DOI：10.7652/xjtuxb201605017

气流入口条件对低旋流燃烧火焰稳定性的影响

陈立，李祥晟，杨诏，卢炼
（西安交通大学能源与动力工程学院，710049，西安）

摘要：为了研究低旋流燃烧器在喷嘴出口气流平均速度为10.12～19.12 m/s、入口温度为300～500 K、入口压力为101.325～8×101.325 kPa条件下的火焰稳定性，对当量比为0.7的甲烷空气预混气体进行了数值模拟，分析了低旋流燃烧器的流场结构及火焰特性，揭示了燃烧稳定的根本原因。结果表明：低旋流燃烧器流场结构受气流入口条件的影响较小，且能够保持自相似特性；轴向和径向速度延伸率以及虚拟原点的位置基本不受气流入口条件的影响；低旋流燃烧器流场随喷嘴出口气流平均速度、入口压力的增加，回火的可能性减小，随入口温度的提高，回火的可能性增大。综合而言，低旋流燃烧器能够在较宽气流入口条件下保持火焰锋面稳定，有利于燃烧器的稳定工作。

关键词：低旋流燃烧；自相似特性；火焰锋面；回火
中图分类号：TK47 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2016)05-0114-06

Effects of Inlet Conditions on Low Swirl Combustion Flame Stability

CHEN Li, LI Xiangsheng, YANG Zhao, LU Lian
(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A numerical simulation of premixed methane-air gas at equivalence ratio 0.7 was conducted to investigate the flame stability of the low swirl combustion under the conditions of different bulk velocity from 10.12 m/s to 40.00 m/s, inlet temperature from 300 K to 500 K and inlet pressure from 101.325 kPa to 8×101.325 kPa. Mechanism of the combustion stability was revealed by analysis of flow field structure and flame characteristics of the low swirl injector. The results show that the bulk velocity, inlet temperature and inlet pressure exert small influences on the flow field structure, so the self-similar characteristics of the low swirl combustion remain. The mean axial aerodynamic stretch rate, the mean radial aerodynamic stretch rate and the virtual origin are almost not affected by the inlet conditions, which facilitates protecting the stability of flame front. The possibility of backfiring reduces with the increasing bulk velocity or the inlet pressure, while the possibility of backfiring increases with the increasing inlet temperature. The flame front of low swirl combustion retains its stability under wider inlet conditions.

Keywords: low swirl combustion; self-similar characteristics; flame front; backfire

目前，燃气轮机普遍采用干式低排放燃烧技术来降低NO_x排放。作为一种新型的低排放燃烧技术，低旋流燃烧技术(LSC)具有燃烧稳定、NO_x排放极低、不易回火及吹熄等[1]特点，应用前景广阔。

Chan等最早提出低旋流燃烧的概念，并利用切向射流产生低旋流，从而稳定湍流预混火焰[2]。

收稿日期：2015-12-08. 作者简介：陈立(1992—)，男，硕士生；李祥晟(通信作者)，男，讲师.
网络出版时间：2016-03-01 网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160301.1015.004.html

Johnson 等通过实验对比了高、低旋流燃烧的流场结构及 NO_x 排放，发现低旋流燃烧流场不存在强烈的回流区，同时指出在保持 CO 排放基本不变的前提下，低旋流燃烧的 NO_x 排放比高旋流燃烧降低大约 60%[3]。Cheng 等通过实验研究了常温、常压下低旋流燃烧的流场结构，发现在不同速度下流场保持自相似特性，火焰锋面不会随速度的变化而发生较大移动[4]。Littlejohn 等通过实验研究了常温、常压下低旋流燃烧的燃料适应性，发现低旋流燃烧器无需进行较大改变即可适用于多种烷烃燃料[5]。Cheng 等研究了常温、常压下燃烧室几何结构对低旋流燃烧流场结构及火焰特性的影响，发现燃烧室直径对中心回流区的大小及强度影响较大[6]。Neumayer 采用涡耗散概念(EDC)模型和预混燃烧模型对低旋流燃烧进行了数值模拟，发现采用预混燃烧模型的模拟结果与实验更加吻合[7]。

国内学者在低旋流燃烧方面也展开了相应研究。尹航等研究了不同安装角下低旋流燃烧器的吹脱极限，发现在旋流器安装角较大时，燃烧器稳定火焰的能力受当量比的影响较大[8]。柳伟杰等研究了当量比对 LSC 流场及火焰特性的影响，发现在富燃条件下，随当量比增加，火焰托举高度逐渐增大[9]。

由目前已有的研究文献可以看出，大多数关于 LSC 的实验研究和数值模拟都建立在常温、常压的基础上，高温、高压下 LSC 的流场结构及火焰稳定性仍不清楚。工业燃机燃烧室一般工作在高温、高压环境，因此亟需开展相应条件下低旋流燃烧的火焰特性及其稳定性的研究。基于此，本文采用数值模拟方法，在考虑了不同入口速度、温度、压力对 LSC 的流场结构、自相似特性影响的情况下，分析了 LSC 的火焰特性，研究了 LSC 的回火性及火焰稳定性，揭示了 LSC 燃烧稳定的根本原因，以期为理解 LSC 在高温、高压环境下的燃烧特性及其在燃机燃烧室中的进一步应用奠定基础。

1　燃烧器数值模拟

1.1　低旋流喷嘴

以美国劳伦斯伯克利国家实验室 Cheng 采用的低旋流喷嘴[4]为参考，构建同尺寸几何模型，如图 1 所示。低旋流喷嘴由中心通道及旋流器组成，在中心通道下方安装一多孔挡板。中心通道半径 R_c = 20 mm，喷嘴出口半径 R_s = 31.7 mm，旋流器叶片安装角 α = 42°，旋流器长度 L_s = 28 mm，中心通道长度 L_c = 48 mm，气流混合通道长度 L_i = 95 mm，喷嘴出口保持 45°倾角。预混气流通过低旋流喷嘴，一部分由旋流通道产生高速旋流，另一部分直接通过中心通道，二股气流经混合通道相互作用后进入半径为 100 mm、高度为 450 mm 的圆柱形燃烧室。

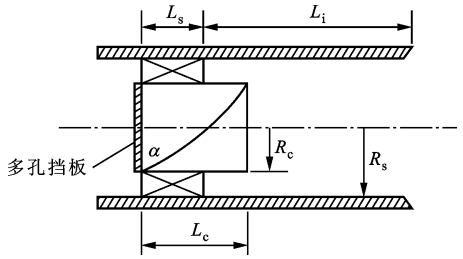


图 1　低旋流喷嘴几何模型

气流的旋流强度采用旋流数 S[1]来表示，即

$$S=\frac{2}{3}\tan\alpha\frac{1-R^3}{1-R^2+[m^2(1/R^2-1)^2]R^2} \quad (1)$$

式中：R 为 R_c 与 R_s 之比；m 为通过中心通道的质量流量 m_c 与通过旋流通道的质量流量 m_s 之比。通过计算得到该旋流器的旋流数 S=0.58.

1.2　网格划分及边界条件

本文采用商业软件 Fluent 对当量比为 0.7 的甲烷空气预混气体进行数值计算，共考虑了 3 组冷态工况和 7 组热态工况，具体条件见表 1，其中 $U_0=Q/A$ 为喷嘴出口气流平均速度，Q 为通过喷嘴的体积流量，A 为喷嘴出口截面积。湍流模型采用(Realizable) k-ε 模型，近壁面处采用标准壁面函数法求解，组分模型采用部分预混燃烧模型，燃烧机理采用甲烷 22 组分简化机理[10]。

表 1　甲烷空气预混气体计算工况

工况	P_0/kPa	T_0/K	U_0/m·s^{-1}
流动 1	101.325	300	10.12
流动 2	101.325	300	15.11
流动 3	101.325	300	19.12
火焰 1	101.325	300	10.12
火焰 2	101.325	300	15.88
火焰 3	101.325	300	19.12
火焰 4	101.325	400	19.12
火焰 5	101.325	500	19.12
火焰 6	4×101.325	500	19.12
火焰 7	8×101.325	500	19.12

采用文献[11]方法设置了入口边界条件。低旋流喷嘴的入口边界均设为质量流量入口，出口边界设为压力出口。计算时采用结构化网格，如图 2 所示，经网格无关性验证，最终确定网格数为 120 万。

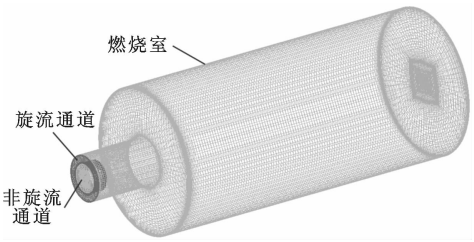
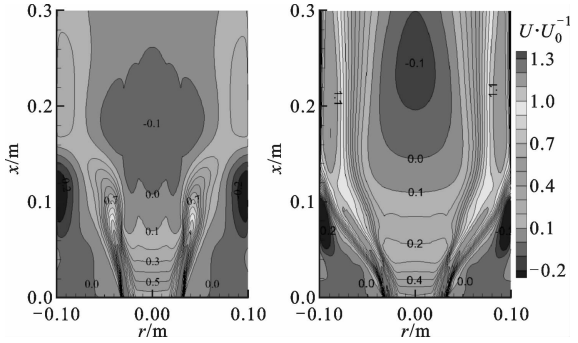


图 2 低旋流喷嘴和燃烧室整体计算网格

2 结果分析

2.1 LSC 流场结构

图 3 给出了流动 3 和火焰 3 在中心平面上的相对轴向速度 U/U_0 分布云图。可以看到:通过中心通道的气流无旋流产生,在喷嘴出口形成平整的低速区;通过旋流通道的气流产生高速旋流运动,并在喷嘴出口开始扩张,形成高速剪切区。



(a)冷态,流动 3 (b)热态,火焰 3

图 3 中心平面相对轴向速度分布云图

随着轴向距离的增加,U/U_0 逐渐减小至 0,在远离喷嘴出口的下游回流开始产生,冷态和热态中对应的位置分别为 $x=110$ mm 和 $x=150$ mm。在剪切区的外侧,高速旋流卷吸其周围的气流,在靠近燃烧室壁面附近形成角回流区。与冷态相比,热态气流扩张角更大,中心回流区靠后,角回流区靠前。

2.2 U_0、T_0、P_0 对 LSC 流场自相似特性的影响

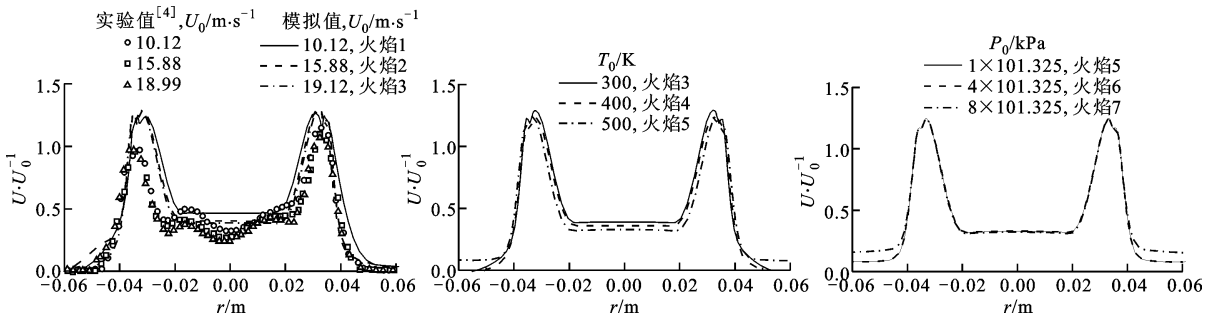
2.2.1 径向分布 图 4 给出了 $x=20$ mm 平面上在不同气流入口条件下 U/U_0 的径向分布。由图 4a 可以看到,在不同 U_0 条件下,U/U_0 曲线几乎重合,体现了 LSC 流场的自相似特性。在 ±34 mm 处,曲线出现波峰,轴向速度达到最大,与旋流通道出口的高速剪切区对应。在 $-20\ \text{mm}<r<20\ \text{mm}$ 范围内,曲线分布平整,随 U_0 的增加,曲线逐渐下移,与中心通道出口的平整低速区对应。在燃烧室壁面附近,U/U_0 逐渐减小至 0。整体而言,模拟值与实验值吻合较好,U/U_0 曲线在波峰处的模拟值较实验值略微偏大,这主要是旋流器的省略使得通过旋流通道的气流阻力减小,从而导致通过旋流通道的气流轴向速度 U 在数值上偏大。在图 4b、4c 中,U/U_0 曲线几乎重合,在不同 T_0、P_0 条件下,U/U_0 波峰位置及其极值几乎不变,唯一不同的是,中间平整曲线段随 T_0 的增加逐渐下移,而随 P_0 的增加基本不变,这表明 P_0 较 T_0 对 LSC 流场的影响更小。

图 5 给出了 $x=20$ mm 平面上在不同气流入口条件下相对径向速度 V/U_0 的径向分布图。由图 5a 可以看到,在 ±34 mm 处,曲线出现波峰,由于旋流器的省略,V/U_0 曲线在波峰处的模拟值较实验值略微偏大。在 $-20\ \text{mm}<r<20\ \text{mm}$ 范围内,V/U_0 呈线性变化,曲线斜率即为径向速度延伸率 a_r,其数值约为 0.006 36 mm^{-1},略小于实验值0.008 81 mm^{-1}。在燃烧室壁面附近,模拟值与实验值不太吻合,但仍表现出逐渐减小至 0 的趋势,整体而言,模拟值与实验值吻合较好。在图 5b、5c 中,V/U_0 的波峰位置和极值大小基本不随 T_0、P_0 发生变化。

2.2.2 轴向分布 在分析轴向速度分布时常引入虚拟原点 x_0[4] 作为坐标原点,其定义如图 6 所示。

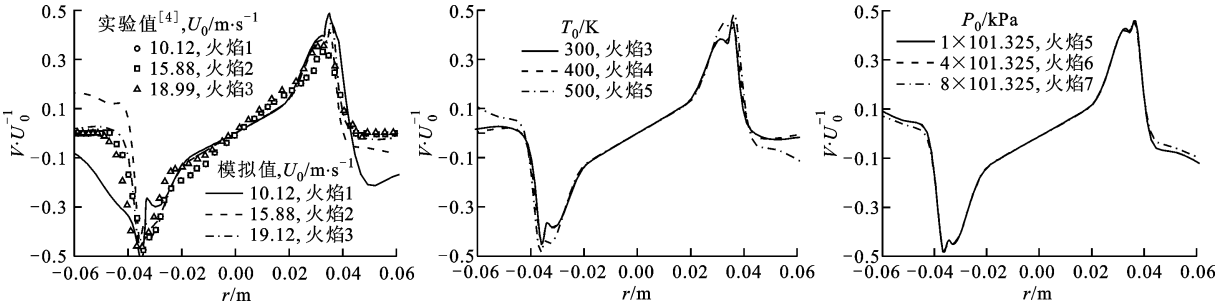
根据喷嘴出口附近相对轴向速度线性段的斜率反推可得 x_0 的位置,而 U/U_0 曲线在喷嘴出口线性段的斜率即为轴向速度延伸率 a_x。

图 7 给出了中心轴线上不同气流入口条件下相对轴向速度的轴向分布图。从图 7a 中可以看到,在



(a)不同 U_0 条件下 (b)不同 T_0 条件下 (c)不同 P_0 条件下

图 4 相对轴向速度的径向分布



(a)不同 U_0 条件下　　(b)不同 T_0 条件下　　(c)不同 P_0 条件下

图 5　相对径向速度的径向分布

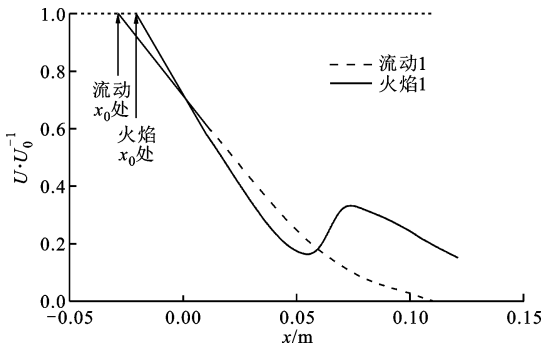
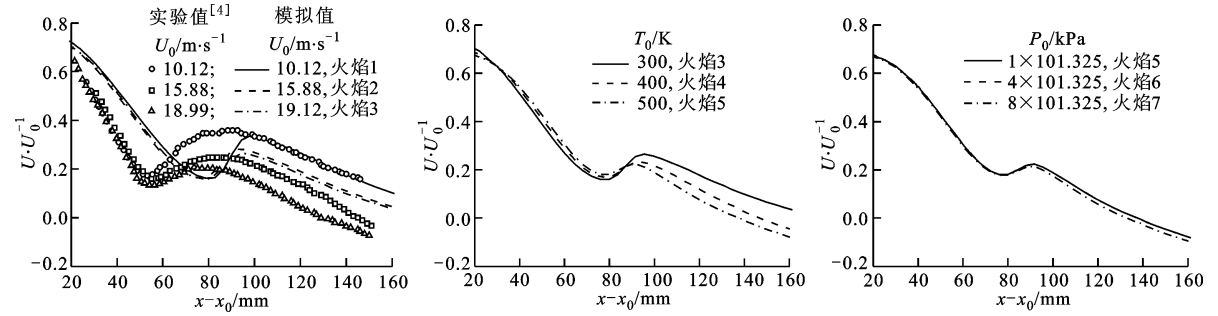


图 6　虚拟原点 x_0 定义

20 mm$<x-x_0<$80 mm 范围内，随着轴向距离的增加，轴向速度在不同 U_0 条件下以相同的斜率逐渐减小，体现出自相似特性。$x-x_0=80$ mm 时，速度减到极小值，这个位置即为火焰锋面 x_f。在火焰锋面后，燃料释放出的大量热量对气流起到了加速作用，使得速度开始回升。$x-x_0=95$ mm 时，温度的下降及气流的继续扩张使得速度开始下降。在较远的下游出现回流区，回流区的位置随 U_0 的增加逐渐前移，同时中心回流区的位置远离火焰区域，说明 LSC 流场并不依靠中心回流区来稳定火焰，这与



(a)不同 U_0 条件下　　(b)不同 T_0 条件下　　(c)不同 P_0 条件下

图 7　相对轴向速度的轴向分布

传统的高旋流燃烧有着较大的差别。火焰锋面位置距喷嘴的模拟值较实验值更远，初步分析这是由于模拟中忽略了多孔挡板对入口气流的阻力作用，使得气流在喷嘴出口速度衰减减小，从而轴向速度延伸率 a_x 的模拟值偏小的缘故。从图 7b、7c 中可以看到，在不同的 T_0、P_0 条件下，随着轴向距离的增加，轴向速度均以相同的斜率逐渐减小，说明温度、压力对 LSC 流场的自相似特性几乎无影响，同时随 T_0、P_0 的增加，回流区的位置逐渐前移。

通过上面的分析可以看到，采用部分预混燃烧模型得到的数值模拟结果与实验值吻合较好，能够很好地反映 LSC 的流场结构，同时 U_0、T_0、P_0 对 LSC 流场径向和轴向的速度分布影响较小，且能够保持自相似特性，这就是稳定燃烧的内在原因。

2.3　U_0、T_0、P_0 对 LSC 火焰特性的影响

表 2 给出了 LSC 火焰的各项参数。由文献[12]可知，火焰锋面稳定在火焰传播速度等于气流速度的位置，即

$$U_0 - \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}(x_f - x_0) = S_T \tag{2}$$

表示在低旋流喷嘴出口，由于气流的扩张运动，使得轴向速度 U_0 逐渐减小，且在火焰锋面位置 x_f 处与火焰传播速度相等，达到火焰稳定。在分析火焰稳定性时，a_x 和 x_0 是 2 个非常重要的参数。a_x 为 LSC 流场中 U/U_0 曲线在喷嘴出口处的斜率，斜率越大，轴向速度下降得越快，当火焰传播速度等于气

流速度时，火焰锋面距离喷嘴出口越近，回火就越容易；斜率越小，火焰锋面距离喷嘴出口越远，回火就越不易。虚拟原点 x_0 的位置对应 LSC 流场中 U/U_0 曲线下降的起点，x_0 的位置距离喷嘴越远，火焰锋面位置距离喷嘴出口越近，回火就越容易；相反，火焰锋面位置距离喷嘴出口越远，回火就越不易。从表 2 中可以看到，a_x 及 a_r 的大小仅与冷、热态相关，与气流入口条件无关。相同条件下 a_x 约等于 a_r 的 2 倍，与文献[4]中的研究结果一致。虚拟原点 x_0 的位置随 U_0、T_0 的增加而逐渐远离喷嘴，但移动程度较小，随 P_0 的增加几乎不变，说明虚拟原点 x_0 受气流入口条件的影响较小。

表 2 LSC 火焰各项参数

工况	U_0/ m·s^{-1}	T_0/ K	P_0/ kPa	x_f/ mm	x_0/ mm	a_x/ mm^{-1}	a_r/ mm^{-1}	x_f-x_0/ mm	S_L/ m·s^{-1}	S_T/ m·s^{-1}
流动 1	10.12	300	101.325		−29.00	−0.009 4	0.004 81			
流动 2	15.11	300	101.325		−34.00	−0.009 3	0.004 81			
流动 3	19.12	300	101.325		−36.00	−0.009 2	0.004 81			
火焰 1	10.12	300	101.325	53.7	−20.45	−0.011 3	0.006 36	74.15	0.172 3	1.67
火焰 2	15.88	300	101.325	50.1	−24.07	−0.011 3	0.006 36	74.17	0.172 3	2.57
火焰 3	19.12	300	101.325	49.8	−24.58	−0.011 3	0.006 36	74.38	0.172 3	3.05
火焰 4	19.12	400	101.325	45.9	−27.65	−0.011 3	0.006 23	73.55	0.314 2	3.23
火焰 5	19.12	500	101.325	38.1	−34.43	−0.011 3	0.006 15	72.53	0.526 5	3.47
火焰 6	19.12	500	4×101.325	38.1	−34.49	−0.011 3	0.006 16	72.59	0.246 1	3.45
火焰 7	19.12	500	8×101.325	38.1	−34.66	−0.011 3	0.006 14	72.76	0.162 0	3.40

注：S_T 为湍流火焰速度；S_L 为层流火焰速度。

在分析了 U_0、T_0、P_0 对 a_x、a_r、x_0 的影响后，本文进一步研究了气流入口条件对火焰回火及火焰锋面位置的影响。当 $x_f-x_0=0$ 时，燃烧室发生回火，x_f-x_0 就是火焰锋面相对虚拟原点的位置，因此 U_0、T_0、P_0 变化对 x_f-x_0 的影响至关重要。在 LSC 流场中，湍流火焰速度 S_T 与层流火焰速度 S_L、湍流脉动速度 u' 之间存在如下关系

$$S_T = S_L + ku' \tag{3}$$

对于甲烷燃料，$k=2.16$[4]。由式(2)、(3)可得

$$1-\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}\frac{(x_f-x_0)}{U_0}=\frac{S_T}{U_0}=\frac{S_L}{U_0}+\frac{2.16u'}{U_0} \tag{4}$$

对于式(4)左侧，$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}x}\frac{1}{U_0}$ 即为轴向速度延伸率 a_x，由表 2 可知，其值在热态时保持为 −0.011 3 mm^{-1}。对于式(4)右侧第一项，S_L 随 T_0 的增加而增加，随 P_0 的增加而减小，对 U_0 的变化不敏感。由湍流基本理论可知，湍流脉动速度 u' 与 U_0 呈线性关系[4]，则式(4)右侧第二项基本保持不变。由此可以推知，随 U_0、P_0 的增加 x_f-x_0 逐渐增加，随 T_0 的增加 x_f-x_0 逐渐减小，这与表 2 中的结果是一致的。进而可以得出：随 U_0、P_0 的增加回火的可能性减小，随 T_0 的增加回火的可能性增大。

表 2 中 S_L 的范围约为 0.15～0.55 m/s，与 U_0 相比小 1 到 2 个数量级。由此可以推知：随 U_0、P_0 的增加 S_L/U_0 的减小量较小，x_f-x_0 的增量较小；随 T_0 的增加 S_L/U_0 的增量较小，x_f-x_0 的减小量较小。该结果与表 2 中的结果也是一致的，由此可得，LSC 在 $U_0=10.12$～19.12 m/s、$T_0=300$～500 K、$P_0=101.325$～8×101.325 kPa 条件下，x_f-x_0 变化不大，火焰锋面可以保持稳定，这也是 LSC 流场能够稳定燃烧的根本原因。

3 结 论

本文采用数值模拟方法研究了不同 U_0、T_0 及 P_0 对低旋流燃烧火焰稳定性的影响，分析了低旋流燃烧的流场结构及火焰特性，得出的主要结论如下。

(1)U_0、T_0、P_0 对 LSC 流场轴向和径向速度分布影响较小，且能保持自相似特性。

(2)a_x、a_r 及 x_0 几乎不受气流入口条件的影响。

(3)LSC 流场随 U_0、P_0 的增加回火的可能性减小，随 T_0 的增加回火的可能性增大。

(4)低旋流燃烧器在 $U_0=10.12$～19.12 m/s、$T_0=300$～500 K、$P_0=101.325$～8×101.325 kPa 条件下，火焰锋面可以保持稳定，有利于燃烧器的稳定工作。

参考文献：

[1] CHENG R K, FABLE S A, SCHMIDT D, et al. De-

velopment of a low swirl injector concept for gas turbines [C]// Proceedings of 2001 International Joint Power Conference. New York, USA: ASME, 2001: 95-101.

[2] CHAN C K, LAU K S, CHIN W K, et al. Freely propagating open premixed turbulent flames stabilized by swirl [C]// International Symposium on Combustion. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Inc., 1992: 511-518.

[3] JOHNSON M R, LITTLEJOHN D, NAZEER W A, et al. A comparison of the flowfields and emissions of high-swirl injectors and low-swirl injectors for lean premixed gas turbines [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2): 2867-2874

[4] CHENG R K, LITTLEJOHN D, NAZEER W A, et al. Laboratory studies of the flow field characteristics of low-swirl injectors for adaptation to fuel-flexible turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2006, 130(2): 277-285.

[5] LITTLEJOHN D, CHENG R K. Fuel effects on a low-swirl injector for lean premixed gas turbines [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(6): 3155-3162.

[6] CHENG R K, LITTLEJOHN D. Effects of combustor geometry on the flowfields and flame properties of a low-swirl injector [C]// ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. New York, USA: ASME, 2008: 393-407.

[7] NEUMAYER M. RANS simulation of methane combustion in a low swirl burner [D]. München, Germany: Technische Universitaet München, 2013.

[8] 尹航，钟仕立，戴韧，等. 合成气低旋流燃烧器设计与流动结构的分析 [J]. 动力工程学报，2011，31(2)：131-136.
YIN Hang, ZHONG Shili, DAI Ren, et al. Design of low swirl syngas burner and analysis on the flow pattern [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(2): 131-136.

[9] 柳伟杰，葛冰，田寅申，等. 当量比对甲烷预混低旋流燃烧的影响 [J]. 燃烧科学与技术，2014(1)：65-69.
LIU Weijie, GE Bing, TIAN Yinshen, et al. Equivalence ratio effects on low swirl combustion for premixed methane-air gas [J]. Combustion Science and Technology, 2014(1): 65-69.

[10] KAZAKOV A, FRENKLACH M. Reduced reaction sets based on GRI-Mech 1.2 [DB/OL]. [2015-03-16]. http://combustion.berkeley.edu/drm/ 1994.

[11] LIU W, GE B, TIAN Y, et al. Experimental and numerical investigations of low-swirl multi-nozzle combustion in a lean premixed combustor [C]// ASME Turbo Expo 2014. New York, USA: ASME, 2014: V04AT04A045.

[12] DAY M, TACHIBANA S, BELL J, et al. A combined computational and experimental characterization of lean premixed turbulent low swirl laboratory flames: Ⅰ Methane flames [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(1): 275-290.

[本刊相关文献链接]

胡鹏，王伟，邓康耀，等. 排气再循环与燃烧边界条件耦合对增压汽油机有效热效率的影响. 2016，50(1)：34-40. [doi：10.7652/xjtuxb201601006]

粘权鑫，郭少龙，方文振，等. 液化天然气浸没燃烧式气化器数值模拟方法研究. 2016，50(1)：67-71. [doi：10.7652/xjtuxb201601011]

崔雨辰，侯俊才，吴筱敏，等. 负直流及低频交流电场对预混火焰影响的实验研究. 2016，50(1)：131-138. [doi：10.7652/xjtuxb201601020]

张聪，侯俊才，段浩，等. 交流电场电压幅值对球形火焰影响的理论研究. 2015，49(11)：33-38. [doi：10.7652/xjtuxb201511006]

杨诏，李祥晟. 高压环境下高炉煤气化学反应机理敏感性分析及机理简化. 2015，49(11)：39-43. [doi：10.7652/xjtuxb201511007]

高忠权，李春艳，蔺子雨，等. 采用离子电流法的甲醇发动机失火诊断. 2015，49(11)：44-48. [doi：10.7652/xjtuxb201511008]

杨振中，秦朝举，宋立业，等. 传统缸内壁面传热模型在氢内燃机中的适用性. 2015，49(9)：36-40. [doi：10.7652/xjtuxb201509007]

汤成龙，司占博，张旭辉，等. 稀释气对高甲烷含量天然气燃烧特性的影响. 2015，49(9)：41-46. [doi：10.7652/xjtuxb201509008]

李春艳，高忠权，刘兵，等. 电极位置与电极面积对离子电流影响的试验研究. 2015，49(7)：55-60. [doi：10.7652/xjtuxb201507010]

李皓宇，刘敬樟. 糠醛渣流化床燃烧过程中床料粘结机理研究. 2015，49(6)：145-150. [doi：10.7652/xjtuxb201506023]

高忠权，李春艳，刘兵，等. 采用离子电流法的发动机非正常燃烧诊断. 2015，49(5)：1-6. [doi：10.7652/xjtuxb201505001]

崔雨辰，段浩，李超，等. 电场分布对球形传播火焰变形率的影响. 2015，49(5)：49-55. [doi：10.7652/xjtuxb201505008]

（编辑　苗凌）