

顶部不同开口尺寸腔室中油池火灾的发展过程

陈兵, 陆守香, 李强, 黎昌海, 袁满

(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:在顶部开口腔室内开展庚烷油池火的燃烧实验,研究了开口尺寸对火灾发展过程的影响.实验使用了2种直径的油池和6种大小的水平开口,并测量了燃料质量损失速率、腔室内的气体温度分布以及火源根部附近的气体浓度变化过程.结果表明,根据火焰熄灭的原因,燃烧可分为缺氧熄灭模式和燃料耗尽熄灭模式.在缺氧熄灭模式下,顶部开口尺寸对燃料消耗率、质量损失速率和气体温度分布的影响较小;火灾进入燃料耗尽熄灭模式后,质量损失速率以及气体温度均随开口尺寸增大而增大.同时,随着开口的增大,火焰熄灭时的氧气浓度变大.在顶部开口腔室火灾中,燃烧开始后,烟气在腔室内迅速沉降并充满整个腔室,“双区模型”不再适用.

关键词:腔室火灾;顶部开口;质量损失速率;温度分布;气体浓度

中图分类号:TK16,U698.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2011.10.009

Burning behavior of compartment pool fires with different ceiling vents

CHEN Bing, LU Shouxiang, LI Qiang, LI Changhai, YUAN Man

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

Abstract: Heptane pool fires were conducted in a compartment with a ceiling vent, and the effect of the ceiling vent size on fire development was investigated, in which two pool fires of different diameters and six vents of varying sizes were used. The fuel mass loss rate, gas temperature distributions at different locations and the gas concentration at the base of the fire were measured during the experiments. Results show that the oxygen-lack regime and fuel-exhaust regime are defined due to the cause of the flame extinction. In the oxygen-lack regime, the vent size has a small influence on the fuel consumption rate, fuel mass loss rate and gas temperature, while it has an increasing impact on them in the fuel-exhaust regime. Moreover, the oxygen concentration at extinction time increases with the increase in vent size. Smoke descends quickly to the floor and the compartment is filled almost completely with smoke, rendering so the “two-zone” model invalid for the fires in compartment with a ceiling vent.

Key words: compartment fire; ceiling vent; mass loss rate; temperature profile; gas concentration

0 引言

了解受限腔室内的火灾发展过程,对于评估火

灾危害性、人员的安全逃生以及及时的火灾探测报警有着非常重要的意义^[1]. 因其典型性及普遍性,对于具有门窗等垂直开口的普通建筑空间,腔室结

收稿日期:2011-05-12;修回日期:2011-10-21

基金项目:国家自然科学基金项目(50976109),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:陈兵,男,1984年生,博士生.研究方向:船舶火灾动力学. E-mail: chenbing@mail.ustc.edu.cn

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

构对火灾的影响和烟气填充过程已经引起了火灾安全研究者的广泛关注^[2-7].

但是,对于船舶机舱、地下室这类受限腔室来说,其开口通常设在腔室的顶棚上.这里把仅具有顶棚水平开口的腔室称为顶部开口腔室.腔室的开口决定了起火空间和外部环境之间的气体交换过程,因而开口的结构特征对腔室火灾的发展过程有着重要影响^[8-11].在边长为 6 m 的立方体舱室中,Jansson 等^[12]开展了顶棚中央有一个水平开口的情况下的木垛火实验,测量了燃料的质量损失速率、舱室上部的气体温度以及舱室下部氧气和二氧化碳的浓度.Morehart 等^[13-14]开展 0.089~0.500 m 直径的圆形油池甲烷扩散火实验时,发现当氧气体积浓度降低到 14%~16.1%后火焰会因缺氧发生熄灭.在边长 40 cm 的立方体舱室中,Wakatsuki^[15]研究了顶棚中央有一个水平开口的情况下的火灾燃烧过程,发现燃烧速率要比自由燃烧时的值小,且当舱室内的氧气体积浓度低于 16%时,庚烷火焰会出现缺氧熄灭现象.针对顶部水平开口处的流动过程,Cooper 和 Tan 等^[16-18]分别开展了一些盐水模拟实验工作,对气体交换的几种方式进行了描述;尽管其结果在真实火灾环境下的适用性和准确性还不清楚^[19],但也为我们了解热烟气和冷空气在开口处的交换流动提供了一定的基础.

可以看出,前人对于顶部开口尺寸对火灾发展的影响,以及火焰熄灭时腔室内的火灾参数特征等问题的研究较少.在没有门窗等竖直开口的顶部开口腔室中,开口尺寸的变化对燃料的质量损失速率产生怎样的影响,烟气能否降到底部,“双区模型”能否适用,以及火焰卷吸的气体成分是否发生改变等

问题均需要开展进一步的研究来解答.根据船舶机舱等顶部开口腔室的结构特点,本文将在小尺度的顶部拐角开口腔室中开展火灾实验,通过改变水平开口的大小,测量并分析燃料的质量损失速率、腔室内气体温度和气体组分浓度等参数的变化过程,来研究水平开口尺寸对火灾发展过程的影响.

1 实验方法

实验舱的尺寸为 1 m×1 m×0.75 m(长×宽×高),前壁面是用 5 mm 厚的钢化玻璃制成,用于观察火焰形状及燃烧过程,其余壁面所用材料均是 5 mm 厚的钢板,如图 1 所示.实验舱只有一个位于顶棚拐角的正方形开口,其余位置没有任何开口,并且为了保证实验舱内外的气体仅通过顶部水平开口交换,相邻的壁面之间均用密封胶进行密封.为研究开口条件对腔室内的火灾烟气填充过程的影响,实验中共使用了 6 种尺寸的水平开口,分别为 25 cm² (5 cm×5 cm),100 cm² (10 cm×10 cm),225 cm² (15 cm×15 cm),400 cm² (20 cm×20 cm),625 cm² (25 cm×25 cm)和 900 cm² (30 cm×30 cm).实验过程中环境气体温度为(19±1)℃,湿度在(65±10)%.

考虑到船舶机舱中的火源形式以及燃料类型,实验使用庚烷油池火作为火源,并把油池放置在腔室的底面中央.实验中使用了直径分别为 10 cm 和 14 cm 的 2 种尺寸的圆形油池,油池的池壁高度为 4 cm,壁面及底面厚度均为 3 mm.每次实验开始前均向油池内倒入 1.3 cm 深的庚烷,并且在燃烧过程中没有燃料的补充.根据不同顶棚开口尺寸和油盘直径的组合方案,本文共进行了 12 种工况下的实验,每种工况的实验重复 1 次,工况条件如表 1 所示.

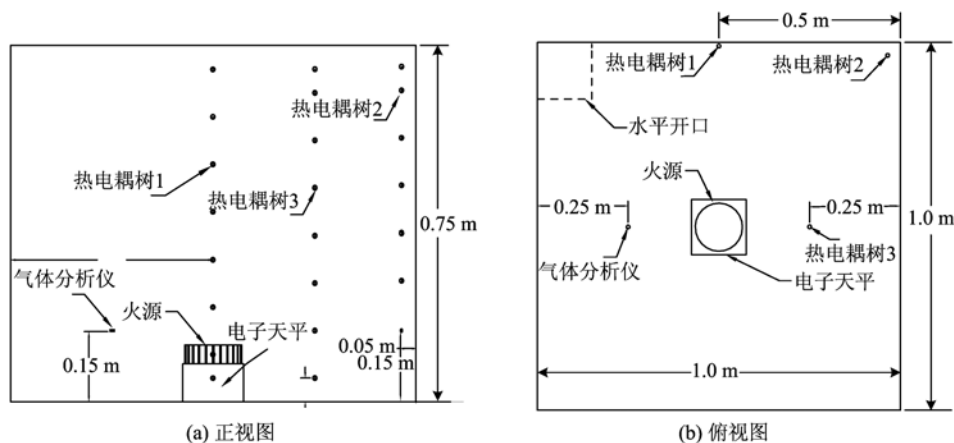


图 1 实验布置图

Fig. 1 Sketch of experimental setup

表 1 实验结果

Tab. 1 Summarize of experimental results

实验序号	油池直径/mm	开口大小/cm ²	烟气温度 ^a /℃	O ₂ 浓度 ^b /%	CO ₂ 浓度/%	CO 浓度/(10 ⁻⁶)
1		25	134	14.0	2.8	424
2		100	145	14.1	2.8	422
3	100	225	143	14.6	2.6	352
4		400	137	15.5	2.3	240
5		625	157	16.8	1.8	143
6		900	158	18.5	1.5	81
7		25	178	13.2	3.2	620
8		100	182	12.9	3.2	537
9	140	225	186	14.0	3.1	433
10		400	178	15.3	2.8	352
11		625	183	16.4	2.2	207
12		900	228	16.9	1.9	151

【注】^a 此处的烟气温度为最上方热电偶的测量温度。

^b 此处提供的气体浓度均为火焰熄灭时刻的气体浓度值。

实验过程中使用电子天平对燃料质量变化过程进行了测量,以考察燃烧强度和火源的燃烧速率.天平放置在油池下方,其量程为 6.2 kg,精度为 0.01 g.

如图 1 所示,为测量腔室内的温度分布以及烟气层的运动情况,分别在距壁面 25,5 和 0.5 cm 的位置处布置了 3 束外径 0.5 mm 的 K 型热电偶.其中热电偶树 1 包含 14 支热电偶,布置在后壁面中央贴近壁面处,探头突出壁面 0.5 cm.最上方和最下方的热电偶分别距顶棚和地面 5 cm,相邻两支热电偶间距均为 5 cm.热电偶树 2 布置在后壁面和右壁面的拐角,距离壁面 5 cm.热电偶树 2 有 12 支热电偶,最下方的热电偶距底面 15 cm,相邻热电偶的间距也为 5 cm.热电偶树 3 也由 14 支热电偶组成,放置在距离右壁面和后壁面分别为 25 cm 和 50 cm 的位置,其热电偶的高度与热电偶树 1 的分布相同.

气体浓度分析仪放置在距壁面 25 cm,距底面 15 cm 的位置,用于测量火焰底部附近的氧气、一氧化碳和二氧化碳等气体浓度,以考察火焰所卷吸的气体成分的变化过程.

2 实验结果与讨论

2.1 质量损失速率变化过程

根据电子天平测量得到的燃料质量变化情况和实验后的观察,发现火焰熄灭后,当开口尺寸较小时,油池内仍剩有相当多的燃料,而当开口大于某一值后,燃料将被完全燃烧.本文使用燃料消耗率 α 表示整个燃烧过程的燃料消耗程度:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_{e,xt}}{m_0} \quad (1)$$

式中, $m_{e,xt}$ 为火焰熄灭时油池内剩余的燃料质量, m_0 为燃料的初始质量.

图 2 显示了不同开口条件下 2 种直径油池火的燃料消耗率.在本研究中,当开口边长大于 20 cm ($A_{vent}=400 \text{ cm}^2$) 时,10 cm 直径的油池火将消耗完所有的燃料;对于 14 cm 的油池火,当开口边长是 30 cm ($A_{vent}=900 \text{ cm}^2$) 时耗尽所有燃料.而在其他的实验工况中,火焰熄灭时,油池内仍剩有燃料.由 Wakatsuki^[15], Quintiere^[20] 等的研究结果可知,此时火焰的熄灭是由于舱室内没有足够的氧气来维持燃烧所造成的.

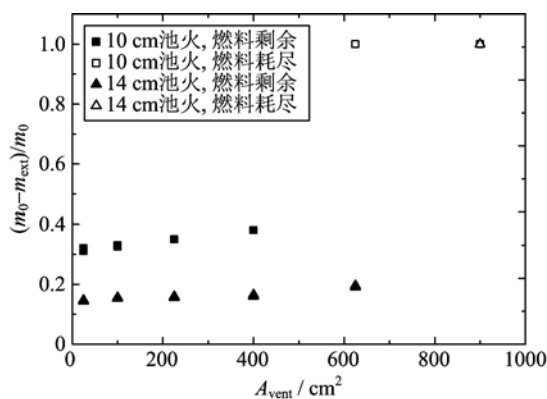


图 2 不同顶部开口条件下池火的燃料消耗率

Fig. 2 Consumption rates of pool fire with different vent sizes

根据火焰熄灭的原因,把油池火分为缺氧熄灭模式和燃料耗尽熄灭模式.由图可见随着油池直径的增大,从缺氧熄灭模式向燃料耗尽熄灭模式转变

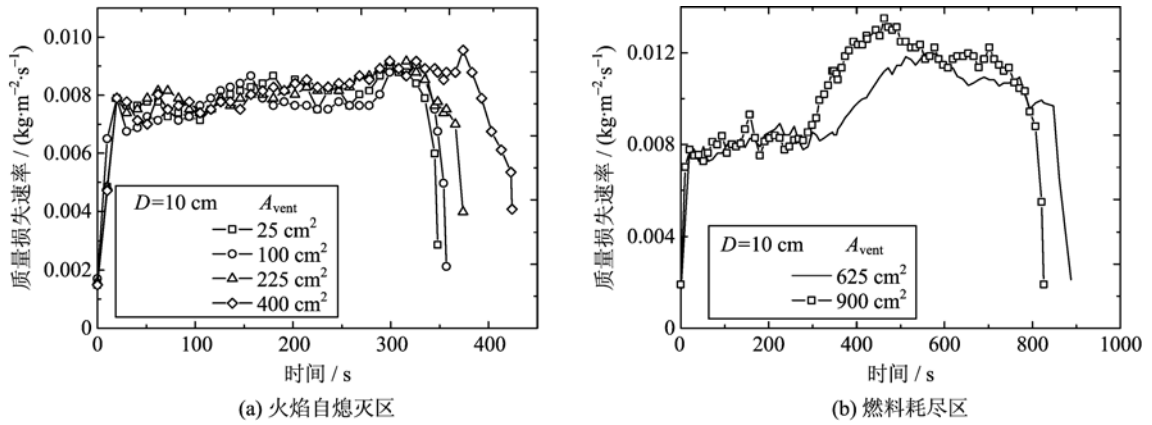


图 3 不同开口大小下 10 cm 直径油池火的质量损失速率

Fig. 3 Burning rates of 10 cm pool fire

的临界开口也将增大,这应该是因为较大尺寸的油池火需要更多新鲜气体的流入以维持燃烧的继续进行.另外,由图 2 也可以看出,在缺氧熄灭模式下,随着开口的增大,燃料消耗率的变化并不太明显 (<20%).

本文选取 10 cm 直径油池火在不同开口条件下的质量损失速率变化过程进行分析.图 3(a)和 3(b)分别显示了两种熄灭模式下的质量损失速率随时间的变化过程.由图 3(a)可以看出,在缺氧熄灭模式下,随着开口面积的增大,稳定阶段持续的时间有稍微增大的趋势,但是质量损失速率变化不明显,维持在 0.008 kg/(m²·s)左右,与开放空间中自由燃烧的 10 cm 直径庚烷池火的质量损失速率相差甚微^[21-22].可见尽管由于舱室内氧气浓度减小的原因会出现缺氧熄灭的现象,却由于周围环境对燃料热反馈的加强,其质量损失速率没有受到受限空间的明显影响.在图 3(b)中,质量损失速率在经历初期增长和稳定燃烧阶段后,出现第二次快速增长和稳定燃烧阶段,这两个阶段分别称为过渡阶段和沸腾燃烧阶段,标志着油池内的燃料出现整体沸腾现象^[21],此时质量损失速率是稳定燃烧时的值的 1.5 倍.14 cm 直径油池火中,两种熄灭模式下的质量损失速率具有类似的变化趋势.

2.2 腔室内气体温度分布特征

图 4 给出了 100 cm² 开口、10 cm 直径油池火条件下腔室内距底面高度为 30 cm 和 65 cm 的气体温度变化.可以看出,相同高度上的温度分布并不十分均匀,距离壁面较远处的气温变化较为一致,并要高于壁面附近的温度.

为忽略水平方向上温差的影响,利用相同高度

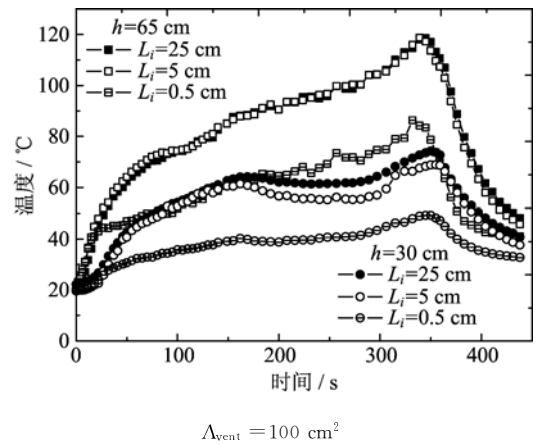


图 4 10 cm 油池火中两个高度上的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution at two heights in 10 cm pool fire

上的平均气温来分析腔室内的温度分布.本文采用加权平均的办法计算高度 h 上的平均气温 $T_{av,h}$:

$$T_{av,h} = \frac{\sum_{i=0}^N T_{i,h} L_i}{\sum_{i=0}^N L_i} \quad (2)$$

式中, $T_{i,h}$ 为高度 h 上位于 i 处的热电偶测量的温度值; L_i 为 $T_{i,h}$ 热电偶距离最近壁面的距离.

图 5 给出了 14 cm 油池火中不同时刻的腔室内竖直方向上的温度分布.由于受到顶棚射流的影响,靠近顶棚附近的温度相对较高 ($h=70$ cm).燃烧开始后,腔室内上部的温度不断升高,而下部的温度保持不变.但是随着燃烧的进行,腔室下部的温度开始上升,竖直方向上的气体温度分布呈“直线”型,且在燃烧后期,腔室内的温度变化不明显,达到较为稳定的状态.

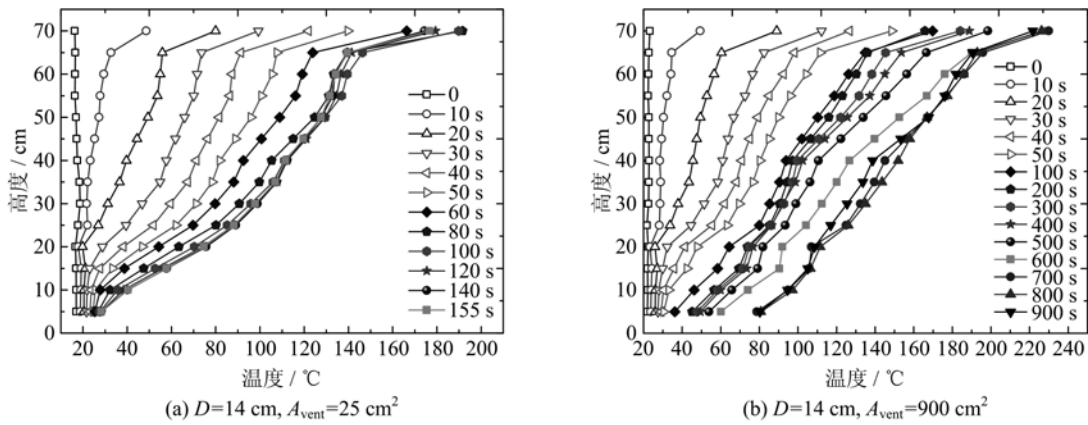


图 5 腔室内竖直方向上不同时刻的气体温度分布

Fig. 5 Vertical temperature profiles vary with time

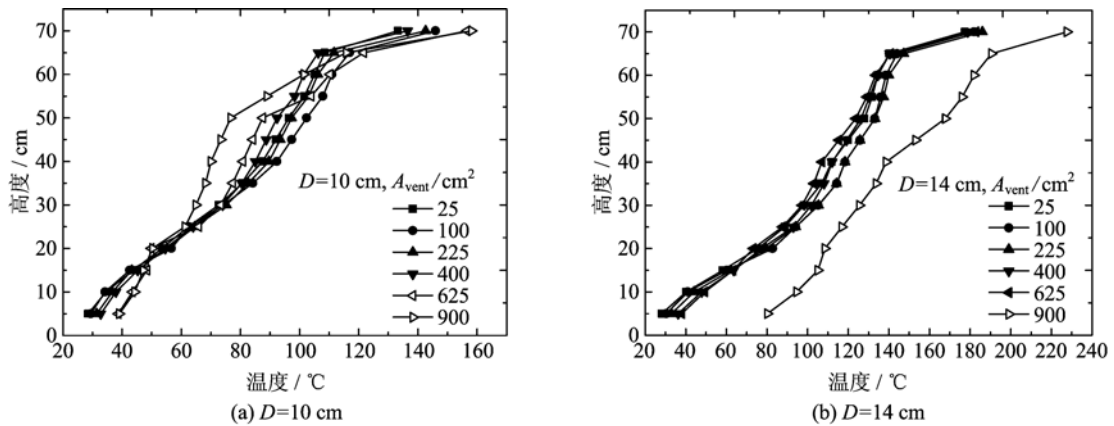


图 6 不同开口条件下临近熄灭时刻的气体温度分布

Fig. 6 Vertical temperature profiles closing to extinction under different vents

这里选取了各次实验中达到稳定状态的温度分布进行分析,以比较不同开口条件对竖直方向上温度分布的影响.由图 6 可以看出,随开口尺寸的变化,竖直方向上的温度分布具有以下几个特点:①在缺氧熄灭模式下,开口大小对于气体温度的影响不明显,竖直方向上的温度分布趋势一致,且其值相差不大($<8\%$),通过分析 Wakatsuki^[15] 的温度测量结果,也可以发现类似的结论;②在燃料耗尽熄灭模式下,顶棚附近处的温度较高,这是由于此时火焰处于沸腾燃烧状态,燃烧速率数倍于缺氧熄灭模式下的值,此时更多的热量储存在舱室内.

忽略火焰辐射的影响,认为腔室内气体温度的升高仅由于烟气的热扩散运动造成.通过对温度分布变化过程的分析,可以看出烟气在腔室内的填充过程可以分为两个阶段:沉降阶段和混合阶段.在燃烧的初期,烟气形成顶棚射流后向下沉降,腔室内可以使用上层烟气、下层空气的“双区模型”来描述.但

是燃烧一段时间后,热烟气沉降到腔室底部,充满整个腔室,随后进入烟气混合过程.此时“双区”现象不再存在,烟气在整个腔室内进行混合,而冷空气层消失.

2.3 气体组分浓度变化分析

本研究中气体浓度测量点位于腔室底部,用于了解燃烧过程中火焰卷吸气体中成分的变化过程和熄灭时刻的氧气临界浓度.实验发现各次实验中气体浓度经历类似的变化过程.图 7 给出了开口面积为 25 cm^2 时的 14 cm 油池火中氧气、二氧化碳和一氧化碳随时间的变化历程.由图可以看出,点火后 3 种气体保持了一段时间的稳定(约 20 s),说明在这个阶段火源根部附近的气体没有受到烟气的污染.随着燃烧的进行,已经有烟气慢慢地下沉到腔室的底部,造成氧气浓度开始下降,而一氧化碳和二氧化碳的浓度逐渐升高.当火焰熄灭时,氧气浓度降到了 13.2% ,一氧化碳则达到了 620×10^{-6} .这也证明了

在水平开口腔室中,随着燃烧的发展,越来越多的烟气沉降到腔室底部,火焰不再卷吸成分单一的空气,而是卷吸成分不断改变的烟气混合物。

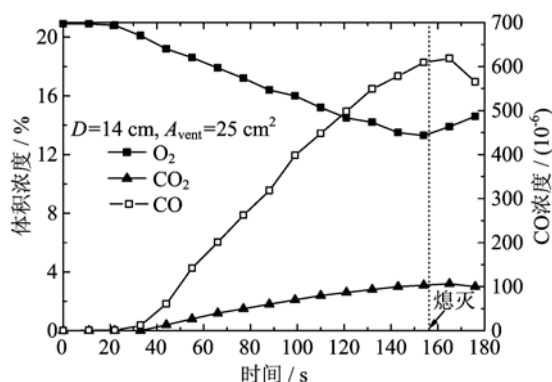


图 7 火焰根部附近的气体浓度变化过程

Fig. 7 Gas concentration at the base of pool fire

表 1 中给出了各次实验中熄灭时刻的氧气、二氧化碳和一氧化碳浓度. 在缺氧熄灭模式下,随着开口尺寸的增大,更多的烟气通过水平流出,而质量损失速率却没有发生明显变化,所以降到底部的烟气量减少,火焰熄灭时的临界氧气浓度变大,二氧化碳和一氧化碳浓度减小. 在燃料耗尽熄灭模式下,氧气浓度保持在 16.5% 以上,一氧化碳和二氧化碳的浓度相比缺氧熄灭模式下的值要低,且随开口面积的增大而变小。

3 结论

在顶部开口腔室中开展了不同尺寸的庚烷油池火灾实验,考察了顶部开口大小的影响,并分析了腔室内的气体温度分布、火源附近的气体浓度变化过程. 研究表明:

(I) 根据火焰熄灭的原因,池火可以分为缺氧熄灭模式和燃料耗尽熄灭模式. 在缺氧熄灭模式下,燃料质量损失速率主要受火源尺寸控制,开口条件的影响并不显著. 而在燃料耗尽熄灭模式下,由于达到沸腾燃烧状态的原因,燃烧速率有较为明显的增大. 另外,当火源尺寸较小时,尽管发生缺氧熄灭现象,池火质量损失速率相比自由燃烧时的值并没有减小。

(II) 通过对腔室内竖直方向上气体温度变化趋势的分析,发现在顶部开口腔室中,烟气层下降速度很快,由“双区模型”描述的烟气层和空气层很快地变为“单区”的烟气层,尽管烟气层内温度分布并不均匀。

(III) 通过测量腔室底部气体浓度的变化,证明烟气层快速降到腔室的底部;火焰不再卷吸成分单一的空气,而是卷吸含氧量不断减少的烟气. 在缺氧熄灭模式下,火焰熄灭时的氧气体积浓度一般低于 16.5%。

与 Wakatsuki^[15]的研究结果进行比较,发现当把开口从顶部中央移动到顶部拐角时,随着开口尺寸的增大,仍有油池火由“缺氧熄灭”模式向“燃料耗尽熄灭”模式转变的现象. 但是,开口和火源的相对位置将直接影响烟气的流出、外界空气的流入以及空气进入火焰区的途径. 因而,“缺氧熄灭”模式向“燃料耗尽熄灭”模式转变的临界开口条件可能会发生改变,这有待于进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] 范维澄, 孙金华, 陆守香, 火灾风险评估方法学[M]. 北京, 科学出版社, 2004.
 - [2] Li S C, Chen Y, Li K Y. A mathematical model on adjacent smoke filling involved sprinkler cooling to a smoke layer [J]. Safety Science, 2011, 49 (5): 670-678.
 - [3] Ji J, Li K Y, Zhong W, et al. Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177(1-3): 209-215.
 - [4] Kaye N, Hunt G. Smoke filling time for a room due to a small fire: The effect of ceiling height to floor width aspect ratio[J]. Fire Safety Journal, 2007, 42 (5): 329-339.
 - [5] Huo R, Chow W K, Jin X H, et al. Experimental studies on natural smoke filling in atrium due to a shop fire[J]. Building and Environment, 2005, 40: 1 185-1 193.
 - [6] NFPA. NFPA92B, Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas [S]. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2005.
 - [7] Kawagoe K. Fire Behavior in Rooms[R]. Ibaraki-ken, Japan: Building Research Institute of Japan, 1958.
 - [8] Quintiere J. Fundamentals of fire phenomena [M]. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
 - [9] Hu Jing, Lu Shouxiang, Li Changhai, et al. A study on temperature characteristic in enclosed cabin fire[J]. Fire Safety Science, 2010, 19(3): 109-115.
- 胡靖, 陆守香, 黎昌海, 等. 船舶封闭舱室火灾烟气温度特性研究[J]. 火灾科学, 2010, 19(3): 109-115.

- [10] Li Changhai, Lu Shouxiang, Yuan Man, et al. Studies on ghosting fire from pool fire in closed compartments [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, 40(7): 751-756.
黎昌海, 陆守香, 袁满, 等. 封闭空间池火火焰游走实验研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010, 40(7): 751-756.
- [11] Li Changhai, Wu Yingchun, Lu Shouxiang, et al. Study on flame pulsation of pool fires in closed compartments [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, 40(4): 380-386.
黎昌海, 吴迎春, 陆守香, 等. 封闭空间油池火火焰振荡特性研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010, 40(4): 380-386.
- [12] Jansson R, Onnermark B, Halvarsson K. Fire in a roof-ventilated room [R]. Stockholm, Sweden: National Defence Research Institute, 1986.
- [13] Morehart J H, Zukoski E E, Kubota T. Characteristics of large diffusion flames burning in a vitiated atmosphere [C]// *Proceedings of the 3rd International Symposium on Fire Safety Science*. New York: Elsevier, 1991.
- [14] Morehart J H, Zukoski E E, Kubota T. Species produced in fires burning in two-layered and homogeneous vitiated environments: GCR-90-585 [R]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 1990.
- [15] Wakatsuki K. Low ventilation small-scale compartment fire phenomena; Ceiling vents[D]. College Park, MD: University of Maryland, 2001.
- [16] Cooper L Y. Combined buoyancy and pressure-driven flow through a shallow, horizontal, circular vent[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1995, 117(3): 659-667.
- [17] Cooper L Y. Calculating combined buoyancy- and pressure-driven flow through a shallow, horizontal, circular vent: Application to a problem of steady burning in a ceiling-vented enclosure[J]. *Fire Safety Journal*, 1996, 27(1): 23-35.
- [18] Tan Q, Jaluria Y. Mass flow through a horizontal vent in an enclosure due to pressure and density differences [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(8): 1 543-1 553.
- [19] Emmons H W. Vent flows [M]// *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2002: 10.
- [20] Quintiere J G, Rangwala A S. A theory for flame extinction based on flame temperature [J]. *Fire and Materials*, 2004, 28(5): 387-402.
- [21] Chen B, Lu S X, Li C H, et al. Initial fuel temperature effects on burning rate of pool fire[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 188(1/3): 369-374.
- [22] Kang Q S, Lu S X, Chen B. Experimental study on burning rate of small scale heptane pool fires [J]. *Chinese science bulletin*, 2010, 55: 973-979.