

# 纵向通风对正方形酒精池火燃烧速率影响的实验研究

李权威, 秦俊, 唐海东, 倪佳迪, 廖光焯, 周宇鹏

(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:**在低湍流风洞实验研究了0~3.95 m/s的纵向通风对边长为4 cm至9 cm的正方形酒精池火燃烧速率的影响,并在实验数据的基础上分析了通风影响酒精池火燃烧速率的机理。实验表明,零风速时酒精池火单位面积燃烧速率基本一致;随着风速的增大,各油池燃烧速率呈单调递增趋势。通风使得酒精油池接收到的热反馈增强是燃烧速率加快的主要原因,其影响远大于对流强制蒸发的作用,且通风影响酒精燃烧速率的趋势主要决定于油池接收的总热反馈量。随着风速的增加,相较于油盘下风侧壁面,燃料表面接收到的热反馈对燃烧速率的影响逐渐占主导。

**关键词:**酒精池火;纵向通风;燃烧速率;热反馈

**中图分类号:**TK16 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2010.07.016

## Experimental study on effects of longitudinal air flow on burning rate of square ethanol pool fires

LI Quanwei, QIN Jun, TANG Haidong, NI Jiadi, LIAO Guangxuan, ZHOU Yupeng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** The effects of a longitudinal air flow ranging in speed from quiescent to 3.95 m/s on the burning rate of square ethanol pools ranging in size from 4 cm×4 cm to 9 cm×9 cm were studied experimentally in a low-turbulence wind tunnel. Based on the experimental results, the mechanism of how the burning rate is affected by the air flow was discussed. The results show that for all pools tested when the flow speed is quiescent the burning rate of ethanol per unit area was basically constant. And the burning rate increased monotonically with the increase of flow air speed. The main reason for ventilation to speed up the burning rate of ethanol pool fires is that it enhances the heat feedback to the pool, which plays a far more important role than ventilation speeding up the evaporation rate by forced convection. With the increase in air flow speed, the heat feedback to the fuel surface plays an increasingly dominant role in the burning rate than that to the downward side wall of the pool.

**Key words:** ethanol pool fire; longitudinal air flow; burning rate; heat feedback

## 0 引言

自上世纪50年代开始,人们对油池火开展了大量的应用和基础研究。这些研究主要集中在油池火

的脉动频率、高度、蔓延速率、烟气生成速率以及油池火的能量平衡等方面,试图给出小尺度油池火与中尺度及大尺度油池火间的尺度关系。这些研究大多是在没有通风的条件下开展的,与静止环境相比,

通风条件下油池火燃烧特性的研究相对较少. 然而, 现实情况中的油池火燃烧大部分都是受通风影响的, 尤其在隧道一类的需要强制通风的狭长环境下更是如此. 因此, 在隧道建设大发展、隧道火灾频发的背景下, 开展通风条件下油池火的燃烧特性研究非常必要. 此前关于纵向通风对油池火燃烧速率的影响尚存争议, 譬如 Blinov 等<sup>[1]</sup>对直径 0.15~0.5 m 的汽油、煤油和柴油池火的研究发现, 通风使其燃烧速率单调增加并趋于常数值, 而相同尺寸的重油燃烧速率则不受通风的影响. 然而, Capener 等<sup>[2]</sup>和 Apte 等<sup>[3]</sup>对直径 0.6~15 m 的航空燃料池火燃烧速率的实验研究发现, 其燃烧速率随纵向通风风速的增加而减小, 这恰与 Blinov<sup>[1]</sup>的结果相反. 近年来, Chatris 等<sup>[4]</sup>开展了直径 1.5~4 m 的碳氢燃料池火的实验, 对燃烧速率与油池尺寸的关系及通风对燃烧速率的影响进行了研究. Kolb 等<sup>[5]</sup>研究了通风对多孔介质内燃料燃烧速率的影响. Carvel 等<sup>[6]</sup>用贝叶斯理论对前人的实验数据总结分析, 研究了风速、隧道截面形状等对火源功率的影响. Yang 等<sup>[7-8]</sup>研究了纵向风速对隧道火灾燃烧速率的影响, 认为通风使得燃烧速率加快是由于供氧充足的正面作用大于冷却的负面影响. Jae 等<sup>[9]</sup>围绕隧道通风临界风速问题, 开展了通风对正庚烷池火燃烧速率影响的小尺度模拟实验, 并对前人的临界风速模型进行了修正. Joshua 等<sup>[10]</sup>进行了纵向通风对矩形甲醇池火燃烧速率影响的实验研究, 给出了不同形状油池燃烧速率随风速变化的规律, 分析了油池形态对燃烧速率的影响, 并给出了通风作用下油池净热反馈增强的推断. 然而, 总结以上的研究可以发现, 大家从各自的角度开展了较好的研究, 但对通风影响油池热反馈的具体机理研究较少. 为此, 笔者开展了纵向通风对酒精池火燃烧速率影响的实验, 对酒精池火的热反馈受通风的影响进行了探讨, 并进一步分析了通风对酒精池火燃烧速率的影响机理.

## 1 油池火能量平衡分析<sup>[11-12]</sup>

图 1 为油池火热平衡示意图, 油池接收到的能量以及油池消耗的能量可分别记为

$$\dot{Q}_{\text{recv}} = \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{cond}} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{cons}} = \dot{Q}_{\text{heat}} + \dot{Q}_{\text{evap}} + \dot{Q}_{\text{re-rad}} + \dot{Q}_{\text{loss}} \quad (2)$$

式中,  $\dot{Q}_{\text{rad}}$ ,  $\dot{Q}_{\text{conv}}$  和  $\dot{Q}_{\text{cond}}$  分别为燃料从火焰接收到的辐射热流和对流热流以及通过油盘壁面热传导作用

获得的热量;  $\dot{Q}_{\text{heat}}$  表示加热燃料的热量,  $\dot{Q}_{\text{evap}}$  是蒸发燃料消耗的热量,  $\dot{Q}_{\text{re-rad}}$  和  $\dot{Q}_{\text{loss}}$  分别代表油池表面的辐射热损失和通过油盘壁面及底部的热损失. 其中

$$\dot{Q}_{\text{evap}} = \dot{m}_{\text{fu}} H_{\text{v}} \quad (3)$$

$H_{\text{v}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$  为燃料的蒸发潜热;  $\dot{m}_{\text{fu}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$  为燃料的质量消耗速率.

燃料着火后,  $\dot{Q}_{\text{recv}}$  由 0 逐渐增大,  $\dot{Q}_{\text{heat}}$ ,  $\dot{Q}_{\text{evap}}$  和  $\dot{m}_{\text{fu}}$  也随之增大, 燃烧开始加剧, 在通风作用下  $\dot{Q}_{\text{re-rad}}$  和  $\dot{Q}_{\text{loss}}$  也越来越大, 当油池达到沸腾后  $\dot{Q}_{\text{heat}}$  为 0, 直到  $\dot{Q}_{\text{recv}}$  与  $\dot{Q}_{\text{re-rad}}$ ,  $\dot{Q}_{\text{loss}}$  以及  $\dot{Q}_{\text{evap}}$  达到平衡, 燃烧进入稳定燃烧状态, 此时  $\dot{m}_{\text{fu}}$  基本保持定值.

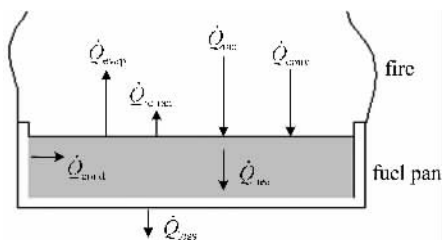


图 1 油池火热平衡示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the energy balance for a pool fire burning a liquid fuel

## 2 实验方法

### 2.1 燃料和油池

实验中采用的燃料是浓度为 95% 的工业酒精. 油盘由 1 mm 厚的不锈钢板加工而成, 均为正方形, 边长分别为 4, 5, 6, 7, 8 和 9 cm, 油盘深度 1.5 cm. 实验前燃料添加至与油盘上边沿齐平, 各油盘对应的添加酒精的质量分别为 17.8, 27.8, 40, 54.4, 71 和 90 g.

### 2.2 风洞

为营造一个准稳态、低湍流的稳定流场, 本文的实验在风洞中进行. 风洞实验段长 2.5 m, 实验段截面宽 0.4 m、高 0.8 m, 为抽吸式风洞. 根据实验的需要对风洞进行了改造, 将风洞的实验段上下各隔去 0.2 m, 即实验时风洞截面有效高度为 0.4 m. 图 2 为实验风洞的结构示意图.

### 2.3 实验布置

#### 2.3.1 燃烧实验

图 3 为燃烧实验时风洞实验段布置示意图. 实验中, 油盘位于实验段的中心, 置于与称重天平相连的金属托盘上, 且托盘与实验段下表面持平. 称重天

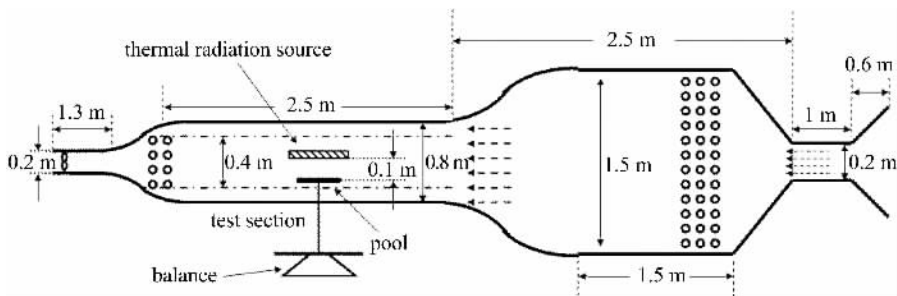


图2 实验风洞结构示意图

Fig. 2 Schematic of the low-turbulence wind tunnel

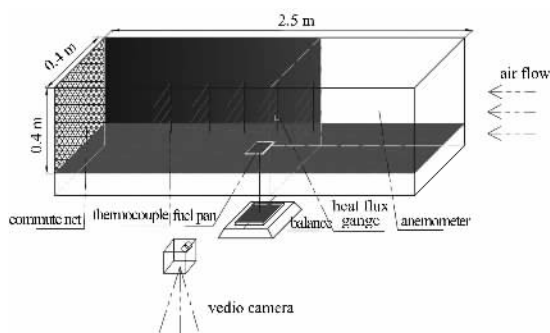


图3 风洞实验段布置示意图

Fig. 3 Schematic layout of the model tunnel

平的精度为 0.01 g, 采样速率为 1 Hz. 风速计位于实验段进气口下风侧 0.2 m 处, 测量该截面不同位置的风速, 取其平均值作为当前风速. 辐射热流计沿油盘中线方向距油盘中心水平距离 0.15 m, 且高出燃料起始上表面 0.05 m, 测量火焰辐射热通量. 油盘中心距底面约 2 mm 处及下风侧外侧中心距油盘壁面约 5 mm 处各设置一个 K 型铠装热电偶监测燃料及侧壁附近的温度, 燃料起始上表面沿气流方向中轴线均匀布置 5 个 S 型铠装热电偶监测温度, 油盘附近沿气流方向布置数个热电偶束监测火场温度. 彩色摄像机位于风洞实验段外侧距油盘 1.5 m 处, 正对油盘进行拍摄. 实验按如下的步骤开展:

(I) 设定风洞风机变频器数值, 打开实验观测窗并向油池注入燃料;

(II) 打开数据采集系统采集质量、辐射和温度数据并点火;

(III) 关闭实验观测窗, 并在点火后 30 s 开始通风, 测量并记录实验段风速;

(IV) 待燃料燃尽后, 持续通风至风洞内部温度与环境一致后关闭风机.

### 2.3.2 蒸发实验

蒸发实验同样在该风洞的实验段中进行, 油盘

及称重系统的布置与燃烧实验相同, 在油盘正上方 0.1 m 处放置一个可调热辐射源, 辐射源的直径为 0.12 m, 如图 2 所示. 油盘中心距底面约 2 mm 处设置一个 K 型铠装热电偶监测油池温度. 实验按如下的步骤开展:

(I) 设定风洞风机变频器数值, 打开实验观测窗并将辐射热流计放置于热辐射源的正下方;

(II) 关闭实验观察窗, 打开数据采集系统采集热流计辐射热流值, 并启动风机开始通风;

(III) 打开并调整热辐射源的输入电压使辐射热流稳定于所需值, 并记录相应的电压值;

(IV) 关闭热辐射源, 打开观测窗撤走热流计, 将油盘放置于称重托盘并注入燃料;

(V) 打开数据采集系统, 关闭观察窗, 设定合适的输入电压, 打开热辐射源;

(VI) 待燃料蒸发完毕后, 关闭热辐射源, 持续通风至风洞内部温度与环境一致后关闭风机. 如需调整风速测量则重复执行步骤(I)~(VI).

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 燃料的质量消耗速率

图 4 为实验测得的 7 cm × 7 cm 酒精池火在不同风速下的燃烧失重曲线, 对其以 5 s 为步长求微分得到图 5 所示的相应的质量消耗速率曲线. 可见, 在没有通风的时候, 酒精的质量消耗速率随时间的变化不大, 燃烧相对比较平稳; 施加通风后, 酒精质量消耗速率呈现先上升后趋于平稳的趋势, 并且质量消耗速率随着风速的增加而增大.

### 3.2 油池温度和质量消耗速率

图 6 给出了边长 7 cm 的酒精池火在 2.15 m/s 风速下的典型质量消耗速率、辐射热通量及油池温度随时间的变化曲线. 可以看到辐射热通量与酒精的质量消耗速率的变化趋势吻合很好, 且与油池温

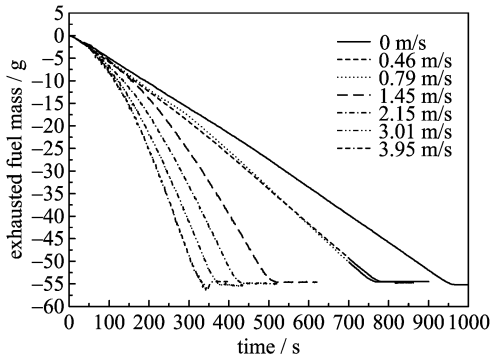


图 4 边长 7 cm 酒精池火燃料质量消耗量随时间变化曲线

Fig. 4 Exhausted fuel mass of the 7 cm×7 cm pool fire versus time

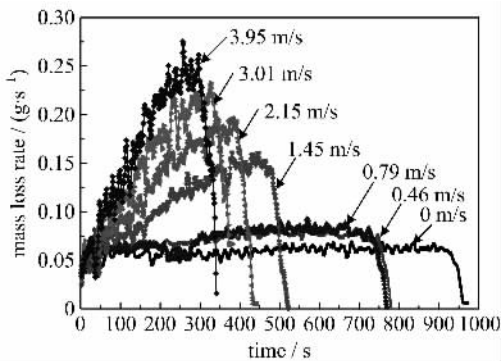


图 5 边长 7 cm 酒精池火质量消耗速率随时间的变化曲线

Fig. 5 Fuel mass loss rate of the 7 cm×7 cm pool fire versus time

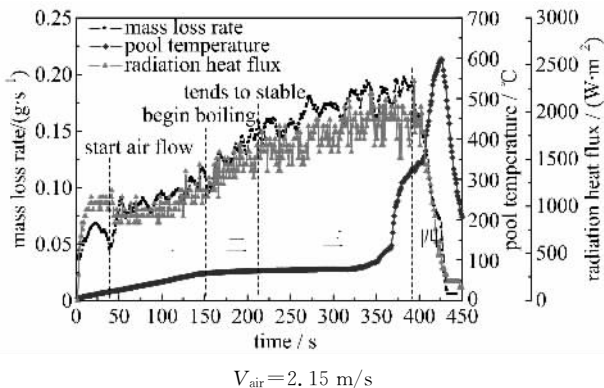


图 6 边长 7 cm 酒精池火的质量消耗速率、辐射热通量及油温随时间变化曲线

Fig. 6 Fuel mass loss rate, radiation heat flux and pool temperature of the 7 cm×7 cm pool fire versus time

度有着较好的对应关系。这里需要说明的是,图 6 中燃烧区段三末段油池温度的大幅跃升是由于随着油池中燃料的不断消耗,油面高度逐渐降低使得油池内的热电偶渐渐露出油面,导致火焰直接灼烧到该热电偶;随着燃料的进一步消耗,火焰对该热电偶的

影响渐渐减小直至燃料燃尽,即与燃烧区段四相对应。

通风条件下,酒精油池的燃烧可分为四个阶段,分别以油池沸腾、 $\dot{m}_{fu}$  稳定及锐减等为界划分为:升温阶段、过渡阶段、稳定燃烧阶段和熄灭阶段。其中升温阶段和过渡阶段为火焰增长阶段。在升温阶段  $\dot{m}_{fu}$  随着油池温度的不断升高而逐渐增大,这主要是由于随着油温的升高,油池表面的蒸发速率加快,燃烧变得更加剧烈,反馈到油池的热量也随之增多,从而形成正反馈。过渡阶段  $\dot{m}_{fu}$  的继续增大可由式(2)解释:即当油池沸腾时,假定  $\dot{Q}_{cre-rad}$  和  $\dot{Q}_{loss}$  保持不变,则原本用于加热燃料的能量  $\dot{Q}_{heat}$  转而用于蒸发燃料,使得燃烧加快直至油池达到新的能量平衡点。

### 3.3 通风对酒精质量消耗速率的影响

为了便于衡量通风对酒精池火燃烧速率的影响,本文将稳定燃烧阶段的质量消耗速率取平均并除以油盘面积记为相应风速下的燃烧速率。

图 7 给出了不同尺寸的酒精池火燃烧速率随风速的变化曲线。从图中可以看出,在静止无通风时,不同尺寸酒精池火的单位面积燃烧速率基本一致(本文实测均值为  $0.0133 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),这一现象与 Joshua<sup>[10]</sup> 的甲醇池火结果相一致。随着风速的逐渐加大,酒精池火燃烧速率先缓慢增加,然后经过一个明显的跳跃式增加后增速变缓。这与 Joshua 给出的小尺寸甲醇油池火的变化趋势相似,Joshua 从质量消耗速率的加快反推认为在通风条件下,火焰主体被吹离油盘下边缘的情况下对油池的热反馈增强,但其并没有给出相应的原因分析和数据支持。正如 Joshua 在文献[10]中所讲,通风条件下油池火的热反馈非常复杂,其与火焰的辐射特性、火焰形态、

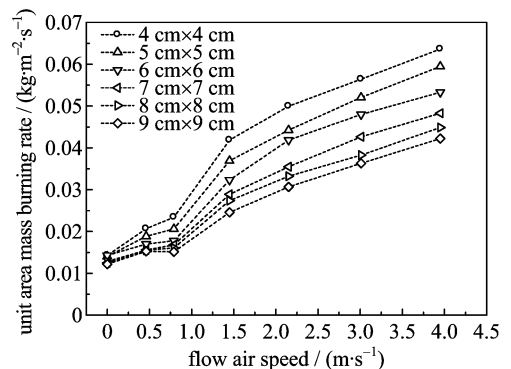


图 7 不同尺寸酒精池火燃烧速率随风速变化曲线

Fig. 7 Fuel mass burning rate of different size pool fires versus flow air speed

燃料的吸热特性、环境材料、气相的流动特性、油盘的热传导性以及油盘内液体的流动等诸多因素有关。

众所周知,液态燃料的燃烧都有一个先汽化的过程.本文所测得的燃料的失重曲线事实上对应着酒精的汽化量随时间和风速的变化.而汽化又包含蒸发和沸腾两种途径,且与沸腾不同的是蒸发受热反馈和通风的双重影响.为定量考察热反馈和通风对酒精蒸发的影响,本文对边长 7 cm 的酒精油池在不同风速和辐射热流条件下的蒸发速率进行了测试,结果如图 8 所示。

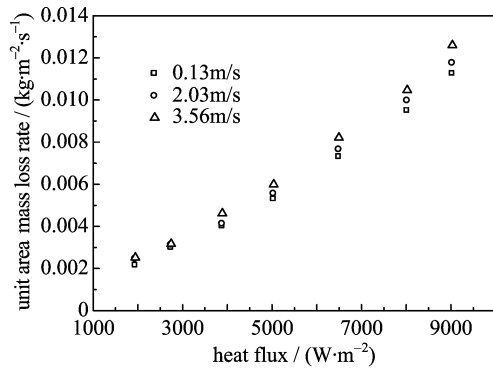


图 8 边长 7 cm 酒精油池在不同风速条件下蒸发速率随辐射热流变化曲线

Fig. 8 Fuel mass loss rate of 7 cm×7 cm ethanol pool versus radiation heat flux under different flow air speeds

从图 8 可以看出,在风速一定的条件下,酒精的蒸发速率随油池所接收到的辐射热流基本呈线性递增趋势;在辐射热流一定的条件下,酒精的蒸发速率随风速的增大而有所增加.将辐射热流一定时,大、小风速作用下的酒精蒸发速率分别记为  $\dot{m}_{\text{fast}}$  和  $\dot{m}_{\text{slow}}$ ,并定义通风对酒精蒸发的影响因子为

$$\Delta_{\text{wind}(\text{fast}-\text{slow})} = \frac{\dot{m}_{\text{fast}} - \dot{m}_{\text{slow}}}{\dot{m}_{\text{fast}}} \times 100\% \quad (4)$$

由图 8 的数据计算可得,在所测的热流范围内  $\Delta_{\text{wind}(3.56-0.13)}$  的值在 6%~15% 之间,由此可见,通风导致的对流强制蒸发对加快酒精蒸发的贡献较小.因此可以推断,影响酒精蒸发速率的决定性因素在于酒精油池所接收到的热反馈的量。

为便于分析通风对热反馈的影响机理,图 9 给出了不同风速条件下边长 7 cm 的酒精池火稳定燃烧阶段的截图.可见,很小的风速作用就会使得火焰发生严重的倾斜,原因在 Joshua 的工作中已有说明,本文关心的重点是火焰的倾斜对油池热反馈的影响。

由于通风后火焰向下风方向严重倾斜,此时相

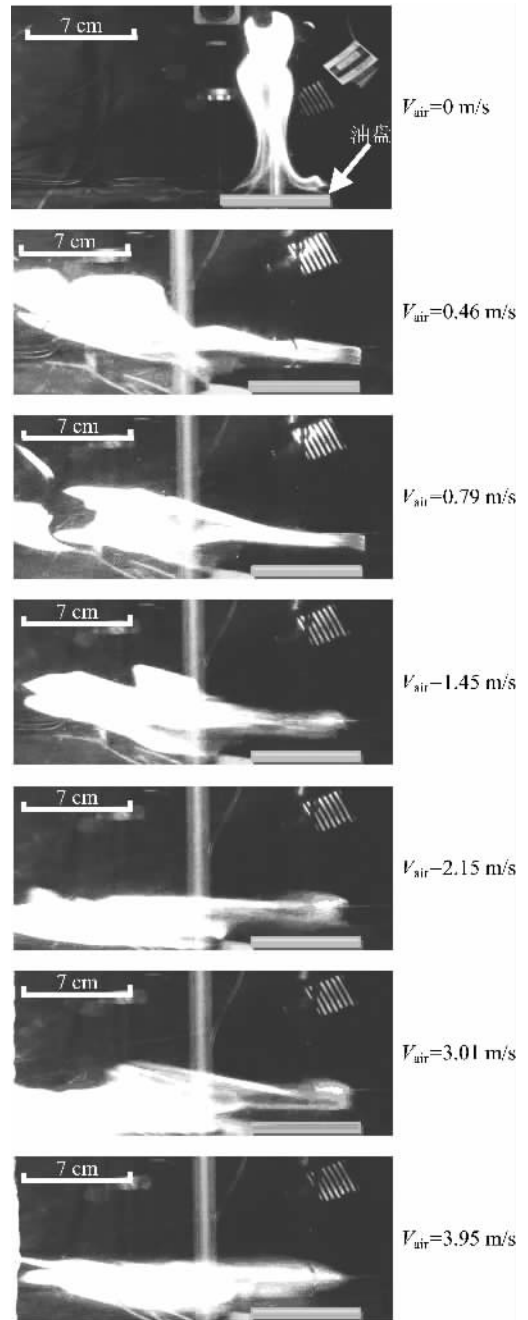


图 9 边长 7 cm 酒精池火在不同风速下的火焰形态

Fig. 9 Digital images of the 7 cm×7 cm ethanol pool fires collected at specified longitudinal air flow speeds

对于静止无风环境,火焰主体对油面的视角系数大大减小,且随着风速的增大越来越小.可以预见,下风方向的火焰主体对油面的辐射热反馈较小,为便于分析,本文将通风条件下的火焰沿油池下风侧壁面划分为主体和根部两部分。

由于火焰对油池的辐射和对流热反馈非常复杂,尤其在通风条件下,火焰的形态改变且脉动增强,这使得理论上定量分析油池热反馈的工作变得

更加困难. 为考察通风前后火焰对油池热反馈的变化, 本文对油池下风向侧壁处和燃料上表面处的温度分别进行了监测, 考虑到火焰在垂直气流方向的对称性, 这两处的温度测点均布置在油池沿气流方向的轴线上. 图 10 给出了不同风速条件下油盘下风向侧壁处的温度测量结果, 可以看出, 通风前油池下风侧处的温度较低, 稍微施加一定的通风则油池下风侧处的温度急剧升高, 这说明通风条件下火焰主体对下风侧的辐射显著增强; 随着风速的继续增加, 油池下风向侧壁处的温度先是在 1.45 m/s 时有个小的跳跃, 之后小幅增长后趋于稳定.

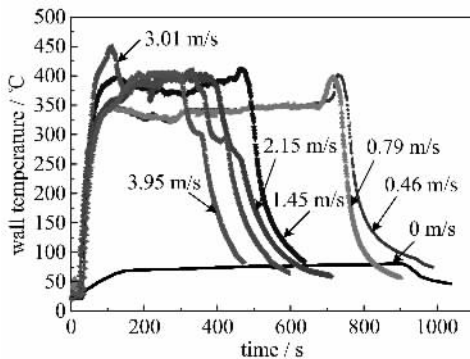


图 10 不同风速下油盘下风向侧壁温度变化曲线  
Fig. 10 The temperature of downwind side wall of the fuel pool versus time

图 11 给出了风速 2.03 m/s 时燃料上表面处沿气流方向轴线上的温度分布的测量结果, 可以看出,

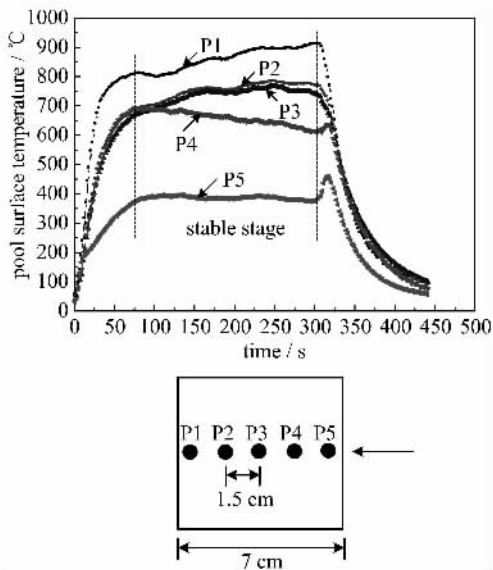


图 11 风速 2.03 m/s 时油池表面温度分布  
Fig. 11 Temperature of ethanol pool surface under 2.03 m/s air flow

在通风条件下燃料上表面处沿气流轴线方向温度存在明显的梯度. 从不同风速条件下的测量结果可以看出, 该温度梯度随风速的增加而增大, 且上风侧和下风侧附近的温度随风速变化呈相反的变化趋势. 为便于直观地衡量燃料上表面的热反馈的变化趋势, 我们对稳定燃烧阶段各测点的温度对时间求平均以消除火焰脉动的偶然影响, 该平均值记为  $\bar{T}_{i,v_j}$ , 单位  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 其中  $i$  为测点号、 $j$  为风速编号, 稳定区段的选取从各测点温度趋于稳定开始至燃尽前温度明显变化之前截止, 如图 11 所示. 由于测点 P1 ~ P5 均匀分布于油池轴线上, 故可对各测点的温度求平均以表征油池上表面的热反馈, 记为  $\bar{T}$ , 单位  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 风速  $v_j$  时其计算方式如式(5).

$$\bar{T}_{v_j} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \bar{T}_{i,v_j} \quad (5)$$

分别计算各风速条件下燃料上表面处的平均温度, 结果如图 12 所示. 从图中可以看出, 在风速较小时, 燃料上表面接收到的热反馈相对于无风条件下有所减小, 随着风速的不断增大, 约在 1.15 ~ 1.5 m/s 附近, 燃料上表面接收到的热反馈有明显的跃升, 并随着风速的继续增加呈逐渐增长趋势. 这一点正好与图 9 中所观察到的火焰形态相印证, 即从风速 1.45 m/s 开始, 在气流的作用下, 火焰根部开始脱离油池的上风侧边沿, 并且随着风速的继续增大, 燃料表面火焰的颜色渐渐趋于淡蓝色, 这表明, 由于供氧更加的充分, 此时燃料表面的火焰燃烧更加充分, 致使燃料表面接收到的热反馈相对增强.

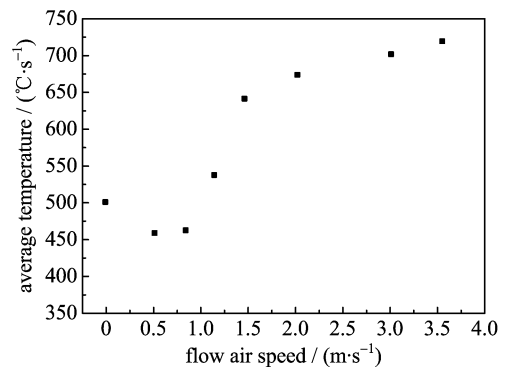


图 12 油池上表面处温度随风速变化曲线  
Fig. 12 Average Temperature of ethanol pool surface versus air flow speeds

简单总结以上的分析可以看出, 油池接收到的热反馈主要来自火焰根部的辐射和对流以及火焰主体辐射油池下风侧壁面并向燃料的传导, 而静止环境下油池接收到的热反馈则主要来自于火焰对油池

的辐射和对流。

结合图7所测得的不同风速条件下的燃烧速率可见,在较小风速时,燃烧速率比静止条件下有小幅的增加,这表明在较小风速时油池接收到的总热反馈有所增强;而从图12可见小风速时燃料表面的热反馈相对静止条件下有所减小。因此,结合图10可以推断,风速较小时酒精燃烧速率的加快主要是由于火焰对油盘下风侧壁面的辐射显著增强。

从图10和图12还可以看出,随着风速的增大,在1.5 m/s附近,油盘下风侧壁面和燃料表面的热反馈均有提升且燃料表面热反馈的跃升尤为显著,这一变化正好与图7中所给出的该风速附近燃烧速率的跃升相吻合。此外,对比燃料表面处和油盘下风侧壁面处的温度可以发现,燃料表面热反馈的增幅远大于油盘下风侧壁面热反馈的增幅。由此可见,燃烧速率的跃升主要是由于火焰对油盘下风侧壁面和燃料表面热反馈的显著增强,且此时燃料表面的热反馈在油池总热反馈中占主导。

此外,随着风速的继续增加,油盘下风侧壁面处的辐射热反馈并没有明显的变化,而燃料表面的热反馈仍呈递增趋势。由此可以推断,风速大于1.45 m/s后燃烧速率的增加主要是由火焰对燃料表面的热反馈增强所导致的。

## 4 结论

通过以上的实验和分析可以得到以下结论:

(I) 通风条件下,酒精池火的燃烧可根据质量消耗速率的变化分为四个阶段,分别为升温阶段、过渡阶段、稳定燃烧阶段和熄灭阶段。且小尺寸酒精池火在稳定燃烧阶段的燃烧速率随纵向通风风速的增加先缓慢增加,后经过一个陡增后增速减缓。

(II) 通风加快酒精池火燃烧速率的主要原因是通风使得酒精油池接收到的热反馈增强,通风导致的对流强制蒸发为次要因素。酒精池火燃烧速率受风速影响的变化趋势主要决定于不同风速条件下油池接收到的总热反馈的量。

(III) 风速较小时通风使得酒精燃烧速率的加快主要是由于火焰对油盘下风侧壁面的辐射显著增强;在风速1.45 m/s时,酒精燃烧速率的跃升主要是由于火焰对油盘下风侧壁面和燃料表面热反馈的显著增强,并且此时燃料表面的热反馈在油池总热反馈中占主导地位;风速大于1.45 m/s后酒精燃烧

速率的继续增加主要是由火焰对燃料表面的热反馈增强所导致。

## 参考文献(References)

- [1] Blinov V I, Khudiakov G N. Diffusion burning of liquids[R]. U. S. Army Translation. NTIS, 1961: NTIS No. AD296762.
- [2] Capener E L, Alger R S. Characterization and suppression of aircraft fuel fires[R]. Monterey, CA: Western States Section Meeting of the Combustion Institute, 1972.
- [3] Apte V B, Green A R, Kent J H. Pool fire plume flow in a large-scale wind tunnel[C]// Proceedings of the Third International Symposium on Fire Safety Science. London: Elsevier, 1991: 425-434.
- [4] Chatris J M, Quintela J, Folch J, et al. Experimental study of burning rate in hydrocarbon pool fires[J]. Combustion and Flame, 2001, 126(1/2): 1 373-1 383.
- [5] Kolb G, Torero J L, Most J M, et al. Cross flow effects on the flame height of an intermediate scale diffusion flame[C]// Proceedings of the International Symposium on Fire Science and Technology. Seoul, Korea: ISFST, 1997: 169-176.
- [6] Carvel R O, Beard A N, Jowitt P W, et al. Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2001, 36(6): 569-596.
- [7] Yang S S, Kim S C, Ryou H S. An experimental study on the effect of longitudinal ventilation on the variation of burning rate in tunnel fires [J]. Tunnel and Underground Space, 2005, 15(1): 55-60.
- [8] Yang S S, Ryou H S, Choi Y K, et al. An experimental study on the effect of ventilation velocity on the burning rate in longitudinal ventilation tunnel fires [J]. Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, 2005, 17(10): 914-921.
- [9] Roh J S, Yang S S, Ryou H S, et al. An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires-heptanes pool fire case[J]. Building and Environment, 2008, 43(7): 1 225-1 231.
- [10] Woods J A R, Fleck B A, Kostiuk L W. Effects of transverse air flow on burning rates of rectangular methanol pool fires[J]. Combustion and Flame, 2006, 146(1/2): 379-390.
- [11] Hamins A, Fischer S J, Kashiwagi T, et al. Heat feedback to the fuel surface in pool fires [J]. Combustion Science and Technology, 1994, 97: 37-62.
- [12] 易亮, 霍然, 张靖岩, 等. 柴油油池火功率特性[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(2): 164-168.