

船舶机舱复杂通风环境下小尺度油池火焰形态特性研究

刘昕梓, 李竣宇, 唐可欣, 马也, 庆林贵

江苏科技大学能源与动力学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2022年2月3日; 录用日期: 2022年3月3日; 发布日期: 2022年3月18日

摘要

现有船舶机舱火灾的研究中, 较多地忽略了舱内复杂通风对油池火燃烧的影响。本文基于具有复杂管路通风的受限空间, 以正庚烷为燃料, 针对直径为 $D = 10\text{ cm}$ 的小尺度圆形油池, 对 $0\sim 4.0\text{ m/s}$ 不同风速下的油池火燃烧特性进行实验研究, 并对其火焰形态进行了分析。研究表明: 油池火焰分为四个阶段, 不同风速下火焰的状态基本相同, 具体火焰形状的复杂程度与横向风速的大小呈现出正相关; 火焰的摆动与风速存在一定的耦合关系, 并呈现出了周期性, 其周期与风速呈二次方关系。

关键词

船舶机舱火灾, 油池火, 复杂通风, 火焰形态

Study on Flame Shape Characteristics of Small Scale Oil Pool in Complex Ventilation Environment of Ship Engine Room

Xinzi Liu, Junyu Li, Kexin Tang, Ye Ma, Lingui Qing

School of Energy and Power engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu

Received: Feb. 3rd, 2022; accepted: Mar. 3rd, 2022; published: Mar. 18th, 2022

Abstract

In the existing research on engine room fire of ships, most of them ignore the influence of complex ventilation in the cabin on the combustion of oil pool fire. In this paper, based on the confined space with complex pipe ventilation, with n-heptane as fuel, for the small-scale circular oil pool with di-

iameter $D = 10$ cm, the combustion characteristics of the oil pool under different wind speeds of 0~4.0 m/s were studied experimentally, and the flame morphology was analyzed. The results show that the flame of oil pool can be divided into four stages, and the flame status is basically the same under different wind speeds, but the complexity of the flame shape is positively correlated with the transverse wind speeds. There is a certain coupling relationship between the flame swing and the wind speed, and the flame swing shows a periodicity. The periodicity shows a quadratic relationship with the wind speed.

Keywords

Ship Engine Room Fire, The Oil Pool Fire, Complex Ventilation, The Flame Shape

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济全球化进程的不断推进,国内外船舶行业得到了快速发展,承载着世界货物流通重任的船舶日益增多,为满足不同要求,其内部结构日益复杂。然而在船舶运行过程中,由于机械设备故障、电气设备和系统故障、操作不当、油管破裂漏油等作用下,往往造成船舶起火的现象,如2017年5月名为HYDRA的杂货船机舱电路起火,2017年9月浮式储油船“Randgrid”号发生火灾,均造成巨大经济损失[1]。

国内外学者在油池尺寸[2][3][4]、环境温度[5]和环境压力[6]等不同条件下对油池火的燃烧特性、燃烧产物进行了广泛的研究。上述研究中均在简单通风环境下进行的研究,即空间相对宽敞、无风或微风条件。然而在现实中,燃油在燃烧时并非处于一个稳定的风速环境下。对于船舶机舱而言,狭窄密闭的空间和机舱管道通风共同形成了一个复杂的通风环境,船舶机舱起火在这样的通风环境下将有别于陆地上简单通风环境。与上述研究结果相比,有风和狭窄密闭空间的油池火燃烧,将改变油池火燃烧的环境氧气浓度,进而影响了油池火燃烧时的燃烧速率和火焰形态。童琳[7]、Tang [8]等人通过搭建不同尺寸的油池实验平台,分析了不同风速条件和不同油池直径的燃烧状况,建立了燃油燃烧速率与风速和油池尺寸的变化关系。谢宝超[9]分析了纵向通风对火灾热释放效率的影响,指出了隧道纵向通风对火灾的规模和蔓延对应关系。Tang 等人[10]研究了横风对隧道内近壁湍流扩散火焰的火焰长度和倾斜角的影响,指出了火焰长度和火焰倾角在不同位置和风速的变化规律。文献[11][12]通过对不同通风条件和船舱环境进行模拟研究,建立了一个数值模拟的单区模型,指出了船舱气流分布与火焰传播速率的关系。上述研究从燃油燃烧速率、热释放速率、蔓延影响、火焰长度和倾角等多角度阐述了不同风速和狭窄环境对油池火的影响。然而复杂结构通风以及机舱狭窄密闭空间对油池火的燃烧的影响却并未得到全面认识。

文章通过搭建复杂通风管路来模拟实际船舶通风环境,对舱内不同进风速度下火焰基本形态特征、火焰倾斜角、火焰摆动周期等进行规律研究,并建立不同进风速度与火焰几何特性之间的耦合关系。

2. 实验方案

实验主要包括包括油池、通风管路结构、电子天平、热电偶、无纸记录仪、红外热像仪、高速摄像机以及数据采集计算机。管路通风结构见图1中所示,实验油池选用直径为10 cm、内高为5 cm的小尺度圆形油池,以正庚烷为燃料,见图2所示,采用不同风速为条件,具体工况见表1。

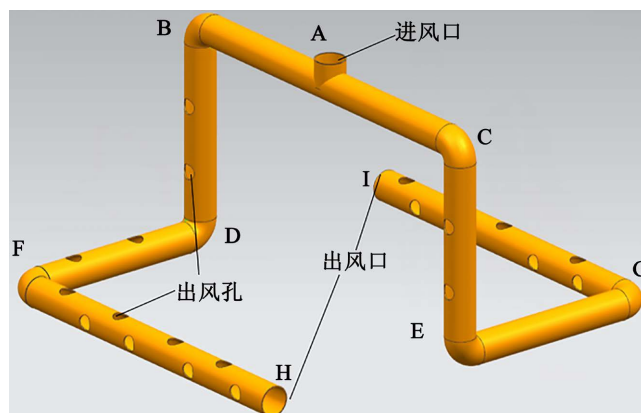


Figure 1. Complex pipeline ventilation structure

图 1. 复杂管路通风结构



Figure 2. Experimental oil pool

图 2. 实验油池

Table 1. Experimental conditions

表 1. 实验工况

序号	风速(m/s)	正庚烷(ml)	油池直径(cm)
1	0	78.5	10
2	0.8	78.5	10
3	1.6	78.5	10
4	2.4	78.5	10
5	3.2	78.5	10
6	4.0	78.5	10

实验过程中将油池置于船舶机舱模拟箱体底部中心的电子天平上，为保护电子天平和保证数据精准度，在电子天平和油池之间垫上防火棉以防火隔热。油池上方放置五根热电偶用于测量油池火温度，每根热电偶之间相隔 5 cm，下面第一根热电偶距离油池地面为 5 cm。箱体空间尺寸为 1.5 m × 1.5 m × 1 m，箱体右侧面留有观察口可用于拍摄和观察。箱体左侧面为钢化玻璃，便于拍摄。高速摄像机布置于箱体左侧，用于拍摄火焰形态视频。箱体右侧为红外摄像机，用于记录火焰表面温度。电子天平放置于油池下，可通过数据线连接计算机实时采集数据。热电偶与无纸记录仪连接记录火焰温度。实验通风由可调

节风速小型风机提供，经实验箱体正上方的通风管路入口经搭建好管路通入受限空间内，见图3所示为船舶机舱模拟受限空间结构图。

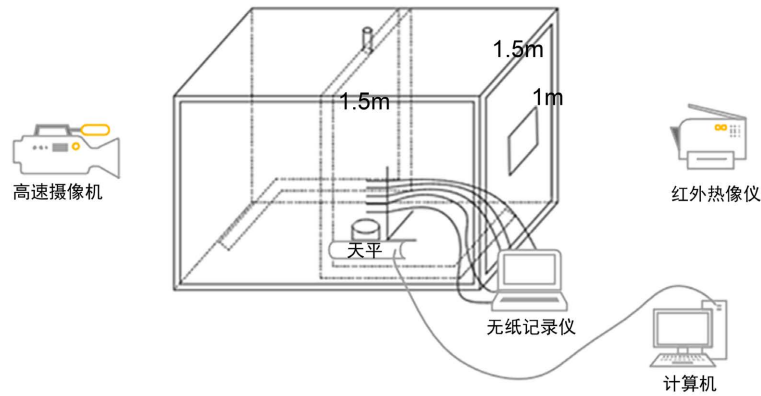


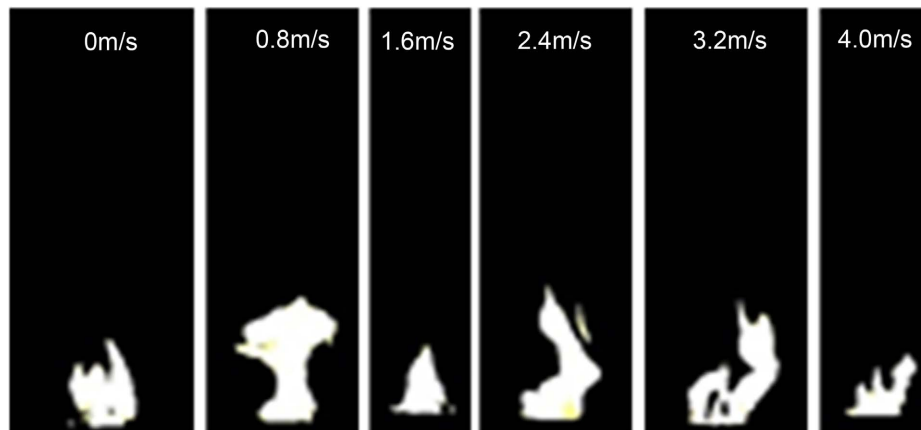
Figure 3. Overall structure of the experiment
图3. 实验总体结构图

3. 结果与分析

3.1. 火焰基本形态

油池中燃料被点燃后，通过池火热反馈吸收热量蒸发离开燃料表面，开始扩散，并且与周围空气混合发生反应，在油池表面和上方形成火焰。火焰形态反应油池火燃烧状态，通过对实验火焰形态的分析可以有效的分析火焰燃烧各阶段的特性。根据油池火焰燃料质量损失速率，可将池火发展分为四个阶段，即：点燃期、发展期、稳定期和衰减期。

见图4为不同风速下火焰四个时期状态图。观察四个阶段火焰特征发现：在第一阶段点燃时期，油池火刚开始点燃，油池火焰温度整体不高。此阶段火焰比较小但是稳定。火燃根部没有覆盖整个油池燃料表面。发展期阶段在点燃期阶段燃烧后，火焰高度迅速增加，火焰燃烧状态处于燃料质量损失速率从最小到最大增加阶段。油池火亮度增大，火焰中心发白，说明油池火正处于充分燃烧状态。第三阶段，此时火焰燃烧最为旺盛，处于稳定期阶段，整个油池火燃烧过程最高高度出现在这一时期；衰减阶段在剧烈燃烧后，燃料即将耗尽，没有燃料继续蒸发维持火焰。火焰迅速变小，火焰燃烧不像点燃时期稳定，火焰形态会出现间隙不连续的现象。



(a) 点燃期

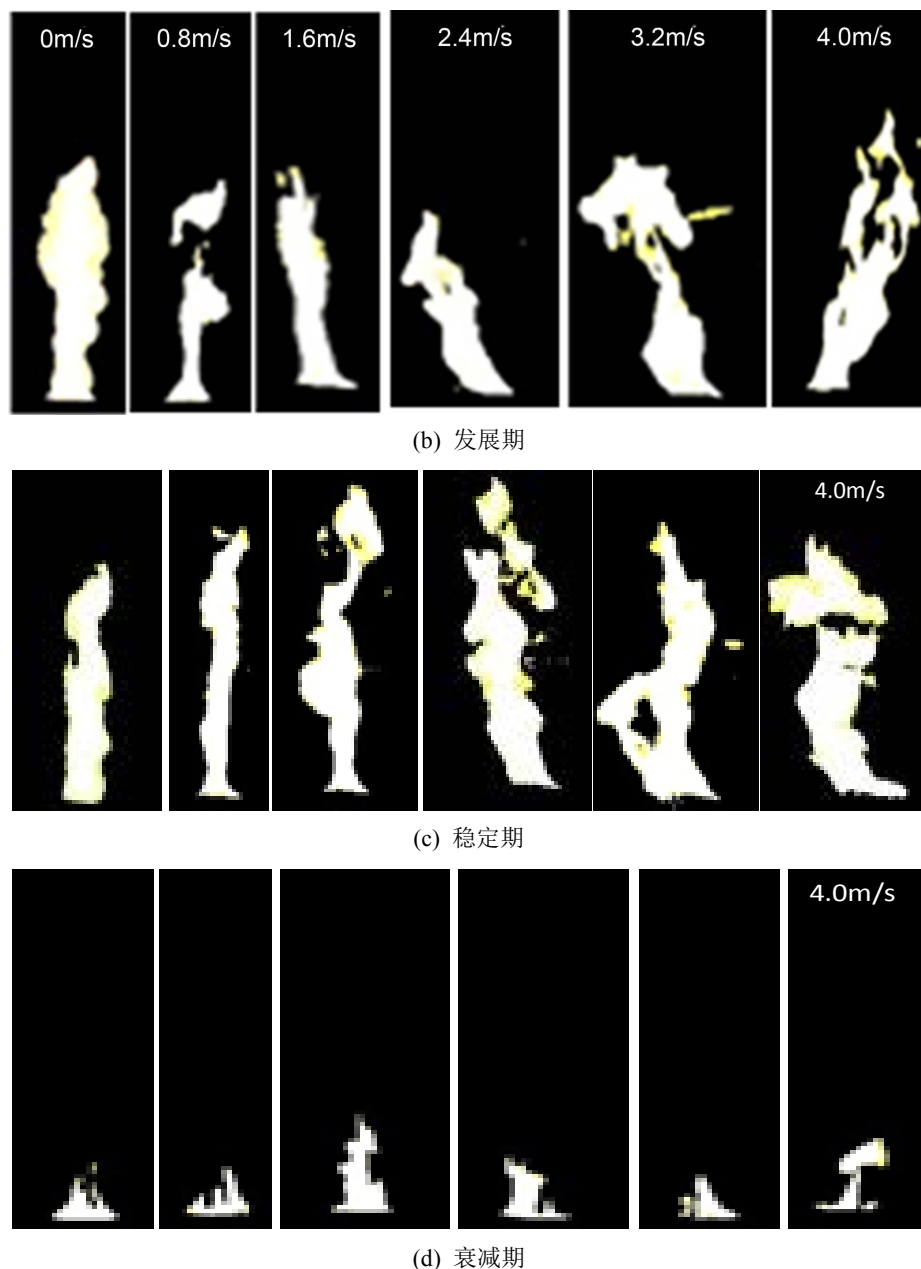


Figure 4. Flame morphology in different periods at different wind speeds
图 4. 不同风速下不同时期火焰形态图

由于燃料的耗尽，油池火燃烧突然衰减，火焰形状变小。形态与点燃期基本相似，但是，燃烧不如点燃期稳定，火焰间隙现象明显。各个风速条件下差异不明显，但在无通风条件下衰减期火焰不是因为燃料耗尽自然熄灭，而是由于受限空间内氧气不足，所以火焰熄灭时间提前。根据实验数据，在火焰熄灭后，风速为 0 m/s 条件下燃料剩余 2.08 g。所以，无风组实验火焰熄灭原因应该是：由于空间密闭，池火燃烧消耗氧气，空间内氧气不足以支持燃烧所致。

火焰形态在不同风速下出现如此差异可能是：因为无风条件下火焰热反馈主要是因为自然浮力产生的对流换热热反馈。而对受限空间内加管路通风，相当于通过增加强制对流，增加火焰热反馈，加强了空气卷吸和燃料蒸发后与空气的混合。

3.2. 不同风速对火焰基本状态和运动规律的影响

油池火是一种典型的在热浮力作用下的扩散火焰，因此重力以及横向风等外界气流均可能使火焰羽流产生不同频率不同程度的脉动和摆动火焰，羽流的脉动与摆动是火焰羽流运动状态的重要参数之一，也是火灾火焰的重要特征。

见图 5 和图 6 的分别为无横向风速和 0.8 m/s 横向风速下的火焰状态图。图中两种风速下，火焰形态呈现出一定规律的变换，均表现为火焰先逐渐向上延伸随后开始收缩。在无横向风速情况下，火焰羽流在纵向上产生一定频率的脉动，羽流整体并无明显倾斜，且火焰形状较为规则，边界凸起较少。因为此时在火焰火焰周围气流扰动主要由火焰羽流本身的波动以及重力而形成，形成的漩涡结构简单。在增加 0.8 m/s 的横向风速后，火焰羽流相较于无横向风速时形状更复杂多变，处在纵向脉动，且羽流发生了局部倾斜，但整体仍无明显倾斜。与无横向风相比，在横向风的干扰下，原本仅靠羽流本身以及重力维持的周期性涡流被打乱，形成新的周期性涡流，漩涡结构也变得复杂多变。即在横向风的作用下出现四种主要的旋涡结构，分别为反向旋转涡对、剪切层涡旋、马蹄形涡旋和尾迹涡旋。[13]



Figure 5. No transverse air (interval 1/10s)

图 5. 无横向风(间隔 1/10s)



Figure 6. 0.8 m/s transverse air (interval 1/10s)

图 6. 0.8 m/s 横向风(间隔 1/10s)

见图 7 为较大横向风速下的火焰形态。随着进一步增加横向风的强度，当风速为 1.6 m/s 时，火焰羽流在发生纵向脉动的同时，表现出明显的倾斜。对于纵向的脉动，当横向风速增加时，火焰羽流边界的混乱程度明显加重，边界上的小型涡流数目增加；羽流宽度整体也呈现增加趋势。这是由于随着风速的增加，增加了燃油的挥发速率，同时也使气态燃油与空气混合更加充分。在摆动幅度上，由于羽流受横向气流的冲击随着气流速度的增大，倾斜角度及倾斜的角度不对称性也呈现增加的趋势。

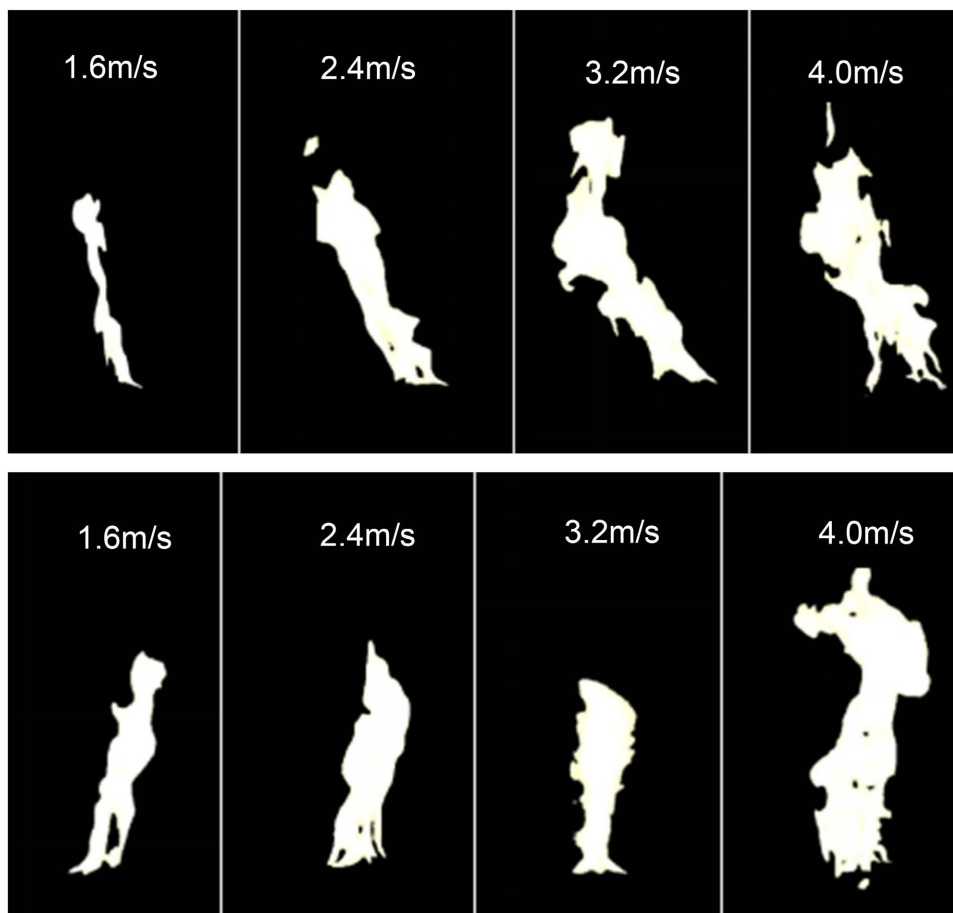


Figure 7. Corresponding shapes of maximum flame inclination angles at different wind speeds
图 7. 不同风速下火焰最大倾斜角下对应形状

在 1.6 m/s 的风速下, 火焰左右摆动时与竖直方向的最大夹角基本相同, 此时的横向风未破坏涡流关于竖直中心轴的对称性。在风速为 2.4 m/s、3.2 m/s、4.0 m/s 情况下, 左右最大夹角具有明显差距, 左摆时夹角大于右摆夹角, 当火焰摆动至下风向时, 火焰扫略范围相较于上风向更大。此时由于横向风的加大, 使产生左右摆动的涡流发生了向下风向的偏移, 且随着风速的增大, 涡流偏移越大, 从而使得火焰的摆动呈现不对称性。

见图 8 为火焰摆动的整个周期的形态, 此次火焰摆动周期在 11 s 左右。火焰呈现出周期性摆动主要是由于油池周围一定空间内的气旋影响而产生的, 由于热浮力以及其他外界力场的影响使得油池周围的空气形成小型气旋。这些气旋使得氧气以及挥发燃料呈现一定周期的流动, 从而使得火焰出现周期性摆动。但由于横向风速使得火焰周围流场相对复杂, 每次摆动的周期并不是一个定值。基于正弦函数拟合方法, 对整个火焰燃烧周期进行分析。见图 9 为火焰摆动周期与风速的拟合曲线图, 由于 0.8 m/s 风速下火焰摆动幅度太小, 不利于分析, 所以仅对 1.6 m/s、2.4 m/s、3.2 m/s、4.0 m/s 四个风速分析摆动频率, 见表 2。对于同一风速下, 火焰摆动频率也有较大的波动, 由于点燃期的火焰特点, 火焰矮小, 摆动幅度不明显导致所得频率误差较大。处于燃烧稳定期的火焰, 火焰高且明亮, 受横向气流冲击部分大, 能更好的展示影响效果。所以火焰后期频率的变化更能代表风速与频率的关系。根据火焰摆动频率随风速的变化趋势看出, 火焰摆动频率随风速的增加先增加再降低, 并符合三次方多项式函数拟合关系。



Figure 8. Flame swing state at wind speed of 1.6 m/s (1 s interval)

图 8. 风速为 1.6 m/s 时的火焰摆动状态(间隔 1 s)

Table 2. Flame swing frequency in different periods under different wind speeds (early stage: igniting stage—early stage of development stage late stage: middle stage of development stage—decay stage)

表 2. 不同风速下不同时期火焰摆动频率(前期: 点燃期 - 发展期初期, 后期: 发展期中期 - 衰减期)

风速 V(m/s)	前期周期 T(s)	后期周期 T(s)
1.6	12.66	9.13
2.4	11.84	9.41
3.2	190.3	9.49
4	18.43	7.56

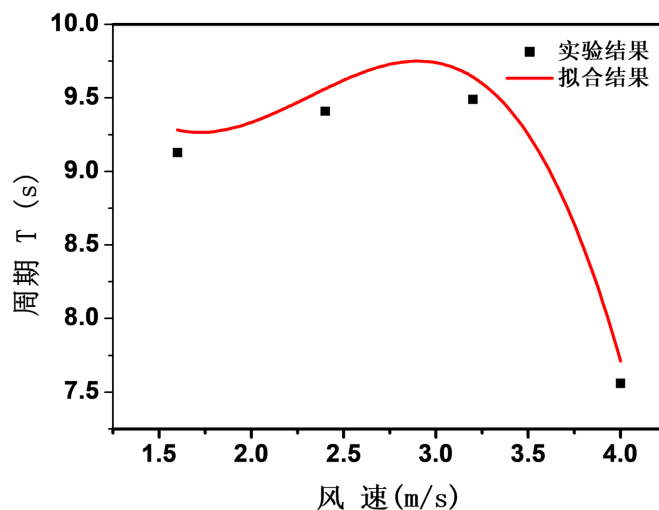


Figure 9. Fitting curve of flame swing period and wind speed

图 9. 火焰摆动周期与风速的拟合曲线图

$$T = -0.59v^3 + 4.09v^2 - 8.83v + 15.36 \quad (1)$$

式中 T 为火焰摆动周期, v 为横向风速。

另外, 根据拟合函数进行分析, 在横向风的作用下, 使得零风速下的气流旋涡被扰乱, 形成了能使火焰摆动的新型旋涡。在小风速下, 新型旋涡的半径以及旋涡中气体流速随横向风速的增加而变大, 由于旋涡半径增加速度相较于气体流速更大, 使得火焰周围气流更新速度变慢, 火焰摆动周期也就变长。当风速增加到一定临界风速时, 气体流速的速度增加速率大于旋涡半径的增加速率, 也就使得旋涡内气流更新速度开始增加, 火焰摆动速度因此也开始缩短。

4. 结论

文中以正庚烷为燃料, 针对不同横向风速, 不同时期的油池火焰状态进行实验研究。基于火焰形态学, 研究了火焰的基本形态即周期性摆动频率的变化特征, 结果如下:

1) 火焰羽流的形状由重力和横向风共同决定。在同一燃烧时期, 无横向风速时, 火焰羽流形状较为简单, 随着横向风速的增加, 火焰羽流形状的复杂程度和不可预测性也随之增加。

2) 在不同横向风的作用下, 火焰均出现了不同程度的摆动, 其中在较大风速下, 火焰摆动呈周期性变化特点。且变化周期与风速呈三次方函数关系。火焰摆动周期在风速为 2.9 m/s 左右时呈现最大值。

3) 文中实验研究主要针对小尺度的单一燃料的油池。当燃料变化后, 燃料的挥发性以及完全燃烧时所需氧化剂的量会随之改变。同时大尺度下的湍流火焰结构、火焰热辐射的反馈性质相较于小尺度油池也有所不同。以此其它条件下的油池火的状态以及摆动特性, 还需进一步的理论分析和实验研究。

参考文献

- [1] 魏承印. 船舶机舱密闭空间火灾燃烧与其环境耦合作用规律研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- [2] 王志刚. 典型液体池火燃烧特性及其烟气的细水雾幕控制方法研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [3] 许晓元, 刘暉亚, 李紫婷, 王鹏飞, 朱红亚. 不同直径食用油池火燃烧特性对比试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 48-52.
- [4] 孙浩. 环形油池火燃烧特性的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [5] 张怡. 柴油池火燃烧特性及热传递规律的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 辽宁: 东北大学, 2014.
- [6] 周志辉. 低气压环境对池火火行为及羽流特性的影响机理研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [7] 童琳. 通风条件航空煤油池火燃烧特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [8] Tang, F. Li, L.J., Zhu, K.J., Qiu, Z.W. and Tao, C.F. (2015) Experimental Study and Global Correlation on Burning rates and Flame Tilt Characteristics of Acetone Pool Fires under Cross Air Flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **87**, 369-375. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.019>
- [9] 谢宝超, 徐志胜. 隧道纵向通风对火灾规模和火灾蔓延的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(4): 451-456.
- [10] Tang, F., Li, L.j., Wang, Q. and Shi, Q. (2016) Effect of Cross-Wind on Near-Wall Buoyant Turbulent Diffusion Flame Length and Tilt. *Fuel*, **186**, 350-357. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.095>
- [11] Utiskul, Y. (1999) Theoretical and Experimental Study on Fully-Developed Compartment Fires. NIST GCR 07-907, Combustion Institute, San Diego, CA, USA, 97-102.
- [12] 杜晓芳, 孙明君. 船舶机舱通风与结构对其火灾特性的影响[J]. 民营科技, 2012(11): 39.
- [13] Pent, J.M. (2014) Combustion Instability Mechanism of a Reacting Jet in Cross Flow at Gas Turbine Operating Conditions. University of Central Florida Orlando, Florida.