

燃料流量与管径对受限空间下微小火焰的影响分析*

甘云华^{1,2} 罗燕来^{1,2} 田中华^{1,2}

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 广东省能源高效清洁利用重点实验室, 广州 510640)

摘要:以小尺度陶瓷管为燃烧器喷管,与陶瓷管同轴的石英玻璃管构造受限空间,采用实验研究与数值模拟相结合的方法分析液体乙醇微小射流火焰特性。实验选择燃料流量为0~2.1 mL/h,采用的陶瓷管包括内径为1.0 mm和0.6 mm两种。结合火焰燃烧过程所涉及的特征参数,包括液滴高温蒸发率、无量纲热损失、熄火直径等,分析了不同燃料流量、燃烧器喷管内径等对微火焰稳定性、温度、形态等的影响。液体乙醇流量从零开始增加,整个变化过程会经历5个阶段,同时微火焰温度升高。而燃烧器喷管内径减小时,火焰逐渐变小。研究结果表明在稳定燃烧阶段,随着乙醇燃料流量的增加,燃料整体高温蒸发量增大,微火焰温度升高、火焰高度增大;随着燃烧器喷管内径减小,无量纲热损失增大,微火焰温度降低、火焰高度减小。适当调整燃料流量和燃烧器喷管内径有利于增强火焰稳定性。

关键词: 微尺度燃烧 受限空间 火焰特性

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0323-06

Effects of Fuel Flow Rate and Burner Nozzle Diameter on Small Flame Characteristics in Confined Space

Gan Yunhua^{1,2} Luo Yanlai^{1,2} Tian Zhonghua^{1,2}

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

2. Guangdong Province Key Laboratory of Efficient and Clean Energy Utilization, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A small scale ceramic tube was used as a combustor nozzle, and a coaxial jet ethanol flame was established in the confined space between the ceramic tube and the quartz glass tube. The fuel flow rates were 0 ~ 2.1 mL/h, and the ceramic tubes with inner diameters of 1.0 mm and 0.6 mm. The small jet flame characteristics were analyzed, while some relevant characteristic parameters were discussed. Some important parameters were selected, including high temperature droplet evaporation rate, normalized heat loss, and quenching diameter. Based on these, the effects of the fuel flow rate and the nozzle inner diameter on flame characteristics, including stabilities, flame temperature and flame shape, in the confined space were investigated experimentally and numerically. When the liquid ethanol flow increased from zero, the change process went through five stages and the flame temperature increased. When the burner nozzle diameter was reduced, the flame became smaller. The results showed that fuel flow and nozzle diameter played an important role in fuel evaporation and combustion process. In the stable combustion stage, overall fuel evaporation, flame temperature and height all increase with the increasing of the fuel flow rate, resulting in flame ignition difficulty in low flow rate and flame oscillation in high flow rate. Normalized heat loss increases, flame temperature and height both decrease due to the diminishment of the nozzle diameter and it would affect the flame stability. Properly adjusting the fuel flow rate and the burner nozzle diameter is helpful to enhance the flame stability.

Key words: Micro-combustion Confined space Flame characteristics

收稿日期: 2014-05-03 修回日期: 2014-06-12

* 国家自然科学基金资助项目(51376066)和广州市珠江科技新星资助项目(2012J220002)

作者简介: 甘云华, 教授, 博士生导师, 主要从事微小尺度燃烧与传热研究, E-mail: ganyh@scut.edu.cn

引言

微能源的发展促使微能源动力系统有巨大的发展潜力,微小尺度燃烧受到了各国研究者的广泛关注^[1-3]。由于特征尺寸非常小,火焰和壁面相互作用、分子扩散等成为影响微观/介观尺度火焰燃烧特性的重要因素^[4-5]。通过火焰特征参数的研究,有助于对微小尺度燃烧火焰特性进行深入分析。万建龙等^[6]通过数值模拟研究了固体材料对微型钝体燃烧器内氢气/空气预混火焰的吹熄极限的影响,分析了火焰稳定性与流动和传热之间的关系,探讨了微型钝体燃烧器材料的合理选择问题。周俊虎等^[7]对微型石英玻璃燃烧器在不同加热功率下的可燃极限进行了实验研究,探讨了燃料气体预热温度对微燃烧器性能的影响规律。Ju等^[8]探讨了通道宽度和路易斯数对介观尺度火焰传播特性的影响。黄显锋^[9]等以均匀空气流中由圆管形成的甲烷射流扩散火焰为对象,用实验和数值解析的方法研究了喷口尺寸和喷口对微扩散火焰结构的影响,同时讨论了甲烷火焰的熄火直径。陈琪等^[10]对小尺度多孔介质燃烧室中火焰的介电特性进行了分析。Gan^[11]等对比了受限射流和自由射流微火焰的特性,为分析外部受限条件对微火焰特性的影响提供了参考。

高能量密度的碳氢燃料适用于微燃烧系统,可满足便携式电力设备、微型无人飞行器、卫星推进器、微观化学反应器和传感器等应用领域的需求。目前的微尺度燃烧器中,多以气体碳氢燃料为研究对象,而液体碳氢燃料与气体碳氢燃料燃烧特性有许多不同,且液体碳氢燃料的能量密度更高^[12]。

本文以乙醇-空气小尺度层流扩散火焰为研究对象,通过探讨受限空间微小射流火焰的特征参数,分析不同燃料流量、燃烧器喷管管径对微火焰特性的影响。

1 实验及模拟条件

1.1 实验方法

选用液体乙醇为燃料,经垂直向上的微小尺度陶瓷管进行扩散燃烧,陶瓷管外加石英玻璃管构造受限空间,实验系统原理如图1所示。

通过注射泵调节控制实验所需要的乙醇流量,保证燃料供应的稳定和精度。通过体视显微镜观察微火焰,使用数字摄像头拍摄微火焰并由计算机实时显示及记录。采用铂铑热电偶对微火焰顶部进行多次温度测量,以确保测得数据的准确性。实验采用的陶瓷管包括内径 d 为1.0 mm和0.6 mm两种;

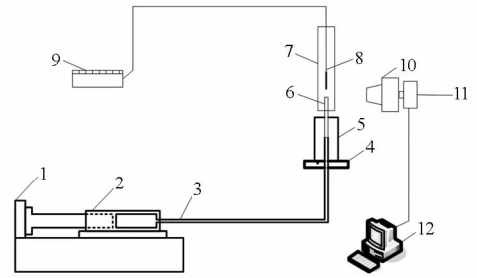


图1 微燃烧实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of micro-combustion experimental system

1. 注射泵 2. 注射器 3. 塑料软管 4. 底座 5. 铜管套筒
6. 陶瓷管 7. 石英玻璃管 8. 热电偶 9. 数据采集仪 10. 摄像头
11. 体视显微镜 12. 计算机

采用的石英玻璃管内径 D 为11 mm和16 mm两种,长度均为80 mm。

1.2 数值模拟

图2所示为二维直角坐标系下的物理模型。假设火焰为轴对称,计算取实际系统的一半,使用Fluent 6.3进行模拟。乙醇液体以较低的流速从陶瓷管底部入口进入,在陶瓷管口点燃后产生扩散火焰。

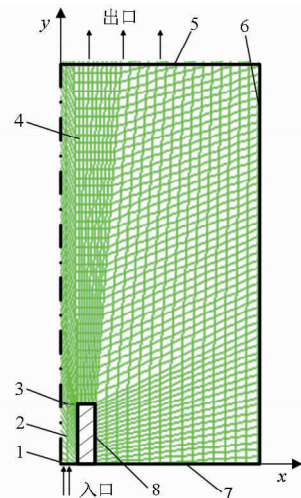


图2 数值分析物理模型示意图

Fig. 2 Numerical analysis physical model

1. 陶瓷管乙醇入口 2. 乙醇流动区 3. 陶瓷管乙醇出口 4. 燃烧区 5. 燃烧区上端面 6. 受限空间边界(石英玻璃管) 7. 燃烧区下端面 8. 陶瓷管管壁

数值模拟过程中,考虑到物理模型流体区有所不同,将其分成陶瓷管内流体区和燃烧流体区,陶瓷管口附近区域网格加密。模型结构形状规则,采用Map形式的网格,网格元素类型格式选择Quad。网格数量分为3种,分别为4 521、7 282、10 600,采用微火焰温度的变化来考核网格独立性。当网格数量从4 521变化到7 282时,火焰温度变化了3.6%,网格数量从7 282变化到10 600时,火焰温度变化了1.2%。因此,最终选用网格数量为7 282的网格划

分进行数值计算可以得到较为精确的结果。

工质流动及燃烧过程遵循质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程及组分守恒方程。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中 u, v —— x, y 方向的速度

x, y 两个方向的动量守恒方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + F_y \end{cases} \quad (2)$$

式中 ρ ——密度 μ ——动力粘度

p ——流体微元体上的压力

F_x, F_y ——微元体上的体积力

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho E + p)] =$$

$$\nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_i (h_i \mathbf{J}_i) + \boldsymbol{\tau}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{u} \right) + S_h \quad (3)$$

其中 $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}$

式中 k_{eff} ——有效传热系数

h_i ——组分 i 的焓值

∇ ——向量微分算子

\mathbf{J}_i ——组分 i 的扩散通量

T ——温度

$\boldsymbol{\tau}_{\text{eff}}$ ——粘性耗散应力

S_h ——体积热源项

组分守恒方程为

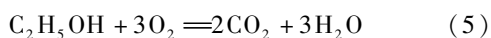
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

式中 Y_i ——第 i 种物质的质量分数

R_i ——净反应速率

S_i ——源项导致的额外产生速率

乙醇在陶瓷管口燃烧简化为空间单步化学反应，化学反应方程式为



进口采用均匀的速度进口边界条件，出口采用出口压力边界条件，陶瓷管内外壁采用绝热壁面条件，石英玻璃管壁采用实验测得的外壁面温度条件。假定乙醇充分燃烧。选择层流黏性模型和通用有限速率化学反应模型计算乙醇的输送和燃烧，乙醇燃烧不发生在壁面，没有弥散相粒子反应，乙醇燃烧的化学反应为体积反应，考虑计算多组分的扩散和热扩散。假设液体乙醇的纯度为 99.7%，供入的液体燃料温度为 300 K。详细的数值分析过程描述可参

见文献[13]。

实验拍摄得到的微火焰图片与数值计算得到的火焰温度场分布图如图 3 所示。二者所得的火焰结构形态十分相近。数值模拟的火焰高度与实验拍摄的火焰高度相差 6.6%，表明了数值模拟结果的准确性。另外，通过火焰温度测量值和计算值的比较，进一步证实数值模拟结果的准确性。

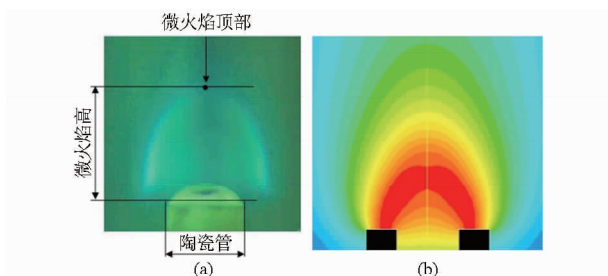


图 3 火焰图像照片和模拟图片

($d = 1.0 \text{ mm}$, $q_v = 1.4 \text{ mL/h}$)

Fig. 3 Flame image and simulated image

(a) 实验图片 (b) 数值计算结果

2 结果与分析

2.1 相关特征参数

在高温条件下进行时，蒸发不仅被分子扩散所控制，而且还决定于液滴表面和周围介质之间的温差。图 4 为液滴高温蒸发简图。

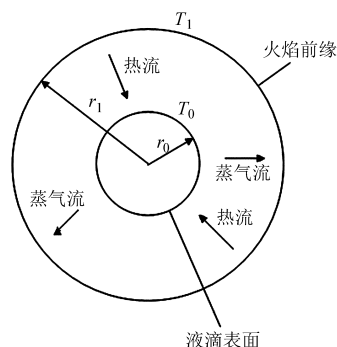


图 4 液滴高温蒸发简图

Fig. 4 Diagram of droplet evaporation under high temperature

液滴高温蒸发率 $m^{[14]}$ 为

$$m = \frac{4\pi\lambda}{c_p} \frac{r_0 r_1}{r_1 - r_0} \ln \left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{c_p}{l} (T_1 - T_0) \right) \quad (6)$$

式中 λ ——液滴的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

c_p ——蒸汽的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

r_1 ——球形火焰区的半径, m

r_0 ——液滴半径, m

T_0, T_1 ——液滴温度和球形火焰区的温度, K

λ_0 ——温度 T_0 下液滴导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

l ——比蒸发潜热, kJ/kg

本文实验条件下，微火焰一般可达 1 000 K，故

分析液滴高温蒸发率对微火焰特性研究有十分重要的意义。

如果燃烧器尺寸小于(大于)熄火直径(d_q),则称为微尺度(介观尺度)燃烧。这项定义在研究物理火焰特性方面具有重要意义。

借鉴文献[15]中有关无量纲热损失 H (通过壁面损失的热量与总化学放热量之比)的分析方法

$$H = \frac{4\delta_f^2}{d_1^2} Nu \quad (7)$$

式中 δ_f ——火焰厚度, m

d_1 ——燃烧器喷管内径, m

Nu ——努塞尔数

得到
$$d_q = 2 \sqrt{e\beta Nu} \delta_f \quad (8)$$

其中
$$e = \frac{1}{\beta H}$$

式中 β ——Zeldovich 数, 与燃料特性有关

由式(7)、(8)可以看出,当燃烧器尺寸逐渐减小,微火焰燃烧无量纲热损失增大,到接近熄火直径时,火焰将会出现熄灭或者不稳定现象。燃料不变的情况下,熄火直径(d_q)取决于壁面温度,是火焰厚度的倍数。当壁温为室温时,熄火直径大约等于15倍的火焰厚度。由实验测得,氢气、丙烷、甲烷/空气混合物的熄火直径在2~5 mm之间,且与实验条件相关^[16]。

2.2 燃料流量对火焰特性的影响

液体乙醇燃料在燃烧之前首先在火焰底部蒸发为气体乙醇,这一过程称为气化过程,这一区域称为气相区。乙醇燃烧火焰结构可以分为气相区、扩散区和强烈发光的反应区。在本实验条件下,液体乙醇的流量从零开始增加,整个变化过程可以依次分为不可燃烧阶段、熄火极限燃烧阶段、稳定燃烧阶段、振荡燃烧阶段和不完全燃烧阶段,图5所示为采用内径11 mm石英玻璃管和内径1.0 mm陶瓷管的微火焰变化过程。

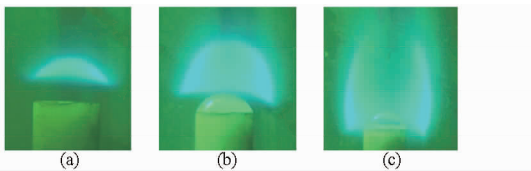


图5 微火焰形态

Fig.5 Flame shapes

(a) 熄火极限燃烧火焰($q_v = 0.8$ mL/h)

(b) 稳定燃烧火焰($q_v = 1.4$ mL/h)

(c) 振荡燃烧火焰($q_v = 2.1$ mL/h)

实验中拍摄得到的熄火极限燃烧火焰为蓝色火焰,形状为扁平的半月状,火焰边界清晰。稳定燃烧火焰为蓝色火焰,形状为半球形,火焰边界清晰。振

荡燃烧火焰会有规律的跳动,且伴随着砰砰的声响,蓝色火焰和黄色的析碳火焰交替出现,当为析碳火焰时,下半部分为蓝色火焰,上半部分为黄色火焰。火焰的侧面边界清晰,但是火焰的上方轮廓模糊。由于在不可燃阶段拍摄不到图像,不完全燃烧阶段,火焰形态不清晰,也拍摄不到图像,因此图5中只能给出其中3个阶段的典型图像。

图6所示为微火焰温度 T_1 随乙醇流量的变化趋势,包括采用内径11 mm石英玻璃管和内径分别为1.0 mm、0.6 mm陶瓷管的实验结果,以及数值计算结果。

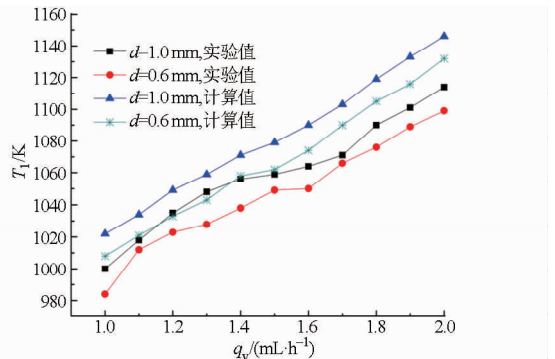


图6 微火焰温度随乙醇流量的变化曲线

Fig.6 Flame temperature varying with ethanol flow rate

随着乙醇流量及燃烧器喷管管径变化,数值计算和实验研究的结果变化趋势相同。对比数据可以看出模拟值和实验值差距较小,最大偏差为3%。进一步说明了数值模拟结果的准确性。

在稳定燃烧阶段,随着乙醇燃料流量的增加,微火焰的温度逐渐升高,且陶瓷管内径为1.0 mm的微火焰温度高于陶瓷管内径为0.6 mm的微火焰温度。

公式(6)中取液滴温度 $T_0 = 300$ K,则 $\lambda_0 = 0.1689$ W/(m·K),定性温度 $T = (T_1 + T_0)/2$ 。查乙醇物性手册可估算得到液滴单位质量高温蒸发率如图7所示。

随着乙醇流量增大,火焰温度升高,液滴高温蒸发率呈现下降的趋势。这主要是因为随着温度的升高,乙醇燃料定压比热容增大,单位质量的乙醇所需吸收的热量增大,使得液滴高温蒸发率减小。

结合乙醇流量变化,当乙醇流量从1.0 mL/h增加到2.0 mL/h,增大了100%,而液滴高温蒸发率仅减小了3.42%($d = 1.0$ mm)和3.44%($d = 0.6$ mm)。燃料整体高温蒸发量随着乙醇流量的增大而逐渐升高,大量液体乙醇气化。可见流量在很大程度上影响着燃料的蒸发及燃烧过程。流量较小时,初期的快速蒸发可能产生高浓度乙醇的气体混合物,而这会引起点火的困难,且小流量时形成较小

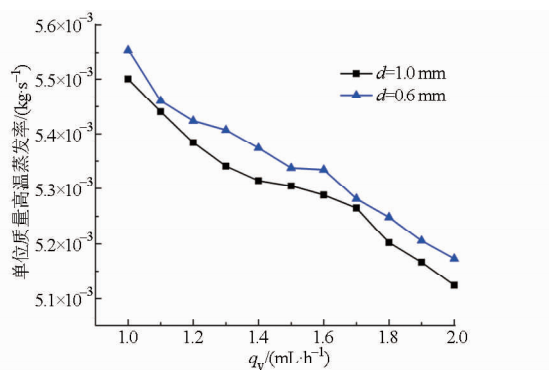


图 7 液滴高温蒸发率随乙醇流量的变化曲线

Fig. 7 Droplet evaporation rate varying with ethanol flow rate

的火焰,表面散热作用显著,因而容易熄灭。而流量增大到一定值时,部分气化的燃料来不及完全燃烧,因而火焰出现振荡。

2.3 燃烧器喷管内径对火焰特性的影响

本文实验测得,在乙醇流量相同的条件下,当陶瓷管内径不同时,火焰特性有所不同。图 8 所示为 $D = 11$ mm 时,微火焰高度 h 随乙醇流量的变化。可以发现,随着乙醇流量的增加,微火焰的温度升高,分子扩散作用增强,微火焰高度逐渐增大。而 $d = 1.0$ mm 的微火焰高度始终大于 $d = 0.6$ mm 的微火焰高度。

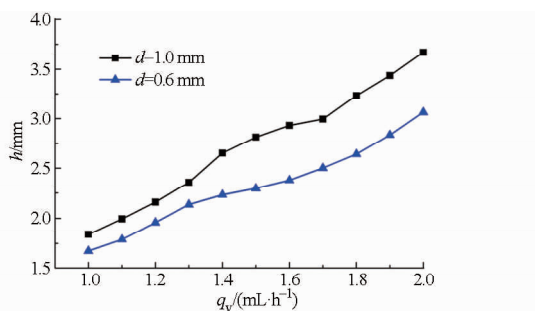


图 8 微火焰高度随乙醇流量的变化曲线

Fig. 8 Flame height varying with ethanol flow rate

玻璃管内径 $D = 11$ mm、 $D = 16$ mm 和 $D = \infty$,陶瓷管内径 $d = 1.0$ mm 时的微火焰高度分别为 2.36、2.46、2.73 mm, $d = 0.6$ mm 时微火焰高度分别为 1.84、2.39、2.55 mm。无论 D 取何值,陶瓷管内径 $d = 0.6$ mm 的微火焰高度总是小于陶瓷管内径 $d = 1.0$ mm 的微火焰高度。

图 9 所示为 $D = 11$ mm 时,不同陶瓷管内径模拟火焰形态对比。模拟设定为相同 $q_v = 1.3$ mL/h,以尽量排除燃烧器喷管内流动特性的影响。

由图发现,随着燃烧器喷管内径减小,火焰逐渐

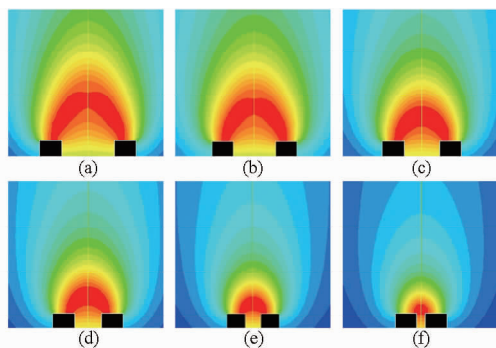


图 9 模拟火焰形态

Fig. 9 Simulated flame shape

(a) $d = 1.2$ mm (b) $d = 1.0$ mm (c) $d = 0.8$ mm
(d) $d = 0.6$ mm (e) $d = 0.3$ mm (f) $d = 0.2$ mm

缩小。各火焰形态基本相同,而当 $d = 0.2$ mm 时,火焰变得特别小,随时有熄灭的趋势。

根据实验测定, $D = 11$ mm 时,采用不同内径陶瓷管的微火焰温度变化曲线如图 6 所示。比较图 6 中 $d = 1.0$ mm 和 $d = 0.6$ mm 时的微火焰,不仅随着燃烧器喷管内径减小,火焰逐渐缩小,微火焰温度也有所减低。

由公式(7)可以发现,陶瓷管内径 d 减小时,无量纲热损失 H 将增大。此时,微火焰散热损失相对增大,微火焰温度降低,使得分子扩散作用减弱,所以微火焰的高度有所减低,整个火焰有缩小的趋势。

减小燃烧器喷管内径,有利于增强燃烧器紧凑性,获得更高的能量密度,但微火焰更容易熄灭。通过适当增加燃料流量的方法可增大液滴高温蒸发率,提高燃料蒸气浓度,使火焰更稳定。

3 结论

采用实验研究与数值分析相结合的方法,结合液滴高温蒸发率、熄火直径、无量纲热损失等特征参数的讨论和分析,研究了不同燃料流量、燃烧器喷管内径对受限空间下微小火焰特性的影响。研究表明:

(1)随着乙醇燃料流量的增加,整体燃料高温蒸发量增大,大量液体乙醇气化加强,微火焰温度升高,微火焰高度逐渐增大。

(2)随着燃烧器喷管内径减小,无量纲热损失增大,微火焰散热损失相对增大,微火焰温度降低,微火焰的高度有所减低,整个火焰有缩小的趋势。

(3)当燃烧器喷管内径减小时,微火焰易熄灭,可通过适当增加燃料流量的方法增大燃料整体高温蒸发率,加强气化,提高火焰稳定性。

参 考 文 献

- 1 Fernandez-Pello A C. Micropower generation using combustion: issues and approaches [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(1): 883 - 898.
- 2 Gemci T, Shortall B, Allen G M, et al. A CFD study of the throat during aerosol drug delivery using heliox and air [J]. Journal of Aerosol Science, 2003, 34(9): 1175 - 1192.
- 3 Dunn-Rankin D, Leal E M, Walther D C. Personal power systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31(5 - 6): 422 - 465.
- 4 Maruta K. Micro and mesoscale combustion [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 125 - 150.
- 5 Chen J, Peng X F, Yang Z L, et al. Characteristics of liquid ethanol diffusion flames from mini tube nozzles [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(2): 460 - 466.
- 6 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]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2014, 65(3): 1012 - 1017. (in Chinese)
- 7 周俊虎, 汪洋, 杨卫娟, 等. 燃料气体预热温度对微燃烧器性能影响的分析 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 90 - 94.
Zhou Junhu, Wang Yang, Yang Weijuan, et al. Effects of preheating fuel gas to micro-scale flame [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 90 - 94. (in Chinese)
- 8 Ju Y, Xu B. Effects of channel width and Lewis number on the multiple flame regimes and propagation limits in mesoscale [J]. Combustion Science and Technology, 2006, 178(10 - 11): 1723 - 1753.
- 9 黄显峰, 赵黛青, 张春林, 等. 微尺度扩散火焰特性的数值解析 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 883 - 886.
Huang Xianfeng, Zhao Daiqing, Zhang Chunlin, et al. Numerical analysis of microdiffusion flames [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(5): 883 - 886. (in Chinese)
- 10 陈琪, 李雪冬, 刘石. 小尺度多孔介质燃烧室中火焰分布的电容层析成像测量 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(9): 1516 - 1519.
Chen Qi, Li Xuedong, Liu Shi. Flame visualization in small-scale porous burner using electrical capacitance tomography [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(9): 1516 - 1519. (in Chinese)
- 11 Gan Y H, Xu J L, Yan Y Y, et al. A comparative study on free jet and confined jet diffusion flames of liquid ethanol from small nozzles [J]. Combustion Science and Technology, 2014, 186(2): 120 - 138.
- 12 Mujeebu M A, Abdullah M Z, Bakar M Z A, et al. A review of investigations on liquid fuel combustion in porous inert media [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(3): 216 - 230.
- 13 甘云华, 罗燕来, 冯清颖, 等. 受限空间下散热对微火焰稳定性的影响 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 37 - 41.
Gan Yunhua, Luo Yanlai, Feng Qingying, et al. Effect of heat loss on micro flame stability in confined space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 37 - 41. (in Chinese)
- 14 斯坦标林努(罗). 工业火焰的燃烧过程 [M]. 清华大学热能教研组, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- 15 Ju Y, Xu B. Theoretical and experimental studies on mesoscale flame propagation and extinction [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2445 - 2453.
- 16 Ju Y, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669 - 715.