

航空煤油池火焰高度特征研究

庄磊, 陆守香, 孙志友, 汪金辉, 康泉胜

(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: 在燃烧风洞试验厅开展了无风和有风条件下的航空煤油池火燃烧实验, 油池直径分别为 0.15, 0.20, 0.30 和 0.60 m, 风速范围在 0~3.5 m/s。结果表明, 不同直径油池均存在临界 Ri^{-1} 值, 小于此临界值时, 无量纲平均火焰高度随 $\ln Ri^{-1}$ 的增加而线性减小, 大于此临界值, 无量纲火焰高度基本保持不变; 随油池直径增加, 临界 Ri^{-1} 值变大, 稳定的无量纲平均火焰高度减少。理论推导了无风条件下火焰高度与油池直径、燃烧速率的函数关系, 表明火焰高度 H_f/D 随 F_c 数的 $2/3$ 次方变化, 拟合给出了相关参数值, 建立了无风条件下火焰高度的预测模型, 并拟合建立了有风条件下池火焰高度的预测模型。

关键词: 航空煤油; 油池火; 火焰高度; 侧向风

中图分类号: X9; X4 **文献标识码:** A

Study of flame height of aviation fuel pool fires

ZHUANG Lei, LU Shou-xiang, SUN Zhi-you, WANG Jin-hui, KANG Quan-sheng

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

Abstract: Aviation fuel pool fire experiments with and without cross wind were carried out in the Wind Tunnel of the State Key Laboratory of Fire Science. Image processing technology based on MATLAB program was built to analyze the flame height of aviation fuel with and without cross wind. In these experiments, the diameters of circular pools are 0.15, 0.20, 0.30 and 0.60 m and the cross wind speed ranges from quiescence to 3.5 m/s. The dimensionless number—Richardson number (Ri) was used to analyze the effect of cross wind on pool fires. The result shows that there is a critical value of Ri^{-1} . When Ri^{-1} increases within the critical value, dimensionless flame height linearity decreases with $\ln Ri^{-1}$. When Ri^{-1} exceeds this value, the flame configuration remains steady. The critical value of Ri^{-1} increases with pool diameter, however, the steady dimensionless flame height decreases with pool diameter. The relation between flame height without cross wind and pool diameter and burning rate was achieved by theoretical analysis, which shows that the dimensionless flame height H_f/D linearly changes with the F_c number to the power $2/3$, and the values of some parameters were obtained by experiment data. Semi-empirical models were also developed to predict the flame height under windy conditions.

Key words: aviation fuel; pool fire; flame height; cross wind

收稿日期: 2008-09-10; 修回日期: 2008-11-25

基金项目: 火灾科学国家重点实验室团队项目和国家“十一五”科技支撑计划(2006BAK06B02)资助。

作者简介: 庄磊, 男, 1979年生, 博士生。研究方向: 火灾燃烧热辐射特性研究。E-mail: lzhuang@mail.ustc.edu.cn

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

0 引言

近年来,在石油、化工等行业的生产过程以及飞机、船舶等交通运输过程中,由于燃油泄漏引发的火灾频繁发生,不断造成灾难性后果^[1]. 航空煤油是一类燃烧热值高、危险性大的燃料,是燃油泄漏火灾事故中的重大危险源^[2]. 典型的燃油泄漏火灾是一种有风作用下的液态池火燃烧,火焰高度与无风自由燃烧存在很大差异. 火焰高度直接影响对相邻物体的热辐射,因此研究无风和有风条件下的航空煤油池火焰高度特征,对火灾蔓延的控制和扑救,降低火灾的危害性具有重要的理论指导意义.

根据 SFPE 的定义^[3],火焰高度为火焰锋线与燃烧表面之间的垂直距离,如图 1 所示. 从上世纪 50 年代起国外研究人员就对油池火焰高度做了大量研究^[4]. Thomas^[5~7] 在上世纪 60 年代初开展了实验研究,认为燃料流率对于火焰高度具有决定作用,并给出了火焰高度在无风条件下的表达式. Pipkin 和 Sliepcevic^[8] 在小型风洞中利用气体燃烧喷嘴进行了实验,建立了最初的关于风作用下的扩散火焰关系式. 2003 年日本研究人员 Yasushi Oka 等^[9] 研究了开放空间中油池火焰高度在不同风速条件下的变化规律,建立了以气体燃烧器作为实验条件下的关系式. 火灾科学国家重点实验室的研究人员对油池燃烧特性开展了较多研究^[10~12],其中宗若雯等对小尺度油品扬沸时的火焰高度进行了研究. 这些实验有的是在小尺度的风洞进行,并以气体燃烧器为主,有的是在风洞或隧道内部进行,实验条件与开放空间有风作用具有一定差异.

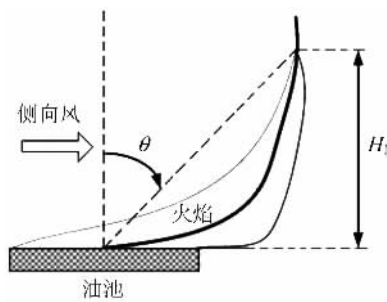


图 1 油池火焰高度定义图

Fig. 1 Definition of flame height

本文利用燃烧风洞试验厅开展航空煤油池火燃烧实验,实验中油池直径分别为 0.15, 0.20, 0.30 和 0.60 m, 风速范围在 0~3.5 m/s. 通过 CCD 拍摄油池火焰图像获取火焰高度特征,并结合理论分析研

究无风和有风条件下的航空煤油池火焰高度的变化规律.

1 实验装置与测量方法

为有稳定的风场条件,航空煤油池火燃烧实验在燃烧风洞试验厅开展. 燃烧风洞是我国第一座在强迫风条件下进行火蔓延及火行为研究的风洞^[13], 用来形成具有一定速度和压力的均匀气流,风洞出口截面大小为 1.8m×1.8m,可开展有风、无风等环境条件下的燃烧蔓延及火焰特性的实验研究.

实验装置主要由火源、风洞、测试系统等三部分组成. 测试系统主要包括了 CCD 摄像机、红外热像仪、热线风速仪、称重天平以及数字采集仪等设备. CCD 摄像机与红外热像仪在同一地点从垂直风向角度对燃烧过程实时拍录. 为使油池燃烧区域处在一个相对稳定均匀的风场内,油池中心距风洞出口截面为 0.5 m,池底面置于高出风洞口下边缘约 0.2 m 位置处. 总体实验装置如图 2 所示.

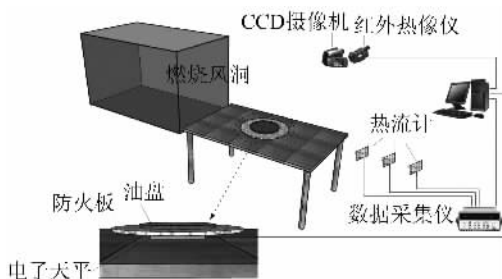


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Sketch of experiment equipment.

采用 MATLAB 程序对航空煤油池火焰图像处理分析,步骤如下:①火焰图像的数字化的. 利用 CCD 数字摄像机拍摄火焰燃烧状态,将火焰的燃烧过程通过数字摄像的方式记录下来.②视频筛选. 选取油池在稳定燃烧阶段的视频段进行分析. CCD 的图像采集频率是 25 帧/s,选取长度约为 10 s.③RGB 图像转化为二值图. 利用 MATLAB 图像处理函数把 RGB 图像转化成二值图像. 阈值的选择是二值化的关键. 实验在晚上进行且布置有黑色背景,因此火焰区域与背景之间对比强度很大,可以明显区分. 经过多次实验对比,二值图转化的阈值取值 160.④像素统计. 二值图像中强度信息是通过 0 和 1 表示的. 编制 MATLAB 程序统计所要计算区域的像素数之和 n , 然后输入单位像素对应的实际长度值,就可以计算出火焰区域的实际长度.⑤火焰高

度的统计分析. 编制 MATLAB 程序统计每个火焰图像样本的火焰高度.

2 实验结果与分析

2.1 油池火焰高度定义

图 3 是直径 0.30 m 油池在无风条件下的火焰高度随时间的变化, 可以看出航空煤油池火燃烧的火焰脉动和跳跃. 一般来说, 油池火焰高度有平均火焰高度和最大火焰高度两个概念. Zukoski 等^[14]引入间歇率的概念来定义火焰高度. 所谓间歇率 $I(H)$, 是指在统计的所有火焰高度中, 火焰高度高于 H 的时间占总时间的比率. 一般情况下, 平均火焰高度 H_{av} 定义为间歇率为 0.5 时对应的 H 值, 而最大火焰高度 H_{max} 应该是当间歇率趋于零时 ($I(x) \rightarrow 0$) 对应的火焰高度. 本文中选取的最大火焰高度对应的间歇率为 0.05, 如图 4 所示.

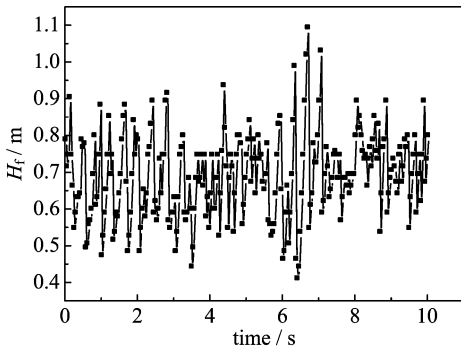


图 3 油池火焰高度随时间变化曲线 ($D=0.30\text{ m}$)
Fig. 3 Plot of flame height with time ($D=0.30\text{ m}$)

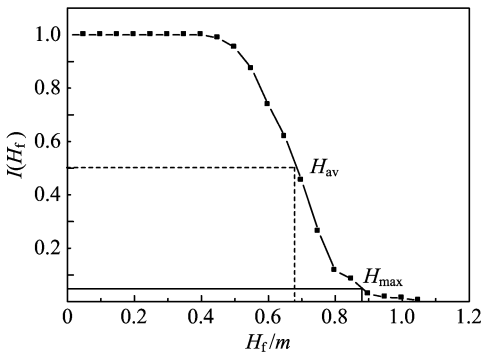


图 4 油池平均火焰高度和最大高度定义 ($D=0.30\text{ m}$)
Fig. 4 Definition of average and maximum flame height ($D=0.30\text{ m}$)

2.2 无风条件下池火焰高度

对于开放空间中燃烧的油池火, 为建立无风条件下的火焰高度模型, 作如下合理假设:

(I) 火羽流是由高度 $z=0$ 处火源发展起来的

高温火焰(烟气)区域, 羽流四周卷吸边界为圆柱, 圆柱直径为油池直径 D , 即

$$r(z) = \frac{D}{2} \quad (1)$$

(II) 假设整个火羽流区域中的密度差随高度的变化很小, 密度差可表示为

$$\Delta\rho = \rho_a - \rho \quad (2)$$

(III) 火羽流区域中的速度 u 随高度变化, 是高度 z 的函数, 其中羽流底部的上升速率接近于零, 即

$$u = u(z) \quad (3)$$

其中 $u(0)=0$.

(IV) 周围空气在羽流区的圆柱边界进行卷吸, 在任一高度上的卷吸速率 v 均与该高度上羽流区内向上速度 $u(z)$ 成比例, 即:

$$v(z) = \alpha \cdot u(z) \quad (4)$$

(V) 在火羽流的发光火焰顶端, 认为燃料蒸气已和卷吸空气中的氧气燃烧完全. 即在高度 $z=H_f$ 处, 有

$$\gamma \dot{m}_f = \dot{m}_a(H_f) \quad (5)$$

式中, γ 为卷吸空气与燃料的化学当量比; $\dot{m}_f/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ 为质量燃烧速率; $\dot{m}_a/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$ 为空气卷吸速率.

通过以上假设条件, 火羽流卷吸结构模型可表示为图 5.

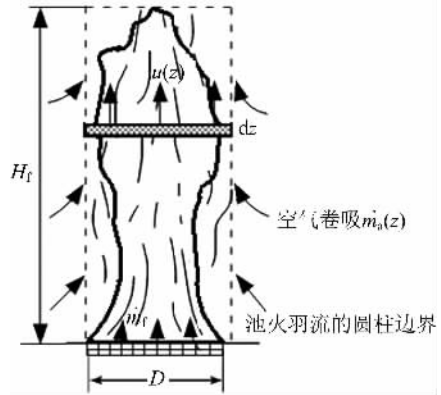


图 5 池火羽流卷吸模型示意图
Fig. 5 Schematic representation of rolling model of pool fire plume

取某一高度 z 处的微元体 dz 为研究对象, 它受到的浮力可表示为

$$dF = g(\rho_a - \rho) \cdot dz \cdot \pi r^2 \quad (6)$$

该微元体的向上运动的动量

$$\dot{m}_p u = \pi r^2 \rho u^2 \quad (7)$$

联合式(6)和(7), 可得

$$\frac{d(\pi r^2 \rho u^2)}{dz} = g \Delta \rho \pi r^2 \quad (8)$$

对式(8)从高度 0 到 z 进行积分,同时由假设 (I),(II)和(III),即 $r(z) = D/2, \Delta\rho$ 不随高度变化, $u(0)=0$,可得到

$$u(z) = \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\rho}} \cdot z \quad (9)$$

又由假设(IV)可知,微元体空气卷吸量 dm_a 为

$$dm_a = \rho_a u \cdot 2\pi r \cdot dz \quad (10)$$

对式(10)从高度 0 到 z 进行积分,最终化简可得

$$\dot{m}_a(z) = \frac{4\rho_a\omega\pi r}{3} \cdot \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\rho}} \cdot z^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

在高度 $z=H_f$ 上,把式(11)代入式(5),即有

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a(H_f) = \frac{4\rho_a\omega\pi r}{3} \cdot \sqrt{\frac{g\Delta\rho}{\rho}} \cdot H_f^{\frac{3}{2}}$$

化简可得

$$\frac{H_f}{D} = \left(\frac{3\gamma}{8\alpha\sqrt{\Delta\rho}} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\dot{m}_f''}{\rho_a\sqrt{gD}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

式中, $\dot{m}_f''/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ 为单位面积质量燃烧速率.

引入无量纲量 F_c 和常数系数 A ,

$$F_c = \frac{\dot{m}_f''}{\rho_a\sqrt{gD}} \quad A = \left(\frac{3\gamma}{8\alpha\sqrt{\Delta\rho}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (13)$$

则式(12)可表示为

$$\frac{H_f}{D} = A \cdot F_c^{\frac{2}{3}} \quad (14)$$

式(14)表明无量纲火焰高度 H_f/D 是随 F_c 数的 $2/3$ 次方变化.

根据实验测量数据得到无量纲火焰高度与 F_c 数的变化曲线如图 6 所示.由图中拟合曲线可以看出,实验测量结果很好地符合了推导出的数学模型.

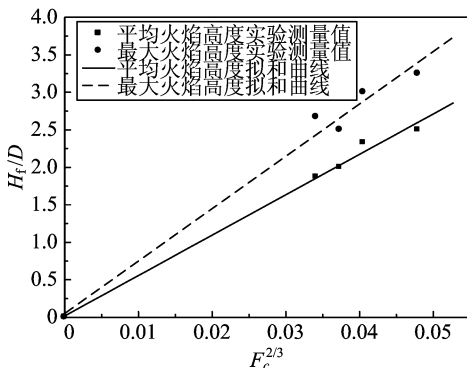


图 6 无量纲火焰高度随 F_c 数的变化

Fig. 6 Plot of dimensionless flame height with F_c

通过拟合曲线的斜率求得常数系数 A ,最终得到无风条件下航空煤油池火焰高度的数学模型:

$$\frac{H_{av}}{D} = 54 \cdot F_c^{\frac{2}{3}} \quad \frac{H_{max}}{D} = 71 \cdot F_c^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

2.3 有风条件下池火焰高度

在侧向风作用条件下,气流会对油池火的卷吸产生影响.引入特征理查森数(Richardson Number)分析侧向风对池火焰的作用.理查森数表示油池燃烧的浮力作用与侧向气流的惯性力作用间的相对强度^[15].理查森数的物理意义是,与燃烧产物密切相关的浮力的增长率与作用于燃烧产物上的侧向风产生的动量的比值.当油池处于完全燃烧状态时,理查森数可表示为

$$Ri = \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \frac{gL}{U_w^2} \quad (16a)$$

式中, $\Delta\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 为周围空气与燃烧产物的密度差; $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 为重力加速度; L/m 为油池的特征参量(对于圆形油池特征参量为其直径 D); $\rho_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ 为侧向气流的空气密度; $U_w/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 为侧向气流速度.

假设气体服从理想气体状态方程,且空气和燃烧产物的摩尔质量之比为 1,则上式可以转化为

$$Ri = \left(1 - \frac{T_a}{T_{ad}} \right) \frac{gL}{U_w^2} \quad (16b)$$

式中, T_a/K 和 T_{ad}/K 分别为侧向气流中空气的温度和绝热火焰温度.为了使无风条件下理查森数有意义,这里取其倒数 Ri^{-1} .

图 7 是不同风速条件下油池平均火焰高度随理查森数 Ri^{-1} 的变化情况. Ri^{-1} 越大,表明相对于油池燃烧产物的自身浮力,侧向风的作用越大.从图中可知,存在这样一个临界值,当小于这一临界值时,随着 Ri^{-1} 的增大,所有直径的油池平均火焰高度均

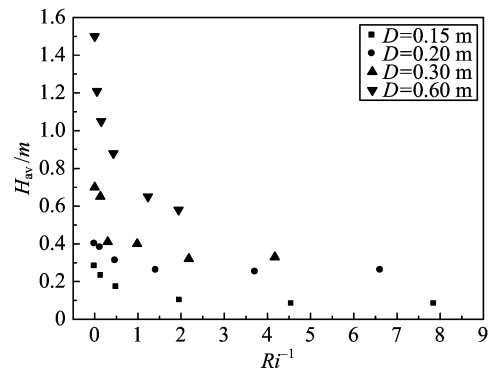


图 7 平均火焰高度随 Ri^{-1} 变化

Fig. 7 Plot of average flame height with Ri^{-1}

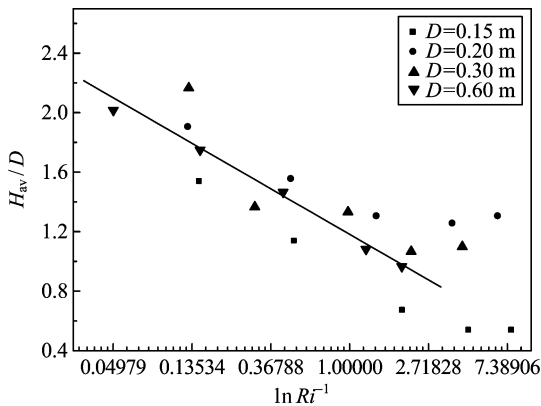
表 1 油池火焰高度预测模型预测效果比较

Tab. 1 Comparison between the experimental flame height and the correlations

		Thomas ^[7]	Moorhouse1 ^[17]	Moorhouse2 ^[17]	Pritchard ^[18]	本文模型
平均火焰高度	NMSE	0.27	0.24	0.14	0.58	0.03
	FB	-0.42	-0.29	-0.16	-0.58	-0.02
最大火焰高度	NMSE	0.08	0.13	0.17	0.17	0.06
	FB	0.005	0.125	0.260	-0.182	0.017

急剧下降,当大于这一临界值时,平均火焰高度基本保持不变,达到稳定高度.这一稳定的平均火焰高度随着油池直径的增加而有所增加.这表明,在侧向风速较小情况下,相对于自由燃烧的浮力作用,侧向风对火焰高度具有重要影响,随着 Ri^{-1} 的增加油池火焰高度明显下降,当 Ri^{-1} 增加到一定值后,火焰高度基本保持不变,其高度受油池自由燃烧的浮力主导控制.

图 8 是航空煤油池火的无量纲平均火焰高度随 $\ln Ri^{-1}$ 的变化情况.由图可以看出:

图 8 无量纲平均火焰高度随 $\ln Ri^{-1}$ 变化Fig. 8 Plot of dimensionless average flame height with $\ln Ri^{-1}$

(I) Ri^{-1} 存在一个临界值,在小于此临界值范围内,不同直径油池的无量纲平均火焰高度均与 $\ln Ri^{-1}$ 成线性关系,即随着 $\ln Ri^{-1}$ 的增加而线性减小.超过此临界值,无量纲火焰高度基本保持稳定不变.

(II) 除了直径 0.15 m 油池外,这个临界值随着油池直径的增加而变大.这表明,随着油池直径增大,火羽流卷吸能力增强,燃烧浮力增大,需要更大的风速才能使得火焰达到稳定高度.

(III) 这一稳定的无量纲平均火焰高度随着油池直径的增加而减少.这是由于在强风作用下,虽然火焰稳定高度随直径的增加而增加(由图 7 可知),

但相对油盘直径,这种增加较弱,最终导致无量纲火焰平均高度下降.

由图 8 中的航空煤油无量纲平均火焰高度的实验数据,可以拟合得到无量纲平均火焰高度与理查森数的关系式:

$$\frac{H_{av}}{D} = -0.3 \ln Ri^{-1} + 1.2 \quad (17)$$

为将本文建立的预测模型和前人的预测模型进行比较,利用归一化标准方差(NMSE)和偏移统计量(FB)两个指标来评判各个关系式的预测效果^[16].其中,NMSE 表征相关程度,FB 表征预测的偏离程度.统计结果见表 1.

从表 1 的统计分析结果可以看出,本文建立的火焰高度预测模型,预测结果较好.相对于平均火焰高度,前人建立的关系式对最大火焰高度都有较好的预测效果.

3 结论

本文对无风和有风条件下的航空煤油池火焰高度进行了实验研究,得到了不同风速条件下池火焰高度的变化规律,建立了火焰高度的预测模型.研究结果表明:

(I) 无风条件下,在研究的油池直径范围内,火焰高度和无量纲火焰高度均随油池直径的增大而变大.推导的池火焰高度与油池直径、燃烧速率的函数关系式表明火焰高度 H_f/D 随 F_c 数的 $2/3$ 次方变化,并根据实验测量数据拟和了相关参数值,建立了无风条件下池火焰高度的预测模型.

(II) 有风条件下,存在 Ri^{-1} 临界值,在小于此临界值范围内,无量纲平均火焰高度与 $\ln Ri^{-1}$ 成线性关系,即随着 $\ln Ri^{-1}$ 的增加而线性减小;超过此临界值,无量纲火焰高度基本保持稳定不变;而且这个临界值随着油池直径的增加而变大,同时这一稳定的无量纲平均火焰高度随着油池直径的增加而减少.根据实验测量结果,拟合建立了有风条件下航空煤油池火焰高度的预测模型,拟合曲线的相关系数

表明预测效果较好.

参考文献(References)

- [1] Planas-Cuchi E, Montiel H, Casal J. A survey of the origin, type and consequences of fire accidents in process plants and in the transportation of hazardous materials [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 1997, 75(B1): 3-8.
- [2] Leonard J T, Fulper C R, Darwin R, et al. *Fire Hazards of Mixed Fuels on the Flight Deck* [R]. Washington, DC: Naval Research Lab, 1992.
- [3] Craig L B. Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires [S]//*The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 2nd ed. Quincy, Massachusetts, USA: NFPA, 2002: 3 268-3 314.
- [4] Joulain P. The behavior of pool fires: State of the art and new insights [C]//*Proceedings of the 27th symposium(Int.) on Combustion*. Pittsburgh, PA, USA: The Combustion Institute, 1998: 2 691-2 706.
- [5] Thomas P H. On the heights of buoyant flames [J]. *Fire Research Note*, 1961, (489).
- [6] Thomas P H. The size of flames from natural fires [J]. *Fire Research Note*, 1962, (497).
- [7] Thomas P H. The size of flames from natural fires [C]//*Proceedings of the Ninth International Symposium on Combustion*. New York: Academic Press, 1963: 844-859.
- [8] Pipkin O A, Sliepcevic C M. The effect of wind on buoyant diffusion flames [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1964, 3(2): 147-154.
- [9] Oka Y, Sugawa O, Imamura T, et al. Effect of cross-winds to apparent flame height and tilt angle from several kinds of fire source [C]//*Fire Safety Science- Proceedings of the Seventh International Symposium*. Gaithersburg, Maryland, USA, 2002: 915-926.
- [10] 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.
- [11] 冯瑞, 霍然, 于海春. 受限空间油池火燃烧特性的实验研究 [J]. *消防科学与技术*, 2005, 24(3): 288-291.
- [12] 谭家磊, 宗若雯, 赵祥迪. 小尺度油品扬沸火灾火行为的实验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(6): 92-96.
- [13] 范维澄, 王清安, 姜冯辉, 等. *火灾学简明教程* [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995: 458-460.
- [14] Zukoski E E, Cetegen B M, Kubota T. Visible structure of buoyant diffusion flames [C]// *Proceedings of 20th Symposium (Int.) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1984: 361-366.
- [15] Woods J A R, Fleck B A, Kostiuk L W. Effect of transverse air flow on burning rates of rectangular methanol pool fires [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146: 379-390.
- [16] Rew P J, Deaves D M. The Validation and Application of Pool Fire Models [M]//*Safety Engineering and Risk Analysis: SERA(Serials) vol. 4*. American Society of Mechanical Engineers, 1995: 57-65.
- [17] Moorhouse J. Scaling criteria for pool fires derived from large scale experiments [C]//*Int Chem E Symp Ser; No. 71*. 1982: 165-179.
- [18] Pritchard M J, Binding T M. FIRE 2: A new approach for predicting thermal radiation levels from hydrocarbon pool fires [C]// *I Chem E Symp Ser; No. 130*. 1992: 491-505.