

液体燃料在毛细管出口扩散火焰燃烧特性

梅开, 邱佐祯, 李军伟, 王宁飞

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 为了解微尺度扩散火焰燃烧特性, 选用液体燃料, 进行燃烧实验, 并利用理论模型对层流火焰高度进行了预估。结果表明: 毛细管层流扩散火焰尺寸随燃料流量的增加而增大, 水平方向当流量大于 $50 \mu\text{L}/\text{min}$ 时, 由于燃料蒸发不完全, 会有液滴喷出, 火焰尺寸增长速度变小; 竖直方向受浮力影响, 火焰高度被拉长, 远大于水平方向。火焰尺寸越大, 振荡越剧烈, 表现为振荡周期随流量的增加而减小, 且竖直方向小于水平方向。燃料含碳量影响火焰特性, 含碳量越多, 火焰尺寸越大, 火焰越明亮, 振荡越剧烈。流量较大时, 含碳量较多的煤油会向管口周围喷射燃料, 形成剧烈振荡的不稳定火焰。竖直方向火焰高度与管口处燃料蒸汽雷诺数成正比, Roper 模型预估结果与实验结果相近, 可用于计算液体烃类燃料在竖直方向的层流扩散火焰高度。

关 键 词: 微尺度; 烷烃; 燃烧特性; 体积流量; 燃料种类

中图分类号: V219

文献标志码: A

Combustion characteristics of liquid fuel diffusion flame at capillary outlet

MEI Kai, QIU Zuozhen, LI Junwei, WANG Ningfei

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

Abstract: In order to study the characteristics of micro scale diffusion flame, liquid fuels were chosen for combustion experiment, and the theoretical models were used to estimate the height of the laminar flame. The following results were obtained. The flame size increased with the increase of the volume flow; in the horizontal direction, when the fuel volume flow was more than $50 \mu\text{L}/\text{min}$, a droplet injection occurred because of the incomplete fuel evaporation, and the flame size changed a little; when the capillary was placed vertically, because of the greater influence of buoyancy, the flame height was elongated. Flame oscillation period decreased with the increase of volume flow, and the bigger flame size meant the stronger flame oscillation. Flame oscillation period in vertical direction was smaller than in horizontal direction. With the increase of carbon content, the flame size became larger, and the oscillation was stronger. Kerosene with more carbon content injected fuel around the nozzle, resulting in unstable flame. The flame height was proportional to the Reynolds number of the fuel vapor at nozzle in the vertical direction, Roper model predicted the experimental result best, helping to calculate the laminar diffusion flame height of liquid hydrocarbon fuels in the vertical direction.

Key words: micro-scale; alkane; combustion characteristics; volume flow; fuel type

收稿日期: 2016-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(50906004); 北京高等学校青年英才计划(YETP1176)

作者简介: 梅开(1993—), 男, 硕士生, 从事液体燃料微尺度燃烧研究。

通信作者: 李军伟(1978—), 男, 副教授、博士生导师, 博士, 从事固体火箭发动机及液体燃料微尺度燃烧等研究。

E-mail: devid78lee@bit.edu.cn

引用格式: 梅开, 邱佐祯, 李军伟, 等. 液体燃料在毛细管出口扩散火焰燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2017, 32(9): 2100-2109. MEI Kai, QIU Zuozhen, LI Junwei, et al. Combustion characteristics of liquid fuel diffusion flame at capillary outlet[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2100-2109.

燃烧可以将储存在物质化学键中的能量转换成热能,再通过各种渠道转换为其他形式的能量用于生活中。近些年,微尺度燃烧的概念逐渐被提出,对于微尺度的定义,Marbach 和 Agrawal^[1]认为燃烧器直径比燃料的淬熄直径小时,可以认为是微尺度;Fernandez-Pello^[2]认为输出功率在毫瓦至瓦级是可以定义为微尺度。

国内外学者近些年对微尺度燃烧领域进行了大量研究,其主要原因是微尺度燃烧所用烃类燃料具有巨大的能量密度,比普通锂电池高出 2 个数量级。这些研究主要围绕探究微尺度燃烧的基本原理以及微尺度燃烧的局限性两方面进行。

为探究尺度极限问题,人们对于各燃料燃烧特性进行了实验。其中大多数为气体燃料,包括甲烷^[3-7],乙烷^[8-9],丙烷^[10-11]等。而在实际的军事运用中,液体烃类燃料的使用更加可行,但相比气体燃料,对液体燃料微尺度燃烧特性的研究较少。

Pham 等^[12]利用液膜实现内径为 10 mm 的微型燃烧器内部或外部火焰的稳定。耶鲁大学的 Kyritsis 等^[13]将液体烃类作为燃料,利用电喷射将燃料喷向网格,形成中尺度燃烧。杨泽亮等^[14-15]对液体乙醇微尺度扩散火焰在自由空间中的特征结构、析碳、熄火等特性做了详细分析。Li 等^[16-17]使用直径为 0.4 mm 的微管将正庚烷注入中尺度燃烧器,正庚烷火焰能保持稳定。

在对毛细管层流扩散火焰长度的研究中,国内外学者提出了多种预估模型^[18-23],其中一个经典的比例模型认为火焰长度与燃料在雷诺数成正比,即: $L/d \propto Re$ 此类研究仍以气体燃料为主,对液体燃料的研究很少。

本实验通过基本的实验装置,探究液体烃类燃料在细微毛细管中的燃烧特性,利用已有的理论计算模型对竖直方向扩散火焰高度进行预估,与实验结果对比,得出适合的理论模型;分析不同燃料流量和不同燃料种类在水平和竖直方向对火焰燃烧特性的影响。

1 实验装置和方法

1.1 装 置

本实验的实验装置^[24]如图 1 所示。实验系统主要由 4 部分构成,分别是:液体燃料供给系统,燃烧系统,观测系统和数据处理系统。

液体燃料装于注射器中,注射器被固定在注射泵的固定架上,前端与毛细管相连,后端由注射

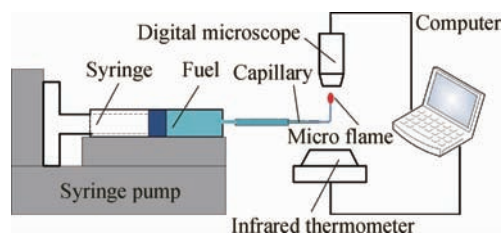


图 1 实验装置总览图

Fig. 1 Overview of experimental device

泵在自身步进电动机的作用下推进,使得毛细管的右端源源不断有燃料流出,即反应区域,它暴露在空气中,一旦被点燃,管口处就会有火焰产生。

微尺度扩散火焰由 2 个仪器记录,红外热像仪用于记录管壁温度;高速显微摄像头用于拍摄火焰图像,摄像头拍摄速率 120 帧/s,它们都与计算机相连,由计算机记录,用于后期处理与分析。

1.2 处理方法

实验对每一幅拍摄到的图像通过 Matlab 程序进行处理,得到火焰高度与宽度。如图 2 所示,图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)分别是火焰原图,灰度图,以及经处理得到的黑白二值图。从图 2(c)中可以得到火焰的高度 L 和宽度 W 的像素长度,经换算,可得到实际长度。对于批量图像,只需要利用循环语句,逐一分析计算,最后集中处理。

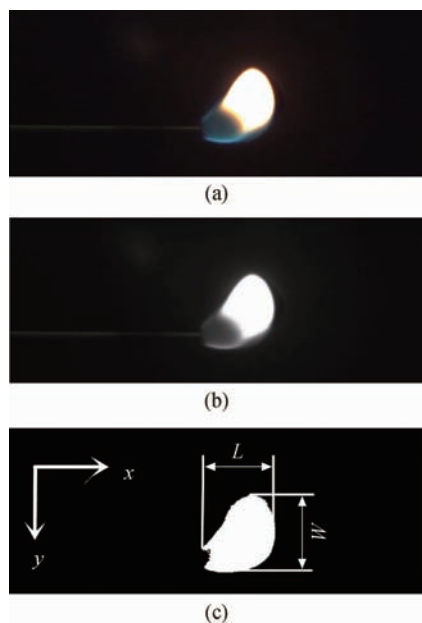


图 2 火焰边界的处理方法

Fig. 2 Treatment method of flame boundary

2 理论模型

有很多学者对毛细管层流扩散火焰高度进行了预估研究,并且总结出很多理论公式,但其大多

数是对气体烃类燃料的预估模型,对于液体燃料的研究较少。

在之前的研究中,许多学者发现火焰高度与燃料的雷诺数成正比,即 $L/d \propto Re$ 。对于液体正庚烷,其雷诺数计算如下:

$$Re = \frac{\rho_v u d}{\mu} \tag{1}$$

$$u = \frac{4Q_v}{\pi d^2} \tag{2}$$

$$\dot{m} = \rho_l Q_l = \rho_v Q_v \tag{3}$$

$$p = \rho_v R_m T \tag{4}$$

$$R_m = R_0/M_f \tag{5}$$

其中 ρ_v 为燃料蒸汽密度,取 3.296 kg/m^3 ; u 为蒸汽在管口处速度; d 为管内径,取 0.3 mm ; μ 为蒸汽在沸点温度的动力黏度,取 $7.2 \times 10^{-6} \text{ kg/(s} \cdot \text{m)}^{[25]}$; Q_l 为燃料体积流量; ρ_l 为液体燃料密度,取 0.682 g/cm^3 ; Q_v 为燃料蒸汽体积流量; p 为标准大气压; $R_0 = 8.3144 \text{ J/(K} \cdot \text{mol)}$, $M_f = 100.8 \text{ g/mol}$; T 为燃料沸点温度,取 372.5 K 。

带入方程式(1)~式(5)得 $\rho_v = 3.296 \text{ kg/m}^3$, $Q_v = 3.4486 \times 10^{-3} \text{ a cm}^3/\text{s}$, $u = 4.8788 \text{ a cm}^3/\text{s}$; $Re = 6.7002a$, a 是燃料体积流量参数,单位为 $\mu\text{L/min}$ 。

接下来介绍几种气体燃料预估模型。

2.1 Roper 模型^[18]

$$\frac{L_f}{Q_v} = \left[4\pi D_0 \ln\left(1 + \frac{1}{S}\right) \right]^{-1} (T_0/T_f)^{0.67} \tag{6}$$

其中 L_f 为火焰高度; D_0 为扩散系数,取 $0.2 \text{ cm}^2/\text{s}$; S 为空气与燃料的体积当量比, $S = n/X_{O_2}$; n 为氧气与燃料的体积当量比; X_{O_2} 为空气中氧气的摩尔比,取 0.21 ; T_f 为平均火焰温度,取 1500 K ; 将以上参量带入方程式(6)中得

$$\frac{L_f}{d} = 6.8264 \cdot 10^{-3} \cdot S \cdot \left(\frac{T_0}{1500} \right)^{0.67} \cdot Re \tag{7}$$

在方程式(7)中, S 与燃料种类有关,也就是与燃料所含碳原子个数有关,对于正庚烷, $S = 52.38$, $T_0 = 372.5 \text{ K}$, $Re = 6.7002a$, 所以

$$\frac{L_f}{d} = 0.1406Re \tag{8}$$

2.2 Spalding 模型^[21]

$$\frac{L_f}{d} = \frac{3}{32} \cdot \frac{1}{Z_{st}} \cdot Re \tag{9}$$

其中 Z_{st} 与燃料种类有关, $Z_{st} = X_{O_2} M_f / (2 \times M_{air})$, M_{air} 是平均空气摩尔质量, $M_{air} = 29 \text{ g/mol}$,

带入计算得

$$\frac{L_f}{d} = 0.2584Re \tag{10}$$

2.3 Mahalingam 模型^[23]

$$\frac{L_f}{R} = \frac{Pe}{4\pi} \tag{11}$$

$$Pe = \frac{u}{D'} R \sqrt{\pi \left(1 + \frac{Y_f}{W_f v_f \beta_0} \right)} \tag{12}$$

其中 Pe 是皮克列数,是一个无量纲数,其中, $\frac{Y_f}{W_f v_f \beta_0} = 3$; D' 是 T_f 温度下的扩散系数, $D' = D_0 \left(\frac{T_0}{T_f} \right)^{1.67}$ ^[20], $D_0 = 0.2 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。带入方程式(12)得 $Pe = 11.503a$ 。

$$\frac{L_f}{d} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Pe}{4\pi} = 0.0683Re \tag{13}$$

2.4 Altenkirch 模型^[20]

$$\frac{L_f}{R} = \left(\frac{R \cdot u^4}{D_0^2 \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{n}{0.66m_{O_2}} \right)^{\frac{4}{3}} \tag{14}$$

其中 R 是燃烧器半径, $R = 0.5 \text{ mm}$; g 是重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; Fr 是弗劳德数,定义为 $Fr = \frac{u^2}{gd} = 0.8088a^2$, 所以方程式(14)可以化简为

$$\frac{L_f}{d} = 0.03767 Fr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{n}{0.66m_{O_2}} \right)^{\frac{4}{3}} \tag{15}$$

其中 m_{O_2} 与燃料种类有关, $m_{O_2} = X_{O_2} \cdot M_{O_2} / M_{air}$, M_{O_2} 是氧气摩尔质量, $M_{O_2} = 32 \text{ g/mol}$ 。

对于正庚烷, $n = 11$, $\left(\frac{n}{0.66m_{O_2}} \right)^{\frac{4}{3}} = 299.2$,

所以

$$\frac{L_f}{d} = 11.2692 Fr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{2}{3}} \tag{16}$$

2.5 实验数据与理论模型对比

图3横坐标 Re 代表毛细管口处燃料蒸汽的雷诺数,纵坐标 L/d 是毛细管层流扩散火焰高度的无量纲数。图3是竖直方向火焰高度的实验数据和计算模型对比图,从图中可以看出,火焰高度与雷诺数之间呈线性关系,即 $L/d \propto Re$ 。

其中,Roper 模型与实验数据的吻合度较高,实验数据得到的 $L/(dRe)$ 等于 0.1312 ; 而 Roper 模型计算值为 $L/(dRe) = 0.1406$ 。Roper 计算模型还可以表示为 $\frac{L_f}{d} = 6.8264 \times 10^{-3} S \left(\frac{T_0}{1500} \right)^{0.67} \cdot Re$, 可以看出,火焰高度除了与 Re 有关外,也与燃料种类有关。该公式中表现为 S 与 T_0 随燃料

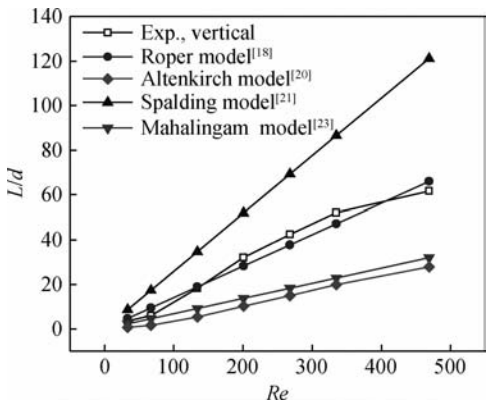


图 3 竖直方向火焰高度实验数据和理论模型的对比
Fig. 3 Comparisons of experimental data and theoretical model of flame height in vertical direction

种类的不同而取不同值。因此,此计算模型的适用范围广泛,对于不同燃料,只需找出燃料本身所对应的 S 与 T_0 值,再计算出燃料的雷诺数,就可以预估火焰高度的具体值。

Spalding 模型计算结果与实验结果有所差距,其结果为 $L/(dRe)=0.2584$,比实验结果大,接近实验结果的 2 倍。Spalding 模型的表达式为 $\frac{L_t}{d} = \frac{3}{32} \cdot \frac{1}{Z_{st}} \cdot Re$,其中 Z_{st} 与燃料种类有关, $Z_{st} = X_{O_2} M_f / (2M_{air})$,从其预估结果与实验结果对比来看,该公式不适合碳原子个数较多的燃料。

Altenkirch 模型预估结果与实验结果相差巨大,几乎相差 2 个数量级,图 3 中数据是预估结果缩小 100 倍后与实验数据的对比,即: $L/(100dRe)=0.0646$,该模型计算结果约是实验结果的 45 倍。分析其原因,该模型计算公式为

$$\frac{L_t}{d} = 0.03767 \cdot Fr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{n}{0.66m_{O_2}}\right)^{\frac{4}{3}} \tag{17}$$

其中 $\left(\frac{n}{0.66m_{O_2}}\right)^{\frac{4}{3}}$ 与燃料种类有关,对于正庚烷, $n=11$,带入得 $\left(\frac{n}{0.66m_{O_2}}\right)^{\frac{4}{3}}=299.2$;而对于甲烷, $n=2$, $\left(\frac{n}{0.66m_{O_2}}\right)^{\frac{4}{3}}=30.81$,可以看出,就这一项,庚烷是甲烷的 10 倍左右,所以,由于正庚烷中含碳原子较多导致该模型预估结果与实验结果差距偏大,因此该模型不适合本实验所用正庚烷燃料。

Mahalingam 模型计算结果为 $L/(dRe)=0.0683$,与 Spalding 模型相反,该模型较实验结果偏小,约为实验结果的 0.5 倍,与前 3 个模型不同的是,该模型的计算表达式中没有与燃料种类

有关的项,而根据其计算结果来看,该计算模型也不适合于本实验。

综上可得,在给定的 4 种预估模型中,Roper 模型预估结果与实验结果相近,可用于预估液体燃料在竖直方向的层流扩散火焰高度,为最优预估模型;Spalding 模型与 Mahalingam 模型与实验结果有所差距,预估性较差;Altenkirch 模型与实验结果相差很远,接近 2 个数量级,不适合预估本实验。

3 实验结果分析与讨论

3.1 微尺度水平扩散火焰特性

图 4 为流量为 $40\mu\text{L}/\text{min}$ 时,截取的一组火焰随时间变化的序列图,图中 t 表示一个周期,不同时刻的火焰表现出部分共性,管口处有大小形状相似的球形淡蓝色火焰;也有部分有所不同,远离管口的亮黄色火焰,主要是燃烧产物中的碳烟,它在周围环境的影响下表现出不稳定性,所以火焰高度和宽度在不同时刻是不同的。图 5 是 $40\mu\text{L}/\text{min}$ 流量下,500 幅连续火焰截图分析所得无量纲火焰高度 (L/D),宽度 (W/D) 及高宽比 (L/W) 随时间的变化图,其中 D 为毛细管外径,取 0.5mm 。从图中可以看出火焰尺寸变化剧烈,没有固定规律。但 L 围绕 6.15mm 变化, W 围绕 5.30mm 变化, L/W 变化比较小,在 1.16 左右。图 6 是流量为 $40\mu\text{L}/\text{min}$ 时无量纲火焰高度,宽

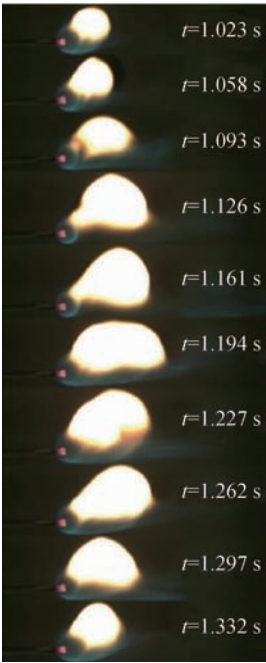


图 4 $Q_t=40\mu\text{L}/\text{min}$ 时一组火焰序列图
Fig. 4 A group of flame sequence diagram when $Q_t=40\mu\text{L}/\text{min}$

度及高宽比的概率分布函数(probability distribution function,PDF,量符号记为 F_{pd})。从图中可以看出,3 个分布形状相似,都有一个明显的峰值,并且每幅图都有超过 80% 的概率分布在峰值附近的区间,该峰值所对应的横坐标就是火焰尺寸大致的平均值。从 PDF 图中还可以大致看出火焰的振荡情况,峰值附近范围越窄,说明火焰振荡越不剧烈,具体讨论由下文给出。

3.1.1 燃料流量的影响

本节以正庚烷为燃料,选用外径为 0.5 mm,

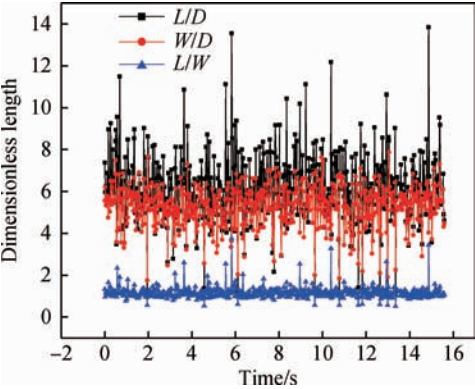


图 5 $Q_t=40\text{ }\mu\text{L/min}$ 时,火焰高度、宽度以及高宽比随时间的变化

Fig. 5 Variation of flame height, Flame width and aspect ratio with time when $Q_t=40\text{ }\mu\text{L/min}$

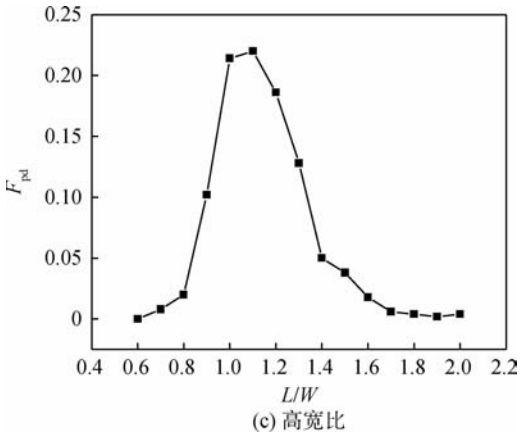


图 6 $Q_t=40\text{ }\mu\text{L/min}$ 时,火焰高度、宽度以及高宽比的 PDF

Fig. 6 PDF of flame of flame height, flame width and aspect ratio when $Q_t=40\text{ }\mu\text{L/min}$

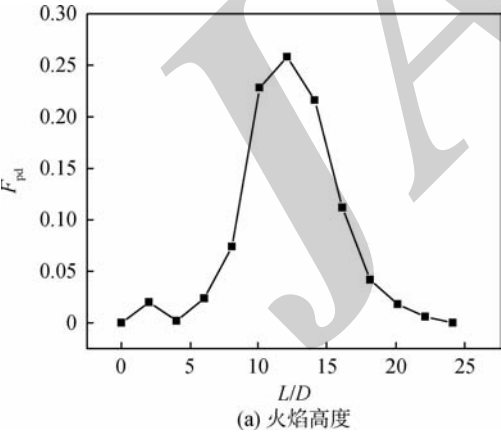
内径为 0.3 mm 的石英毛细管,分别选取 5~100 $\mu\text{L/min}$ 的 9 种流量进行实验。各流量下管口处扩散火焰(取平均长度附近火焰图像)如图 7 所示,图 7 中 L 表示火焰高度, W 表示火焰宽度。从图中可以看出,在小流量下,火焰呈淡蓝色,形状为基本规则的球形;随流量的增加,火焰形状变得不规则,颜色以亮黄色为主,尺寸逐渐增大。

如图 8 所示,火焰高度和宽度随燃料流量 Q_t 增加呈上升趋势,火焰高度最小为 1.03 mm,最大可以达到 8.83 mm。

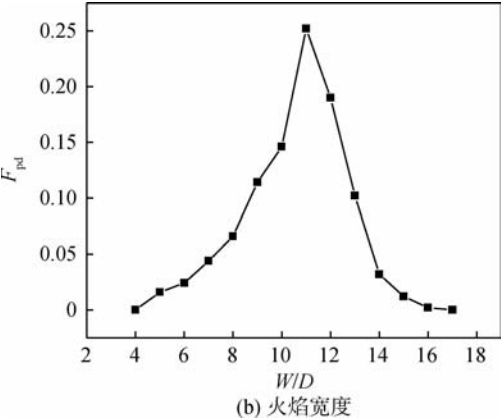
在流量较小时增长的速度较快。这是由于随着燃气流量的增加,燃烧所需氧气量增加,火焰的燃烧区域逐渐变大,使得火焰高度与火焰宽度随流量的增加不断增长,且基本呈线性。当燃气流量较高时(40~100 $\mu\text{L/min}$),火焰高度仍然会随流量呈线性增长,但增长的速度有所降低,原因如下:如图 7 所示,当流量大于 40 $\mu\text{L/min}$ 时,每个火焰的尾部都有一块拉长的淡蓝色燃烧区,并且此区域随流量的增加不断增大。该区域实际上是管内未来得及蒸发的液体以液滴的形式从管口喷出,在火焰尾部燃烧形成的淡蓝色尾焰。越来越多的液体以液滴的形式喷出,用于管口处燃烧的燃料蒸汽增长速度逐渐减慢,使得管口处火焰尺寸的增长速度有所下降。

从图 9 可以看出,流量为 5,10 $\mu\text{L/min}$ 时,火焰尺寸变化很小,说明此时火焰比较稳定。另外,从图 9(c)可以看出,无论火焰高度和宽度怎么变化,高宽比变化很小,主要在 1.0~1.2 之间变化。

在实验过程中,扩散火焰会以一定的频率闪烁,称之为火焰的振荡。虽然在肉眼看来振荡是



(a) 火焰高度



(b) 火焰宽度

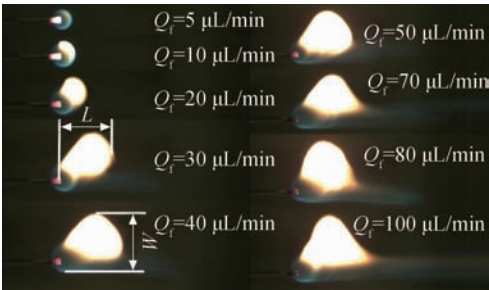


图 7 不同流量下的扩散火焰对比

Fig. 7 Comparison of diffusion flame under different volume flows

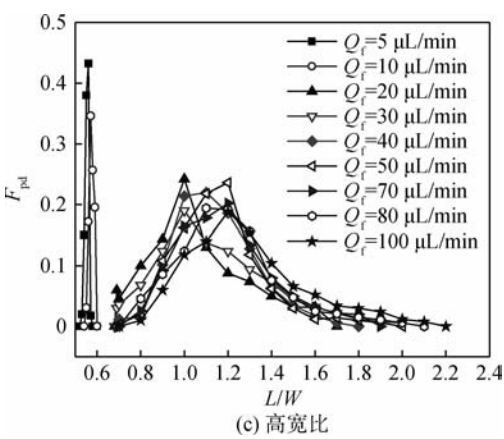


图 9 不同流量的火焰高度、宽度以及高宽比的 PDF
Fig. 9 PDF of flame height, flame width and aspect ratio of different volume flows

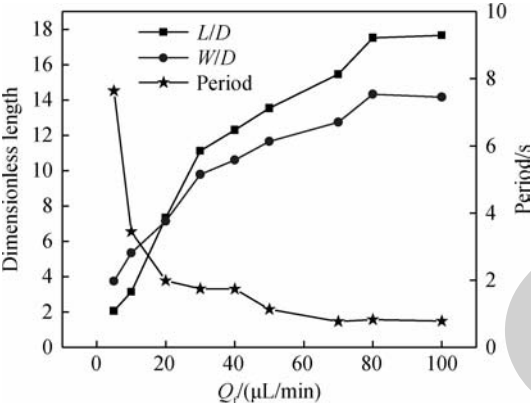


图 8 不同流量的火焰尺寸及振荡周期图

Fig. 8 Flame size and the oscillation period of different volume flows

杂乱无章的,如图 10 所示,但其实它是有规律的,并且其振荡周期随流量的增加也会有一定的变化。本研究对火焰高度数据运用快速傅里叶变换(FFT)得到不同流量下的火焰振荡周期,如图 10 所示。

从图 8 中可以看出,火焰振荡周期总体上随流量的增加而减小,也就是说流量越大,火焰闪烁得越快;从图中还可以看出,当流量大于 40 μL/min

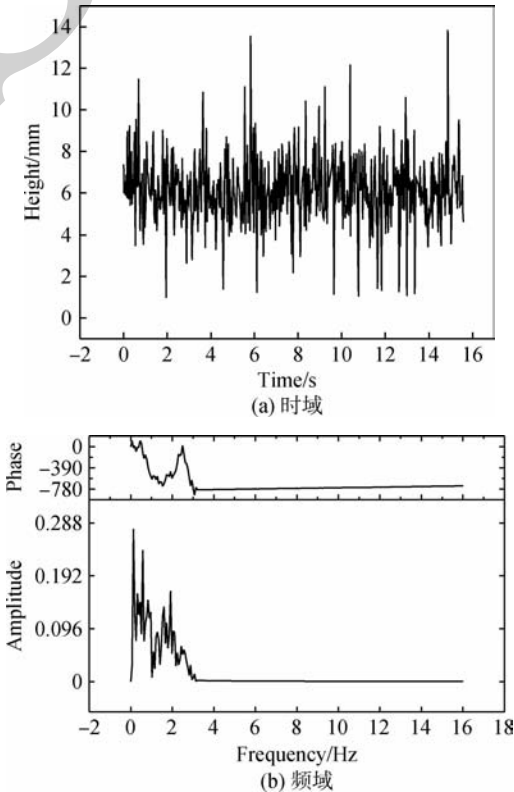
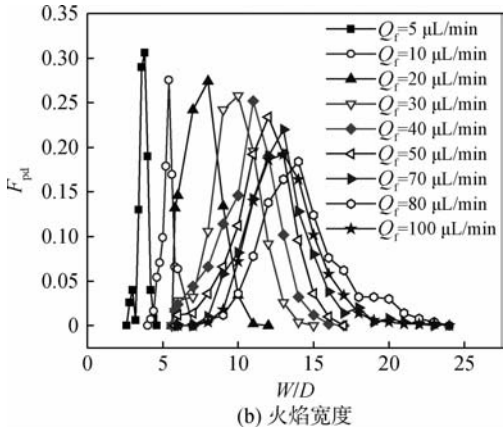
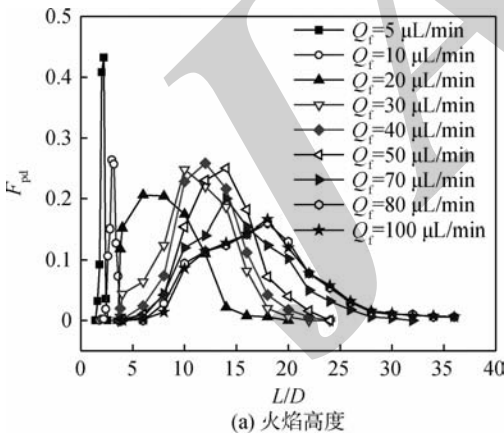


图 10 $Q_f=40\text{ }\mu\text{L/min}$ 时,火焰高度时、频域对比
Fig. 10 Comparison of flame height in time and frequency domain when $Q_f=40\text{ }\mu\text{L/min}$

时,火焰振荡周期随流量的变化的速率逐渐变小。

火焰之所以会存在振荡,是因为燃气属于流体,当从管口喷出时,直接暴露在空气中,会受到周围环境的影响,由于气流方向与重力方向垂直,所以水平火焰受浮力影响而改变方向;其次,由于实验装置中的注射泵是由步进电动机驱动的,因此电动机每一个微步也会引起火焰振荡。

当燃气流量变大时,燃烧所需燃烧区域逐渐变大,受到周围环境的影响越大,所以火焰的振荡周期与火焰高度是有一定关系的,从图 8 中可以看出,当流量较大时,振荡周期的变化速率减小,这与高流量下的火焰高度增长速率缓慢是相对应的。

3.1.2 燃料种类的影响

本节选用外径为 0.5 mm,内径为 0.3 mm 的石英毛细管,选取 3 种不同的液体碳氢燃料:正庚烷,异辛烷以及煤油,取燃料流量为 30 μL/min,探究不同燃料对火焰燃烧特性的影响。

表 1 是不同燃料的物理性质,3 种燃料拥有不同的燃烧热;随着碳原子个数的增加,碳氢质量比也会增加。

表 1 不同燃料物理性质				
Table 1 Physical properties of different fuels				
燃料	沸点/℃	燃烧热/(kJ/kg)	分子式	碳氢质量比
正庚烷	98.5	48.07	C ₇ H ₁₆	5.25
异辛烷	99.3	47.67	C ₈ H ₁₈	5.33
煤油	175~325	43.1~46.2	C ₁₂ H ₂₆	5.54

图 11 是 3 种不同燃料的扩散火焰图像,从图中可以看出,不同燃料扩散火焰的形状尺寸以及颜色是有一定差距的。

随着燃料碳原子个数的增加,扩散火焰的颜色有所不同,碳原子个数越多,火焰越明亮。这是因为燃料所含碳原子个数越多,未完全燃烧产生的碳烟越多,进而反射出更加明亮的光。另外,碳烟越多,火焰越容易受空气的浮力影响发生上翘,从图 11 中也可以明显看出。

从图 12 可以看出,火焰高度和火焰宽度都随碳原子个数的增加而增加,其中,火焰宽度随碳原子个数增长的速率大于火焰高度的增长速率。火焰尺寸由大到小依次为煤油、异辛烷、正庚烷,其中,煤油的沸点高于其余两种燃料,不能在毛细管中完全蒸发,会有液滴喷出,液滴在管口燃烧出现明亮的火焰羽流,使得火焰尺寸更大。

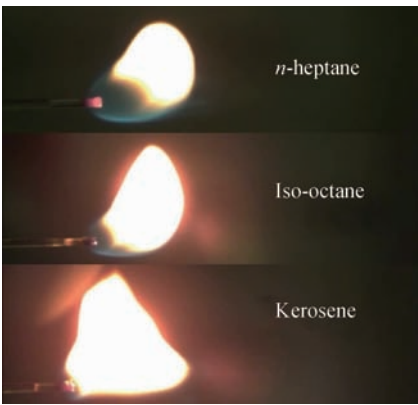


图 11 不同燃料的火焰形状对比图
Fig. 11 Comparison of flame shape of different fuels

图 12(b)还给出了不同燃料的振荡周期的变化规律,由小到依次依次为煤油、异辛烷、正庚烷,不难发现,这与火焰尺寸刚好相反,原因为:火焰尺寸越大,所占燃烧区域越大,越容易受到波动,所以振荡越快,周期越小。

3.2 微尺度竖直扩散火焰特性

本节从燃料流量和燃料种类两方面探究了毛细管竖直放置时扩散火焰的特性。

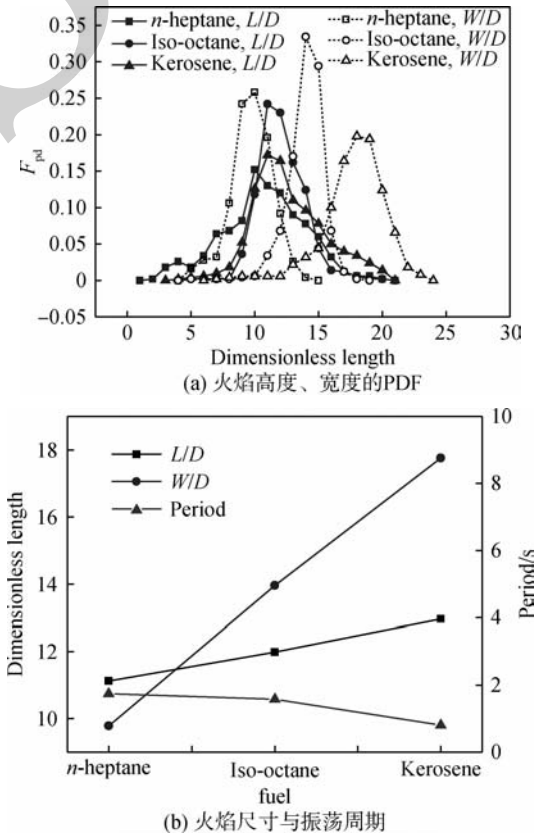


图 12 不同燃料的火焰高度、宽度 PDF 以及火焰参数对比图
Fig. 12 Comparison of PDF of flame height, flame width and flame parameter of different fuels

3.2.1 燃料流量的影响

实验以正庚烷为燃料,选用外径为 0.5 mm,内径为 0.3 mm 的石英毛细管,选取 5~100 $\mu\text{L}/\text{min}$ 的 11 种流量,探究毛细管竖直放置时,燃料流量对扩散火焰特性的影响。

图 13 是不同流量下火焰的直观对比图(选取该流量下平均火焰长度附近的火焰图像),可以看出,火焰随流量的增加基本呈线性增长,这与 Roper 模型预估火焰高度的理论是相吻合的。由

图 14 可以看出,流量较小时($Q_f < 30 \mu\text{L}/\text{min}$,火焰的形状接近椭球形,随着流量的增加($Q_f > 30 \mu\text{L}/\text{min}$),火焰逐渐被拉长,图 14(c)很好地反映了这一现象,火焰顶部逐渐变得尖锐。

在实验的过程中,发现随流量的增加,毛细管口会喷出未来得及蒸发的液滴,这些液滴会在管口处燃烧,形成淡蓝色尾焰。从图 13 中还可以观察到,随流量增加,火焰越来越明亮,这是管口处未完全燃烧的碳烟逐渐增加产生的。

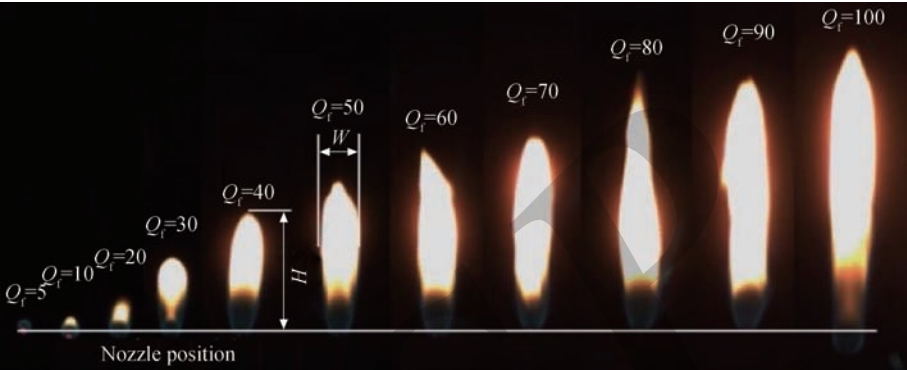


图 13 竖直方向不同流量下的火焰对比图(单位: $\mu\text{L}/\text{min}$)

Fig. 13 Comparison of flame of different volume flows in vertical direction (unit: $\mu\text{L}/\text{min}$)

如图 15 所示,是水平和竖直方向扩散火焰特性的对比图,从中可以明显看出,两种方式下的火焰尺寸都与燃料流量有着良好的正相关性,且基

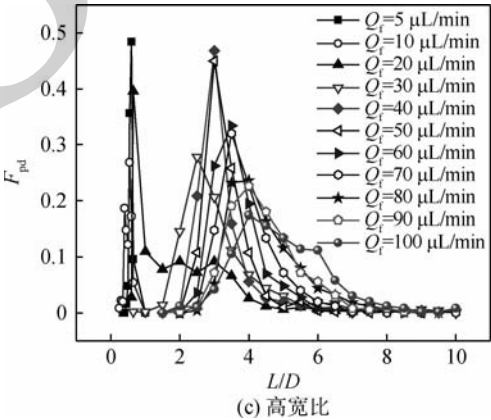
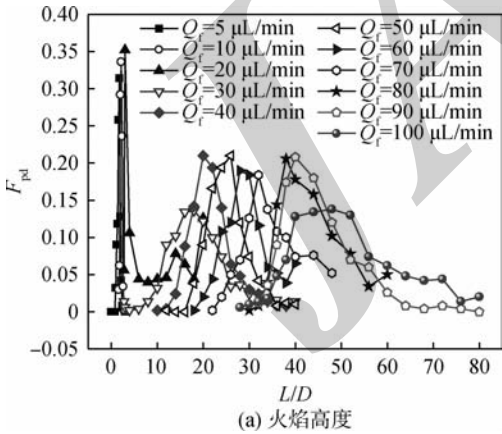


图 14 竖直方向火焰高度,宽度,高宽比的 PDF
Fig. 14 PDF of flame height, flame width, aspect ratio in vertical direction

本呈线性增长。其中,竖直方向的火焰高度随流量的增加会急剧增长,增长速度几乎是水平方向的两倍,这是因为竖直放置时,燃料的输送方向与燃气所受浮力的方向是相同的,燃气在向上喷出的同时,受到外界空气浮力的作用,使得燃气的燃烧区域进一步扩大,导致火焰高度远远大于水平放置时的高度。

从图 15 中还可以看出,两种方式下火焰的振荡周期都随流量的增加而减小,并且变化的趋势基本相同;分开来看,竖直放置的火焰振荡周期要小于水平时的,也就是说,竖直放置时火焰的振荡

更剧烈,对比两种方式下的火焰尺寸,可以发现,振荡周期的关系与火焰高度的关系很密切:火焰高度越大,振荡周期越小。

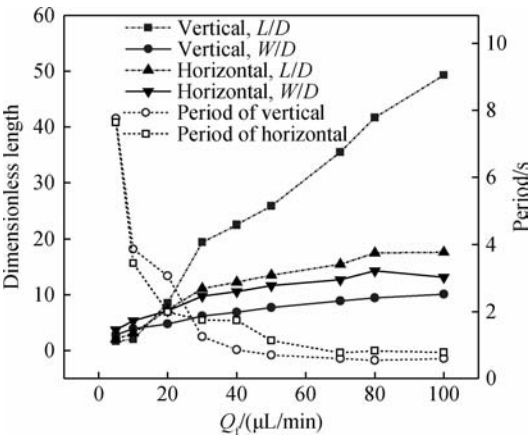


图 15 水平和垂直方向火焰特性对比图
Fig. 15 Comparison of flame characteristic in horizontal and vertical directions

3.2.2 燃料种类的影响

实验选用外径为 0.5 mm,内径为 0.3 mm 的石英毛细管,选取正庚烷,异辛烷,煤油 3 种液体燃料,探究竖直放置的毛细管中,不同燃料对火焰特性的影响。

如图 16 所示,是 3 种燃料在不同流量下的火

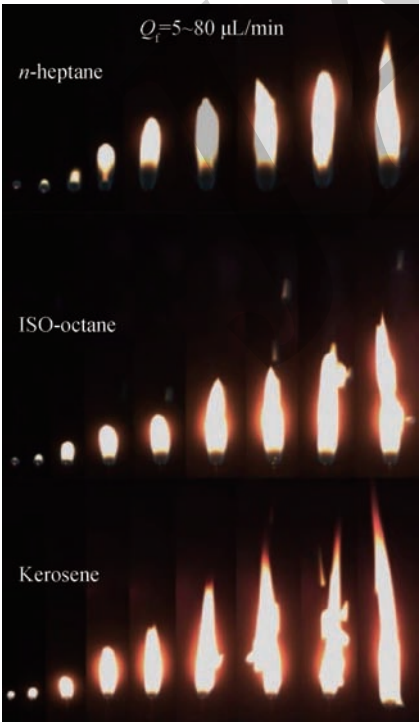


图 16 不同流量下正庚烷,异辛烷和煤油火焰对比
Fig. 16 Comparison of *n*-heptane, iso-octane and kerosene flame under different volume flows

焰对比图。从图中可以直观看出,3 种燃料的火焰尺寸都随流量的增加而增大,且基本呈线性关系增长,图 17 中有火焰高度实验结果与 Roper 模型计算结果的对比,可以看出,它们具有很好的吻合程度。从图中还可以发现 3 种燃料的火焰具有不同亮度,煤油最为明亮,其次是异辛烷,正庚烷,这与燃料的含碳量有关,煤油含碳量最多,所以其火焰最明亮。此外,由于煤油含碳量较多,管口会产生大量未完全反应的碳烟,碳烟易受周围环境波动的影响,使得火焰出现不稳定振荡,尤其发生在燃料流量较大时,从图 16 中高流量下的异辛烷和煤油的火焰可以看出火焰存在不稳定波动。从图 17 可以发现,煤油的火焰尺寸最大,正庚烷的火焰尺寸最小,不难发现,在流量一定时,火焰尺寸的大小与燃料含碳量呈正相关。

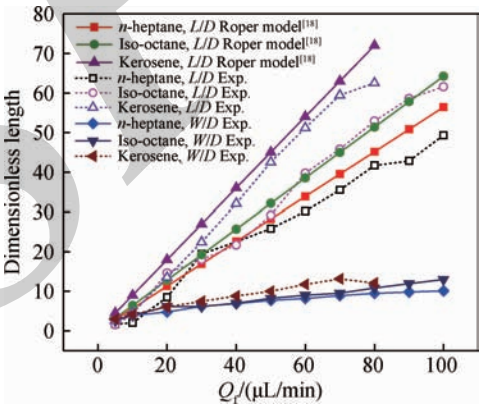


图 17 不同流量下正庚烷,异辛烷和煤油火焰尺寸实验和理论对比
Fig. 17 Comparison of experimental and theoretical results of *n*-heptane, iso-octane and kerosene flame sizes under different volume flows

4 结 论

为探究液体燃料在毛细管末端的扩散火焰燃烧特性,利用 4 种理论模型对竖直方向的层流扩散火焰高度进行了预估,并通过实验测试了不同燃料在水平和竖直两个方向的扩散火焰参数,得出以下结论:

竖直方向层流扩散火焰高度与管口处燃料蒸汽雷诺数成正比,Roper 模型预估结果与实验结果相近,为最优预估模型。对于含碳量较多的液体烃类燃料,可以用该模型对火焰高度进行预估。

毛细管层流扩散火焰尺寸随燃料流量的增加而增大。水平方向当流量大于 50 μL/min 时,由于燃料蒸发不完全,会有液滴喷出,火焰尺寸增长

速度变小;竖直方向受浮力影响,火焰高度被拉长,远大于水平方向。火焰的振荡频率与火焰尺寸有关,火焰尺寸越大,振荡越剧烈,表现为振荡周期随流量的增加而减小,且竖直方向小于水平方向。

燃料含碳量影响火焰特性,含碳量越多,火焰尺寸越大,火焰越明亮,振荡越剧烈。流量较大时,含碳量较多的煤油会向管口周围喷射燃料,形成剧烈振荡的不稳定火焰。

参考文献:

[1] MARBACH T L, AGRAWAL A K. Heat-recirculating combustor using porous inert media for mesoscale applications[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22 (1):145-150.

[2] FERNANDEZ-PELLO A C. Micropower generation using combustion:issues and approaches[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(1):883-899.

[3] ZHONG Beijing, WANG Jianhua. Experimental study on premixed CH₄/air mixture combustion in micro Swiss-roll combustors[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157 (12): 2222-2229.

[4] APPEL C, MANTZARAS J, SCHAEEREN R, et al. An experimental and numerical investigation of homogeneous ignition in catalytically stabilized combustion of hydrogen/air mixtures over platinum[J]. *Combustion and Flame*, 2002, 128(4):340-368.

[5] CHEN C P, CHAO Y C, CHENG T S, et al. Structure and stabilization mechanism of a microjet methane diffusion flame near extinction[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 3301-3308.

[6] SINHA A, GANGULY R, PURI I K. Control of confined nonpremixed flames using a microjet [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2005, 26(3):431-439.

[7] KUWANA K, TAGAMI N, MIZUNO S, et al. Extinction of laminar jet diffusion microflames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(2):3115-3121.

[8] WON S H, CHA M S, PARK C S, et al. Effect of electric fields on reattachment and propagation speed of tribrachial flames in laminar coflow jets[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1):963-970.

[9] WON S H, RYU S K, KIM M K, et al. Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames in coflow jets[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 152(4):496-506.

[10] MATTA L M, NEUMEIER Y, LEMON B, et al. Characteristics of microscale diffusion flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(1):933-939.

[11] BAKER J, CALVERT M E, MURPHY D W. Structure and dynamics of laminar jet micro-slot diffusion flames[J]. *Transactions of the ASME; Serie C Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(4):783-790.

[12] PHAM T K, DUNN-RANKIN D, SIRIGNANO W A.

Flame structure in small-scale liquid film combustors[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31 (2): 3269-3275.

[13] KYRITSIS D C, GUERRERO-ARIAS I, ROYCHOUDHURY S, et al. Mesoscale power generation by a catalytic combustor using electrosprayed liquid hydrocarbons[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(1):965-972.

[14] 杨泽亮, 刘志成, 甘云华. 液体燃料小尺度扩散火焰影响因素分析[J]. *顺德职业技术学院学报*, 2009, 7(4):15-18. YANG Zeliang, LIU Zhicheng, GAN Yunhua. Analysis of the influencing factors of liquid fuel mini-scale diffusion flame[J]. *Journal of Shunde Polytechnic*, 2009, 7(4):15-18. (in Chinese)

[15] 杨泽亮, 甘云华, 赖伟其. 液体燃料扩散小火焰的实验研究[J]. *热科学与技术*, 2009, 8(2): 151-155. YANG Zeliang, GAN Yunhua, LAI Weiqi, et al. Experimental study on small diffusion flames of liquid fuel[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2009, 8(2): 151-155. (in Chinese)

[16] LI J, HUANG J, YAN M, et al. Experimental study of *n*-heptane/air combustion in meso-scale burners with porous media[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 52(1):47-58.

[17] LI J, HUANG J, ZHAO D, et al. Diffusion combustion of liquid Heptane in a small tube with and without heat recirculating[J]. *Combustion Science and Technology*, 2012, 184(10):1591-1607.

[18] ROPER F G. The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part I theoretical model [J]. *Combustion and Flame*, 1977, 29(3):219-226.

[19] ROPER F G, SMITH C, CUNNINGHAM A C. The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part II experimental verification [J]. *Combustion and Flame*, 1977, 29 (3):227-234.

[20] ALTENKIRCH R A, EICHHORN R, HSU N N, et al. Characteristics of laminar gas jet diffusion flames under the influence of elevated gravity[J]. *Symposium on Combust*, 1977, 16(1):1165-1174.

[21] SPALDING D B. *The laminar diffusion flame*[M]. Amsterdam, Holland:Elsevier, 1979.

[22] KLAJN M, OPPENHEIM A K. Influence of exothermicity on the shape of a diffusion flame[J]. *Symposium on Combust*, 1982, 19(1):223-235.

[23] MAHALINGAM S, FERZIGER J H, CANTWELL B J. Self-similar diffusion flame[J]. *Combustion and Flame*, 1990, 82(2):231-234.

[24] 邱佐楨. 液体燃料在毛细管出口处燃烧特性研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015. QIU Zhuozhen. Studies on the combustion characteristics of liquid fuel in capillary tube[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2015. (in Chinese)

[25] 黄勇. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.