

综合管廊火灾探测模拟研究

白振鹏, 李炎锋, 李俊梅, 王致远, 黄有波
(北京工业大学北京绿色建筑与节能技术重点实验室, 北京 100124)

摘要:为了解决综合管廊中基于火灾迅速报警需求的火灾探测器合理布置问题,提出一种火源热能换算系数的数学模型,通过建立三维综合管廊模型,应用FDS软件进行模拟研究.分析综合管廊不同宽度和高度对管廊发生火灾时温度的影响.另外,对数学模型及模拟结果与前人研究结果对比,验证了该数学模型的正确性.研究结果表明:距火源位置越远,管廊顶部热烟气温度达到最大值的时间越长,热空气层厚度和烟气层的厚度均受管廊宽度、高度的影响,火源的热能换算系数与管廊当量直径成正相关.当综合管廊截面的宽度、高度变化范围在1.40~2.60 m时,建议火灾探测器安装间距为5.00 m,它在30 s之内可以确定火源的位置.

关键词:综合管廊;火灾探测;烟气;温度;热释放值;模拟研究

中图分类号: TU 832

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2020)05-0476-07

doi: 10.11936/bjtxb2018050041

Simulation Research on Fire Detection in Utility Tunnel

BAI Zhenpeng, LI Yanfeng, LI Junmei, WANG Zhiyuan, HUANG Youbo

(Beijing Key Laboratory of Green Built Environment and Energy Efficient Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To solve the problem of fire alarm in utility tunnel, the installation distance of fire detector was arranged reasonably. In this paper, a mathematical model of conversion coefficient of heat energy from fire source was presented. Through the establishment of a three-dimensional utility tunnel, a simulation study was conducted by using FDS software. The influence of different width and height of utility tunnel was analyzed on the temperature. In addition, the correctness of the mathematical model was verified by comparing the mathematical model and the simulation results with previous research results. Results show that the farther away from the fire source, the longer the maximum temperature of hot smoke at the top of the utility tunnel. The thickness of the hot air layer and the smoke layer are affected by the width and height of the utility tunnel. The conversion coefficient of the heat energy of the fire source is positively correlated with the equivalent diameter of the utility tunnel. When the width and height of the section of the utility tunnel varies from 1.40 m to 2.60 m, the installation distance of fire detector is suggested to be 5.00 m, and the location of fire source can be determined within 30 s.

Key words: utility tunnel; fire detection; smoke; temperature; heat release rate; simulation research

由于新型公用事业系统的发展,城市综合管廊已经成为城市现代化的标志^[1],它不仅能防止挖掘

街道干扰交通,而且可以有效地利用街道下宝贵的地下空间.近年来,由于城市综合管廊卓越的性能

收稿日期: 2018-05-31

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805008)

作者简介: 白振鹏(1989—),男,博士研究生,主要从事建筑节能及火灾安全技术方面的研究, E-mail: baiyi1056@126.com

通信作者: 李炎锋(1971—),男,教授,主要从事建筑火灾安全技术方面的研究, E-mail: liyanfeng@bjut.edu.cn

和独特的优势^[2],许多国家和地区已经广泛应用综合管廊技术。

城市综合管廊存在的主要危害包括氧气短缺、存在有毒和含有刺激性的气体。为此,必须采取特别的预防措施,防止氧气短缺和空气污染。综合管廊内若发生火灾,高温有毒烟气在管廊内容易积聚,综合管廊狭长而横截面窄,火灾时烟气弥漫,导致能见度较低,探测着火点困难,扑救不容易,火灾破坏性及危害性较大,并且火灾后恢复正常使用的时间较长,造成经济等重大损失。目前综合管廊火灾探测受到探测器探测机理和管廊结构、环境条件的制约。综合管廊内部结构复杂,属于狭长空间;综合管廊内环境比较差,潮湿、多烟尘、存在强电磁干扰、夏季温度比较高。这些因素导致对综合管廊内火灾探测有更高的要求,并且狭长空间导致火灾探测器安装困难。因此,综合管廊内火灾探测的应用研究具有重要的意义^[3]。

针对不同类别的管廊用途,需要采用不同截面形式的综合管廊,而不同截面形式综合管廊的火灾烟气特性不尽相同,对于火灾探测器位置的安装,在控制火灾烟气方面应确定不同的通风风速,并选择采用相应通风设备^[4]。

前人已对综合管廊发生火灾进行研究。陈宏磊^[5]研究综合管廊内天然气管道泄漏引发火灾,对天然气泄漏火灾进行数值模拟。结果表明一个防火分区的天然气舱内空气仅能支持燃烧3 min,火灾温度可达1 300 ℃。赵永昌等^[6]研究综合管廊电力舱室内火灾初期温度场特征,通过改变汽油盘的大小改变火源功率,得到烟气温度与距离的衰减经验公式。王方舜^[7]对管廊电缆火灾发展过程运用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟,分析防火分区间距对火灾的影响,得到不同工况下的管廊内热释放速率、管廊内温度分布、管廊内烟气扩散及一氧化碳浓度分布等情况。

冯彦妮^[8]运用加速遗传算法,借助 MATLAB 计算平台编程,合理设计综合管廊横断面,分析管廊内管线相容性,计算管廊内管线间的安全距离,优化管廊横断面布局方案。孙伟俊^[9]通过 FDS 软件模拟电力舱室电缆火灾,分析舱室内火灾自动灭火系统对电缆火灾危险的控制作用。胡敏华^[10]采用甲烷模拟共同管沟中天然气管道的微小泄漏,分析甲烷的泄漏量和模型的断面宽度对纵向布置的探头报警时间的影响,最终得出报警响应时间的经验公式。王雪梅^[11]以天然气独立舱室内天然气体积分数 1%

为报警限度,研究了不同因素对独立舱报警时间的影响。结果表明,风速变化对远端测点的报警时间影响不大,报警时间都在 5 s 以内。郝冠宇^[12]利用火灾模拟软件(fire dynamics simulator, FDS)对综合管廊模拟,得到火灾期间火势发展、烟气扩散和温度变化,并模拟分析排风口风速、诱导风机以及通风口位置形式等因素对排烟效果的影响。由前人研究可知,利用 FDS 模拟管廊火灾比较普遍,但对于管廊火灾探测的应用研究尚少。

在综合管廊中,由于火灾发生的不确定性,在综合管廊顶部安装火灾探测系统已经引起研究者的极大关注。然而,由于缺乏对这些城市综合管廊在现场条件下的可行性和适应性的调查,一些标准尚未更新^[13]。因此,需要进一步研究火灾探测器在综合管廊内布置的位置,不同管廊断面形式对火灾探测器位置布置的影响,提出包括综合管廊高度、宽度和风速在内的火源热能换算系数概念,分析换算系数对烟气层厚度的影响。结果表明,火灾探测器可以安装在综合管廊顶部,间距小于 5.00 m。火源热能换算系数随着管廊当量直径的增加而增加。研究结果对综合管廊中火灾探测器的安装应用具有指导意义。

1 管廊内火灾探测数学模型

综合管廊内火灾探测的研究,首先,计算火源的热能。其次,根据管廊的不同高度和宽度,计算火源燃烧产生的烟气温度和烟气层厚度。为便于计算高温烟气层厚度,提出高温烟气层厚度取决于火源热能换算系数的表达式。再次,利用 FDS 模拟计算得到管廊内的烟气温度和烟气层厚度,得到烟气温度和烟气层厚度的火源热能换算系数。最后,与前人的实验结果对比,验证该数学模型在管廊火灾探测中应用的正确性及可靠性。

在综合管廊中进行火灾模拟时,火源燃料为已知的液体燃料,固定管廊的几何参数,从模拟结果中计算得到烟气层厚度等参数。采用液体燃料的燃烧能量是已知的,则燃烧可以用燃料损失量的函数表示,即

$$E = \int_0^{T_n} kG(t) dt \quad (1)$$

式中: E 为热能,kJ; k 为系数,kg/s; $G(t)$ 为燃料质量损失; t 为时间,s; T_n 为燃烧时间,s。

为更好地计算出火源的热能,假设如下:1)火源所有热能均可达到综合管廊顶棚。综合管廊顶棚

和壁面热量释放忽略. 2) 综合管廊中一定距离内的温度均匀分布, 综合管廊断面的温度分布均匀. 3) 随着燃料的燃烧, 烟气层保持恒定的厚度. 因此, 热能用

$$E' = \beta \sum_{i=1}^{N_j} (\theta_i - \theta_0) DW' \Delta Z \quad (2)$$

表示^[14]. 式中: E' 为热能, kJ; β 为系数; ΔZ 为温度测量的距离分辨率; $N_j = (l_c - l_s) / \Delta Z$, 其中 $l_c - l_s$ 为烟气高温层长度, m; $\theta_i - \theta_0$ 为环境温度升高值, K; D 为高温烟气层厚度, m; W' 为高温烟气层宽度, m.

高温烟气层的厚度 D 取决于综合管廊高度 H 、宽度 W 和风速 U , 管廊高度 H 、宽度 W 和风速 U 均包含在火源热能换算系数 $\alpha(H, W, U)$ 中, 则式(2)可以用

$$E' = \alpha(H, W, U) \theta_{\text{sum}} \quad (3)$$

表示^[14]. 式中 $\theta_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N_j} (\theta_i - \theta_0) \Delta Z$.

从式(1)(3)可知, 火源热能换算系数如

$$\alpha(H, W, U) = \frac{\int_0^{T_n} kG(t) dt}{\theta_{\text{sum}}} \quad (4)$$

所示^[14]. 火源中的热量形成一个小的的高温烟气层. 火源热释放值 Q 用

$$Q = \frac{\partial E'}{\partial t} = \alpha(H, W, U) \frac{\partial \theta_{\text{sum}}}{\partial t} \quad (5)$$

表示^[14]. 式中 Q 为火源热释放值, kW.

由于管廊高度 H 和宽度 W 发生变化, 为了更好地研究火源热能换算系数随管廊横截面的变化, 引入管廊当量直径 \bar{H} ^[15], 有

$$\bar{H} = 4S/P \quad (6)$$

式中: S 为管廊截面面积, $S = HW, \text{m}^2$; P 为管廊截面的周长, $P = 2(H + W), \text{m}$.

2 综合管廊火灾模拟

火灾研究中, FDS 软件由美国国家技术标准与技术研究所研发^[16]. FDS 软件经过了大量的全尺寸实验验证, 可信度较高, 适用于研究隧道、管廊等狭长通道问题^[17].

2.1 火灾工况描述

在本文模拟管廊计算中, 应用 FDS 软件模拟不同宽度或高度的火灾情况. 由于实际应用中的火灾探测器间距不大于 6.00 m^[18], 并为了与前人实验进行对比, 因此, 选取实际大小尺寸的综合管廊中的一段 10.00 m 长度进行模拟研究. 选定的模拟计算模

型如图 1 所示.

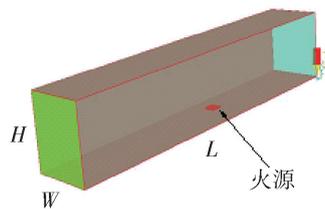


图 1 综合管廊模型示意图

Fig. 1 Sketch of the utility tunnel model

为计算数学模型中换算系数 $\alpha(H, W, U)$, 采用不同高度和宽度的综合管廊分别进行了火灾工况研究. 管廊墙壁材料为石膏板, 综合管廊长 10.00 m. 火灾模拟工况中火源为正庚烷, 燃烧热 4 806.60 kJ/mol. 火源距离一端出口为 4.00 m, 距离另一端出口为 6.00 m. 通过分别固定管廊宽度 W (或高度 H) 为 1.80 m, 改变管廊高度 H (或宽度 W) 分别为 1.40、1.80、2.20、2.60 m 进行了一系列的模拟工况研究.

2.2 边界条件及网格划分

综合管廊内环境温度在 20 ~ 29°C, 相对湿度在 49% ~ 85%. 出入口设定为自由边界条件, 外部的压力是标准大气压^[17]. 模拟中网格划分的依据是按 FDS 中推荐的网格设定的原则^[19]. 李俊梅等^[20]按 FDS 中推荐的网格划分, 进行了大坡度隧道临界风速的数值模拟和实验研究, 结果表明数值模拟和模型实验结果具有一致性, 此网格划分方法具有较高的可信性. 本文中网格划分数量为 120 万, 综合管廊中部火源重点部位的网格尺寸为 0.10 m × 0.10 m × 0.10 m, 满足 FDS 软件计算火灾的精度要求^[21].

3 结果与讨论

针对不同几何形状的管廊, 采用数值模拟, 可以得到顶棚温度变化特性和管廊内烟气层厚度 D , 进而确定火源位置. 确定管廊中火源的热释放值, 通过计算管廊火源热能换算系数与热释放值之间的关系, 可以评价火源热释放的时间. 研究不同横截面形式的管廊, 进而转化为研究其当量直径与火源热能换算系数的关系.

3.1 顶棚温度变化特性

图 2 所示为综合管廊宽度与高度均为 1.80 m 时, 数值模拟计算的管廊顶棚温度分布结果. 即距离火源位置为 1.00、2.00、3.00、4.00、5.00 和 6.00 m 处顶棚计算温度随时间变化值. 随着燃料的

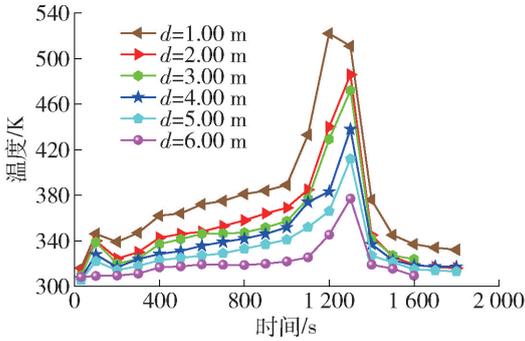


图2 顶棚热烟气温度

Fig. 2 Hot flue gas temperature at the ceiling

燃烧,在点燃 1 200 s 后,顶棚温度达到最大值,距离火源位置 6.00 m 处温度大于 360 °C。随着距火源位置距离的逐渐增加,顶棚热烟气温度达到最大值的时间随着距离火源的位置增加而延长。这表明该模拟计算模型可以用来解释综合管廊模型内火灾蔓延的行为。由于综合管廊模型中的温度模拟计算值,随距离火源位置的距离发生变化,这表示该模拟计算工况可以从火源点燃的温度分布数据中找到火源位置。因此,该模拟工况对综合管廊火灾的计算是有效的。

图3表示综合管廊顶棚中间纵断面的温度分布,每一条曲线代表燃料燃烧后在给定时间的温度分布。由图3可知,随着时间的推移,高温烟气层向开口端扩散,热烟气从管廊开口处流出。在综合管廊顶棚为平顶时,高温烟气层的温度在综合管廊断面内分布均匀。燃烧时间 25 s,火源位置 ($x = 4.00$ m) 正上方温度 339 K,距离火源位置 5.00 m 处 ($x = 9.00$ m) 的综合管廊顶棚一侧的温度为 318.80 K。结合安装探测器经济性,火灾探测器宜安装距离火源位置 5 m 以内,这与 Park^[18] 提出的火灾探测器

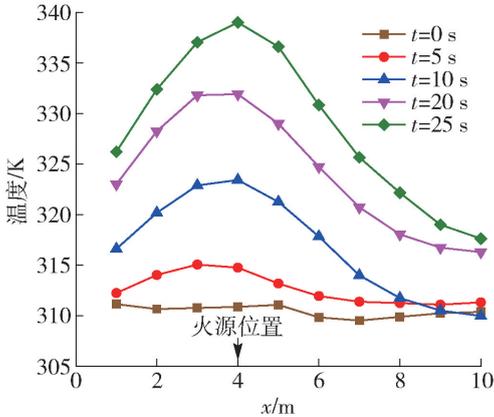


图3 管廊中温度分布。

Fig. 3 Temperature distribution in utility tunnel

的安装位置宜在靠近火源中心位置 6.00 m 以内相一致。因此,管廊火灾探测器安装间距 5.00 m,则在着火 25 s 后报警。

研究综合管廊顶棚中间部位平均温度随时间的变化。图4表示综合管廊顶棚平均温度数值模拟计算结果。结果表明,在综合管廊宽度小于 3.00 m 时,顶棚的平均温度呈现先增加、后降低的趋势。在燃烧进行 85 s 前,顶棚的平均温度急剧增加。在燃烧 305 s 时,顶棚的平均温度达到最大值,之后随着时间的推移而呈现逐渐降低的趋势。这是由于火源位置处燃料的燃烧,开始 85 s 内释放的热量急剧增加,在 85 ~ 305 s 处于稳定燃烧阶段,在 305 s 之后,燃料的燃烧逐渐熄灭。

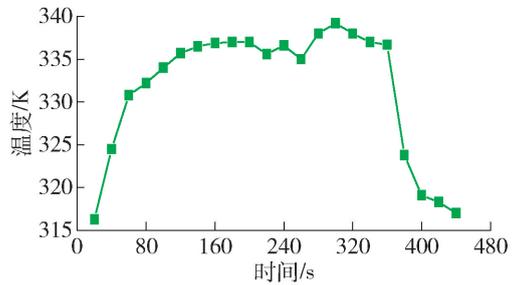


图4 顶棚中部平均温度随时间的变化

Fig. 4 Average temperature in the middle of the ceiling changing with time

3.2 管廊宽度或高度的影响

固定综合管廊宽度为 1.80 m 时,由数值模拟得到的高温热空气层的厚度和烟气层的厚度。

图5表示烟气层厚度与管廊当量直径的关系。烟气层厚度随着综合管廊高度的增加而增加,烟气层的厚度与热空气厚度基本一致。在管廊宽度为 1.00 ~ 3.00 m 时,随着管廊宽度的增加,热空气层厚度和烟气层的厚度均逐渐增加。热空气层的厚度小于烟气层的厚度,这是由于高温烟气受到浮升力等影响,烟气向上运动,热空气层阻止烟气上升,但由于烟气的卷吸作用,热空气层与烟气进行混合,使得烟气的温度逐渐上升,而热空气层受到破坏温度降低。

固定综合管廊高度为 1.80 m,综合管廊宽度改变,得到如图6所示的结果。这揭示了热空气层厚度和烟气层厚度彼此之间随着综合管廊当量直径变化的情况。当管廊宽度为 2.60 m 时,即管廊当量直径为 2.13 m,可以看出,热空气层厚度和烟气层厚度降到最低,热空气厚度为 0.25 m,烟气层厚度为 0.23 m。

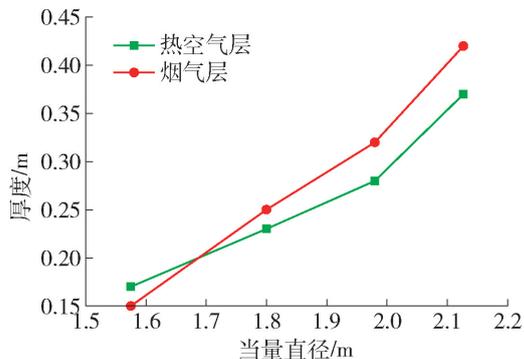


图5 烟气层厚度与当量直径的关系 ($W = 1.80 \text{ m}$)

Fig. 5 Relationship between the thickness of smoke layer and equivalent diameter ($W = 1.80 \text{ m}$)

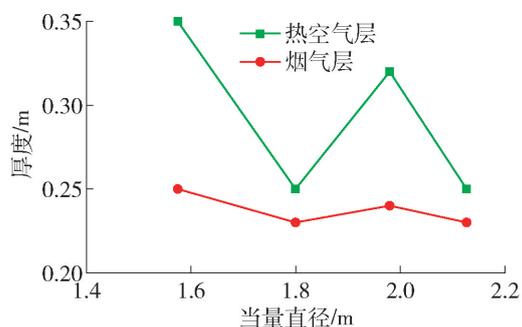


图6 烟气层厚度与当量直径的关系 ($H = 1.80 \text{ m}$)

Fig. 6 Relationship between the thickness of smoke layer and equivalent diameter ($H = 1.80 \text{ m}$)

固定管廊宽度为 1.80 m , 图7表示了热空气层厚度与火源距离的关系. 从距离火源 $2.00 \sim 4.00 \text{ m}$, 选取 $1.40, 1.80, 2.20, 2.60 \text{ m}$ 共4个高度值. 结果表明, 选定的4个不同的综合管廊高度, 热空气层厚度均随着综合管廊高度的增加而逐渐增加, 热空气层厚度大于 0.20 m .

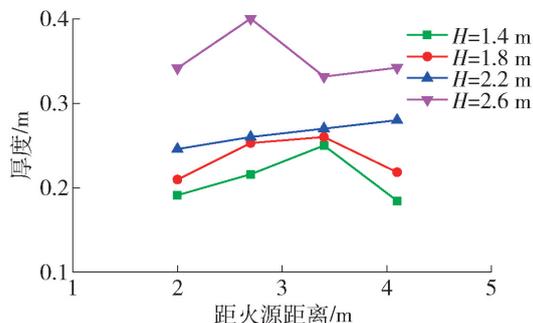


图7 热空气层厚度与火源距离的关系 ($W = 1.80 \text{ m}$).

Fig. 7 Thickness of thermal air zone and distance of the fire source ($W = 1.80 \text{ m}$)

本文研究的烟气层厚度和热空气厚度是建立在前人研究烟气层和热空气层基础之上的. 游宇航

等^[22]进行了全尺寸实验,研究了夏季大空间热空气层对火灾烟流的影响,结果表明热空气层可以降低顶棚附近温度. 胡隆华^[23]采用现场模拟火灾实验方法,研究了不同纵向通风速率下,公路隧道火灾烟气温度的以及烟气层化高度,结果表明较小纵向风不影响烟气层在隧道顶部层化现象. 本文研究得出的热空气层厚度及烟气层厚度变化规律,与前人的研究结果一致,这表明该数值模拟工况对烟气层和热空气层的计算是有效的. 由图5~7可知,采用的假设2)和3)是合理的.

3.3 火源热能换算系数

为了确定火源热能换算系数,计算了管廊内热空气区域内温度上升的总和. 固定管廊宽度为 1.80 m , 由式(3)得到燃料损失 $g(t)$ 计算的总和与热能 E 之间的关系,如图8所示. 管廊高度越高,燃料转换的程度就越大,火源的热能换算系数越大. 这是由于管廊高度增加,烟气层或热空气层厚度增大,烟气热扩散体积变大. 当固定管廊高度、改变宽度时,得到相似的结果. 管廊越宽,火源热能换算系数越大. 然而,由于热空气层厚度或高温烟气层的厚度没有显著变化,火源的热能换算系数受综合管廊高度的影响比受到综合管廊宽度的影响要大.

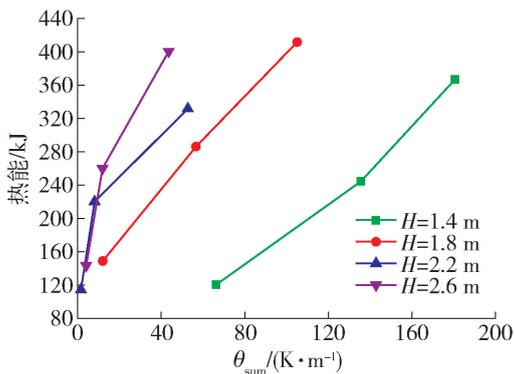


图8 热能与温度总和的关系 ($W = 1.80 \text{ m}$)

Fig. 8 Sum of heat and temperature ($W = 1.80 \text{ m}$)

火源的热能换算系数由式(4)计算得到. 图9为火源热能换算系数与管廊当量直径的关系. 采用2种模拟工况:一种是固定的管廊宽度 $W = 1.80 \text{ m}$, 计算管廊高度改变时的火源热能换算系数;另一种是固定管廊高度 $H = 1.80 \text{ m}$, 计算综合管廊宽度 W 改变时的火源热能换算系数. 随着当量直径的增加,火源的热能换算系数逐渐增加. 这是由于火源燃料的热转换程度变大,烟气热扩散体积变大.

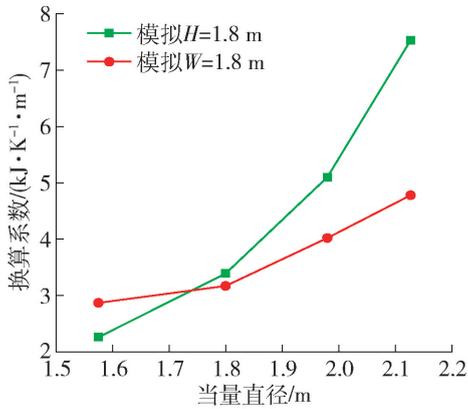


图9 火源热能换算系数与当量直径的关系.

Fig.9 Relationship between conversion coefficient of fire source heat and equivalent diameter

3.4 数值模拟验证

为了验证综合管廊火灾探测模拟结果,计算火源热能换算系统的可靠性,采用与 Ishii 等^[14]的综合管廊火灾实验进行对比分析.

Ishii 等^[14]选择 10 m 长管廊,固定管廊宽度(高度)为 1.82 m,分别改变高度(宽度)范围为 1.35 ~ 2.7 m,利用庚烷作为火源,测量出沿光纤火灾探测器的温度,计算得到火源热能换算系数.图 10 为模拟结果计算的火源热能换算系数与 Ishii 等^[14]的实验计算结果的比较,二者变化趋势基本一致.结果表明,固定管廊宽度 1.80 m,随着管廊当量直径的增加,模拟计算值得出的火源热能换算系数逐渐由 2.87 kJ/(K·m)增加至 4.87 kJ/(K·m).同理,固定管廊高度 1.80 m,随着管廊当量直径增加,火源热能换算系数由 2.26 kJ/(K·m)增加至 7.53 kJ/(K·m).火源热能换算计算固定管廊高度时的数值大于固定管廊宽度时的数值.管廊数值模拟结果计算得到的火源热能换算系数具有可靠性.

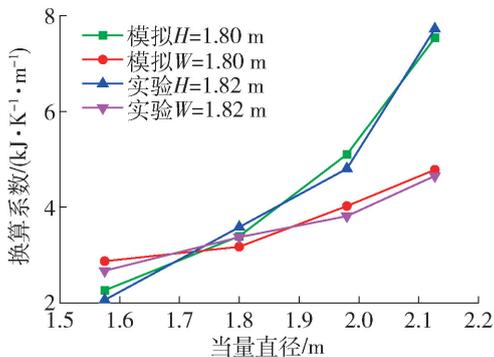


图10 模拟结果与 Ishii 等实验结果的比较.

Fig.10 Comparison of simulation results with experimental results such as Ishii et al

4 结论

1) 综合管廊火灾探测器宜安装在距离火源中心位置 5.00 m 以内.综合管廊顶棚平均温差变化在 5 °C 以内,可以确定 10.00 m 长的综合管廊,火灾探测器在 30 s 内依据得到的温度数据确定火源位置.本文中火灾探测器的安装间距仅适用于管廊截面的宽度(高度)变化范围在 1.40 ~ 2.60 m,对于其他截面形式的管廊,探测器的安装间距需进一步的研究.

2) 对于综合管廊内火灾,综合管廊内烟气层的厚度与热空气厚度变化一致,并且高温烟气层厚度与热空气层厚度均随着综合管廊高度的增加而增加.

3) 综合管廊内火源的热释放值与顶棚下方烟气层温度之间存在着恒定的函数关系.这种关系取决于该综合管廊的火源热能换算系数,即包括综合管廊内的宽度、高度和风速等因素.

参考文献:

- [1] CURIEL-ESPARZ A, JORG E, CANTO-PERELLO J. Indoor atmosphere hazard identification in person entry urban utility tunnels[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2005, 20(5): 426-434.
- [2] DIAN. Field test of optical and electrical fire detectors in simulated fire scenes in a cable tunnel [J]. Photonic Sensors, 2014, 4(2): 156-161.
- [3] 戴文涛. 电缆隧道及综合管廊火灾探测报警技术研究 [J]. 消防科学与技术, 2017, 36(1): 89-92.
DAI W T. Cable tunnel and integrated gallery fire detection and alarm technology [J]. Fire Science and Technology, 2017, 36(1): 89-92. (in Chinese)
- [4] International Labour Office (ILO). Ambient factors in the workplace[S]. Geneva: ILO, 2001.
- [5] 陈宏磊. 基于 FDS 的综合管廊天然气泄漏火灾特性研究[J]. 福建建设科技, 2017(4): 30-32.
CHEN H L. Research on natural gas leakage fire characteristics of integrated pipe gallery based on FDS[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2017(4): 30-32. (in Chinese)
- [6] 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.
ZHAO Y C, ZHU G Q, GAO Y J. Study on the temperature field of fire smoke in urban underground

- comprehensive pipeline[J]. *Fire Science and Technology*, 2017, 36(1): 37-40. (in Chinese)
- [7] 王方舜. 城市综合管廊电缆火灾 CFD 数值模拟研究[J]. *武警学院学报*, 2017, 33(8): 14-18.
WANG F S. CFD numerical simulation of cable fire in urban comprehensive pipeline gallery [J]. *Journal of Armed Police Force Academy*, 2017, 33(8): 14-18. (in Chinese)
- [8] 冯彦妮. 城市地下综合管廊横断面设计及其优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
FENG Y N. Study on design and optimization of cross section of city underground comprehensive pipeline [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 孙伟俊. 城市地下综合管廊火灾危险控制技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
SUN W J. Research on control technology of fire hazard in urban underground comprehensive pipeline [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] 胡敏华. 共同沟天然气管道泄漏报警的模型实验[J]. *天然气工业*, 2006(10): 150-153, 189-190.
HU M H. Model experiment of leak alarm for common trench natural gas pipeline [J]. *Natural Gas Industry*, 2006(10): 150-153, 189-190. (in Chinese)
- [11] 王雪梅. 入廊天然气管道泄漏扩散模拟与危险性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG X M. Analysis of leakage diffusion simulation and hazard analysis of natural gas pipeline [J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] 郝冠宇. 综合管廊中电缆舱内火灾烟气模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
HAO G Y. Simulation study of fire smoke in cabins in comprehensive pipeline [J]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017. (in Chinese)
- [13] 朱军, 范典. 光纤光栅隧道火灾探测器的设计研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 29(4): 107-109.
ZHU J, FAN D. Design of fiber Bragg grating detector in tunnel fire [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(4): 107-109. (in Chinese)
- [14] ISHII H, KAWAMURA K, ONO T, et al. A fire detection system using optical fibres for utility tunnels [J]. *Fire Safety Journal*, 1997, 29(2/3): 87-98.
- [15] 李思成. 城市地下交通联系隧道火灾烟气运动特性及优化控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
LI S C. Study on smoke movement characteristics and optimal control of urban underground traffic tunnel [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] MCGRATTAN K B. Fire dynamics simulator (version 4)—technical reference guide [J]. Nist Special Publication, 2005, 4(4): 206-207.
- [17] 李炎锋, 朱滨, 孙旋, 等. 利用大涡模拟研究地铁区间火灾的烟气扩散[J]. *北京工业大学学报*, 2007, 33(10): 1060-1065.
LI Y F, ZHU B, SUN X, et al. Using large eddy simulation to study the smoke dispersion in subway fire [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2007, 33(10): 1060-1065. (in Chinese)
- [18] PARK D H. Automatic fire detector spacing calculation for performance based design [J]. *Fireence & Engineering*, 2010, 24(1): 15-23.
- [19] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, MCDERMOTT R, et al. NIST special publication 1018-sixth edition: fire dynamics simulator technical reference guide [M]. Washington D C: Government Printing Office, 2013.
- [20] 李俊梅, 许鹏, 李炎锋, 等. 坡度对隧道拱顶烟气最高温度影响的数值模拟与实验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(5): 707-713.
LI J M, XU P, LI Y F, et al. Numerical simulation and experimental study on the influence of slope on the maximum temperature of tunnel vault smoke [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(5): 707-713. (in Chinese)
- [21] PATTERSON N M, FLEISCHMANN C. Assessing the feasibility of reducing the grid resolution in FDS field modelling [M]. Christchurch: University of Canterbury Civil Engineering, 2002.
- [22] 游宇航, 李元洲, 霍然, 等. 夏季大空间热空气层对火灾烟流的影响[J]. *中国科学技术大学学报*, 2006, 36(10): 1069-1074.
YOU Y H, LI Y Z, HUO R, et al. Influence of large space hot air layer on fire smoke flow in summer [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, 36(10): 1069-1074. (in Chinese)
- [23] 胡隆华. 隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
HU L H. Study on thermophysical characteristics of smoke spread in tunnel fire [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)

(责任编辑 吕小红)