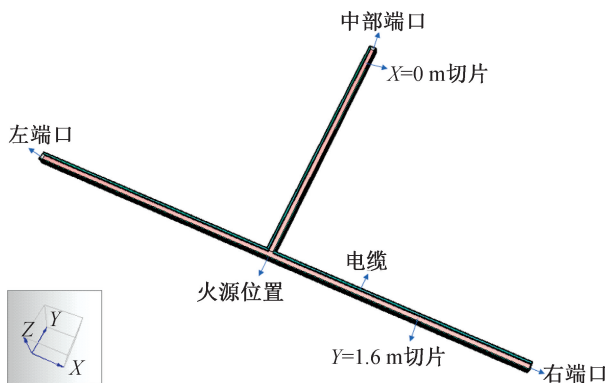


图1 电缆舱模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cable cabin model

1.2 网格设置

网格尺寸是FDS需要设置的重要参数,网格尺寸的经验值为特征火焰直径的1/4~1/16较为合适。特征火焰直径采用下式计算:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中, D^* 为特征火焰直径,m; Q 为火灾燃烧时的热释放速率,kW; ρ_{∞} 为环境中空气密度,取1.2 kg/m³; C_p 为空气比热容,取1 kJ/(kg·K); T_{∞} 为环境温度,取293 K; g 为重力加速度,取9.81 m/s²。通过网格敏感性分析验证得出,本模型的网格尺寸设置成0.2 m×0.2 m×0.2 m较为合理,本文将网格沿X、Y方向划分为两部分,网格总数为432 000。

1.3 火源设置

由于综合管廊内部的电缆分布情况及用量均匀,在火源位置择定时宜将火源设置在能够引燃最多的电缆位置,便于研究火源处于最不利位置电缆舱室的火灾危险性,所以火源设置在管廊交叉口处,火源尺寸设置为1 m×1 m。

管廊空间狭长,为小型火灾,故选取的火源功率为3 MW,火源类型为 t^2 快速增长火,火源功率的比例系数为0.046 89,模拟时间为600 s,根据热释放速率公式计算得知约在253 s时,火源的热释放速率达到最大值。

1.4 风口设置

通风口采取简化模式,用端口作为进、出口,位于X轴负向为左端口,X轴正向为右端口,Y正向为中部端口,通风方式分为“两进一回”(即两个进风口、一个出风口)、“一进两回”(即一个进风口、两个出风口),并根据通风口位置进一步划分为四种通风方案。

出风口风速根据不同的通风方案分别定义。GB 50838—2015《城市综合管廊工程技术规范》规定,综合管廊电缆舱室应该采用自然进风与机械排风相结合的通风方式,管廊的通风口处出风风速不宜大于5 m/s^[9]。为了得出临界风速,需要在规定范围内设置多个风速值,利用PyroSim软件依次模拟后,从中选取若干具有代表性的风速值作为本文模拟工况风速。

2 模拟工况设置

2.1 工况设计

根据通风方式和出风风速设置21个工况,见表1。其中工况0为基准工况,三个端口均采用自然风;其他工况进风口均采用自然进风,出风口采用机械排风。

表 1 模拟工况

Tab. 1 Simulated operating conditions

工况	通风方式	通风方案	进风口 1	进风口 2	出风口 1	出风口 2	出风口风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
0	自然通风	基准	左	右	中	—	—
1							2
2							2.8
3		a	左	右	中	—	3
4							3.5
5	两进一回						5
6							2
7							2.8
8		b	左	中	右	—	3
9							3.5
10							5
11							1
12							1.5
13		c	中	—	左	右	1.75
14							2
15	一进两回						2.5
16							1
17							1.5
18		d	右	—	左	中	1.75
19							2
20							2.5

2.2 测点、切片布置

在管廊宽度中心线上高度为 1.8 m 处布置温度和 CO 浓度测点,并沿管廊长度方向每隔 10 m 展开布置;在管廊宽度中心线上高度为 1.6 m 处布置能见度测点;在管廊中设置 $X=0$ m 和 $Y=1.6$ m 能见度切片,切片如图 1 所示。

3 模拟结果分析

3.1 两进一回通风方式下的结果分析

3.1.1 a 通风方案下,不同排风风速对管廊的火灾影响分析

当左、右端口进风,中部端口排风时,分析管廊 X 方向 1.8 m 高度在 $t=300$ s 时的温度和 CO 浓度变化分布情况。

图 2 是温度情况,当左右端口进风、中部端口排风时,左右侧温度均匀分布。当排风风速为 2 m/s 时,交叉口处温度达到峰值 125.4 $^{\circ}\text{C}$;当风速为 3.5 m/s 时,交叉口处温度降至 52.1 $^{\circ}\text{C}$;而当风速为 5 m/s 时,交叉口处温度略有回升,为 55 $^{\circ}\text{C}$ 。这说明排风风速存在某一临界值,风速过大或过小会影响携带的氧气量和湿空气含量,进而影响温度变化。

从温度变化趋势来看,处于机械通风状态下,

从火源位置到左右端口的温度呈先快速下降、后缓慢下降、再维持稳定水平的分布趋势;而自然通风状态下,从火源位置到左右端口的温度呈先快速下降、后缓慢回升、再缓慢下降的分布趋势。其原因在于,机械排风状态下,中部端口的排风机及时排出热空气,从而快速降低了火源两侧的温度,左右两端的自然风补入使温度缓慢降低,直至端口处接近外部温度;而自然通风状态下,中部的自然风虽使温度下降,但风力不足,因而温度有一个回升过程,后等到靠近两端口时,端口自然风补入才使温度下降。对比五种机械排风风速下的温度变化情况,发现当风速为 3 m/s 时,温度变化幅度最小,交叉口处温度为 51.5 $^{\circ}\text{C}$,整体数值在五种工况中最低。

图 3 是 CO 浓度情况。比较图 3 中 CO 浓度分布特征,可知各种风速下 CO 浓度变化呈现出左右对称的分布趋势。在自然通风下,交叉口左右 CO 浓度下降是因中部端口自然风对燃烧起到一定的抑制作用并稀释了 CO 浓度,但自然风力不足,持续的物质燃烧使 CO 浓度不断升高,直到靠近左右端口时,端口自然风补入稀释了 CO 的浓度。在机械通风下,左右两补风口空气流动较快,促进了物质燃烧,使得交叉口处 CO 聚集,浓度最高。从图

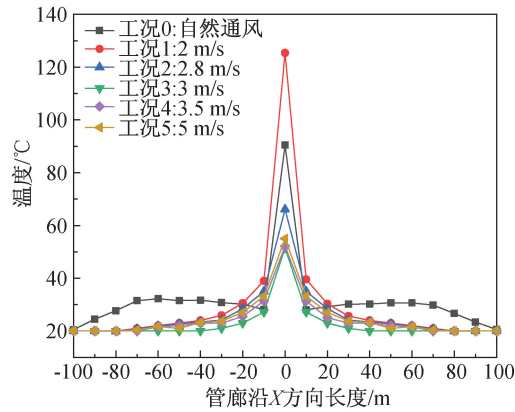


图2 a 通风方案下不同排风风速时管廊温度变化曲线
Fig. 2 Temperature variation curve of pipe corridor under different exhaust wind speeds under a ventilation scheme

中可以看出,风速为 2.8 m/s 时,交叉口处 CO 浓度为 0.03%;风速为 3、3.5 和 5 m/s 时的 CO 浓度整体变化极小,峰值低于 0.02%,此 CO 浓度下人体在 2~3 h 后才会有轻度头痛症状^[10],其中,当风速为 3 m/s 时,CO 浓度整体变化最小,数值最低。

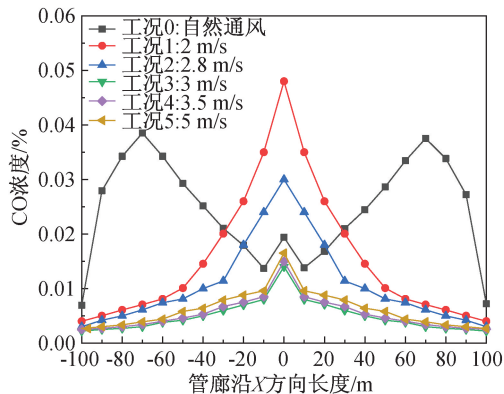


图3 a 通风方案下不同排风风速时管廊 CO 浓度变化曲线
Fig. 3 Variation curve of CO concentration in pipe corridor with different exhaust wind speeds under a ventilation scheme

3.1.2 b 通风方案下,不同排风风速对管廊的火灾影响分析

当左、中部端口进风,右端口排风时,分析管廊 X 方向在 $t=300$ s 时的 1.8 m 高度处 CO 浓度和 1.6 m 高度处能见度变化分布情况。

图 4 是 CO 浓度情况。由于左侧端口和中部端口进风,右侧端口排风,使得 CO 在管廊右侧聚集,五种机械排风方式下 CO 浓度呈现出左端低右端高的相似趋势,但在不同风速下,CO 浓度峰值和达到峰值的位置也不同。其中,当排风风速为 3 m/s 时,CO 浓度在交叉口往右 20 m 处达到峰值,数值远低于最大值,在各种风速情况下最低;其他机械排风风速下,CO 浓度均在交叉口往右

10 m 处达到峰值。由此可知,排风风速为 3 m/s 时,CO 浓度峰值位置离交叉口最远且整体 CO 浓度最低。

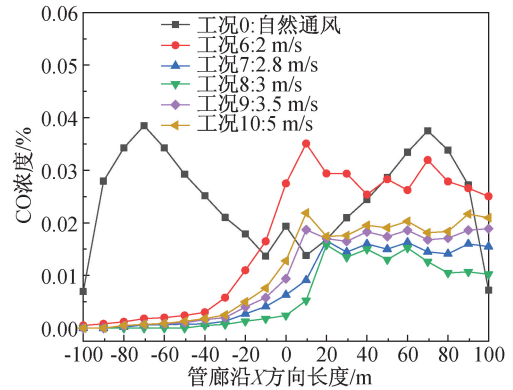


图4 b 通风方案下不同排风风速时管廊 CO 浓度变化曲线
Fig. 4 Variation curve of CO concentration in pipe corridor with different exhaust wind speeds under b ventilation scheme

图 5 是能见度情况。自然风速下,空气流动缓慢,物质燃烧使管廊内部能见度普遍低于 2 m。机械排风下,右端排风口及时排出热空气,左侧端口和中部端口及时补入自然风,使整个管廊内、外空气交换速率增大,左端能见度维持在 30 m;与此同时,空气流动也携带了大量的氧气进入管廊内,促进了交叉口处的火源燃烧,且右侧端口排风促使烟气向右运动,因此临近交叉口处的能见度急速降低,直至管廊右侧端口一直保持较低的能见度水平。排风风速为 3 m/s 时,临近交叉口处的能见度下降速率低于其他风速,右侧的能见度保持在 5 m 左右,高于其他风速情况。

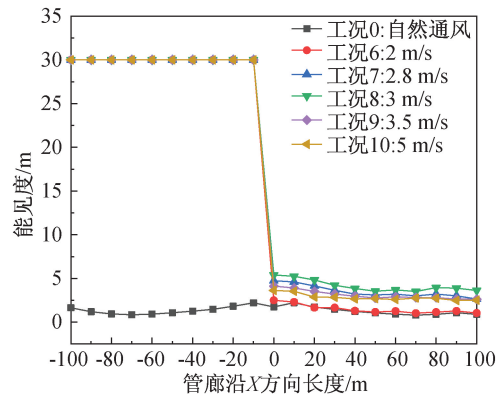


图5 b 通风方案下不同排风风速时管廊能见度变化曲线
Fig. 5 Visibility variation curve of pipe corridor under different exhaust wind speeds under b ventilation scheme

3.1.3 临界风速下,a、b 通风方案对管廊烟气扩散影响分析

由前可知,a、b 通风方案中的临界风速为 3 m/s,即工况 3 和工况 8。图 6 展示了工况 3 和工况 8 火

灾烟气随时间蔓延的过程。当左、右端口进风,中部端口排风时,管廊支路方向慢慢被烟气充满且随着时间的推进烟气层越来越厚,而管廊主路方向在前 60 s 内几乎没有烟气,火灾持续 180 s 时,烟气也仅在主路的顶棚对称蔓延,这主要是中部的排风机及时排除空气使得烟气主要往支路方向流动,待支路方向烟气下沉后才有一部分烟气向交叉口处逆流。当左端口、中部端口进风,右端口排风时,烟气主要随着排风机的位置向右端流动,越靠近端口烟气层越厚,是因为右端风机在不断排风使烟气向右运动并聚集,管廊左侧和管廊支路在 180 s 内无烟气。相比较而言,以进风口作为应急疏散通道时,b 方案更安全。

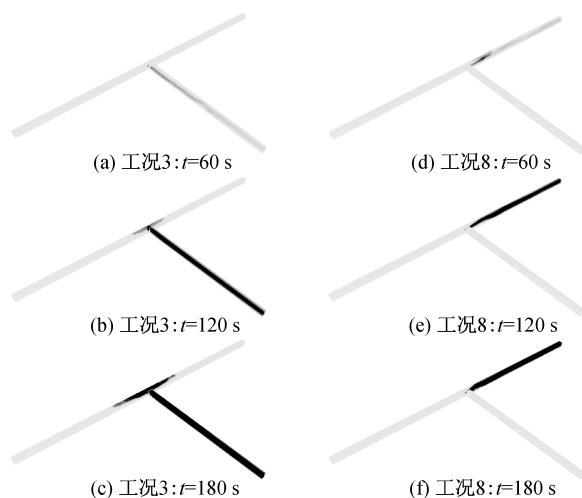


图 6 a、b 通风方案下烟气随时间蔓延情况

Fig. 6 Smoke spread with time under a and b ventilation schemes

3.2 一进两回通风方式下的结果分析

3.2.1 c 通风方案下,不同排风风速对管廊的火灾影响分析

当中部端口进风,左、右端口排风时,分析管廊 X 方向在 $t=300$ s 时的 1.8 m 高度处 CO 浓度和 1.6 m 高度处能见度变化分布情况。

图 7 是 CO 浓度情况。管廊内 CO 浓度呈现出左右对称形态:左右两端 CO 浓度较高,越靠近端口浓度越高,靠近交叉口时 CO 浓度明显下降并在交叉口处出现最低值。造成以上现象,主要是因为左右排风口持续排风,使左右两端越靠近端口浓度值越大,而中部端口进风虽有助燃作用,但产生的 CO 及时被左右侧排风机抽走,所以在交叉口浓度下降。当排风风速为 1 m/s 时,左右两侧 CO 浓度基本保持在 0.04% 以上,交叉口处降至 0.027%,均为五种机械排风风速下的最大值;其余

四种风速下,CO 浓度数值较为接近,风速为 1.5、1.75、2、2.5 m/s 时,交叉口处 CO 浓度依次为 0.006 1%、0.005 2%、0.007 4%、0.008%,左右两侧浓度高低顺序也与之对应。综合分析五种机械排风风速下 CO 浓度的分布形态,可知风速为 1.75 m/s 时,整体浓度最小。

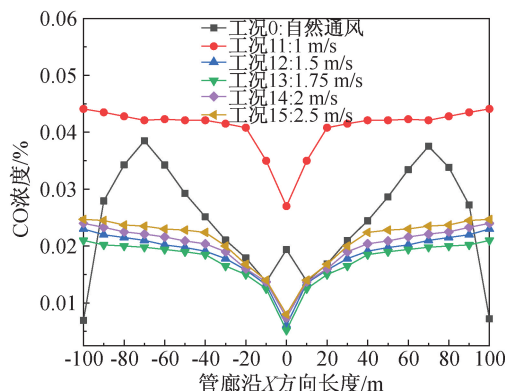


图 7 c 通风方案下不同排风风速时管廊 CO 浓度变化曲线

Fig. 7 CO concentration variation curve of pipe corridor under different exhaust wind speeds under c ventilation scheme

图 8 是能见度情况。管廊内能见度范围普遍偏低,而交叉口处能见度较高,达到峰值,这是因为中部端口进风直接吹散交叉口处烟气,使得烟气向左右两端蔓延,导致左右两端能见度骤降。比较五种机械排风风速下左右两端的能见度范围,风速为 1、1.5、1.75、2、2.5 m/s 时,交叉口处能见度依次为 20、27.2、30、26.4、25 m,左右两侧能见度高低顺序也与之对应,由此得出当风速为 1.75 m/s 时,能见度范围整体优于其他风速。

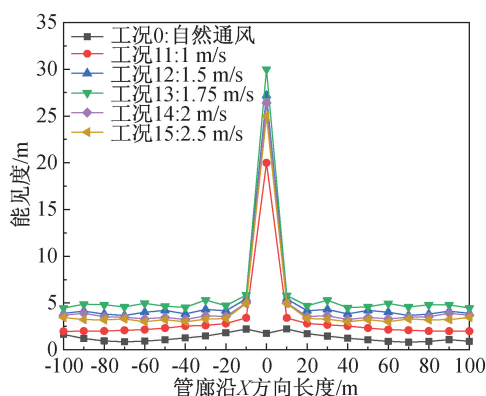


图 8 c 通风方案下不同排风风速时管廊能见度变化曲线

Fig. 8 Variation curve of visibility of pipe corridor under different exhaust wind speeds under c ventilation scheme

3.2.2 d 通风方案下,不同排风风速对管廊的火灾影响分析

当为右端口进风,左端口和中部端口排风时,

分析管廊 X 方向在 $t=300\text{ s}$ 时的 1.8 m 高度处温度和 1.6 m 高度处能见度变化分布情况。

图9是温度情况。左端和中部的排风机将热空气排走,使得火源位置和管廊左侧温度较低;右侧补入的自然风携带了大量具有助燃作用的氧气进入管廊中,使得温度在火源右侧 10 m 处达到峰值,后又因持续进入的冷空气使得温度逐渐下降。在机械排风下,管廊左侧温度总体低于自然通风时,说明机械通风效果优于自然通风。其中,当排风风速为 1.75 m/s 时,交叉口处和各段温度均为五种风速中的最小值,右侧温度上升幅度也最为平缓。

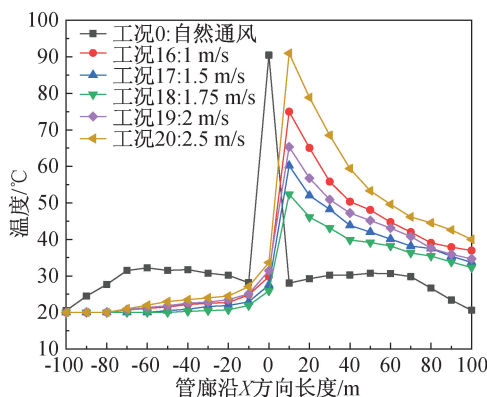


图9 d通风方案下不同排风风速时管廊温度变化曲线
Fig. 9 Temperature variation curve of pipe corridor under different exhaust wind speeds under d ventilation scheme

图10是能见度情况。管廊左侧排风机排烟使得能见度偏低,能见度普遍低于 5 m ,右侧自然风补入稀释了烟气的浓度,从管廊左侧到右侧能见度呈现上升趋势,并达到 30 m 的峰值。但不同排风风速下达到能见度峰值的位置是不同的:风速为 1.75 m/s 时,能见度在交叉口处即火源上方达到峰值;风速为 1 m/s 、 1.5 m/s 时,能见度在交叉口右侧 10 m 左右达到峰值;风速为 2 m/s 、 2.5 m/s 时,能见度在交叉口右侧 20 m 左右达到峰值。因此,当风速为 1.75 m/s 时,该段管廊内的能见度峰值区域最长,整体能见度最佳。

3.2.3 临界风速下,c、d通风方案对管廊能见度影响分析

由前可知,c、d通风方案中的临界风速为 1.75 m/s ,即工况13和工况18。

图11和图12分别为工况13在 $X=0\text{ m}$ 和 $Y=1.6\text{ m}$ 时能见度随时间变化的切片。当中部端口进风,左、右端口排风时,管廊支路方向除了靠近交叉口位置,其余位置的能见度维持在环境水平;

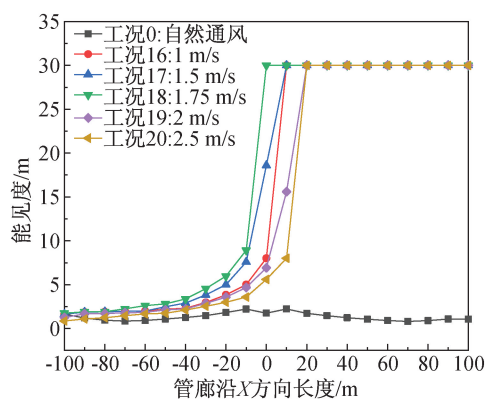


图10 d通风方案下不同排风风速时管廊能见度变化曲线
Fig. 10 Visibility variation curve of pipe corridor with different exhaust wind speeds under d ventilation scheme

管廊主路方向能见度随时间的推进越来越低,且左右两边呈对称变化,火灾发生 180 s 时能见度下降至 $5\sim 6\text{ m}$,危险性较大。此种通风方式下宜选择管廊支路方向作为应急疏散通道。

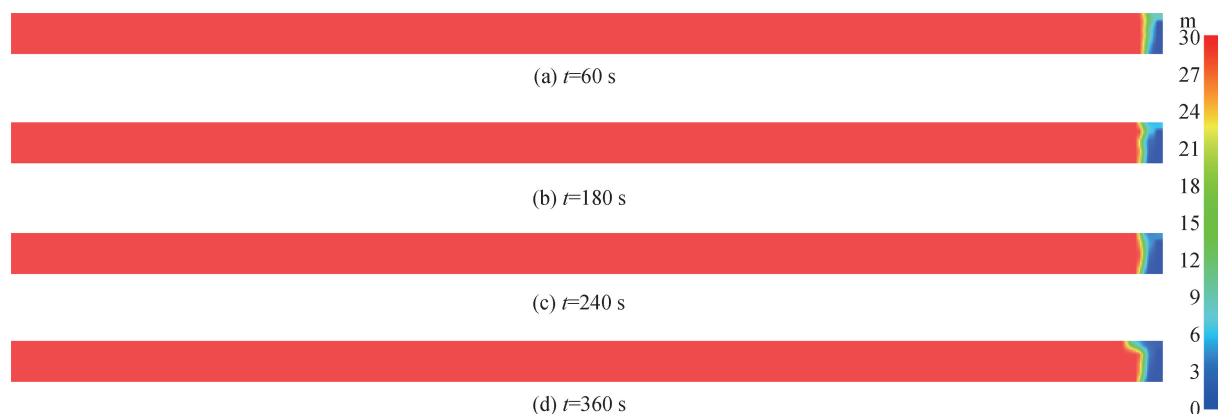
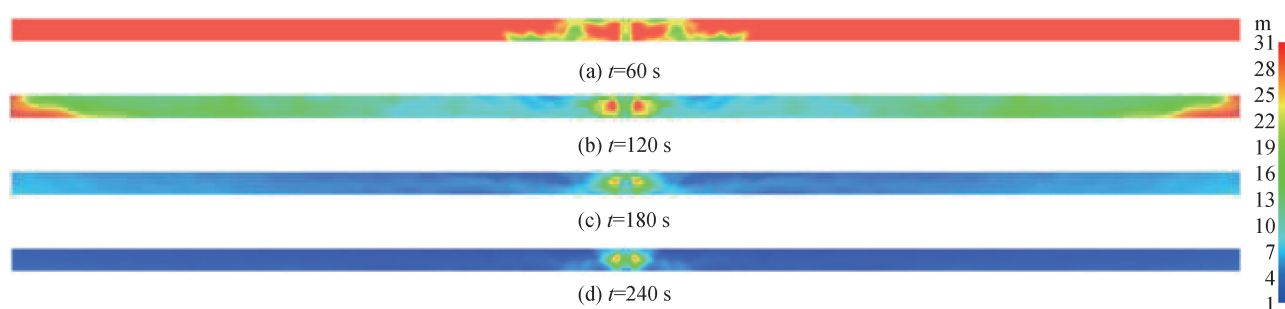
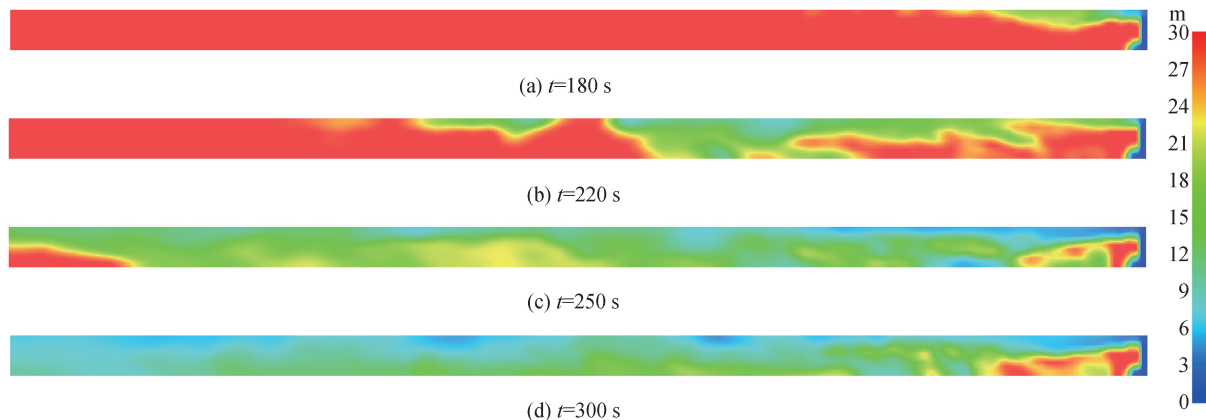
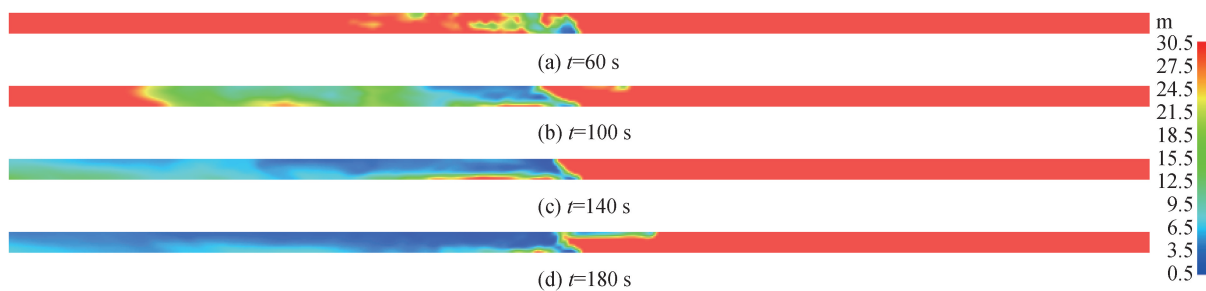
图13和图14分别为工况18在 $X=0\text{ m}$ 和 $Y=1.6\text{ m}$ 时能见度随时间变化的切片。当右端口进风,左端口和中部端口排风时,右端补入的自然风使得管廊右端能见度维持在环境水平,管廊左端能见度随时间呈现分层下降的趋势,到 180 s 时左端能见度下降到 3.5 m 以下且烟气出现回流现象;管廊支路方向由于排风机不断排出烟气从而能见度在不断下降, 180 s 时能见度出现明显的分层,下层能见度比上层高 20 m 以上, 220 s 时支路一半以上受到影响, 300 s 时上层能见度下降至 6 m 以下,相比而言宜选用右端作为应急疏散通道。

4 结论

通过对“两进一回”和“一进两回”这两类机械排风方式下的四种通风方案、20个工况进行数值模拟,综合分析T型综合管廊内部总体及交叉口位置情况,得出最优通风、疏散方案是采用 1.75 m/s 临界排风风速时的c方案,即中部端口进风、左右端口排风,以支路进风口方向作为应急疏散通道。在设计T型综合管廊通风路径时,应优先考虑“一进两回”,让两个出风口处于直通位置,尽量避免多个进风口同时进风、相向进风。

参考文献:

- [1] 米红甫,刘亚玲,杨文璟,等.基于FDS的综合管廊电缆火灾烟气优化控制模式研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(7):100-105.

图 11 工况 13; $X=0$ m 切片能见度随时间变化情况Fig. 11 Operating condition 13: the variation of slice visibility with time when $X=0$ m图 12 工况 13; $Y=1.6$ m 切片能见度随时间变化情况Fig. 12 Operating condition 13: the variation of slice visibility with time when $Y=1.6$ m图 13 工况 18; $X=0$ m 切片能见度随时间变化情况Fig. 13 Operating condition 18: the variation of slice visibility with time when $X=0$ m图 14 工况 18; $Y=1.6$ m 切片能见度随时间变化情况Fig. 14 Operating condition 18: the variation of slice visibility with time when $Y=1.6$ m

- [2] 赵永昌,朱国庆,高云骥. 城市地下综合管廊火灾烟气温度场研究[J]. 消防科学与技术,2017,36(1):37-40.
- [3] 陶海军,朱国庆,赵永昌,等. 综合管廊电缆燃烧烟气温度实验研究[J]. 消防科学与技术,2017,36(6):745-748.
- [4] 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.
- [5] 王振榕,彭伟,陈灵娟. 换气率对综合管廊内火灾环境影响研究[J]. 消防科学与技术,2018,37(7):914-917.
- [6] LIANG K, HAO X, AN W, 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.
- [7] YAN E Z, SUN Y M. Study on the Distribution of Fire Temperature Field of L-type Cable Corridor Through Numerical Simulation [J]. Procedia Engineering, 2018, 211:861-870.
- [8] 安伟光,王涛,梁凯,等. T型地下综合管廊电缆火灾数值模拟[J]. 消防科学与技术,2020,39(8):1120-1123.
- [9] GB 50838—2015,城市综合管廊工程技术规范[S].
- [10] 李欣玉. 综合管廊电缆舱火灾后通风系统的数值模拟与优化设计[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.
- (责任编辑 王利君)

欢迎关注《河北工程大学学报(自然科学版)》微信公众号

为更好地服务作者和读者,顺应学术期刊数字化发展趋势,本刊开通了《河北工程大学学报(自然科学版)》微信公众号。目前,微信公众号已推出“期刊浏览”“投稿指南”等板块,此后,将陆续推出“稿件查询”“热点聚焦”“编阅互动”等板块,热切期待大家持续关注。

添加微信公众号的方式有两种:一是在微信中直接搜索“河北工程大学学报自然科学版”微信公众号;二是扫描下方二维码,点击“关注”即可。河北工程大学学报编辑部欢迎作者、读者对微信公众号的建设提出宝贵建议!



河北工程大学学报编辑部
