

空气涡环对线缆火的远程吹熄机制研究

权赛南^{1,2}, 吕敬龙¹, 梁柏镰¹, 熊才溢¹, 黄鑫炎²

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641;

2. 香港理工大学智慧消防与城市韧性研究中心, 香港 999077)

摘要: 涡环是一种特殊的流体结构, 具有持续旋转和稳定传播的特点, 在远程灭火方面展现出良好的潜力. 以空气涡环为介质, 研究了其作用下线缆火的燃烧行为和熄火现象. 实验发现, 空气涡环的能量耗散比普通气流更低. 在相同出口面积和流速下, 空气涡环能在更远距离处更快吹熄火焰. 考虑到线缆火的蔓延行为, 涡环灭火时的火焰-涡环相对位置会不断变化, 进一步测定了空气涡环灭火效率的空间分布特性, 并分别基于涡核近场环量和火焰根部拉伸率构筑了涡环引发火焰熄灭的临界判据. 本研究可为发展基于空气涡环的远程清洁灭火技术提供思路.

关键词: 空气涡环; 线缆火; 远程灭火; 环量; 熄火极限

中图分类号: X932

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)03-0255-08

Remote Blow-Off Mechanism of Wire Fire by Air Vortex Ring

Quan Sainan^{1,2}, Lü Jinglong¹, Liang Bolian¹, Xiong Caiyi¹, Huang Xinyan²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou 510641, China; 2. Research Centre for Smart Urban Resilience and Firefighting,

The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Vortex ring, a special fluid pattern featured by a stable and continuously rotating and propagating structure, shows good potential for remote fire extinguishing. Using air vortex rings as the extinguishing medium, this study investigates the combustion behavior and extinction phenomena of wire fires. It was found that air vortex rings exhibit lower dissipation compared to conventional airflows. Under identical hole area and velocity, air vortex rings can blow out fire faster and at a greater distance. Considering the spreading behavior of wire fire, the relative position of flame-vortex constantly changes, and the spatial distribution characteristics of the extinguishing efficiency of air vortex rings are further determined. Based on the near-field circulation of the vortex core and the flame stretch rate, the critical extinction criteria for the influence of vortex rings on flame extinction are constructed. This study provides insights into the development of remote fire suppression technologies leveraging air vortex rings.

Keywords: air vortex ring; wire fires; remote firefighting; circulation; flame extinction limit

空气作为一种简单易得的介质, 已被广泛用于抑制火灾, 如利用风力灭火机吹灭野火^[1]和环境风气流

抑制线缆火^[2]. 然而, 大量实验发现, 普通气流抑制火焰是相对困难的. 一方面, 引发熄灭所需的临界风

收稿日期: 2024-10-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52006185); 广州市科技计划资助项目(2024A04J3263).

作者简介: 权赛南(1998—), 男, 博士研究生, 202310180594@mail.scut.edu.cn.

通信作者: 熊才溢, 男, 博士, 副教授, yexiong@scut.edu.cn.

速通常较大^[3],且需近距离持续作用于火焰^[4];另一方面,气流会因为摩擦而快速耗散,在远距离处不仅熄火能力降低,相反可能会因增强供氧而加大火势^[5].尽管如此,空气仍然是易于获取的灭火介质.可尝试改变空气流场的结构,减弱空间耗散,以提升其远距离灭火的能力.

涡环是一种自然界中广泛存在的流动现象,其结构主要由一条封闭的环形涡线组成,也称为“涡核”^[6-7].在涡线的任意截面上,存在着由环绕流体形成的小涡旋.由于结构特殊,涡环的运动有别于常规流动.首先,涡环的结构稳定,环绕气流会被吸附在涡线附近保持旋转,不易耗散.其次,环绕流体会将涡线与周围流体隔开,从而减少涡线与周围流体的摩擦,使涡环能远距离传播^[8-10].而空气作为常见的流体,自然也能用于构成涡环.鉴于空气涡环同样具备结构稳定和远距离传播的特点,其应具备良好的远距离灭火能力.此外,以空气涡环为灭火介质具备多方面优势:无需在火场附近提前储备,产生涡环的设备相对简单;由于涡环的远距离传播能力,其灭火安全距离更长;不会对环境造成污染,无清洁负担.

然而,目前围绕空涡环灭火的研究相对较少,仅有利用爆炸产生涡环扑灭天然气射流火^[11]和丙烷气体火^[12]的测试,但其中使用的爆炸方案存在危险,且仅探索了涡环扑灭大尺度火灾的能力,并未深入分析背后的科学机制.在较近的研究中^[13],作者利用薄膜系统生成了可控的空气涡环,并扑灭了丙醇池火和酒精灯火.研究表明,仅单个涡环就可实现瞬间灭火,最远灭火距离至少为 30 倍涡环出口直径,且灭火所需能量比目标火源能量低 2~3 个数量级,灭火效率较高.然而,该研究侧重从传热角度建立涡环灭火理论模型,故其实验始终保持涡环与燃料表面齐平,未考虑涡环-火焰相对空间位置的影响.鉴于涡环在行进后可能会以各种间距与火源(或燃料)接触,需探讨涡环-火焰相对位置对其灭火能力的影响.因此,本

文选择了线缆火这一典型火蔓延现象为灭火对象.线缆作为广泛应用的输电媒介,其绝缘层多为高聚物,常会由于短路、过载、外部受热等原因引发火灾^[14-15].在实验中以线缆火为目标具有以下优势:线缆不会对涡环流场产生过度遮挡干扰;线缆火可确保燃料与火焰均完整暴露在涡环影响下,更便于揭示火-涡相对位置的影响;线缆的热解燃烧同时涉及固、液、气三相,更贴近真实火灾燃料.

本文将通过实验研究线缆火在空气涡环作用下的燃烧和吹熄过程.实验中,涡环与火源的相对距离和高度都将不断改变,以帮助揭示空气涡环灭火效率的空间分布规律,并以此建立涡环远距离灭火的临界条件和有效判据.研究结果可为线缆及其他火灾的远程清洁抑制提供新思路.

1 实验设计

1.1 涡环的生成和标定

涡环是当流体从圆孔快速喷出或受其他物体扰流时,因流动边界层的剪切效应而形成的特殊结构,见图 1.根据涡环的产生原理^[16-17],设计了基于电磁活塞和柱状管的涡环生成系统,见图 2.电磁活塞是产生涡环的主要动力源,其工作流程为先由信号发生

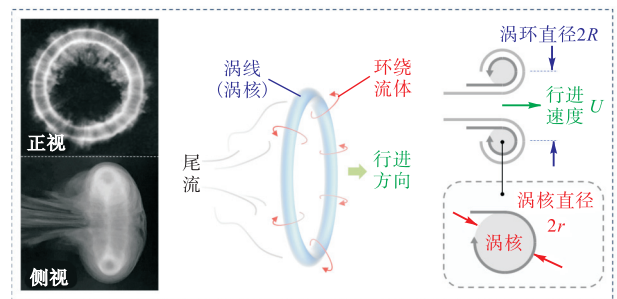


图 1 涡环结构示意图及其可直接测量参数
Fig.1 Structure of vortex ring and its directly measurable parameters

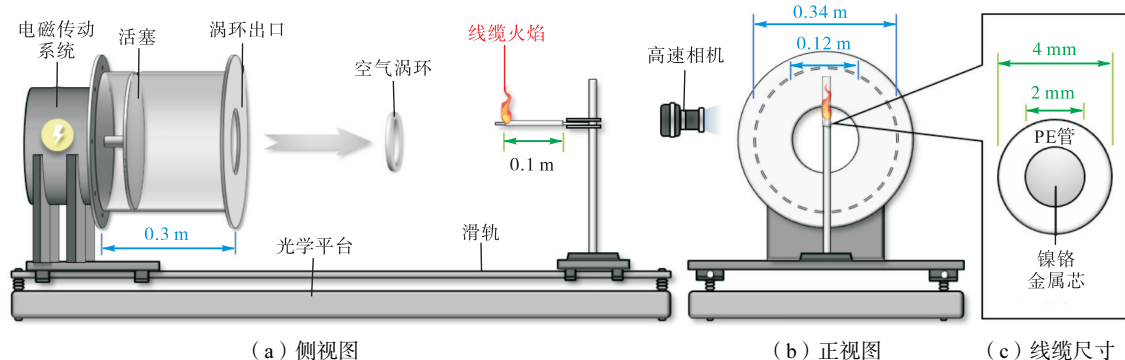


图 2 空气涡环灭火实验台
Fig.2 Experimental setup for fire suppression by air vortex ring

器产生频率为 0.1 Hz 的锯齿波电信号. 随后, 电信号传入电磁传动系统, 通过线圈改变磁场方向, 继而带动活塞运动. 最后, 经由活塞将柱状管内的空气由另一端开口向外推出, 利用固壁边界的瞬间消失产生剪切力驱使空气旋转, 从而产生空气涡环.

相比爆炸和弹性薄膜系统, 本文使用的装置可重复性更高, 产生的空气涡环更加稳定. 作为初步研究, 本文仅围绕水平行进的单个空气涡环开展测试. 同时, 为探究线缆火在涡环作用下的燃烧行为, 需确保涡核尺寸与火焰接近, 故选择涡核直径较小的薄型涡环作用于火焰. 为确保图 2 中活塞系统推出的空气形成涡环而非纯射流, 本文使用无量纲涡环形成时间 T^* ^[10,18] 控制涡环的生成过程, 见式(1):

$$T^* = \frac{U_p \cdot t}{2R_0} \left(\frac{R_p}{R_0} \right)^2 \quad (1)$$

式中: U_p 为活塞位移速度; t 为活塞位移时间; R_p 为柱状管内半径(即活塞半径); R_0 为柱状管开口半径. 这 4 个参数也是系统控制涡环生成过程的主要因素. 前人研究表明^[10], $T^* < 3$ 时活塞出气量将主要用于构成涡环主体, 且 T^* 值越小, 尾流的影响范围越小. 基于此, 本文使用如图 2(a) 所示的 0.3 m 长柱状管产生涡环, 其内径 $R_p = 0.17$ m, 出口半径 $R_0 = 0.06$ m, 所用活塞位移速度 $U_p = 0.4$ m/s, 运动时间 $t = 0.025$ s, 由式(1)可得 $T^* \approx 0.67$, 满足系统生成涡环的条件. 经测试, 该涡环生成装置的功耗约 40 W, 活塞单次推气量约为 0.9 L. 空气涡环初始行进速度 U_0 可由柱状管内外空气体积守恒计算得出, 见式(2), 其值约为 3.2 m/s.

$$R_0^2 \cdot U_0 = R_p^2 \cdot U_p \quad (2)$$

由于透明空气难以被拍摄, 本文在开展灭火实验前, 利用烟雾实现空气涡环的可视化, 并用高速相机记录了涡环的运动过程, 见图 3. 该涡环可行进约 3 m, 以涡环初始尺寸为参照, 其行进距离约为 30 倍涡环初始直径. 需说明, 由于示踪烟雾会逐渐变淡从而难以被标定, 因此本文仅对行进距离 1.5 m 内的空气涡环进行测量并用于灭火测试.

对于涡环结构, 其可直接测量的参数包括: 涡环半径 R 、涡核半径 r 和行进速度 U , 见图 1. 通过分析涡环运动视频, 上述参数沿涡环行进距离的分布如图 4 所示. 由图 4 可看出, 由于涡环在运动过程中不断卷吸周围流体, 其结构尺寸逐渐增大. 此外, 为直观展示空气涡环的稳定性, 图 4 给出了涡环行进速度沿行进距离的衰减曲线, 并与初速度 U_{w0} 分别约为 3 m/s 和 4 m/s 的两类环境风进行对比. 本文所

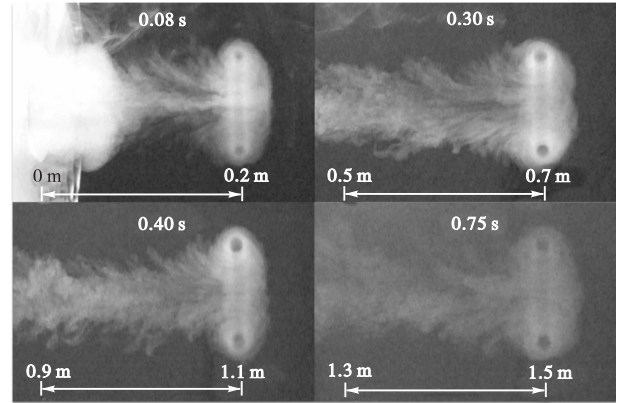
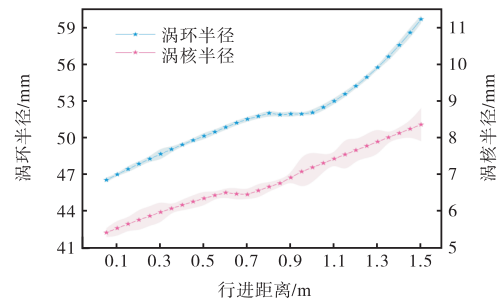
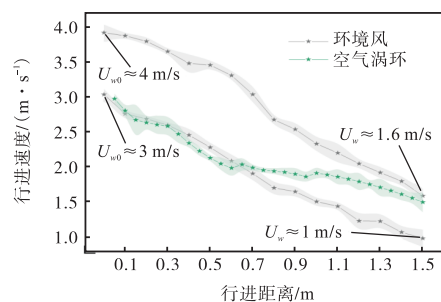


图 3 空气涡环运动过程可视化
Fig.3 Visualization of air vortex ring movement

用环境风以风机为动力源, 搭配长度 30 cm 且与涡环出口直径相同的风管产生, 管中布置阻尼网以保持层流, 并由精度为 ± 0.2 m/s 的热线风速仪测量风速. 所用两类环境风速 (3 m/s 和 4 m/s) 分别代表了在出口处和 1.5 m 处与涡环相同速度的普通气流. 可以看出, 环境风的整体速度衰减明显快于空气涡环. 换言之, 涡环流场的空间耗散更慢, 其结构更加稳定.



(a) 涡环及涡核半径



(b) 行进速度(与环境风对比)

图 4 空气涡环参数随行进距离的变化

Fig.4 Variation of air vortex ring parameters with travel distance

1.2 目标火焰及实验流程

本文选择水平线缆火蔓延为主要研究对象, 探索涡环与线缆火同向蔓延的场景, 暂不考虑管道侧壁对

涡环传播的影响. 实验所用线缆由镍铬合金线芯和外部包覆的聚乙烯 (PE) 绝缘层组成. 线缆长度 0.1 m、金属芯直径 2 mm、芯外包裹外径为 4 mm 的 PE 绝缘材料. 静止环境中点燃后, 可产生约 25 mm 高的浮力火焰, 水平火蔓延速率约 1.07 mm/s, 火焰功率约 426 W.

实验前, 线缆的一端由夹具固定, 并水平放置于涡环出口前方, 保持与柱状管同向. 由于涡环的特殊结构, 不同的涡核旋转方向会造成较大灭火差异. 为便于讨论, 本文仅对涡环顶部处的涡核灭火开展分析, 并建立以涡环出口中心为原点的 $x-y$ 坐标系, 见图 5.

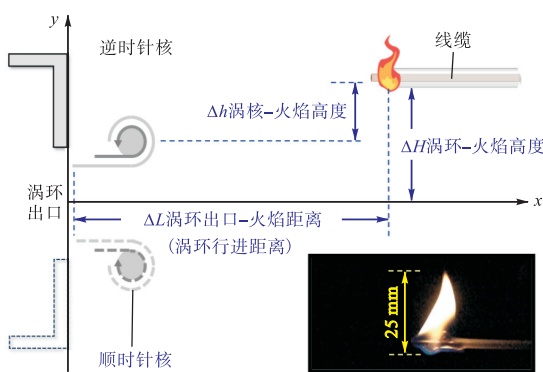


图 5 空气涡环-火焰位置示意
Fig.5 Positioning of air vortex ring and flame

在此平面区域内, 本文主要对不同的涡环-火焰横向相对距离 (x 坐标) 和纵向相对高度 (y 坐标) 开展测试. 其中, 涡环-火焰横向距离 (ΔL , 即涡环行进距离) 的测试范围为 $x \in [0.5 \text{ m}, 1.5 \text{ m}]$, 测试间隔 0.2 m. $x < 0.5 \text{ m}$ 的区域为涡环初始发展区域, 无法避免喷口动量影响, 因此不做分析. 涡环-火焰相对高度 (ΔH) 的范围为 $y \in [2 \text{ cm}, 8 \text{ cm}]$, 测试间隔 1 cm. $y < 2 \text{ cm}$ 的区域为涡环中心区域, 涡环尾流的干扰较大, 因此同样不做分析. 实验过程中, 线缆均从非固定端开始点火, 待其稳定蔓延 1 cm 后即开展灭火测试. 为减小误差, 各工况均重复测量 50 次以上. 灭火过程由高速相机记录.

2.1 涡环作用下的线缆火行为

图 6(a) 展示了在最远距离 $x = 1.5 \text{ m}$ 处, 涡核从火焰上方较近区域掠过时引发的熄火过程. 由于涡核持续旋转, 其在行进途中会不断卷吸周围的气体. 因此, 涡核会引发火焰整体旋转偏移, 并使火焰从顶部向根部逐渐减弱, 最终消失. 逐帧分析发现, 自涡环接触火焰到引发完全熄灭仅用时约 50 ms. 与之相似, 图 6(b) 展示了涡环从火焰下方近场掠过时的工况, 可观察到相近的火焰形变和熄灭. 值得一提的是, 在所有熄火工况中, 线缆火的根部会始终固定在燃料表面. 这与涡环吹灭固定火源^[13]时出现的火焰剥离和抬升存在明显差异.

若持续增大涡核-火焰的相对高度, 熄火现象则不会出现. 图 6(c) 展示了空气涡环从线缆下方较远

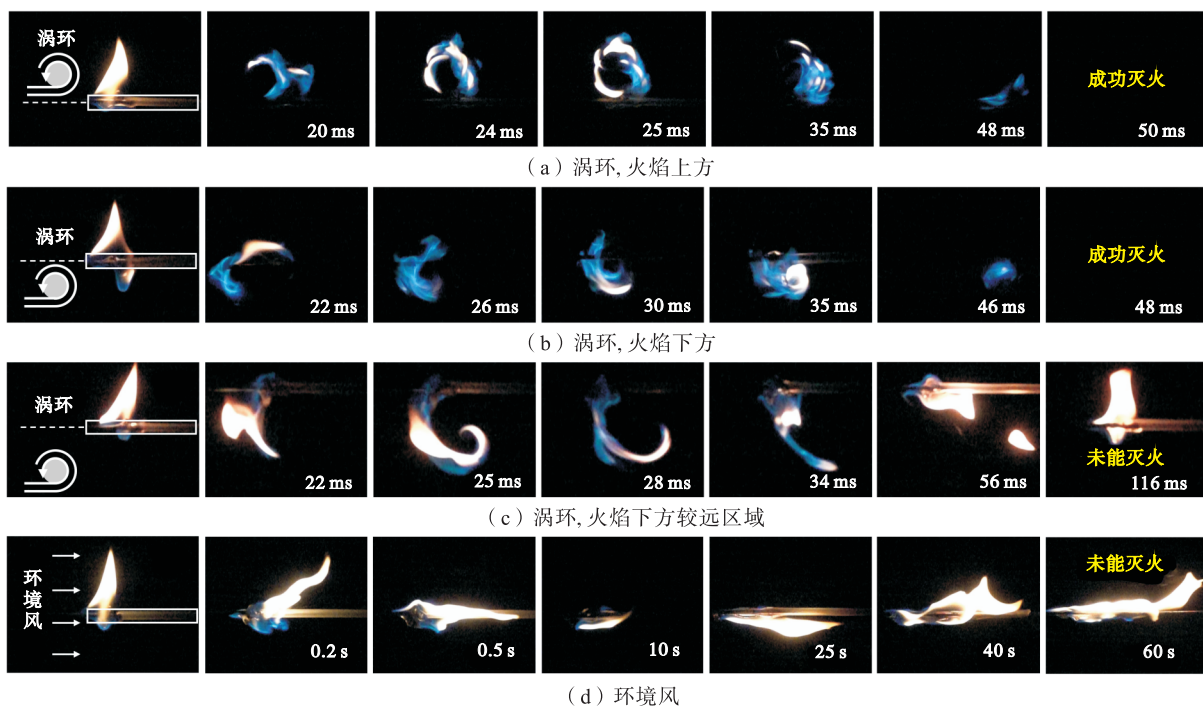


图 6 空气涡环及普通气流引发的线缆火燃烧行为变化
Fig.6 Variation in combustion behavior of wire fire induced by air vortex ring and normal airflow

区域掠过时的火焰状态. 可以看出, 火焰主体会被涡核及环绕气流卷曲拉伸, 然而, 远离涡核的火焰根部并没有出现明显的横向偏移. 当涡环吹远后, 火焰复归为初始稳定状态.

为直观对比空气涡环和环境风的区别, 图 6(d) 展示了相同初速度 ($U_{w0} \approx 3 \text{ m/s}$) 的环境风气流吹过相同位置处线缆火的情况. 可以看出, 由于同向火蔓延的存在, 气流会使火焰前倾并紧贴燃料预热区, 迫使燃料持续热解, 导致熄火难度增加. 经测试, 上述气流在 1.5 m 处无法有效灭火, 线缆会维持燃烧直至燃尽.

2.2 涡环灭火的空间特性

以上实验证实, 涡环-火焰的相对高度和距离都会对灭火结果产生影响. 基于此, 本文进一步将线缆火放置在涡环出口前方的不同位置处, 通过重复实验, 统计各处的灭火概率 P_{ex} 为^[19-20]

$$P_{\text{ex}} = \frac{N_{\text{ex}}}{N_{\text{tot}}} \quad (3)$$

式中: N_{ex} 为成功熄火次数, $N_{\text{tot}} = 50$ 为重复测量次数. 图 7 展示了 P_{ex} 随涡环-火焰高度和距离的整体变化. 可以发现, 涡环行进距离越远, 其有效灭火区域越高. 这是因为涡环在行进中会不断卷吸膨胀, 导致顶部涡核高度不断增加. 图 7 阴影部分为顶部涡核的移动轨迹. 轨迹上侧区域为涡核从火焰下方引发熄灭的工况; 与之对应, 轨迹下侧为涡核从火焰上方掠过时的工况. 可以看出, P_{ex} 较高处均集中在涡核附近, 表明涡环灭火与持续旋转的涡核密切相关. 火焰离涡核越近, 其被吹熄的概率越高.

借鉴前人对颗粒点火^[21]的分析, 本文定义灭火概率 $P_{\text{ex}} = 50\%$ 处为涡环的临界熄火位置, 并在图 7 中以红色虚线标注. 可以发现, 涡核从火焰上方和下方引发临界熄火的位置并不对称. 为详细展示, 图 8

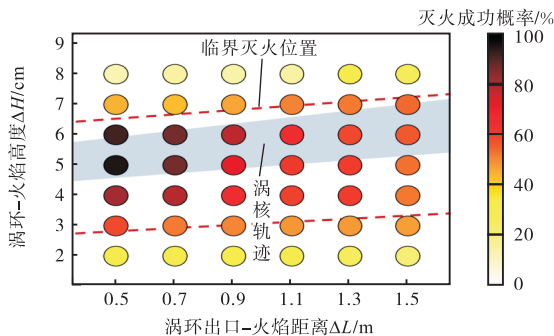


图 7 涡环顶部涡核在其行进区域内的熄火概率分布
Fig.7 Probability distribution of the top vortex core extinguishing the flame within its travel path

以涡核-火源的相对高度 Δh 为纵坐标, 展示了涡环临界熄火位置沿其行进距离的分布. 此处, $\Delta h = 0$ 表示与线缆齐平的高度. 换言之, 图 8 中的观察坐标系被放在了线缆上.

由图 8 可以看出, 当涡核从火焰上方掠过时, 其在距离线缆约 2.4 cm 的高度范围内均能灭火. 但当涡核从火焰下方掠过时, 需更靠近线缆 (约 1.3 cm 内) 才能灭火, 此高度范围仅约为上方的一半. 该现象说明, 涡核流经火焰上方时更容易灭火, 潜在原因包括: 受热浮力的影响, 燃料的热解产物集中于线缆上方, 涡核从线缆下方经过时难以卷吸全部热解可燃气体; 涡核从上方卷吸时, 热浮力为助力; 而当涡核从下方卷吸时, 热浮力为阻力; 当涡核高于火焰时, 由于涡核水平切向速度和涡环行进速度的叠加, 涡核作用于火焰的水平流速更大, 且涡环后方少量尾流的辅助吹熄影响无法避免.

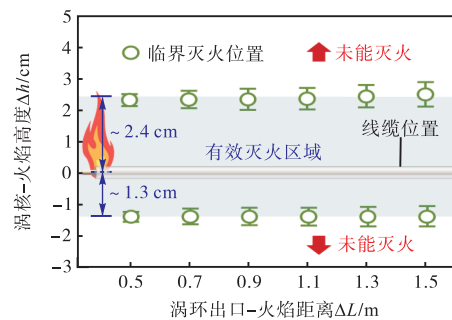


图 8 顶部涡核经过线缆上方和下方的临界灭火位置
Fig.8 Critical flame-extinction positions when the top vortex core passes above and below the wire

2.3 涡环灭火条件

吹熄现象可从 3 个角度进行解释: 火焰角度, 即分析火焰面的形变拉伸; 燃料角度, 即分析涡环引发对流冷却或卷吸稀释; 火焰-燃料交界处的特征时间分析, 即达姆科勒数分析. 鉴于涡环灭火过程较快, 测量方案尚不成熟, 本文仅尝试从火焰形变的角度开展分析.

对于火焰形变引发的熄火, 传统理论侧重计算火焰面的拉伸率^[22]. 然而, 涡环的流场在空间上是非均匀的, 仅靠火焰拉伸率难以描述涡核-火焰相对空间位置的影响. 因此, 本文首先选用环量 (Γ) 作为涡环灭火的分析判据. 根据定义, Γ 描述的是流速沿封闭曲线的积分. 换言之, Γ 等价于曲线所围区域内各点的涡量与微元面积的乘积之和, 可表征涡环的旋转强度, 因此更适用于描述有旋流场在指定区域内的综合

流动影响。

由于本文使用的涡环半径大于其涡核半径,因此可使用薄型涡环理论计算。在任意时刻,涡环近场区域的环量为

$$\Gamma = 2\pi\omega_{\max} \cdot \frac{\Delta H^3}{R} \cdot \cos h^{-1} \left[11.7 \left(\frac{\Delta H}{R} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中: ΔH 为线缆距涡环中心的垂直高度; R 为涡环半径,二者的比值即可表示涡环-火焰的纵向相对高度。而涡环-火焰横向距离的影响可由涡核中心的瞬时最大涡量 ω_{\max} 决定。由于涡环会在行进过程中逐渐耗散, ω_{\max} 也会逐渐衰减。对于薄型涡环^[8,23], ω_{\max} 的计算公式为

$$\omega_{\max} = \frac{4UR}{r^2} \cdot \left(\ln \frac{8R}{r} - \frac{1}{4} \right)^{-1} \quad (5)$$

由公式(5)可看出, ω_{\max} 仅依赖涡环半径 R 、涡核半径 r 和行进速度 U , 而这3个参数沿行进距离的分布均已在图4中预先标定,因此公式(5)可直接计算。图9展示了 ω_{\max} 沿行进距离的分布。

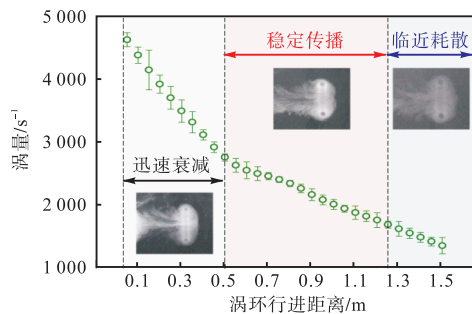


图9 涡核中心最大涡量沿涡环行进距离的变化

Fig.9 Variation of the maximum circulation of the vortex core with vortex ring travel distance

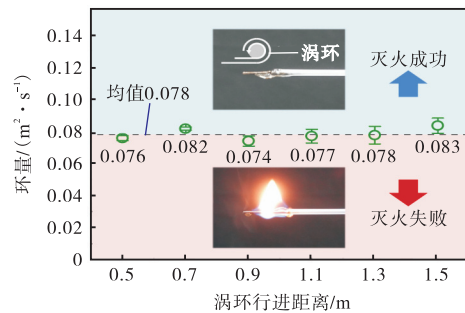
结合图8和图9中测定的临界灭火位置和 ω_{\max} , 根据公式(4)可计算出空气涡环在不同位置引发熄灭所需的临界环量 (Γ_{ex}), 结果如图10所示。当涡核从线缆火焰上方经过, 引发熄火所需临界环量 Γ_{ex} 接近常数, 为 $\Gamma_{\text{ex}} \approx 0.078$ 。而当涡核低于火焰时, 需要更高的旋转强度才能引发熄灭, 此时临界环量 $\Gamma_{\text{ex}} \approx 6.97$ 。涡环在火焰不同区域的临界熄火环量存在区别, 原因如前所述, 主要涉及到涡环环量与火焰浮力环量之间的协作和竞争。此外, 图10还表明无论涡核-火焰相对位置 (ΔL 和 Δh) 如何变化, Γ_{ex} 的计算值均较稳定。因此, Γ_{ex} 可作为涡环远程灭火的稳定判据。

鉴于在实际的远程灭火中, 涡环-火源的相对位

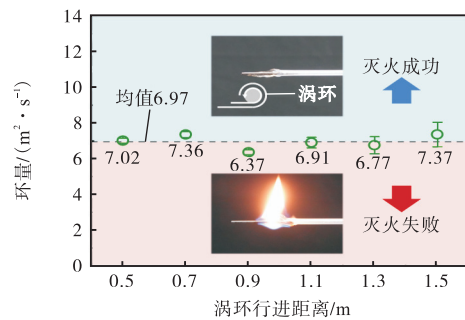
置难以准确控制, 因此本文依旧尝试以火焰拉伸率建立不考虑空间因素的涡环灭火判据。参考前人的线缆火吹熄研究^[24-25], 其临界熄火拉伸率 α 的计算公式为

$$\alpha = \frac{V_r}{r_s} \quad (6)$$

式中: $r_s = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$, 为线缆半径; V_r 为火焰偏离燃料的速度。在传统环境风作用下, V_r 可取为风速。但对于涡环流场, 身处其中的火焰各处偏移速度均不相同。鉴于涡核需贴近燃料表面才能成功引发熄火, 本文取 V_r 为线缆火焰根部在接触空气涡环时的同向偏移速度。需说明, 该速度难以通过理论计算得出。因此, 本文采用逐帧分析灭火过程视频的方法对 V_r 进行间接测量, 所得结果见图11。



(a) 涡核于线缆上方经过



(b) 涡核于线缆下方经过

图10 空气涡环在不同高度灭火所需的临界环量

Fig.10 Critical circulation of vortex ring caused flame extinction in different height

图11展示了不同行进距离下, 空气涡环以任意高度扑灭线缆火时的 α 。可以发现, 涡环在其前方任意空间位置引发灭火的临界拉伸率接近常量 1620 s^{-1} 。然而, 由于本文仅针对单一线缆火开展研究, 上述基于临界拉伸率的分析是否适用于更多类型的火焰, 相关探索仍有待进一步开展。

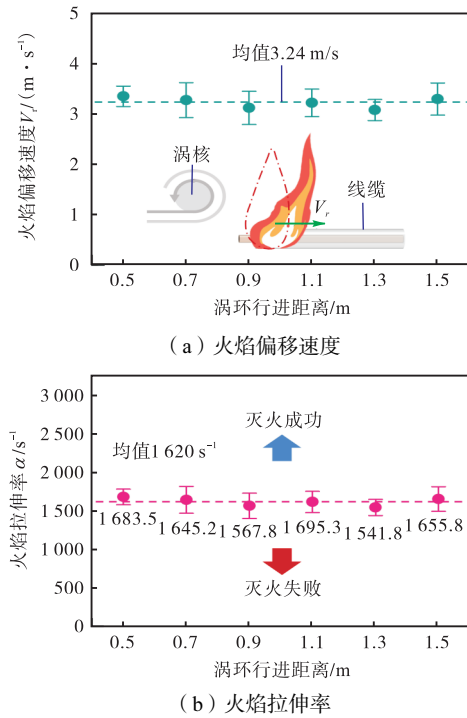


图 11 空气涡环作用下的线缆火焰偏移速度和临界拉伸率
Fig.11 Deflection velocity and critical stretch rate of flame under vortex ring action

3 结 论

本文通过实验,研究了线缆火在空气涡环远程影响下的燃烧行为和熄灭火机制.所用空气涡环由电磁式活塞稳定生成,其最大半径约 60 mm,涡核半径约 7 mm,为标准的薄型涡环.为集中分析,本文仅讨论涡环顶部涡核引发的灭火.所用线缆直径为 4 mm,考虑工况为较难扑灭的水平同向线缆火蔓延.由于同向线缆不会干扰涡环流动,本文进一步分析了空气涡环灭火效率在横向及纵向两个维度上的空间分布规律.

研究发现,空气涡环仅其涡核附近区域可有效灭火.由于涡环在行进过程中会卷吸膨胀,其有效灭火高度会随着行进距离增加.此外,由于火焰热浮力的存在,涡核从火焰上方经过时更容易引发熄火.相比之下,当涡核从火焰下方经过时,灭火所需的涡核-火焰相对高度仅为上方的一半.因此,本文基于涡核近场环量和火焰根部拉伸率,为涡环灭火分别构建了与火-涡位置有关及无关的数值判据,可在任意熄火区域保持常量.本研究有望为基于空气涡环的远距离清洁灭火技术提供理论支撑.

参考文献:

[1] Liao J J, Deng S H, Chen Q C, et al. Modeling and

design of ionic-wind-based fire extinguisher power driver system[J]. 2023 IEEE PEELS Students and Young Professionals Symposium, 2023, 57: 1-5.

[2] Jia S Y, Hu L H, Ma Y X, et al. Experimental study of downward flame spread and extinction over inclined electrical wire under horizontal wind[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 237: 111820.

[3] Lu Y, Huang X Y, Hu L H, et al. Concurrent flame spread and blow-off over horizontal thin electrical wires[J]. *Fire Technology*, 2019, 55(1): 193-209.

[4] 杨春梅, 马亚强, 王成, 等. 自走引流式森林风力灭火机设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(5): 56-63.

Yang Chunmei, Ma Yaqiang, Wang Cheng, et al. Design and experiment on self-propelled forest wind extinguisher[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(5): 56-63 (in Chinese).

[5] Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*[M]. Scotland: Wiley, 2011.

[6] Maxworthy T. The structure and stability of vortex rings[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 51: 15-32.

[7] Hu J C, Peterson S D. Vortex ring impingement on a wall with a coaxial aperture[J]. *Physical Review Fluids*, 2018, 3: 084701.

[8] Akhmetov D G. *Vortex Rings*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.

[9] Saffman P G. The velocity of viscous vortex rings[J]. *Studies in Applied Mathematics*, 1970, 4: 371-380.

[10] Gong C Q, Cheng Y, Jiang Y H. Investigation into fresh air delivery performance with vortex ring[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885: 163874.

[11] Akhmetov D G, Tarasov V F. Extinguishing fire of a powerful gas gusher[J]. *Dynamics of Continuous Media*, 1983, 62: 3-10.

[12] Giannuzzi P M, Hargather M J, Doig G C. Explosive-driven shock wave and vortex ring interaction with a propane flame[J]. *Shock Waves*, 2016, 26(6): 851-857.

[13] Xiong C Y, Wang Z L, Huang X Y. Blow-off of diffusion flame by moving air vortex ring[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2024, 151: 111059.

- [14] Huang X Y, Nakamura Y. A Review of fundamental combustion phenomena in wire fires[J]. *Fire Technology*, 2020, 56(1): 315-360.
- [15] Fujita O, Nishizawa K, Ito K. Effect of low external flow on flame spread over polyethylene-insulated wire in microgravity[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29: 2545-2552.
- [16] Zhai C, Wang Y, Cao Z X, et al. Effect of thermal buoyancy on vortex ring air supply mode[J]. *Building and Environment*, 2022, 221: 109257.
- [17] Glezer A. The formation of vortex rings[J]. *Physics of Fluids*, 1988, 31: 3532-3542.
- [18] Cao Z X, Wang R P, Zhai C, et al. Flow characteristics and formation optimization of vortex ring air supply[J]. *Indoor Air*, 2022, 32: 13096.
- [19] 张玉, 张春寅, 王苏盼. 低速热颗粒点燃聚苯乙烯泡沫的实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(4): 460-466.
Zhang Yu, Zhang Chunyin, Wang Supan. Ignition of EPS foam by low-velocity hot particles[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(4): 460-466 (in Chinese).
- [20] 张春寅, 王凯锋, 王苏盼. 空心与实心热颗粒点燃松针燃料床实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2024, 30(3): 248-254.
Zhang Chunyin, Wang Kaifeng, Wang Supan. Ignition of pine needles fuel bed by hollow and solid hot particles [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(3): 248-254 (in Chinese).
- [21] Wang S P, Huang X Y, Chen H X, et al. Ignition of low-density expandable polystyrene foam by a hot particle[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 161: 4112-4118.
- [22] 张玉涛, 林国铖, 张园勃, 等. 横向声波作用下油池火焰燃烧行为模拟[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(4): 381-389.
Zhang Yutao, Lin Guocheng, Zhang Yuanbo, et al. Simulation of combustion behavior of pool flame under transverse acoustic wave[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(4): 381-389 (in Chinese).
- [23] Yershin S A. Theory of vortex rings. *Paradoxes in Aerohydrodynamics. Mathematical Engineering*[M]. Berlin: Springer, 2017, 309-350.
- [24] Lu Y, Huang X Y, Hu L H, et al. The interaction between fuel inclination and horizontal wind: Experimental study using thin wire[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37: 3809-3816.
- [25] Ma Y X, Zhang X L, Lu Y, et al. Effect of transverse flow on flame spread and extinction over polyethylene-insulated wires[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38: 4727-4735.