

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-684-06

# 电缆敷设方式和火源位置对不同防火分区长度的综合管廊火灾影响研究

肖 洋 邓志辉 范登鑫

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘 要】** 为研究不同防火分区长度对综合管廊电缆舱火灾特性的影响,运用 FDS 软件对电缆舱进行了全尺寸的数值模拟。分析了不同的电缆敷设方式、不同的火源位置在不同防火分区长度下对电缆舱的火灾热释放速率、温度分布、火灾发展的影响。结果表明:当火灾发生在中部位置时,不同敷设方式的电缆火灾规模都随着防火分区长度的增加而增大,且对平行敷设方式的影响更大。当火灾发生在端部时,防火分区长度的改变并没有导致引燃更多的电缆,这种情况下的火灾熄灭是由于烟气流动造成的。

**【关键词】** 综合管廊;数值模拟;电缆火灾;防火分区

中图分类号 X932 文献标识码 A

## Study on the Influence of Cable Laying Method and Fire Source Location on the Fire of Utility Tunnel with Different Lengths of Fire Compartment

Xiao Yang Deng Zhihui Fan Dengxin

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In order to study the influence of different fire compartment lengths on the fire characteristics of utility tunnel, full-scale numerical simulation of the cable cabin was established by using the Fire Dynamics Simulator software. The influences of different cable laying methods and different fire locations on the heat release rate, development process and extinction time under different fire compartment are analyzed. The results showed that when the ignition source was located in the middle position, the hazard of fire increased with the increased of the length of the fire compartment, and the influence on the laying method of parallel is greater. When the ignition source was located at one end of the fire compartment, the longer length of fire compartment did not lead more cables to be ignited. The hazard of fire did not increase, and the fire extinguishment was mainly caused by the flow of smoke.

**【Keywords】** utility tunnel; numerical simulation; cable fire; fire compartment

## 0 引言

综合管廊是用于容纳电力、通信、给水等工程管线的城市地下构筑物,由于地上空间的紧张,综合管廊已经在各大城市开始展露其重要性<sup>[1,2]</sup>。但

是综合管廊由于自身的特点,内部存在大量的可燃物,舱室内一旦发生火灾将会直接、间接的造成巨大的经济损失<sup>[3]</sup>。因此,有必要对综合管廊的火灾特性和发展进行研究,对减少财产损失,提升公共

作者简介:肖 洋 (1995-),男,在读硕士研究生, E-mail: 835254141@qq.com

通讯作者:邓志辉 (1962-),男,硕士,副教授, E-mail: dzhwk1007@163.com

收稿日期:2020-11-25

安全具有重要意义。

国内虽然对综合管廊火灾的研究起步较晚,近些年也取得了丰硕的研究成果。李政等研究了防火隔板对电缆舱在火灾时的火势发展及温度分布的影响<sup>[4]</sup>;徐志胜等进行了综合管廊电缆舱在不同起火位置时的人员安全性分析<sup>[5]</sup>;郭雄对综合管廊发生火灾时的烟气逆流长度和临界风速进行了规律性的研究<sup>[6]</sup>。以上研究的综合管廊防火分区长度均不超过200m,但是在某些复杂的路况下,如十字路口、跨江管廊和穿山管廊,地面条件不支持布置风井,这时需要对综合管廊的防火分区进行延长。住建部最新颁布的《城市地下综合管廊建设规划技术导则》也对长距离区间进行了说明。

基于以上分析,本文采用FDS软件对不同防火分区长度的综合管廊电缆舱进行数值模拟,分析其不同敷设方式和不同火源位置发生火灾时的热释放速率,温度分布,火灾蔓延情况,熄灭时间的规律,为综合管廊在实际工程中的火灾防治提供参考。

## 1 火灾模拟参数

### 1.1 FDS原理

本文选用美国国家标准与技术研究院(NIST)开发的FDS来进行数值计算。FDS中的湍流模型一般分为直接数值模拟和大涡模拟,直接数值模拟需要非常精细的网格和庞大的计算机资源,不适用于大型火灾场景,因此本文所选用的湍流模型为最常用的大涡模拟,燃烧模型为混合分数燃烧模型。

在FDS对综合管廊火灾的适用性方面,陈炳元、杜长宝等人分别进行了综合管廊火灾的实体实验,并与数值模拟进行比较,结果表明拟合效果较好<sup>[7,8]</sup>。

### 1.2 物理模型

选取广州市某综合管廊电缆舱为研究对象,如图1所示。设置不同的防火分区长度,分别为200m,300m,400m,断面尺寸为3.2m(宽)×3.6m(高),混凝土厚度为0.3m。按照规范要求,并结合实际工程中的电缆布置情况,在舱室两端安装长为0.75m的支架,层间距为0.4m,支架底部距离管廊为0.3m,顶层电缆支架距顶棚的距离符合转弯半径的要求,通道宽度为1.1m<sup>[9,10]</sup>。

### 1.3 火源设置

按照规范,初始火源功率设为275kW,为使其能引燃更多的电缆,火源设置在中部左侧电缆的底部<sup>[11]</sup>。为符合实际,用电缆中厚度最大的绝缘材料交联聚乙烯(XLPE)作为燃料。根据Clayton Huggett的实验表明,XLPE消耗每单位质量的氧气所释放的热量为13100kJ/kg<sup>[12]</sup>,美国消防工程师协会也给出,XLPE在燃烧时的烟产率平均值为0.12kg/kg,CO产率的平均值为0.11kg/kg<sup>[13]</sup>。

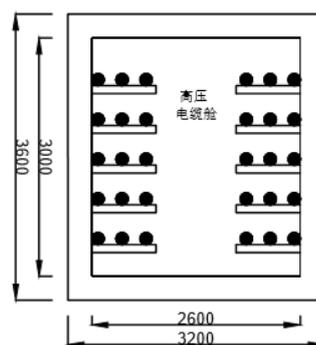


图1 管廊布局

Fig.1 Layout of utility tunnel

### 1.4 网格尺寸

在使用FDS进行火灾数值模拟时,网格尺寸一般通过火源特征直径 $D^*$ 来确定,火源特征直径的公式如下:

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

其中, $Q$ 为火灾热释放速率,kW; $\rho_{\infty}$ 为空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $c_{\infty}$ 为空气比热容, $(\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K})$ ; $T_{\infty}$ 为环境温度,K; $g$ 为重力加速度, $\text{m}/\text{s}^2$ 。

在模拟过程中,网格尺寸越小计算精度越高,但同时会导致计算时间的增加,李政在全尺寸的数值模拟中设置网格尺寸为0.2m<sup>[4]</sup>;王明年在研究选取网格尺寸为0.2m×0.2m×0.1m<sup>[3]</sup>。综合考虑计算机资源以及计算精度,本文在发生火灾区段60m内的网格尺寸为0.1m×0.1m×0.1m,其他区段的网格尺寸为0.2m×0.2m×0.1m。

### 1.5 材料和边界条件设置

王明年和郭雄等人研究发现,电缆在燃烧过程中护套和绝缘层的热释放贡献在90%以上<sup>[3,6]</sup>。110kV高压电缆多为单芯电缆,其绝缘层厚度最大,如图2所示。本文把电缆简化为厚度最大,燃烧热释放量最多的XLPE,密度为920.0kg/m<sup>3</sup>,比

热容为 2.5 (kJ/kg·K)，热导率为 0.48 (W/m·K)。NIST 按照美国核监管委员会的要求进行了名为 CHRISTIFIRE 的大型电缆燃烧项目，得到了不同材料电缆的，本文按照 XLPE 电缆的燃烧试验来选择热释放速率曲线<sup>[14]</sup>。



图2 高压电缆截面

Fig.2 Cross section of high voltage cable

本文考虑无检修人员进入廊内的火灾情况，并按照规范设置了感温火灾探测器，在感温火灾探测器响应之后的 30s 内，联动关闭风口位置的防火阀，使管廊内部形成密闭空间，实现窒息灭火<sup>[9]</sup>。考虑最不利因素，在本文的研究中没有设置自动灭火系统。

## 2 平行敷设方的结果分析

### 2.1 平行敷设方式的电缆火灾发展

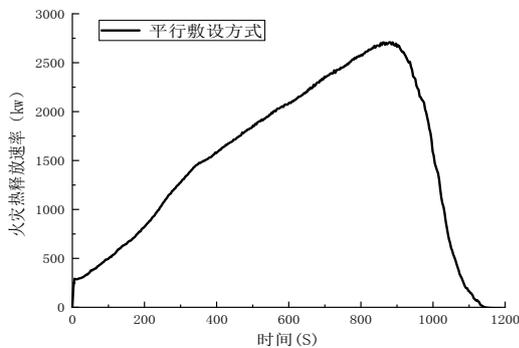


图3 电缆火灾热释放速率

Fig.3 Heat release rate of cable fire

如图 3 所示，密闭的管廊电缆舱的火灾主要分为两个阶段，发展阶段与衰退阶段，其火灾热释放速率峰值达到了 2710kW。为能清晰地看到火灾发展过程，选取火源中间 30m 的区段。如图 4 所示，由于高压单芯电缆的特性，不能紧密排布，火焰在浮力作用下，不断引燃上层电缆，在 200s 时，最顶层电缆被引燃；在这之后火焰持续不断地撞击顶棚，出现了顶棚射流现象，伴随着烟气层温度的升高和热辐射的共同作用下，使得顶层电缆在纵向方

向上被引燃的长度增加，对侧电缆则是由上至下的被点燃，在 879s 时火灾热释放速率达到峰值；此时舱室内的氧气已经不足，火灾逐渐熄灭；在 1146s 时，火灾热释放速率下降到 0，舱室内无明火，火灾已经熄灭。

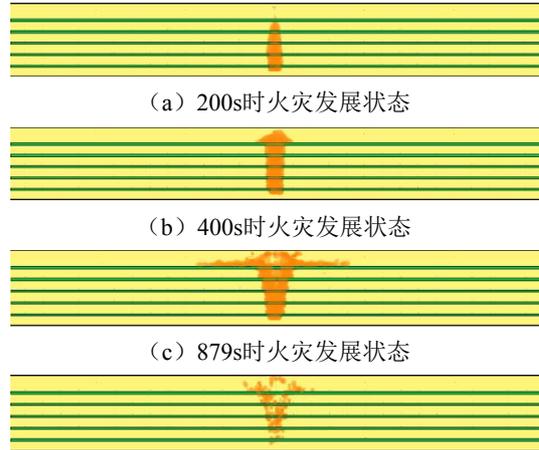
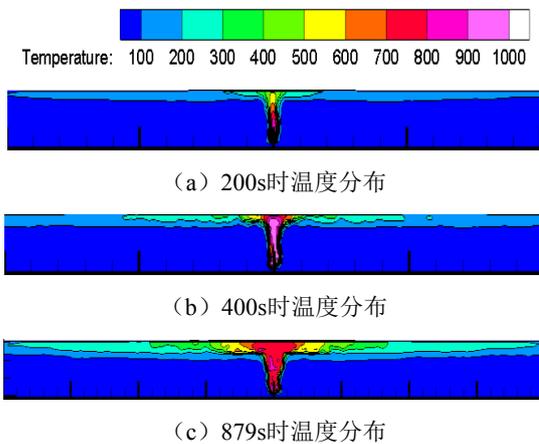


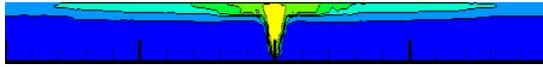
图4 电缆火灾发展过程

Fig.4 Development process of cable fire

当廊内发生火灾时，过高的火场温度不仅会引燃更多的电缆，还会对其他附属设施以及舱室的结构造成一定的破坏，所以有必要对温度分布进行分析，为便于观察，选择火源中区段 40m 处。如图 5 所示，在 200s 时火灾已经形成了 300℃ 以上的高温烟气撞击顶棚并沿着管廊纵向蔓延，此时火焰还没有直接撞击顶棚；随着顶层电缆被引燃数量的增多，在 400s 时，已经形成 800℃ 以上的顶棚射流；在火灾规模最大的 879s 时，虽然火势不断地向两侧蔓延，但由于氧气的消耗，火源中心的温度已经下降；1000s 时，舱室最高温度下降到 600℃ 以下，高温烟气范围也在缩小，在这之后火灾发生熄灭。



(c) 879s时温度分布



(d) 1000s时温度分布

图5 纵向截面温度场

Fig.5 The temperature field of longitudinal section

## 2.2 不同防火分区长度对火灾的影响

如图 6 所示, 由于防火分区长度的改变使得整个舱室内氧气含量增多, 因此造成了火势的进一步扩大。300m 的电缆舱在 1083s 时火灾热释放速率达到峰值, 为 3781kW, 在 1416s 时火灾熄灭; 在 400m 的情况下, 1192s 时火灾热释放速率达到峰值, 为 4640kW, 在 1713s 时火灾熄灭。同时, 当防火分区长度发生改变之后, 火灾热释放速率的增长率也发生了改变, 在电缆被引燃之后的 800s 以内, 其增长率几乎恒定, 为 3.12kW/s, 在 800s~1000s 内, 增长率平均值为 3.99kW/s, 在 1000s~1200s 内, 增长率为 6.55kW/s, 火灾热释放速率的增长率与防火分区长度呈正相关。

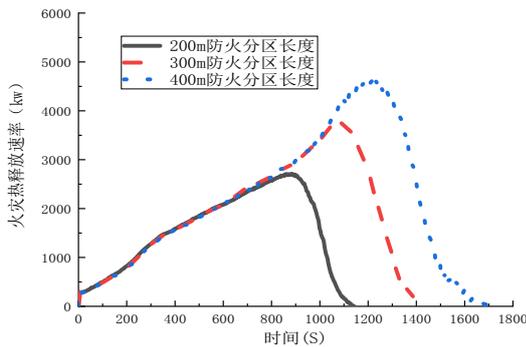


图6 不同防火分区的电缆火灾热释放速率

Fig.6 Heat release rate of cable fire in different compartments

表1 电缆火灾蔓延长度

Table 1 Spread length of cable fire

防火分区长度	200m	300m	400m
最底层电缆	1m	1m	1m
第二层电缆	1.2m	1.2m	1.3m
第三层电缆	1.5m	1.5m	1.7m
第四层电缆	1.8m	2.3m	4m
顶层电缆	9m	12.5m	18.7m
对侧顶层电缆	1.6m	7.3m	11.5m

由表 1 可以看出, 在火焰顶棚射流和高温烟气

的共同作用下, 防火分区长度的改变对顶层电缆影响最大, 其火灾蔓延长度近似等比例增加, 且氧气含量的增多也使得对侧顶层电缆也更多的被引燃, 从而导致火灾热释放速率增长率在 800s 之后的增加。位置越靠近下层影响越小, 底部三层的电缆火灾蔓延长度在不同长度的防火分区下几乎不变。

## 3 品字形敷设方式对火灾的影响

高压电缆在廊内敷设时, 另一种常见的敷设方式为品字形敷设方式。高压电缆多为单芯电缆, 三相电缆呈品字布置时, 在空间上三相电流的矢量和为零, 可以提高电缆的载流量。但是, 品字形敷设方式相较于平行敷设方式, 电缆之间的过度拥挤会使得散热效果变差, 可能会具有更大的火灾危险性<sup>[15]</sup>。

### 3.1 品字形敷设方式的电缆火灾发展

如图 7 所示, 在火灾发展初期, 品字形敷设的电缆排布紧密, 底层电缆燃烧时火焰只能通过两側向上蔓延, 导致品字形敷设的电缆在竖向方向上火焰蔓延速度小于平行敷设方式, 因此初期的火灾热释放速率增长率较小, 在 300s 内的火灾热释放速率的平均增长率为 2.26kW/s。但同样是由于电缆排列紧密, 燃烧时由于热传导和热辐射的影响, 横向电缆火灾蔓延速度较平行布置较快, 随着火势的发展品字形敷设方式的火灾热释放速率增长较快, 在 300s~792s 期间的火灾热释放速率的平均增长率为 5.25kW/s。且在 792s 时达到火灾热释放速率峰值为 3540kW, 由于火势更大, 消耗舱室内的氧气更快, 在 1032s 时火灾热释放速率下降到 0, 火灾熄灭。

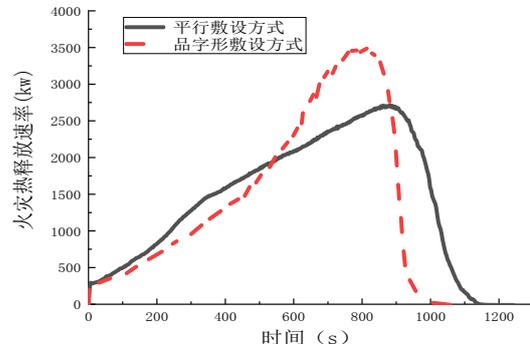


图7 不同敷设方式的电缆火灾热释放速率

Fig.7 Heat release rate of cable fire with different laying methods

### 3.2 不同防火分区长度对火灾的影响

与平行敷设方式相同，当火灾位于中心位置时，更长的防火分区长度导致密闭空间有更多的氧气含量，火灾规模扩大。由图8可以看出，防火分区长度为300m时在1011s到达其火灾热释放速率峰值，为4103kW，在1342s时火灾发生了熄灭；防火分区长度为400m时的电缆舱在1136s到达其火灾热释放速率峰值，为4720kW，熄灭时间为1609s。

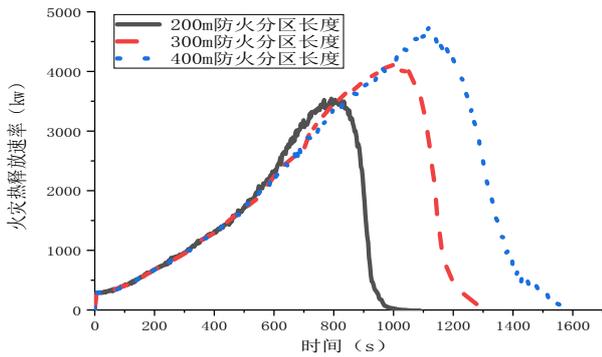


图8 不同防火分区的电缆火灾热释放速率

Fig.8 Heat release rate of cable fire in different compartments

在400m内的防火分区长度，品字形敷设方式的电缆火灾热释放速率峰值始终大于平行敷设方式，但是其差值呈逐渐减小的趋势，分别是830kW，322kW和80kW。出现这种现象是品字形敷设方式的电缆两侧间距较远，引燃对侧电缆更加困难。品字形敷设方式的电缆火灾在防火分区长度为200m和300m时都没有引燃对侧电缆，当防火分区长度为400m时对侧顶层电缆的电缆火灾蔓延长度也没有超过4m，远小于平行敷设方式下的11.5m。

## 4 不同火源位置对火灾的影响

### 4.1 不同火源位置的火灾发展

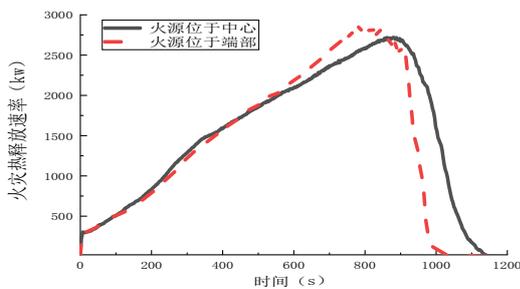


图9 不同位置的电缆火灾热释放速率

Fig.9 Heat release rate of cable fire at different locations

在实际的火灾场景中，火灾可能发生在不同的位置，本节考虑火灾发生在端部，分析其火灾特性。如图9所示，火灾在不同的位置下热释放速率的曲线相差不大，在777s达到其火灾释放速率峰值，为2890kW，在1020s时火灾熄灭。

但是，如图10所示，当火灾发生在端部时，火势并非呈对称发展，且下层火焰向近壁端产生一定的倾角，类似通风速度使得火焰发生倾斜。通过分析，出现这种现象的原因是由于靠近端部的烟气更快地撞击近壁端产生回流，热损失较小，下层电缆的左侧温度高于右侧，形成了压力差。但近壁端氧气含量较少，很快被消耗，所以使得顶层电缆火灾向远壁端蔓延。

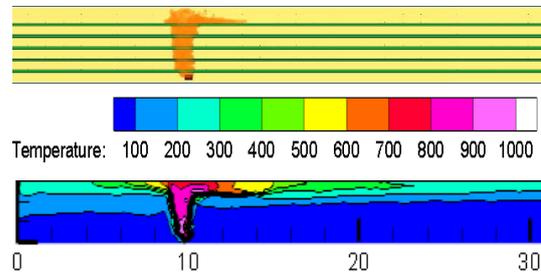


图10 火焰倾斜和温度分布

Fig.10 Flame tilting and temperature distribution

### 4.2 不同防火分区长度对火灾的影响

当防火分区长度改变时，如图11所示，火灾热释放速率曲线几乎相同，说明电缆火灾蔓延范围没有扩大，氧气在更长的防火分区下并没有被完全消耗。考虑到是烟气压迫所导致的火灾熄灭，选择烟气前端120m~200m范围的温度分布来进行观察。

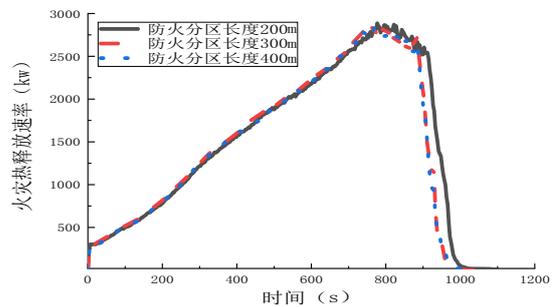


图11 不同防火分区长度的电缆火灾热释放速率

Fig.11 Heat release rate of cable fire in different compartments

选择观察120m~200m的烟气温度分布，如图12所示。在200s时，烟气已经蔓延到120m处。随着火势的扩大，使得管廊内壁被加热，导致热损

失减小。在600s、800s时,可以看出温度分布没有明显的变化,说明在与冷空气的热量交换以及壁面的吸热作用下,烟气前端温度已经下降到环境温度,烟气纵向流动过程很缓慢,无法卷吸更多的远端空气进入火源区段,使得火势逐渐下降;同时因为火源处的温度降低导致烟气前进动量减少,沉降速度加快,火灾发生了熄灭。所以,位于电缆舱端部的火灾发生熄灭并不是由于整个舱室内的氧气不足所致,而是烟气压迫阻碍空气进入所导致,当防火分区长度发生改变时火灾的危害性没有扩大。

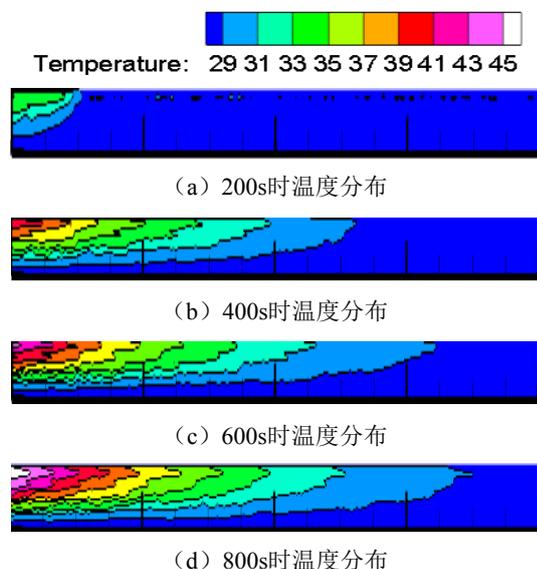


图12 烟气在120m-200m的温度分布

Fig.12 Temperature field of smoke in 120m-200m

## 5 结论

(1) 当火灾发生在电缆舱中部时,火灾发展和温度都呈对称分布,且平行敷设方式的电缆火灾热释放速率的增长率随着防火分区长度的增加而增大。

(2) 品字形敷设方式的电缆火灾规模在400m内始终大于平行敷设方式,但由于平行敷设方式的电缆与对侧电缆的距离较近,使得火灾热释放速率的峰值差距随着防火分区长度的增加而减小。

(3) 当火灾发生在电缆舱端部时,火焰在下层电缆由于两端的温度差形成了一定的火焰倾角,且由于烟气的沉降,防火分区长度的改变并没有扩大电缆火灾的规模,所以在整个综合管廊中更应该注重舱室中部的防火设计。

## 参考文献:

- [1] 邱灏,邓志辉,袁艳平,等.通风形式对综合管廊内空气温度影响的研究[J].制冷与空调,2018,32(06):668-672.
- [2] 李粤川,邓志辉.地下综合管廊运行优化研究[J].制冷与空调,2020,34(5):549-553.
- [3] 王明年,田源,于丽.城市综合管廊电缆火灾数值模拟及影响因素分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(11):52-57.
- [4] 李政,张国维,贾伯岩.综合管廊内防火隔板对电缆火灾蔓延的影响[J].消防科学与技术,2020,39(5):611-614.
- [5] 徐志胜,王蓓蕾,孔杰,等.城市综合管廊火灾特性和人员疏散安全性研究[J].消防科学与技术,2020,39(6):786-789.
- [6] 郭雄.城市综合管廊电缆舱室火灾特性及人员疏散研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [7] 陈炳元,杨永斌,邴震,等.细水雾粒径对地下综合管廊电缆舱灭火效果的影响研究[J].消防科学与技术,2019,38(6):832-836.
- [8] 杜长宝.地下综合管廊电缆火灾温度场分布及烟气流动特性分析[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [9] GB 50838-2015,城市综合管廊工程技术规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [10] GB 50217-2018,电力工程电缆设计标准[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [11] GB 50898-2013,细水雾灭火系统技术规范[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [12] Clayton Huggett. Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements[J]. Fire and Materials, 1980,4(2):61-65.
- [13] M J Hurley, D T Gottuk, J R Hall, et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[M]. 2016.
- [14] Mcgrattan K B, Bareham S D. Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire[R].2013.
- [15] Jorge Curiel-Esparza, Julian Canto-Perello. Indoor atmosphere hazard identification in person entry urban utility tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2005,20(5):426-434.