

航空煤油火焰蔓延脉动过程数值模拟研究

陈国庆,周劼波,王昌建,陆守香

(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:建立了航空煤油火焰脉动模型,并进行了数值模拟.根据航空煤油的活化能计算平均反应速率,参照火焰温度的实验测量结果,确定以最大燃烧化学反应速率 $0.077 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 为航空煤油着火判据.通过对燃料蒸气浓度分布、速度矢量分布、反应速率分布和温度分布数值模拟结果的分析,将航空煤油火焰蔓延脉动过程划分为发展阶段和衰退阶段,并证明主火焰的着火方式主要包括扩散燃烧和预混燃烧,闪燃火焰为预混燃烧.建立了航空煤油火焰蔓延脉动频率预测模型.证明燃料初温低于闪点时,火焰脉动频率随 $T_0^{0.58}$ 正比增长;当燃料初温高于闪点时,脉动频率随 T_0 正比增长.

关键词:航空煤油;火焰蔓延;火焰脉动;着火方式

中图分类号:TK16;X913 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.10.007

Numerical simulation of pulsating aviation fuel flame spread

CHEN Guoqing, ZHOU Jiebo, WANG Changjian, LU Shouxiang

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

Abstract: A model was set up to describe the flame spreading oscillation on an aviation fuel oil pool. The chemical kinetic parameter was deduced by simulation, and, based on the measurement of flame temperature, the average reaction rates of flammable mixture were calculated and taken as a criterion for ignition. The large eddy simulation and mixture fraction model were applied to calculate the oscillations of aviation fuel flame spreading, and the pulsating of flame spread was divided into the development step and the fading step. The result indicated that there are mainly two combustion modes: diffusion and premix. The model for prediction of flame pulsating frequency was also established.

Key words: aviation fuel; flame spread; flame pulsation; combustion mode

符号表

$c_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比定压热容	$g / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	重力加速度
p / Pa	压力	$u / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	径向速度
T / K	温度	$v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	轴向速度
$D / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	分子扩散率	$h / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	沸腾传热系数
$\Delta T / \text{K}$	过热度	Y	质量浓度
t / s	时间	$\dot{m} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	质量流量

收稿日期:2009-11-04;修回日期:2010-06-22

基金项目:国家自然科学基金(50976109)资助.

作者简介:陈国庆,男,1975年生,硕士.研究方向:火灾安全. E-mail: gqchen@mail.ustc.edu.cn

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

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	密度
$\mu/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	动力粘度
$L/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	蒸发潜热
M/kg	燃料质量
T_0	燃料初温
T_c	火焰蔓延最低燃料初温;
f_0	不同燃料初温条件下火焰脉动频率
f_c	火蔓延最低燃料初温条件下火焰脉动频率

下标	
b	沸腾
f	燃料蒸气
i	气体成分
ox	氧气
m	燃料蒸气与空气混合气
∞	环境状态

0 引言

当液体燃料的初温下降到一定程度时,火焰会以脉动方式向前蔓延^[1].人们借助实验和数值模拟的方法对液体火蔓延过程进行了大量研究^[2-5],至今火焰脉动蔓延的模式和机理还是液体火蔓延的研究热点. Cai 等^[6]在 2001 年建立了液体火蔓延的三维数学模型,对闪点以下温度的液体燃料点燃和火焰蔓延进行了研究,计算过程中施加了相对火焰蔓延方向的气流,使用动网格计算方法来研究点燃和火焰以固定速度和脉动方式蔓延等现象. Takahashi 等^[7]在 2002 年对火焰锋面前方液面下的冷流与正丁醇火焰脉动蔓延过程的关系进行了实验研究. Degroote 等^[8]在 2005 年对酒精火蔓延进行了实验研究,对不同燃料初温条件下,火焰锋线位置随时间变化过程进行了测量. Konishi 等^[9]在 2007 年对甲醇、乙醇、丙醇和丁醇火焰在不同氧气浓度和重力条件下的火焰脉动蔓延过程中的火焰结构,及蔓延速度与表面流厚度和长度之间的关系进行了研究.前人研究主要针对低闪点单质燃料,而根据本文前期航空煤油火蔓延实验研究^[10],做为高闪点(66 °C)混合燃料的航空煤油火焰脉动蔓延过程有很大不同.航空煤油火脉动蔓延过程中,始终以橘红色主火焰与蓝色闪火焰共存的模式向前水平脉动蔓延,而在低闪点单质燃料火焰脉动蔓延过程中,火焰锋面前方无明显蓝色闪燃火焰存在.两者的脉动方式也有较大区别.如图 1 和图 2 所示,酒精火焰始终以前出—停滞—前出的模式向前脉动蔓延,而航空煤油主火焰始终以前出—回缩—前出的模式向前脉动蔓延,而且酒精火焰每次脉动幅值也较小.此外,航空煤油初温低于 73 °C 时,脉动方式是火焰向前蔓延的唯一模式.说明航空煤油火的脉动蔓延过程和着火方式都与低闪点单质燃料有很大区别.因此,航空煤油火焰脉动机理和着

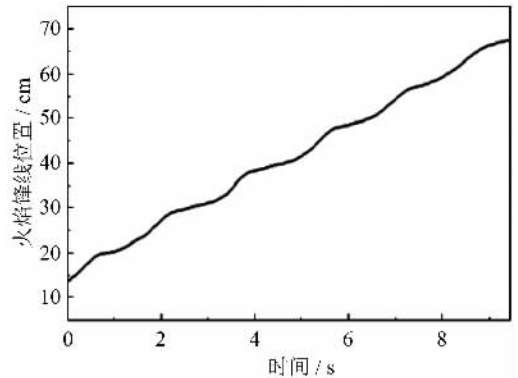


图 1 酒精火焰锋面位置随时间变化^[8]

Fig. 1 Alcohols flame front evolution^[8]

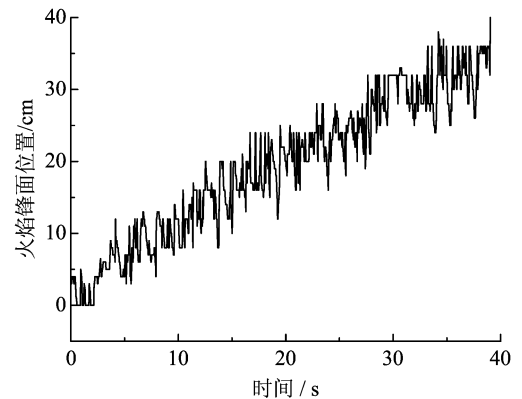


图 2 航空煤油火焰锋面位置随时间变化^[10]

Fig. 2 Aviation fuel flame front evolution^[10]

火方式的研究,对常温条件下航空煤油火灾的防治有重要理论和实践意义.

液体火蔓延过程中火焰形态和传播方式主要受火焰前方燃料蒸发速率控制,所以本文基于航空煤油火焰锋面前方燃料表面温度分布实验数据,利用大涡模拟(LES)和混合分数燃烧模型数值研究航空煤油火焰脉动蔓延过程,目的是分析火焰锋面前方可燃蒸气的运动和着火过程,揭示航空煤油火焰脉动蔓延的脉动规律和着火方式.

1 模型的建立及求解

1.1 物理模型

根据航空煤油火蔓延实验装置的实际设置^[10], 在 $0.6\text{ m} \times 0.06\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 的计算域内, 根据油池观察窗段的实际尺寸, 建立 $0.4\text{ m} \times 0.04\text{ m} \times 0.08\text{ m}$ 的油池火源, 如图 3 所示. 将燃油表面设置为火源表面, 由多块块长度为 0.5 cm 的小块火源构成, 根据实验测试得出的瞬时燃料表面温度分布梯度, 及相应的燃油蒸发速率, 赋予每块燃料表面不同的热流密度, 由此模拟火焰蔓延过程中火焰前方燃油蒸发的梯度分布. 另外还假设环境压力始终保持在 0.1 MPa ; 混合气中只包含燃油蒸气和空气, 而且符合理想气体准则. 这样就建立了描述航空煤油火蔓延脉动三维模型, 图 3 为模型示意图.

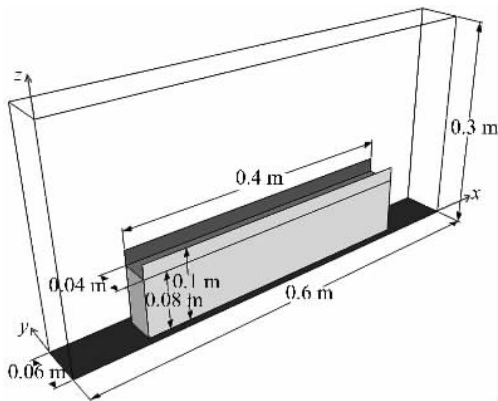


图 3 油池火蔓延模型示意图

Fig. 3 Physical model of pool fire spreading

1.2 控制方程

模型采用低马赫数流体流动 N-S 方程.

质量守恒:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

组分守恒:

$$\frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \rho Y_\alpha \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D \nabla Y_\alpha + \dot{m}''_\alpha \quad (2)$$

动量守恒:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (3)$$

能量守恒:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} - \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \epsilon \quad (4)$$

1.3 初始和边界条件

根据 1.1 节中的假设, 最初的环境完全静止, 满

足以下边界条件:

$$\textcircled{1} t=0, x, y, z=\infty;$$

$$u_x = u_y = u_z = 0; T = T_\infty; P = P_\infty;$$

$$\rho = \rho_\infty; Y_{\text{ox}} = Y_{\text{ox}, \infty}; Y_f = 0$$

$$\textcircled{2} \text{火源表面以外的区域:}$$

$$u_x = u_y = u_z = 0; T = T_\infty; Y_{\text{ox}} = 0; Y_f = 0$$

根据实验测量得出的燃料表面温度, 结合不同温度条件下航空煤油蒸发速率, 可以得到航空煤油火焰蔓延过程中燃料表面瞬时燃料蒸发速率分布. 本文采用燃料初始温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 火焰蔓延至观察窗左端时瞬间燃料表面蒸发速率分布为计算边界条件, 如图 4 所示.

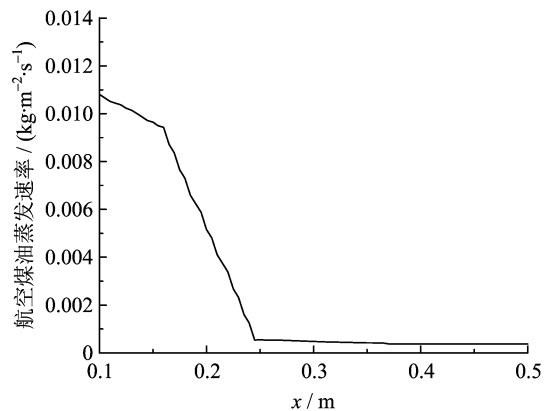


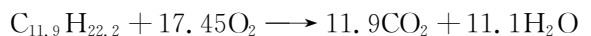
图 4 航空煤油表面蒸发速率分布

Fig. 4 Aviation fuel surface evaporation rate distribution

计算域的边界都设定为开口边界.

1.4 燃烧反应模型

航空煤油实际上是多种碳氢化合物的混合燃料, 没有精确的分子式, 对其化学构成, 一般都是根据其碳氢含量给出等价分子式. 本文所使用的航空煤油等价分子式为 $\text{C}_{11.9}\text{H}_{22.2}$, 假设其燃烧化学反应方程式为:



根据阿仑尼乌斯定律, 一级反应的化学反应速率为:

$$\omega = AY^a Y_{\text{ox}}^b \exp\left(-\frac{E}{RT_m}\right) \quad (5)$$

根据文献^[12]中的数据, 航空煤油的指前因子 A 为 $3.3925 \times 10^{13}\text{ s}^{-1}$, 活化能 E 为 177.0 kJ/mol , 反应级数 a, b 都设为 1.

1.5 数值求解

守恒方程采用大涡模拟进行计算, 空间微分采用二级中心差分来估计, 时间步长为 0.0652 s , 总

时间为 30 s, 网格数取 $300 \times 30 \times 150$ 。

2 计算结果分析

2.1 着火条件的确定

研究火焰脉动机理, 首先要选择着火条件, 以确定火焰锋面的位置, 然后才能进一步对火焰脉动机理进行研究。作为混合燃料的航空煤油, 很难明确描述其着火的实际状态。对于实验研究, 一般是以燃烧释放出的光能作为判据, 对于理论研究, 一般以燃烧过程中的快速化学反应作为发生着火的判据。针对不同燃料和实验条件, 前人进行了大量的研究, 也提出了各种不同的着火判据。Yuji 等^[1]提出的热羽流着火判据, 认为局部最大反应速率大于某个关键值 C_{cri} 时, 就会发生着火。

图 5 为 $y=0.02 \text{ m}$, $z=0.085 \text{ m}$ 高度的温度和反应速率分布。图 5 表明反应速率与温度的脉动区域主要集中在 $x=0.2 \text{ m}$ 位置的附近区域, 并且与温度跃升位置一致, 说明火焰锋面主要在此区域脉动。闪燃火焰温度为 $170 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ (见图 6), 本文取下限 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 为火焰温度, 由此确定以 $C_{\text{cri}} = 0.077 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为着火发生的判据。

2.2 计算结果与实验对比

图 6 为初温 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 航空煤油火焰蔓延过程中, 油池中心液面上方 $y=0.003 \text{ m}$ 处热电偶温度测量结果, 可以看出 17 s 时热电偶位置开始升温, 温度达到 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 随后在 25 s 时温度突跃至 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。图 7 为液面上方 0.003 m 处温度分布数值模拟结果, 可以看出在 $x=0.37 \text{ m}$ 位置, 温度开始上升, 最高温度达到 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 在 $x=0.2 \text{ m}$ 处温度发生突跃, 最高温度达到 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

温度测量结果说明闪燃火焰首先到达热电偶位置, 但其温度较低, 主火焰温度较高, 主火焰的到达使热电偶位置的温度发生突跃。数值模拟结果显示主火焰前方有低温燃烧现象的存在, 温度上升与热电偶测量结果基本相同, 都为 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 在燃烧剧烈区域温升出现突跃现象, 但最高温度达到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。说明数值模拟结果能够反映实验中主火焰与闪燃火焰共存向前脉动的现象。由于计算过程中将航空煤油燃烧化学反应假设为单步反应, 导致主火焰区域最高温度大于实验测量值; 而闪燃火焰区域可燃蒸气浓度较低, 与空气充分混合燃烧完全, 与单步燃烧化学反应相似, 所以温度测量结果

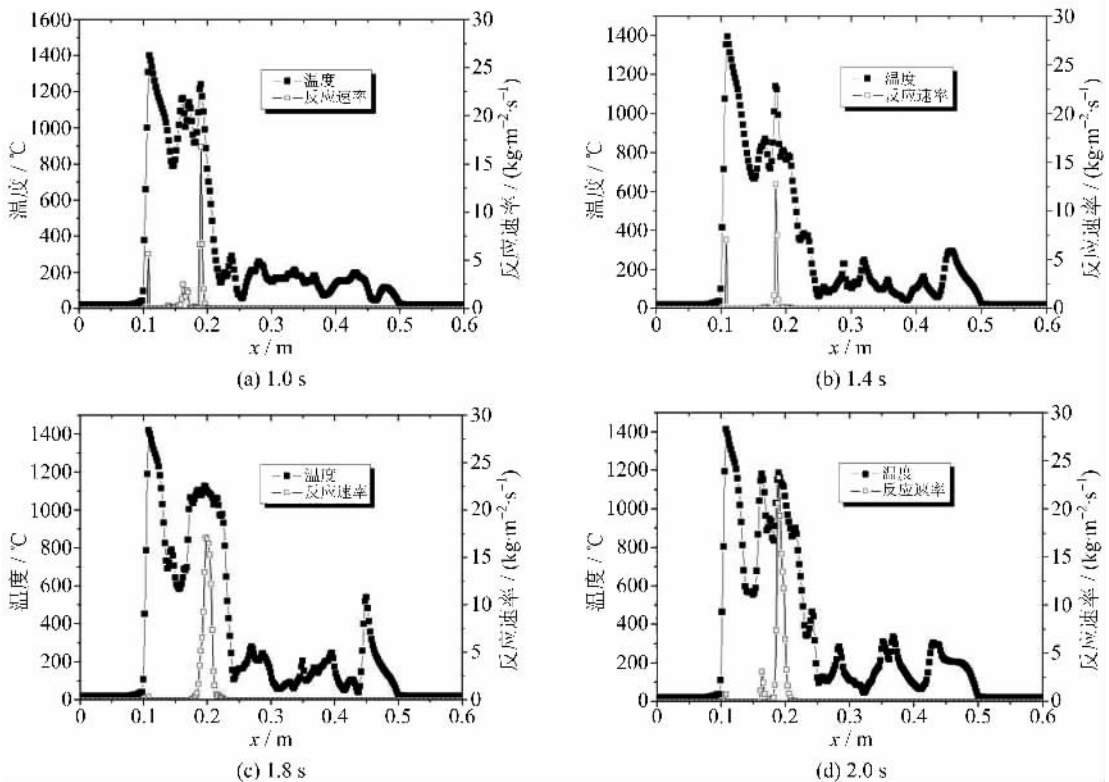


图 5 燃料初始温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 燃料表面 $y=0.02 \text{ m}$, $z=0.085 \text{ m}$ 处的化学反应速率计算结果

Fig. 5 Fuel temperature $40 \text{ }^\circ\text{C}$, fuel surface $y=0.02 \text{ m}$, $z=0.085 \text{ m}$ reaction rates

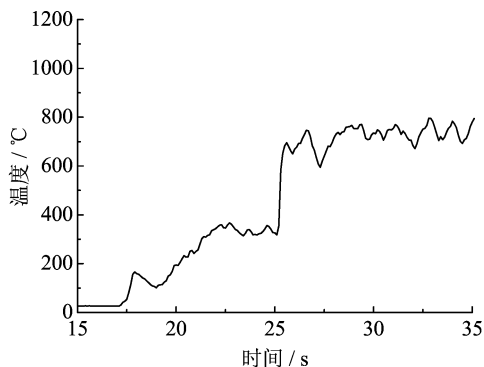


图 6 液面上方 0.003 m 处温度变化过程热电偶测量结果

Fig. 6 Temperature evolution at 0.003 m above liquid surface

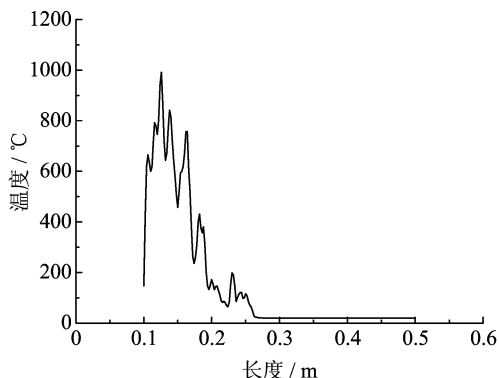


图 7 液面上方 0.003 m 处温度分布计算结果

Fig. 7 Temperature profile at 0.003 m above liquid surface

与数值模拟计算结果基本一致,证明数值模拟结果具有一定的正确性,能够满足本文对航空煤油火蔓延的脉动过程和着火方式的研究需求。

2.3 火焰脉动过程分析

表 1 为不同时刻油池中心 $y=0.02\text{ m}$ 处截面上的可燃蒸气浓度、温度、燃烧化学反应速率和速度矢量分布的数值模拟结果。由表 1 可以看出,1.01 s 时燃料蒸气在 $x=0.21\text{ m}, z=0.082\text{ m}$ 附近发生了聚集,并发生了剧烈燃烧反应,高温燃烧产物开始聚积,同时主火焰根部 $x=0.15\text{ m}$ 附近越接近主火焰卷吸越强烈。随后燃料蒸气聚集区域中心逐渐向左移动,聚集区的高度和宽度都明显增加,主火焰燃烧反应区域也逐渐增高,原 $x=0.21\text{ m}$ 处的燃烧化学反应区也逐渐向左移动,高温燃烧产物聚积厚度增大,聚集区逐渐接近主火焰根部。1.11 s 时高温燃烧产物聚集区已左移至 $x=0.19\text{ m}$ 处,高度达到 $z=0.14\text{ m}$; $x=0.15\text{ m}$ 处主火焰燃烧对周围空气的卷吸有所减弱,右侧燃料蒸气向上运动的剧烈程度有所增大。1.17 s 时主要蒸气聚集区高度达到 $z=0.16\text{ m}$;原 $x=0.21\text{ m}$ 处的燃烧化学反应区、高温燃烧产物聚集区与主火焰合并;此时主火焰对空气的卷吸达到最大,主火焰根部 $x=0.15\text{ m}$ 处右侧区域附近的燃料聚集厚度减小到了最小。1.22 s 时燃料蒸气

表 1 数值模拟计算结果

Tab. 1 Numerical simulation result

时间	1.01 s	1.06 s	1.11 s	1.17 s	1.22 s
燃料蒸气浓度分布					
速度矢量分布					
化学反应速率分布					
温度分布					

聚集区与主火焰合并消失,并在右侧前端 $x=0.21$ m 处重新产生燃料蒸气积聚现象,主火焰燃料蒸气聚集高度降低至 $z=0.12$ m 位置.整个过程中,主火焰右侧 $x>0.21$ m 区域始终都有一薄层高温区域分布在燃料表面,且化学反应速率分布也呈薄层分布状态,说明此处为闪燃火焰区域,且闪燃区宽度随着主火焰的脉动而变化.

根据以上分析可以得出,航空煤油火焰脉动过程,就是主火焰燃烧剧烈程度不断变化,配合主火焰根部火焰蔓延方向不断产生新的燃料蒸气聚集区、向主火焰移动最终与主火焰合并的周而复始、不断循环的过程.每次脉动可分为以下两个阶段:

(I) 发展阶段:从火焰蔓延方向出现新的燃料蒸气聚积区,此聚集区不断向主火焰根部转移,主火焰燃烧逐渐增强,直到燃料蒸气聚积区与主火焰合并,主火焰上方高温聚集区厚度达到最大时为止.主要特征为主火焰燃烧不断加剧,火焰高度不断增加,燃料蒸气分布中断位置不断向主火焰根部移动.

(II) 衰退阶段:从主火焰高度达到最大,主火焰燃烧对周围空气卷吸有所减小开始,到主火焰高度降低至最低,在火焰蔓延方向出现新的燃料蒸气聚集区域为止.

闪燃火焰始终出现在主火焰锋面前方,闪燃火焰出现的位置主要是在整个火焰的最前方,是火焰脉动区域燃料蒸发速率最低的位置.闪燃火焰总是与主火焰锋线相连,其脉动并没有确定规律,只是在燃料蒸气浓度达到燃烧下限时,立刻完全燃烧,燃烧产物很少,只是紧贴燃料表面形成一高温薄层.

2.4 燃烧方式分析

根据模拟计算结果,航空煤油火焰蔓延过程中,主火焰区域和闪燃火焰区域的燃料蒸气燃烧方式各不相同.由表 1 中 1.01 s 速度矢量分布图可以看出,左侧 $x=0.14$ m 燃料蒸发速率较高的主火焰区域,随着高度的增加,蒸气加速卷吸周围新鲜空气,结合化学反应速率分布图可以看出,此处可燃气体的高温区域位于羽流区的顶部,化学反应速率随着高度增加而不断增大,说明此处为扩散燃烧.1.01 s 速度矢量分布图右侧 $x=0.18$ m 附近燃料蒸气对周围空气的卷吸直接到达燃料表面,说明燃料蒸气与新鲜空气直接从上至下同时混合成为可燃混合气体,结合化学反应速率分布图可以看出,此处化学反

应速率并未随着高度增加而增大,高温区域从上至下贯穿整个羽流区,说明此处为预混燃烧.同样,闪燃区燃料蒸气直接与空气混合完全燃烧,燃料蒸气几乎没有剩余,说明闪燃区的燃烧也是预混燃烧.

通过以上分析可知,主火焰燃烧方式主要有扩散和预混两种燃烧方式,闪燃区的燃烧方式为预混燃烧.

2.5 燃油初温对火焰蔓延脉动的影响

图 8 为不同燃油初温条件下航空煤油火蔓延过程中火焰水平脉动频率实验测量结果与数值模拟结果的对比.由图中可以看出,火焰脉动频率的实验测量值和数值模拟结果都随着燃料初温的升高而增大,二者较为符合,证明数值模拟结果具有一定的正确性.同时由于数值模拟避免了实验过程中外界环境参数的影响,能够更好地反映燃料初温对火焰脉动频率的影响.由图中还可以看出,当燃料初温低于闪点 $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,火焰脉动频率随初温升高缓慢增长,当燃料初温高于闪点时,火焰脉动频率随初温升高迅速增大,其速度远大于燃料初温小于闪点时.

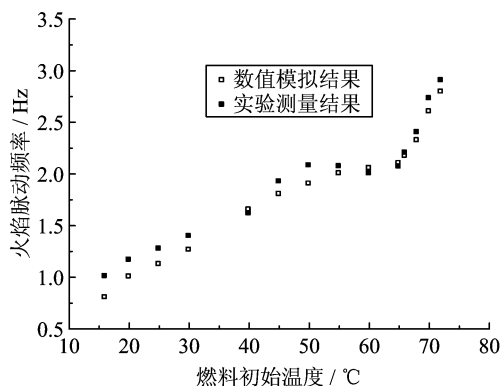


图 8 火焰脉动频率

Fig. 8 Flame pulsate frequency profile

以上结果说明随着火焰锋面前方燃料蒸发速率的增大,火焰锋面前方可燃蒸气浓度达到航空煤油着火下限的速率也逐渐增大,导致火焰水平脉动频率也逐渐升高.式(6)为数值模拟计算的脉动频率随燃料初温变化的数值拟合结果,图 9 为拟合曲线.可以看出当燃料初温低于闪点时,脉动频率随 $((T_0 - T_c)/T_c)^{0.58}$ 呈正比增长趋势;当燃料初温高于闪点时,脉动频率随 T_0 呈正比增长趋势.并由此建立了航空煤油火蔓延脉动频率预测模型.

$$\frac{f_0}{f_c} = \begin{cases} 0.75 + 1.02 \left(\frac{T_0 - T_c}{T_c} \right)^{0.58} & 16^\circ\text{C} \leq T_0 < 66^\circ\text{C} \\ -4.56 + 2.24 \left(\frac{T_0 - T_c}{T_c} \right) & 66^\circ\text{C} \leq T_0 < 73^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

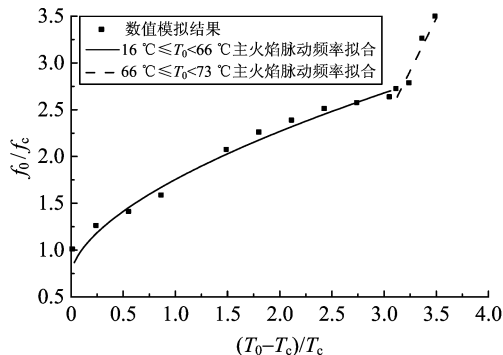


图 9 火焰脉动频率拟合

Fig. 9 Flame pulsate frequency profile

3 结论

(I) 航空煤油着火条件为最大化学反应速率大于 $C_{\text{cri}} = 0.077 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.

(II) 航空煤油火焰脉动过程可以分为发展阶段和衰退阶段, 闪燃火焰始终出现在主火焰锋面前方, 是火焰脉动区域燃料蒸发速率最低的位置。

(III) 主火焰区域主要有扩散燃烧和预混燃烧两种燃烧方式, 闪燃区的燃烧方式为预混燃烧。

(IV) 通过对火焰脉动频率随燃料初温变化的数值拟合, 建立了航空煤油火焰蔓延脉动频率预测模型. 拟合结果显示, 燃料初温低于闪点时, 脉动频率随 $T_0^{0.58}$ 呈正比增长趋势; 当燃料初温高于闪点时, 脉动频率随 T_0 呈正比增长趋势。

参考文献 (References)

[1] Akita K. Some problems of flame spread along a liquid surface[J]. Symposium (International) on

Combustion, 1973, 14(1): 1 075-1 083.

- [2] Takahashi K, Ito A, Kudo Y, et al. Scaling and instability analyses on flame spread over liquids[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2 271-2 277.
- [3] Miller F J, Ross H D, Schiller D N. Temperature field during flame spread over alcohol pools: Measurements and modeling [R]. Washington, D C: National Aeronautics and Space Administration, 1994.
- [4] Ito A, Narumi A, Konishi T, et al. The measurement of transient two-dimensional profiles of velocity and fuel concentration over liquids[J]. Journal of Heat Transfer, 1999, 121: 413-419.
- [5] Schiller D N, ROSS H D, Sirignano W A. Computational analysis of flame spread across alcohol pools[J]. Combustion Science and Technology, 1996, 118: 203-255.
- [6] Cai J, Liu F, Sirignano W A. Three-dimensional flame propagation above liquid fuel pools[J]. Combustion science and technology, 2002, 174: 5-34.
- [7] Takahashi K, Kodaira Y, Kudo Y, et al. Effect of oxygen on flame spread over liquids[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 2 625-2 631.
- [8] Degroote E, García Ybarra P L. Flame propagation over liquid alcohols[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2005, 80: 541-548.
- [9] Konishi T, Ito A, Kudou Y, et al. The role of a flame-induced liquid surface wave on pulsating flame spread[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29: 267-272.
- [10] 周劼波, 陈国庆, 李培铭, 等. 航空煤油火焰蔓延特性分析[J]. 科学通报, 2010, 55(2): 199-204.
- [11] Nakamura Y, Yamashita H, Takeno T, et al. Effects of gravity and ambient oxygen on a gas-phase ignition over a heat solid fuel[J]. Combustion and Flame, 2000, 120: 34-48.
- [12] Vogel F, Smith K A, Tester J W, et al. Engineering kinetics for hydrothermal oxidation of hazardous organic substances[J]. AIChE Journal, 2002, 48: 1 827-1 839.