科学通报 2010 年 第 55 卷 第 1 期：87 ~ 93
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

小尺度庚烷池火燃烧速率实验研究

康泉胜, 陆守香*, 陈兵

中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027
* 联系人, E-mail: sxlu@ustc.edu.cn

2009-07-05 收稿, 2009-10-30 接受
国家自然科学基金(批准号: 50976109)和 2008 年度中国科学院研究生科技创新与社会实践基金资助项目

摘要 对小尺度庚烷薄油池火燃烧速率特性进行实验研究. 测量了不同直径庚烷油池火焰高度、燃烧速率以及燃油温度随时间变化规律, 计算了燃烧过程中燃油的液面温度和池壁热流密度. 综合油池燃烧现象和各种测量参数提出了小尺度薄油池火的 4 个典型燃烧阶段, 并探讨了池壁热流密度对油池沸腾燃烧的影响. 结果表明: 油池沸腾燃烧阶段的火焰高度和燃烧速率明显大于准稳态燃烧阶段; 燃油液面温度在油池燃烧初期迅速上升至沸点, 随后基本保持不变; 池壁温度达到并超过燃料的沸点, 从而在油池壁面上发生核态沸腾, 是油池发生沸腾燃烧的条件.

关键词
庚烷
薄油池火
燃烧速率
沸腾燃烧

油料泄漏往往会形成油层厚度较薄的油池火灾, 如船舶甲板燃油泄漏火灾. 油池火实验研究已经开展了多年, 其燃烧过程通常可以分为 3 个阶段, 即增长阶段、稳定燃烧阶段以及熄灭阶段[1]. 前人的研究大都针对油池稳定燃烧阶段, 即燃烧过程中保持燃油液面高度不变, 以使油池火处于准稳态燃烧[2~4], 而对油池火燃烧过程中各参数随时间的变化规律研究较少. 油池火燃烧速率是火灾学研究的重要参数, 国外研究者对各种燃料和直径的油池燃烧速率进行了广泛的实验测量, 但是由于各研究者的实验条件各有差异, 导致所测结果往往不同, 甚至有的差异较大[5~8].

与一般油池火相比, “薄油池火”的燃烧过程更为复杂, 由于其油层较薄, 燃烧过程受到壁面热传递过程的强烈影响. 尤其是燃油沸点较低时, 油池壁面温度一旦超过燃料沸点, 固/液界面上就会发生沸腾现象, 致使油池燃烧更为激烈. 因此有必要对非稳态油池火燃烧过程及其影响因素进行深入细致的研究. 本文通过对小尺度薄油池火的实验研究, 对油池不同燃烧阶段的特点进行分析, 测量火焰高度、燃烧速率以及燃油温度随燃烧过程的变化规律, 探讨池壁沸腾现象对油池火焰高度和燃烧速率的影响规律.

1 实验装置与测试方法

如图 1 所示, 整个实验系统由小尺寸油池、质量测量系统、温度测量系统和 CCD 摄像构成.

实验采用不锈钢制圆形油池, 其内径分别为 0.10, 0.14, 0.20 和 0.30 m, 油池内高为 0.04 m, 壁厚为 0.003 m. 实验时设定燃油初始厚度约为 0.013 m, 油池下部使用三脚架支撑在电子天平上, 油池下表面和天平之间保留一定空隙以使空气正常流动.

燃烧过程中设置电子天平每秒记录一次燃烧系统的质量数据, 从而得到系统的失重曲线, 对失重曲线进行微分可以得到油池的质量损失速率, 也即质量燃烧速率.

油池中心线上放置了 9 支直径为 0.5 mm 的微细热电偶, 用以测量燃烧过程中不同高度燃油的温度变化情况, 这些热电偶从上到下编号分别为 F1~F9, 他们相对于油池底面的高度分别为 12.6,11.6,10.9, 10.4,8.4, 7.6,6.5,6.0 和 2.4 mm. 根据燃油中热电偶测

英文版见: Kang Q S, Lu S X, Chen B. Experimental study on burning rate of small scale heptane pool fires. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0741-y

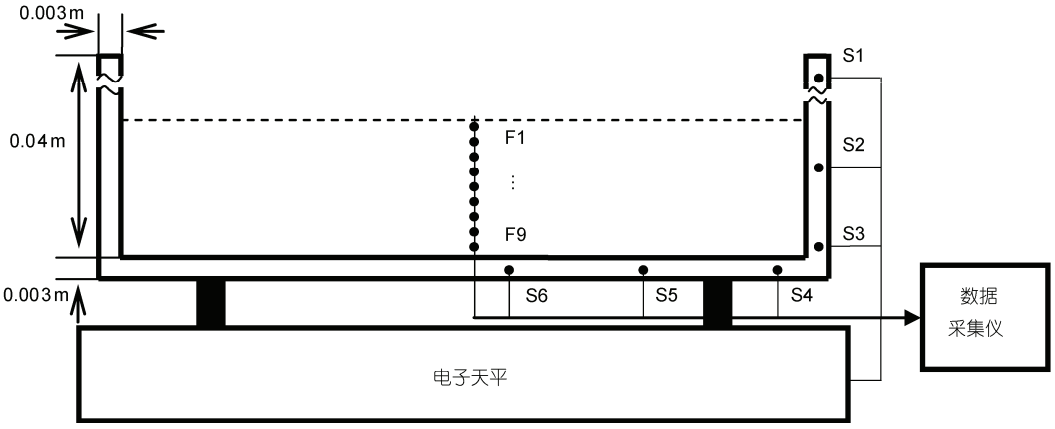

图 1 小尺度庚烷池火实验设置示意图

得的温度数值, 可以推算出燃烧过程中燃油液面的温度变化, 其具体计算方法如下: 首先根据系统失重曲线确定某一时刻液面的高度, 然后对热电偶所测温度取插值, 则可以得到该时刻液面处的温度数值. 油池侧壁和底壁上分别植入 3 支微细热电偶用以测量壁面的温度变化, 其编号分别为 S1 至 S6, 侧面上的热电偶相对于油池底面的高度分别为 37, 20 和 3 mm, 底面上的热电偶距油池中心分别为 5 mm, $D/4$, $(D/2-5)$.

另外还采用两台 CCD 摄像机, 一台拍摄油池内燃油的燃烧情况, 另一台用以拍摄火焰图像, 通过图像处理技术可以得到火焰高度的实时变化情况. 如无特殊说明, 下文中提到的火焰高度均指无量纲火焰高度(H_f/D).

本文实验所采用的燃料为正庚烷(C_7H_{16}). 正庚烷作为一种液体燃料, 十六烷值为 56, 与柴油相当, 虽然其物理性质有所差异, 但自燃着火特性与柴油类似, 因此被广泛用于研究柴油燃烧的替代燃料[9]. 其闪点为 272 K, 沸点为 371.6 K. 为排除风的干扰, 本次实验在室内进行, 大气压力为 1 atm(1 atm=1.013 $\times 10^5$) Pa, 具体实验工况如表 1 所示.

表 1 小尺度庚烷池火实验工况表

编号	油池直径/m	初始厚度/mm	室温/℃	湿度(%)
1	0.10	13	13.5	54
2	0.14	13	5	10
3	0.20	13	14.5	50
4	0.30	13	11.5	34

2 结果和讨论

2.1 小尺度薄油池火燃烧过程分析

燃油被点燃后, 随着油池燃烧的进行, 燃料不断蒸发进入火焰燃烧, 油池质量不断下降. 通过电子天平测量油池质量变化得到油池失重曲线. 对油池失重曲线进行微分可以得到油池燃烧速率随时间的变化, 如图 2(a)所示.

对 CCD 摄像机拍摄到的火焰图像进行图像处理, 可以得到燃烧过程中火焰高度的实时变化情况, 对火焰高度随时间变化曲线进行平滑处理则可以看出油池相对火焰高度随时间的变化趋势, 如图 2(b)所示.

根据图 2 中庚烷池火燃烧速率和火焰高度随时间的变化规律, 可以将小尺度薄油池火的燃烧过程划分为 4 个阶段:

(ⅰ) 首先是预燃阶段, 油池被点燃后火焰迅速扩展至整个油面, 燃烧速率快速增长, 火焰高度不断增大; 典型火焰形态如图 4(a)和(b)所示;

(ⅱ) 经过短暂的预燃阶段后, 油池进入准稳态燃烧阶段, 燃烧速率基本达到稳定值, 火焰高度也在某一高度附近上下振荡; 由对油池液面拍摄的图像可知, 此时燃油燃烧比较平静, 如图 4(a)所示; 此阶段内燃烧速率可以称为稳定燃烧速率($\dot{m}_1''$); 典型火焰形态如图 3(c)所示;

(ⅲ) 油池经过一段时间燃烧后, 200 s 左右时燃烧速率突然增大, 火焰高度也迅速增加, 350 s 时油池燃烧速率和平均火焰高度均达到最大值; 从油池液面图像可知, 200 s 左右时, 油池壁面上开始出现零星气泡, 如图 4(b)所示. 随着燃烧继续进行, 池壁上产生的气泡越来越多, 液面开始剧烈振荡, 至 300 s 左右时, 整个油池内充满气泡. 如图 4(c)所示. 燃烧速率进一步增大; 综合燃烧速率特征、火焰高度变化以

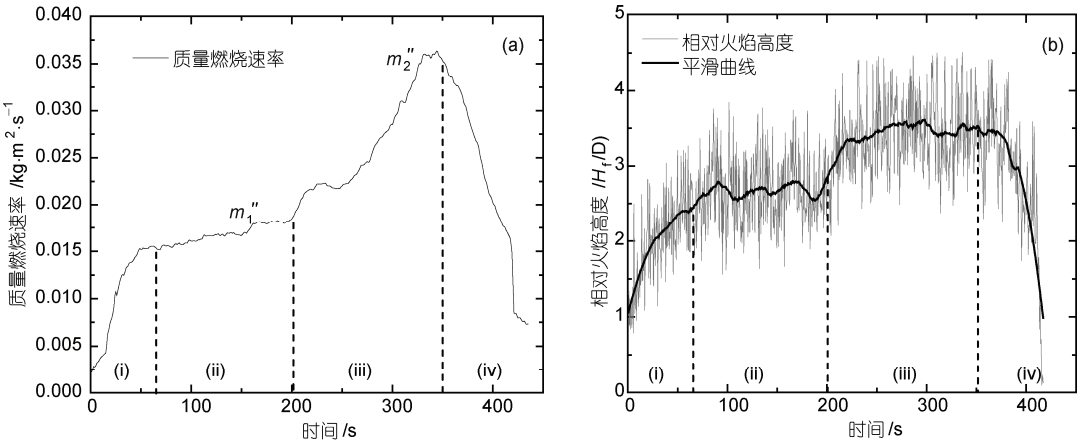

图 2　庚烷池火燃烧速率和火焰高度随时间变化 (D=0.30 m, h_0=13 mm)

(a) 质量燃烧速率; (b) 相对火焰高度

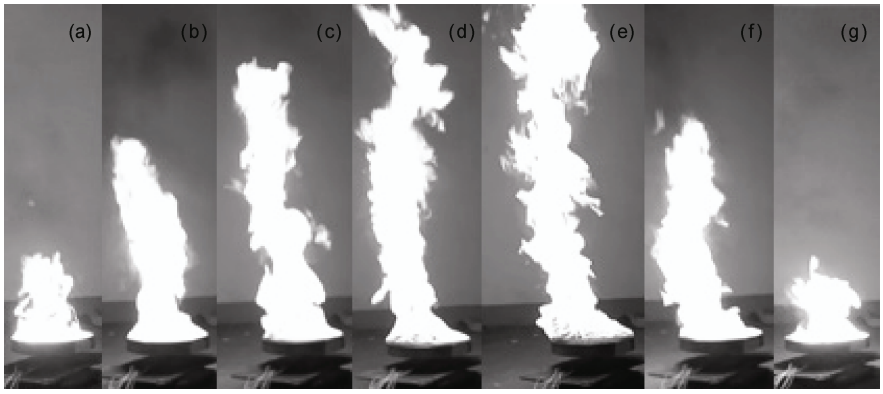

图 3　不同时刻庚烷池火火焰形态(D=0.30 m, h_0=13 mm)

(a) 5 s; (b) 40 s; (c) 100 s; (d) 200 s; (e) 300 s; (f) 400 s; (g) 420 s

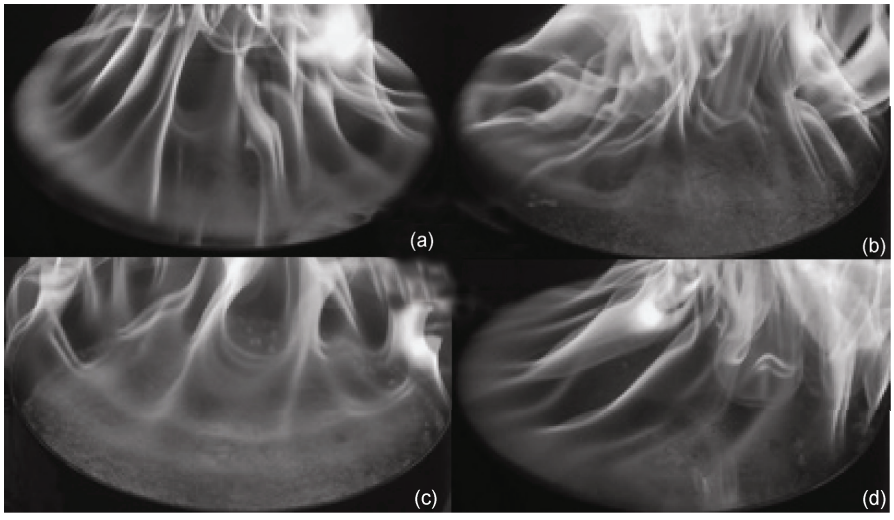

图 4　不同时刻庚烷池火液面图像(D=0.30 m, h_0=13 mm)

(a) 100 s; (b) 200 s; (c) 300 s; (d) 400 s

及燃油内气泡形成特点可知, 油池壁面上发生了沸腾现象, 因此将此阶段称为沸腾燃烧阶段, 将此阶段内燃烧速率最大值称为沸腾燃烧速率($\dot{m}_2''$); 典型火焰形态如图 3(d), (e)所示;

(ⅳ) 油池燃烧速率达到最大值后, 燃烧速率开始减小, 油池进入衰减熄灭阶段; 此时燃油已经不能覆盖整个油池底面, 如图 4(d)所示; 随着燃油持续减少, 燃烧速率和火焰高度迅速下降, 以致最后熄灭; 典型火焰形态如图 3(f), (g)所示.

图 5 为不同直径庚烷池火燃烧速率随时间的变化. 由图 5 可以看出, 不同直径油池燃烧速率随时间的变化规律是相似的, 都经历了预燃阶段、准稳态燃烧阶段、沸腾燃烧阶段和衰减熄灭阶段. 随着油池直径增大, 庚烷池火稳定燃烧速率和沸腾燃烧速率均有所增大, 而且沸腾燃烧速率增幅更显著, 因此其燃烧时间显著缩短.

2.2 薄油池火沸腾燃烧特性

由前面的分析得知, 油池被点燃后, 随着燃烧的进行, 火焰高度在振荡中逐渐增大, 燃烧速率迅速增大; 进入准稳态燃烧阶段后, 火焰高度保持在某个高度附近不断脉动, 燃烧速率则基本保持不变; 而在进入沸腾燃烧阶段后, 由于池壁沸腾作用, 致使油池火焰高度和燃烧速率均有较大增加. 由图 2 可知, 直径为 0.30 m 时, 庚烷油池火稳定燃烧速率为 0.014 kg/m^2·s, 沸腾燃烧速率最大值则为 0.022 kg/m^2·s.

图 6 所示为不同燃烧阶段下的火焰高度间歇率的比较. 根据 Zukoski 等人[10]给出的火焰间歇率概念, 取 I=0.5 时的火焰高度为池火平均火焰高度, 由图 6 可知, 油池直径为 0.30 m 时准稳态燃烧阶段和沸腾燃烧阶段的平均火焰高度分别为 2.5D 和 3.3D.

图 7 显示油池直径分别为 0.10, 0.14, 0.20 和 0.30 m 时, 庚烷油池火稳定燃烧速率和沸腾燃烧速率的比较. 由图可知, 稳定燃烧速率和沸腾燃烧速率均随油池直径增大而增大; 沸腾燃烧速率与稳定燃烧速率的比值在油池直径为 0.10 m 时最大, 在油池直径为 0.14 m 时最小, 然后随着油池直径增大缓慢增长.

2.3 薄油池火燃烧过程传热分析

油池火燃烧与传热过程密切相关, 要深入研究池火燃烧的机理和规律, 就必须了解燃烧系统的温度变化及其热量传递过程. 通常认为在小尺度油池火

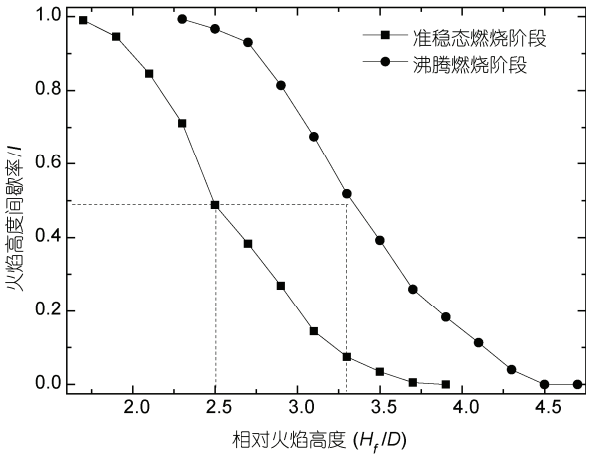

图 6 准稳态燃烧阶段与沸腾燃烧阶段火焰高度间歇率比较(D=0.30 m, h_0=13 mm)

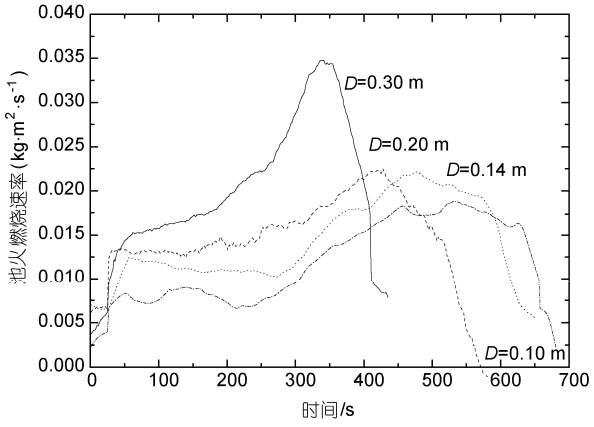

图 5 不同直径庚烷池火燃烧速率随时间变化(h_0=13 mm)

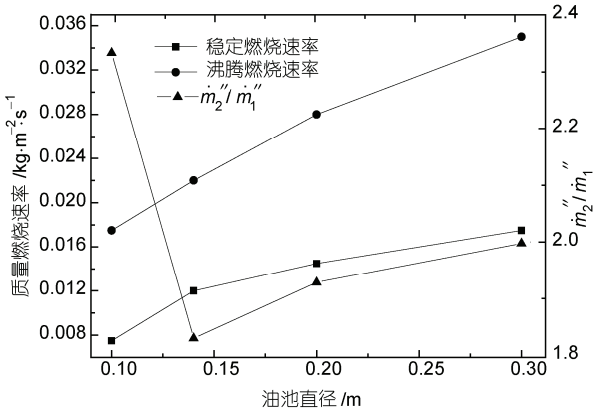

图 7 庚烷池火稳定燃烧速率与沸腾燃烧速率比较

中, 通过油池壁面传导的热量是影响油池燃烧过程的主要传热模式, 下面以直径为 0.30 m 庚烷油池火为例对小尺度薄油池火燃烧过程进行传热分析.

图 8 显示直径为 0.30 m 庚烷油池燃烧过程中各热电偶所测温度随时间的变化规律, 其中 F1 至 F9 号热电偶位于油池燃料中, 其所测温度变化趋势是相似的(如图 8(a)所示). 下面以 F1 号热电偶为例说明热电偶温度变化规律, 油池燃料初始高度为 13 mm, F1 号热电偶高度为 12.6 mm. 油池被点燃后, 随着燃料液面不断下降, 热电偶温度迅速上升, 在 30 s 左右时, 燃料液面下降到 F1 号热电偶附近时, 热电偶温度达到庚烷沸点; 在 50 s 左右时, 燃料液面高度约为 12.4 mm, 此时 F1 号热电偶已经脱离燃料液面, 测量的温度应为庚烷蒸汽温度, 在 50~140 s 之间, 由于受到液面蒸发的影响, 热电偶温度有所下降, 但下降幅度不大; 140 s 时, 燃料液面高度约为 10.3 mm, 此时 F1 号热电偶位于燃料液面上方 2.3 mm 处, 温度又开始逐渐上升; 380 s 后, 由于热电偶直接接触到火焰,其温度急剧上升.

S1~S3 号热电偶以及 S4~S6 号热电偶分别位于油池侧壁和油池底壁上. 侧壁温度随时间变化可以分为两个阶段: 在油池燃烧初始阶段, 温度迅速上升; 随着壁面温度越来越高, 其对空气和燃料的对流热传导等热损失也逐渐增大, 因此温度上升幅度减缓. 而底壁温度始终增长缓慢, 只在油池最后燃烧阶段超过了庚烷沸点温度(如图 8(b)所示).

根据液面位置随时间变化以及各热电偶所测温度数值可以计算出燃烧过程中燃料表面温度以及液面处的侧壁温度, 分别如图 9 所示. 固/液交界面之间通过对流传热, 根据燃油温度和壁面温度可以计算得到燃油与油池壁面之间的热量传递情况. 对流换热的相应形式应为[11]:

$$\dot{q}''_{cv,sl} = h\left(T_s - T_l\right) = h\Delta T, \tag{1}$$

其中 $\Delta T = \left(T_s - T_l\right)$ 表示某一高度上池壁温度与燃油温度之差. 对于庚烷油池来说, 池壁温度小于庚烷的沸点(98.4°C)时属于自然对流换热; 当池壁温度处于 98.5~160°C 时将会发生核态沸腾[12].

由图 9 可知, 庚烷油池被点燃后不久, 燃料表面温度迅速上升至沸点, 并在以后的燃烧过程中基本保持不变. 在预燃和准稳态燃烧阶段, 侧壁温度一直低于燃料温度, 因此热量传递方向是由燃料传向壁面; 随着油池燃烧的进行, 油池侧壁温度不断上升, 到沸腾燃烧阶段后油池侧壁温度开始超过庚烷沸点, 此时热量由池壁向燃料传递, 且固/液界面上发生了核态沸腾现象.

根据自然对流换热和沸腾换热的常用计算公式可以计算得到不同时刻液面处的池壁热流密度, 如图 10 所示, 图中负号表示热量由燃料向壁面传递. 由图可知, 在预燃和准稳态燃烧阶段, 池壁热流密度小于零, 进入沸腾燃烧阶段后, 池壁热流密度显著增大, 从而导致油池燃烧速率的增长. 图 11 为不同直径庚烷池火液面处的侧壁温度随时间变化, 由图可知, 不同直径油池壁面温度的变化规律是相似的; 在预燃和准稳态燃烧阶段小于沸点, 而在发生沸腾燃烧后超过燃料沸点.

结合图 9 和图 10 可以发现, 油池稳定燃烧阶段和沸腾燃烧阶段的分界点是液面处固/液界面温度达到庚烷沸点. 在稳定燃烧阶段, 燃料的消耗全部是通

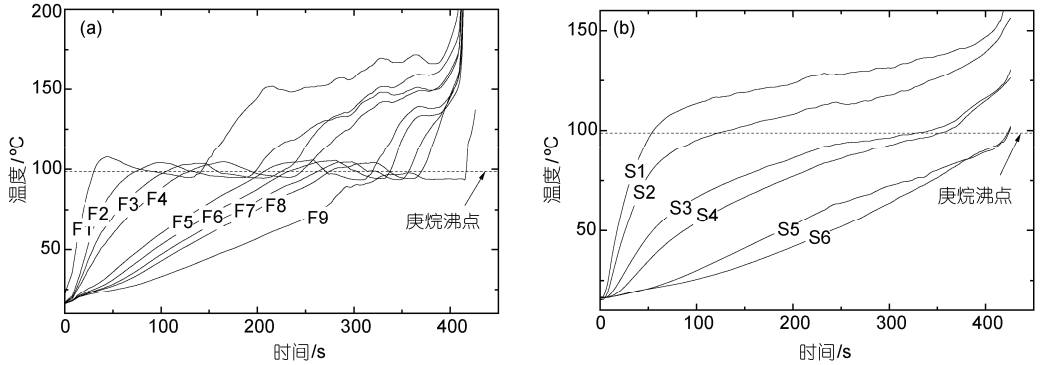

图 8　庚烷池火热电偶测量温度随时间变化(D=0.30 m, h_0=13 mm)

(a) 燃料温度; (b) 壁面温度

过液面向外蒸发, 因此燃烧速率与燃料蒸发特性有关, 蒸发速率主要受燃料温度、油池面积以及空气流动等因素的影响. 由图 9 可知, 稳定燃烧阶段内, 燃料液面温度基本维持在沸点附近, 而且实验空间内排除了外界风速的影响, 因此稳定燃烧速率主要与油池面积有关, 如图 7 所示, 油池稳定燃烧速率随油池直径的增大而增大.

进入沸腾燃烧阶段后, 由于壁面上发生了沸腾现象, 燃料大量汽化, 从而导致油池燃烧速率大幅增加. 此阶段内, 燃料除了继续通过液面不断蒸发外, 还在壁面上通过沸腾大量汽化, 由此可以将沸腾燃烧速率 $\dot{m}_2''$ 分为两个部分, 其一为通过燃料液面蒸发的部分 $\dot{m}_{2s}''$, 由于在沸腾燃料阶段内液面温度依然保持在沸点附近, 可以认为 $\dot{m}_{2s}'' \approx \dot{m}_1''$; 另一部分为燃料通过壁面沸腾的汽化速率 $\dot{m}_{2w}''$

$$\dot{m}_{2w}'' = \dot{m}_2'' - \dot{m}_{2s}'' \approx \dot{m}_2'' - \dot{m}_1'', \qquad (2)$$

$\dot{m}_{2w}''$ 受到固/液界面上的沸腾热流及沸腾面积强烈影响, 池壁温度越高, 沸腾热流越大, 沸腾面积越多, 燃料汽化速率也越大. 进入沸腾燃烧阶段后, 开始只有一部分壁面温度超过燃料沸点, 随着燃烧进行, 壁面温度不断升高, 发生沸腾的池壁面积不断增大沸腾燃烧速率也相应增加. 由图 11 可知, 不同直径油池沸腾燃烧过程中侧壁最高温度相差不大, 因此汽化速率主要受到池壁沸腾面积的影响, 也即随着油池直径的增大而增大, 如图 12 所示.

综上所述, 油池发生沸腾燃烧的条件是池壁温度达到并超过燃料的沸点, 从而在油池壁面上发生核态沸腾现象, 导致燃烧速率显著增大. 因此, 小尺度薄油池火燃烧过程中是否出现沸腾燃烧阶段, 主要取决于固/液交界面上的过余温度是否大于零. 由此可知沸点较低的燃料比较容易发生沸腾燃烧现象.

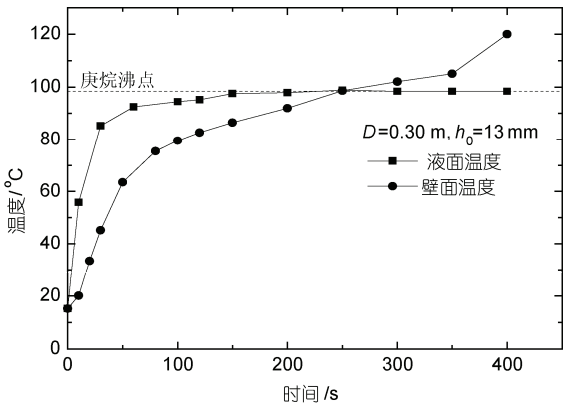

图 9 燃料表面温度及液面处的壁面温度

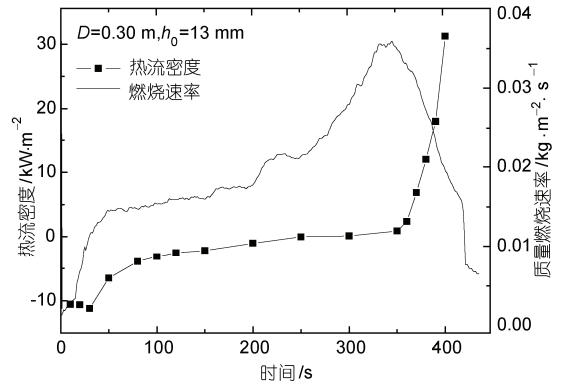

图 10 液面处池壁热流密度与燃烧速率

3 结论

通过小尺度薄油池火实验研究, 可以得出以下

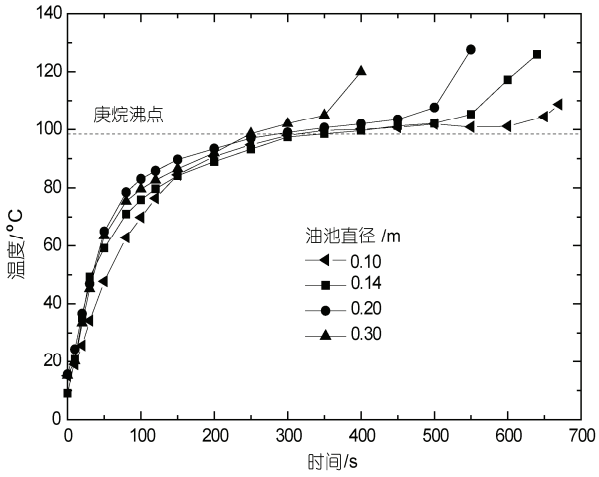

图 11 不同直径庚烷池火液面处侧壁温度随时间变化

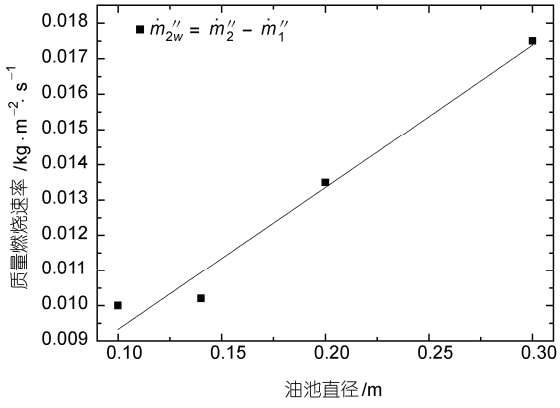

图 12 燃料通过固/液界面沸腾产生的汽化速率

结论:

(1) 小尺度薄油池火燃烧过程包括预燃、准稳态燃烧、沸腾燃烧和衰减熄灭 4 个典型阶段, 沸腾燃烧阶段的火焰高度和燃烧速率明显大于准稳态燃烧阶段. 不同直径庚烷池火燃烧速率随时间变化的规律相似, 稳定燃烧速率和沸腾燃烧速率均随直径增大而增大, 且沸腾燃烧速率增幅更大.

(2) 油池燃烧过程中, 燃油液面温度在燃烧初期迅速上升至沸点, 并在随后的燃烧过程中基本保持不变.

(3) 池壁温度随油池燃烧逐渐增大, 最后超过燃料沸点, 致使固/液界面上发生核态沸腾, 池壁对燃料的传热量急剧增加, 从而导致燃烧速率显著增大.

(4) 油池火燃烧过程中是否会出现沸腾燃烧阶段, 主要取决于池壁温度是否大于燃料沸点, 沸点较低的燃料更容易发生沸腾燃烧.

参考文献

1 Chatris J M, Quintela J, Folch J, et al. Experimental study of burning rate in hydrocarbon pool fires. Combust Flame, 2001, 126: 1373—1383

2 Blinov V I, Khudyakov G N. Diffusion burning of liquids. T-1490 ASTIA AD 296762, 1961. 118—163

3 Babrauskas V, Grayson S J. Heat Release in Fires. London: Elsevier Science, 1992

4 Hamins A, Fischer S J, Kashiwagi T, et al. Heat feedback to the fuel surface in pool fires. Combust Sci Technol,1994, 97: 37—62

5 Gore J, Klassen M, Hamins A, et al. Fuel property effects on burning rate and radiative transfer from liquid pool fires. In: Proc 3rd Symp (Int) Fire Saf Sci, 1991

6 Koseki H, Hayasaka H. Estimation of thermal balance in heptane pool fire. J Fire Sci, 1989, 7 237—250

7 Shinotake A, Koda S, Akita K. An experimental study of radiative properties of pool fires of an intermediate scale. Combust Sci Technol, 1984, 43: 85—97

8 Koseki H, Yumoto T. Burning characteristics of heptane in 2.7 m square dike fires. Fire Saf Sci, 1989, 2: 231

9 喻武, 卫立夏, 马志豪, 等. 正庚烷+丙烷/氧气/氮气低压预混层流燃烧. 科学通报, 2009, 54: 505—515

10 Zukoski E E, Cetegen B M, Kubota T. Visible structure of buoyant diffusion flames. In: Proc 20th Int Symp on Combust, 1984, 361—366

11 Holman J P. Heat Transfer. 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2002

12 Manzello S L, Yang J C. An experimental study of high weber number impact of Methoxy-nonafluorobutane C4F9OCH3 (HFE-7100) and n-heptane droplets on a heated solid surface. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45: 3961—3971