隧道机器人电缆火灾参数仿真与试验研究

方书博，罗浩，洪骁，郑雷

（国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司，湖北 武汉 430074）

摘　要：隧道电缆火灾参数获取对指导机器人灭火具有重要作用，基于 FDS 流体仿真软件建立了原尺寸不同火情功率等级电缆燃烧仿真模型，计算了不同工况电缆火灾发生后不同时间和空间的温度、烟气浓度和 CO 浓度分布，分析了不同层人工火源功率分别为 150 kW 、 600 kW 和 1.2 MW 时电缆层燃烧的火灾总功率分布，以及 600 kW、 1.2 MW 火源分别置于上、中、下三层时的火灾蔓延速度。建立了多传感器机器人电缆隧道火灾参数监测系统，监测了 10 kV 三芯电缆模拟人工点火后电缆隧道内固定点温度和气体浓度分布。经分析表明，试验检测数据与仿真数据一致性较好。

关键词：电缆火灾参数；火情功率等级；人工火源；火灾总功率；火灾参数监测；气体浓度

Simulation and experimental study on cable fire parameters of tunnel robot

FANG Shubo，LUO Hao，HONG Xiao，ZHENG Lei

（State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Nanrui Co.，Ltd.，　Wuhan 430074，China）

Abstract：The acquisition of tunnel cable fire parameters plays an important role in guiding robot fire extinguishing. Based on FDS fluid simulation software，this paper establishes cable combustion simulation models of original tunnel size in different fire power levels，calculates temperature distribution，smoke concentration and CO concentration in different time and space after cable fire under different working conditions，analyses the total cable fire power distribution when artificial fire power are 150 kW，600 kW and 1.2 MW in different layers and the fire spreading speed when artificial fire power are 600 kW，1.2 MW in different layers. A multi-sensor robot cable tunnel fire parameter monitoring system was established to monitor the temperature and gas concentration distribution at the fixed point of 10 kV three-core cable after artificial ignition. The analysis table shows that the test data are in good agreement with the simulation data.

Key words：tunnel cable fire parameters; fire power levels; artificial fire power; the total cable fire; fire parameter monitoring; gas concentration

0　引言

目前，随着城市化进程的不断加快，城市电网电缆敷设率持续提升，不同电压等级电缆和通信线路共用电缆隧道，造成同一通道密集敷设的情况不断增多。同时高压电缆及通道监测体系尚不完善，均导致了重要电缆通道火灾隐患突出、运维检修不及时及设备状态掌控难等突出问题，始终存在大面积停电的安全风险[1-4]。此外，随着重要电缆通道及其运检数据量呈指数级增长，状态数据离散化、孤岛化严重及作业效率低下的问题进一步加剧，受限

于巡检技术自动化与智能化水平较低，运维人员无法在巡检过程中实时掌握电缆线路运行状态，对重要电缆通道电缆线路状态管控、全寿命周期管理和检修策略的科学制定支撑力度严重缺失，难以支撑电缆线路的精益化运维管控[5-8]。由于电缆隧道是空间较小的狭长结构，两侧分布的电缆支架情况较为复杂，电缆处于不同状态的着火工况引起有害气体、烟雾浓度的空间分布有较大差异，火情危险等级状态也有较大不同。因此，研究分析电缆燃烧后的颗粒物分布对掌握和研判着火位置、火情发展状态和火灾蔓延速度等参数，以及建立火灾预警模型具有重要作用。

国外在20世纪60年代就已开始对电缆隧道进行火灾模拟的研究，美国哈佛大学的埃蒙斯首次提出区域模化理论，即把所研究的空间划分成几个区域，根据对各个分过程的理论与实验数据分析确定这些过程对各区域中典型火灾参数的影响[9-13]，以求得该参数在建筑物内部随时间的变化和分布。美国、日本和俄罗斯在原有研究的基础上建立了多层次火灾应用基础研究机构，促进了火灾研究的进程[14-17]。初期研究用数学建模的方法观察火灾成长和传播过程中的各种现象，将其综合形成较为完整的火灾数学模型，实现输入参数后计算机终端模拟输出结果。近年来，我国在火灾的计算机模拟、试验模拟和材料的热物理测量方面开展了广泛研究，提出了火灾双重性及建筑火灾场区网络模化理论[18-20]，引起了国外火灾学术界的关注和重视。重庆大学刘方等在中庭和大空间火灾烟气流动与控制和报警装置与探测器方面做了系列化研究工作。

为了分析隧道电缆火灾不同燃烧阶段的火灾参数，为火灾预测与发展提供基础数据，本文以实际隧道尺寸建立了火灾仿真模型，计算了三层电缆在不同燃烧阶段的隧道内温度、烟气浓度和CO浓度的时空分布，揭示了隧道电缆火灾发生后的各参数的分布规律，建立了多传感器隧道机器人火灾参数监测系统，以10 kV三芯电缆为例计算了不同燃烧阶段隧道内的温度和气体浓度分布状况，仿真与实测结果具有较好的一致性。

1 电缆隧道火情发展仿真模拟

本文采用流体动力学软件FDS的Proysim模块建立仿真模型，数值求解热力驱动低马赫数流动的N-S方程，计算火灾中热传递和烟气流动过程的瞬态流场，对火灾中烟气的运动、温度和毒气浓度进行预测分析。

建立长度为200 m、横截面宽度为2.3 m、高度为2.3 m的电力单舱，舱室两端设0.6 m电缆线桥架，如图1所示。桥架上敷设10 kV、110 kV和220 kV交联聚乙烯电缆，其碳化分解温度为330 ℃，密度为1 500 kg/m^3，比热容为1.5 kJ·kg^{-1}·K^{-1}，热导率为0.5 W·m^{-1}·K^{-1}，燃烧热为2 500 kJ/kg。在整体模型长、宽和高三个方向上的网格数为2 000、23和23，模拟火灾初期燃烧时间为600 s。

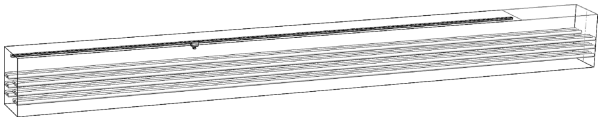


图1 仿真模型结构图

Fig. 1 Structural diagram of simulation model

不考虑火灾的初期准备过程，采用t^2模型描述火灾过程中热释放速率随时间的变化过程模型如下

$$Q = bt^2 \tag{1}$$

式中，Q为火源的热释放速率，kW；b为火灾发展系数，$b = Q_0/t_0^2$，kW/s^2；t_0为火源热释放速率，即Q_0=1 MW时所需的时间，s；t为火灾的发展时间，s。

在管廊内电缆桥架上设置16根电缆，长度与隧道长度相等，截面积取0.3 m×0.3 m和0.2 m×0.2 m两类。机器人测量位置的温度云图切面如图2所示，主要仿真分析电缆处于阴燃状态下、初期着火阶段的燃烧情况。

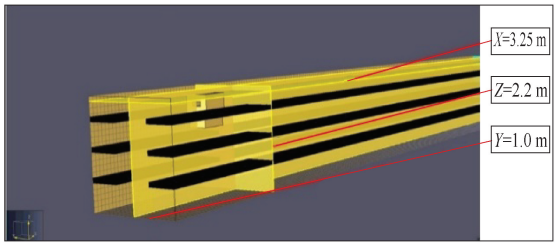


图 2　电缆温度云图取值面

Fig. 2　Value surface of cable temperature cloud map

分别计算电缆在下层、中层和上层燃烧后 50 s、300 s 和 600 s 时对应的温度、烟气浓度和 CO 浓度，仿真得到不同燃烧工况下的温度分布云图如图 3～图 5 所示，烟雾体积分数如图 6～图 8 所示，CO 浓度如图 9～图 11 所示。

（1）温度分析

由图 3～图 5 可知，电缆燃烧过程中生成的热量随着烟气流动向周围环境中传播，使周围环境温度上升，每层电缆燃烧后火焰中心最高处温度随着燃烧时间的增加而升高，不同层火焰温度最大值位于最高位置处。由于中上层电缆处于来自下部火焰中温度较高的外焰部分，火灾蔓延速度明显快于底部电缆，更接近烟气层的结果。

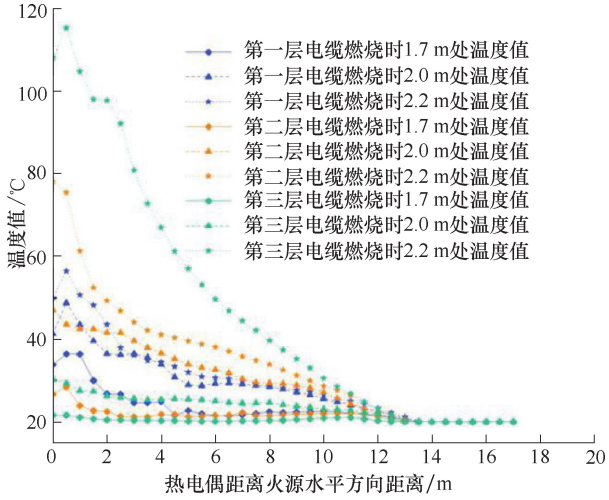


图 3　不同工况下测量点的温度采样值（t=50 s）

Fig. 3　Temperature sampling value of measuring point under different working conditions（t=50 s）

50 s 时由于火源温度在 120～170 ℃之间，没有达到电缆的着火点不足以点燃电缆束，火焰温度最大值位于最高层电缆处；90～120 s 时随着热量进一步积累，高温区域逐渐累积向上层电缆和四周蔓延，燃烧 600 s 时温度达到 280 ℃，电缆护套阻燃材料开始引燃，上层电缆燃烧，导致温度进一步升高且热传导加速。

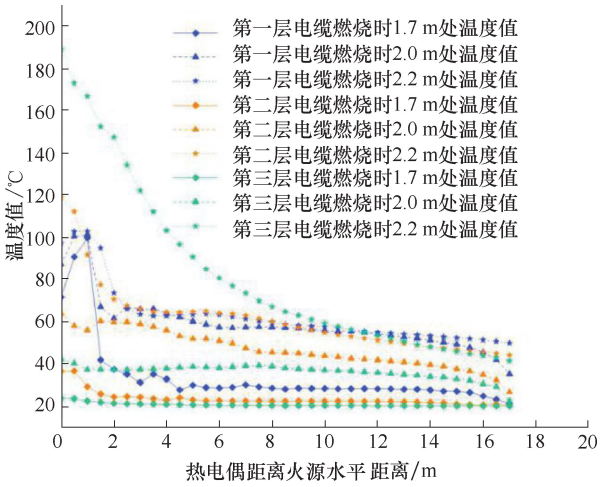


图 4　不同工况下测量点的温度采样值（t=300 s）

Fig. 4　Temperature sampling value of measuring point under different working conditions（t=300 s）

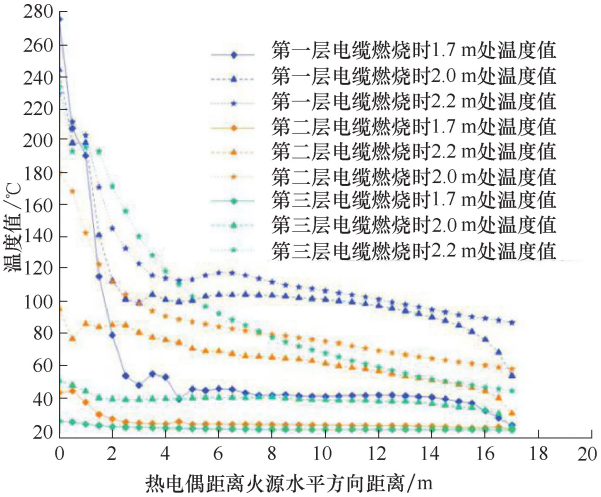


图 5　不同工况下测量点的温度采样值（t=600 s）

Fig. 5　Temperature sampling value of measuring point under different working conditions（t=600 s）

（2）烟气浓度分析

由图 6～图 8 可知，电缆在不同层受热阴燃造成电缆材料裂解形成烟气逸出，烟气先到达电缆隧道顶部，逐渐占满整个隧道顶棚，电缆引燃范围扩大后，电缆盒内烟气浓度增大，整个电缆隧道上层充满烟气。随着时间推移，

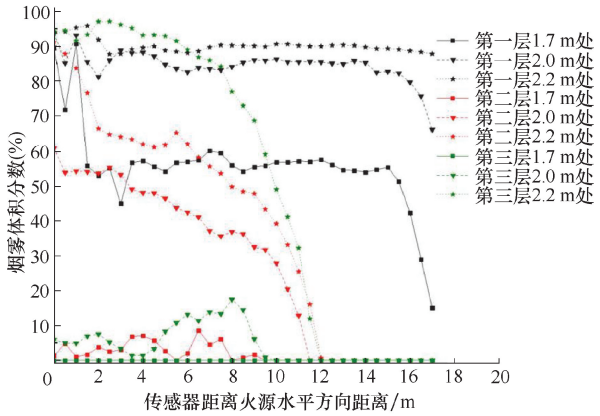


图 6　不同工况下烟气分布图（t=50 s）

Fig. 6　Flue gas distribution map under different working conditions（t=50 s）

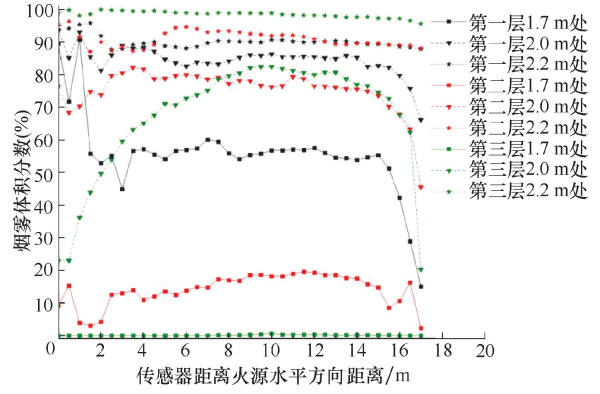


图 7　不同工况下烟气分布图（t=300 s）

Fig. 7　Flue gas distribution map under different working conditions（t=300 s）

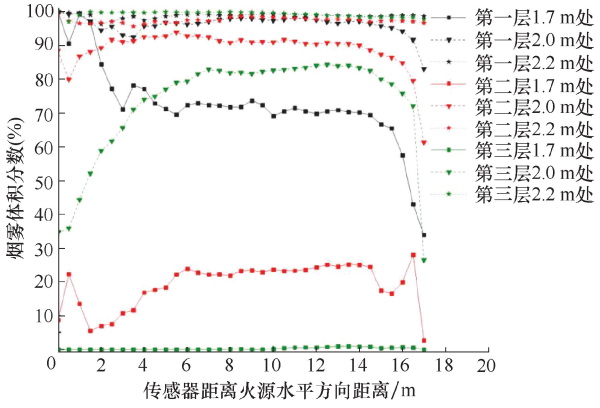


图 8　不同工况下烟气分布图（t=600 s）

Fig. 8　Flue gas distribution map under different working conditions（t=600 s）

烟气向两端更远处扩散。燃烧 50 s 时，烟气未完全扩散到另一端，燃烧 300 s 时，烟气已经完全扩散到了另一端且有足够高的浓度。燃烧 600 s 时，烟气已占据整个隧道，距燃烧点 17 m 处 1.7 m 的高度烟雾体积分数达到 35%。

（3）CO 浓度分析

由图 9～图 11 可知，在电缆完全燃烧时产生的 CO 较少，而在阴燃时浓度较高。第一层电缆燃烧时，受温度和密度的影响，垂直方向监测点为 2.2 m 处的 CO 浓度最大，即 CO 主要分布在燃烧位置的最上层；水平方向从火源中心到外侧 2.5 m 处，CO 浓度呈指数规律衰减，后逐渐趋于稳定，至 16 m 外衰减完毕。随着电缆燃烧层数的增加，CO 逐渐向最高层分布。对比不同层的电缆燃烧情况，最上层的电缆燃烧在最高点得到的 CO 浓度最大。随着

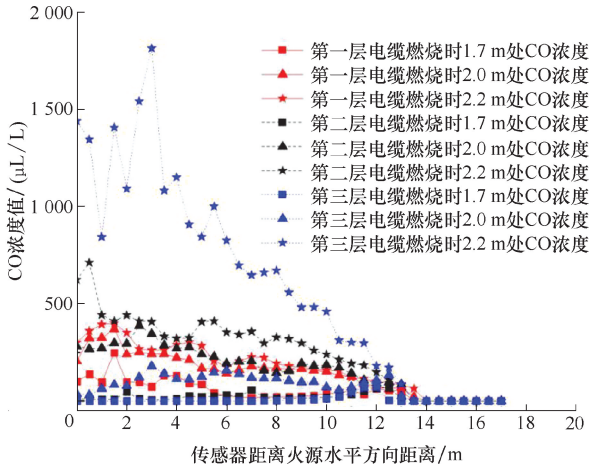


图 9　不同工况下 CO 浓度（t=50 s）

Fig. 9　CO concentration under different conditions（t=50 s）

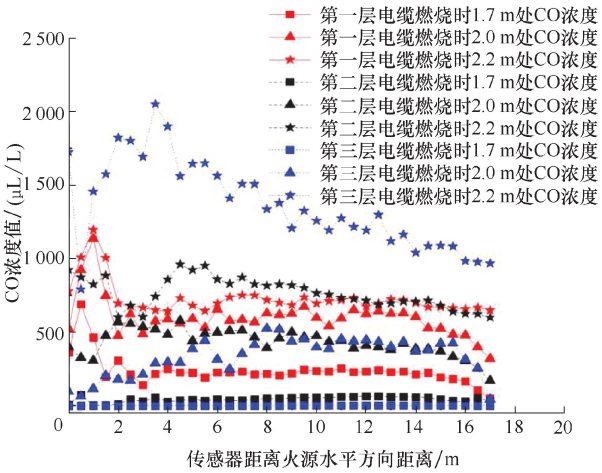


图 10　不同工况下 CO 浓度（t=300 s）

Fig. 10　CO concentration under different conditions（t=300 s）

燃烧时间的增加，同一层相同位点 CO 浓度逐渐增大。

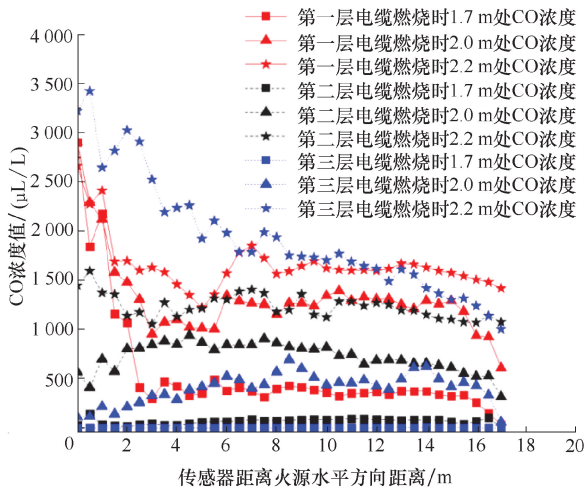


图 11　不同工况下 CO 浓度（t=600 s）

Fig. 11　CO concentration under different conditions（t=600 s）

（4）电缆隧道火灾蔓延规律分析

分别将 150 kW、600 kW 和 1.2 MW 功率的火源置于第一、二和三层进行引燃仿真实验。对计算时间 1 200 s 过程中的电缆隧道火灾总功率进行监测，不同工况下的火灾总功率如图 12~图 14 所示。

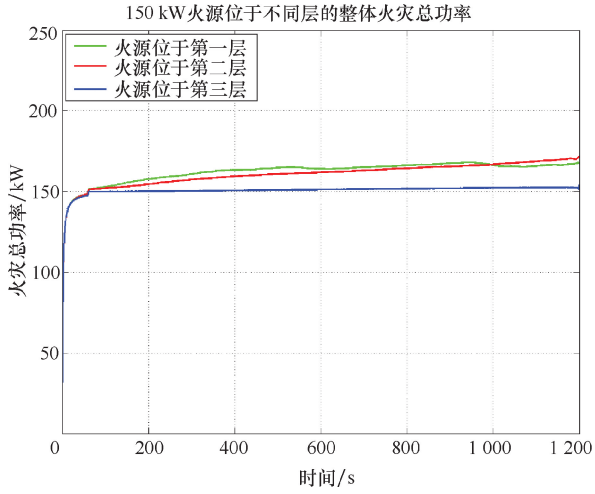


图 12　150 kW 火源分别位于不同电缆层燃烧的火灾总功率

Fig. 12　Total fire power of 150 kW fire sources burning in different cable layers

由各个工况的火灾总功率曲线可知，当火源大小为 150 kW 时，火源未能使电缆迅速引

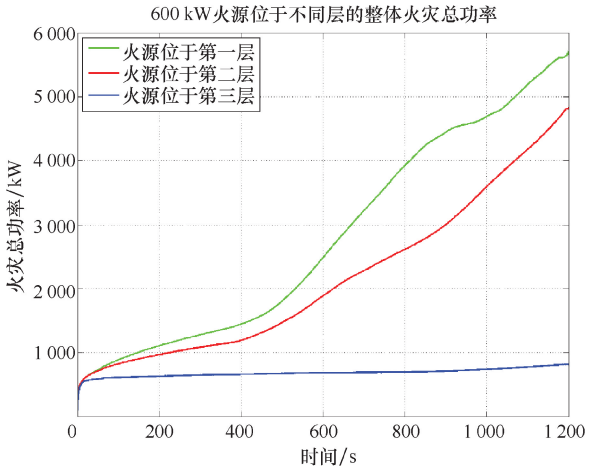


图 13　600 kW 火源分别位于不同电缆层燃烧的火灾总功率

Fig. 13　Total fire power of 600 kW fire sources burning in different cable layers

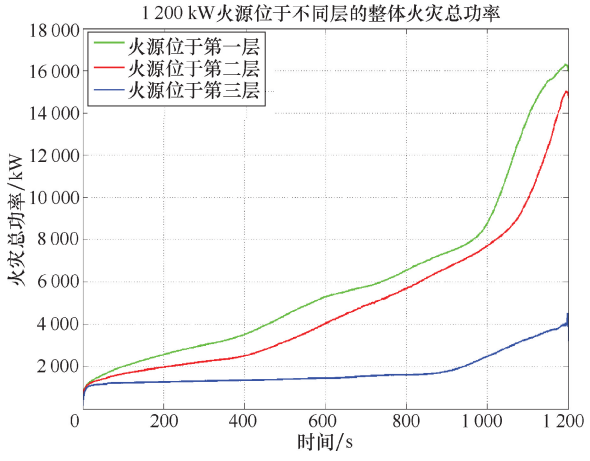


图 14　1 200 kW 火源分别位于不同电缆层燃烧的火灾总功率

Fig. 14　Total fire power of 1 200 kW fire sources burning in different cable layers

燃和蔓延。当火源位于第一、二层时，两种工况下电缆燃烧的火灾总功率相差不大，总体大小超过 175 kW；当火源位于第三层电缆引燃时，在整个发展过程中，火源总功率一直维持在火源功率大小 150 kW。而造成前者火灾总功率大于后者的原因则是火焰受热气流升力作用的影响，在火源置于下层或中层电缆时，外焰的高温会引燃桥架上方的电缆，造成总功率增大。当火源功率大小为 600 kW 与 1.2 MW 时，均能达到引燃电缆的温度。火源位于最底层电缆时，火灾总功率均最大。火源功率为 600 kW 时，电缆燃烧总功率最终可达到最大

值5 700 kW左右，火焰蔓延总体呈“V”字形扩散，火源上方电缆均被点燃并发生火灾蔓延。

不同工况下火灾蔓延速度曲线如图15所示。当火源功率大小为600 kW，分别在上、中和下三层引燃电缆时，火焰蔓延速度变化范围在0~0.05 m/s之间；当火源功率为1 200 kW，分别三层电缆引燃时，火焰蔓延速度最快可达0.05~0.25 m/s。即火源功率越大，蔓延速度越快，同时火源位置越低，有效蔓延范围越大，蔓延速度越快。因此，最底层电缆起火后，最上层电缆的火灾蔓延速度可以作为该功率大小火源的最严重火情发展速度。

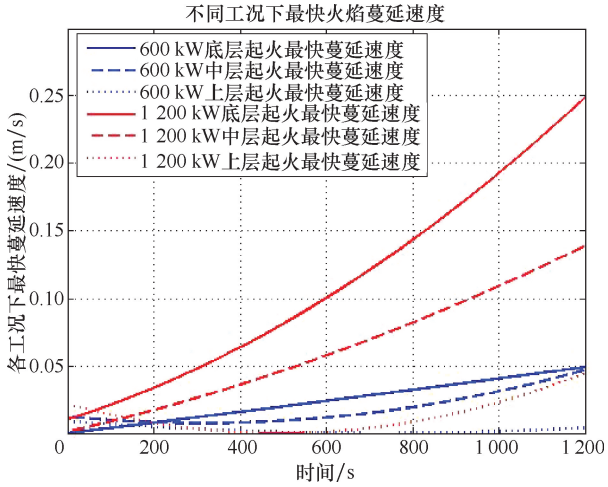


图15　不同工况下火灾蔓延速度曲线

Fig. 15　Fire spread velocity curve under different conditions

综合分析可知，火源在第一层的情况下，火灾燃烧面积最大，火情发展最严重。当火焰发展至靠近隧道顶棚时，气体热流均聚集上方，达到一定程度后产生轰燃现象，第三层迅速蔓延，燃烧速率远远大于下两层。火源位于第二层时火灾总功率大小较第一层小，火源位于第三层电缆时火灾总功率最小，且只有一层电缆引燃，故电缆燃烧总功率远小于火源在第一、二层引燃时的情况。

2　电缆隧道机器人火灾参数监测系统搭建

轨道式巡检机器人监测系统包括模拟机器人壳体、温度传感器、烟雾浓度传感器、电缆火灾对应的有害气体传感器以及无线数据传输单元，如图16所示。机器人壳体与轨道通过可伸缩连杆连接调节机器人悬挂高度，无线数据传输单元将测量数据传给数据采集系统。

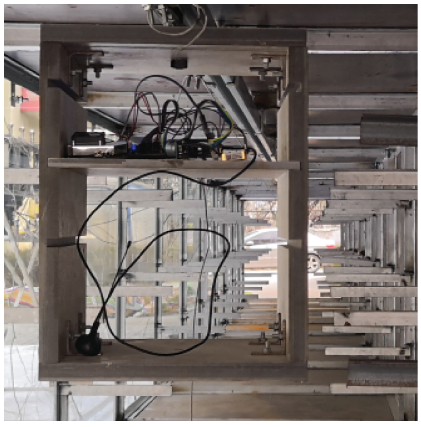


图16　巡检机器人监测和无线传输系统

Fig. 16　Patrol robot monitoring and wireless transmission system

在轨道上设置定点监测系统，根据试验确定布置数量和间隔距离，包括热电偶阵列和烟雾浓度传感器阵列，测量数据与巡检机器人检测数据进行对比。通过电缆隧道火灾试验所测得数据与仿真软件建模所计算的数据进行对比分析，验证地下综合管廊电力舱火灾预警模型所得数据的吻合性，为地下综合管廊消防设计和火灾防护提供参考。

本文对10 kW火源功率下的电缆绝缘层进行燃烧试验测试，采用10 kV三芯电缆作为试验电缆，将试验隧道主体、机器人和轨道系统安装好，并将电缆、热电偶和数据采集仪等布置完毕。将丙烷气体燃罐喷气嘴对准电缆底部，使用无线点火装置点燃电缆，电缆燃烧情况如图17所示。燃烧开始后数据采集系统对定点温度数据与气体数据同时采集并实时记录，如图18所示，电缆燃烧产生的烟气值达到一定阈值时起动电动机，机器人记录气体含量数值。

燃烧器燃烧60 s后关闭流量控制阀，电缆护套自燃，可以观察到电缆护套燃烧部分开始脱落。由于护套内含有阻燃成分，电缆护套自

身的燃烧不足以支持其蔓延，10 s 后即熄灭，电缆熄灭后 60 s 停止试验，待隧道主体环境达到正常后进行下一次试验。

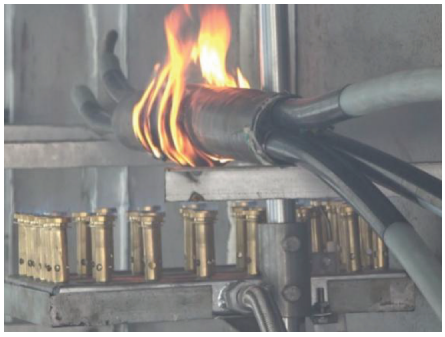


图 17　燃烧器点燃电缆护套

Fig. 17　Burner ignites cable sheath

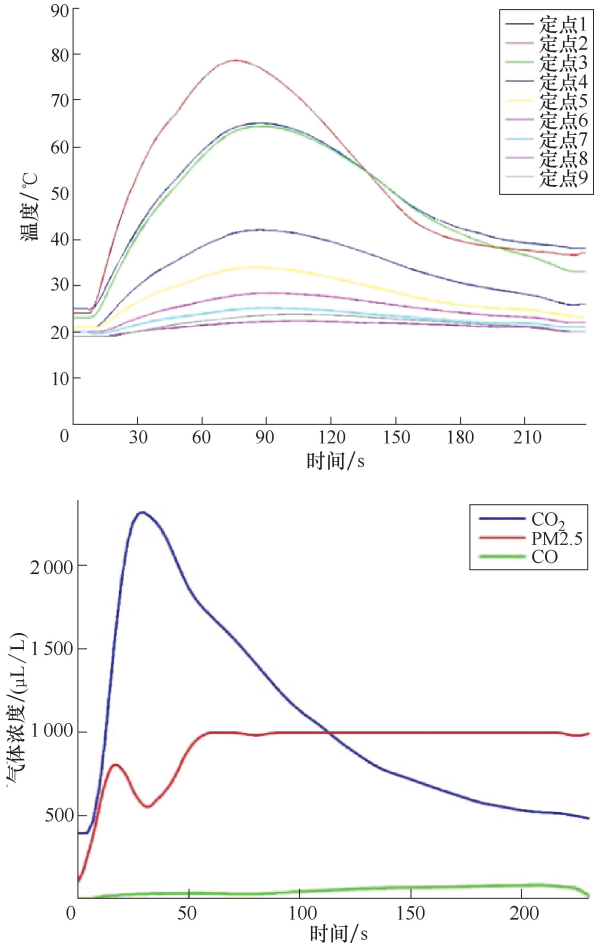


图 18　定点测温和气体浓度数据

Fig. 18　Fixed-point temperature and gas concentration data

建立 FDS 仿真模型，如图 19 所示，设置与试验相同位置的温度传感器、CO 传感器和烟雾传感器，火源功率 10 kW，仿真开始后 60 s 关闭火源。

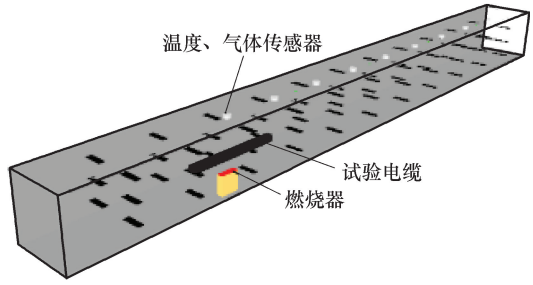
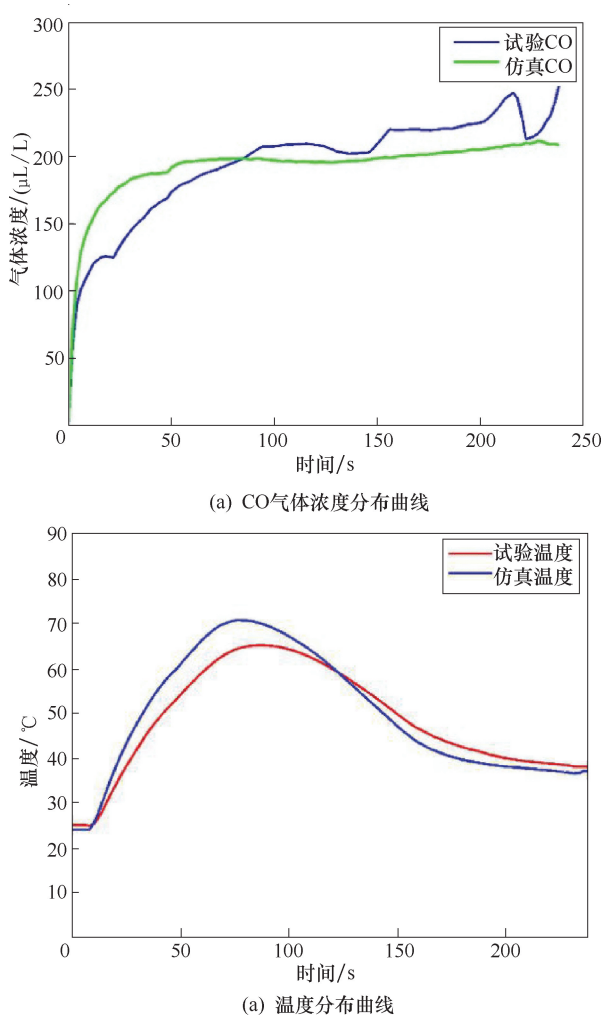


图 19　仿真模型图

Fig. 19　Simulation model diagram

将距离试验区域最近的传感器所采集的数据与仿真得到的数据进行分析，温度、CO 气体浓度数据如图 20 所示。



(a) CO气体浓度分布曲线

(a) 温度分布曲线

图 20　试验与仿真的温度、 CO 分布曲线

Fig. 20　Temperature and CO distribution curves of experiments and simulations

由图 20 可知，仿真计算的 CO 浓度曲线较试验燃烧产生 CO 浓度曲线变化更快，在 50 s 后达到 200×10^{-6} 并保持稳定，而试验中 CO 浓度会受到环境的影响不断变化，燃烧至 100 s 后受到试验场地风速影响，CO 浓度在 $200\times10^{-6}\sim250\times10^{-6}$ 范围内波动；仿真中温度曲线也由于实际的气相反应，产生的热量更快，导致温度曲线上升快、峰值高，仿真持续燃烧时间比试验短，温度下降更为明显。总体上，试验与仿真数据的曲线趋势较为一致，吻合较好，仿真结果具有一定的可靠性。

3 结束语

本文采用 FDS 仿真软件模拟计算了电缆隧道三层不同高度的电缆在火灾发生后不同时间和空间的温度、CO 浓度和烟气浓度分布状况，分析了不同火源功率对不同层电缆引燃后隧道火灾总功率和火灾蔓延速度分布，主要结论如下：

1）电缆处于阴燃状态下时，随着燃烧时间的增加散发的热量逐步积累，高温区逐渐向上层和四周蔓延。50 s 时火源温度达到 120～170 ℃，电缆束未达到燃点，600 s 时温度达到 280 ℃，电缆护套开始引燃，温度升高、热传导加速。

2）电缆在不同层受热阴燃逸出的烟气先到达电缆隧道顶部，随着燃烧时间的增加，烟气逐渐向另一端扩散且浓度逐渐增大。燃烧 600 s 时，距燃烧点 17 m 处 1.7 m 的高度烟雾体积分数达到 35%。

3）电缆阴燃状态下，CO 浓度较燃烧状态下高。水平方向从火源中心到外侧 2.5 m 处，CO 浓度呈指数规律衰减，后逐渐趋于稳定，至 16 m 外衰减完毕。随着电缆燃烧层数的增加，CO 逐渐向最高层分布，最上层的电缆燃烧在最高点得到的 CO 浓度最大。

4）当火源位于最底层电缆时，火灾总功率均最大。火源功率为 600 kW 时，电缆燃烧总功率最终可达到最大值 5 700 kW 左右，火焰蔓延总体呈“V”字形扩散，火源上方电缆均被点燃并发生火灾蔓延。

5）计算的 CO 浓度曲线较试验燃烧产生 CO 浓度曲线变化更快，在 50 s 后达到 200×10^{-6} 并保持稳定；仿真中温度曲线由于气相反应产生的热量更快，导致温度曲线上升快、峰值高，仿真持续燃烧时间比试验短。试验与仿真数据的曲线趋势较为一致。**EA**

参 考 文 献

[1] 傅璇，谢淑翔，等. 地下综合管廊电缆火灾烟气流场与浓度场规律研究［J］. 轻工科技，2019（3）：187-188.

[2] 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（3）：14-19.

[3] 刘钟薇. 管廊电缆火灾 CO 浓度分布规律研究［J］. 现代商贸工业，2017（12）：187-188.

[4] 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］. 北京：中国矿业大学，2017.

[5] 王明年，田源，于丽，等. 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）：53-57.

[6] ANTONIO CRESPO. A simplified preflashover zone model of a fire in a single room［J］. Fire Safety Science，1989（2）：463-470.

[7] 张小翌，王德明，等. 煤矿硐室电缆火灾数值模拟［J］. 工矿自动化，2019，45（3）：53-55.

[8] 赵云龙，王飞，刘红威，等. 矿井机电硐室火灾的 FDS 模拟与分析［J］. 煤矿安全，2018，49（12）：181-184.

[9] 周彪，江记记，白亚楠. 基于 FDS 的 T 型电缆隧道火灾探究［J］. 火灾科学，2008，13（9）：93-96.

[10] 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.

[11] 李宛鸿，胡洋，朱锴，等. 矿井火灾和冲击波传播特性数值模拟及实验研究［J］. 煤炭技术，2017，36（11）：211-213.
[12] 文虎，张铎，郑学召. 煤矿平巷火灾数值模拟及其特征参数研究［J］. 煤炭科学技术，2017，45（4）：62-67.
[13] 吴凤，鲁昆仑，肖旸. 地铁隧道电缆火灾烟气流动规律数值模拟研究［J］. 建筑防火设计，2015，34（7）：863-865.
[14] RMEINIE R，SONNIER R，ZAVALETA P，et al. Fire behavior of halogen-free flame retardant electrical cables with the cone calorimeter［J］. Journal of Hazardous Materials，2017，342：306-316.
[15] 李文婷. 综合管沟电缆火灾数值模拟研究［D］. 北京：首都经济贸易大学，2012.
[16] 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.
[17] 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.
[18] ZAVALETA P，AUDOUIN L. Cable tray fire tests in a confined and mechanically ventilated facility［J］. Fire and Materials，2017，42（12）：28-43.
[19] 李博. 多出入口城市公路隧道烟流控制及人员疏散模式研究［D］. 成都：西南交通大学，2017.
[20] 申婷. 地铁隧道电线电缆火灾危险性研究［D］. 北京：首都经济贸易大学，2018.

作者简介

方书博

方书博（1985—），男，硕士，高级工程师，目前从事高电压绝缘、输电线路运维、电力线路及隧道机器人研发工作。

（收稿日期：2020-01-25）