

微型燃烧器扩展角对氢气/空气预混燃烧特性影响的模拟研究

王卓¹, 俞志鹏², 姬鹏², 王波^{1*}, 刘梦辉¹, 孙成喜¹

¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

²上海船用柴油机研究所, 上海

Email: *wangbo@usst.edu.cn

收稿日期: 2020年11月20日; 录用日期: 2020年2月2日; 发布日期: 2021年2月10日

摘要

基于建立的三维微型燃烧器模型, 选用氢气体积分数为10%的预混气, 对长度100 mm, 扩展角分别为0°、0.36°、0.72°的微型燃烧器内氢气/空气的预混燃烧过程进行模拟研究。研究发现, 对方形微通道燃烧器, 在相同的燃烧器长度、外壁边长和进口尺寸下, 扩展角越大的燃烧器, 速度极限范围越大。当入口速度较低时, 扩展角越大, 火焰传播速度越低, 最高燃烧温度越高; 当入口速度较高, 燃气充分燃烧时, 扩展角的大小对最高燃烧温度几乎没有影响。

关键词

微型燃烧器, 扩展角, 入口速度, 最高燃烧温度

Simulation Study on the Influence of Micro Burner Expansion Angle on Hydrogen/Air Premixed Combustion Characteristics

Zhuo Wang¹, Zhipeng Yu², Peng Ji², Bo Wang^{1*}, Menghui Liu¹, Chengxi Sun¹

¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai

Email: *wangbo@usst.edu.cn

Received: Nov. 20th, 2020; accepted: Feb. 2nd, 2021; published: Feb. 10th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 王卓, 俞志鹏, 姬鹏, 王波, 刘梦辉, 孙成喜. 微型燃烧器扩展角对氢气/空气预混燃烧特性影响的模拟研究[J]. 建模与仿真, 2021, 10(1): 93-106. DOI: 10.12677/mos.2021.101010

Abstract

Based on the established three-dimensional model of the microburner, the premixed combustion process of hydrogen/air in a 100 mm long microburner with expansion angles of 0° , 0.36° and 0.72° was simulated with 10% hydrogen volume fraction. It is found that for square micro-channel burners, with the same burner length, outer wall length and inlet size, the larger the burner expansion angle, the larger the speed limit range. When the inlet velocity is low, the larger the spreading angle is, the lower the flame propagation velocity is, and the higher the maximum combustion temperature is; when the inlet velocity is high and the gas is fully burned, the expansion angle has little effect on the maximum combustion temperature.

Keywords

Micro Burner, Expansion Angle, Inlet Velocity, Maximum Combustion Temperature

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial International License (CC BY-NC 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着几十年来的微机械技术和微电子技术的不断进步,逐渐发展出了一个新兴的领域——微型机电系统(MEMS)。微型机电系统因为体积小、轻巧、智能化的优势而逐渐应用于航天、汽车、医学、通讯等领域[1]。传统的电池作为微型设备的动力能源来说有续航时间短、体积笨重、能量密度低等缺点,已经不再满足为微型设备提供动力的需求,而微型燃烧装置因能量密度高、持续时间长、成本低、污染小等优点逐渐成为了学者研究重点。

微型燃烧装置中微尺度燃烧技术相较于传统燃烧技术而言还面临着许多新的问题,主要集中在散热损失较大,气体混合物的停留时间较短,燃烧火焰不稳定性增强这三个方面。为了解决这些问题,近年来国内外学者在表面催化反应和燃烧器结构方面进行了许多基础和应用研究。邵霞等[2]对微通道内的局部催化燃烧过程进行了数值模拟,发现当量比过高或过低时,表面催化反应对气相反应有抑制作用。刘子琨等[3]对二甲醚和甲烷在微尺度催化燃烧过程进行了实验和数值模拟,发现燃气入口流量的大小对燃气在催化剂表面的吸附有影响。Chen 等[4]对氢气与空气在微型圆管燃烧器中的壁面催化燃烧过程进行了数值模拟,结果表明:加入壁面催化反应之后,均相燃烧反应被极大地削弱了;当圆管直径逐渐减小时,非均相燃烧反应会被加强。Zhong 等[5]设计并测试了三种类型拥有双螺旋通道的微型瑞士卷燃烧器,发现微型瑞士卷结构燃烧器在中心处能够实现稳定的燃烧,在反应物和排气通道里的温度分布比较均匀,最大温度差在燃烧器边缘与燃烧器中心处。李军伟等[6]发现有空气槽的燃烧器拥有更宽的可燃极限。刘伟等[7]对甲烷与空气的预混气在瑞士卷燃烧器中的燃烧过程进行了数值模拟,发现瑞士卷燃烧器的结构对燃烧是有利的。Yang 等[8] [9] [10]利用氢气作为燃料对两种带突台结构的和直通型的不锈钢燃烧器做了对比实验研究,结果表明:燃烧器的突台结构加强了燃料混合物的混合并延长了燃烧的停留时间,拓宽了微型燃烧器的速度极限和浓度极限,而且突台结构的微型燃烧器可以控制火焰的稳定位置。邓尘等[11]对氢气与空气在微型缩放喷管的预混燃烧进行了实验研究。燃烧器结构如图 1 所示,微型缩放喷管采用石英玻璃材料,喉部的内径尺寸为 0° 。实验结果表明:缩放喷管结构加强了燃烧过程中流体的流动与

传热的扰动,使得反应速率变快,火焰的传播速度变大,更有利于火焰的稳定,这使得相比于相同直径的圆形和 T 形燃烧器,微型缩放喷管燃烧器拥有更宽的稳燃范围。

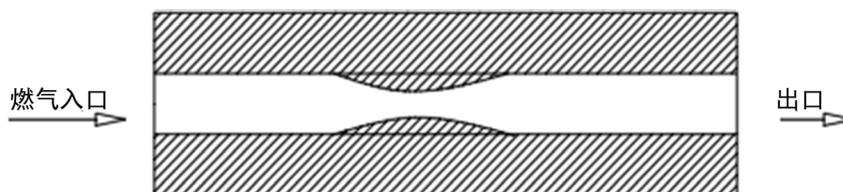


Figure 1. Miniature zoom nozzle
图 1. 微型缩放喷管

本文建立了微型燃烧器的物理模型以及氢气/空气预混燃烧的数学模型和反应机理,通过模拟不同扩展角燃烧器中氢气/空气预混气的预混燃烧过程,分析扩展角对微型燃烧器中的流体速度分布、流体温度分布、燃烧中间产物分布和稳燃范围的影响,并比较了火焰传播速度、最高燃烧温度、出口温度和火焰位置的变化规律。

2. 数值方法与模型

2.1. 微型燃烧器的物理模型

本文所采用的微型燃烧器如图 2 所示,为了防止发生回火,在直通段采用了低导热率堇青石材料,而在渐扩段采用高导热率碳化硅材料使燃烧后的热量能够快速的传递到未燃区去预热预混未燃气。3 种燃烧器的结构参数如表 1 所示,燃烧器的外部长宽高尺寸为 $100\text{ mm} \times 3.8\text{ mm} \times 3.8\text{ mm}$,内部直通段方孔尺寸为 $20\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,渐扩段长度 L_2 为 80 mm ,在 20 mm 处方孔边长 d_2 从 1 mm 分别渐扩到 2 mm 和 3 mm ,扩展角 α 从 0° 分别变成 0.36° 和 0.72° 。

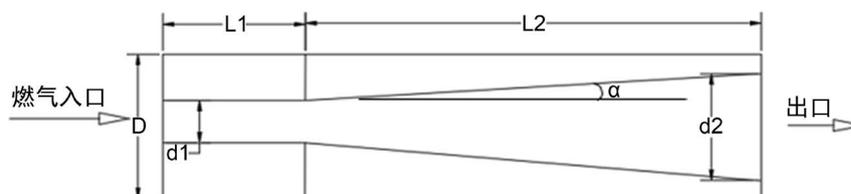


Figure 2. Schematic diagram of microburner
图 2. 微型燃烧器的结构示意图

Table 1. Structural parameters of three burners

表 1. 三种燃烧器的结构参数

燃烧器	d_1/mm	d_2/mm	D/mm	L_1/mm	L_2/mm	α
1	1	1	3.8	20	80	0
2	1	2	3.8	20	80	0.36
3	1	3	3.8	20	80	0.72

氢气和空气预混后从入口处进入燃烧器被高温壁面加热进而燃烧,在燃气进入渐扩段时速度逐渐降低,与火焰传播速度达到平衡时,火焰就稳定在燃烧器的某一位置,进而通过高导热率壁面将燃烧后高温尾气的热量传递给上游未燃区的预混气体。

为了简化计算过程,本文对预混燃气在微尺度渐扩式燃烧器内的预混燃烧模型进行了以下假设:

- 1) 预混燃气为不可压缩理想气体，在进入燃烧器时已混合均匀；
- 2) 忽略气体的辐射作用；
- 3) 忽略气体的体积力；
- 4) 忽略燃烧器壁面的催化作用；
- 5) 忽略浓度梯度产生的粘性热耗散效应和 Dufour 效应；
- 6) 忽略入口与出口处壁面带来的环境热损失。

2.2. 微型燃烧器的数学模型

流体的控制方程可以写成以下形式：

气体连续性方程：

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

式中： ρ 为预混气体的平均密度； u 为预混气体在 x 方向的速度； v 为预混气体在 y 方向的速度； w 为预混气体在 z 方向的速度。

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

式中： μ 为粘性系数。

能量方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho hu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho hv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho hw)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum_i \frac{\partial}{\partial x} \left(h_i \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) \\ &+ \sum_i \frac{\partial}{\partial y} \left(h_i \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + \sum_i \frac{\partial}{\partial z} \left(h_i \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right) + \sum_i h_i W_i \end{aligned} \quad (5)$$

式中： h 为预混气体的总焓； k_f 为预混气体的导热系数； T 为预混气体的温度； h_i 为组分 i 的焓值； $D_{i,m}$ 为组分 i 的扩散系数； Y_i 为组分 i 的质量分数； W_i 为组分 i 的化学反应速率。

组分方程：

$$\frac{\partial(\rho hu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho hv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho hw)}{\partial z} = \sum_i \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \sum_i \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + \sum_i \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right) + W_i \quad (6)$$

固体能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (7)$$

式中： k_w 为燃烧器壁面的导热系数。

2.3. 反应机理

氢气在微尺度燃烧器的化学反应非常复杂, 本文选用文献[12]提出的氢气与空气详细反应机理, 包含 9 种组分, 19 步基元反应, 具体如表 2 所示。

Table 2. 19 step reaction mechanism between hydrogen and air
表 2. 氢气和空气 19 步反应机理

序号	基元反应式	A (cm, mole, s)	β	E (calories/mole)
1	$\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{OH}$	1.70E+13	0.00	47780
2	$\text{OH} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	1.17E+09	1.3	3626
3	$\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$	5.13E+16	-0.816	16507
4	$\text{O} + \text{H}_2 = \text{OH} + \text{H}$	1.80E+10	1.00	8826
5	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M}^{\text{a}}$	2.10E+18	-1.00	0.00
6	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{O}_2 = \text{HO}_2 + \text{O}_2$	6.70E+19	-1.42	0.00
7	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{N}_2 = \text{HO}_2 + \text{N}_2$	6.70E+19	-1.42	0.00
8	$\text{OH} + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	5.00E+13	0.00	1000
9	$\text{H} + \text{HO}_2 = 2\text{OH}$	2.5E+14	0.00	1900
10	$\text{O} + \text{HO}_2 = \text{O}_2 + \text{OH}$	4.80E+13	0.00	1000
11	$2\text{OH} = \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	6.00E+08	1.30	0.00
12	$\text{H}_2 + \text{M} = \text{H} + \text{H} + \text{M}^{\text{b}}$	2.23E+12	0.50	92600
13	$\text{O}_2 + \text{M} = \text{O} + \text{O} + \text{M}$	1.85E+11	0.50	95560
14	$\text{H} + \text{OH} + \text{M} = \text{H}_2\text{O} + \text{M}^{\text{c}}$	7.5E+23	-2.60	0.00
15	$\text{H} + \text{HO}_2 = \text{H}_2 + \text{O}_2$	2.5E+13	0.00	700
16	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	2.00E+12	0.00	0.00
17	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{M} = \text{OH} + \text{OH} + \text{M}$	1.30E+17	0.00	45500
18	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H} = \text{HO}_2 + \text{H}_2$	1.60E+12	0.00	3800
19	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} = \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2$	1.00E+13	0.00	1800

其中, a 处增强因子: $\text{H}_2\text{O} = 21.0, \text{H}_2 = 3.3, \text{N}_2 = \text{O}_2 = 0.0$; b 处增强因子: $\text{H}_2\text{O} = 6.0, \text{H} = 2, \text{H}_2 = 3.0$; c 处增强因子: $\text{H}_2\text{O} = 20.0$ 。

在以上基元反应速率常数是由阿累尼乌斯公式给出:

$$k = AT^{\beta} \exp(-E_K/RT) \quad (8)$$

式中: A 为指数前因子; β 为温度指数; E_K 为化学反应的活化能; R 为气体常数。

2.4. 边界条件的设置

本文中模拟不同入口速度下的微型燃烧器的燃烧情况, 选择速度入口边界条件, 流体速度为沿流动方向入口速度, 流体初始温度设置为 300 K, 组分计算按各组分的摩尔分数设置。

均采用出口压力边界条件，压力为大气压 0.1 MPa，各组分按摩尔分数设置。

热流通量边界条件设置热流通量为 0 时的绝热壁面；内壁面交界面选择为双侧壁面的热力学边界条件，并将定义的交界面和影子交界面进行耦合设置；外壁面边界条件设置为热流通量的边界条件，对流传热系数设置 $5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

2.5. 模型验证

选取文献[13]中的一个实验工况进行验证，其中燃烧器外部尺寸长宽高为 $18 \text{ mm} \times 9 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ，壁厚 0.5 mm；纯氢流量为 200 ml/min，与空气混合后以当量比为 1，入口流速约为 0.466 m/s 进入燃烧器；壁面材质为 316 不锈钢，壁面发射率为 0.65。模拟结果如图 3 所示，从图中可以看出壁面温度相差为 20 K 左右，数值模拟误差为 2.5%，表明本文所用的数值方法是合理的。

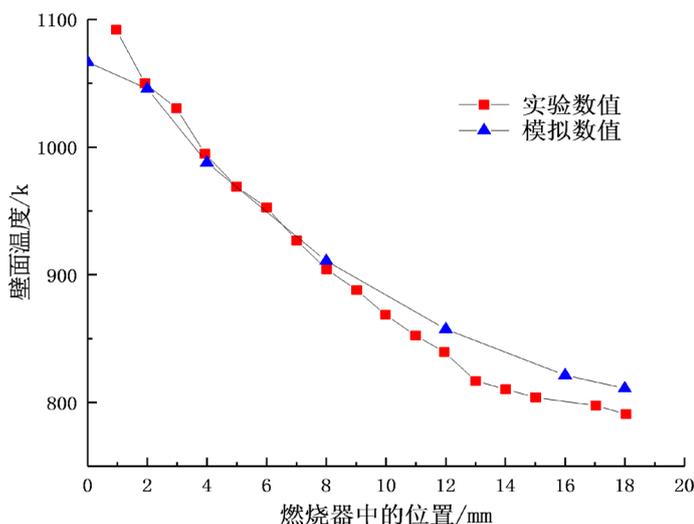


Figure 3. Comparison and verification between experiment and simulation
图 3. 实验与模拟对比验证

由于采用的三维模型，所以在提取数据时为保证能够很好的反映变化规律，在文献[14] [15]二维模拟研究中对火焰传播速度和稳燃位置的基础上，分别将最高燃烧温度、火焰传播速度和稳燃位置定义如下：

- 1) 将燃烧器的流体通道的中心线上的最高燃烧温度定义为燃烧器的最高燃烧温度。
- 2) 将燃烧器流体通道的中心线上的 OH 浓度最高的位置所对应的流体速度定义为燃烧器的火焰传播速度。
- 3) 氢气与空气的 19 步反应机理中反应最慢的基元反应是第 12 步反应，即 $\text{H}_2 + \text{M} = \text{H} + \text{H} + \text{M}^b$ ，所以将燃烧器流体通道的中心线上，第 12 步反应最快的位置即为火焰的位置。

3. 结果与分析

为了对比氢气/空气在不同扩展角燃烧器中的预混燃烧特性，这里选用氢气体积分数为 10% 的预混气，研究不同入口流速下氢气/空气预混气在燃烧器中的预混燃烧特性。

3.1. 扩展角对燃烧器中的流速分布的影响

图 4 给出了氢气体积分数为 10%，入口速度为 4 m/s 时，不同扩展角的燃烧器中的速度分布云图。从图中可以看出，与扩展角为 0° 的燃烧器中相比，扩展角越大的燃烧器中燃气燃烧区域的流速越小。其

中扩展角为 0.72° 的燃烧器中最高流速为 19.7 m/s ，扩展角为 0.36° 的燃烧器中的最高流速为 22.9 m/s ，扩展角为 0° 的燃烧器中的最高流速为 29.23 m/s ；而且扩展角越大的燃烧器中高速流体越在燃烧区域集中，使得燃气的停留时间延长，减小了对火焰拉伸的作用，这对燃气在燃烧器中的稳定燃烧是有利的。

氢气体积分数为 10% 在三种燃烧器中的燃烧火焰传播速度如图 5 所示。从图中可以看出，扩展角 0.72° 的燃烧器中火焰传播速度最小，扩展角 0° 的燃烧器中火焰传播速度最大；扩展角 0° 的燃烧器即直通型燃烧器中火焰传播速度与入口速度近似成正比例关系，而扩展角 0.36° 和扩展角 0.72° 的燃烧器中的火焰传播速度曲线变成了抛物线。在图 5 中，扩展角为 0.72° 的燃烧器中的火焰传播速度曲线在 11 m/s 时出现了突然的下降，然后继续上升的现象，当入口流速增加时，在渐扩式通道里火焰传播速度反而减小，这跟燃烧器中的火焰位置有关。

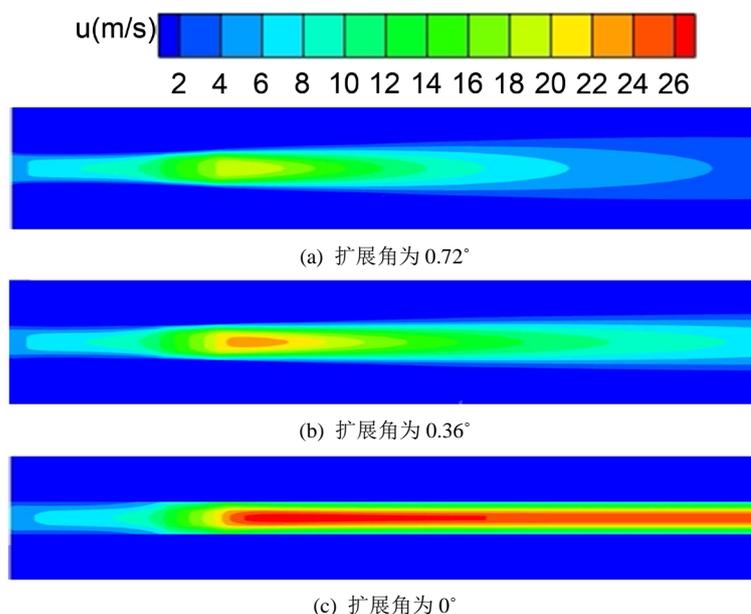


Figure 4. Cloud chart of fluid velocity distribution in burners with different spreading angles
图 4. 不同扩展角的燃烧器中流体速度分布云图

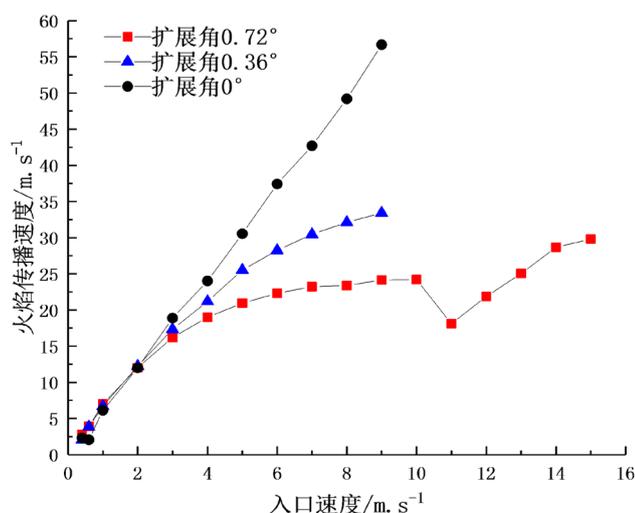


Figure 5. Flame propagation velocities of burners with different expansion angles at different inlet velocity
图 5. 不同扩展角的燃烧器在不同入口流速下的火焰传播速度

图 6 给出了扩展角为 0.72° 的燃烧器在入口速度为 11 m/s 附近的速度分布。从图中可以看出，扩展角为 0.72° 的燃烧器在入口速度 10 m/s 时，燃烧区域靠近了出口位置，而入口速度达到 11 m/s 时，高流速区域变得窄小，而在 12 m/s 时，高流速区域又重新变得狭长。

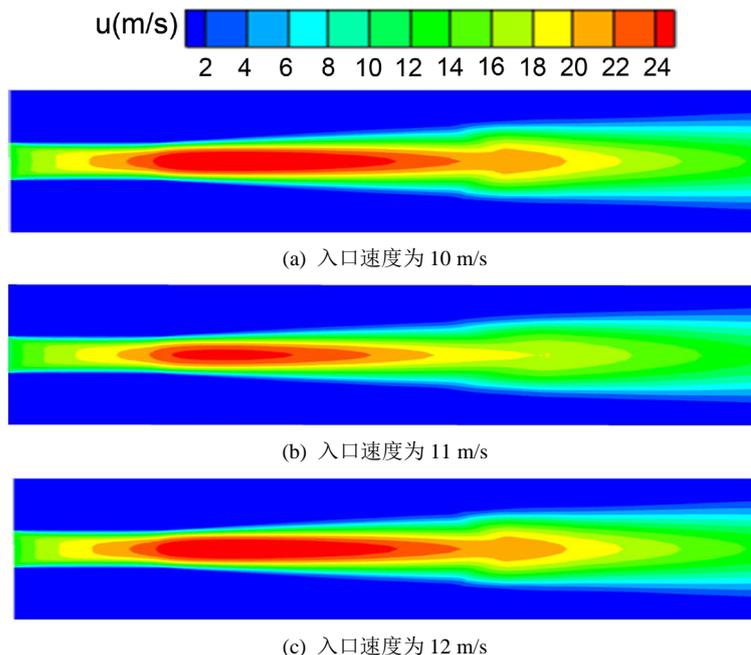


Figure 6. Velocity distribution cloud chart at different inlet velocities in a burner with an expansion angle of 0.72°
 图 6. 扩展角为 0.72° 的燃烧器中不同入口速度下的速度分布云图

3.2. 扩展角对燃烧器中的温度分布影响

氢气体积分数为 10% 的预混气在三种燃烧器中最高燃烧温度如图 7 所示。从图中可以看出，扩展角为 0.72° 的燃烧器内燃烧温度最高，而扩展角为 0° 的燃烧器即直通型燃烧器内的最高燃烧温度最低。从图

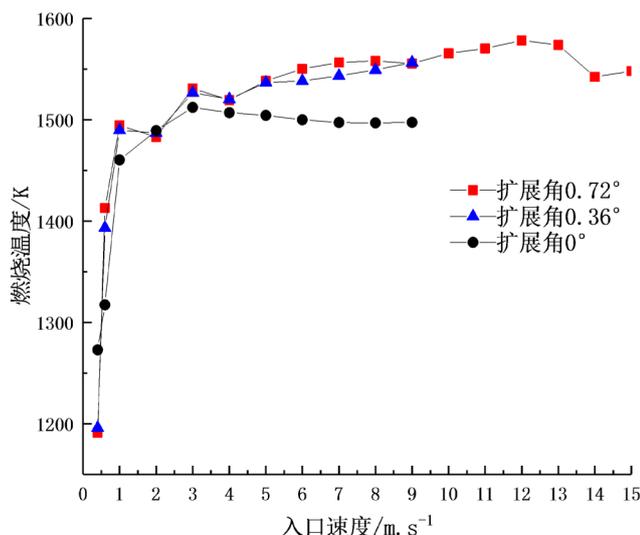


Figure 7. Maximum combustion temperature at different inlet velocities in burners with different expansion angles
 图 7. 不同扩展角的燃烧器内不同入口流速下的最高燃烧温度

中也可以看出, 扩展角为 0.72° 的燃烧器在体积分数为 10% 时的速度极限为 $0.4\sim 15$ m/s, 扩展角为 0.36° 和扩展角为 0° 的燃烧器的速度极限为 $0.4\sim 9$ m/s。当扩展角从 0° 增加到 0.36° 时, 燃烧的空间变大, 但是渐扩段的壁厚会变薄, 而壁厚变薄会减少火焰燃烧时向上游传导的热量, 这就削弱了燃烧空间变大的带来的对稳燃的积极作用, 使燃烧器扩展角渐扩到 0.36° 时速度极限没有变化。当扩展角为 0.72° 时火焰燃烧空间进一步变大, 而壁厚变薄的影响则变得很小, 所以速度极限变大。

图 8 给出了在氢气体积分数为 10%, 入口速度为 4 m/s 时的温度分布云图。从图中可以看出当燃烧器的扩展角逐渐增大时, 燃烧的火焰得到了伸展且变得更加宽大, 使预混气在微尺度空间里的反应更加完全, 提高燃气的反应速率, 从而获得更高的燃烧温度。

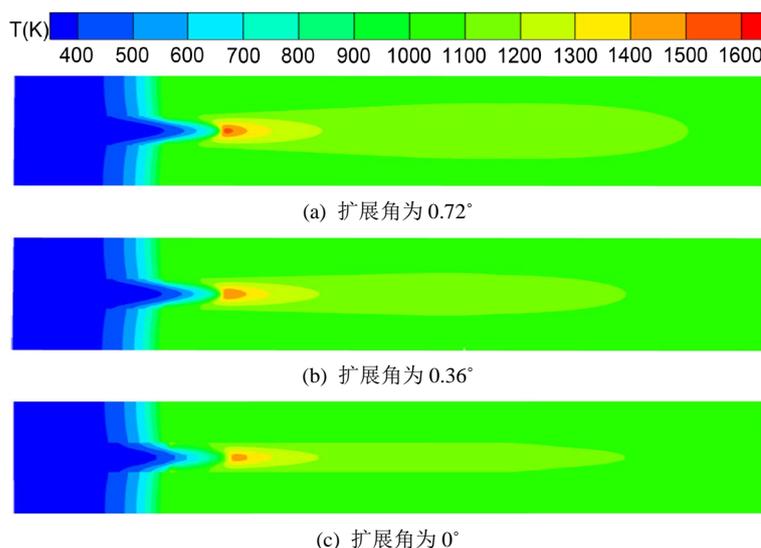


Figure 8. Cloud chart of temperature distribution in burners with different expansion angles
图 8. 不同扩展角燃烧器内的温度分布云图

图 9, 图 10 和图 11 分别给出了在不同扩展角的燃烧器中接近燃烧器的吹熄极限时的温度分布云图。当氢气的体积分数为 10% 时, 扩展角为 0° 的燃烧器的吹熄极限为 9 m/s, 扩展角为 0.36° 的燃烧器的吹熄极限为 9 m/s, 扩展角为 0.72° 的吹熄极限为 15 m/s。从图中可以看出由于燃烧器通道形状的原因, 扩展角为 0° 的燃烧器中在接近吹熄极限时的火焰形状已经变得狭长稀薄, 而扩展角为 0.36° 和扩展角为 0.72° 的燃烧器中的火焰形状较为宽大; 在接近吹熄极限时, 扩展角为 0° 和扩展角为 0.36° 的火焰的位置相同, 且距离出口位置较远, 表明这两种燃烧器在靠近出口位置时不能稳定燃烧, 而扩展角为 0.72° 的燃烧器在 11 m/s 时靠近出口位置实现了稳定燃烧, 这是由于燃烧器通道里空间越大, 火焰高温区域越宽大, 燃烧越充分, 通过壁面对未燃的预混气的预热能力越大, 使得燃烧器在更高的速度下和更靠近出口位置实现稳定燃烧。

在图 5 中, 扩展角为 0.72° 的燃烧器内的火焰传播速度曲线在 11 m/s 时出现了突然的下降, 然后继续上升的现象。造成这种现象的原因可以由图 11 看出, 图 11(a)、图 11(b)、图 11(c) 分别对应入口速度 10 m/s、11 m/s、12 m/s 时燃烧器稳燃时的温度分布云图。当流体速度达到 11 m/s 时, 火焰中心接近了出口位置, 燃烧释放的热量未能向壁面传导而被直接排出, 向上游传递的热量对预混气预热不足, 这就造成了火焰传播速度的突然的下降。当入口速度增加时, 从图 11(c) 中可以看出, 火焰中心向上游移动, 且火焰形状变得窄小, 这时速度的增大已经开始削弱了预混气的燃烧, 对稳燃造成不利的影响; 入口速度继续增加到一定值时, 火焰就会开始熄灭, 此时已不能稳定燃烧, 进而造成了吹熄现象的发生。

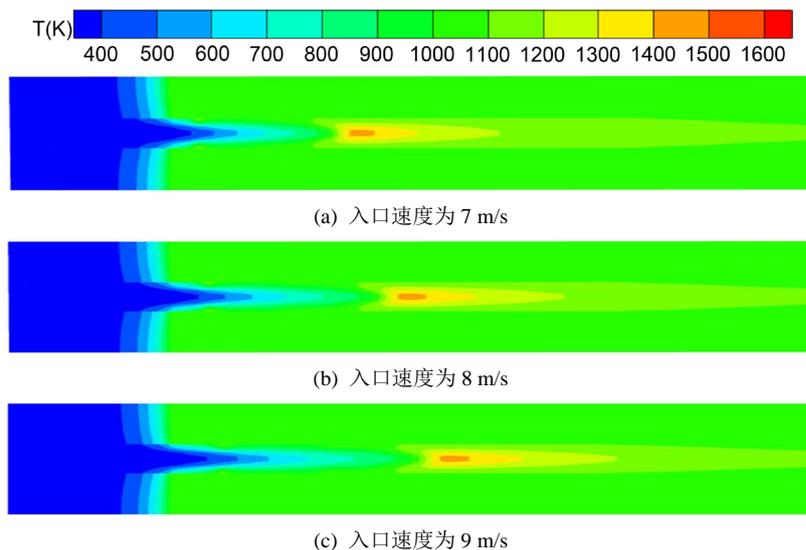


Figure 9. Cloud chart of temperature distribution at different inlet velocities in a burner with 0° expansion angle
图 9. 扩展角为 0° 的燃烧器内不同入口速度下的温度分布云图

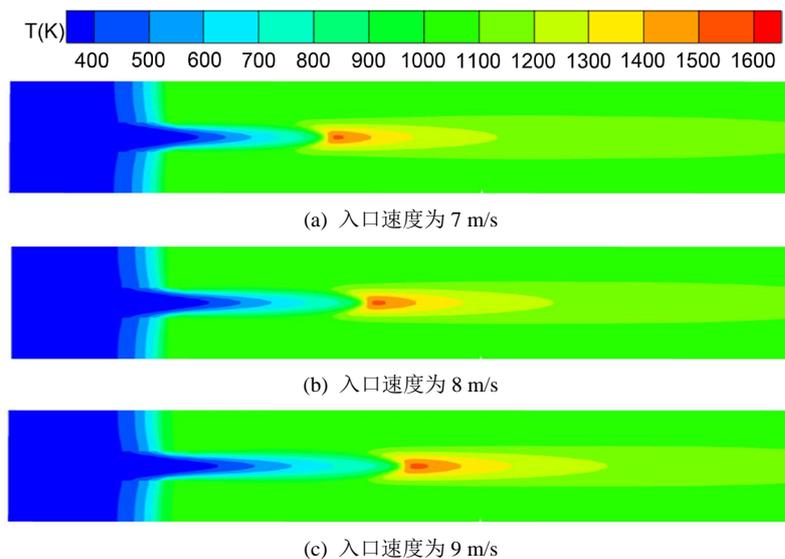
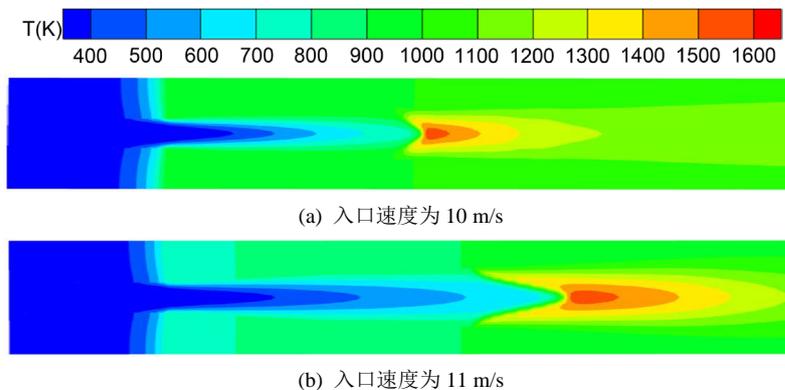
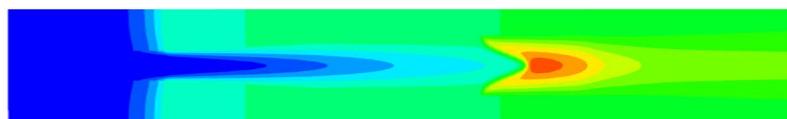


Figure 10. Cloud chart of temperature distribution at different inlet velocities in a burner with 0.36° expansion angle
图 10. 扩展角为 0.36° 的燃烧器内不同入口速度下的温度分布云图





(c) 入口速度为 12 m/s

Figure 11. Cloud chart of temperature distribution at different inlet velocities in a burner with 0.72° expansion angle
图 11. 扩展角为 0.72° 的燃烧器内不同入口速度下的温度分布云图

从图 12 给出的入口速度分别为 10 m/s、11 m/s、12 m/s 时，在扩展角为 0.72° 的燃烧器中的流体温度分布来看，虽然 12 m/s 时的火焰位置相比于 11 m/s 时的向上游移动了，但是燃烧器中火焰区域前面的流体温度基本不变，这表明增加的入口速度只是带走了火焰区的热量使得火焰形状变小，使火焰向上游移动而并没有降低火焰前面的流体温度；从吹熄时的火焰位置依然比 10 m/s 的远这一现象也可以看出，火焰前端位置基本没有变化。

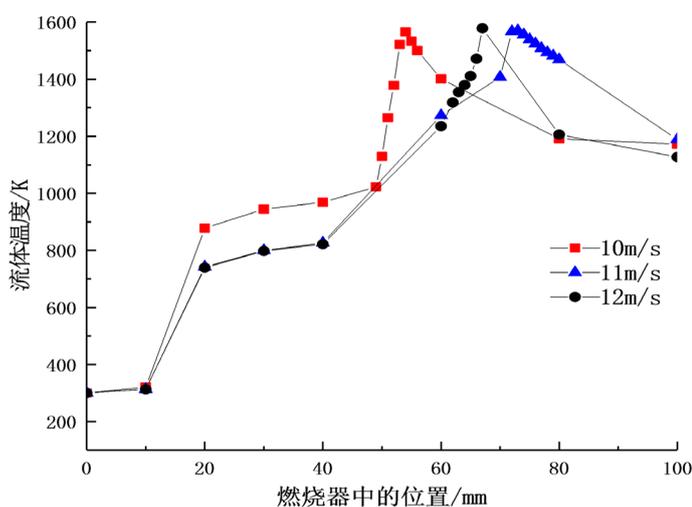


Figure 12. The effect of inlet velocity on fluid temperature distribution in a burner with an expansion angle of 0.72°
图 12. 扩展角为 0.72° 燃烧器中入口速度对流体温度分布的影响

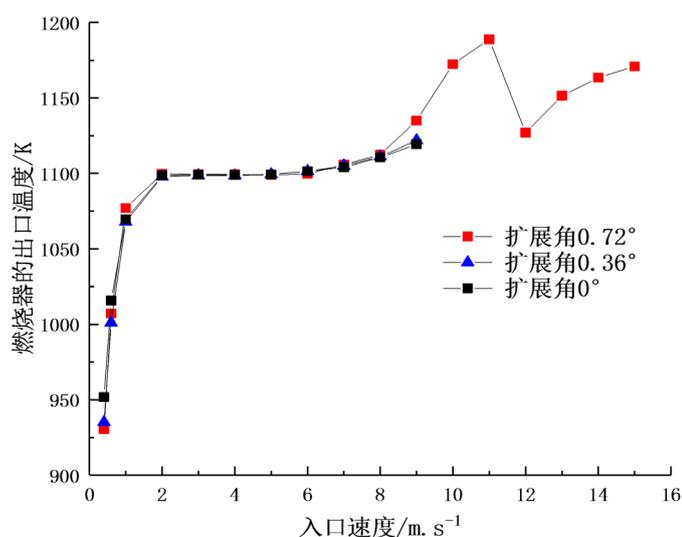


Figure 13. Effect of inlet velocity of burner with different expansion angles on gas outlet temperature
图 13. 不同扩展角的燃烧器内入口速度对气体出口温度的影响

三种不同扩展角的燃烧器在不同入口速度下气体离开燃烧器时的出口温度分布如图 13 所示。从图中可以看出，在 0.4~9 m/s 之间，三种燃烧器的出口温度曲线基本重合。0.4~9 m/s 是扩展角为 0°和扩展角为 0.36°的燃烧器在氢气体积分数 10% 时的速度极限，这表明燃烧器通道空间的扩大并没有对燃烧器的气体出口温度产生明显的影响。而图中扩展角为 0.72°的曲线在 12 m/s 时的突然下降然后继续上升的现象与前面分析的结论是一致的，由于火焰在 11 m/s 时是最接近出口位置使得出口的气体温度上升，接着由于速度的继续增加火焰中心开始向上游移动，燃烧器出口的温度出现短暂的下降，当入口速度继续增加时，虽然由于火焰形状的变小而向上游继续移动，但是增加的入口速度使得燃气中更多的热量放出，这些增加的热量并没有通过壁面及时的预热上游的未燃预混气体，而是被直接气流带出了燃烧器，从而造成了在 12 m/s 开始燃烧器出口温度继续上升的现象。

3.3. 扩展角对燃烧器中燃烧产物分布的影响

图 14 和图 15 给出了入口速度为 9 m/s 时，不同扩展角的燃烧器中 OH 浓度分布。从图中可以看出，扩展角越大的燃烧器中 OH 浓度的分布越集中，这表明发生的燃烧反应越集中，反应速率越快，越能抑制流体中由于流速带来拉伸作用；而图中扩展角为 0.72°的燃烧器中的 OH 最高浓度最靠前，说明火焰区域也更靠前，这对扩大燃烧器的速度极限是有利的。

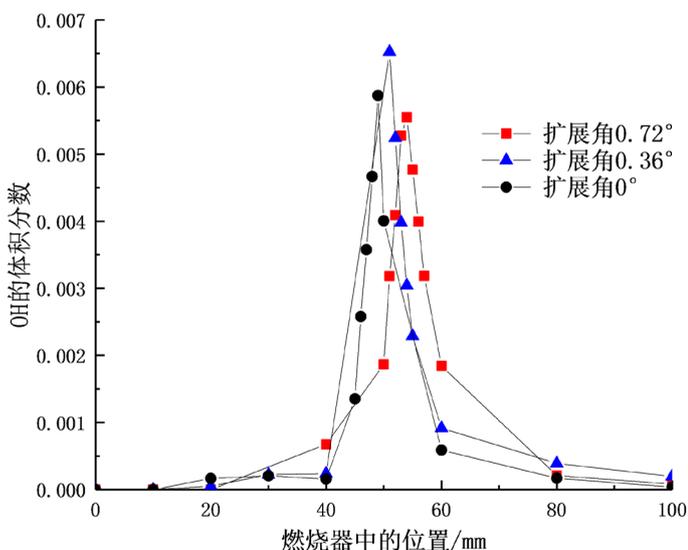
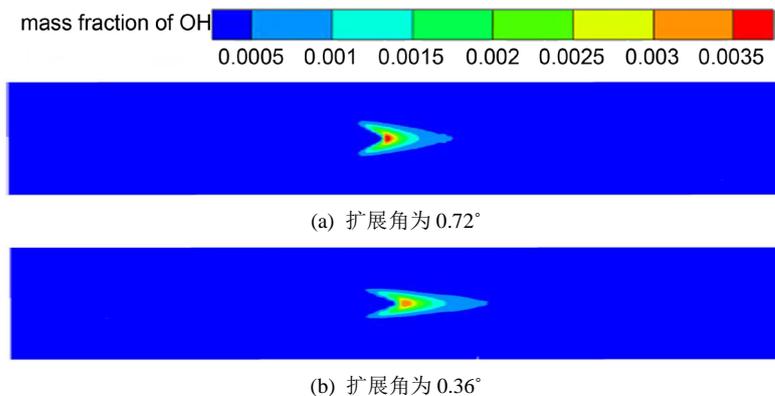


Figure 14. OH concentration distribution in burners with different spreading angles
图 14. 不同扩展角的燃烧器中 OH 浓度分布



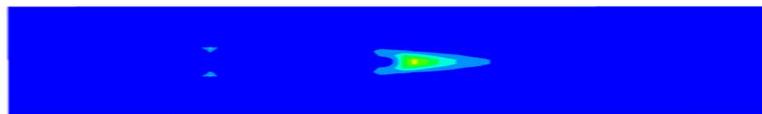
(c) 扩展角为 0°

Figure 15. Cloud chart of OH concentration distribution in burners with different spreading angles
图 15. 不同扩展角的燃烧器中 OH 浓度分布云图

3.4. 扩展角对燃烧器的火焰位置的影响

氢气体积分数 10% 的预混气在三种燃烧器中不同入口速度下的火焰位置如图 16 所示。从图中可以看出，在同一入口速度下，渐扩通道对预混气的火焰位置影响不大，这在前面的图 8 中更明显地看出，渐扩通道只是使火焰的伸展空间变大，火焰传播速度变小，但是燃烧位置基本不变，这表明渐扩式燃烧器对氢气的预混燃烧是有利的。渐扩式燃烧器在入口速度较大时，燃烧器的火焰位置先是逐渐向下游方向移动然后向上游移动，火焰的稳燃位置在 11 m/s 时突然的变化是由火焰位置靠近燃烧器出口造成的；从入口速度为 11 m/s 时开始，火焰的初始位置没有变化，但是逐渐增加的入口速度使燃烧的热量更多的被直接排出造成火焰的形状从狭长开始变得窄小，火焰中心逐渐向火焰的初始位置靠近，所以对应的火焰位置会逐渐减小，直到火焰熄灭。

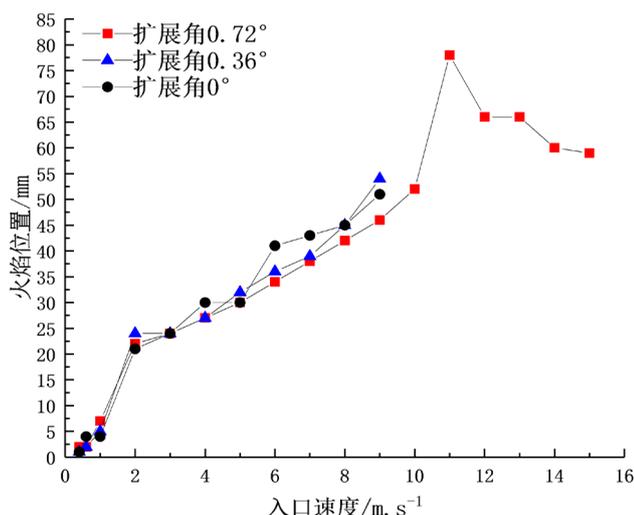


Figure 16. Flame position at different inlet velocities in burners with different expansion angles
图 16. 不同扩展角的燃烧器中不同入口速度下的火焰位置

4. 结论

基于建立的三维微型燃烧器模型和详细的氢气/空气的 19 步燃烧反应机理，对长度 100 mm，扩展角分别为 0° 、 0.36° 、 0.72° 的微型渐扩式燃烧器内氢气/空气的预混燃烧过程进行模拟研究。得出以下结论：

1) 扩展角为 0.72° 的燃烧器具有更大的速度极限和更低的贫燃极限。其中氢气体积分数为 10% 时，扩展角为 0.72° 的燃烧器的速度极限达到了 0.4~15 m/s；扩展角为 0.36° 和扩展角为 0° 的燃烧器的速度极限为 0.4~9 m/s。

2) 扩展角为 0° 的燃烧器在入口速度较高时表现出了更低的燃烧温度，更高的火焰传播速度；扩展角为 0.72° 的燃烧器在入口速度为 11 m/s 时火焰中心最靠近出口位置，这对燃烧器的燃烧不利。

3) 三种燃烧器在共有的速度极限范围内不同入口速度下的出口温度相同，不受燃烧器结构的影响。

参考文献

- [1] 张冬至, 胡国清. 微机电系统关键技术及其研究进展[J]. 压电与声光, 2010, 32(3): 513-520.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1004-2474.2010.03.051>
- [2] 邵霞, 潘剑锋, 唐爱坤, 胡松, 侯智勇. 微尺度催化燃烧表面反应对气相反应的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 391-396. <http://dx.chinadoi.cn/10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.053>
- [3] 刘子琨. 微尺度平板燃烧器中甲烷、二甲醚催化燃烧研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [4] Chen, G.B., Chen, C.P., Wu, C.Y. and Chao, Y.-C. (2007) Effects of Catalytic Walls on Hydrogen/Air Combustion Inside a Micro-Tube. *Applied Catalysis A: General*, **332**, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2007.08.011>
- [5] Zhong, B.J. and Wang, J.H. (2010) Experimental Study on Premixed CH₄/Air Mixture Combustion in Micro Swiss-Roll Combustors. *Combustion and Flame*, **157**, 2222-2229. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.07.014>
- [6] 李军伟, 钟北京, 王宁飞, 魏志军. 空气槽对微型双通道螺旋型过量焓燃烧器工作特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(2): 40-45.
- [7] 刘伟, 陈琪. Swiss-Roll 型微燃烧器的燃烧数值模拟[J]. 工业加热, 2013, 42(3): 27-28, 39.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1002-1639.2013.03.009>
- [8] Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Li, Z.W. and Xue, H. (2002) Combustion in Micro-Cylindrical Combustors with and without a Backward Facing Step. *Applied Thermal Engineering*, **22**, 1777-1787.
[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00113-8)
- [9] Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Li, Z.W. and Xue, H. (2005) Study of Catalytic Combustion and Its Effect on Microthermophotovoltaic Power Generators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **38**, 4252.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/23/018>
- [10] Yang, W.M., Chou, S.K., Shu, C., Li, Z.W., Xue, H., Li, D.T., et al. (2003) Microscale Combustion Research for Application to Micro Thermophotovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, **44**, 2625-2634.
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00024-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00024-4)
- [11] 邓尘, 杨卫娟, 王威, 周俊虎, 刘建忠, 岑可法. 微型缩放喷管中氢气/空气预混燃烧实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 34(2): 260-265. <http://dx.chinadoi.cn/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.02.007>
- [12] Giovangigli, V. and Smooke, M.D. (1987) Extinction of Strained Premixed Laminar Flames with Complex Chemistry. *Combustion Science and Technology*, **53**, 23-49. <https://doi.org/10.1080/00102208708947017>
- [13] Tang, A.K., Xu, Y.M., Shan, C.X., Pan, J.F. and Liu, Y.X. (2015) A Comparative Study on Combustion Characteristics of Methane, Propane and Hydrogen Fuels in a Micro-Combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**, 16587-16596. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.101>
- [14] Norton, D.G. and Vlachos, D.G. (2003) Combustion Characteristics and Flame Stability at the Microscale: A CFD Study of Premixed Methane/Air Mixtures. *Chemical Engineering Science*, **58**, 4871-4882.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2002.12.005>
- [15] Norton, D.G. and Vlachos, D.G. (2004) A CFD Study of Propane/Air Microflame Stability. *Combustion and Flame*, **138**, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.04.004>