

封闭空间池火火焰游走实验研究

黎昌海, 陆守香, 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: 火焰游走是在通风不足的受限空间中出现的特殊火行为。为探讨无开口空间池火能否出现游走火, 在 17.55 m³ 无开口封闭空间内进行了庚烷池火实验。实验结果表明, 燃料沸腾后无开口封闭空间出现了游走火现象; 燃料沸腾产生大量可燃蒸气及卷吸到火焰区的氧气含量过低, 导致空间内在燃料区以外较远的区域存在满足燃烧条件的蒸气浓度和氧气浓度是游走火出现的根本原因; 油池位置高度越高, 火焰游走距离越远, 而游走火出现时间和持续时间与油池位置增加并非简单递增或递减关系。

关键词: 池火; 封闭空间; 火焰游走; 质量损失速率

中图分类号: U698.4 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.07.015

Studies on ghosting fire from pool fire in closed compartments

LI Changhai, LU Shouxiang, YUAN Man, ZHOU Yang

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

Abstract: Ghosting fire is a unique fire behavior which usually occurs under specific conditions with low ventilation. A series of fire tests were conducted in a 17.55 m³ closed compartment without vent to find out whether ghosting fires occur in compartments under no vent conditions. The results show that ghosting fires occurred in all the 17.55 m³ fire tests when fuels boiled. The large amounts combustible gases produced by boiling and low oxygen entrained to flame zone result in redundant combustible gases flowing to somewhere far from the fuel zone, where the gases mix with oxygen and the ignition condition is reached, causing ghosting fires to occur. The travel distances of ghosting fires become longer as the pool position gets higher, while the beginning time and duration of ghosting fires with regard to the pool position do not simply increase or decrease.

Key words: pool fire; closed compartment; ghosting fire; mass loss rates

0 引言

一般情况下,池火火焰(燃烧反应区)直立于可燃物(燃料供应区)表面上,而在一定条件下,受限空间内的池火火焰可以离开燃料表面,出现在可燃物上方常规火焰区以外的区域。早在1986年, Foote^[1]

在研究通风受限的腔室火灾行为时,首先发现了火焰脱离燃料池表面燃烧的现象,他将这种火行为称为游走火(ghosting fire),并指出这种现象在弱小通风状态时极可能出现。Utiskul 和 Hu 等^[2-3]将游走火明确定义为火焰离开液体表面并漫无目的飘浮的行为。

Kawagoe 等^[4]在 Foote 实验发现的基础上,在

内尺寸为 2.00 m(L)×3.00 m(W)×0.60 m(H)且侧壁上方有大小可调的小开口(实验中调节的范围为 150~160 cm²)的封闭舱室进行乙醇池火燃烧实验. 油池的规格为直径 30 cm、深 5 cm, 油池距离底面的高度可调(实验中分别为 30, 35 和 40 cm). 实验发现, 当油池距地面 40 cm 时, 淡蓝色游走火焰可以彻底脱离燃料表面而在顶棚处盘旋, 游走火的持续时间从 30 s 到 20 多分钟不等, 有时游走火又会重新回到燃料表面进行燃烧. 而当油池距地面 30 cm 或 35 cm 时, 则不会出现这一特殊现象. 他们指出, 游走火呈现部分预混特征, 黄色火焰中混杂有淡蓝色火焰, 甚至火焰全为淡蓝色; 游走火是一种不稳定的燃烧现象, 它的出现对质量损失速率产生了影响, 游走火出现后, 质量损失速率降低到出现前的 1/6. Audouin 等^[5]在内尺寸为 10.00 m(L)×3.75 m(W)×2.50 m(H)且一端侧墙中心有 0.8 m×0.8 m 通风口的封闭空间内的研究中也观察得到了类似的火焰行为. 他们使用的燃料为四丙烯(TPH)和磷酸三丁酯(TBP), 油池大小为 1.00 m², 放置于无开口一端, 离壁面的距离为 2.00 m. 点火后空间内温度迅速升高至 560 °C, 火焰从油池面脱离向通风口移动, 移动速度约为 4~8 cm/s, 最后火焰稳定在通风口附近直至燃料耗尽. 他们从机理上解释游走火发生的原因是可燃气体团在热环境下的重新点燃. Pearson 等^[6]进一步设计实验提升火源高度位置, 使之位于通风口上方, 也观察到了火焰脱离燃料池表面燃烧的现象, 认为其产生是由于该处的预混火焰速度高于自然对流速度, 这一观点与 Utiskul 等^[2]对通风受限条件下池火行为的划分观点一致. Utiskul 等^[2-3, 7-8]的研究是目前唯一给出游走火出现判定条件的工作, 他们引入全局当量比(GER)的概念作为游走火出现的判定条件. 全局当量比的表达式为 $GER = (r_s / Y_{O_2, a}) \cdot (m_l / m_a)$, 其中 m_a 为流入舱室的空气流率, 当 $GER > 1$ 时游走火才能出现.

综上所述, 前人观察到游走火均是在有侧壁开口的封闭空间内得到, 总体上具有燃料充分和通风不良的特点, 所采用燃料均具有闪点和沸点较低的特点. Utiskul 等^[2-3, 7-8]关于游走火出现条件的判定方法并不适用于所有受限空间, 如以船舶机舱为代表的一类空间, 因为这类空间往往缺乏侧墙开口(垂直开口), 甚至在火灾条件下空间可能处在无开口状态, 舱内温度、压力和气体成分随燃烧的进行而不断改变, 外界新鲜空气不能进入空间, m_a 不存在. 本文

针对以船舶机舱为代表的无开口封闭空间, 通过实验研究探索在这类空间中的池火燃烧能否出现火焰游走现象, 并分析其燃烧特性.

1 实验方法与实验条件

1.1 实验装置与测试系统

实验在容积为 17.55 m³ 的无开口封闭空间内进行, 所采用燃料为庚烷(C₇H₁₆). 庚烷是一种单质烷烃, 在常温时为无色液态, 密度为 684 kg/m³, 闪点为 -4 °C, 沸点为 98.54 °C, 燃烧热值 44.6 MJ/kg.

17.55 m³ 无开口封闭空间的尺寸为 3.00 m(L)×3.00 m(W)×1.95 m(H), 封闭空间的两侧面距离地面高度为 1.20 m 处各有直径为 0.20 m 的观察窗. 油池放置在封闭空间的中心线上, 油池直径(D)为 0.30 m, 深度 4 cm, 壁厚 0.5 cm. 油池距离空间底面的高度(h)可调. 实验中用量程为 0~6 200 g、精度为 0.01 g 的电子天平测量燃烧过程中燃料质量的变化; 用烟气分析仪测量空间底面附近的气体成分变化, 气体采样点距离空间底面的高度为 0.10 m, 距最近两面侧壁的距离分别为 1.50 m 和 1.20 m; 各观察窗布置一台数码摄像机, 记录燃烧过程中火焰及燃料的行为变化. 实验总体布置如图 1 所示.

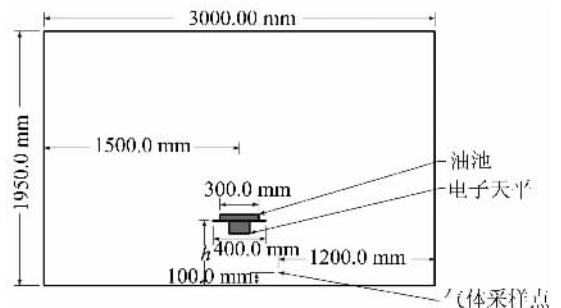


图 1 封闭空间池火燃烧实验布置

Fig. 1 Experimental setup for fire tests in closed compartment

1.2 实验工况

实验燃烧过程中保持封闭舱室处在无开口状态, 实验工况按油池距离空间底面的不同高度来区分, 油池距离空间底面的高度分别设为 1.00, 0.50, 0.30 和 0.10 m, 每种工况重复一次. 初始燃料量为 1 800 mL, 油深 3.56 cm, 可保证燃烧熄灭前油池内仍然有燃料剩余. 实验进行时的环境气温为 296 K, 大气压力 1.008×10^5 Pa. 为减小空间内气体初始温度等因素对实验结果的影响, 实验前对空间内进行不小于 30 min 的通风, 使得空间内初始温度与环境温度持平.

2 结果与讨论

2.1 实验现象

实验观察到的火焰形态随时间变化明显,燃料沸腾后观察到了游走火现象,同工况条件的两次实验燃烧持续时间和火焰行为变化基本一致.火焰熄灭后油池有燃料剩余.

图2为油池距离底面的高度为1.00 m条件下一次实验燃烧过程中的质量损失速率随时间变化图.燃烧可分为4个阶段,分别为点火初期阶段(0~12 s,图2中A)、平稳燃烧阶段(12~60 s,图2中B)、燃烧增长阶段(60~436 s,图2中C)和衰退阶段(436~541 s,图2中D).点火初期的质量损失速率较小,约为 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 并有增长趋势;点火12 s后进入平稳燃烧阶段,平稳阶段的质量损失速率维持在 $12.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右;60 s后质量损失速率开始随时间显著增长,油池在237 s开始沸腾,沸腾开始时质量损失速率已接近 $25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,沸腾后质量损失速率继续增长,在436 s达到最大,为 $51.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,约为点火初期的5倍;质量损失速率达到最大后持续急剧下降至熄灭.该工况条件下游走火出现的时间段为点火后262 s至熄灭.由图2质量损失速率曲线可见,游走火出现后,池火的质量损失速率并没有降低,这与Kawagoe等^[4]在侧壁上方有大小可调小开口的封闭空间中得到游走火出现后质量损失速率大幅度降低的结果有较大差别.

图3是该实验中不同时刻拍摄到的火焰图像,图3中的图片编号分别对应图2上所标记的相应编号时刻.图3(a)是点火后10 s时的火焰图像,此时

处在燃烧的初期阶段,池火火焰与自由空间池火火焰在外观上也无明显区别,火焰轮廓清晰可见,火焰直立于油池表面上,火焰根部大小与油池直径一致;高度在大约 $0.5D$ 的范围内,火焰呈稳定的锥形,在大约 $0.5D$ 以上火焰观察到卷吸旋涡,旋涡上方有因卷吸旋涡上移而形成的火球,旋涡和火球都有向上运动的趋势;在接下来的一段时间内,旋涡的出现和火球的形成、上升、脱落至消失呈现周期性变化,紧邻火球的下方火焰区直径远小于油池直径;而随着燃烧进行,这种周期性变化减弱.图3(b)是点火后180 s时的火焰图像,此时燃烧处在燃烧增长阶段的初期,火焰连续羽流区呈现柱状,火焰直径与油池直径基本相等;随后油池根部开始有向外扩张的趋势,火焰轮廓较点火初期略为模糊,火焰卷吸而引起的周期性火球出现的位置越来越接近油盘根部,在燃料沸腾时刻,火焰根部火焰面开始向油池外扩张.图3(c)是点火后240 s时的火焰图像,此时离燃料开始沸腾的时间为3 s,火焰轮廓线更为模糊,火焰根部直径可以比油池直径大并且呈现周期性振荡;油池沸腾后燃烧变得异常剧烈,火焰根部随时间变化进一步往外、往下扩张,有包含油盘的趋势.图3(d)是点火后300 s时的火焰图像,火焰根部开始呈现明显的不对称性;随后局部火焰团开始周期性地或无规律地断断续续向油池边缘以外的区域蔓延.图3(e)是点火后360 s时的火焰图像,火焰根部已经明显脱离油池表面,火焰根部与燃料之间的空隙清晰可见;随后扩张到油池之外的火焰团继续远离油池表面,向外、向下蔓延.图3(f)是点火后390 s时的火焰图像,此时扩张到油池外的部分火焰团已蔓延到至离油池边缘在水平和垂直方向各有约 0.5 m 左右.图3(g)是点火后420 s时的火焰图像,此时部分游走火逐渐与主火焰之间发生断裂,在离油池更远的区域飘荡或徘徊;这个时刻附近飘荡的火焰或消失或最终又汇合到主火焰区;随着脱离主火焰的火焰团越来越多或越来越大,整个火焰区明显偏离油池中心,火焰与燃料表面之间的距离进一步增大.图3(h)和图3(i)分别是质量损失速率最大时刻(436 s)和点火480 s时的火焰图像,这个时刻附近游走火可以在油池外各个方向较远处观察到.图3(j)为点火后540 s时的火焰图像,此时火焰已临近熄灭时刻,所有游走的火焰回到油盘上空,整个火焰区缩小成一小火焰团,在油盘上空飘忽;火焰团向上运动并最终消失,火焰熄灭.该燃烧持续了541 s.

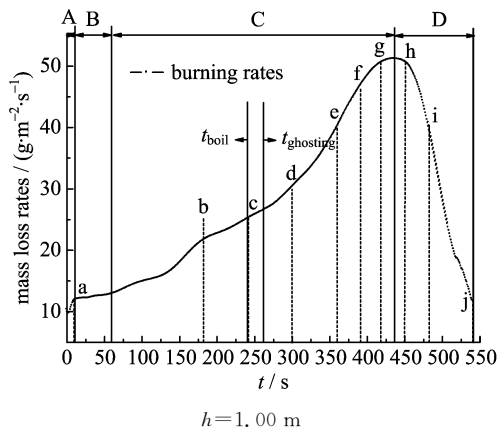


图2 封闭空间池火燃烧过程中的典型质量损失速率曲线

Fig.2 Typical mass loss rates of pool fire in closed compartment

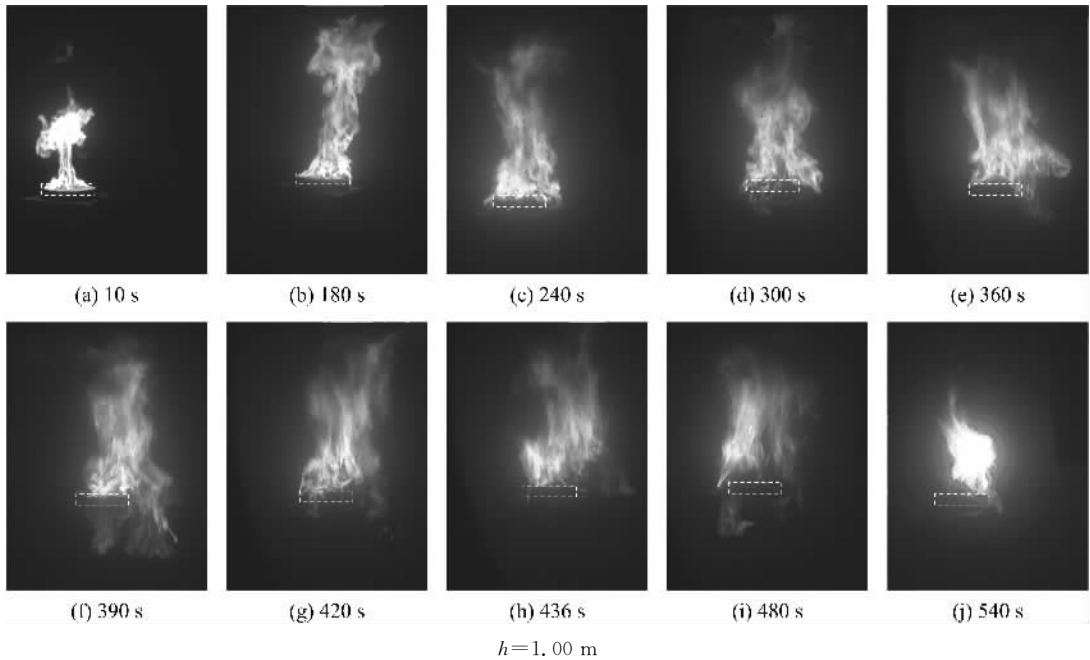
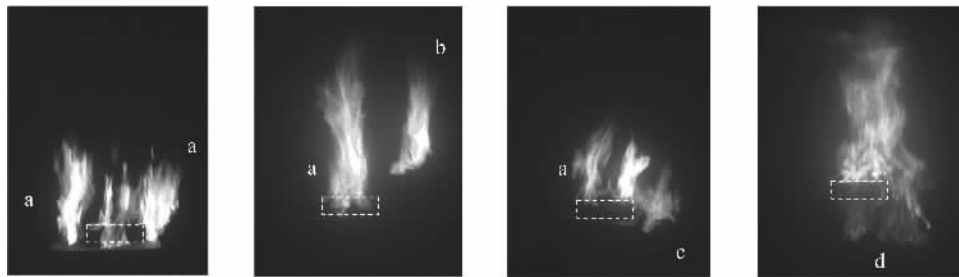


图 3 封闭空间池火燃烧过程中的火焰形态

Fig. 3 Flame profiles during burning process in closed compartment



a. 边缘游走, b. 纵向游走, c. 水平游走, d. 下沉游走

图 4 实验中观察到的游走火的不同形式

Fig. 4 Various ways of ghosting fire

实验所观察到的游走火,可分为边沿游走、纵向游走、水平游走和下沉游走四种基本形式,四种游走火的形式如图 4 所示. 边沿游走是指火焰部分脱离燃料池,在燃料池周围游荡的现象;纵向游走是指火焰团离开燃料池表面,在距离燃料池表面较高的空中飘荡燃烧;水平游走指火焰完全离开燃料池表面,在与燃料池基本持平的空间高度向外游荡的现象;而下沉游走则指火焰位置出现在燃料池下方的一种游荡燃烧现象. 在 17.55 m^3 中尺度无开口封闭空间池火燃烧实验中,所有实验都观察到了游走火的出现. 在每一次实验中,几种游走形式可能都能出现甚至是同时出现多种游走形式,并且边沿游走和水平游走是必然出现的,纵向游走则多出现在部分实验的火焰熄灭前夕,下沉游走在燃料池位置距离舱底较高时更容易出现.

2.2 游走火出现条件分析

本文进行的四种工况实验均观察到了游走火,表明无开口空间也可以出现游走火现象. 图 5 是不同油池位置高度条件下燃烧过程中质量损失速率和氧浓度随时间的变化以及游走火出现时刻图,实验发现所有实验中游走火开始出现在燃料沸腾之后,质量损失速率处在急剧增长阶段,故燃料沸腾是火焰游走的必要条件之一. 然而对比在自由空间中的池火,燃料沸腾无法导致游走火现象,由此可见燃料沸腾并不是火焰游走的充分条件. 各实验中,游走火开始出现时刻位于封闭空间底面附近的气体测量点测量到的氧气浓度在 $17\% \sim 19\%$ 之间,小于大气环境的氧浓度而大于常规闷熄灭浓度 $9\% \sim 15\%$ [3,9-10],由此可推测出卷吸到火焰区的氧气浓度接近闷熄浓度.

当卷吸到油池上方的气体中氧含量不足以维持

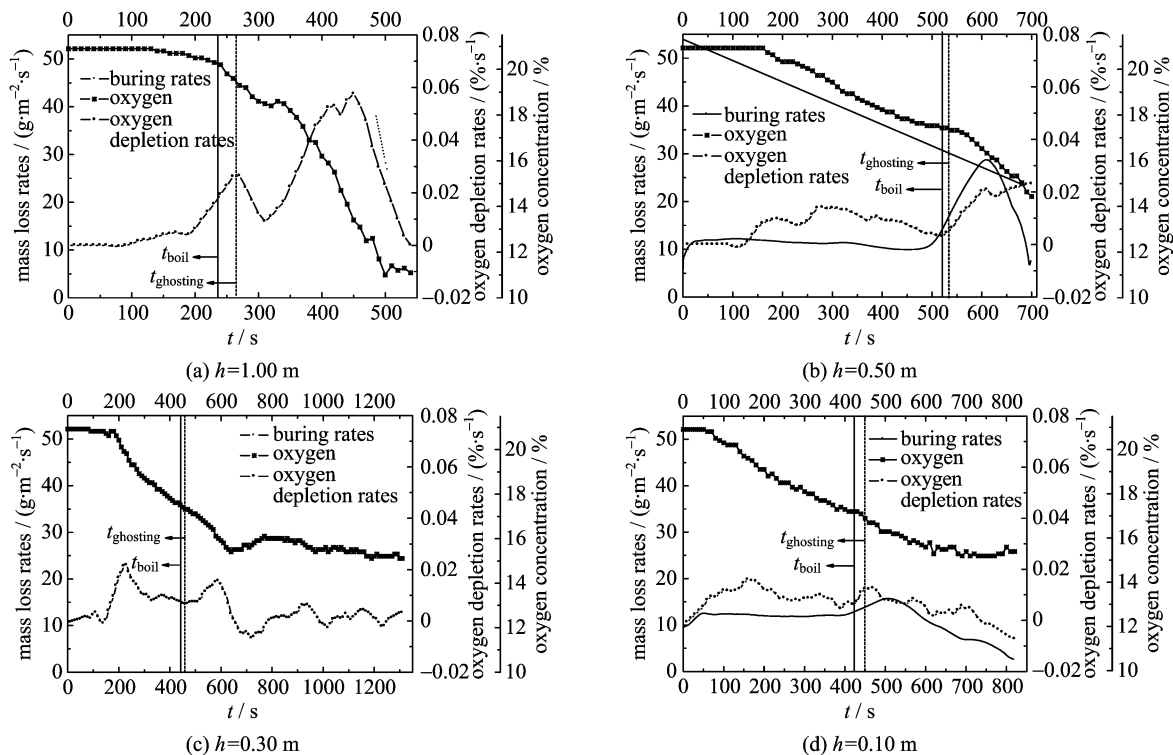


图 5 质量损失速率、氧气浓度随时间变化与游走火出现时刻

Fig. 5 The change of mass loss rates and oxygen concentration with time, and the time of ghosting fire beginning

燃烧后,由于庚烷蒸气密度较大,未及时燃烧的蒸气部分扩散在油池上方及周围区域,导致了火焰向油盘外蔓延。同时部分未燃庚烷蒸气,将随羽流上升到封闭空间的顶部,并随着顶棚射流和墙壁回流运动到下层空间,随着火源的卷吸作用,部分燃料蒸气到达油池附近。随着空间内氧气的短缺,越来越多从油池蒸发出的燃料蒸气未能及时燃烧,空间内可燃蒸气浓度越来越高,而远离油池的氧含量较油池附近要高,因此时而可以导致油池上方常规火焰区某些区域氧气不足以维持燃烧而远离油池的其他某些局部区域同时存在满足燃烧条件的氧气浓度和燃料浓度,引起火焰往这些区域传播。而当这些区域内氧气或燃料浓度下降至不能维持燃烧的浓度,火焰就会消失或者传播到其他符合燃烧条件的区域,这就形成了飘忽不定的游走火。当空间内游走火不能持续传播,火焰发生熄灭。所有实验中,游走火从沸腾后不久开始,而于火焰熄灭时消失;火焰熄灭时,位于空间底面附近测量到的氧气浓度为 11%~15%,达到了封闭空间的闷熄浓度。

游走火过程中,燃料蒸气和氧气之间既可以是边混合边燃烧,也可以是先混合然后被点燃,所以部分游走火有预混燃烧的性质,火焰部分呈蓝色。这类

游走火更容易脱离油盘向外蔓延。

因此,封闭空间游走火的出现是由热量和空间氧浓度共同作用的结果。一方面由于空间内的热量积蓄并反作用于油池使得燃料沸腾产生大量蒸气,而另一方面由于空间的封闭性使得内部氧气含量持续下降,使得有大量可燃蒸气未能及时燃烧而在空间内流动到达氧气较为充足的空间下层,被主火焰点燃并蔓延。

2.3 油池位置高度对火焰游走的影响分析

尽管所有工况实验均观察到了游走火,但各工况的燃烧持续时间差别较大,其中油池位置高度为 0.30 m 的工况条件下燃烧持续时间最长,不同油池位置高度条件下游走火出现的时间、持续时间和游走距离等也有较大区别。油池位置高度为 1.00 m 的工况在点火后 262 s 即有游走现象产生(对应的持续时间为 279 s),油池位置高度为 0.30 m 时在点火后 426 s 出现游走现象(对应的持续时间为 887 s),油池位置高度为 0.10 m 时在点火后 448 s 出现游走现象(对应的持续时间为 369 s),而油池位置高度为 0.50 m 的工况条件下则在点火后 525 s 才开始出现游走现象(对应的持续时间为 173 s)。对应的质量损失速率变化如图 6 所示,质量损失速率在点

火初期均为 $10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,与 Utiskul 等^[2]得到的在侧墙有开口的封闭空间池火质量损失速率极为接近;随后经历一段长短不一的稳定期,对应的质量损失速率为 $12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右;游走火开始出现时刻对应的质量损失速率大于点火初期的质量损失速率;质量损失速率峰值与油池距离底面的高度有关,高度越高,峰值越大.从火焰游走的距离方面看,则是油池位置高度越高,火焰游走的距离越远.

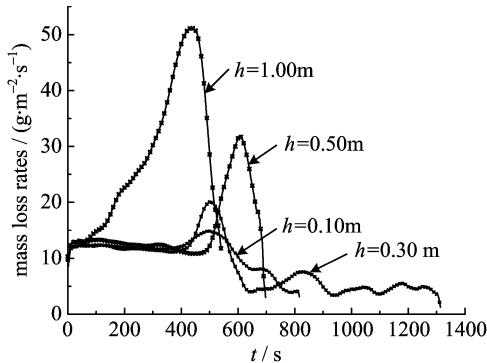


图 6 不同油池位置高度下的质量损失速率

Fig. 6 Mass loss rates under different pool height conditions

本文所有实验在燃烧结束后仍在油池中发现有燃料剩余,且火焰熄灭时刻位于空间底面附近的测量点测得的氧气浓度在封闭空间的闷熄浓度范围之内,这表明火焰熄灭是由于氧气的短缺.本文实验中,各工况条件下氧气的初始量是一致的,封闭空间对外无开口,因此燃烧持续的时间与燃料的蒸发速度和卷吸到火焰区的室内氧气量有关.油池的蒸发速度随着油池所受到的热量增加而增加.油池位置高度越高,越接近上层烟,受到的来自烟气的辐射作用越大,因而油池的蒸发速率越大,燃烧越剧烈,热释放速率越大,火焰对油池的热反馈作用也加强,促进燃烧的进行,同时对氧气的消耗越快,越容易导致油池上方局部氧气短缺,使得未燃蒸气在空间内扩散,因此游走火越容易出现.由于火焰在空间上层燃烧,空间下层的气体中氧含量较高,当运动到空间下层的燃料蒸气与氧气混合达到燃烧条件,火焰就有可能往这些区域蔓延,因此油池位置越高,火焰游走距离越远.

3 结论

(I) 无开口的封闭空间也可以出现游走火现象;游走火可分为边沿游走、纵向游走、水平游走和

下沉游走四种基本形式,边缘游走在实验中首先出现并与其他三种形式在后面交替出现.

(II) 燃料沸腾产生大量可燃蒸气及卷吸到火焰区的氧气含量过低,导致空间内在燃料区以外较远的区域存在满足燃烧条件的蒸气浓度和氧气浓度是游走火出现的根本原因.

(III) 油池位置高度越高,火焰游走距离越远,而游走火出现时间和持续时间与油池位置增加并非简单递增或递减关系.

参考文献 (References)

- [1] Foote K L. 1986 LLNL enclosure fire tests data report: UCID-21236 [R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1987.
- [2] Utiskul Y, Quintiere J G, Rangwala A S, et al. Compartment fire phenomena under limited ventilation [J]. Fire Safety Journal, 2005, 40: 367-390.
- [3] Hu Z, Utiskul Y, Quintiere J G, et al. A comparison between observed and simulated flame structures in poorly ventilated compartment fires [C]//Proceedings of 8th IAFSS Symposium. Beijing: IAFSS, 2005.
- [4] Sugawa O, Kawagoe K, Oka Y, et al. Burning Behavior in a Poorly-ventilated Compartment Fire-Ghosting Fire [J]. Fire Science and Technology, 1989, 9(2): 5-14.
- [5] Audouin L, Such J M, Malet J C, et al. A Real Scenario for a Ghosting Flame [C]//Fire Safety Science-Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science. Melbourne: IAFSS, 1997: 1 261-1 272.
- [6] Pearson A, Most J M, Drysdale D. Behaviour of a confined fire located in an unventilated zone [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 2 529-2 536.
- [7] Utiskul Y, Quintiere J G. Generalizations on compartment fires from small-scale experiments for low ventilation conditions [C]//Proceedings of the 8th IAFSS Symposium. Beijing: IAFSS, 2005: 1 229-1 240; doi:10.3801/IAFSS.FSS.8-1229.
- [8] Hu Z, Utiskul Y, Quintiere J G, et al. Towards large eddy simulation of flame extinction and carbon monoxide emission in compartment fires [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2 537-2 545.
- [9] Coulbert C D. Energy release criteria for enclosure fire hazard analysis-part I [J]. Fire Technology, 1977, 13 (3): 173-184.
- [10] Quintiere J G, Rangwala A S. A theory of flame extinction based on flame temperature [J]. Fire and Materials, 2004, 28(5): 387-402.