

中文引用格式:彭伟,王依婷,张少杰,等. 悬挂电缆火蔓延速率增加机制[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 157–163.

英文引用格式:PENG Wei, WANG Yiting, ZHANG Shaojie, et al. Study on mechanism of increased fire spread rate of suspended cables[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 157–163.

悬挂电缆火蔓延速率增加机制^{*}

彭伟^{1,2}教授, 王依婷², 张少杰^{**2}, 任俊生², 周月², 谷恒²

(1 安徽理工大学 公共安全与应急管理学院, 安徽 合肥 231131;

2 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232000)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0453

资助项目:安徽高校自然科学基金项目(2024AH040063)。

【摘要】 为明确下垂角度对电缆火蔓延特性的影响,构建电缆燃烧试验平台,开展不同下垂角度(θ)及不同横截面积(S)的电缆燃烧试验。结果表明:电缆水平布置时火焰呈现轴对称锥形状态;下垂角度大于 0° 时,随着燃烧的进行,火焰形态从多分叉锥形过渡到沿着电缆方向延伸状态。电缆火蔓延行为可分为3个阶段:阶段I热解前沿推进使火蔓延速率(FSR)增加;阶段II热对流与热辐射相互作用导致FSR快速增加;阶段III热辐射主导使FSR持续增加。燃烧产生的辐射热通量对FSR增加起主导作用,辐射热通量的迅速增加及峰值的出现与火蔓延3个阶段具有一致性,可作为增加阶段发生的标志。 θ 的增大和 S 减小会促进FSR增加,根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,提出FSR发生增加的 θ 与 S 关系式,且关系式理论指数与试验指数吻合较好。

【关键词】 悬挂电缆; 火蔓延速率(FSR); 下垂角度; 横截面积; 热通量

Study on mechanism of increased fire spread rate of suspended cables

PENG Wei^{1,2}, WANG Yiting², ZHANG Shaojie², REN Junsheng², ZHOU Yue², GU Heng²

(1 School of Public Safety and Emergency Management, Anhui University of Science and Technology, Anhui Hefei 231131, China; 2 School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232000, China)

Abstract: In order to clarify the influence of droop angle on suspended cable fire spread characteristics, a cable combustion test platform was constructed. The cable combustion tests with different droop angles (θ) and different cross-sectional areas (S) were carried out. The results show that the flame presents an axisymmetric conical state when the cable is arranged horizontally. When the droop angle is greater than 0° , as the combustion progresses, the flame shape transits from a multi-branched cone to an extended state along the cable direction. The flame spread behavior of cable can be divided into three stages: the advance of the pyrolysis front in stage I increases FSR, the interaction between thermal convection and thermal radiation in stage II leads to a rapid increase of FSR. Stage III thermal radiation dominates the continuous increase of FSR. The radiation heat flux generated by combustion plays a leading role in the increase of

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0157-07; 收稿日期:2025-06-08; 修稿日期:2025-08-15

** 通信作者:张少杰(1991—),男,安徽太和人,博士,讲师,主要从事火灾动力学、锂离子电池安全方面的研究。E-mail: zsjay@mail.ustc.edu.cn.

FSR. The rapid increase of radiation heat flux and the appearance of peak value are consistent with the three stages of fire spread, which can be used as a sign of the increase stage. The increase of θ and the decrease of S will promote the increase of FSR. According to the Stephen-Boltzmann law, the relationship between θ and S for the increase of FSR is proposed, and the theoretical index of the relationship is in good agreement with the experimental index.

Keywords: suspended cable; flame spread rate (FSR); droop angle; cross-sectional area; heat flux

0 引言

悬挂电缆凭借其特有的优势,在诸多领域发挥着不可替代的功能。相较于埋地电缆,悬挂电缆因处于相对较高的位置,能够有效规避地面车辆碾压、施工挖掘工具误挖等外力干扰,显著增强了电缆运行的安全性与稳定性^[1]。然而,电缆在实际应用中,由于重力和敷设条件的限制,弯曲处易发生应力集中,易导致绝缘层损坏,发生火灾^[2]。

针对电缆火蔓延行为,众多学者已开展大量研究,并对倾斜角度、电缆数量、电缆间距和周围环境等关键变量对电缆火蔓延行为的影响进行了深入探讨^[3-4]。在倾斜角度影响方面,XU Tong 等^[5]模拟实际电缆敷设场景,设置了3种电缆敷设条件,最后给出了不同点火位置和点火倾角下的火蔓延速率(Fire Spread Rate, FSR)关联式。HU Longhua 等^[6]开展试验,研究不同倾斜角度对电缆的燃烧行为的影响,发现FSR随倾斜角度增大呈现先减小后增大的趋势,且火焰底部的宽度、长度热解区与FSR紧密相关。CHEN Changkun 等^[7]针对不同弯折角度的U形电缆燃烧特性开展试验,发现FSR和质量损失速率(Mass Loss Rate, MLR)与弯折角度呈正相关。此外,周围环境对火焰传播行为也至关重要。WANG Zhi 等^[8]通过试验研究了环境温度和入射热流对电缆水平火焰传播的影响,结果表明:火焰沿着焊丝均匀蔓延,且随着环境温度的升高,FSR略有增加,最大增幅达16%。王涛等^[9]开展电缆着火试验,研究内热源功率及电缆线芯截面积对电缆温升、着火时间等着火关键参数的影响,发现内热源功率的增加弱化了电缆线芯截面积对各层升温速率的影响。综上所述,尽管已有研究取得一定成果,但针对电缆下垂开展的研究还较为鲜见。

鉴于此,笔者拟以三铜芯交联聚乙烯国标电线电缆为试验对象,通过试验观测与理论分析相结合的方法,深入剖析悬挂电缆下垂火蔓延机制,以期为电缆的敷设方式提供理论参考。

1 悬挂电缆燃烧试验装置

悬挂电缆燃烧试验装置由燃烧平台、视频记录、数据监测3个部分组成,如图1所示。将长度为0.5 m^[10]电缆置于2根可移动支架之间(支架高0.5 m),以此来改变电缆的下垂角度 θ ,如图2所示。在精密电子天平(精度为0.1 g)上方放置防火板,将电缆支架置于防火板上,使电子天平可以测量到整个燃烧过程中的电缆质量变化;将K型铠装热电偶及热流计通过模块及数据采集仪与电脑连接,以实现测点温度变化及热通量变化实时记录;试验过程中环境温度为23℃。

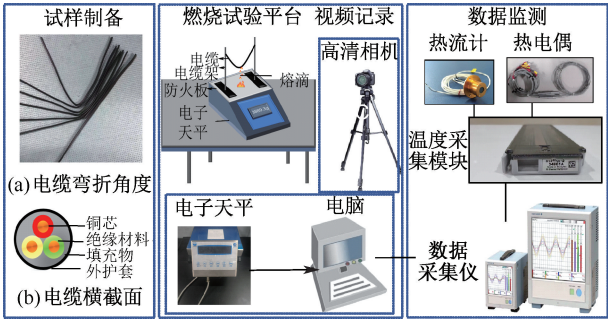


图1 燃烧试验装置

Fig. 1 Combustion test device

设置 θ 分别为0、15、22.5、30、37.5、45和60°的7种工况;选取横截面积 S (电缆的横截面积通常指的是单根导体的横截面积,不包括绝缘层或护套的总面积。)分别为2.5、4.0、6.0、10.0和16.0 mm²的5种电缆,线径分别为1.78、2.26、2.76、3.57和4.51 mm。如图2所示,在电缆上下外壁设置温度测量点,每隔6.25 cm设置一个测量点,上方分别为 A_1 — A_4 ,下方分别为 B_1 — B_4 。在下垂处正上方0、5和10 cm处设置3根热电偶,依次计为 C_2 、 C_3 和 C_4 ,在下垂处正下方 C_1 设置1根热电偶。

每组试验选取1根电缆,并将其固定于电缆支架上,调节至所需角度,然后,调整热电偶、热流计位置,以保障测量设备能够精准获取电缆在燃烧过程中的温度数据及热通量数据。电缆通过乙醇油池火

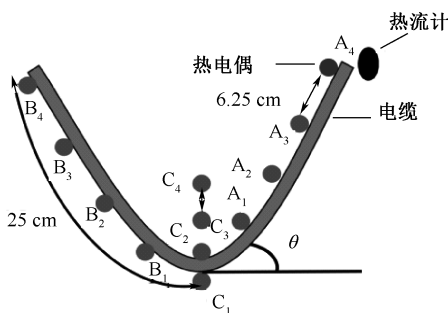


图 2 热电偶测点布设

Fig. 2 Thermocouple measuring point layout

在下垂处进行引燃,当 $\theta=0^\circ$ 时,从电缆中间处引燃,每次试验所使用的油盘大小(5 cm×5 cm)、油盘中乙醇用量(100 mL)均为定值。乙醇被点燃后 30 s 达到稳定燃烧^[11],此时,在油盘里火焰高度约为 10 cm。不同的 θ 通过调节电缆高度使每根电缆点燃位置均位于油盘上方 5 cm 处(即电缆最低点位置距离油盘表面距离始终为 5 cm),此时火焰温度约为 720 ℃。每次点火时长设定为 30 s^[12],确保电缆可以自主燃烧出现明火,将加热源移走的同时开始计时。试验工况见表 1,每组工况均重复 3 次试验。

表 1 试验工况

Table 1 Test condition

工况名称	S/mm^2	$\theta/(\text{ }^\circ)$
$a_1 - a_5$	2.5, 4.0, 6.0, 10.0, 16.0	0
$b_1 - b_5$		15
$c_1 - c_5$		22.5
$d_1 - d_5$		30
$e_1 - e_5$		37.5
$f_1 - f_5$		45
$g_1 - g_5$		60

2 悬挂电缆 FSR 时变趋势

2.1 火焰形态

图 3 为 $S=2.5\text{ mm}^2$ 时, $\theta=0^\circ$ 、 30° 、 45° 和 60° 的电缆火演化过程。可以看出,电缆水平布置时,火焰呈现轴对称锥形状态,初期火焰局限在电缆被点燃的位置,处于不稳定状态,这是由于初始燃烧时,可燃物质的释放量不稳定,使得火焰难以保持固定的形态和大小。随着火焰状态慢慢稳定且不断向两端蔓延,火焰结构表现出多火焰分叉现象,整个过程伴随着外护套熔化物的产生和滴落^[13]。随着中部材料慢慢燃尽,火焰集中在电缆两端,火焰高度增高,随着材料慢慢燃尽,火焰彻底熄灭。高温熔滴滴落至

防火板继续燃烧,熄灭后固化置于防火板上。

下垂电缆火焰状态演化过程为:初始下垂部分燃烧时,火焰呈现多分叉锥形的状态,伴随火势推进,热传递致使周围空气升温。当火焰扩增至一定位置,鉴于电缆倾斜角度,火焰与可燃物距离拉近,火焰沿电缆方向迅速蔓延,火焰高度及火焰传播速率快速增长,产生火焰附壁效应^[14],火焰沿着电缆方向延伸,整个过程伴随着外护套熔化物的产生和滴落,滴落于防火板上继续燃烧,熄灭后固化置于防火板上。

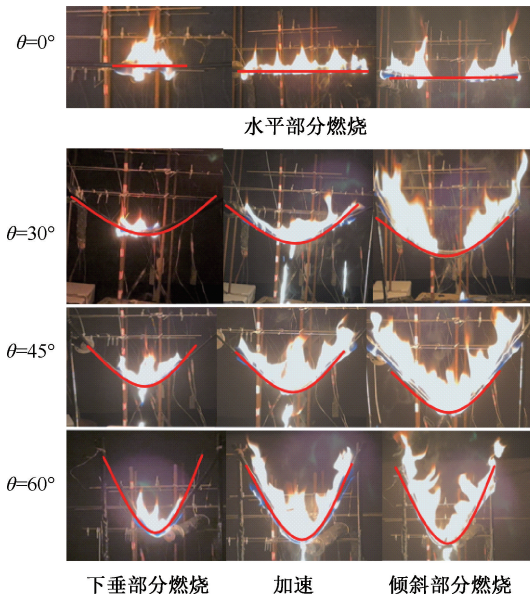


图 3 电缆火演化过程

Fig. 3 Cable fire evolution process

2.2 MLR

图 4 为 $S=2.5\text{ mm}^2$ 时, $\theta=0^\circ$ 、 30° 、 45° 和 60° 时 θ 对 MLR 的影响。可以看出, $\theta=0^\circ$ 时,MLR 比较平稳,在 300 s 左右基本热解完,熔融物脱离电缆到滴落至防火板上导致质量增加,MLR 出现负值。当 $\theta>0^\circ$ 时,MLR 先平稳上升后急剧增加; $\theta=45^\circ$ 时 MLR 出现增加更早,峰值更大, $\theta=60^\circ$ 早于 $\theta=30^\circ$ 出现峰值且前者峰值大于后者。FSR 从大到小的顺序为 $\theta=45^\circ>\theta=60^\circ>\theta=30^\circ>\theta=0^\circ$ 。

2.3 FSR 的时变趋势

图 5 为 $\theta=45^\circ$ 、 $S=2.5\text{ mm}^2$ 时 FSR(V_f)随时间的变化,可以看出,燃烧初期下垂部分燃烧(阶段 I), V_f 稍有增加;随着燃烧过渡(阶段 II)到倾斜部分,火焰尺寸增大, V_f 持续增加,该阶段会导致周围空气的流动紊乱,形成湍流;之后,燃烧进入倾斜部分(阶段 III),状态逐渐趋于稳定。

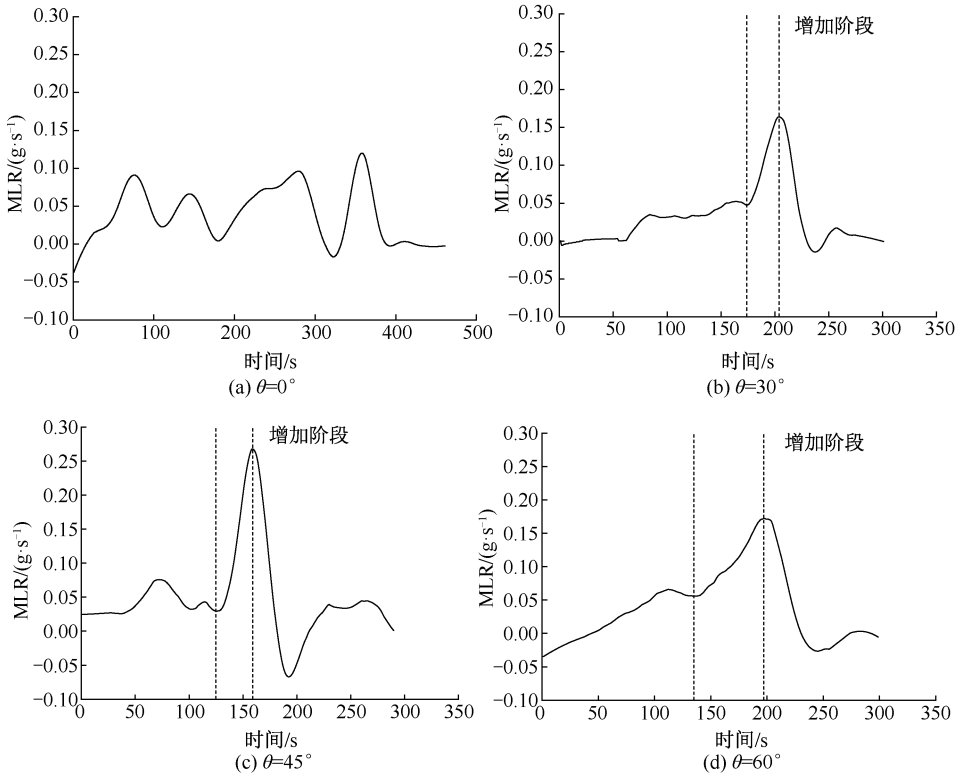


图4 θ 对 MLR 的影响
Fig. 4 Effect of θ on MLR

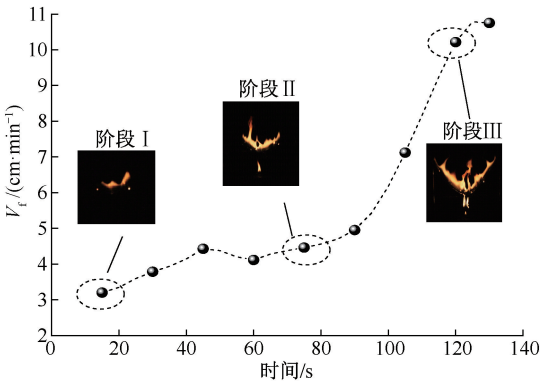


图5 V_f 随时间变化趋势
Fig. 5 Variation trend of V_f over time

图6为 $\theta=0、15、30$ 和 45° 时, V_f 随热解距离 x_p (点燃位置开始至热解位置的距离)的变化情况。当 $\theta=0^\circ$ 时,火焰与电缆间的视角因子^[15]较小,辐射热通量 $\dot{q}''_r$ 和 V_f 也较小;当 $\theta>0^\circ$ 时,火焰传播过程中 V_f 不断增加。下垂电缆燃烧阶段的特征长度 l_c ^[16]会随着 θ 的增大而增加, $\dot{q}''_r$ 与 l_c 呈正相关^[7], l_c 、 V_f 和 $\dot{q}''_r$ 的变化趋势一致。当 $\theta=15、22.5$ 和 30° 时,在火焰蔓延过程中, V_f 先是略微增加(阶段I),接着迅速增加(阶段II),最后稳定增加(阶段III)。当 $S>6.0\text{ mm}^2$ 时, $\theta=15、22.5$ 和 30° 的 V_f 增加趋势

与 $\theta=0^\circ$ 时相同。当 $\theta=37.5^\circ$ 时, V_f 先是略微增加(阶段I),然后较大幅度增加(大于 $\theta=15、22.5$ 和 30° 时)(阶段II),最后稳定增加(阶段III)。当 $S>10.0\text{ mm}^2$ 、 $\theta=37.5^\circ$ 时, V_f 增加趋势与 $\theta=0^\circ$ 时相同。 $\theta=45$ 和 60° 时变化趋势一致。

在阶段I,火焰与电缆表面的距离较远, $\dot{q}''_r$ 较小, V_f 较小。在阶段II,随着热解前沿在电缆上向前移动,火焰与电缆的夹角逐渐减小, $\dot{q}''_r$ 的效果逐渐增强,这与文献[17]的结果相符。对流热通量 $\dot{q}''_c$ 与 $\dot{q}''_r$ 等2种效果相互作用,使得 V_f 产生增加现象。在阶段III,火焰与电缆表面的距离拉近,由于电缆依旧处于倾斜阶段, V_f 始终保持着稳定增加的趋势,这清晰地表明在辐射传热占据主导地位。

3 FSR 增加机制

3.1 FSR 增加条件

表2为悬挂电缆下垂时导致FSR增加的 θ 和 S 值,对于固定 θ ,随着 S 的减小,夹带气流速率和FSR均增大,推动火焰更靠近燃料表面,热传递增大; θ 增大时,火焰与电缆间的视角因子增大,热辐射增大,热对流增强。因此,随着 θ 的增大和 S 的减小,阶段II发生的概率增加。

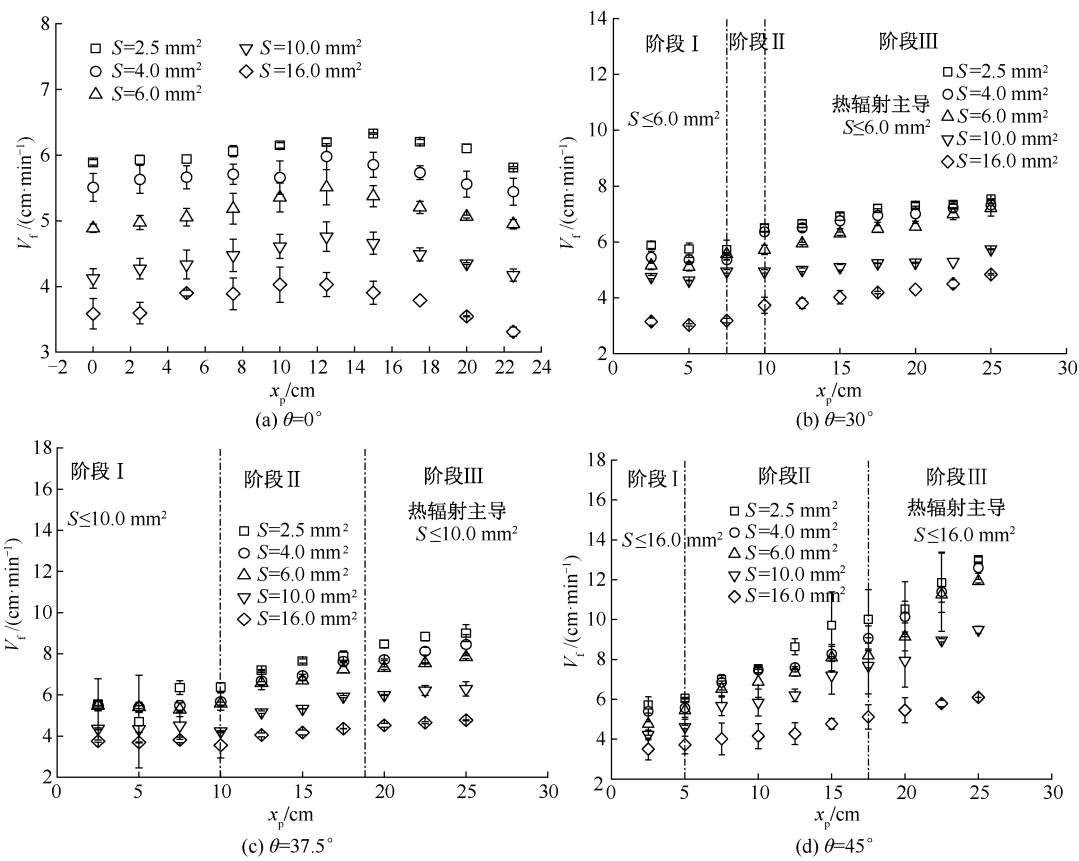


图 6 不同 θ 下 V_f 的演化

Fig. 6 Evolution of V_f under different θ values

表 2 FSR 增加的 θ 和 S

Table 2 FSR increases θ and S

S/mm^2	2.5	4.0	6.0	10.0	16.0
$\theta/(\text{°})$	15~60			37.5~60	45~60

图 7 为测量的辐射热通量 $\dot{q}''_m$ 、 l_c 和 V_f 随 x_p 的变化,随着 θ 的增大和 S 的减小, l_c 、 V_f 增大。在阶段 I 中, l_c 逐渐增大,而 V_f 变化趋势并不明显。

l_c 与 $\dot{q}''_c$ 及 $\dot{q}''_r$ 呈正相关。这是 V_f 增加缓慢的主要原因。在阶段 II,随着 $\dot{q}''_m$ 的迅速增加, l_c 、 V_f 也迅速增加,这表明: $\dot{q}''_m$ 的增加是 V_f 增加的主要原因。随后在 $\dot{q}''_m$ 达到峰值时, l_c 逐渐减小, V_f 的增值减小;在阶段 III, V_f 会随着 $\dot{q}''_m$ 第 2 个峰值的出现增值增加。 $\dot{q}''_m$ 的迅速增加及峰值的出现可作为阶段 II 发生的标志。

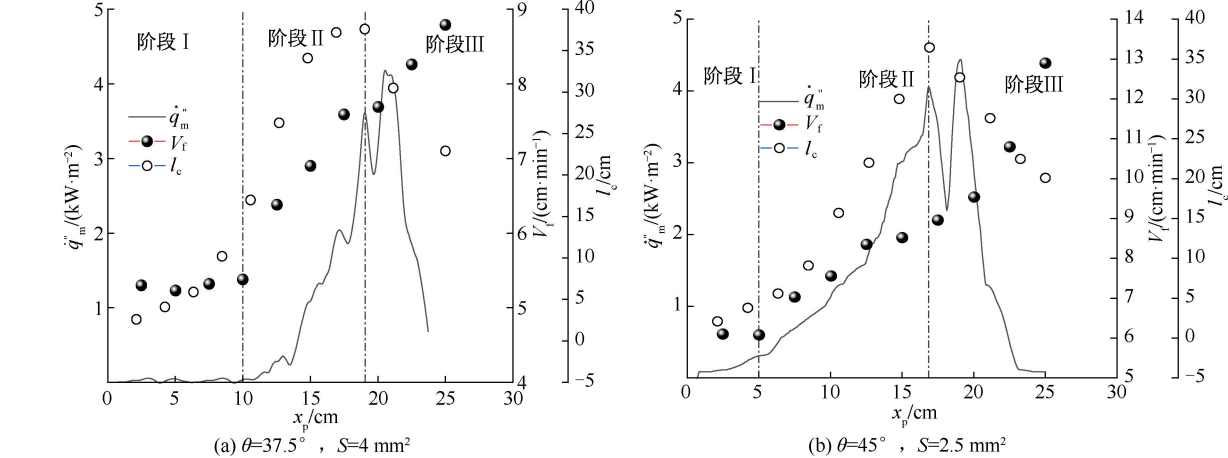


图 7 $\dot{q}''_m$ 、 l_c 和 V_f 随 x_p 的变化

Fig. 7 The variation of $\dot{q}''_m$, l_c , and V_f with x_p

3.2 θ 和 S 对 FSR 增加的影响

假设图 7 中第二峰与第一峰的比率为常数 r 。在 θ 固定的情况下, r 随 S 的增大呈增大趋势, 在双峰临界出现条件下, S 保持不变, r 基本保持不变, 近似为常数 1.11, 常数 r 的假设成立。

电缆燃烧过程中的辐射热通量 $\dot{q}''_r$ 可近似表示为^[18]:

$$\dot{q}''_r = F\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (1)$$

式中: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$; T 为表面温度, K ; T_0 为周围环境温度, K ; ε 为火焰发射率; F 为视角因子。

$$\varepsilon \approx 2 \left[\frac{l_p}{\pi} \left(\frac{S}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中 l_p 为热解长度, cm 。

$$F = \frac{1}{\pi} \left[\arctan \left(\frac{r'}{h} \right) - \frac{hr'}{(h^2 + r'^2)} \right] \quad (3)$$

式中: r' 为圆柱体火焰半径, cm ; h 为火焰平面到圆柱轴线距离, cm 。因此:

$$r \approx \frac{\dot{q}''_{r2}}{\dot{q}''_{r1}} \Rightarrow \theta \sim S^{0.285} \quad (4)$$

式中: $\dot{q}''_{r1}$ 为第 1 个峰值热通量, kW/m^2 ; $\dot{q}''_{r2}$ 为第 2 个峰值热通量, kW/m^2 ; 0.285 为试验指数。

拟合表 2 中数据, 得到 FSR 增加的发生条件为

$$\theta = 7.64S^{0.170} \quad (5)$$

式中 0.170 为理论指数。式(5)与式(4)有较好的一致性。

4 结 论

1) 电缆水平布置时, 火焰呈轴对称锥形状态; 电缆下垂布置时, 火焰呈现多分叉锥形状态, 伴随火势上移, 沿电缆倾斜方向延伸。下垂角度从 0° 增加至 60° 时, 火焰分叉数量增加; 下垂角度越大, 火焰沿缆传播趋势越明显, 火焰形态越复杂。

2) 有下垂角度的悬挂电缆, 燃烧初期为下垂部分燃烧, FSR 增加缓慢; 燃烧过渡到倾斜部分时 FSR 快速增加, 之后逐渐趋于稳定。当下垂角度与横截面积间满足 7~8 倍的 0.170 指数幂关系时, 电缆 FSR 快速增加, 处于燃烧由下垂部分过渡到倾斜部分的阶段。

参 考 文 献

- [1] SHI Yunliang, YANG Yongxin, ZHU Jinbo, et al. Effect and mechanism of stiffness distribution and sag-span ratio of main cables on structural dynamic characteristics and flutter performance of multi-cable suspension bridges[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2024, 254: DOI: 10.1016/j.jweia.2024.105919.
- [2] 钟委, 郭超杰, 马文辉, 等. 管廊内电缆内热源燃烧过程数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10): 86-93.
ZHONG Wei, GUO Chaojie, MA Wenhui, et al. Numerical simulation research on combustion process of heat sources inside cables in pipe gallery[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2023, 33(10): 86-93.
- [3] 王小山. 狭长受限空间电缆火蔓延行为及温度分布规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
WANG Xiaoshan. Study of cable fire spread behavior and temperature distribution patterns in confined spaces[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [4] TANG Kaixuan, WANG Shuai, FU Ming, et al. Comprehensive assessment of the thermal aging effects on fire risks of PVC cable[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2024, 149(9): 3785-3793.
- [5] XU Tong, CHEN Changkun, DU Wuhao, et al. Experimental study on fire spread behavior of single 110 kV cable under different layout conditions[J]. Fire Safety Journal, 2023;141: DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103957.
- [6] HU Longhua, ZHANG Yangshu, YOSHIOKA K, et al. Flame spread over electric wire with high thermal conductivity metal core at different inclinations[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(3): 2607-2614.
- [7] CHEN Changkun, DU Wuhao, XU Tong. Experimental study on combustion behavior of U-shaped cables with different bending forms and angles[J]. Fire, 2023, 6(9): DOI: 10.3390/fire6090348.
- [8] WANG Zhi, WANG Jian. A comprehensive study on the flame propagation of the horizontal laboratory wires and flame-retardant cables at different thermal circumstances[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 139: 325-333.

[9] 王涛, 宋晓枫, 徐文淑, 等. 内热源影响下高压电力电缆着火机制[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 200–205.
WANG Tao, SONG Xiaofeng, XU Wenshu, et al. Ignition mechanism of high-voltage power cables under influence of internal heat source[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 200–205.

[10] 陈长坤, 杜武豪, 徐童, 等. 下折弯电缆燃烧火蔓延行为试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2025, 65(4): 805–812.
CHEN Changkun, DU Wuhao, XU Tong, et al. Experimental study on the fire spread behavior of downward-bending cables[J]. Journal of Tsinghua University: science and Technology, 2025, 65(4): 805–812.

[11] 任俊生. 含烃/氟类表面活性剂水雾抑灭液体池火效果实验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.
REN Junsheng. Experimental study on the effect of water mist containing hydrocarbon/fluorinated surfactants in suppressing liquid pool fires[D]. Huainan: AnHui University of Science and Technology, 2024.

[12] JIA Boyan, XIA Yanwei, NING Zhaoyu, et al. Research on the fire extinguishing efficiency of low-pressure water mist in urban underground utility tunnel cable fires[J]. Fire, 2023, 6(11): DOI: 10.3390/fire6110433.

[13] 邢朝亮, 黄成家, 何乐, 等. 火焰撞击障碍物形成的溢流火焰融合行为研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 171–176.
XING Chaoliang, HUANG Xianjia, HE Le, et al. Experimental study on flame merging behavior of spilled flame generated by flame impinging on obstruction[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 171–176.

[14] LIU Xin, ZHU Guoqing, PAN Rongliang, et al. Experimental study on wall fire behavior produced by n-heptane pools with different aspect ratios and orientations in arched tunnel[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 28: DOI: 10.1016/j.csite.2021.101438.

[15] 孟亦飞, 赵东风, 廖启霞. 任意角度喷射火视角因子的计算[J]. 石油化工高等学校学报, 2010, 23(4): 85–88.
MENG Yifei, ZHAO Dongfeng, LIAO Qixia. View factor computation for jet fire of any direction[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2010, 23(4): 85–88.

[16] WANG Qiang, LU Aquan, LIANG Xuan, et al. Thermal radiation distribution of low-momentum jet diffusion flame under the effect of cross airflow[J]. Fire Safety Journal, 2023, 135: DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103728.

[17] EMORI I, IGUCHI Y, SAITO K, et al. Simplified scale modeling of turbulent flame spread with implication to wildland fires [C]. Proceedings in 2nd International Symposium on Fire Safety Science Hemisphere Publishing Corporation, 1989: 263–273.

[18] FISENKO I A, IVASHOV N S. Determination of the true temperature of molybdenum and luminous flames from generalized Wien's displacement and Stefan-Boltzmann's laws: thermodynamics of thermal radiation[J]. International Journal of Thermophysics, 2009, 30(5): 1 524–1 535.



作者简介： 彭 伟 （1981—）,男,安徽淮南人,博士,教授,主要从事火灾防治方面的研究。E-mail:wpeng@aust.edu.cn。