



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2407890

引用格式:蔡泽源,黎鹏,黄道春.基于Pyrosim的风速对植被火焰倾角的影响[J].科学技术与工程,2025,25(10):4168-4174.

Cai Zeyuan, Li Peng, Huang Daochun. The effect of wind speed on vegetation flame inclination based on Pyrosim[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 4168-4174.

# 基于 Pyrosim 的风速对植被火焰倾角的影响

蔡泽源<sup>1</sup>, 黎鹏<sup>1\*</sup>, 黄道春<sup>2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 宜昌 443002; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

**摘要** 山火可能导致架空输电线路跳闸停运,进而危及电网的安全和稳定运行。为了研究植被的火焰倾角在环境风影响下的变化情况,以尺寸为1 m×1 m×0.6 m的方形杉木垛作为研究对象,通过Pyrosim软件建立一个四周通风的5 m×5 m×5 m的室外场地,对风速为1~10 m/s的10个自由燃烧算例进行了模拟研究,分析了火焰形态随着风速大小的变化情况;拟合了适用于该风速范围内的火焰倾角计算公式;根据火焰倾角的变化情况进而得到了火焰的水平偏移距离,并对模拟研究结果进行了现场试验验证。结果表明:在风速越大的情况下,火焰倾角和火焰的水平偏移距离变化越小。该研究结果可为输电线路山火跳闸事故的预防以及输电线路走廊两侧植被的砍伐距离提供参考。

**关键词** Pyrosim; 输电线路; 山火; 风速; 火焰倾角

**中图分类号** TM752; **文献标志码** A

## The Effect of Wind Speed on Vegetation Flame Inclusion Based on Pyrosim

CAI Ze-yuan<sup>1</sup>, LI Peng<sup>1\*</sup>, HUANG Dao-chun<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**[Abstract]** Vegetation fires may lead to tripping and shutdown of overhead transmission lines, thus endangering the safe and stable operation of power grids. In order to study the change of flame inclination of vegetation under the influence of ambient wind, a square fir crib with the size of 1 m×1 m×0.6 m was used as the research object, and a 5 m×5 m×5 m outdoor site with ventilation was set up by Pyrosim software, and simulation research was carried out on 10 free burning cases with the wind speed of 1~10 m/s, and the change of the flame pattern with the size of the wind was analysed. The formula for calculating the flame inclination applicable to this wind speed range was fit. The flame inclination calculation formula was based on the flame inclination of this range, and the flame inclination calculation formula was based on the flame inclination of this range. The change of flame shape with the wind speed was analyzed. The formula for calculating the flame inclination angle applicable to the wind speed range was fitted. And the horizontal offset distance of the flame was obtained according to the change of the flame inclination angle. The results show that the larger the wind speed is, the smaller the change of flame inclination and flame horizontal offset distance are. The results of this study can be used as a reference for the prevention of tripping accidents on transmission lines and the cutting distance of vegetation on both sides of transmission line corridors.

**[Keywords]** Pyrosim; transmission line; vegetation fire; wind speed; flame inclination

中国发电能源和负荷中心分布不均衡,需要大容量、远距离传输电能<sup>[1-3]</sup>。近年来,山火在世界各地频繁发生,已成为危及输电线路安全及电网稳定运行的主要灾害之一<sup>[4-7]</sup>。风速作为影响山火发展和蔓延的关键因素之一,其强度对火势的演变有着显著的影响,例如,2022年发生的马歇尔大火因强

烈的下坡风迅速蔓延到邻近的各县,导致超过6 000 ac(1 ac=4 046.86 m<sup>2</sup>)土地不到24 h内被毁<sup>[8]</sup>。近20年来,中国发生了10 301起林火,其中约8%发生在四川省,尤以凉山彝族自治州、甘孜藏族自治州等地为主。这些地区森林密集、地形陡峭,特别是这里的风速较大且方向不稳定,极大地

收稿日期:2024-10-23; 修订日期:2025-03-05

基金项目:国家自然科学基金(51677138);南方电网公司科技项目(GDKJXM20222564)

第一作者:蔡泽源(2000—),男,汉族,湖北黄冈人,硕士研究生。研究方向:高电压与绝缘技术。E-mail:1973141316@qq.com。

\*通信作者:黎鹏(1989—),男,汉族,湖北咸宁人,博士,副教授。研究方向:电力设备智能运维、电磁多物理场分析。E-mail:lipeng\_ctgu@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

加剧了火灾蔓延速度,造成了严重的人员伤亡<sup>[9]</sup>。山火导致植被燃烧产生的高温、高电导率以及灰烬颗粒等因素会显著降低架空线路的空气间隙绝缘强度,可能导致线路跳闸或闭锁,同时重合闸或重新启动的成功率较低,严重威胁输电线路的安全稳定运行<sup>[10-12]</sup>。而风速直接影响火焰的蔓延速度<sup>[13]</sup>,风能够将火焰中的火星、灰尘和可燃物带离火源,形成火灾的风向扩散。高风速可以迅速推动火焰,导致火势迅速蔓延,增加火灾的危险性。

当前,中外学者在风速对火焰形态的研究上做了较多工作。文献<sup>[14]</sup>利用 FDS 软件进行建模,模拟室外风对火焰燃烧倾角和长度的影响,得出室外风速增大会导致火焰长度缩短,并使其向上风向倾斜的角度减小,但会使火焰向下风向倾斜的角度增大的结论。文献<sup>[15]</sup>通过搭建模拟山火试验平台,分析了风速对火焰燃烧强度的影响,提出风速在 1~3 m/s 时,能促进植被的燃烧,加速火焰的蔓延。风速在 3 m/s 以上时,植被燃烧火焰的垂直高度会大幅度降低,甚至是熄灭。Rothermel<sup>[16]</sup>介绍了预测火灾蔓延的数学模型,并进行了试验来分析燃料和天气对山火蔓延的影响。但是实际山火情况下火焰边界的风力条件十分复杂,要控制环境的风速与风向是非常困难的,因此在试验过程中可能会出现较大的误差。

Pyrosim 是一款专门为 FDS 开发的建模软件,利用流体力学原理,能够快速准确地构建复杂的火灾模型。它可以预测烟雾浓度、烟气层高度、热流量等火灾过程中的关键参数,并可通过调用 FDS 进行模拟计算。用户可以使用 Smokeview 或 Pyrosim results 查看火灾模拟结果<sup>[17]</sup>。本文研究以木垛火焰作为对象,通过 Pyrosim 软件进行风速对火焰倾角的仿真模拟,得到不同风速条件下,木垛燃烧火焰的倾角变化,并通过试验对仿真结果进行验证分析,分析结果可为输电线路山火跳闸事故的预防以及输电线路走廊两侧植被的砍伐距离提供参考。

## 1 模型的建立

### 1.1 场地模型

采用 Pyrosim 软件建立了一个室外场地模型,整个模型的尺寸为 5 m × 5 m × 5 m。模拟的网格数量总计为 125 000 个,而模拟中的单元格尺寸则为 0.1 m × 0.1 m × 0.1 m。在场地的左方加一个能控制风速的风扇,提供恒定风向和风速,其建立过程参考了模拟试验所开展的实际情况。

### 1.2 边界及初始条件

试验场地的环境压力为 80 kPa,初始温度为

25 °C,整个计算区域采用绝缘、无滑移壁面条件<sup>[18]</sup>。试验场地四周通风,与外界相连。模拟风速 1~10 m/s,模拟时间为 100 s。

### 1.3 火源设置

山火导致的输电线路跳闸主要涉及杂树、杂草、松树、杉树和桉树等可燃植物<sup>[19]</sup>。其中,杉树干具有结构简单、重复性好等特点,故采用一个尺寸为 1 m × 1 m × 0.6 m 的杉木垛用于模拟试验研究。结合工程常用防火模拟实际,采用  $t^2$  火的火灾增长模型模拟实际火灾过程<sup>[20]</sup>。 $t^2$  火模型公式为

$$Q = at^2 \quad (1)$$

式(1)中: $Q$  为热释放速率, kW;  $a$  为火灾增长系数, kW/s<sup>2</sup>;  $t$  为火灾增长时间, s。

在进行模拟试验分析时应针对可燃物的特点选择  $t^2$  火模型的热释放速率参数。 $t^2$  火模型的火灾增长系数可分为 4 种不同的类型,针对杉木等木本类植物,应该选用增长速度快的火源类型,即火灾增长系数  $a = 0.0469$  kW/s<sup>2</sup>。模型的整体布置如图 1 所示。

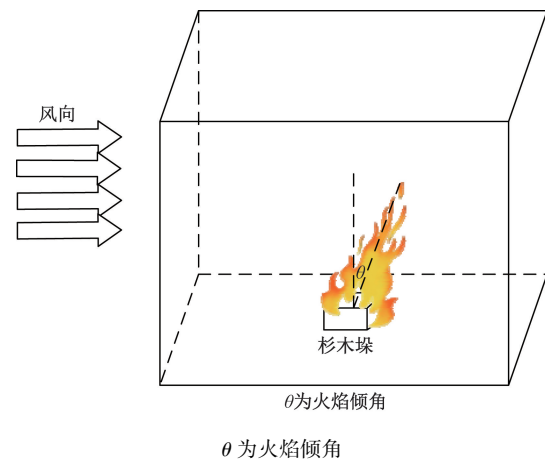


图 1 Pyrosim 模型示意图

Fig. 1 Schematic of Pyrosim model

## 2 模拟结果与分析

经查阅<sup>[21]</sup>,尺寸为 1 m × 1 m × 0.6 m 的方形植被种类完全燃烧产生的热释放速率大约为 1 500 kW,图 2 为木垛的热释放速率随时间的模拟结果,可以看到木垛完全燃烧产生的热释放速率在 1 500 kW 左右,与查阅结果相符,证明模拟网格大小设置合适。

### 2.1 不同风速下火焰形态分析

通过调节仿真模型中风扇的风速,得到不同风速下的火焰燃烧形态,如图 3 所示。

可以看到,当风速处于 1~3 m/s 的时候,火焰倾角受风速的影响较大,火焰形态较为完整,火焰长度在垂直方向上的高度逐渐缩短。当风速大于

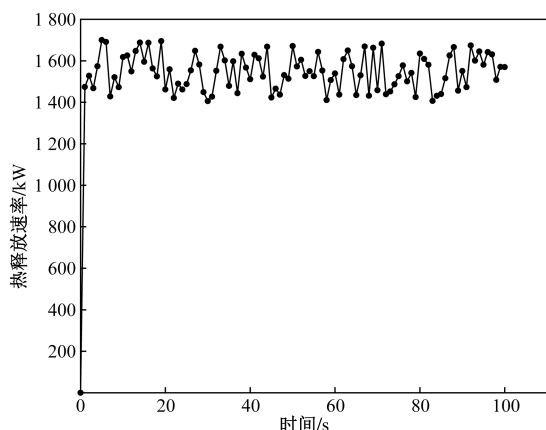


图2 木垛热释放速率变化曲线

Fig. 2 Curve of change in rate of heat release from wood cribs

3 m/s时,火焰形态几乎保持不变,倾角变化也较小,火焰整体长度在竖直方向无较大变化,但在风速方向上逐渐变长。

## 2.2 不同风速下火焰形态分析

对图3中不同风速下火焰的形态进一步分析火焰的倾角关系,得到上述不同风速条件下火焰的倾角 $\theta$ 如表1所示。

根据表1的内容对风速与火焰倾角的关系进行拟合分析,得到如图4的拟合结果。

如图4的拟合关系不难发现,在风速为1~10 m/s

表1 不同风速对应的火焰倾角

Table 1 Flame inclination for different wind speeds

风速 $S/(m \cdot s^{-1})$	火焰倾角 $\theta/(\circ)$	风速 $S/(m \cdot s^{-1})$	火焰倾角 $\theta/(\circ)$
1.0	5.998 9	6.0	68.074 4
2.0	23.694 2	7.0	68.850 5
3.0	48.525 6	8.0	66.336 9
4.0	58.781 6	9.0	67.550 9
5.0	59.317 9	10.0	69.519 6

时,风速与火焰倾角的拟合关系较好,拟合关系式为

$$\theta = 77.69(1 - e^{-0.27S}), \quad 1 \leq S \leq 10 \quad (2)$$

式(2)中: $\theta$ 为火焰倾角, $(\circ)$ ;  $S$ 为风速,m/s。

通过式(2)可以更好地验证2.1小节中的分析结果,在风速1~4 m/s时,火焰的倾角从 $18.38^\circ$ 变化到了 $51.31^\circ$ ,火焰倾角变化了179.16%,变化幅度大。在风速4~10 m/s时,火焰倾角从 $51.31^\circ$ 变化到了 $72.47^\circ$ ,火焰倾角仅变化了38.54%,故在风速越大的情况下,火焰倾角的变化将会越小。在风速超过10 m/s时,应考虑以下因素。

(1)火焰形状的改变:高风速会改变火焰的形状。较强的风可能会导致火焰倾斜或摇摆,尤其是在户外环境中,这会使火焰呈现出不规则的形态。

(2)火焰的熄灭和扩散:高风速可以导致火焰的扩散,使火焰变得更广泛。另一方面,如果风速过大,可能导致氧气流过燃烧区域太快,使火焰熄灭。

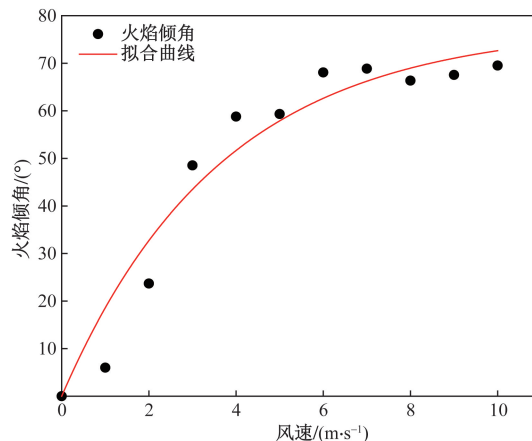


图4 不同风速与火焰倾角的关系

Fig. 4 Relationship between different wind speeds and flame inclination

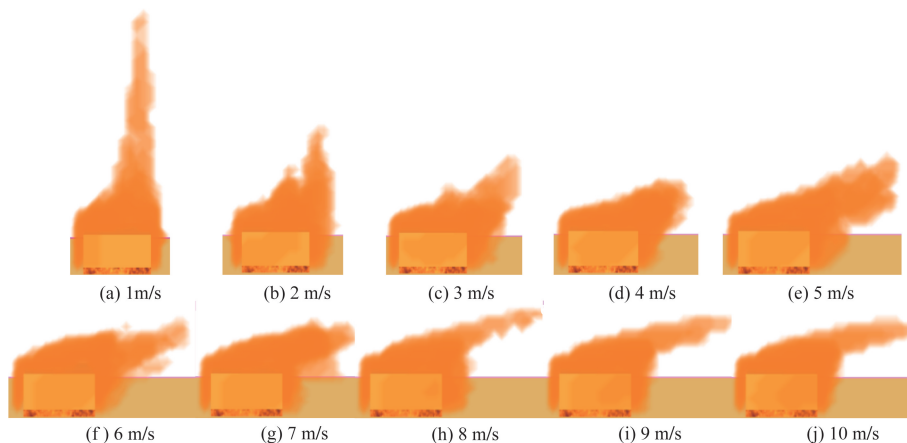


图3 不同风速下火焰形态变化图(仿真)

Fig. 3 Flame pattern change under different wind speeds(emulation)

(3)火焰的稳定性: 高风速可能影响火焰的稳定性。在某些情况下, 强风可能使火焰更难以维持, 甚至可能导致火焰熄灭。

### 2.3 火焰的水平偏转距离分析

输电走廊外侧区域未被砍伐植被发生山火后, 火焰和烟雾受不同环境风的影响偏向输电线路导致火焰和烟雾桥接导线与植被间隙。根据植被类型、植被高度、植被状态、气象条件(风速)等因素可确定火焰的长度, 不同的植被高度和环境风可对应不同的火焰区长度。以仿真模型为基础, 植被垛燃烧时的火焰偏转情况如图 5 所示。

根据几何关系以及式(2)可得火焰的水平偏移距离  $x$  与环境风  $S$  的关系式为

$$x = l \sin[77.69(1 - e^{-0.275S})], \quad 1 \leq S \leq 10 \quad (3)$$

考虑到实际山火发生时, 输电线路走廊两侧植被砍伐距离  $X$  需在火焰水平偏转距离  $x$  的基础上加上一定的安全裕度<sup>[22]</sup>, 将风速设置为 0 m/s 时, 可以得到此时杉木垛燃烧的火焰形态仿真结果如图 6 所示。

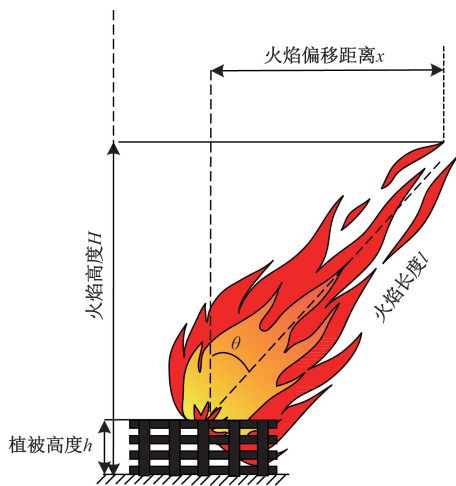


图 5 有风情况下火焰偏转情况示意图

Fig. 5 Schematic of flame deflection under windy conditions

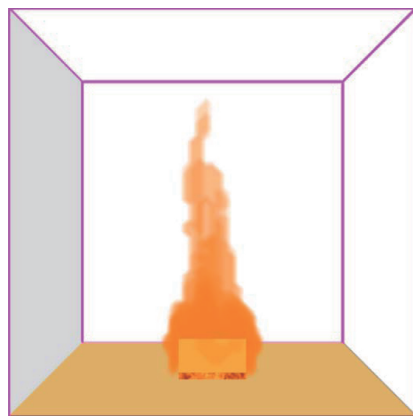


图 6 无风情况下杉木垛火焰形态仿真示意图

Fig. 6 Schematic simulation of the flame pattern of cedar cribs under windless conditions

由仿真结果可得到火焰高度  $H$  为 4.43 m, 此时可以认为杉木垛燃烧的最大火焰高度  $H_{max}$  与火焰长度  $l$  相等, 即  $l = H_{max} = H = 4.43$  m。通过式(3)可以得到不通风速下火焰的偏移距离如表 2 所示。

表 2 不同风速对应的火焰偏移距离

Table 2 Flame offset distance for different wind speeds

风速 $S/(m \cdot s^{-1})$	火焰偏移距离 $x/m$	风速 $S/(m \cdot s^{-1})$	火焰偏移距离 $x/m$
1.0	1.40	6.0	3.92
2.0	2.31	7.0	4.05
3.0	3.03	8.0	4.13
4.0	3.46	9.0	4.18
5.0	3.74	10.0	4.22

可以看出火焰偏移距离的变化与火焰倾角一样, 随着风速的增大而逐渐趋于稳定, 植被清理距离  $X$  需结合当地的季节特点、环境风特点、植被砍伐难度等因素综合确定。

## 3 模拟结果的验证

### 3.1 试验平台

为更进一步研究不同环境风情况下火焰倾角的变化情况, 通过在室外开展木垛燃烧试验, 搭建如图 7 所示的植被燃烧试验平台, 测量不同环境风对火焰倾角的影响, 来验证仿真结果的准确性。试验平台主要包括塔尺、金属板、植被垛、可见光摄像机。其中板电极通过耐火绝缘材料与地面隔开; 植被垛作为火源放置在板电极正中心; 试验过程通过两台水平布置的摄像机全程记录, 两台摄像机所布置位置均可无死角的记录整体火焰形态, 其中可见光相机的作用是通过后续对比试验录像中垂直布置的标尺来测量火焰高度。

试验过程中, 尽量保证温度、湿度及大气压强等与仿真参数一致, 以减少环境因素对试验结果产生的影响<sup>[23]</sup>。

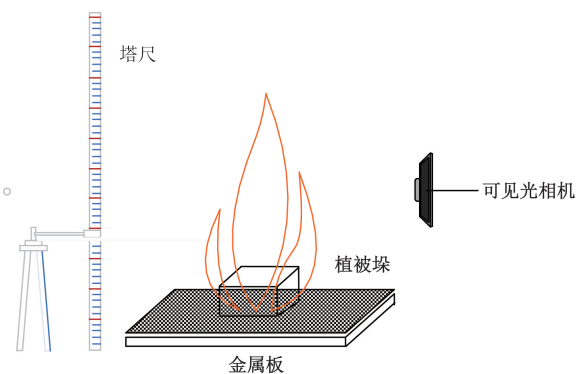


图 7 燃烧试验平台示意图

Fig. 7 Schematic diagram of combustion test platform

### 3.2 试验设备

(1)塔尺:塔尺可以用来准确测量长度、宽度和高度。它具体设计和功能可以根据其应用场景的不同有所变化,但它的基本功能通常围绕着测量、绘制、校准和检查,本文研究中选择量程为7 m的塔尺,如图8所示。

(2)植被垛:燃烧试验使用的植被为典型植被杉木,摆放方式如图9所示。植被垛的布置密度根据仿真中设置决定,尺寸约为1 m×1 m×0.6 m。

(3)可见光相机:为研究植被垛燃烧的不同时刻对应的火焰高度的变化,需直观、清晰地记录下火焰燃烧时的形态。索尼 DSC-RX10M4 是一款高性能的紧凑型数码相机,配备1英寸的Exmor RS CMOS传感器,提供高画质和出色的低光性能,它不仅拍摄帧率高达100帧,且能持续拍摄135 min,适合拍摄火焰这种快速变化的物体,提供了更大的后期视频处理灵活性。

(4)风速测量仪器:为时刻关注试验过程中风速的变化情况,需要用风速测量仪器对试验环境中

的风速进行实时测量。优利德(UNI-T)UT363是一款高精度的迷你型数字风速计,专为手持测量设计,适合各种环境下的风速检测,如图10所示。它具备快速响应和高准确度,可以实时显示风速数据,并提供多种单位选择,方便用户进行精确测量。

### 3.3 试验结果分析

试验选取了在无风情况下测得的火焰最大火焰高度以及在1~3 m/s的环境风速下火焰的倾角变化瞬间作为验证,试验过程中不同风速下火焰形态变化图如图11所示。仿真结果与试验结果对比情况如表3所示。

测得无风情况下杉木垛的最大火焰高度为4 m,与仿真结果差距不大。由表3可以发现火焰倾角的仿真结果与试验结果在风速为1 m/s时的误差要大于风速为2 m/s和3 m/s时的情况。这是因为在低风速时火焰的形态波动较大,此时火焰初始倾角较小,故导致二者误差较大;当风速逐渐变大,此时火焰的形态趋于稳定,变化幅度小,导致火焰倾角的变化也随之变小,故误差较小。

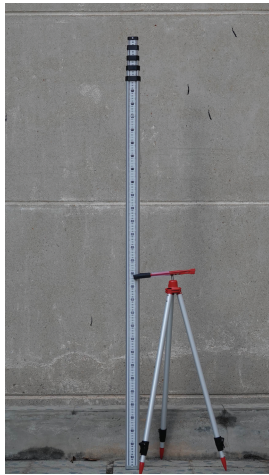


图8 塔尺实物图

Fig. 8 Tower ruler physical drawing



图9 杉木垛摆放实物图

Fig. 9 Physical picture of fir crib placement



图10 风速测量仪器

Fig. 10 Wind speed measuring instruments

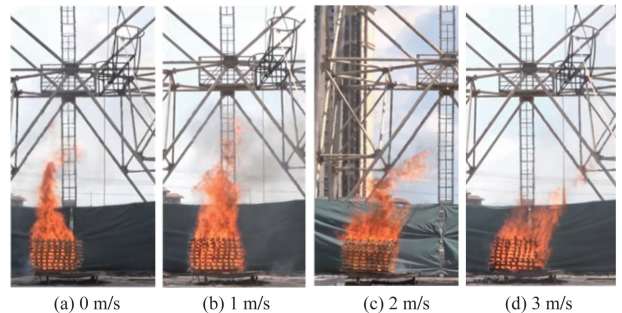


图11 不同风速下火焰形态变化图(试验)

Fig. 11 Flame pattern change under different wind speeds(experimental)

表3 仿真与试验结果对比表

Table 3 Comparison table of simulation and test results

风速 $S/(m \cdot s^{-1})$	火焰倾角 $\theta/(^\circ)$		差/%
	仿真	试验	
1	18.38	16.12	13.83
2	32.42	34.58	6.25
3	39.49	41.92	5.80

## 4 结论

(1)当风速处于低风速(1~2 m/s)时,杉木垛燃烧产生的火焰形态随风速的变化影响较大,火焰高度逐渐变低;当风速处于高风速(大于3 m/s)时,火焰形态几乎保持不变,火焰整体长度在竖直方向无较大变化,但在风速方向上逐渐变长。

(2)随着风速的变大,火焰倾角的变化也逐渐减小,故在输电线路山火防控方面,要特别关注中小型风速的情况。

(3)火焰水平偏移距离的变化随着风速的逐渐增大而减小,最后逐渐趋于稳定,输电线路走廊两侧植被的砍伐距离需在此基础上根据国家、行业和特定应用考虑一定安全裕度。

### 参 考 文 献

- [1] 孟沛或, 向往, 迟永宁, 等. 一种适用于大规模新能源远距离外送的分层混联输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3349-3363, 3661.  
Meng Peiyu, Xiang Wang, Chi Yongning, et al. A hierarchical LCC-MMC hybrid transmission system for transmitting large-scale renewable power over long-distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3349-3363, 3661.
- [2] 黄道春, 范建斌, 王平, 等. 极端环境条件下输变电设备空气间隙绝缘特性研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1892-1906.  
Huang Daochun, Fan Jianbin, Wang Ping. Current status and future prospects of transmission and transformation equipment air gap insulation characteristics under extreme natural environmental conditions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1892-1906.
- [3] 周恩泽, 龚博, 刘淑琴, 等. 南方电网架空线路因山火跳闸故障统计分析[J]. 广东电力, 2022, 35(4): 80-86.  
Zhou Enze, Gong Bo, Liu Shuqin, et al. Statistics and analysis on tripping fault of overhead transmission lines caused by mountain fires in China Southern Power Grids[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(4): 80-86.
- [4] 苑司坤, 李帅, 王津宇, 等. 输电线路山火监测预警技术研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(11): 31-35.  
Yuan Sikun, Li Shuai, Wang Zinyu, et al. Research on monitoring and early warning technology of transmission line mountain fire[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(11): 31-35.
- [5] 普子恒, 阮江军, 黄道春, 等. 火焰条件下间隙的直流电压击穿特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 453-459.  
Pu Ziheng, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Study on DC voltage breakdown characteristics of gap under fire conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 453-459.
- [6] 吴田, 阮江军, 胡毅, 等. 500 kV 输电线路的山火击穿特性及机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 163-170.  
Wu Tian, Ruan Jiangjun, Hu Yi, et al. Study on forest fire induced breakdown of 500 kV transmission line in terms of characteristics and mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 163-170.
- [7] 周恩泽, 王磊, 王彤, 等. 植被火条件下考虑导线不均匀温升的弧垂计算[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 6074-6080.  
Zhou Enze, Wang Lei, Wang Tong, et al. Sag calculation considering conductor's nonuniform temperature rise under vegetation fire condition[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 6074-6080.
- [8] Caroline J, Kristofer I, Madeline L, et al. Wildfire damage and contamination to private drinking water wells [J]. AWWA Water Science, 2023, 5(1): e1319.
- [9] 吉日伍呷, 田宏岭, 刘雅琴. 喜德县“6.4”山火泥石流灾害特征与防治建议[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 6880-6887.  
Jiri Wuga, Tian Hongling, Liu Yaqin. Characteristics of the “6.4” forest fire-induced debris flow in Xide County and disaster preventing advices [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(17): 6880-6887.
- [10] Vosloo H F, Hawes H, Britten A, et al. Vegetation fire characteristics and the potential impacts on overhead line performance[R]. Paris: CIGRE, 2019.
- [11] 黄道春, 黎鹏, 阮江军, 等. 山火引发输电线路间隙放电机理与击穿特性综述[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 622-632.  
Huang Daochun, Li Peng, Ruan Jiangjun, et al. Review on discharge mechanism and breakdown characteristics of transmission line gap under forest fire condition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 622-632.
- [12] 杨淳岚, 宁鑫, 徐会凯, 等. 电网山火监测及风险预警技术研究综述[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4765-4777.  
Yang Chunlan, Ning Xin, Xu Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4765-4777.
- [13] 殷浩洋, 刘东. 山火灾害下电网安全形态的事件驱动模型与动态推演方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 7911-7925.  
Yin Haoyang, Liu Dong. Event-driven model and dynamic deduction method of security morphological of power system under wildfires[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 7911-7925.
- [14] 梁振涛, 李思成, 陈旺海涛, 等. 室外风对火焰特征影响的数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(9): 939-941.  
Liang Zhentao, Li Sicheng, Chen Wanghaitao, et al. Numerical study of wind effects on the characteristics of flame[J]. Fire Science and Technology, 2013, 32(9): 939-941.
- [15] 黎鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 模拟山火条件下导线-板间隙击穿特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 195-201.  
Li Peng, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Influence factors analysis of the conductor-plane gap breakdown characteristic under simulation forest fire condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 195-201.
- [16] Rothermel R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[M]. Washington: Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US Department of Agriculture, 1972.
- [17] 宋洋, 姜红肖. 基于 Pyrosim 的航站楼火灾差异化喷淋系统仿真[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10998-11004.  
Song Yang, Jiang Hongxiao. Pyrosim-based simulation of differentiated sprinkler system for terminal fire[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10998-11004.

- [18] 陈晓楠, 李祖鑫, 谢建斌. 基于 PyroSim 模拟的木质结构古建筑火灾报警系统研究——以曹溪寺大殿为例[J]. 中国建筑装饰装修, 2022(17): 54-56.  
Chen Xiaonan, Li Zuxin, Xie Jianbin. Research on fire alarm system of wooden structure ancient buildings based on PyroSim simulation; taking Caoxi Temple Great Hall as an example [J]. Interior Architecture of China, 2022(17): 54-56.
- [19] 任贤达, 刘佳琼, 唐震, 等. 不同退火温度下输电导线疲劳性能的实验分析[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 214-218.  
Ren Xinda, Liu Jiaqiong, Tang Zhen et al. Experimental analysis of fatigue performance in transmission lines at different annealing temperatures [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4): 214-218.
- [20] 刘晓燕, 梁天水, 沈震亚, 等. 基于 Monte Carlo 的喷淋响应时间特性研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(11): 79-85.  
Liu Xiaoyan, Liang Tianshui, Shen Zhenya, et al. A Monte Carlo simulation on response time of sprinkler [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(11): 79-85.
- [21] 黄晓露, 谢元一, 荣建忠, 等. 木垛火热释放速率的试验研究[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(5): 484-486.  
Huang Xiaolu, Xie Yuanyi, Rong Jianzhong, et al. Experimental study of heat release rate of wood crib [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(5): 484-486.
- [22] 蒋申晨. 大容量储能与分布式电源接入后地区电网安全裕度计算[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
Jiang Shenchen. Study on the calculation of safety margin for regional network in consideration of large-capacity storage and distributed generation accessing [D]. Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [23] 黎鹏, 黄道春, 阮江军, 等. 全火焰条件下植被燃烧特征量对导线? 板间隙击穿特性的影响[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3250-3257.  
Li Peng, Huang Daochun, Ruan Jiangjun, et al. Influence of vegetation combustion features on breakdown characteristics of conductor-plane gap under full flame condition [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3250-3257.