

不同钝体对正庚烷油池火燃烧行为的影响研究

张 导, 林武强, 雷海莺, 张鹏程, 彭 望

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15日; 录用日期: 2022年3月15日; 发布日期: 2022年3月24日

摘 要

油池火源常用于船舶机舱火灾的研究, 而受机舱内大量设备的影响, 在液体油池的形成过程中常含有各类形状的钝体结构物, 这将极大地影响油池火焰的传热和流动特性。本文以正庚烷为火源, 分别对含有不同形状(矩形、三角形、圆形、正方形)钝体的圆形油池火焰燃烧特性开展实验研究。通过对燃油质量损失速率、火焰几何形态的分析, 研究结果表明钝体显著改变了油池火的燃烧行为。钝体延长了燃油质量消耗的时间, 且正方形钝体可使质量损失速率下降迅速。虽然不同钝体下油池火焰均存在抬升-下降周期振荡行为, 但其振荡频率却与钝体当量直径间存在三次方的非线性变化关系。

关键词

油池火, 钝体, 质量损失速率, 振荡频率

Effect of Different Blunt Bodies on Combustion Behavior of N-Heptane Pool Fires

Dao Zhang, Wuqiang Lin, Haiying Lei, Pengcheng Zhang, Wang Peng

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

Received: Feb. 15th, 2022; accepted: Mar. 15th, 2022; published: Mar. 24th, 2022

Abstract

Oil basin fires are commonly used in the study of ship cabin fires, and the formation of liquid oil basin often contains various shapes of blunt body structures due to the large amount of equipment in the cabin, which will greatly affect the heat transfer and flow characteristics of oil basin flames. In this paper, the flame combustion characteristics of a circular pool containing different shapes (rectangular, triangular, circular and square) of obtuse structures were experimentally studied using n-heptane as the ignition source. By analyzing the fuel mass loss rate and flame geometry,

the results of the study showed that the obtuse body significantly changed the combustion behavior of the pool fire. Blunt bodies prolonged fuel mass depletion and square blunt body resulted in a rapid decrease in mass loss rate. Although the lifting-declining cycle oscillation behavior of the pool fire was observed for different obtuse bodies, the oscillation frequency was nonlinearly varied in a cubic manner with the equivalent diameter of the obtuse body.

Keywords

Pool Fire, Blunt Bodies, Mass Loss Rate, Oscillation Frequency

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

近年来, 船舶机舱火灾频繁发生, 严重危害船舶安全, 影响船舶正常运行, 如 2018 年桑吉号邮轮爆燃事故和中华富强轮失火, 造成了较大的人员伤亡和财产损失。油池火是各种可燃液体泄漏后形成的一种基本燃烧形式, 在船舶机舱火灾的研究中被广泛应用, 并分别重点从机舱复杂空间内的烟气填充运动与控制[1] [2] [3] [4]、机械通风对机舱火灾的影响[5]、空间内的温度及其热流场分布规律[6]、机舱火灾的发展特性及其特殊火行为[1] [2]、人员逃生等方面进行了研究[7] [8]。以上的研究成果, 主要体现了以油池为火源的船舶机舱整个空间内火灾演变及控制特性的研究。

但由于机舱内有各类高压供油管路及各种运转着的动力机械和电器设备等各类钝体, 则泄露的燃料在油池的形成过程中往往包含各类钝体, 这将极大地影响油池火焰的传热和流动特性。而现有的研究中, 较多的是对冷态场的钝体绕流进行研究, 火焰蔓延的钝体绕流则相关文献报道却较为有限。

本文以正庚烷为火源, 对含不同形状(矩形、三角形、圆形、正方形)钝体的圆形油池开展小尺度实验研究。通过对燃油质量损失、火焰几何形态的分析, 研究不同钝体对油池火焰燃烧特性的影响。

2. 实验方案

实验总体结构由测试系统和实验平台组成。本文的实验条件为大空间自然无风条件。如图 1 所示是

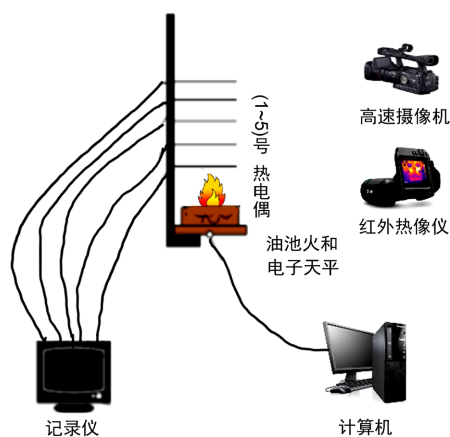


Figure 1. Overall layout of the experiment
图 1. 实验整体布置图

各设备的整体布置图，油池置于电子天平上方，油池中心部位放置不同形状的钝体。5 根热电偶间隔 5 cm 布置于油池上方。红外热像仪和高清摄像机位于油池侧面，分别用于测量火焰温度及记录油池火焰的发展过程。采用直径为 10 cm 的圆形油池，燃料体积均是 50 ml，并使用当量直径从 2 到 5.2 不等的不同形状钝体，具体实验工况如表 1 所示。

Table 1. Experimental operating conditions

表 1. 实验工况表

序号	燃料体积/ml	钝体形状	钝体高度/cm	钝体当量直径/cm	钝体底面积/cm ²
1	50	无钝体	0	0	0
2	50	正方形	21.5	5.2	27.04
3	50	矩形	18.5	4.2	21
4	50	三角形	21.5	3.06	12.1
5	50	圆形	32	2	12.6

电子天平通过数据线与计算机相连，天平上的显示屏可以实时显示燃油的质量变化。在倒入燃油前，电子天平要进行调零步骤。同时，为了避免在倾倒燃油的过程中将微量的燃油滴落到天平上，故在天平周围包裹了一层防火棉。红外热像仪和高清摄像机构成了实验的视频采集系统，预先将镜头对准油池，不断调整与油池的距离，确保镜头画面完整记录火焰变化。5 根热电偶分别布置在油池上方 5 cm 处、10 cm 处、15 cm 处和 25 cm 处，热电偶的热端分布在火焰中心线上。

3. 结果与分析

3.1. 燃油质量和燃料损失率

如图 2 为燃油质量随时间的变化曲线，从中可知在有钝体参与的情况下燃油质量随时间的消耗量显著降低。在燃烧时间约 210 s 附近，可将整个曲线分为两个部分：210 s 之前燃油质量随时间变化较为平

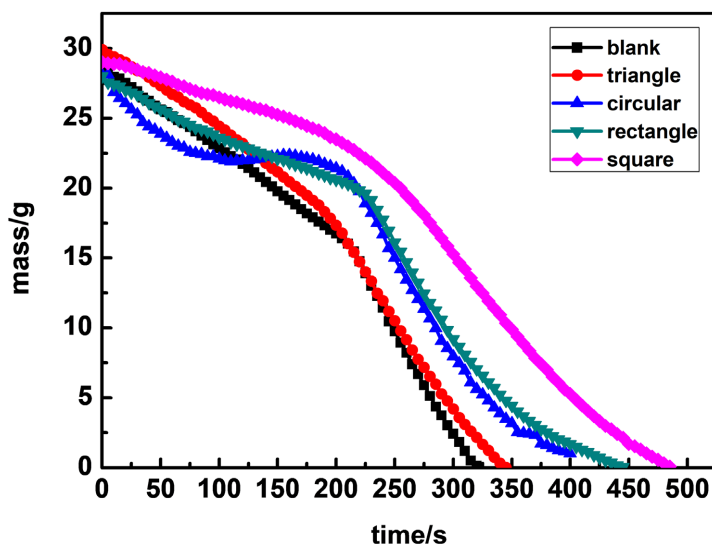


Figure 2. Variation curve of fuel quality over time

图 2. 燃油质量随时间的变化曲线图

缓, 210 s 之后曲线衰减较快。另由图 2 可知, 正方形钝体的减缓效果最为显著, 圆形钝体在第一部分有加剧燃烧的趋势。圆形钝体的第二部分与长方形钝体曲线较为重合。不同形状的钝体延迟效果不同。但都有延缓燃烧的效果, 造成延迟的原因可能是由于钝体形状、高度和底面积差异所致。另康泉胜[9]研究表明, 小尺度油池火焰的燃烧过程有预燃、稳定燃烧、沸腾燃烧以及衰减熄灭等四个典型燃烧阶段。由图 2 可知钝体的存在使得在四个时期的燃油质量损失都减少了, 可以认为钝体在油池火燃烧的所有阶段都有延长燃烧的作用。

图 3 为不同钝体下燃油质量损失速率变化曲线图。从中可知在 200 秒至 300 秒左右质量损失速率的剧烈上升可能是燃烧时燃料燃烧和壁温的反馈关系造成的。Chen 等人[10]和 Kang 等人[11]在研究燃料表面与油池壁面之间温度差异的结果中表明, 在初始燃烧阶段对流热量会由液体燃料转移到油池壁面, 但这种趋势在后面的燃烧阶段将出现反转现象。钢制表面导热系数远大于庚烷类物质, 导致开始阶段, 热量会大量被油池壁所吸收, 从而导致了燃料燃烧速率在第一阶段较小, 而在壁温高于燃料温度时, 反过来加热燃料, 使燃料温度上升, 燃烧速率上升。此外, 燃烧的油液在高温壁面上常常有高强度的沸腾燃烧现象, 较小的壁面过余温度都能造成极大的沸腾流[12], 易导致如图 3 中所示的燃烧质量损失速率的大幅上升。300 秒后质量损失速率的下降, 并进入了衰减熄灭阶段, 原因是燃料的大量消耗导致的热反馈不足。另外, 图 3 中不同钝体造成的质量损失速率的下降效果都很明显, 其中以正方形钝体最为出色, 较无钝体情况有大幅度降低。可知正方形钝体在其中具有最好的“延燃性”。

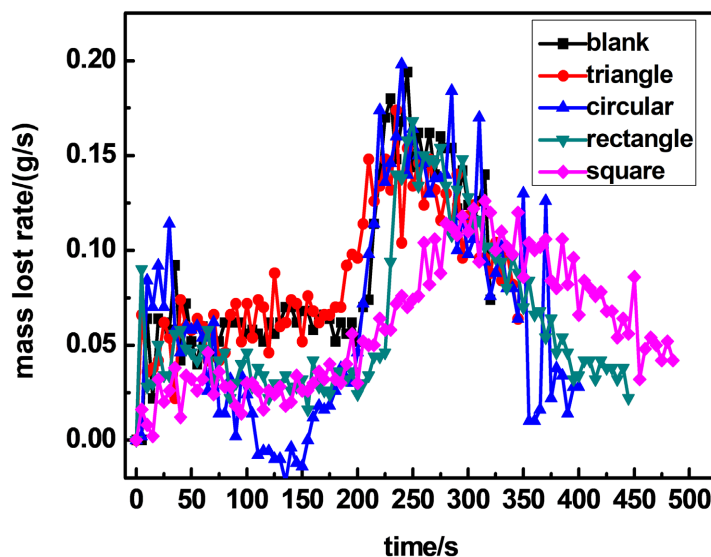


Figure 3. Mass loss rate curve

图 3. 质量损失速率曲线

3.2. 火焰几何形态

基于 MATLAB 的数字图像处理功能以及边缘分割法进行火焰图像的提取。如图 4 所示为正庚烷油池火在点燃阶段的火焰状态图(以无钝体工况和矩形工况的工况为例)。各工况下的火焰, 在点燃阶段都会出现突然的火焰升高, 然后迅速下降的周期性变化。在该阶段, 火焰形态有极为明显的变化。可以观察到火焰始终按照某一周期发生随机、不稳定的脉动, 火焰区域的高度、亮度和边缘形状不断发生变化。火焰虽然处于频闪状态(火焰按照周期性规律发生频率闪烁), 相邻的图像之间仍具有相似性。火焰均位于油池口附近, 发光的火焰区底部与燃料液面之间始终有一段距离, 可推断其为蒸汽区。从火焰形状上来

看, 火焰上方多表现为锥形, 而在油池内火焰底部则呈现类似于椭球的形状。从火焰边缘可以发现, 火焰边缘出现了许多尖角, 火焰尖角数量随时间的推移不断变化着。上述现象的出现, 也验证了上一节的燃油质量分析。由于燃油体积小, 所形成的燃油厚度很薄, 与快接近油池直径的内壁长度来说, 两者有着极大的差别, 火焰对周围空气的卷吸受到抑制, 油池底部区域产生的蒸汽不断升腾。当蒸汽上升到一定高度时, 满足了氧气浓度的需求, 便在油池口处发生了燃烧, 从而形成了高温蒸汽区的现象。由此可知, 高温蒸汽区形成的直接原因是由于边沿高度较大, 燃料蒸汽在油池底部(液面附近)无法与火焰卷吸的空气进行掺混进而燃烧, 从而滞留在火焰与燃料液面之间。而前人研究显示[13], 火焰底部存在的蒸汽区将直接影响油池热反馈机制, 从而改变燃烧速率。随着边沿高度不断升高, 油池侧壁面积逐渐增加, 油池外壁面与空气的接触面积扩大, 导致了油池冷壁效应的增强。在冷壁效应的作用下, 燃烧时的火焰温度降低, 从而减少了油池中液体燃料接收到的传导热通量。高温蒸汽区和冷壁效应的共同作用, 造成了火焰形态在点燃阶段升高-降低-升高的周期性变化。油池火火焰在点燃阶段燃烧平缓, 火焰颜色为白黄相接, 随时间的增加黄色褪去, 白色增加。此时正庚烷燃料未被充分加热, 其蒸发速率较低, 导致火焰高度与火焰宽度较低。

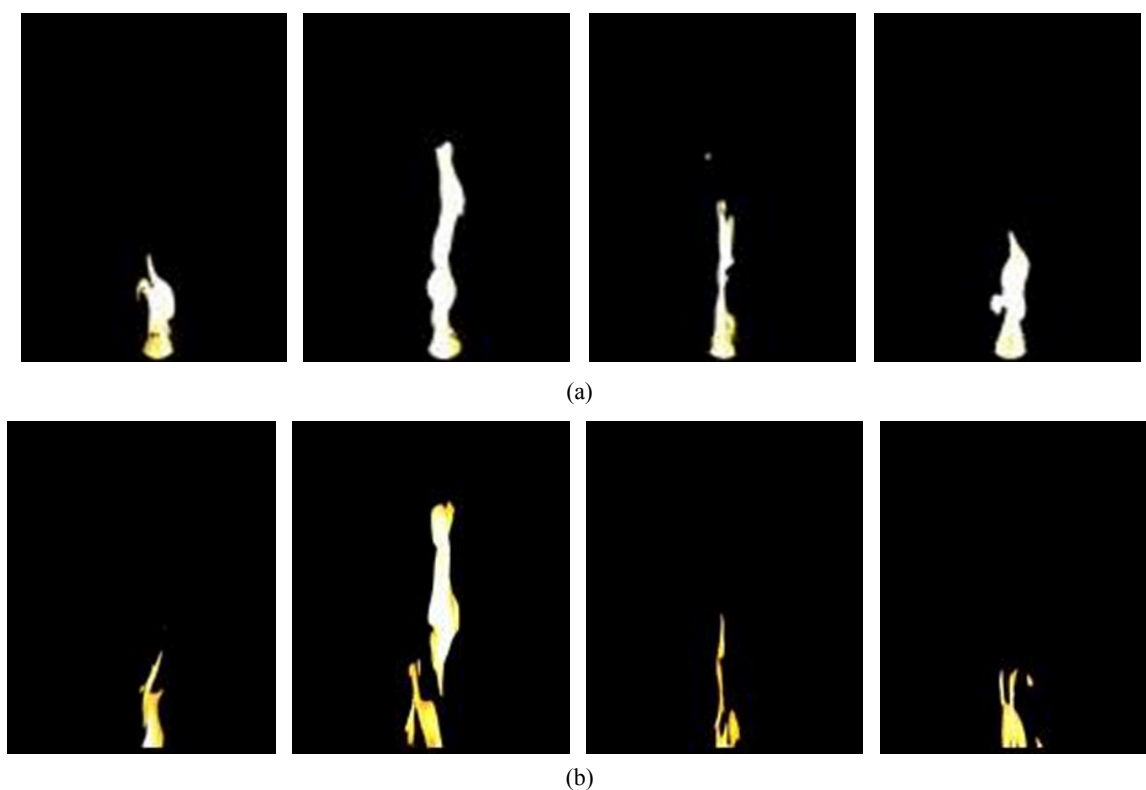


Figure 4. Transient diagram of flame state of oil pool without blunt body and with rectangular blunt body. (a) Periodic change of ignition stage (ignition stage without blunt body); (b) Periodic change of ignition stage (ignition stage of rectangular blunt body condition)

图 4. 无钝体及含矩形钝体油池火焰状态瞬时图。(a) 点燃阶段周期性变化(无钝体时点燃阶段); (b) 点燃阶段周期性变化(矩形钝体工况点燃阶段)

经过点燃阶段, 火焰团急速上涨, 在进入沸腾燃烧阶段时, 燃油燃烧程度剧烈, 火焰颜色呈现亮黄色或者白色。油池中燃料已经加热到沸点, 质量损失速率达到峰值。如图 5 所示为稳定沸腾时的火焰状态, 可以发现油池火的直径与底盘相似甚至略微超过, 火焰高度也明显高于点燃阶段的火焰高度。由于

燃烧速率不断升高，火焰为了维持燃烧需要消耗更多的氧气，从而提高了火焰的空气卷吸强度。因此，火焰将不断向上攀升，火焰根部在不断地进行收缩和膨胀，逐渐扩大火焰与空气的接触面积，达到卷吸更多氧气的效果，从而造成了火焰高度的增加。火焰中部被拉伸，导致中部火焰面比较光滑，火焰上部产生火焰团，火焰团具有一定的流体速度矢量的旋度，即具有一定方向的切应力，火焰团自身开始向外旋转，随着剪切力的持续作用，火焰团与火焰主体部分有分离的趋势。

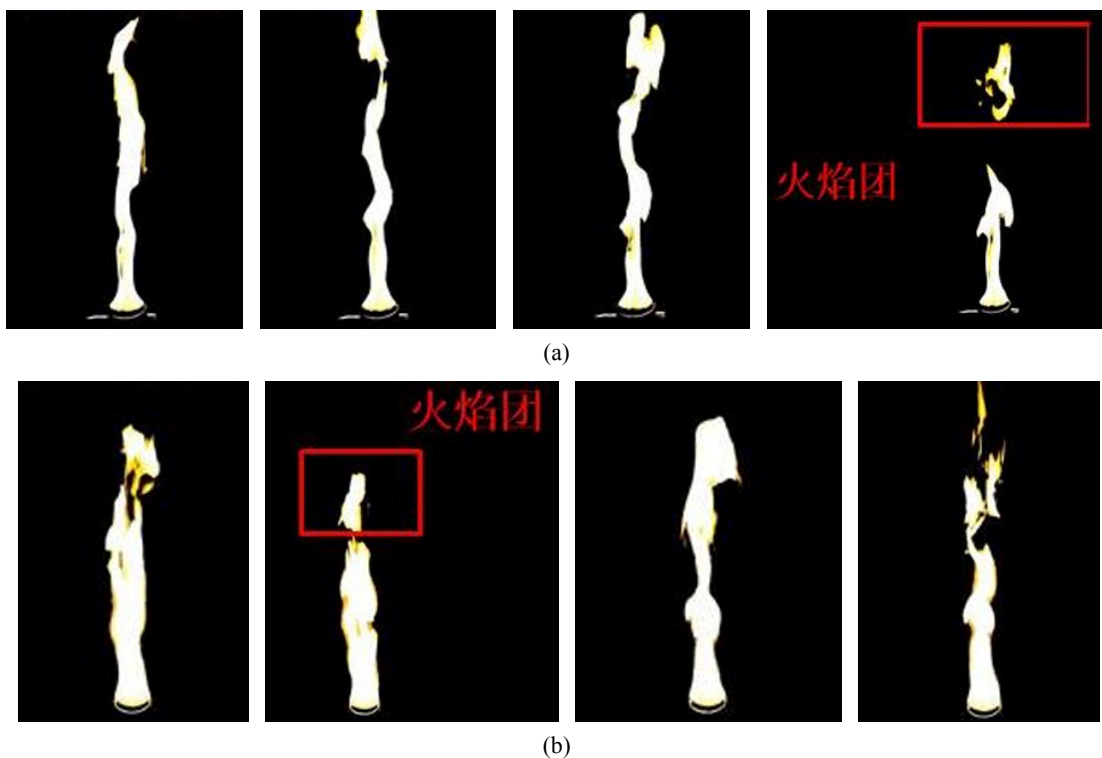
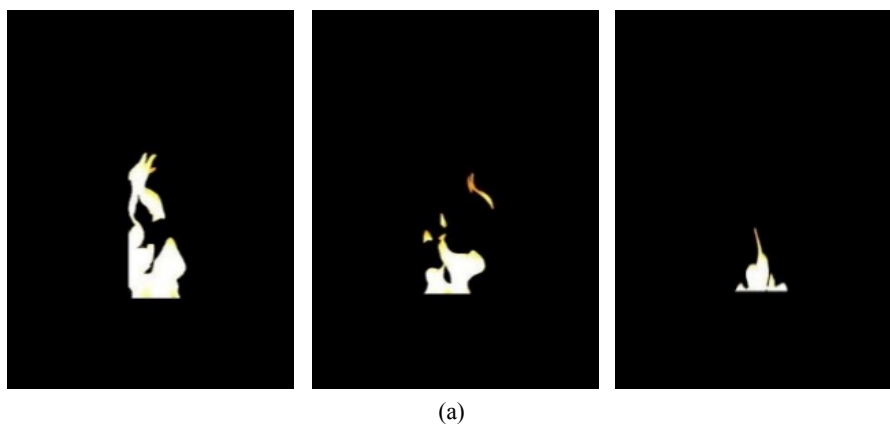


Figure 5. Flame state at steady boiling. (a) Stable boiling state under rectangular blunt body condition; (b) Stable boiling state without blunt body

图 5. 稳定沸腾时的火焰状态。(a) 矩形钝体工况时稳定沸腾状态；(b) 无钝体时稳定沸腾状态

图 6 为衰减阶段火焰瞬时状态。在衰弱阶段，正庚烷油池火的亮黄色火焰渐渐变成土黄色火焰。随着燃烧的进行，火焰的高度明显减小，这主要是由于油料燃烧殆尽。火焰的高度明显减小，形态较为萎缩，亮度明暗交替，直至熄灭。



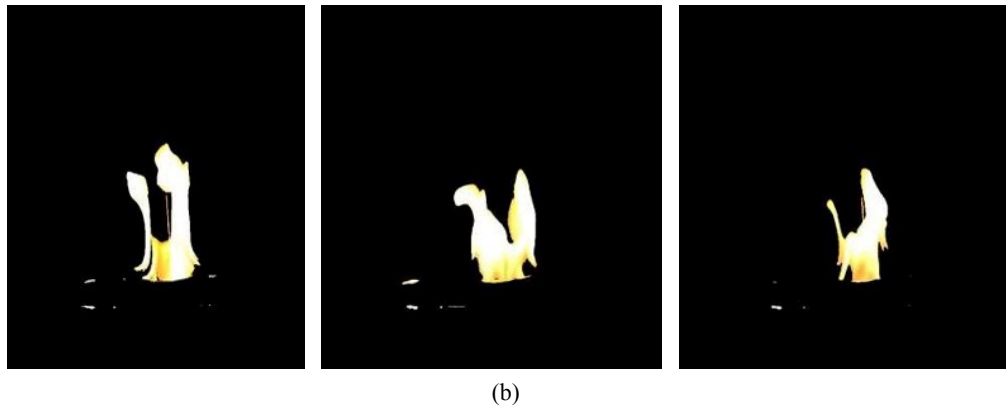


Figure 6. Flame state at decay stage. (a) Weak state in rectangular blunt body condition; (b) Weak state without blunt body
图 6. 衰弱阶段的火焰状态。(a) 矩形钝体工况时衰弱状态；(b) 无钝体时衰弱状态

3.3. 羽流中心线温度

羽流温度是表征油池火对外热危害的重要参数，刘[14]对羽流温度开展了研究，在研究中可将垂直方向上远离火源位置处的假设为：(a) 火羽流是浮力驱动的湍流流体；(b) 羽流边缘的卷吸速度与羽流局部垂直方向的流动存在比例关系；(c) 羽流形态假设为“帽型”分布，即羽流向上流动的速度和温升在羽流径向方向上相同，羽流之外为零。而这种假设是符合实验情况的。

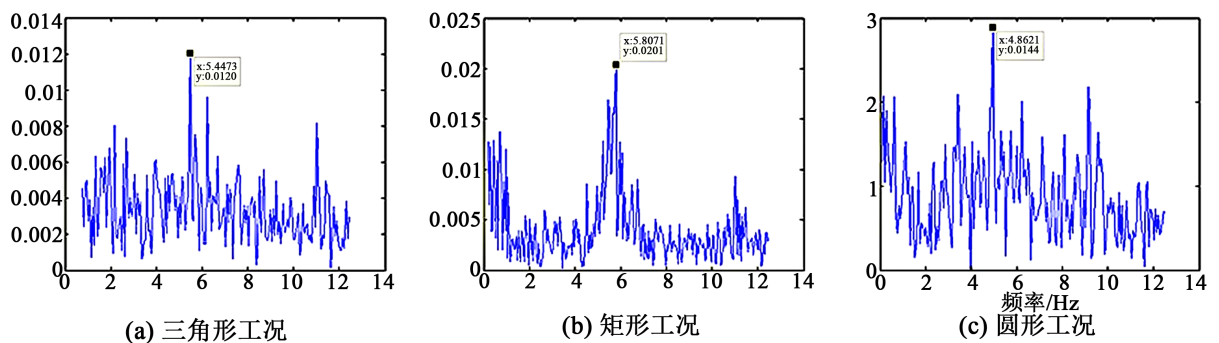
上述模型适用于点火源即火源面积很小的情况，本实验是小范围油池，符合假设的前提条件，虚点源是个假设的火羽流起源，虚点源的推算可以根据质量流率或羽流中心线的温度得到，之后就有了考虑利用虚点源并得到广泛验证的羽流中心线模型加以预测：

$$\Delta T = 9.1 \left(\frac{T_o}{2gc_p \rho_o^2} \right)^{1/3} Q_c^{2/3} (z - z_o)^{-5/3}$$

3.4. 火焰振荡频率

火焰振荡是由于火焰表面的由浮力产生的大涡沿着火焰移动而形成的，这种现象也称为开尔文 - 赫姆霍兹不稳定性[14]。火焰振荡会引起火焰结构的周期反复变化，利用 MATLAB 对图像进行相关性分析，再通过快速傅里叶变换，得到了不同工况下火焰的振荡频率。通过快速傅里叶变换，可以将图像从空间域转换到频率域，最终提取出火焰信号的频谱。

图 7 为不同工况下油池火焰周期振荡频谱曲线分布图。从中可知，不同钝体工况下，稳定期火焰的振荡频率并不相同。方形和矩形钝体工况下频率扰动较小。而圆形、三角形、无钝体工况下的振荡频率扰动较多。可知钝体对许多火焰特性造成了显著的影响。



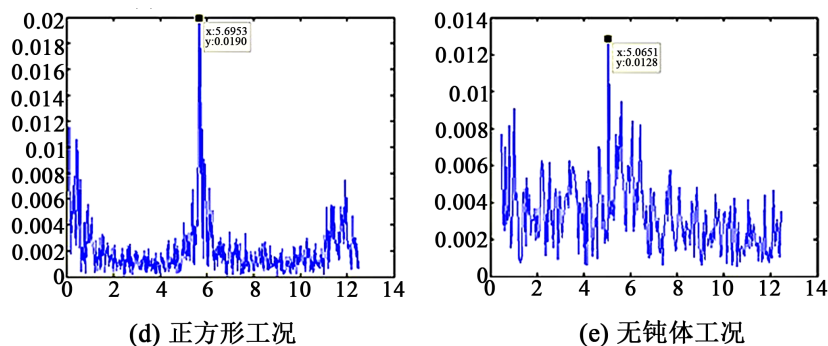


Figure 7. Spectrum curve of flame periodic oscillation under different working conditions
图 7. 不同工况下油池火焰周期振荡频谱曲线

许多研究者探索了油池直径对振荡频率的影响, 其中 Malalasek 给出了振荡频率和直径的关系为: $f = cd^{0.5}$ [15]。由于所有工况下的油池直径都相等, 根据该公式得 10 cm 油池火焰的振荡频率为 5.22 Hz。图 8 为不同工况下周期振荡频率随钝体当量直径变化关系, 从中可知不同工况下的振荡频率不符合 Malalasek 的结论。采用非线性拟合方法对实验数据进行拟合, 得如式(1)所示的火焰振荡频率与钝体当量直径之间的函数关系, 即: 火焰振荡频率和当量直径间具有三次多项式的关系

$$f = 5.064 - 0.687l + 0.424l^2 - 0.052l^3 \quad (1)$$

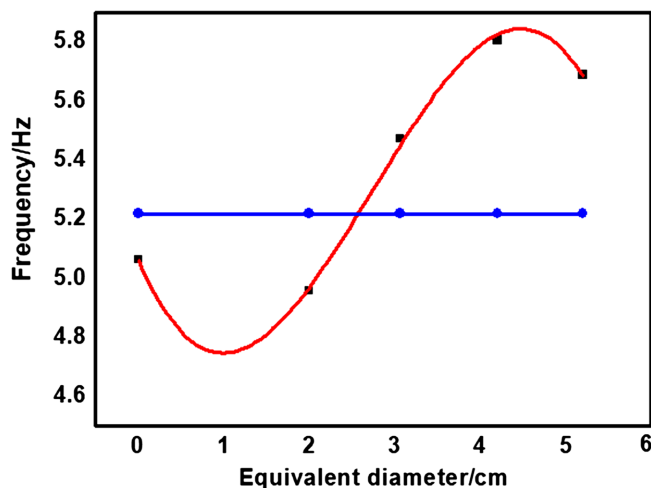


Figure 8. Periodic oscillation frequency versus equivalent diameter of blunt body
图 8. 周期振荡频率随钝体当量直径变化关系

4. 结论

本文通过实验研究了不同钝体对正庚烷油池火燃烧行为的影响, 从燃油质量变化、燃烧火焰形态角度进行了对比分析, 研究主要结论如下:

- 1) 不同钝体工况下正庚烷油池火的燃烧可分为 3 个阶段: 点燃阶段、稳定沸腾燃烧阶段和衰弱阶段, 并且燃油的质量变化损失速率与钝体当量直径间存在非线性变化关系;
- 2) 火焰形态在点燃阶段有着明显的升高 - 降低 - 升高的周期性变化, 稳定沸腾燃烧阶段能观察到明显的火焰卷吸周围空气的过程, 中部火焰被拉伸且较为光滑, 火焰上部会出现火焰团;
- 3) 不同钝体对火焰振荡频率产生影响, 火焰振荡频率与钝体当量直径存在三次多项式的耦合关系。

参考文献

- [1] 张迪. 机舱通风量对相邻舱室火灾烟气特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019. <https://doi.org/10.27060/d.cnki.gbcbu.2019.000560>
- [2] 吴晓伟, 贾佳, 陆守香, 陈潇. 机械通风对舰船机舱火灾烟气控制实验研究[J]. 船海工程, 2018, 47(6): 5-9.
- [3] Amado, A.F. (2000) Propagation of Fire Generated Smoke in Shipboard Spaces with Geometric Interferences. Naval Postgraduate School, Monterey.
- [4] Fay Terry, S., Mack Erin, C., *et al.* (2003) Amphibious Assault Ship Hangar Bay Smoke Removal Tests Conducted Onboard the U.S.S. Saipan (LHA-2) and U.S.S. Peleliu (LHA-5). Naval Air Warfare Center Weapons, China Lake.
- [5] Zhang, B.S., Zhang, J.Q., Wang, X.M., Lu, S.X, Li, C.H. and Chen, R.Y. (2016) Effects of Air Inlet Configuration on Forced-Ventilation Enclosure Fires on a Naval Ship. *Fire Technology*, **52**, 547-562. <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0473-2>
- [6] 杨枫, 浦金云, 李其修, 吴向君. 船舶封闭舱室池火灾温度分布特性[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(3): 61-65.
- [7] 苏石川, 刘景敏, 王亮, 张未军, 李光琛. 基于 Helbing 模型某化学品船机舱火灾人员逃生仿真研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26(4): 322-326.
- [8] Kim, W.-O. (2013) A Numerical Study on the Effects of the Smoke Exhaustion on Safe Evacuation in Emergency Situations during Fires on Ships. *Journal of Navigation and Port Research*, **37**, 85-89. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2013.37.1.85>
- [9] 康泉胜. 小尺度油池火非稳态燃烧特性及热反馈研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [10] Chen, B., Lu, S.X., Li, C.H., Kang, Q.S. and Lecoustre, V. (2011) Initial Fuel Temperature Effects on Burning Rate of Pool Fire. *Journal of Hazardous Materials*, **188**, 369-374. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.122>
- [11] Kang, Q.S., Lu, S.X. and Chen, B. (2010) Experimental Study on Burning Rate of Small Scale Heptane Pool Fires. *Chinese Science Bulletin*, **55**, 973-979. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0741-y>
- [12] Holman, J.P. (2002) Heat Transfer. Ninth Edition, McGraw-Hill, New York.
- [13] Bouhafid, A., Vantelon, J., Joulain, P., *et al.* (1989) On the Flame Structure at the Base of a Pool Fire. *Symposium (International) on Combustion*, **22**, 1291-1298. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(89\)80140-7](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(89)80140-7)
- [14] 刘春祥. 边缘高度影响下油池火燃烧行为研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021. <https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2021.000326>
- [15] Pan, K.L., Li, C.C., Juan, W.C., *et al.* (2009) Low-Frequency Oscillation of a Non-Premixed 125 Flame on a Bluff-Body Bumper. *Combustion Science and Technology*, **181**, 1217-1230. <https://doi.org/10.1080/00102200903074311>