

# 旋转流中预混合火焰高速传播现象 —II. 点火位置与燃烧过程

夏亮<sup>1,2</sup>, 赵黛青<sup>1</sup>, 山下博史<sup>3</sup>, 汪小慈<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 名古屋大学大学院工学研究科, 日本 名古屋 464-8603)

**摘要:** 在前期关于 Vortex-busting 旋流式预混燃烧器的燃烧效率及其进口混合气速度分布对燃烧效率的影响实验基础上, 围绕燃烧器的点火特性, 对旋流场中的点火位置和稳定火焰形成进行了数值分析. 结果表明, 不适当的点火位置会影响稳定火焰的形成, 在相同的燃烧工况下, 在流场中点火位置不同, 火焰的发展出现不同的趋势. 在靠近中心轴附近的低速区点火时, 火焰能够稳定; 在靠近管壁的高速区点火时, 撤离点火源后, 火焰吹熄. 本结果对于强化预混合燃烧的稳定性具有理论和工程指导意义.

**关键词:** 火焰稳定性; 旋流燃烧; 点火位置

**中图分类号:** TK16

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2007)03-0462-05

## 1 前言

无论从能源资源供给及运输, 还是对排放物的环境可承受容量, 大力发展替代能源以及拓展更多的燃料来源都极为重要. 在上述背景下, 高炉煤气、炼油伴生气、煤层气、生物质热解气化产物, 包括生活垃圾焚烧等等来源广泛的低热值燃料的利用越来越受到重视, 是企业节能降耗、降低生产成本的重要途径. 但这些燃料的热值低, 难以形成稳定的燃烧, 容易吹熄, 迫切需要开发有效的稳燃技术以及低热值燃气的燃烧设备. 目前, 解决低热值燃气的稳定燃烧的方法主要是与部分高热值燃料混烧, 如钢铁厂的高炉煤气和焦炉煤气或煤混烧<sup>[1]</sup>, 另一个途径是提高燃烧的预热温度, 改善低热值燃气的点火特性, 提高燃烧稳定性<sup>[2]</sup>.

已有的对涡管中预混合燃烧现象的实验和理论研究<sup>[3-16]</sup>表明, 在旋转流中, 预混合火焰传播速度随着旋转强度增大而增大. 从稳定燃烧的角度来看, 即说明当预混合气的喷出速度提高时, 通过增大混合气的旋转速度有可能使火焰稳定而不会吹熄, 为设计稳定可靠的低热值燃料燃烧器提供了一种新的思路, 它不同于钝体和旋流二次风利用回流区加强传热传质的稳燃方式.

前部分工作中研究了基于 Vortex-busting 现象构思的旋转式预混合燃烧器的燃烧效率, 探讨了进口混合气的速度分布对燃烧效率的影响, 发现具有沿半径方向递减的进口速度分布可以提高燃烧效率, 同时也发现由于旋转以及火焰热膨胀的双重作用, 燃烧场的流动特性复杂, 点火过程能否完成, 与点火位置、点火后火焰的形成与速度场变化是否匹配关系密切. 以往关于 Vortex-

busting 现象的研究多是针对无外加轴向速度的直涡管和涡环进行, 采用轴线处点火. Margolin 等<sup>[12]</sup>研究了非轴线处点火, 发现在静止直涡管的周围位置点火时, 火焰将首先向旋流轴线移动, 到达轴线之后, 火焰轴向方向的延伸速度将远远超过径向方向的发展速度. 在实际的旋流预混合燃烧器中, 进口预混合气体将以一定的轴向速度和旋转速度喷出, 因此, 本工作根据已把握的旋转流中预混合火焰特殊的燃烧场结构, 采用数值模拟的方法, 以强制涡作用下的旋流甲烷/空气预混合燃烧为对象, 考察了在流场的不同区域点火对燃烧稳定性的影响, 并探讨了其内在规律.

## 2 数值计算方法和解析对象

计算中采用与前文<sup>[17]</sup>相同的计算模型、边界条件和反应动力学模型及各物性参数<sup>[18,19]</sup>. 为了突出点火位置的影响, 选择 1 组燃烧工况: 旋转角速度  $\Omega=3000 \text{ s}^{-1}$ , 当量比  $\phi=0.5$ , 预混气进口速度  $V_{in}=22.55 \text{ m/s}$ , 在此条件下, 点火成功且火焰稳定后, 火焰的前锋驻定于坐标原点.

对 7 种点火位置的工况进行了计算, 即分别为(mm): (0, 0), (2, 0), (4, 0), (6, 0), (8, 0), (10, 0), (12, 0). 各点轴向高度相同、横坐标逐渐增大意味着它们离中心轴线的距离越来越大. 需要说明的是点火位置并不是 1 个点, 在程序中是指一块由 4 个网格点组成的区域. 计算中的点火方式为点火点温度  $T=2250 \text{ K}$ , 点火时间  $\tau=0.2 \text{ s}$ , 此后去掉强制高温源, 继续计算, 考察燃烧能否发展, 最终形成稳定的火焰. 解析对象和控制方程与文献[5]相同.

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 旋转流中预混合火焰的燃烧场特性

旋转流中的预混合火焰( $\phi=0.5, \Omega=3000 \text{ s}^{-1}, V_{in}=22.55 \text{ m/s}$ )如图 1 所示, 稳定后的火焰面呈 U 型, 下游火焰面几乎与轴线平行. 已燃区流场的特点是速度较小, 并有明显的回流. 未燃区流速大, 流线基本平行, 可看出未燃气主要通过该区域, 在靠近壁面附近流出燃

烧器. 根据此特点, 本工作把整个燃烧场分成 2 个区域, 即以已燃区为主的低速区和未燃部分组成的高速区. 为了方便地描述点火位置, 引入无量纲半径  $r_{\text{ignit}}^+$ :

$$r_{\text{ignit}}^+ = r_{\text{ignit}}/R_t, \tag{1}$$

式中  $r_{\text{ignit}}$  表示点火点的径向坐标,  $R_t$  是圆管半径.  $r_{\text{ignit}}^+$  在 0~1 之间取值, 大小反映点火点到中心轴的径向距离.

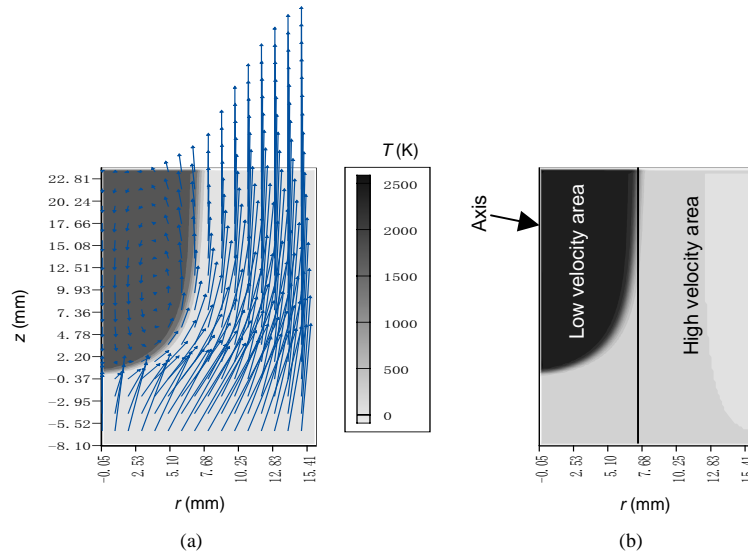


图 1 火焰和流场最终形态(a)和分区示意图(b)

Fig.1 Distributions of temperature (K) and velocity vector (m/s) of stable combustion (a) and partition of tube (b)

表 1 点火点位置及所在区域

Table 1 Ignition positions

$r_{\text{ignit}}$ (mm)	0	2	4	6	8	10	12
$r_{\text{ignit}}^+$	0	0.125	0.25	0.375	0.5	0.625	0.75
Position	Axis	Low velocity area	Low velocity area	Low velocity area	High velocity area	High velocity area	High velocity area
Flame stability (after ignition)	Stable immediately	Stable immediately	Stable after several seconds	Stable after several seconds	Blowing out	Blowing out	Blowing out

#### 3.2 点火位置与火焰形成特性

在  $\phi=0.5, \Omega=3000 \text{ s}^{-1}, V_{in}=22.55 \text{ m/s}$  的条件下, 考察了点火位置对火焰形成的影响. 点火位置的设置如表 1 所示, 点火时间维持 0.2 s 后去掉高温点火源, 考察火焰的发展情况, 发现火焰的形成与点火位置密切相关, 并且最终影响燃烧的稳定性.

##### 3.2.1 在中心轴上点火时的燃烧过程

图 2 表示在中心轴上的点火过程( $\tau < 2 \text{ s}$ ). 在中心轴上点火时, 点火初期的火焰细长, 随着时间增加, 火焰径向扩展, 但并没有这样简单地继续发展下去. 因为此时燃烧的热膨胀作用使火焰根部(点火处)右侧的未燃气向壁面处流动. 而在更下游处, 由于热膨胀的效应减弱, 壁面高压的作用使预混气向左偏转, 火焰根部附近的流

场在这 2 种偏转力的作用下产生了回流区, 正好提供了稳定的燃烧源. 周围预混气被引燃又使火焰扩张, 回流区亦随之扩大, 直至最后火焰完全发展. 需要指出的是以上都处在点火期间. 去掉点火后, 火焰的形态和尺寸都没有明显变化.

##### 3.2.2 低速区内点火的燃烧过程

在低速区内点火时, 点火初期火焰扩展且产生回流区, 但回流区的大小和成因与离轴线的距离有关. 如果点火位置靠轴线较近, 如  $r_{\text{ignit}}^+=0.125$  时, 产生的回流区在已燃区内, 成因和  $r_{\text{ignit}}^+=0$  时相同. 但此回流区比图 2 的小, 且只在下游出口附近产生. 这是由于在点火源左侧存在冷预混气, 使火焰不可能像在中心轴上点火那样发展得快.

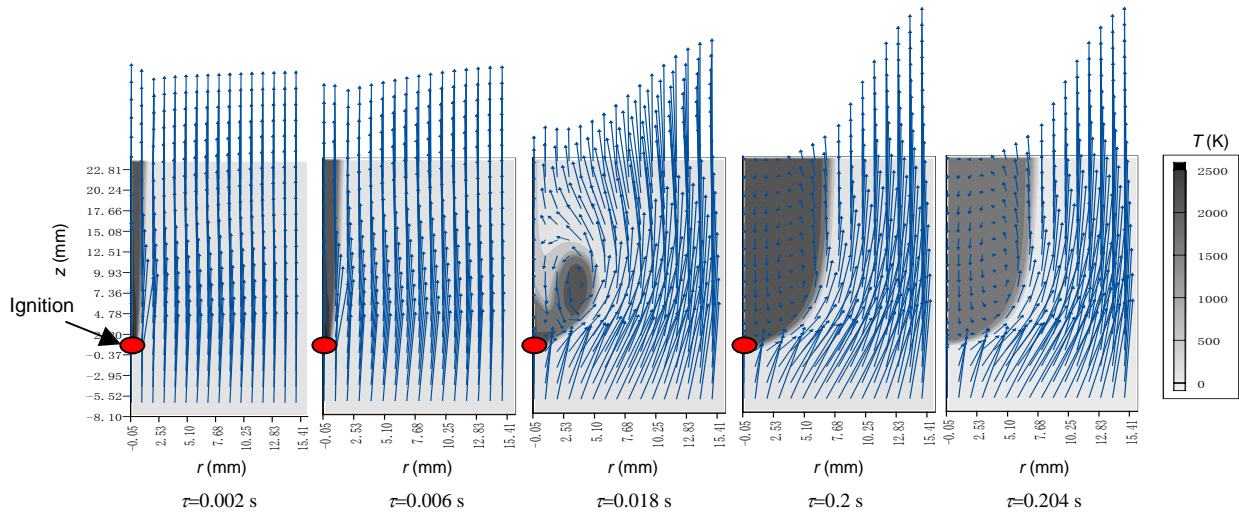


图2 中心轴点火时的燃烧过程中温度和速度矢量分布

Fig.2 Distributions of temperature (K) and velocity vector (m/s) during combustion process when igniting on axis

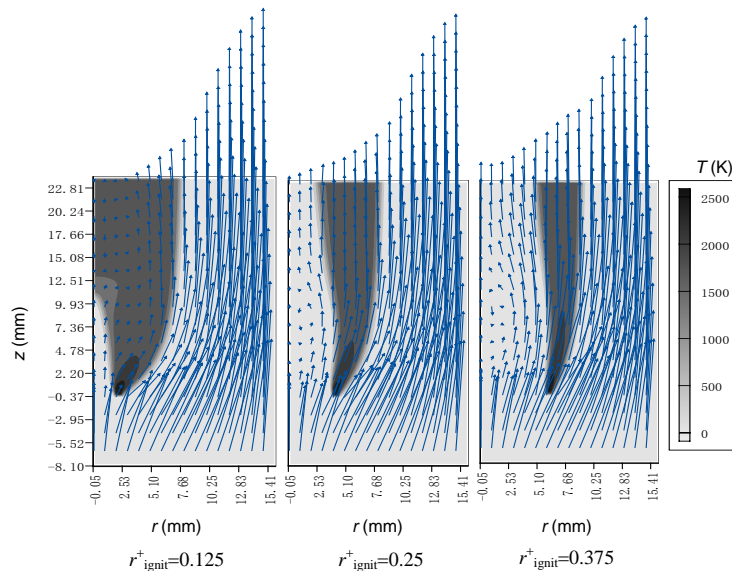


图3 低速区内不同位置处点火 0.2 s 后的火焰温度和速度矢量分布

Fig.3 Distributions of temperature (K) and velocity vector (m/s) at  $\tau=0.2$  s as igniting in low velocity area with different  $r_{\text{ignit}}^+$ 

当点火源离轴线更远, 如  $r_{\text{ignit}}^+=0.25, 0.375$  时, 火焰左侧存在足够多的冷预混气. 在流线偏转效应下, 会在靠近轴线且与火焰根部等高的区域产生一个很小的回流区, 此回流区远离已燃区域, 难以成为稳燃源. 图3表示  $r_{\text{ignit}}^+=0.125, 0.25, 0.375$  点火 0.2 s 时燃烧场的速度和温度分布. 如图所示, 越靠右侧的预混气速度越大, 火焰两旁的高速冷预混气难以燃烧, 燃烧区就会变窄. 过小的回流区使火焰在点火过程结束后尚未充分发展, 在去掉点火源后, 还需一定的时间火焰才能达到稳定状态.

$r_{\text{ignit}}^+=0.125$  时, 点火过程中在靠近轴线出口的下游出现了一个回流区. 去掉点火后, 回流区继续扩大, 向上游扩展. 由于回流区处在已燃区, 因此它可作为高温、

低速的稳定热源.  $r_{\text{ignit}}^+=0.25, 0.375$  时, 点火阶段出现的回流区小且不在已燃区, 去掉点火后, 火焰被吹至下游. 但点火源左侧的冷预混气向壁面流动, 所以回流先缩小, 在移动的过程中, 火焰径向扩展, 使得流线在高温膨胀效应的作用而偏转更加剧烈. 因此回流区又开始逐渐增大并移动到火焰头部, 促进了高温燃气回流对未燃气的预热, 保证了火焰发展直至最终稳定. 图4表示在  $\tau=0.204$  s 时上述3种点火位置条件下的温度场和流场.

### 3.3 高速区内点火的燃烧过程

当在高速区点火时, 火焰不能稳定. 原因是在去掉点火源之后回流区虽然也有扩展, 但是由于距离火焰区域太远而不能起到稳定火焰的作用, 火焰最终被吹熄. 图5给出了  $r_{\text{ignit}}^+=0.5$  时的火焰发展情况.

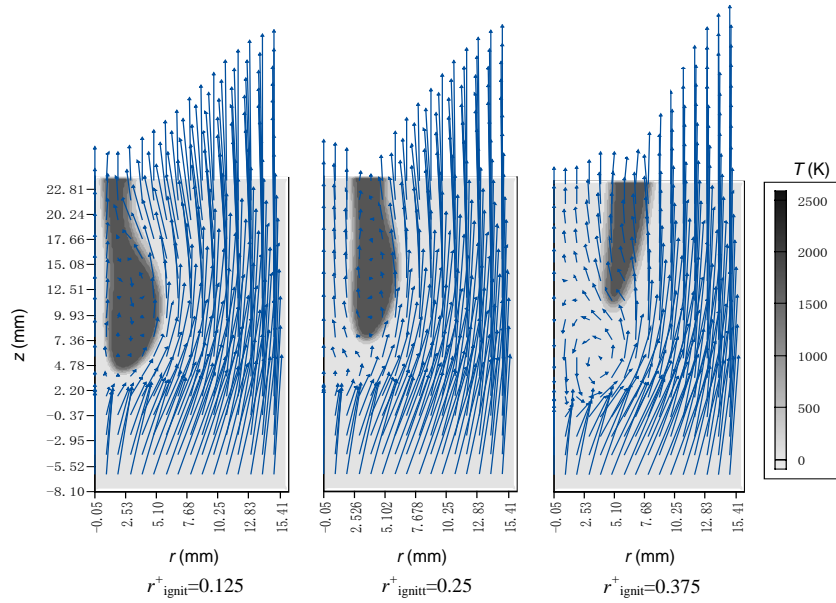


图 4 低速区内不同位置后点火 0.204 s 后的火焰温度和速度矢量分布  
 Fig.4 Distributions of temperature (K) and velocity vector (m/s) at  $\tau=0.204$  s as igniting in low velocity area

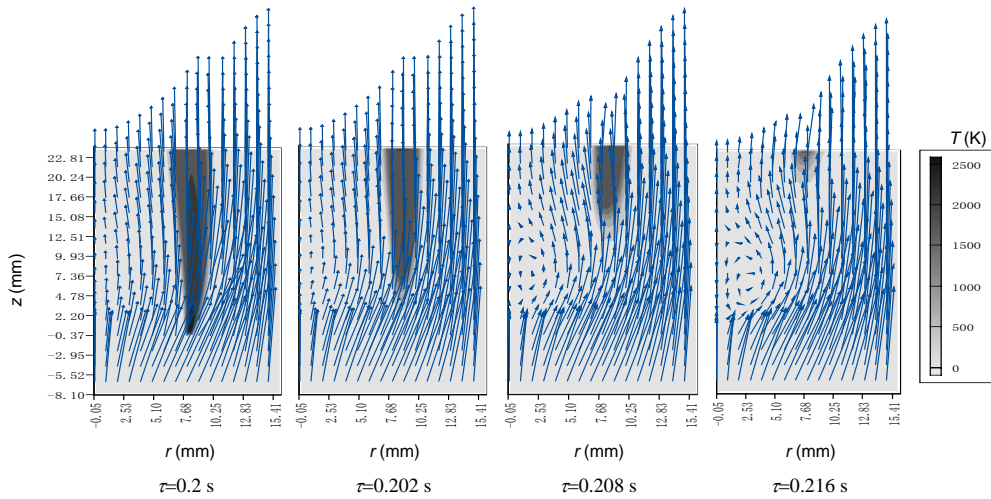


图 5 高速区内在  $r_{ignite}^+=0.5$  点火时的火焰温度和速度矢量分布  
 Fig.5 Distributions of temperature (K) and velocity vector (m/s) during combustion process as  $r_{ignite}^+=0.5$

### 4 结论

在研究圆管内旋流甲烷/空气预混合燃烧过程中，点火位置是影响火焰稳定形成的重要因素。本工作在相同的点火条件下，通过数值模拟考察了在流场的不同区域点火对燃烧稳定性的影响，并探讨了火焰的形成规律，为今后的燃烧器设计和实验研究提供了理论指导。

(1) 在中心轴和低速区点火时，最终可形成稳定的火焰。在中心轴点火时，已燃区域有较强的回流，它的不断扩展使燃烧区域扩大，起到了稳燃作用。在低速区内点火时，初期产生的回流强度并不像中心轴点火时那样大，但在火源去掉后，回流区对高温已燃烟气的卷吸

使部分火焰进入回流区并发展，最终也能使火焰稳定。

(2) 当点火位置处在高速区时，虽然也产生了较小的回流区，但由于回流区的扩展以及热量向燃烧区内供给的速度太低，点燃的火焰被高速的未燃气流吹向下游，最终被吹熄而不能形成稳定燃烧。

(3) 对于旋转流中预混合火焰的形成，为了保证点火的有效和可靠，点火位置应该尽可能选择在中心轴上或其附近，避免选择 1/2 半径以外的区域点火，可以保证点火成功。

#### 参考文献：

[1] 宋光荣, 韩宾. 掺烧高、焦炉煤气锅炉设计体会 [J]. 锅炉技术, 2004, 35(2): 21-24.

- [2] 李元廷, 张森. 高炉煤气独立燃烧节能技术的开发与应用 [J]. 节能技术, 2001, 19(5): 34–35.
- [3] Moore N, Martin D. Flame Propagation in Vortex Flow [J]. Fuel, 1953, 32: 393–394.
- [4] McCormack P, Scheller K, Mueller G, et al. Flame Propagation in a Vortex Core [J]. Combust. Flame, 1972, 19(2): 1665–1673.
- [5] Ishizuka S. On the Flame Propagation in a Rotating Flow Field [J]. Combust. Flame, 1990, 82(2): 176–190.
- [6] Ishizuka S, Hirano T. 回転予混合気流中を伝播する火炎の空気力学的構造 [J]. 燃焼の科学と技術, 1994, 2: 15–26.
- [7] Ishizuka S, Michikami T, Takashi H, et al. Flame Speeds in Combustible Vortex Rings [J]. Combust. Flame, 1998, 113(4): 542–553.
- [8] Hasegawa T, Michikami S, Nomura T, et al. Flame Development along a Straight Vortex [J]. Combust. Flame, 2002, 129(3): 294–304.
- [9] Hasegawa T, Nishikado K, Chomiak J. Flame Propagation along a Fine Vortex Tube [J]. Combust. Sci. Technol., 1995, 108: 67–80.
- [10] Asato K, Takeuchi Y, Kawamura T. Fluid Dynamics Effects of Flame Propagation in a Vortex Ring [A]. Proceedings of the Eleventh Australasian Fluid Mechanics Conference [C]. Hobart: University of Tasmania, 1992. 167–170.
- [11] Chomiak J. Dissipation Fluctuation and Structure and Propagation of Turbulent Flames in Premixed Gases at High Reynolds Numbers [J]. Proc. Combustion Inst., 1977, 16: 1665–1673.
- [12] Margolin A, Karpov V. Flame Propagation in an Eddy Combustion Chamber [A]. Newman P. International Stratified Charge Engine Conference [C]. Warrendale, Pa. USA: Society of Automotive Engineers, 1974. 11–22.
- [13] Ashurst W. Flame Propagation along a Vortex: The Baroclinic Push [J]. Combust. Sci. Technol., 1996, 112: 175–185.
- [14] Umemura U, Tomita K. Theoretical Study on a Flame Propagation at High Speed within a Vortex Tube Filled with Flammable Gas Mixture [J]. Trans. JSME, 1999, 65: 3177–3794.
- [15] Zhao D, Yamashita H. A Numerical Study on Premixed Flame Propagation in a Swirling Flow [J]. Collect. Mech. Inst. Japan (B), 2001, 67(662): 2001–2010.
- [16] Nagai H, Zhao D, Yamashita H. A Numerical Study on Effects of Density Ratio and Laminar Burning Velocity on Premixed Flame Propagation in Swirling Flow [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (B), 2005, 71(709): 2339–2345.
- [17] 赵黛青, 夏亮, 山下博史. 旋转流中预混合火焰高速传播现象—I. 稳燃特性以及燃烧效率的提高 [J]. 过程工程学报, 2007, 7(3): 457–461.
- [18] Coffee T P, Kotlar A J, Miller M S. The Overall Reaction Concept in Premixed, Laminar, Steady-state Flame—I. Stoichiometries [J]. Combust. Flame, 1983, 54(2): 155–169.
- [19] Smooke M. Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane–Air Flames [M]. Berlin: Springer Verlag, 1991. 1–28.

## High Speed Propagation of Premixed Flame in Swirling Flow —II. Ignition Position and Process of Combustion

XIA Liang<sup>1,2</sup>, ZHAO Dai-qing<sup>1</sup>, Yamashita Hiroshi<sup>3</sup>, WANG Xiao-han<sup>1,2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, CAS, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Mechanical Engineering, Nagoya University, Nagoya 464-8603, Japan)

**Abstract:** The previous research of vortex-bursting shows that in the swirling condition, premixed methane–air combustion can be stable in the high inlet velocity gas. Based on the investigation of both the combustion efficiency of swirling premixed combustor and the effect of distribution of inlet velocity on enhancement of combustion efficiency in the previous paper, the numerical research of ignition position effect on the flame stability is carried on in this work. It is found that inappropriate ignition position can affect the process of flame evolution. Under the same condition, development of combustion will evolve in different trends if the flame is ignited at different positions in the flow field. A non-dimensional parameter is put forward for describing the ignition position. When ignition position is located on the axis and low velocity area of tube, the resulting flame will be stable. Instead, when ignition position is in high velocity area, the flame is finally blown out. In this work, the useful theoretical and applicable results for enhancing stability of premixed combustion are achieved.

**Key words:** flame stability; swirling combustion; ignition position