

## 正庚烷液滴在微细直管中的燃烧特性实验

姚 荣, 李军伟, 邱佐祯, 黄景怀, 王宁飞

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

**摘 要:** 为了解微细直管对液滴形成和燃烧稳定性的影响,采用正庚烷作为燃料在内径为4 mm的石英直管中的进行了实验研究.其结果显示:首先在不加热时,容易形成液滴,正庚烷体积流量小于 $40\mu\text{L}/\text{min}$ 时,火焰稳定性受液滴滴落的影响较大,液滴的蒸发主要受到空气体积流量影响下的火焰位置的影响;大于 $40\mu\text{L}/\text{min}$ 时,液膜形成,火焰受液滴滴落影响不大.其次,管壁加热温度为 $180^\circ\text{C}$ 时,正庚烷体积流量低于 $60\mu\text{L}/\text{min}$ 时难以形成液滴,大于 $60\mu\text{L}/\text{min}$ 时液滴滴落后不形成液膜,液滴的蒸发受空气流速的影响较大,在液滴滴落以及空气流速的影响下,微燃烧器温度的变化对燃料的蒸发产生更大的影响,富燃较贫燃更易形成连续的火焰.空气流速大小对管壁温度影响明显,空气流速越小,管壁温度越高,液滴蒸发速率越大.

**关 键 词:** 微尺度燃烧; 稳定性; 蒸发; 正庚烷液滴; 外部加热

中图分类号: V219

文献标志码: A

## Experiment on combustion characteristics of *n*-heptane droplets in micro-tube

YAO Rong, LI Jun-wei, QIU Zuo-zhen,

HUANG Jing-huai, WANG Ning-fei

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To understand the effect of micro-tube on the droplet formation and combustion stability, the following researches were performed by using the *n*-heptane as fuel in 4 mm internal diameter quartz tube. Firstly, without heating, the stability of the flame and quartz tube drips was studied. The results showed that without heating, quartz tube was easy to form droplets, and when the *n*-heptane volume flow rate was lower than  $40\mu\text{L}/\text{min}$ , the flame stability was influenced by dripping easily, the evaporation rate of the droplets was mainly affected by the flame position under the influence of the effect of air volume flow rate; when the fuel volume flow rate was larger than  $40\mu\text{L}/\text{min}$ , the flame stability was not affected easily by the dripping of droplet due to the formation of liquid film. Secondly, the influences of heating on the droplet formation and the combustion characteristic were studied. It was found difficult to form droplets when the *n*-heptane volume flow rate was lower than  $60\mu\text{L}/\text{min}$ , and when the *n*-heptane volume flow rate was greater than  $60\mu\text{L}/\text{min}$ , the droplet could drip, and film didn't appear when the wall temperature was  $180^\circ\text{C}$ . Droplet evaporation was greatly influenced by air velocity; under the influence of air velocity and the droplet dripping, the temperature of micro burner had a greater impact on evaporation rate of droplet. The flame was more easily formed under fuel-rich condition than fuel-lean condition. Hence, air velocity has strong impact on the tube wall temperature, the lower air velocity means the higher wall temperature, the higher evaporating rate of fuel droplet and

收稿日期:2014-03-10

基金项目:国家自然科学基金(50906004)

作者简介:姚荣(1989—),男,甘肃张掖人,硕士生,主要从事发动机燃料燃烧研究.

lower droplets dripping frequency.

**Key words:** micro-scale combustion; stability; evaporation; *n*-heptane droplets; external heating

近年来,随着微型电子设备和微型飞行器的发展,对能量密度高、工作时间长的微型能量系统和推力器的需求日益增加<sup>[1-3]</sup>.在此背景下设计研制了许多微燃烧器和微推力器,如 London 等人设计制造的双组元微推力器<sup>[4]</sup>,Kim 等人设计的瑞士卷微燃烧器<sup>[5]</sup>等.为了解决在微燃烧器中由于反应时间短、燃烧室散热严重等引起的燃烧不稳定,人们对微尺度燃烧机理已经进行了大量的实验和理论研究.石英和陶瓷熔点较高,加工方便并且便于观察燃烧形态,在许多研究中都采用该种材料制作的微细管来研究微尺度燃烧特性,如 Maruta 等人在加热微细玻璃管中研究了预混燃烧的淬火距离特性<sup>[6]</sup>,李军伟、王国锋等人用微细管研究了甲烷和空气的燃烧以及散热特性<sup>[7-8]</sup>.微尺度燃烧,如 Sirignano 等人对液体燃料在直管管壁形成液膜的燃烧特性进行了研究<sup>[9]</sup>,但是在微燃烧器中使用液体燃料时,由于实际应用的限制,无法使得液体燃料很好的雾化,当连续加入燃料时,可能会形成液滴<sup>[10]</sup>,并且形成的液滴大小往往与微燃烧器尺寸在同一个数量级,涉及到火焰对微燃烧器的加热以及回热对微燃烧器的影响<sup>[1]</sup>,燃料进入燃烧室时,在重力、表面张力等作用的影响下,液滴的增长与滴落需要一定的过程,并且液滴可能滴落在壁面上,这种情况都会对燃料的扩散燃烧稳定性产生很大的影响.

由于液滴的蒸发过程对发动机燃烧的重要性,燃料液滴的蒸发与燃烧过程已经被广泛的关注和研究<sup>[11]</sup>.许多科学家对液滴蒸发模型进行了多年研究<sup>[12-13]</sup>,进行了大量的实验研究和提出了理论模型,包括液滴在静止空气、高压气体、不同来流条件下以及不同温度条件下液滴的蒸发燃烧以及在不同流动条件下的蒸发过程的研究<sup>[14]</sup>,并且对周围环境对液滴蒸发的影响进行了模拟研究<sup>[15]</sup>.但是缺少微尺度空间中,液滴的蒸发以及燃烧的研究,因此,有必要单独对微尺度空间中液滴的蒸发燃烧过程进行研究.

为了研究在微尺度空间中在液滴形成以及滴落的过程中,燃料蒸发速率对火焰稳定性的影响,本文以正庚烷为液体燃料,在无加热和有加热两种工况下,对其燃烧特性进行了研究,通过对这种现象的研究可以对液滴形成的扩散火焰的稳定性

有更加清楚的认识,为微尺度液体燃料燃烧稳定性的研究和微燃烧器的设计开发提供参考.

## 1 实验方案

### 1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示,压缩空气减压后从石英微细直管微燃烧器左侧入口进入,空气流量采用质量流量控制器调节(D0727A/ZM,量程为0~5 L/min),测量误差小于满量程的1%.液体正庚烷由20 mL的注射器挤压进入不锈钢毛细管注入微燃烧器,体积流量(下文简称流量)通过液体注射泵(LSP01-1A)控制.在微燃烧器壁面和管口共布置了5个外径为0.5 mm的K型铠装热电偶(TC1, TC3~TC6),测量微燃烧器外壁面温度和尾气温度,热电偶误差极限为±0.75%(0~1100℃).

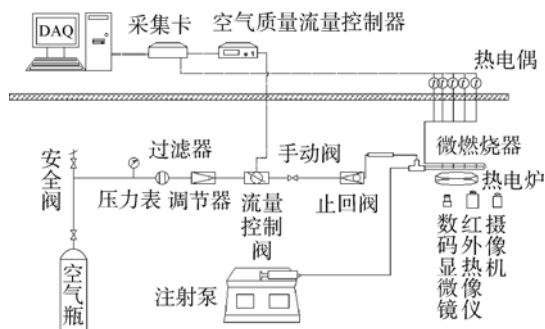


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

此外,采用红外热像仪(FLIR-A40)记录微燃烧器外壁面温度场.采用数码显微镜(帧频为30帧/s)和摄像机(Canon HF200)记录液滴、火焰位置和形状的变化,布置位置如图1所示.同时,利用LABVIEW软件开发的数据采集软件来实时记录气体流量和温度数据.

### 1.2 微燃烧器

采用一个内径为4 mm,外径为6 mm的石英微细直管模拟微燃烧器,如图2所示.为了防止在燃料大流量时,微燃烧器底部堆积大量燃料,引起爆燃,同时为了模拟真实发动机中燃料喷射受重力的影响,微燃烧器水平放置.为了模拟真实发动机中燃料液滴在气流中的蒸发和混合过程,燃

料从微燃烧器中心放置的不锈钢毛细管中心通入. 为了使毛细管与石英直管同心, 采用长度为 25 mm (外径为 4 mm) 的泡沫镍来定位毛细管, 泡沫镍的末端距离毛细管针头 8 mm. 另外, 泡沫镍还可以预热空气, 并使其流动更均匀. 为了研究有无加热对火焰稳定的影响, 采用温度可调节的电热炉来进行加热. 实验中使用外部火源在石英直管出口处点火. 在进行有加热条件下的实验时, 先加热微燃烧器, 当管壁温度不变后, 再通入正庚烷进行燃烧实验.

针对功率为 10~50 W 的微动力装置, 本文开展了不同当量比 (在 0.7~1.3 之间变化), 不同正庚烷流量  $q_v$  (20~90  $\mu\text{L}/\text{min}$ ) 的实验研究. 当量比为实际油气比与化学恰当油气比之比, 记为  $\Phi$ .

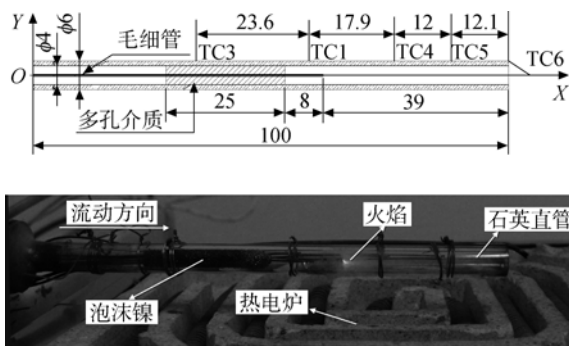


图2 微燃烧器示意图 (单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of macro-combustor  
(unit: mm)

## 2 正庚烷液滴蒸发计算模型

为了研究液滴直径 ( $d$ )、空气流速 ( $U_{\text{air}}$ ) 和空气温度 ( $t_{\text{air}}$ ) 对正庚烷液滴蒸发速率的影响, 本文建立了对流条件下液滴的蒸发计算模型, 如图 3 所示.

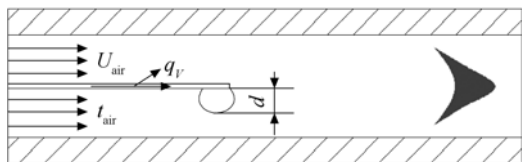


图3 液滴蒸发模型

Fig. 3 Droplet evaporation model

液滴简化为球形, 液滴直径近似用液滴高度表示, 液滴表面和来流气体间的传热和传质用表面传热系数  $h$  和传质系数  $h_m$  分别来表示, 它们可以用努塞尔数 ( $Nu$ ) 和舍伍德数 ( $Sh$ ) 进行无量纲化<sup>[16]</sup>.

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad Sh = \frac{h_m L}{D_m} \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为导热系数,  $L$  为特征长度,  $D_m$  为质量扩散系数.

液滴的蒸发速率选取文献[17]中给出的计算模型计算

$$\dot{m}'_l = \frac{\pi \lambda_{\text{mix}} d}{c_p} Nu \ln(1 + B_t) \quad (2)$$

式中  $\lambda_{\text{mix}}$  为燃料与空气混合气体的导热系数,  $d$  为液滴直径,  $c_p$  为燃料蒸气的比定压热容,  $t_{\text{air}}$  和  $t_s$  分别为来流空气温度和液滴表面温度,  $B_t$  为 Spalding 传热数.

$$B_t = \frac{c_p (t_{\text{air}} - t_s)}{q_e} \quad (3)$$

式中  $q_e$  为燃料的蒸发潜热.

空气相对液滴的流动导致强制对流, 对  $Nu$  进行修正来表示这种影响. 采用文献[18]中的方法进行修正

$$Nu = 2 + 0.552 Re_d^{1/2} Pr^{1/3} / F(B_m) \quad (4)$$

其中

$$Re_d = 2 \rho r_d U_{\text{air}} / \mu_{\text{mix}}$$

$$Pr = c_{p, \text{mix}} \mu_{\text{mix}} / \lambda_{\text{mix}}$$

式中  $Re_d$ ,  $Pr$  分别为雷诺数和普朗特数,  $\mu_{\text{mix}}$  为空气和燃料蒸气混合气的动力黏度,  $c_{p, \text{mix}}$  为空气和燃料蒸气混合气的比定压热容<sup>[13]</sup>.  $F(B_m)$  是 Spalding 传质数  $B_m$  的函数, 其公式如下:

$$F(B_m) = (1 + B_m)^{0.7} \frac{\ln(1 + B_m)}{B_m} \quad (5)$$

$$B_m = \frac{\omega_{fs} - \omega_{f\infty}}{1 - \omega_{fs}} \quad (6)$$

$$\omega_{fs} = \left[ 1 + \left( \frac{p}{p_{fs}} - 1 \right) \frac{M_{\text{air}}}{M_f} \right]^{-1} \quad (7)$$

$$p_{fs} = \exp \left[ a - \frac{b}{t_s - 46.13} \right] \quad (8)$$

其中  $\omega_{f\infty}$  表示燃料蒸气在来流中的质量分数,  $\omega_{fs}$  表示液滴表面燃料蒸气质量分数,  $p$  是外界压力 (kPa),  $p_{fs}$  为燃料蒸气饱和压力,  $M_{\text{air}}$  和  $M_f$  分别是空气和燃料的分子质量, 对正庚烷来说, 式中  $a$  和  $b$  的值如表 1 所示. 表 1 中  $t_b$  为正庚烷在常压下的沸点, 为 98.25  $^{\circ}\text{C}$ .

表1 a 和 b 的取值

Table 1 Values of  $a$  and  $b$

| 参数  | 当 $t > t_b$ 时 | 当 $t < t_b$ 时 |
|-----|---------------|---------------|
| $a$ | 14.2146       | 14.3896       |
| $b$ | 3151.68       | 3209.45       |

本文传热传质参数的计算采用的参照温度  $\bar{t}$  为<sup>[19]</sup>

$$\bar{t} = (t_{\text{air}} + 2t_s)/3 \quad (9)$$

在模型中使用到的正庚烷液体燃料的物性参数选自文献[20], 燃料蒸发潜热的选取根据文献[21]的计算方法进行计算. 正庚烷蒸气比定压热容和热导率分别根据文献[22]和文献[23]进行选择.

本文用到的空气热力学物性参数取自文献[24]. 混合气体的物性参数根据文献[18]中的方法进行计算. 具体如下所示:

$$\mu_{\text{mix}} = \omega_{\text{air}} \mu_{\text{air}} + \omega_{\text{fuel}} \mu_{\text{fuel}} \quad (10)$$

$$c_{p, \text{mix}} = \omega_{\text{air}} c_{p, \text{air}} + \omega_{\text{fuel}} c_{p, \text{fuel}} \quad (11)$$

$$\lambda_{\text{mix}} = \omega_{\text{air}} \lambda_{\text{air}} + \omega_{\text{fuel}} \lambda_{\text{fuel}} \quad (12)$$

$$\rho_{\text{mix}} = (\omega_{\text{air}}/\rho_{\text{air}} + \omega_{\text{fuel}}/\rho_{\text{vap}})^{-1} \quad (13)$$

### 3 结果和分析

#### 3.1 常温下正庚烷液滴在微细直管中的燃烧特性

当壁面无加热时, 微细直管温度不高, 液体燃料从毛细管流出时, 在空气流动和火焰回热的影响下, 蒸发速度较慢, 较易在毛细管口形成液滴, 液滴的存在会造成燃烧振荡和火焰不稳定.

为了研究在微细直管中液滴的蒸发燃烧特性, 本论文进行了不同正庚烷流量 ( $q_v = 20 \sim 90 \mu\text{L}/\text{min}$ ) 下的实验. 根据实验中液滴滴落、液膜出现和火焰位置等现象的关系, 将无加热液滴燃烧分为4类, 如图4所示. 第1类为在毛细管末端形成悬挂液滴, 液滴滴落或是悬挂时, 火焰均位于微细直管内下游, 且均不熄灭; 第2类为液滴从毛细管末端滴落, 但液滴遇到管壁后蒸发, 在下一次液滴滴落前, 管壁正庚烷蒸发完毕, 此时火焰在微细直管中不稳定, 在微细直管中反复被点燃和熄火,

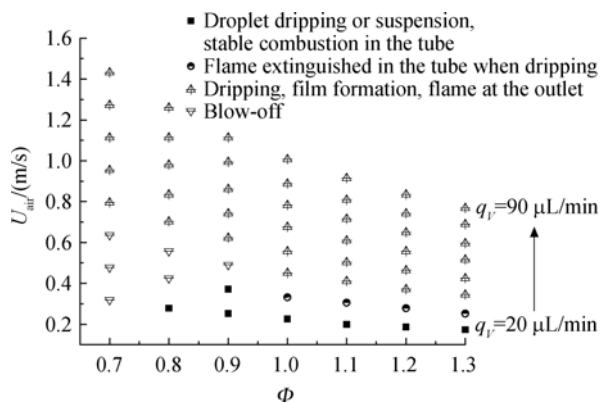


图4 无加热状态时燃烧状况

Fig. 4 Combustion status under no heating condition

火焰位置不固定, 火焰熄火周期受到液滴低落的影响; 第3类为毛细管末端形成液滴, 液滴滴落并在管壁上形成液膜, 此时火焰能够稳定在管口; 第4类为火焰被吹熄. 当  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 0.7$  时, 空气流速较高 ( $U_{\text{air}} = 0.24 \text{ m/s}$ ), 火焰在管内容易被吹熄, 不能形成稳定火焰;  $\Phi$  在  $0.8 \sim 1.0$  区间时, 液滴滴落但是火焰不熄灭, 在  $1.1 \sim 1.3$  区间内液滴不滴落, 都能在管内形成稳定的火焰. 液滴与火焰形态如图5所示.

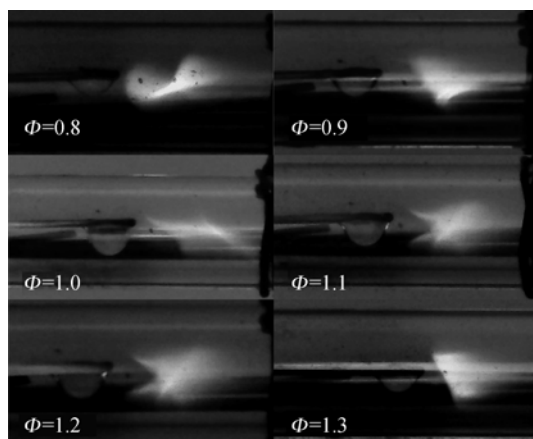


图5  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$  时, 稳定燃烧时火焰和液滴形态  
Fig. 5 Photos of flame and droplets at  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$

由图5可以看出, 随着空气流量的变化, 火焰的形态也发生了很大的变化. 从火焰明亮区的长度来看, 随着空气流量的减少, 火焰的长度也在逐渐减小. 并且当量比较低时, 火焰下部分较上半部分明亮. 主要是由于正庚烷液滴在流动空气中的燃烧, 可以看做是层流扩散燃烧, 其火焰长度与流量呈正比, 因此在空气流速较高时火焰较长, 而在较低时, 恰恰相反. 同时由于正庚烷与空气的混合需要一定的时间, 使得在空气流速较高时, 靠近液滴位置处的下半部分正庚烷质量分数较大, 火焰较为明亮.

当  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 0.9$  时管壁温度和尾气温度随时间的变化如图6(a)所示. 从图中可以看出管壁温度基本保持不变, 出口温度由于液滴滴落产生振荡. 另外, TC4 温度最高这是由于火焰稳定位置在 TC4 附近.

在燃烧过程中, 当  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi$  在  $1.1 \sim 1.3$  之间时, 管壁温度以及尾气温度都基本保持不变,  $\Phi = 1.3$  时, 热电偶所测管壁与管口温度随时间的变化如图6(b)所示. 可以看出, 随着时间的变化, 管壁以及尾气温度保持不变, 对照图

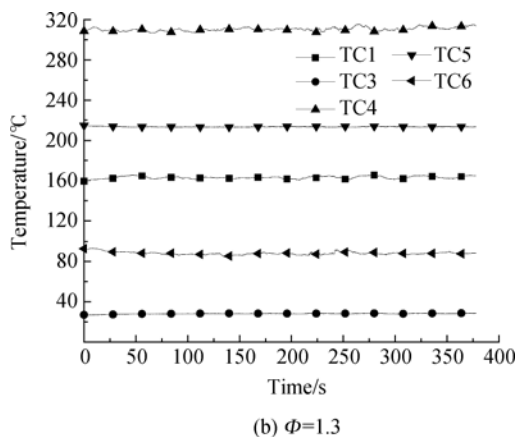
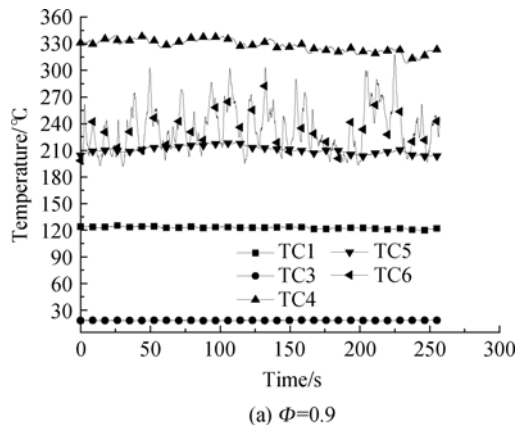


图6  $q_V = 20 \mu\text{L}/\text{min}$  时管壁温度和尾气温度随时间的变化

Fig. 6 Temperatures of tube wall and exhaust gas variation with time at  $q_V = 20 \mu\text{L}/\text{min}$

2和图6可以看出TC4在火焰下游位置处,因此温度最高,而TC3处在最上游位置,其温度也相对最低.可以看出,由于空气的流动作用,在微细直管内,火焰只能位于液滴下游,不能形成对液滴的包覆,微细直管中的液滴燃烧主要受到空气流动影响下的液滴蒸发速率的影响,同时受到火焰散发的热量对液滴蒸发的影响.

由图4可以看出,当 $q_V = 30 \mu\text{L}/\text{min}$ 时,液滴滴落但未能形成稳定液膜. $\Phi = 0.7, 0.8$ 时,火焰位于管口,且容易被吹熄. $\Phi = 0.9$ 时,液滴大小不变,高度为2.3 mm,火焰稳定在管内. $\Phi > 1$ 时,在出口点燃混合气后火焰进入管内,但是随着液滴直径增大,火焰后移,当液滴滴落时,火焰熄灭.主要是由于在不加热情况下正庚烷的蒸发受空气流动的影响较大,当量比较低时,气流流速较大使得无法形成稳定火焰. $\Phi = 0.9$ 时,火焰稳定在管内.当量比继续增大时,液滴会滴落,在管壁上形成液膜蒸发,增大了蒸发面积,造成瞬时富燃,并且由于正庚烷液滴位置的变化,造成空气与正庚烷的

混合不均,使火焰瞬时熄灭.这个现象可以从图7中看出,图中 $\tau$ 为时间.此时的管壁温度变化如图8所示.

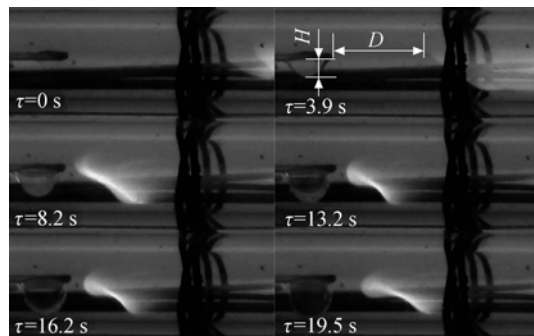


图7  $q_V = 30 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 1.1$  时火焰与液滴随时间变化序列

Fig. 7 Sequence of flame and droplet variations with time at  $q_V = 30 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 1.1$

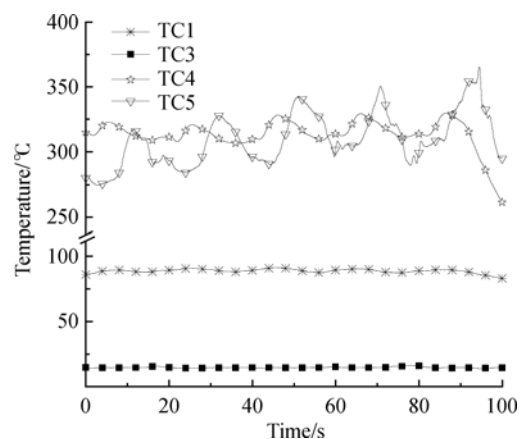


图8  $q_V = 30 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 1.1$  时管壁温度随时间的变化

Fig. 8 Temperature of tube wall variations with time at  $q_V = 30 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 1.1$

由于当量比大于1时,液滴滴落造成火焰熄灭.为了解火焰在微细直管中的传播情况,在微细直管管口放置酒精灯,在 $q_V = 30 \mu\text{L}/\text{min}$ 时,一旦火焰熄灭,混合气会被重新点燃,火焰从管口向上游传播.图9显示了 $q_V = 30 \mu\text{L}/\text{min}$ 时,液滴高度以及火焰根部到毛细管口的距离.火焰根部到毛细管口距离为图7中的D,液滴高度为H.

从图9可以看出,在有点火源存在的情况下, $\Phi = 1, 1.1, 1.2$ 时液滴的平均滴落周期分别为22.7, 19.5, 19.2 s.在一个滴落周期内,液滴逐渐增大,液滴滴落时火焰熄灭.当液滴在毛细管末端形成时,混合气在管口被点燃,向上游传播,3种当量比下火焰传播时间分别为7.19, 6.04, 6.7 s.根据传播距离和传播时间,可以计算出火焰从管口向上游的平均传播速度( $U_{\text{flame}}$ ). $\Phi = 1$ 时

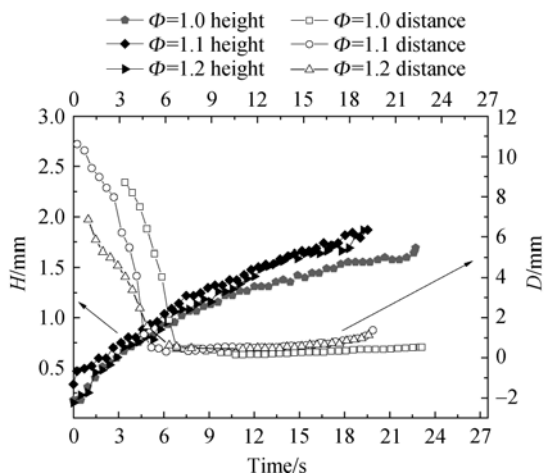


图9  $q_v = 30 \mu\text{L}/\text{min}$  时液滴高度以及火焰根部到毛细管口的距离随时间的变化

Fig. 9 Distance from flame root to capillary outlet and droplet height variations with time at  $q_v = 30 \mu\text{L}/\text{min}$

$U_{\text{flame}} = 1.24 \text{ m/s}$ ;  $\Phi = 1.1$  时  $U_{\text{flame}} = 1.78 \text{ m/s}$ .  $\Phi = 1.2$  时  $U_{\text{flame}} = 1.12 \text{ m/s}$ , 之后随着液滴的增大, 火焰位置变化不大, 在液滴滴落前稍有后移, 当液滴高度分别达到 1.69, 1.86, 1.86 mm 时, 液滴滴落火焰熄灭.

如果继续增大正庚烷流量,  $q_v > 40 \mu\text{L}/\text{min}$  时, 火焰不易被吹灭. 这是由于在微燃烧器壁面上形成液膜, 当液滴滴落时, 正庚烷的蒸发率变化不大, 火焰不易被吹熄. 此时已经不是液滴蒸发影响下的燃烧, 而是空气流动对液膜蒸发的燃烧, 本文不做研究.

从上面结果可以看出, 微细直管中液滴的扩散燃烧受空气流速和液滴直径变化的影响很大. 但是不同于一般研究中液滴的蒸发燃烧受空气流速和液滴直径变化的影响, 其主要是在微尺度空间中, 空气流速和液滴直径的变化对微燃烧器温度和火焰位置产生很大的影响, 进而对液滴的蒸发又产生了影响, 产生了耦合效应.

### 3.2 加热对正庚烷液滴在微细直管中燃烧特性的影响

由于在实际情况下, 微燃烧器的温度往往很高, 并且来流空气温度的变化会对液滴的蒸发产生很大的影响, 为了研究在微尺度空间中受热条件下的液滴蒸发燃烧, 对微细直管采用微加热器对进行加热, 管壁平均温度为  $180^\circ\text{C}$  左右. 同样为了研究液滴在加热条件下的微细直管中蒸发燃烧情况, 根据有加热时的实验现象, 可以将燃烧状态分为 5 类, 分别为无液滴稳定火焰、无液滴火焰不

稳定、有液滴稳定火焰、有液滴火焰不稳定以及火焰被吹熄. 具体情况如图 10 所示.

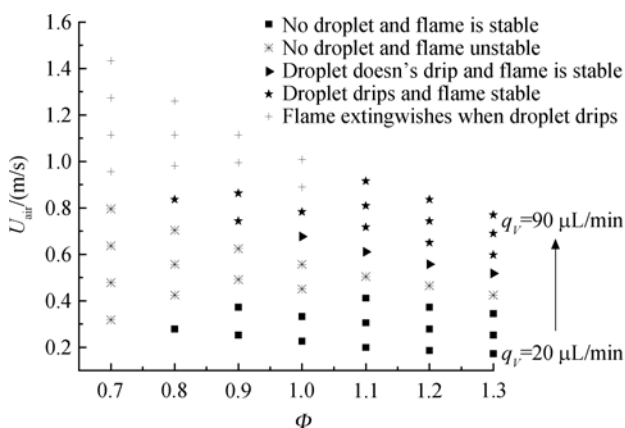


图10 加热条件下的燃烧状况

Fig. 10 Combustion status under heating condition

从图 10 可以看出, 当  $q_v < 60 \mu\text{L}/\text{min}$  时, 毛细管口无液滴形成. 这是由于管壁加热温度为  $180^\circ\text{C}$ , 泡沫镍加热了毛细管, 正庚烷在毛细管中已经变成蒸气.  $q_v = 60 \mu\text{L}/\text{min}$  时, 如果  $U_{\text{air}} > 0.74 \text{ m/s}$ , 液滴会从毛细管滴落; 如果  $U_{\text{air}} < 0.74 \text{ m/s}$ , 液滴悬挂在毛细管口但不滴落.  $q_v > 60 \mu\text{L}/\text{min}$  时, 所有工况均出现液滴滴落, 但无液膜形成.

有加热条件下  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$  时, 正庚烷在毛细管中被汽化, 火焰稳定在毛细管出口附近.  $\Phi = 0.7$  时,  $U_{\text{air}} = 0.32 \text{ m/s}$ , 由于空气流速较高, 导致火焰在管内振荡熄灭.  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 0.9$  时, 微细直管壁温度以及尾气温度如图 11 所示. 从图中可以看出, 当有加热时管壁以及尾气温

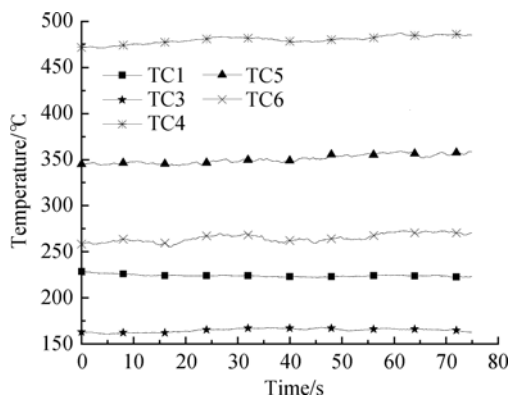


图11  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 0.9$  时, 微细直管壁以及尾气温度随时间的变化

Fig. 11 Temperature of micro-tube wall and exhaust gas variations with time at the condition of  $q_v = 20 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi = 0.9$

度均保持基本稳定,这主要是由于在加热条件下,使得正庚烷从毛细管流出时已经汽化.对比图 6 可以发现,如果微燃烧器的管壁温度较高,在空气以及正庚烷流量较小的情况下,会使得液滴消失,并且扩散燃烧火焰变的更加稳定.

与图 6 相比,图 11 中 TC4 的温度高了  $145^{\circ}\text{C}$ ,TC5 的温度高了  $140^{\circ}\text{C}$ ,而 TC6 尾气温度变化不大,大约  $260^{\circ}\text{C}$ .  $q_v=20\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi=0.8\sim 1.3$  时燃烧火焰如图 12 所示.从图 12 可以看出,当  $\Phi=0.8$  时,  $U_{\text{air}}=0.28\text{ m/s}$ ,火焰距离毛细管口较远.随着当量比的增加,空气流速逐渐降低,在  $0.17\sim 0.25\text{ m/s}$  之间变化.  $\Phi>1$  时,火焰固定在了毛细管出口处,不再移动.

图 12 表明  $\Phi=0.8$  时,微细直管后半段管壁温度较高,随着当量比增加,空气流速降低,火焰位置前移,使得管壁中间段温度上升,但是后半段温度下降.从管壁温度变化可以看出,在贫燃条件下,当量比越大,燃烧越充分温度越高,而在富燃条件下当量比越低燃烧越充分,温度越高.

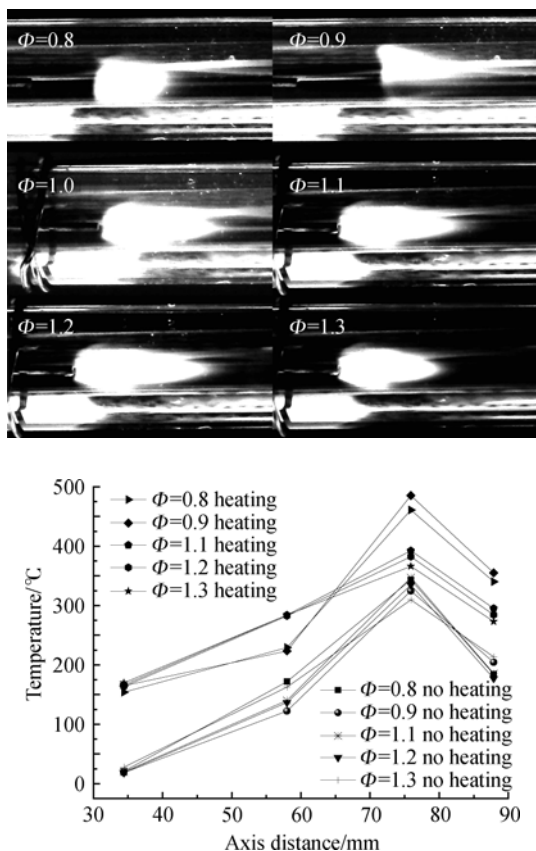


图 12  $q_v=20\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$ ,有加热时,火焰照片和壁面温度分布

Fig. 12 Flame photos and wall temperature distribution at  $q_v=20\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$  under heating conditions

当  $q_v=60\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$  时,由于空气流速的不同造成液滴燃烧状态也不相同.表 2 可以看出,在当量比较高时,空气流量较低的情况下,无液滴滴落;而当量比较低,空气流速较高的情况下液滴滴落,并且  $\Phi=0.7$  时,火焰会随着液滴的滴落熄灭.这说明在不同的空气流量下,空气流速发生了很大的变化,使得正庚烷蒸发速率发生了很大变化.

表 2  $q_v=60\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$  时燃烧状态

Table 2 Combustion state with  $q_v=60\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$

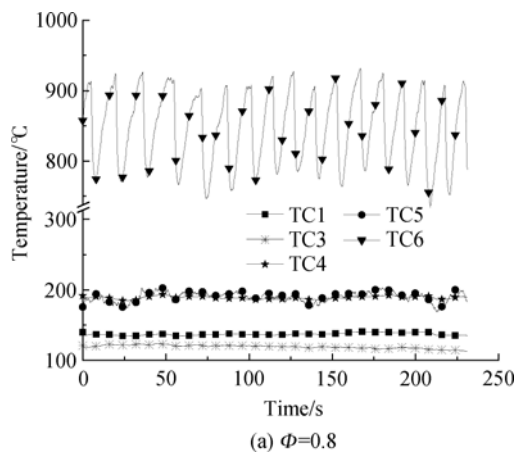
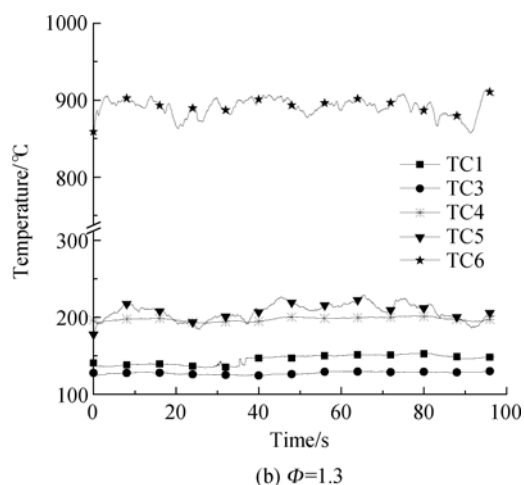
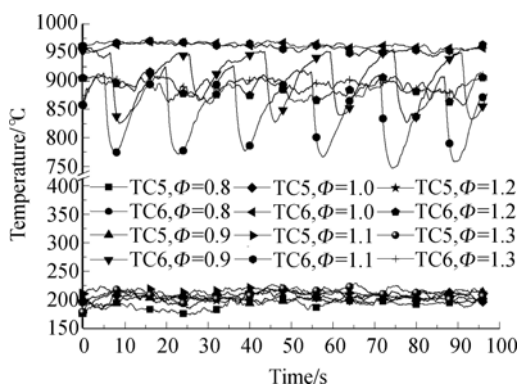
| 实验现象描述        | $\Phi$ | $U_{\text{air}}/(\text{m/s})$ |
|---------------|--------|-------------------------------|
| 火焰不随着液滴的滴落熄灭  | 1.0    | 0.68                          |
|               | 1.1    | 0.61                          |
|               | 1.2    | 0.56                          |
|               | 1.3    | 0.52                          |
| 液滴不滴落,火焰稳定在管口 | 0.8    | 0.84                          |
|               | 0.9    | 0.74                          |
| 火焰随着液滴的滴落而熄灭  | 0.7    | 0.96                          |

$q_v=60\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi=0.8$  和  $1.3$  时管壁温度以及尾气温度随时间变化如图 13 所示.从图 13 中可以看出,  $q_v=60\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi=0.8$  时由于液滴的滴落引起燃烧振荡,使得管口所测温度振幅达到  $143.8^{\circ}\text{C}$ ,而  $\Phi=1.3$  时,管口火焰稳定,基本保持在  $900^{\circ}\text{C}$  左右.由于 TC4 和 TC5 管壁温度达到了  $180^{\circ}\text{C}$ ,一旦液滴滴落,正庚烷会立刻蒸发,变成蒸气,所以  $\Phi=0.8$  时尾气温度振荡剧烈.

$q_v=60\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$  时,燃烧火焰均在管口,对管口以及靠近管口位置处管壁的温度随时间变化作图,如图 14 所示.

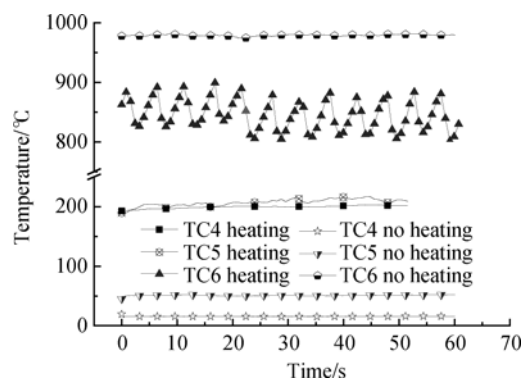
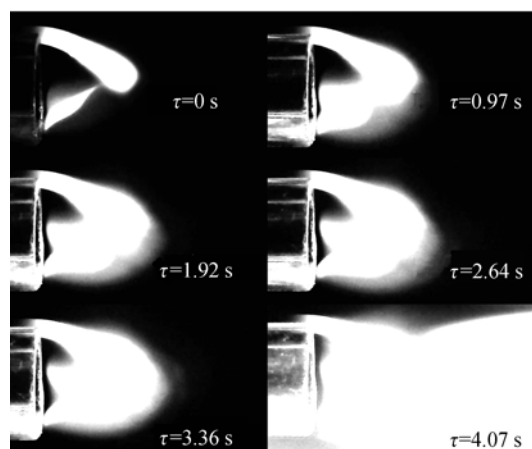
从图 14 中可以看出,固定  $q_v=60\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$ ,当  $\Phi=0.8\sim 1.3$  时,TC5 所测温度平均值分别为  $190.8, 201.9, 205.9, 211.5, 207.0, 207.5^{\circ}\text{C}$ ,整体呈增加趋势,这主要是由于  $U_{\text{air}}$  从  $0.84\text{ m/s}$  减小到  $0.52\text{ m/s}$ ,空气流动对管壁冷却作用降低,而  $\Phi=1.1$  时所测 TC5 温度值较高主要是由于此处正好富燃,并且火焰未被来流空气吹离微细直管,火焰温度较高为  $959.4^{\circ}\text{C}$ ,火焰对管壁加热作用明显.

当  $q_v>60\text{ }\mu\text{L}/\text{min}$  时,正庚烷在毛细管末端形成液滴并增大,最终滴落在管壁上.但是由于管壁温度较高,管壁上不会出现液膜.当  $q_v=90$

(a)  $\Phi=0.8$ (b)  $\Phi=1.3$ 图13 加热条件下,  $q_v=60 \mu\text{L}/\text{min}$ , 管壁和尾气温度随时间的变化Fig. 13 Temperatures of tube wall and exhaust gas variations with time at  $q_v=60 \mu\text{L}/\text{min}$  under heating condition图14  $q_v=60 \mu\text{L}/\text{min}$  时, 管壁以及尾气温度随时间的变化Fig. 14 Temperatures of tube wall and exhaust gas variations with time at  $q_v=60 \mu\text{L}/\text{min}$ 

$\mu\text{L}/\text{min}$  时, 均有液滴滴落, 并且  $\Phi \leq 1.0$  时火焰随着液滴滴落熄灭, 而  $\Phi \geq 1.1$  时, 液滴滴落时火焰

不熄灭.  $q_v=90 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi=1.3$  时, 一个周期内的火焰时间序列如图15所示.

图15  $q_v=90 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi=1.3$  时, 火焰时间序列和温度分布Fig. 15 Photo sequence of droplet and temperature variation with time at  $q_v=90 \mu\text{L}/\text{min}$ ,  $\Phi=1.3$ 

从图15可以看出, 随着时间的变化, 火焰一直稳定在微细直管出口处. 由于液滴尺寸逐渐增大, 正庚烷蒸发量增加, 火焰从浅蓝色逐渐变为明亮火焰, 并且管壁温度较高, 在  $180^\circ\text{C}$  左右, 高于正庚烷的沸点  $98.5^\circ\text{C}$ , 液滴滴落的过程中, 其瞬时蒸发量会发生变化, 使得火焰发生振荡现象. 此工况下, 加热对管壁以及管口温度的影响如图15所示. 在有加热的情况下, 由于液滴滴落引起火焰振荡, 管口温度 TC6 振荡较大, 管壁温度受液滴滴落影响较小, 趋于恒定. 而无加热条件下由于液膜的存在管壁以及管口温度都基本保持不变, 火焰稳定.

### 3.3 正庚烷液滴蒸发速率的理论分析

#### 3.3.1 不同空气流量对液滴蒸发速率的影响

为了研究不同空气流量对液滴蒸发速率的影响, 针对无加热时正庚烷流量  $q_v=20 \mu\text{L}/\text{min}$  的

工况,本文采用第 2 节的蒸发模型,研究了微细直管中空气流量对液滴蒸发速率的影响.分别取液滴直径  $d=0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$  mm,空气入口温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ,液滴表面温度为  $20^{\circ}\text{C}$  时,正庚烷液滴蒸发率随空气流量的变化如图 16 所示.

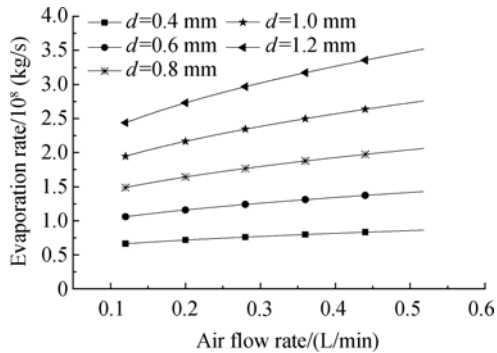


图 16 正庚烷液滴蒸发率随空气流量的变化

Fig. 16  $n$ -heptane droplet evaporation rate variation with the air volume flow rates

从图 16 中可以看出在不同液滴直径下,液滴的蒸发率均随着空气流量的增加而增加,并且液滴直径越大,其蒸发率以及液滴蒸发随空气流量的增加也越大.这符合了在实验中,随着液滴直径的变化,由于蒸发量发生改变,引起的燃烧现象的不同.

### 3.3.2 不同加热空气温度对液滴蒸发的影响

在液滴的蒸发中,液滴周围的环境温度对其蒸发速率有很强的影响.当火焰在微细直管内燃烧时,周围温度往往较高,取液滴表面温度为  $47^{\circ}\text{C}$ ,固定液滴直径为  $1.2$  mm,当环境温度变化(在  $47\sim 677^{\circ}\text{C}$  范围内)时,液滴蒸发率随环境温度的变化关系如图 17 所示.

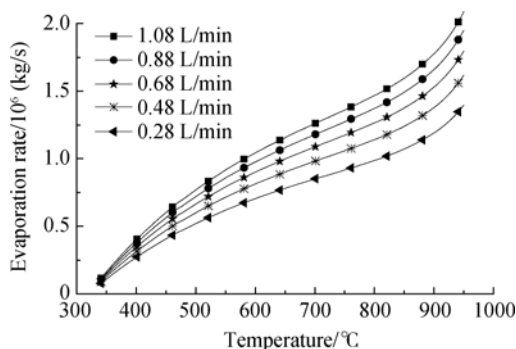


图 17 不同空气流量下,蒸发速率随环境温度的变化

Fig. 17 Evaporation rate variation with ambient temperature at different air volume flow rates

从图 17 中可以看出,随着环境温度的增加,液滴的蒸发速率逐渐增加,在相同温度下,空气流量越大,所对应的液滴蒸发速率也越大.

在实验中,由于空气流量的大小对火焰位置影响很大,因此空气流量对液滴周围的温度会产生很大的影响,这就使得液滴蒸发速率发生了很大变化.

### 3.3.3 在微燃烧器中实际当量比和努塞尔数

随着时间的变化

正庚烷流量  $q_v = 90 \mu\text{L}/\text{min}$  时,在不同空气流量下,液滴直径随着时间的变化如图 18 所示.

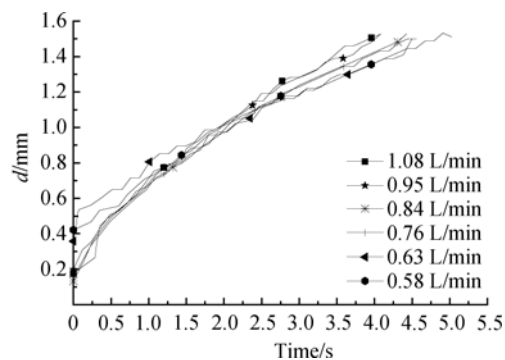


图 18  $q_v = 90 \mu\text{L}/\text{min}$  时,不同空气流量下液滴直径随着时间的变化

Fig. 18 Diameter of droplet variation with time and different air volume flow rates at  $q_v = 90 \mu\text{L}/\text{min}$

可以看出,在不同的流量下,液滴所能达到的最大直径都是一致的,约为  $1.5$  mm,这说明在不同的空气流速下,液滴的滴落受空气流动的直接影响较小,主要是受液滴自身重力与表面张力的影响.

根据液滴直径随时间变化的实验数据,进行拟合后,得到在实验条件下,液滴蒸发时,实际当量比和  $Nu$  随着时间的变化关系如图 19 所示.

从上面的计算中可以看出,混合气的实际当量比和  $Nu$  均随着时间的变化而增加,说明在单个液滴形成与增大的过程中,正庚烷蒸发量不断的增加,并且由于液滴占微燃烧器中空间相对较大,在液滴增大过程中,其液滴周围的空气流速增加,使得液滴对流换热强度也随着时间增加.并且从图中可以看出,在空气流量大的情况下,实际当量比反而越小,这主要是由于,在实验室中通入空气流量的大小会对空气自身的加热温度有很大的影响,空气流量越大其温度越低,使得其蒸发量反而越小.

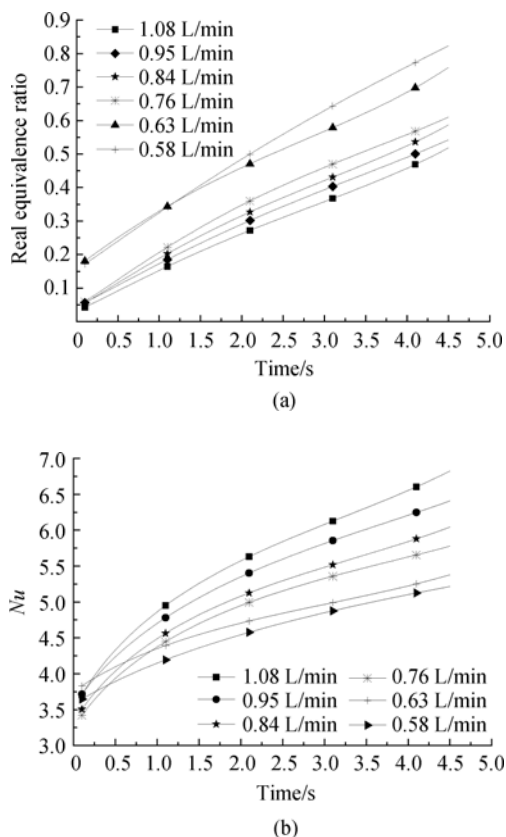


图 19  $q_v = 90 \mu\text{L/min}$  时, 实际当量比和  $Nu$  随时间的变化

Fig. 19 Real equivalence ratio and  $Nu$  variations with time at  $q_v = 90 \mu\text{L/min}$

## 4 结 论

通过对不同情况下正庚烷液滴在微细直管中燃烧的实验研究发现, 在没有加热的情况下, 容易出现液滴滴落引起燃烧不稳定, 液滴容易滴下形成液膜。燃料的蒸发速率大小主要受到空气流速和火焰位置的影响, 空气流速越大, 火焰距离液滴越远, 使得液滴的蒸发率反而越小。随着液滴的增大, 燃料的蒸发率不断增大, 对火焰位置产生一定的影响。

外部加热可以使得在燃料流量较小时不形成液滴以及液滴不滴落, 使得火焰稳定。燃料流量较大时, 由于液滴滴落之后的瞬时蒸发, 使得低当量比下会出现吹熄或脱火, 使得火焰出现不稳定, 液滴的蒸发以及滴落受空气流量和液滴周围温度影响很大。

在加热条件下, 液滴的蒸发受到气流流动的影响主要体现在气流对液滴周围温度的影响上, 从而改变了燃烧的振荡周期, 使得周期随空气流速降低而增大。

## 参考文献:

- [1] JU Yiguang, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669-715.
- [2] Maruta K. Micro and mesoscale combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 125-150.
- [3] 万建龙, 范爱武, 刘毅, 等. 固体材料对微型钝体燃烧器吹熄极限的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(3): 1012-1017.  
WAN Jianlong, FAN Aiwu, LIU Yi, et al. Effects of solid material on blow-off limit in micro bluff body combustor[J]. CIESC Journal, 2014, 65(3): 1012-1017. (in Chinese)
- [4] London A P, Ayon A A, Epstein A H, et al. Microfabrication of a high pressure bipropellant rocket engine[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 92 (1/2/3): 351-357.
- [5] Kim N I, Kato S, Kataoka T, et al. Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters[J]. Combustion and Flame, 2005, 141(3): 229-240.
- [6] Maruta K, Kataoka T, Kim N I, et al. Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2429-2436.
- [7] LI Junwei, ZHONG Beijing. Experimental investigation on heat loss and combustion in methane/oxygen micro-tube combustor[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(7): 707-716.
- [8] 王国锋, 钟北京, 唐皇哉. 微细通道中甲烷与氧气的预混燃烧[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(2): 97-100.  
WANG Guofeng, ZHONG Beijing, TANG Huangzai. Micro methane-oxygen premixed combustion in micro-scale tube[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(2): 97-100. (in Chinese)
- [9] Sirignano W A, Pham T K, Dunn-Rankin D. Miniature-scale liquid-fuel-film combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 925-931.
- [10] Mikami M, Maeda Y, Matsui K, et al. Combustion of gaseous and liquid fuels in meso-scale tubes with wire mesh[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3387-3394.
- [11] Abramzon B, Sirignano W A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(9): 1605-1618.
- [12] Burger M, Schmehl R, Prommersberger K, et al. Droplet evaporation modeling by the distillation curve model: accounting for kerosene fuel and elevated pressures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(23): 4403-4412.
- [13] Hallett W L H, Clark N A. A model for the evaporation of biomass pyrolysis oil droplets[J]. Fuel, 2006, 85(4): 532-544.
- [14] Abou Al-Sood M M, Birouk M. A numerical study of the effect of turbulence on mass transfer from a single fuel droplet evaporating in a hot convective flow[J]. Interna-

- tional Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(8): 779-789.
- [15] Kitano T, Nishio J, Kurose R, et al. Effects of ambient pressure, gas temperature and combustion reaction on droplet evaporation[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(2): 551-564.
- [16] ZHOU Zhifu, WANG Guoxiang, CHEN Bin, et al. Evaluation of evaporation models for single moving droplet with a high evaporation rate[J]. Powder Technology, 2013, 240: 95-102.
- [17] 黄勇, 林宇震. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [18] 孙慧娟, 张海滨, 白博峰. 高温燃气中单个液滴的蒸发特性[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 833-837.
- SUN Huijuan, ZHANG Haibin, BAI Bofeng. Evaporation investigation of single droplet in high temperature fuel gas[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(7): 833-837. (in Chinese)
- [19] Lefebvre A. Atomization and sprays[M]. New York: CRC Press, 1988.
- [20] Sazhin S S, Abdelghaffar W A, Sazhina E M, et al. Models for droplet transient heating, effects on droplet evaporation, ignition, and break-up[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2005, 44(7): 610-622.
- [21] Chin J, Lefebvre A. The role of the heat-up period in fuel drop evaporation[R]. AIAA 83-0068, 1983.
- [22] Poling B E, Praustiz J M, O'connel J P. The properties of gases and liquids[M]. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [23] Ludwig E E. Applied process design for chemical and petrochemical plants: Volume 2[M]. Houston: Gulf Professional Publishing, 1997.
- [24] Incropera F P, Lavine A S, DeWitt D P. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. New York: John Wiley and Sons, 2011.

(编辑: 秦理曼、陈 越)