

电缆接地故障火灾数值模拟研究

唐鹏宇,裴山山,彭雨,唐滔,王金皇,陈锴

(国网四川省电力公司宜宾供电公司,四川 宜宾 644000)

摘要:由于城市地下电缆空间狭长,防范电力电缆隧道火灾威胁城市电网安全意义重大。针对配电网同沟混合敷设的情况下电缆故障起火并引发电网故障,运用火灾动力学模拟工具,探究了电缆隧道狭长受限空间中电缆绝缘层内热源燃烧的火灾动态演变特性。研究结果对预防电缆隧道火灾以及防止火情扩散,保护人民群众的生命财产安全都具有重要的实际意义。

关键词:电缆隧道; FDS 火灾仿真; 温度分布; 烟气蔓延

中图分类号: TM 855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)06-0086-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240613

Numerical Simulation Study of Fire in Cable Grounding Fault

TANG Pengyu, PEI Shanshan, PENG Yu, TANG Tao, WANG Jinhuang, CHEN Kai

(State Grid Yibin Electric Power Supply Company, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: Due to the narrow and elongated space of urban underground cable, preventing fires in power cable tunnels is of great importance for ensuring the safety of urban power grids. In response to the scenario where a cable fault in a mixed-laying configuration within the same trench leads to a fire and triggers grid failure, fire dynamics simulation tools are employed to investigate the dynamic evolution characteristics of fires caused by the combustion of heat sources within the cable insulation layer in the constrained space of cable tunnels. The results has important practical significance for preventing fires in cable tunnels, controlling fire spread and protecting the safety of people's lives and property.

Key words: cable tunnel; FDS fire simulation; temperature distribution; smoke spread

0 引言

中国城市的电力设施正在向地下空间大规模聚集发展,电缆也逐步进入地下空间^[1-2]。但由于电缆隧道空间封闭狭长,普遍通风不畅,导致其发生故障时易发展成为火灾。电缆火灾产生的烟气以及不易扩散的高温环境也给火场人员逃生以及后续抢修重建工作带来了不便。为预防电缆隧道火灾以及防止火情扩散,亟需对隧道火灾发展进行研究。目前国内外学者针对综合隧道内的电缆火灾开展了广泛的研究:

在火灾动态数值模拟方面,文献[3]依照实际

电缆管道进行局部建模,探究了电缆管道发生火灾时内部温度的变化与烟气的蔓延特性;文献[4]使用蒙特卡罗技术和火灾动力学模拟器(fire dynamics simulator, FDS)作为确定性火灾模型进行概率模拟,分析了多种电缆隧道的火灾演变特性;文献[5]通过构建建筑物模型实现了对电缆起火及烟气扩散过程的分析,揭示了电力电缆的火灾特性规律。

在隧道温度场变化方面,文献[6]研究了电缆隧道火灾温度场随火灾荷载的变化规律,得到隧道火灾温度状态的全因子实验结果;文献[7]讨论了模型的修改对电缆桥架燃烧面积和局部火灾持续时间的影响;文献[8]对综合隧道电缆火灾发展过程进行了研究,分析了防火分区间距对电缆火灾的影响;文献[9]则通过缩尺寸实验的方式研究了综合隧道内线性火源的燃烧特性,揭示了火源尺寸和功

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目“电缆接地故障火灾演变及防护研究”(521911230002)

率对空间温度场的影响。

在烟气分布方面,文献[10]计算了火灾中烟气、温度、热传递等过程参数,并分析了烟气运动,为现实灭火救援提供指导;文献[11]研究了氧气变化及烟气蔓延,提出了综合管廊电力舱火灾进行的4个阶段为初期引燃、发展扩散、猛烈燃烧、燃烧衰减;文献[12]则分别通过实验和数值模拟的方法研究了不同条件下的电缆火灾发生发展过程,得到了隧道烟气扩散及一氧化碳浓度分布等情况。

以上文献对电缆隧道火灾蔓延进行了一定研究,但缺乏针对配电电缆同沟混合敷设下火势变化的研究。下面基于交联聚乙烯电缆基本结构及材料进行建模,采用故障区域产热的处理方式,得到电缆故障过程的单位面积热释放速率,并对典型的电缆隧道进行火灾动态仿真,最大程度地对电缆火灾场景进行研究拓展,分析在自然通风条件下火灾发生及蔓延时火场的热释放速率以及烟气蔓延情况。

1 仿真模型建立

1.1 电缆部分模型构建

根据 GB/T 12706.2—2020《额定电压 1 kV ($U_m=1.2$ kV)到 35 kV ($U_m=40.5$ kV)挤包绝缘电力电缆及附件 第2部分:额定电压 6 kV ($U_m=7.2$ kV)到 30 kV ($U_m=36$ kV)电缆》^[13],采用 10 kV 和 110 kV 长度为 10 m 的电缆堆叠仿真,电缆芯材料均为无氧铜,绝缘层材料均为交联聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE),护套层材料均为聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC),其他仿真参数如表 1 所示。10 kV 和 110 kV 电缆仿真模型如图 1 和图 2 所示。

表 1 电缆仿真参数

电压等级/ kV	缆芯截面积/ mm^2	绝缘层厚度/ mm	护套层厚度/ mm
10	400	3.8	4.5
110	800	4.5	5.0

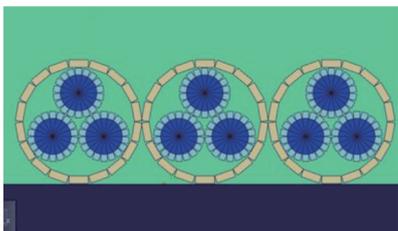


图 1 10 kV 电缆模型

实际电力工程中不同电压等级电缆的堆叠方式不尽相同,其中 110 kV 电缆的堆叠方式为交错堆叠,而 10 kV 电缆的堆叠方式为并列堆叠,如图 1、图 2 中所示。

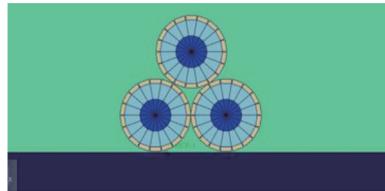


图 2 110 kV 电缆模型

1.2 电缆隧道模型构建

建立宽度、高度、深度尺寸为 2.5 m×2.9 m×10 m 的电缆隧道,隧道首末两端未封闭,呈自然通风状态,如图 3 所示。

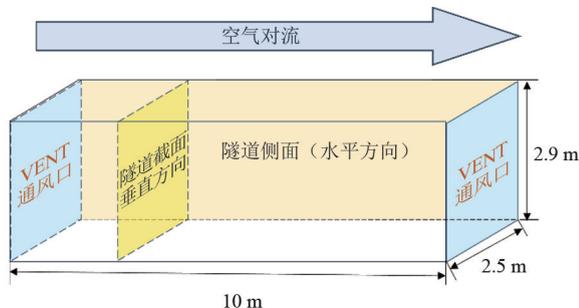


图 3 隧道整体模型

隧道内部左右两侧共分布有 14 层支架,支架高度为 0.1 m。其中,隧道顶部 2 层为通信光纤支架,其余 12 层为电力电缆支架。左侧电力电缆支架编号由上至下分别为 THCP-01、THCP-02、THCP-4(故障电缆所在支架层)、THCP-03、THCP-04、THCP-05,右侧电力电缆支架编号分别为 THCP-06、THCP-07、THCP-08、THCP-09、THCP-10、THCP-11。110 kV 电缆支架上下间距为 0.5 m,10 kV 电缆支架上下间距为 0.4 m。电缆隧道垂直截面布局如图 4 所示。

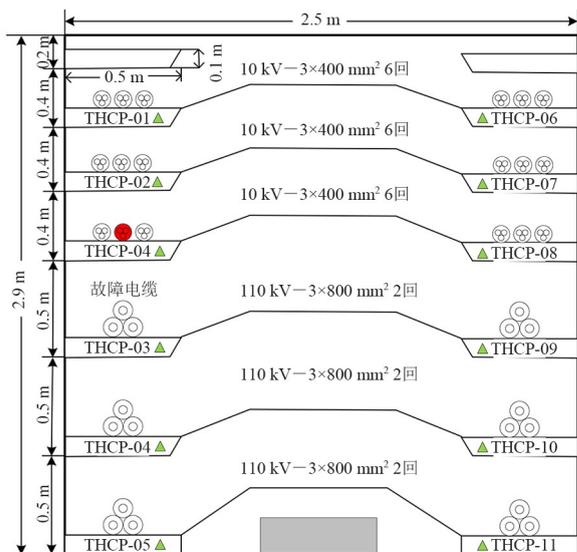
为更好地探究火场温度及烟雾颗粒随时间变化在隧道截面的上下分布情况,将故障电缆设置在截面中部 THCP-4 支架上的 10 kV 单相电缆,由红色标记。

整个电缆沟道仿真模型的垂直截面 2D 视图如图 5 所示。

1.3 计算参数设置

配电网电缆单相接地故障是电力系统中比较常见的故障之一,主要由电缆绝缘损坏、设备老化、外部损伤等原因引起。在仿真软件中通过指定故障电缆并加入内部热源的形式,来模拟电缆单相接地故

障引发的火灾。



▲: 热电偶 (Thermocouple, 用于温度测量)

图 4 电缆隧道垂直截面布局

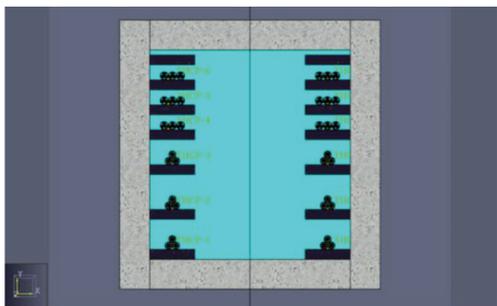


图 5 电缆隧道 2D 模型视图

如图 3 所示,隧道首尾两端均设置有通风口,默认空气流速通常由 FDS 根据模型尺寸、通风口的位置和大小等因素自动计算或设置。此外,与材质对应,在仿真平台中新建钢铁 (STEEL)、燃烧器 (BURNER)、无氧铜 (OFC) 和混凝土 (CONCRETE) 等材料。以新建聚氯乙烯 (PVC) 表面为例,由于 PVC 为可燃材料,则将表面类型定义为“分层”,与此相对,STEEL、OFC 等不可燃材料表面类型为“分层”;CONCRETE 表面类型定义为“绝热”。

火源初始热释放速率^[14]设置为 265 kW/m²,火源位置设置在图 4 故障电缆离隧道首端 1.375 m 处,其中燃烧物质 XLPE 和 PVC 的辐射率设置为 0.9,吸收系数^[15]设置为 0.05 m⁻¹。

为探究隧道故障侧温度变化,在隧道左侧各层电力电缆支架处设置热电偶,见图 4 中绿色三角标记。热电偶是常用的测温元件,它直接测量温度,并把温度信号转换成热电动势信号,通过二次仪表显示被测介质的温度。

2 火灾动态演变分析

2.1 火场温度分析

FDS 是火灾模拟领域应用最广泛的软件,通过求解受火灾浮力驱动的低马赫数流动的 N-S 方程,得到空间温度、材料热释放速率、燃烧产物等相关仿真结果。FDS 计算按照的质量守恒、牛顿第二定律、热力学第一定律可用式(1)~式(3)表示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为环境气体密度,kg/m³; \mathbf{u} 为流体的速度矢量,包含 3 个方向的分量,m/s; t 为模拟时间。

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ji} \quad (2)$$

式中: \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{f} 为流体单位体积所受的体积力矢量; $\boldsymbol{\tau}_{ji}$ 为牛顿流体黏性应力张量 $j \times i$ 阶矩阵; p 为流体压强。

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{dp}{dt} + \dot{q} - \nabla \cdot \mathbf{q}' + \varphi \quad (3)$$

式中: $\frac{\partial (\rho h)}{\partial t}$ 为单位体积空间上流体的总能量随时间的变化率; $\nabla \cdot (\rho h \mathbf{u})$ 为由运输造成的流出单位体积空间的总能量的净流量; \dot{q} 为单位体积的热释放速率,表示单位时间内材料燃烧所释放的热量,W/m³; \mathbf{q}' 为热通量矢量,表示单位时间通过单位面积的热能,W/m²; $\nabla \cdot \mathbf{q}'$ 为净流入单位体积流体的热流量; φ 为耗散函数,表示流体的内热源在单位时间单位体积的热量产生率。

理想气体状态方程为

$$P = \frac{\rho R T}{\bar{W}} \quad (4)$$

式中: P 为气体压强; R 为理想气体常数,取 8.314 J/(mol·K); T 为气体温度; \bar{W} 为气体混合物相对分子质量。

除了以上几个基本控制方程外,FDS 计算过程中还包含湍流流动模型、燃烧模型和辐射传输模型等,通过对这些模型方程求解,可得到温度、压力、气体浓度等参数的空间分布。Smagorinsky 亚格子模型是 FDS 常采用的模型,能够处理湍流和浮力的相互作用,根据 Smagorinsky 亚格子模型,流体动力黏性系数表示为

$$\mu_{LES} = \rho (C_s \Delta)^2 \cdot$$

$$\left[\frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} (\nabla \mathbf{u})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中, $\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}}$

式中: C_s 为 Smagorinsky 固定经验常数; \mathbf{u}^T 为 \mathbf{u} 的转置; x, y, z 分别为模型中 3 个方向。

当电缆发生接地故障时, 线路中将产生极大的接地电流, 因此电缆内部温度将急剧上升。当温度升高到一定水平后绝缘层材料将发生热解现象, 产生的热解气体将在更外层护套的阻碍下逐渐积聚在电缆内部, 当护套热解完毕时才会流通至外部空间, 继而相邻电缆也会发生与故障电缆相似的热解过程, 从而扩大电缆隧道火灾的规模。

在自然通风条件下, 设定运行时间为 1800 s, 进行 FDS 仿真, 左侧支架热电偶测得的温度变化曲线如图 6 所示。

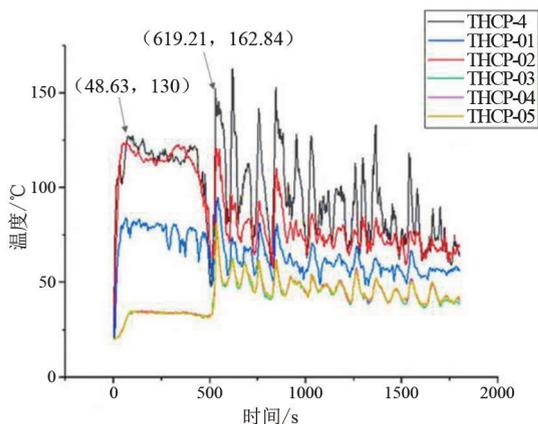


图 6 自然通风时的温度曲线

由图 6 可以看出, 当燃烧源对外界环境产生热量释放后, 电缆内部温度逐渐升高, 当电缆绝缘层温度超过 90 °C 后, XLPE 材料逐渐开始迅速热解, 在 48.63 s 时温度曲线出现第 1 个极值, 即 130 °C。但由于护套层的包裹, 可燃物处于阴燃状态, 此处仅有绝缘护套的热解反应, 没有明火产生, 故第 1 个极值后热释放速率有缓慢下降趋势。

随着护套 PVC 材料逐渐开始热解, PVC 材料热解将吸收热量并导致电缆表层温度的降低。在 502.23 s 时, PVC 材料热解气体与空气结合燃烧致使电缆表层温度继续升高, 发生燃烧。在 619.21 s 时, 电缆表层温度曲线出现第 2 个极值, 达到 162.84 °C, 此时整个隧道非故障电缆均由于外热源开始发生剧烈燃烧, 热释放速率达到最大值。最后, 伴随电缆绝缘层的热解过程, XLPE 与 PVC 材料在燃烧过程中逐

渐消耗完毕, 此时内热源中心区域火源熄灭, 电缆表层温度开始衰减。总体看来, 内热源上层电缆绝缘层温度大于下层电缆绝缘层温度。

综上所述, 设定的模拟空间区域内火灾一般会经历 3 个阶段, 即初期增长阶段、充分燃烧阶段和衰减阶段。

2.2 烟气蔓延分析

2.2.1 电缆隧道烟气的垂直截面分布

电缆隧道尺寸有限, 较为狭窄, 即使在隧道首末两端空气流动为自然通风状态下, 电缆发生内热源燃烧现象时烟气也不能及时排出, 在内部积聚大量烟气。FDS 自带的后处理软件 Smoke-view 可以将 FDS 的计算结果图形化显示描述火灾烟气的运动过程。隧道垂直截面的烟气蔓延情况如图 7 所示。

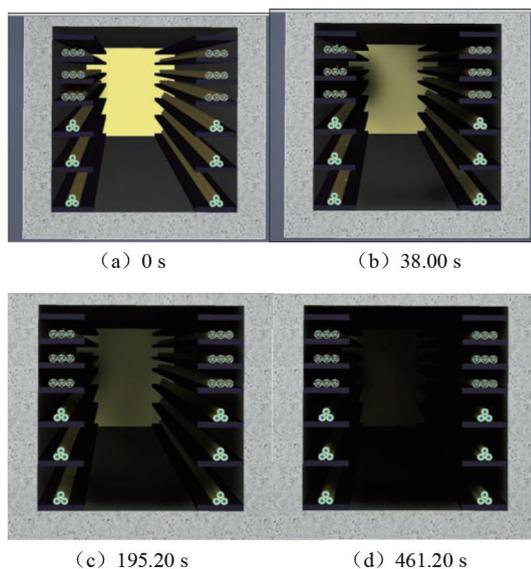


图 7 隧道垂直截面的烟气蔓延情况

由图 7 可以看出: 在电缆火灾发展的初期阶段, 电缆烟气可以较好地扩散, 能见度正常; 在 38.00 s 时, 隧道内电缆燃烧烟气已经扩散至内热源对应电缆隧道的正上方, 此时内热源同侧以及电缆隧道顶棚处空气受到影响, 而对侧电缆支架以及电缆隧道底部的烟气含量较少; 195.20 s 时, 电缆燃烧现象已经较明显, 由于热源周围存在较多可燃物, 内热源燃烧过程已经转变为内、外热源综合燃烧过程, 此时燃烧范围较大、可燃物燃烧较快、燃烧产生的烟气较多, 烟气扩散速度已经小于烟气产生速度, 电缆隧道能见度开始受到影响; 461.20 s 时, 电缆燃烧产生的高热烟气已经充满了整个截面, 此时电缆隧道故障处能见度极低。

上述电缆隧道烟气扩散趋势满足一般情况下隧道烟气分布特征^[16-18]。

2.2.2 电缆隧道烟气的水平扩散分布

为了观测整个隧道水平方向的烟气分布,将视角转换为隧道侧面,得到电缆隧道烟气水平运动模拟图,如图 8 所示。

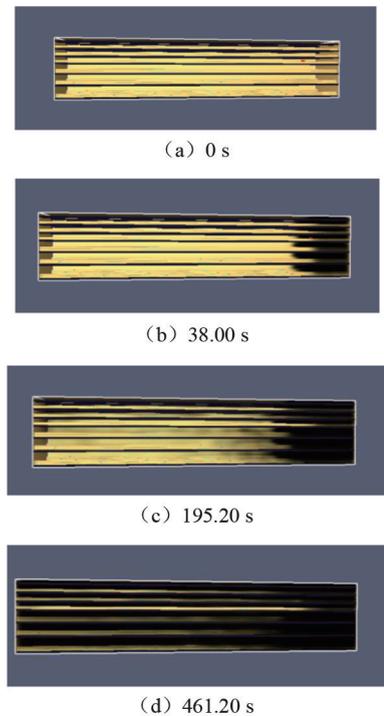


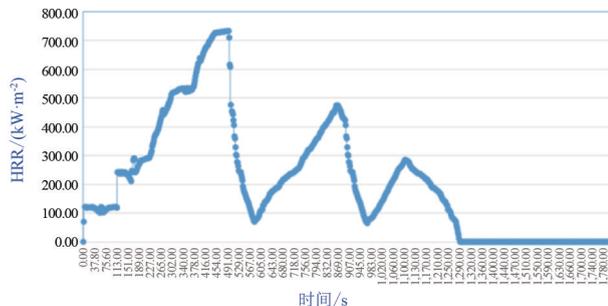
图 8 隧道内烟气水平扩散情况

从图 8 烟气动态仿真可以看出,自然通风条件下烟气蔓延速度较快;在实验初期,内热源燃烧发展过程比较缓慢,燃烧烟气产生较少,燃烧现象不明显;38.00 s 时,可以观察到燃烧点附近开始产生烟气并向隧道另一侧扩散,此时隧道内开始产生较明显的燃烧现象;195.20 s 时,燃烧点处产生的烟气继续向电缆隧道对侧扩散,可以观察到由于燃烧烟气含有热量较多,密度较小,大多向上扩散,所以此时电缆隧道上层已经被烟气铺满,而下层烟气浓度较小,能见度仍然较好;461.20 s 时,电缆绝缘层的内热源燃烧过程已经发展为多段燃烧的综合过程,火灾烟气产生较多,烟气扩散不及时使电缆隧道内的水平空间均被烟气充满。

2.3 电缆故障火灾的热释放速率变化趋势

在 FDS 中,单位时间内的热释放速率(heat release rate, HRR)随时间变化曲线是根据用户在模拟中定义的各项参数仿真得出的,通常用于预测火灾的发展和建筑物的热响应。HRR 曲线也是评估火灾风险和设计建筑物防火措施的常用工具之一。

根据第 1.3 节中火源、材料等设置,可得到在内热源热释放速率为 265 kW/m^2 的条件下,电缆隧道内火灾的 HRR 曲线如图 9 所示。



道内温度降低。当温度降低至绝缘层燃点以下时,燃烧便无以为继,此时通风条件将对电缆燃烧起阻碍作用。

3 结 论

上面基于内热源燃烧理论以及模型建立的等效化处理方法,通过 FDS 建立了综合电缆隧道以及 10 kV 与 110 kV 高压电缆多层交叉敷设模型,并对电缆内热源燃烧过程进行分析。

区域内火灾一般会经历初期增长阶段、充分燃烧阶段和衰减阶段。在初始增长阶段,电缆温度急剧升高,产生的烟气可以通过一定的通风条件向外排出;在充分燃烧阶段,电缆铜芯外层绝缘层在高温下发生热解,热解吸收热量,导致电缆温度在峰值上下波动,烟气开始在电缆隧道内大量聚集;在衰减阶段,绝缘层介质基本已经热解完毕,电缆隧道内残留的可燃物较少,烟气聚集在电缆隧道内形成较厚的烟气层,可见度极低。

参考文献

- [1] 贡颖,郭耸,程洋,等.基于 FDS 的火源位置对高压电缆沟道火灾的影响研究[J].工业安全与环保,2023,49(2):21-25.
- [2] MAGALIE C, ANNE-SOPHIE C, RODOLPHE S, et al. Fire behaviour of electrical cables in cone calorimeter: Influence of cables structure and layout[J]. Fire Safety Journal, 2018, 99:12-21.
- [3] NIU Y J, LI W T. Simulation study on value of cable fire in the cable tunnel[J]. Procedia Engineering, 2012, 43:569-573.
- [4] KIM H S, HWANG I J, KIM Y J. Characteristics of smoke concentration profiles sith underground utility tunnel fire [J].Journal of Computational Fluids Engineering, 2005, 10(1):94-98.
- [5] 陈伟,崔浩浩,秦龙,等.基于 FDS 的火灾仿真研究[J].计算机仿真,2011,28(12):227-231.
- [6] NUIANZIN O, KRYSHTAL M, NESTERENKO A, et al. Investigation of the regularities of temperature regime of fire in cable tunnels depending on its parameters[C/OL]. [2023-09-04]. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002022>.
- [7] ZAVALETA P, HANOUZET R, BEIJI T. Improved assessment of fire spread over horizontal cable trays supported by video fire analysis [J]. Fire Technology, 2019,55(1):233-255.

- [8] 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.
- [9] 李政,张国维,贾伯岩,等.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.
- [10] 周彪,徐幼平,张腾.FDS 在电缆隧道火灾中的应用[J].河南理工大学学报(自然科学版),2008,27(2):148-152.
- [11] 张晋,徐大军,宋文琦,等.城市综合管廊电力舱火灾行为试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(6):1818-1825.
- [12] 王明年,田源,于丽,等.城市综合管廊火灾温度场分布及结构损伤数值模拟[J].现代隧道技术,2018,55(5):159-165.
- [13] 全国电线电缆标准化技术委员会.额定电压 1 kV ($U_m = 1.2$ kV)到 35 kV ($U_m = 40.5$ kV)挤包绝缘电力电缆及附件 第 2 部分:额定电压 6 kV ($U_m = 7.2$ kV)到 30 kV ($U_m = 36$ kV)电缆:GB/T 12706.2—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [14] 刘素蓉,胡钰铎,郑建康,等.10 kV 电缆单相电弧接地故障引燃隧道的火灾动态仿真[J].高电压技术,2021,47(12):4341-4348.
- [15] 孙正瑶.地铁电缆辐射引燃行为的实验分析及数值模拟[D].北京:首都经济贸易大学,2019.
- [16] 孙振宇.长大隧道火灾烟气蔓延特性及人员疏散安全性分析[D].石家庄:石家庄铁道大学,2023.
- [17] 从伟.地铁隧道/列车双狭长受限空间火灾烟气蔓延与特征参数演化规律[D].合肥:中国科学技术大学,2022.
- [18] 刘亚玲.综合管廊电力舱火灾烟气蔓延规律及控制措施研究[D].重庆:重庆科技学院,2021.
- [19] LU Yong, HUANG Xinyan, HU Longhua, et al. The interaction between fuel inclination and horizontal wind: Experimental study using thin wire [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019,37(3):3809-3816.

作者简介:

唐鹏宇(1996),男,助理工程师,从事输电线路运维、架空输电线路及电缆线路施工作业等专业技术管理工作;

裴山山(1990),男,工程师,从事架空输电线路及高压电缆专业技术管理工作;

彭雨(1993),男,工程师,从事输电线路运检专业技术管理工作;

唐滔(1994),男,助理工程师,从事架空输电线路运维、检修、电缆线路运维等专业技术管理工作;

王金皇(1995),男,硕士,工程师,从事输电线路运行、检修等专业管理工作;

陈锴(1995),男,硕士,高级工程师,从事输电线路专业技术管理工作。

(收稿日期:2024-02-14)