

封闭空间油池火火焰振荡特性研究

黎昌海, 吴迎春, 陆守香, 陈兵, 胡靖, 袁满, 周洋

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 在内尺寸为 1 m(长)×1 m(宽)×0.75 m(高)的无开口封闭空间进行了庚烷池火燃烧实验, 重点研究了封闭空间内庚烷池火火焰的振荡行为特性, 油池尺寸包括 0.100, 0.141, 0.200 和 0.300 m 四种规格. 实验发现, 火焰根部面积的变化频率与火焰高度的振荡频率相等, 在此基础上提出了采用火焰根部面积的变化频率求取火焰振荡频率的方法, 并应用于具有顶棚射流的封闭空间池火火焰振荡频率的确定. 研究结果表明, 在燃烧过程中油池火焰振荡频率波动较小, 火焰振荡频率小于开放空间经验公式预测值, 火焰振荡频率与油池直径的关系拟合结果为 $f = 1.33D^{-0.5}$, 且对无量纲关系式 $St = 0.26Fr^{-0.532}$ 符合较好.

关键词: 油池火; 封闭空间; 火焰振荡

中图分类号: X932 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.04.009

Study on flame pulsation of pool fires in closed compartments

LI Changhai, WU Yingchun, LU Shouxiang, CHEN Bin, HU Jing, YUAN Man, ZHOU Yang

(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract: A series of experiments on heptane pool fires were conducted in a closed compartment without vents with the inner dimensions of 1 m (L) × 1 m (W) × 0.75 m (H), focusing on flame pulsation characteristics. Different pools with the diameters of 0.100, 0.141, 0.200 and 0.300 m were investigated. Based on the fact that pulsation frequency of flame bottom area equals that of flame height, a method using flame bottom area was proposed to determine flame pulsation frequency and applied to pool fires in closed compartments with ceiling jet flames. The results show that the variation of flame pulsation frequency is small, and the flame pulsation frequency is smaller than those predicted by empirical equations developed for burnings in free atmosphere while it fits well with the scaling relationship $St = 0.26 Fr^{-0.532}$, and the expression of $f = 1.33D^{-0.5}$ is appropriate in describing the relationship between the flame pulsation frequency and pool diameter.

Key words: pool fire; closed compartment; flame pulsation

0 引言

以船舶机舱为代表的一类船舶舱室的封闭性较

好, 通常没有垂直开口(墙开口)而只有水平开口(顶棚开口), 故通过关闭舱口以使得舱内火灾因缺氧而闷熄成为一种可行的灭火方法, 这也就是封舱灭火

收稿日期: 2009-08-13; 修回日期: 2009-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(50976109)和“2008年度中国科学院研究生科技创新与社会实践资助专项”资助.

作者简介: 黎昌海, 男, 1980年生, 博士生. 研究方向: 封闭空间动力学. E-mail: lxh@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 陆守香, 博士/教授. E-mail: sxlu@ustc.edu.cn

方法^[1].当封舱灭火采用时,舱内火灾将在一个无开口的封闭空间中进行,由于空间的封闭性,火灾对氧气的消耗、产物的生成以及能量的释放使得空间内气体成分、压力和温度等不断改变,而这些变化反过来会不断影响舱内火灾的燃烧行为.因此,无开口封闭空间内的火灾是一个非稳态的燃烧过程,这种火灾最主要的特点是缺乏外界氧气补给,基于常规建筑空间火灾发展起来的火灾理论或模型难以适用于无开口封闭空间火灾行为的分析和预测.

Sugawa等^[2-4]对通风严重受限的封闭空间进行了实验研究,他们的研究发现了通风严重受限封闭空间的池火燃烧速率和火焰形状都有别于开放空间或通风良好的一般建筑空间,甚至会出现一些独特的燃烧行为.Sugawa等的研究虽然为人们揭示了通风严重受限的封闭空间火灾的一些行为特性,但他们的研究没有涉及反映池火特性之一的火焰振荡频率,所进行实验的空间也依然以有垂直开口的建筑空间为背景,没有涉及只有顶棚水平开口或无开口的封闭空间.

由于火焰的振荡对燃烧速率、烟气卷吸、火焰高度、燃烧效率、火焰形状和有毒物质的产生有重要影响,前人对开放空间油池火的振荡行为进行了广泛研究.早在1928年Chamberlin等^[5]对火焰周期性脉动进行了研究.1984年Zukoski等^[6]观察到油池上方附近火焰直径周期性收缩而产生有规律上升火焰团,火焰呈现强烈的周期性振荡.前人^[7-14,19]的研究表明,自由燃烧的油池火焰的脉动频率在很大范围内与油池直径的开方根成反比例关系: $f \propto D^{-1/2}$.Pagni^[15], Bejan^[16], Cetegen^[14,17], Malalasekera等^[18]分别提出了预测火焰振荡频率的经验关系式.Malalasekera等^[18]在其研究综述中指出油池火焰振荡频率对无量纲关系式 $St=0.52 \times Fr^{-0.505}$ 符合较好,发现燃料的出口流速与热释放速率对油池火焰振荡频率没有明显的联系.Gotoda等^[20]研究发现氧气浓度为19%~40%时甲烷池火火焰脉动频率随氧气浓度增加而增加.Darabkhani等^[21]发现在0.20~1.6 MPa之间火焰脉动频率随着压力的增加而增加,同时发现火焰形状对压力很敏感.

然而人们还缺乏对封闭空间池火火焰振荡特性的研究和认识,封闭空间中的池火火焰对空气的卷吸作用会受到围护结构的影响,行为变化还可能受到封闭空间内不断变化的气体浓度和温度影响,可能表现出与自由空间火焰不一样的脉动或振荡规

律;并且,封闭空间中的池火火焰可能达到封闭空间顶部形成顶棚射流,此时无法用火焰高度随时间的变化来求取火焰振荡频率.本文在特定的无开口封闭空间内进行了不同大小的庚烷池火燃烧实验,提出了一种基于火焰图像的火焰频率确定方法,并对实验中的火焰振荡进行分析.

1 实验

实验在内尺寸为1.000 m(长)×1.000 m(宽)×0.750 m(高)的无开口封闭舱模型内进行,舱正面为5 mm厚的钢化玻璃,其余5面为5 mm的钢板,所有缝隙采用密封胶填充.实验采用正庚烷(C₇H₁₆)作为燃料,油池直径分别为0.100, 0.141, 0.200和0.300 m,油池深0.040 m,各次实验保持油池内燃料初始厚度均为12.8 mm,油池底面距离舱底面0.100 m.实验中将电子天平布置在封闭舱底面的中心位置,测量油池在燃烧过程中的质量变化,其精度为0.01 g,数据输出频率为1 Hz;采用烟气分析仪测量燃烧过程中池火根部附近O₂, CO和CO₂随时间的变化,采样点位置距离舱地面0.150 m,距离左、右侧面0.500 m,距离舱后壁面0.250 m,抽气采样频率为0.1 Hz.实验采用高速数码相机置于钢化玻璃舱壁前,以300FPS对燃烧过程中油池火焰变化进行了视频记录.每种规格油池实验均进行了两次.实验装置及测量布置见图1.

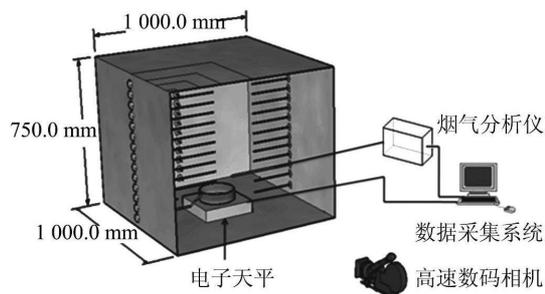


图1 实验装置示意图

Fig.1 Sketch of experiment setup

2 实验结果与分析

2.1 封闭空间火焰振荡现象

油池火焰根部火焰面呈现出周期性的收缩和膨胀是实验中观察到的最显著现象之一.如图2所示,火焰在一个振荡周期中通常可以分为四个典型阶段.火焰周期性振荡时,周期的某时刻火焰团在浮力作用下快速上升拉伸火焰,火焰团下面出现火焰柱,

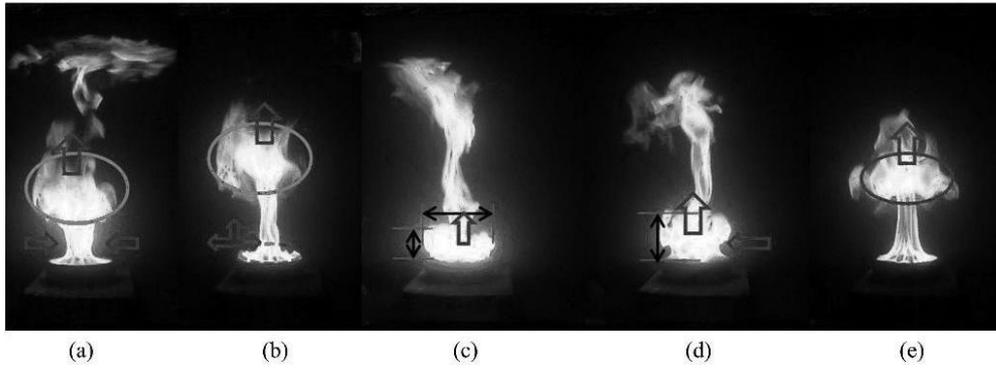


图 2 火焰周期振荡(油盘直径 0.200 m)

Fig.2 A period of flame pulsation (pool diameter 0.200 m)

在由于火焰卷吸而形成的涡的压缩作用下,火焰根部收缩,根部火焰柱面收缩变小,火焰面平稳、光滑,其直径小于火焰团直径和油池直径,如图 2(a);然后在靠近油池壁面内边缘处,出现一小火焰环,如图 2(b);小火焰环在上升的过程中,在横向上向油池壁内外两个方向蔓延膨胀,在离油池上边沿约 $0.5D$ (D 为油池直径)内充满火焰,小火焰环发展成为火焰团,火焰团宽度约为高度的两倍,在火焰团的上部,由于上一周期火焰拉升有一细长的火焰柱,如图 2(c);火焰团在浮力作用下迅速上升,卷吸空气在火焰根部产生对称涡,火焰团上部由于涡量而旋转,具有向油池外部翻滚的趋势,同时靠近油池上边沿的油池根部开始向内收缩,如图 2(d);在火焰上升的拉升作用与涡的压缩作用下,火焰进入下一个振荡周期,如图 2(e).在进行实验的小封闭空间中,直径为 $0.100\sim 0.200$ m 的油池火在燃烧进行到旺盛燃烧阶段后最有可能清楚观察到这种现象.

2.2 封闭空间火焰振荡频率

火焰振荡频率是表征火焰振荡的一个重要参数,一般利用特征参数和火焰图像求取.利用火焰高度(图像中火焰的最高点与最低点之间距离)周期性振荡求取火焰振荡频率是常用的方法^[22-23],而在封闭空间中,由于体积有限与火焰拉升增大,到达封闭空间顶部的火焰在顶部展开形成射流火焰,火焰高度受顶棚高度的限制,因此无法利用火焰高度的变化来求取其火焰振荡频率.而前人研究指出,火焰振荡是由于火焰卷吸作用在火焰根部形成的涡向上传播与脱落引起的,涡的脱落频率等于火焰振荡频率^[13-19],主要表现在竖直方向上火焰高度间歇振荡与水平方向上油池上方火焰根部(本文指油池上方一个油池直径高度内)周期性收缩或膨胀,因此火焰高度间歇振荡与水平方向上油池上方火焰根部面积的周期性变化是火焰振荡在火焰不同区域位置的不同体现.如图 3 所示,火焰高度周期振荡,封闭空间

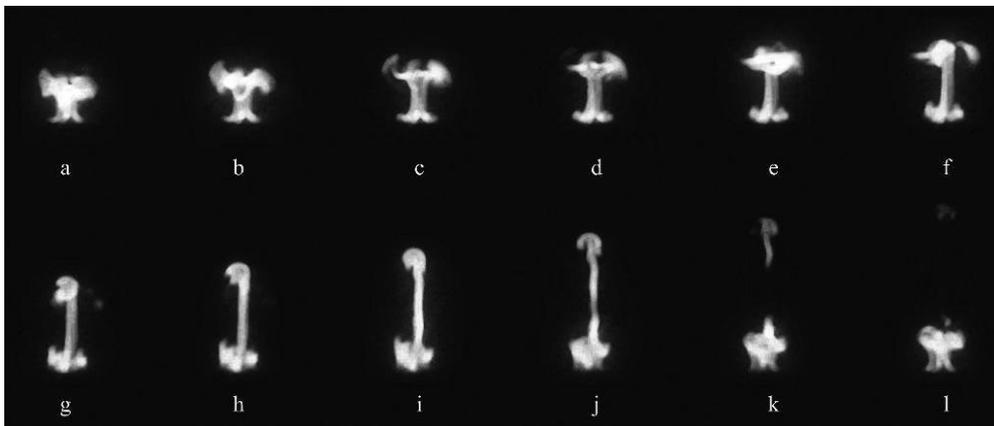


图 3 火焰高度振荡序列图(油盘直径 0.100 m, 图片间隔 0.02 s)

Fig.3 Sequence images of flame height pulsation (pool diameter 0.100 m, time interval 0.02 s)

中氧气浓度逐渐下降,使火焰加速上升的时间增大,火焰拉伸长度增长,导致火焰被拉断,形成由于浮力作用而继续上升燃烧的火焰团,如图3中的j,k,l.因此,火焰高度由于上升火焰团燃烧完而呈现阶跃下降的特性,如图5(a).图4是火焰根部垂直视图面积的振荡序列图,火焰根部垂直视图面积周期性地逐渐收缩和膨胀,不存在阶跃现象,因此,火焰根部垂直视图面积的渐变性好于火焰高度.

利用 MATLAB 程序将火焰录像中每一帧图片的火焰从背景中分割出来,以油池直径为标尺而计算得到火焰的高度和面积等参数.取实验中火焰典型振荡周期内火焰高度与火焰根部面积,如图5(a)所示,从图中可以看出,火焰根部面积与火焰高度的变化趋势一致.对火焰高度和火焰根部面积随时间变化进行 FFT 变换,从其频谱图(图5(b))可以看出,火焰根部面积振荡频率与火焰高度振荡频率相等,且均在 8.3 Hz 和 12.6 Hz 处观察到谐频.因此火焰根部面积的振荡频率即为火焰振荡频率.对于火焰到达顶部而形成顶棚射流火焰的油池火,可以用油池火焰根部面积的振荡变化求其火焰振荡频率.并且由于油池的水平切面是圆形的,我们可以认为火源根部是轴对称的,轴线垂直于燃料面而过油

池水平切面的圆心.与火焰振荡频率相关的涡也可以认为是轴对称的,其周期性形成和向上运动直接导致了火焰根部垂直视图面积的周期性变化.即使火焰根部局部不规则可能会影响火焰根部垂直视图面积值的大小,但火焰根部垂直视图面积值的周期性变化趋势不会改变,火焰振荡频率与垂直视图面积的周期性变化频率有关而与面积的绝对值无关,火焰根部的局部不规则不会影响到对火焰振荡频率确定的准确性.

对封闭空间内油池直径为 0.100, 0.141, 0.200 和 0.300 m 的油池火,用 MATLAB 程序对火焰根部面积进行 FFT 变换计算出该时刻火焰振荡频率,结果如图6,同一工况两次实验结果接近.图6(a)显示,直径为 0.100 m 的油池火焰振荡频率在点火初期为 4.5 Hz,点火后 50 s 开始逐渐缓慢减小,到 250 s 时约减小到 3.6 Hz,然后火焰振荡频率变大;图6(b)~(d)显示,在进行试验的封闭空间内,油池直径大于 0.141 m 时,火焰振荡频率比较稳定,波动较小.从图6可以看出,油池直径大于 0.141 m 时,从池火开始燃烧到熄灭的过程中,封闭空间内氧气浓度从 21% 下降到 13% 左右,而火焰振荡频率在燃烧过程中波动不大,没有随着氧浓度的变化而明

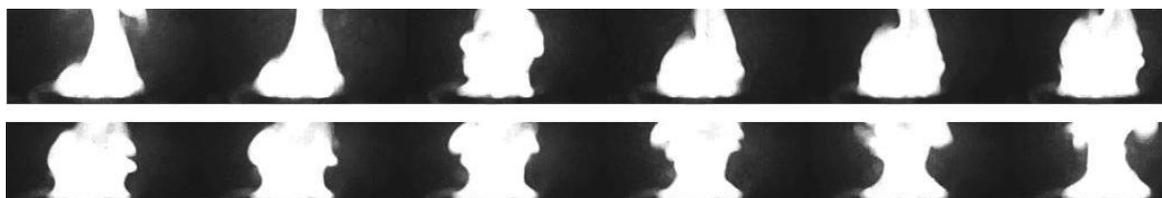


图4 火焰根部垂直视图面积振荡序列图(油盘直径 0.141 m, 图片间隔 0.02 s)

Fig.4 Sequence images of flame bottom area pulsation (pool diameter 0.141 m, time interval 0.02 s)

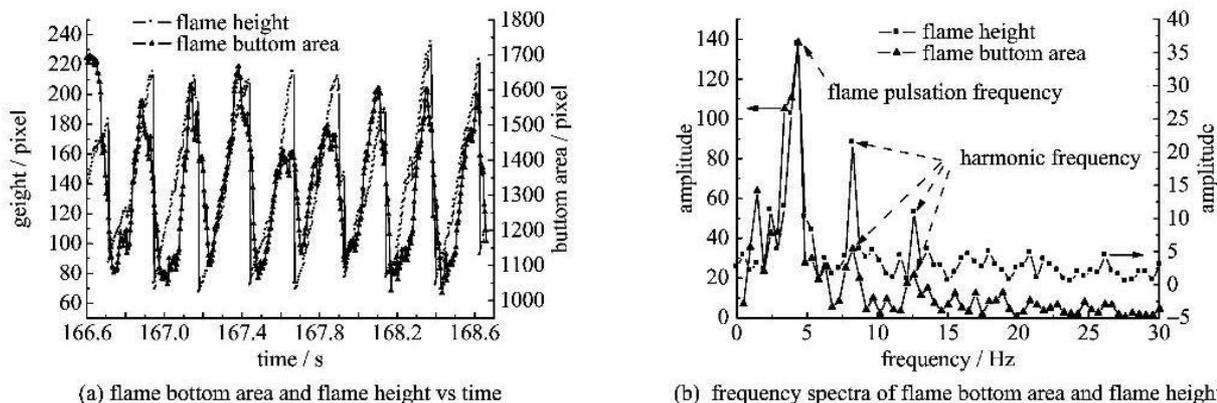


图5 火焰根部面积与火焰高变化曲线及频谱图(油盘直径 0.100 m)

Fig.5 Flame bottom area and flame height vs time and their frequency spectra (pool diameter 0.100 m)

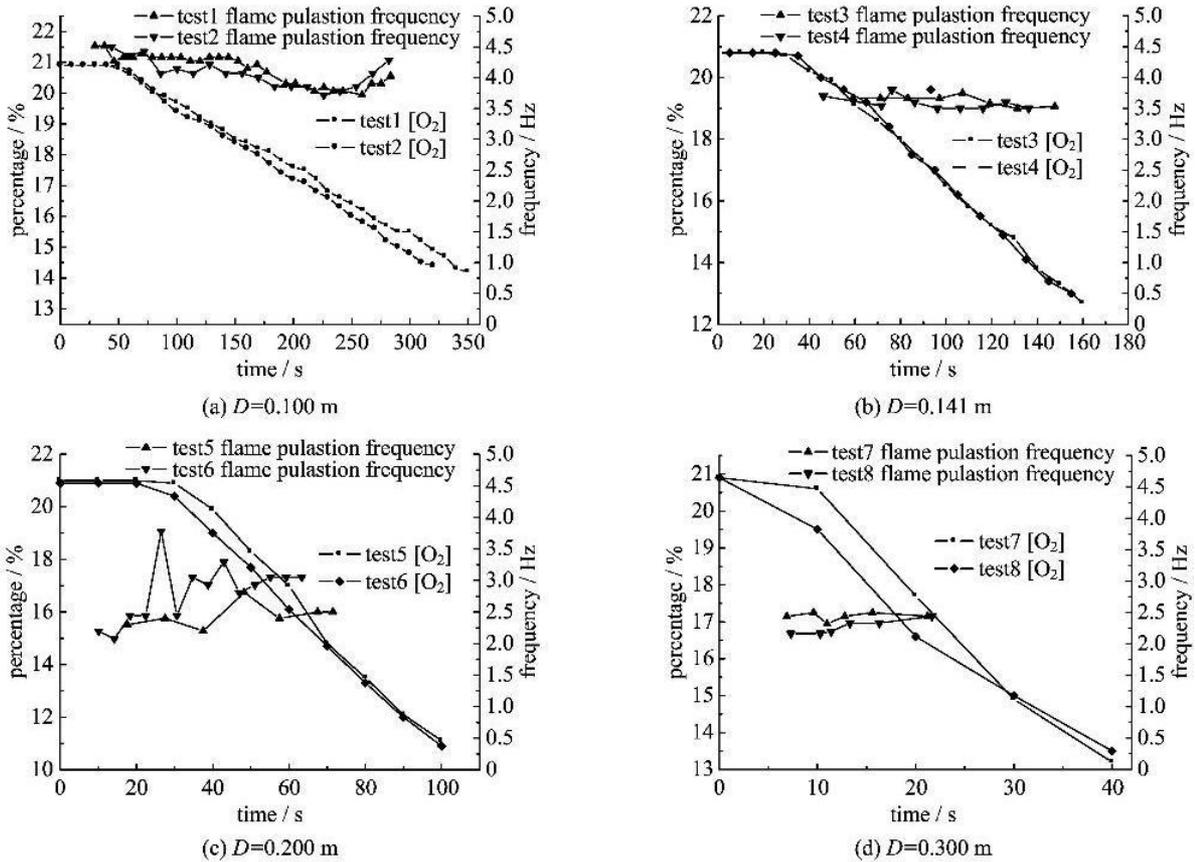


图 6 火焰振荡频率与氧气浓度随时间变化图

Fig.6 Flame pulsation frequency and oxygen concentration versus time

显改变.

Rasbash 等^[7-14]的研究表明,火焰的脉动频率在很大范围内与油池直径的开方根成反比例关系,即 $f \propto D^{-1/2}$. Pagni^[15]总结前人数据给出了火焰振荡频率与油池直径的关系式:

$$f^2 \cong \frac{2.3}{D} \quad (1)$$

Bejan^[16]根据无粘流理论(buckling theory of inviscid streams)推导出了与实验数据符合良好的公式,给出了圆形羽流火焰振荡频率公式:

$$f^2 \cong \frac{3.1}{D} \quad (2)$$

Cetegen 等^[14,17]利用氦气浮力羽流模拟火焰,发现氦气浮力羽流与火焰一样呈现周期性的振荡现象,从而推断两者的不稳定机理是相似的;实验发现在氦气出口约 $0.5D$ 高度内形成涡而导致氦气羽流振荡,涡对火焰面和氦气羽流的影响随着涡的上升而减少;虽然氦气羽流的振荡频率与火焰振荡频率不完全相同,但都符合频率表达式:

$$St = aRi^b \quad (3)$$

其中, $St = \frac{fD}{u}$, $Ri = \frac{(\rho_\infty - \rho_f)gD}{\rho_\infty u^2}$. f 为脉动频率, g 为重力加速度, D 为直径, ρ_∞, ρ_f 分别为环境和火焰密度, u 为流速.

Cetegen 等^[14]的研究显示火焰的脉动频率与油池上方一个直径高度内涡的传播速度有关,从而推导了火焰振荡频率关系式:

$$f = K \sqrt{\frac{g}{D}} \left[\left(1 + \frac{1}{Ri} \right)^{1/2} - \frac{1}{\sqrt{Ri}} \right]^{-1} \quad (4)$$

其中, $K = C \left(\frac{\rho_\infty - \rho_f}{\rho_f} \right)^{1/2}$, C 为 $0.3 \sim 0.5$.

Malalasekera 等^[18]结合前人的数据给出了油池火焰振荡频率关系式:

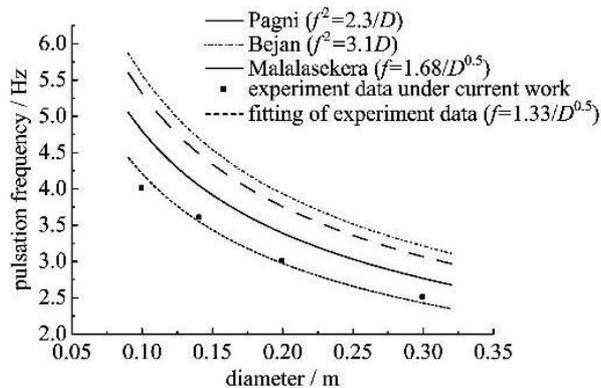
$$f = 1.68 D^{-0.5} \quad (5)$$

或

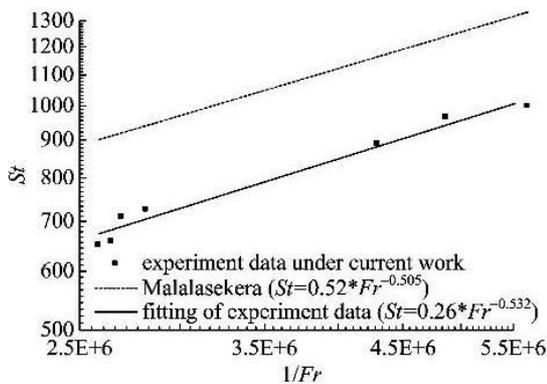
$$St = 0.52 \times Fr^{-0.505} \quad (6)$$

其中, $Fr = u^2/gD$.

对本文实验数据用 $f = aD^{-0.5}$ 拟合,得到本文



(a) comparison of flame pulsation frequency



(b) comparison of numerical relationship $St=aFr^b$

图 7 实验结果与经验公式的比较

Fig. 7 Experiment results compared with empirical equations

研究的封闭空间池火的火焰振荡频率为:

$$f = 1.33 D^{-0.5} \quad (7)$$

图 7(a) 为本文的封闭空间内火焰振荡频率实验值、拟合经验公式(7)与前人的经验公式比较, 由图可见封闭空间池火火焰振荡频率比前人经验公式预测值都偏小.

对电子天平测得的油池质量变化曲线进行线性拟合得到燃料质量损失速率, 将油池出口处燃料蒸气视为温度为沸点、压力为大气压的理想气体, 从而确定其油池出口速度. 用火焰根部面积振荡频率确定用于计算 St 数和 Fr 数的火焰振荡中间频率. 将油池内燃料蒸气视为温度为其沸点的理想气体, 则有

$$n = \dot{m} / M \quad (8)$$

$$PV = nRT \quad (9)$$

$$u = V / A \quad (10)$$

其中, \dot{m} 为质量损失速率, M 为庚烷相对分子质量, n 为庚烷的物质的量, R 为普适气体常数, V 为庚烷蒸气气体体积, A 为油池口面积. 假设 T 为庚烷沸点, P 为大气压, u 为燃料蒸气在油池口速度.

对 St 和 Fr 进行 $St=aFr^b$ 拟合, 得到关系式

$$St = 0.26 Fr^{-0.532} \quad (11)$$

图 7(b) 显示, 由于无量纲关系式 $St=aFr^b$ 综合考虑了油池直径与油池出口速度的影响, 封闭空间油池火焰振荡频率对无量纲关系式 $St=aFr^b$ 符合较好.

3 结论

(I) 本文实验发现, 竖直方向上火焰高度间歇

振荡频率和水平方向上火焰根部周期收缩或膨胀频率是相等的, 因此可以通过求取火焰根部垂直视图面积来确定火焰振荡频率.

(II) 进行试验的封闭空间内, 直径为 0.141, 0.200 和 0.300 m 的油池火焰振荡频率随时间的波动很小, 并且小于开放空间经验公式预测值, 实验得到的火焰振荡频率与油池直径关系拟合结果为 $f=1.33 D^{-0.5}$.

(III) 在本文实验中, 封闭空间油池火焰振荡频率对无量纲关系式 $St=aFr^b$ 符合较好, 具体形式为 $St=0.26 Fr^{-0.532}$.

参考文献 (References)

[1] 陈仁铃, 浦金云. 水面舰艇生命力[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 1982: 21-23.

[2] Sugawa O, Kawagoe K, Oka Y, et al. Burning behavior in a poorly ventilated compartment fire-ghosting fire[J]. Fire Science & Technology, 1989, 9 (2): 5-14.

[3] Utiskul Y, Quintiere JG, Rangwala A S, et al. Compartment fire phenomena under limited ventilation [J]. Fire Safety Journal, 2005, 40: 367-390.

[4] Hu Z X, Utiskul Y, Quintiere J G, et al. A comparison between observed and simulated flame structures in poorly ventilated compartment fires[C]// Fire Safety Science, Proceedings of the Eighth International Symposium. Beijing: IAFSS, 2005.

[5] Chamberlin D S, Rose A. The flicker of luminous flames[J]. Industrial Engineering Chemistry, 1928, 20: 1 013-1 016.

[6] Zukoski E E, Ceteegen B M, Kubota T. Visible structure of buoyant diffusion flames[J]. Symposium

- (International) on Combustion, 1985, 20; 361-366.
- [7] Rasbash D J, Rogowski Z W, Stark G W V. Properties of fires of liquids[J]. Fuel, 1956, 35; 94-107.
- [8] Portscht R. Studies on characteristic fluctuations of the flame radiation emitted by fires [J]. Combustion Science and Technology, 1975, 10; 73-84.
- [9] Sibulkin M, Hansen A G. Experimental study of flame spreading over a horizontal fuel surface [J]. Combustion Science and Technology, 1975, 10; 85-92.
- [10] Grant A J, Jones J M. Low frequency diffusion flame oscillations [J]. Combustion and Flame, 1975, 25; 153-160.
- [11] Becker H A, Liang D. Visible length of vertical free turbulent diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 1978, 32; 115-37.
- [12] Weckman E J, Sobiesiak A. The oscillatory behavior of medium-scale pool fires [J]. Symposium (International) on Combustion, 1989, 22; 1 299-1 310.
- [13] Hamins A, Yang J C, Kashiwagi T. An experimental investigation of the pulsation frequency of flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1992, 24; 1 695-1 702.
- [14] Cetegen B M, Ahmed T A. Experiments on the periodic instability of buoyant plumes and fires [J]. Combustion and Flame, 1993, 93; 157-184.
- [15] Pagni P J. Pool fire vortex shedding frequencies [J]. Applied Mechanics Review, 1990, 43; 153-170.
- [16] Bejan A. Predicting the pool fire vortex shedding frequency [J]. Journal of Heat Transfer, 1991, 113; 261-263.
- [17] Cetegen B M, Kasper K D. Characteristics of Oscillating Buoyant Plumes [C]// Thirteenth Meeting of The UJNR Panel on Fire Research and Safety. Gaithersburg, MD; NIST, 1996; 285-293.
- [18] Malalasekera W M G, Versteeg H K, Gilchrist K. A review of research and an experimental study on the pulsation of buoyant diffusion flames and pool fires [J]. Fire and Materials, 1996, 20; 261-271.
- [19] Joulain P. The behavior of pool fires: State of the art and new insights [C]// Twenty-seventh Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh, PA; Combustion Institute, 1998; 2 691-2 706.
- [20] Gotoda H, Kawaguchi S, Saso Y. Experiments on dynamical motion of buoyancy-induced flame instability under different oxygen concentration in ambient gas [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32; 1 759-1 765.
- [21] Darabkhani H G, Bassi J, Huang H W, et al. Fuel effects on diffusion flames at elevated pressures [J]. Fuel, 2009, 88; 264-271.
- [22] 陈志斌, 胡隆华, 霍然, 等. 基于图像相关性提取的火焰振荡频率 [J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(4); 367-371.
- [23] 孙志友. 航空煤油池火燃烧特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.