

贫燃预混旋流燃烧器回熄火边界数值模拟

郭乔轩^{1,2,3}, 雷福林^{1,2,3}, 田文栋^{1,2,3}, 张哲颠^{1,2,3}, 肖云汉^{1,2,3}

(1.中国科学院先进能源动力重点实验室(工程热物理研究所), 北京 100190;
2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.江苏中国科学院能源动力研究中心, 江苏 连云港 222069)

[摘 要] 为了预测回熄火边界, 采用部分预混燃烧模型对天然气旋流预混燃烧器开展计算流体力学模拟。燃烧室直径 60 mm、长 160 mm, 模拟工况包括空气和体积分数为 25%的 O₂+体积分数为 75%的 N₂ 2 种氧化剂, 旋流器出口轴向速度为 0.6~1.5 m/s 范围的回火边界, 以及 1.5~4.5 m/s 范围内的吹熄边界。通过回火和吹熄实验数据对模型进行验证, 并分析结构参数对回熄火边界的影响。对比了 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力湍流模型, 结果表明雷诺应力模型对回熄火边界的模拟结果更好。分析了回火和吹熄前后旋流器出口截面 Da 的变化情况, 结果表明不同气流速度条件下回火临界点的 $1/Da$ 以及吹熄临界点的 Da 和混合分数具有一定的关系。保持几何旋流数不变, 对比分析了 3 种旋流器进口结构回熄火发生前后的流场变化及回熄火边界的变化, 结果表明结构参数对回火和吹熄区间的影响作用相反, 存在最优的进口长度和宽度组合使得由回火到吹熄的稳定燃烧区间最大。

[关键词] 贫燃预混燃烧; 旋流燃烧器; 回火边界; 吹熄边界; 几何旋流数; 数值模拟

[中图分类号] TK16; TK473 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rld.202001019

[引用本文格式] 郭乔轩, 雷福林, 田文栋, 等. 贫燃预混旋流燃烧器回熄火边界数值模拟[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 82-88.
GUO Qiaoxuan, LEI Fulin, TIAN Wendong, et al. Simulation of flash back and blow-off limits in lean premixed swirl combustor[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 82-88.

Simulation of flash back and blow-off limits in lean premixed swirl combustor

GUO Qiaoxuan^{1,2,3}, LEI Fulin^{1,2,3}, TIAN Wendong^{1,2,3}, ZHANG Zhedian^{1,2,3}, XIAO Yunhan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Advanced Energy and Power, Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Research Center for Clean Energy and Power, Chinese Academy of Sciences, Lianyungang 222069, China)

Abstract: To predict the boundaries of flashback and blow-off, partial premixed combustion model is employed to perform computational fluid dynamics (CFD) simulation of the natural gas premixed swirl burner. The combustion chamber is 60 mm in diameter and 160 mm in length. The simulation conditions include two oxidizers, the air and the 25%O₂+75%N₂ (volume fraction). The swirler exit is flash back with axial velocity of 0.6~1.5 m/s and blow-off of 1.5~4.5 m/s. The model is verified by the flashback and blow-off experimental data, and the influence of the structural parameters on the boundaries of flash back and blow-off is analyzed. The Realizable $k-\varepsilon$ model and Reynolds stress turbulence model are compared, and it shows the Reynolds stress model has better simulation results. The changes of Da number at the section of swirler exit before and after flashback and blow-off are analyzed. It is found that there is a certain relationship between $1/Da$ at critical flashback point and mixing fraction, as well as Da at critical blow-off point and mixing fraction at different gas velocities. Keeping the geometric swirl number unchanged, the flow fields before and after the flashback and blow-off and their boundaries for three kinds of swirler inlet structures are compared and analyzed. The results show that, the influence of the structural parameters on flashback intervals is opposite to that on blow-off, and there is an optimal combination of the inlet length and width to maximize the stable combustion region between flashback and blow-off.

Key words: lean premixed combustion, swirl burner, flashback boundary, blow-off boundary, geometric swirl number, numerical simulation

收稿日期: 2020-01-07

基金项目: 国家科技重大专项(2017-I-0009-0010)

Supported by: National Science and Technology Major Project (2017-I-0009-0010)

第一作者简介: 郭乔轩(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为燃烧不稳定的数值模拟, guoqiaoxuan@iet.cn.

通信作者简介: 雷福林(1975), 男, 博士, 主要研究方向为燃烧学、煤气化、多相流等, leifulin@iet.cn.

贫燃预混燃烧具有减少污染物排放的优点, 被广泛应用于燃气轮机燃烧室^[1]。实际燃烧器会遇到负荷变化、燃料变换以及工况调节等情况, 容易发生燃烧不稳定现象^[2]。为防止不稳定燃烧造成燃烧室部件受损, 重要的一环是要避免回火 (flash back, FB) 和吹熄 (lean blow off, LBO) 等现象的发生。

通过数值模拟手段确定燃烧器的稳定燃烧区间, 可以在设计阶段对燃烧器结构进行优化, 也能为实验设计、运行工况调节等提供指导。Plee 和 Mellor 总结了预混燃烧的 4 种回火机理; Fritz 和 Lieuwen^[2-3]等分别通过实验和数值模拟等手段对回火的机理以及其影响因素进行了研究。Kiesewetter 等人^[4]采用计算流体力学模拟强旋流情况下的回火特性, 并得到与实验结果一致的变化趋势; 吴泽俊等^[5]采用数值模拟预测了二维本生灯结构的甲烷空气预混燃烧回火极限。在吹熄方面, Dawson^[6]、Kariuki^[7]、Chaudhuri^[8]等对火焰吹熄机理进行了分析; Stöhr^[9]和 Cavaliere^[10]等人研究了部分预混旋流火焰的吹熄过程, 表明在吹熄临界时火焰根部的熄灭现象很显著。因此在含有旋流的预混火焰的吹熄过程中, 火焰的根部熄火和重点火过程会有重要的作用, 张玮杰等^[11]使用 OH-PLIF 技术对旋流钝体稳燃的甲烷火焰的吹熄过程进行研究, 证实了火焰根部熄火和冷流回流引起吹熄的机理。以上对于燃烧器回火、吹熄现象的数值模拟主要针对机理研究, 而较少涉及吹熄和回火边界。

对此, 本文以文献[12]中有实验数据的旋流预混燃烧器为对象, 建立并验证一种能够快速确定回熄火边界的模拟方法, 在此基础上分析结构参数对回熄火边界的影响。

1 模拟方法

1.1 研究对象

本模拟研究对象是文献[17]的旋流燃烧器实验装置。其旋流器几何结构如图 1 所示。此装置的旋流器以 Syred 等人^[13]的设计为原型, 通过改变旋流器几何结构来确定不同旋流数。天然气和氧化剂 (空气、25% (体积分数, 下同) O₂+75%N₂ 的富氧空气) 完全预混后通过旋流器进入燃烧室燃烧。在实验过程中, 保持作为燃料流的天然气质量流量不变, 改变氧化剂的质量流量来实现回火和吹熄。燃烧室为直径 60 mm、长 160 mm、壁厚 2 mm 的石英管。

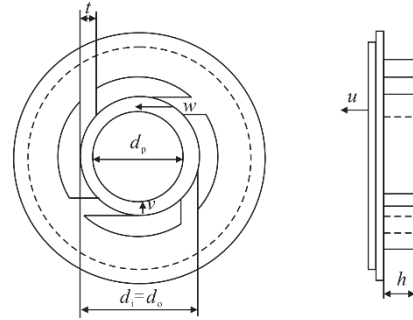


图 1 旋流器几何结构

Fig.1 Geometric structure of the swirl generator

依据 Shelil^[14]给出的切向供气旋流发生器的几何旋流数计算公式为

$$S_g = \frac{\pi \times (d_o^2 - d_p^2)(d_i - t)}{4 \times n \times t \times h \times d_o} \quad (1)$$

式中, d_o 和 d_i 分别为旋流器进口前外径和进口后外径 (本旋流器前后外半径相同), d_p 为内径, n 为旋流进口个数, t 和 h 为进口的宽和长。

本文选取几何旋流数 S_g 为 1.35 的旋流发生器进行模拟研究, 其具体结构参数见表 1。

表 1 旋流器结构参数

Tab.1 Geometric parameters of the swirl generator

S_g	n	$d_i=d_o/\text{mm}$	d_p/mm	t/mm	h/mm
1.35	4	28	21.5	4	10

1.2 计算网格

使用 SpaceClaim 软件将旋流燃烧器划分非结构网格, 对旋流器和燃烧室前段进行局部加密, 获得网格数分别为 20 万、65 万和 100 万的 3 套网格, 进行网格无关性验证。图 2a) 为非结构网格径向切面, 图 2b) 为使用 3 套网格计算的中心轴向 xy 截面上燃烧室内冷态的轴向速度对比结果。可以看出, 当网格数增加到 65 万后模拟结果相差不大, 最终确定使用 65 万网格数进行计算。

1.3 计算模型设置

实验所用的燃料为天然气, 模拟计算使用的燃料燃烧化学反应机理为 GRI-Mech 3.0; 湍流模型比较 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型 (RSM); 燃烧模型为部分预混燃烧模型中层流小火模型 (FGM)。组分、能量方程的离散格式采用二阶迎风格式; 压力、速度的耦合求解方法采用 Couple 算法。燃烧器出口设置为压力出口边界, 入口为给定质量流量。计算分析的工况范围见表 2。

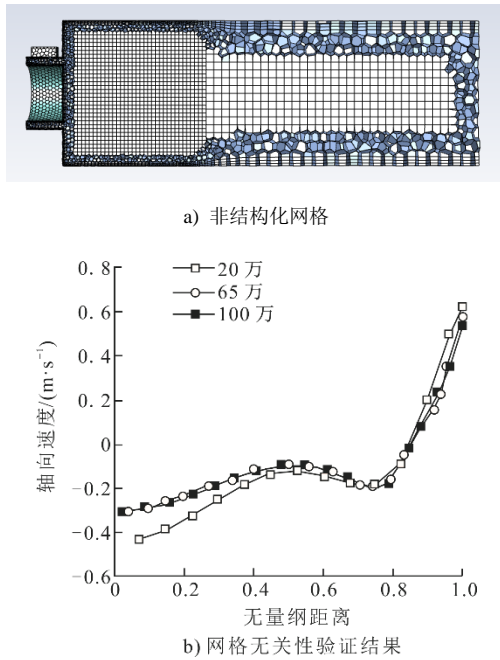


图2 旋流燃烧器非结构化网格与网格无关性验证
Fig.2 The unstructured mesh of the swirl burner and grid independence verification

表2 计算工况范围
Tab.2 The ranges of calculation conditions

项目	氧化剂为空气		氧化剂为富氧空气	
	回火	吹熄	回火	吹熄
进口速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.1~2.5	2.5~6.4	1.1~2.3	2.5~6.8
雷诺数	446~1 014	1 014~2 595	446~914	1 014~2 757
进口质量 流量/ $(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$	0.22~0.50	0.52~1.30	0.22~0.46	0.51~1.38
混合分数	0.038~0.046	0.029~0.033	0.037~0.046	0.028~0.032

甲烷和氧化剂组成的预混可燃气体当量比 ϕ 从文献[12]中提取。通过当量比计算得到质量分数 Z 以及混合分数 f ，其中混合分数定义为

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,O}}{Z_{i,f} - Z_{i,O}} \quad (2)$$

式中 Z_i 为统一为同种元素表示的质量分数，其定义为

$$Z_i = 2 \times \frac{Z_C}{M_C} + 0.5 \times \frac{Z_H}{M_H} - \frac{Z_O}{M_O} \quad (3)$$

式中， M_x 表示元素 x 的原子质量，下标 f 和 O 表示进口处燃料和氧化剂对应值。

为了更直观地分析，将气体质量流量转换为气流速度。本文将旋流器入口的轴向速度作为燃烧室的进口速度，计算式为

$$v = \frac{G}{\rho A} \quad (4)$$

式中， G 为进口质量流量， ρ 为预混气密度， A 为旋流器入口通道截面积。

1.4 回熄火的判断

本文所指的回火是快速发生的完全回火现象。旋流器出口面是判断是否发生回火的分界面，当有火焰锋面扫过旋流器出口环截面时，表示已发生回火。当燃烧室内的预混燃料点火后无法稳定燃烧即为吹熄。

图3和图4分别为回、熄火发生前后2个工况稳态模拟的燃烧中间产物OH分布。可以发现，回火和吹熄发生后燃烧室内的OH分布会有明显变化。通过监测某些位置产物及温度变化可以较为直接地判断回火和吹熄现象的发生。

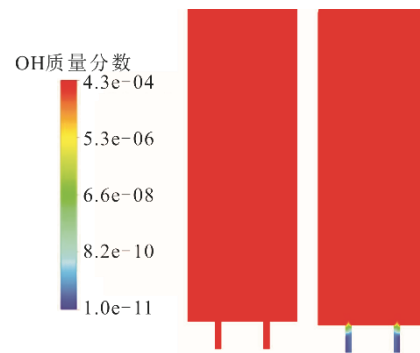


图3 回火前后 OH 分布变化
Fig.3 The OH distribution change before and after flashback

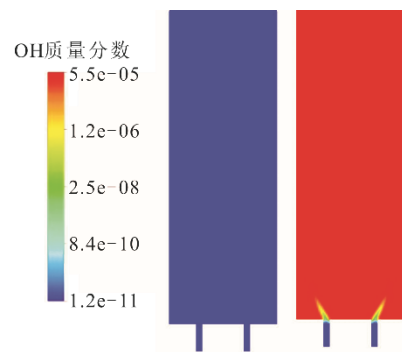


图4 吹熄前后 OH 分布变化
Fig.4 The OH distribution change before and after blow-off

2 计算结果及分析

2.1 湍流模型对回熄火边界模拟结果的影响

对比分析 Realizable $k-\epsilon$ 模型和 RSM 2 种湍流模型对回熄火边界模拟结果的影响。图5和图6分别为使用不同氧化剂所对应的回火和吹熄边界模拟结果与实验结果对比。

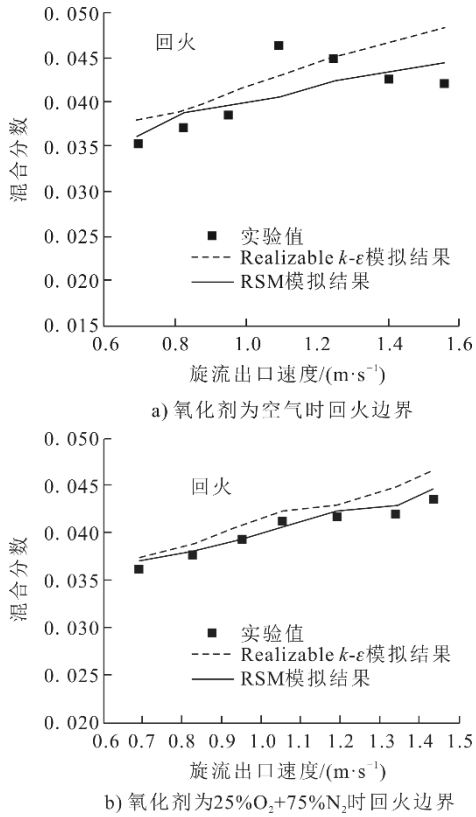


图 5 不同氧化剂对应回火边界

Fig.5 The flashback boundary corresponding to different oxidizers

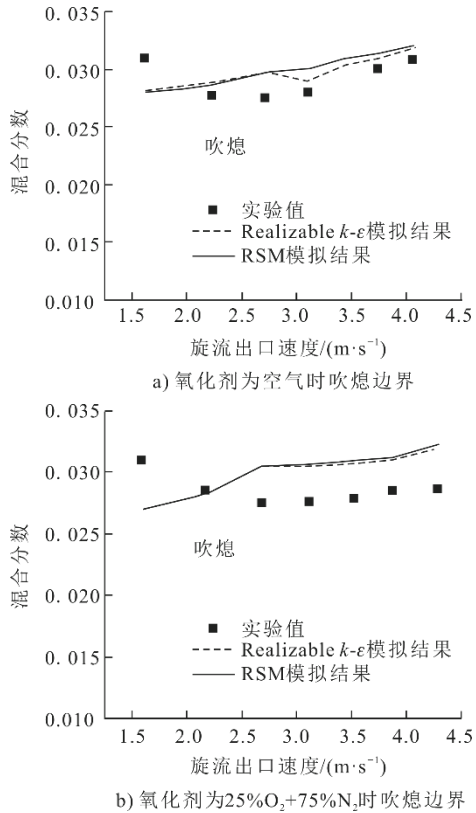


图 6 不同氧化剂对应吹熄边界

Fig.6 The blow-off boundaries corresponding to different oxidizers

由图 5a)可以看出, 对于回火边界, Realizable *k-ε* 模型和 RSM 2 种湍流模型的模拟结果平均偏差分别为 7.3% 与 4.9%。就数值模拟角度而言, 随进气速度增加, 贫燃侧层流火焰传播速度也需增大, 即模拟结果会单调增加。但在第四点处存在较大误差 (绝对平均偏差分别为 7% 与 12%), 与原实验中多工况下结果一致, 说明在此速度范围内存在局部回流区造成高温烟气回流入旋流器, 而稳态数值模拟难以捕获的瞬态局部回流区。更换氧化剂后实验结果则无此类似突跃。由图 5b)可见, RSM 相对更加准确 (偏差 1.2%), 而 Realizable *k-ε* 模型导致湍流耗散率过大 (偏差 4.1%), 不能准确捕捉涡核位置。旋流数较大时, 考虑湍流各向异性的 RSM 会更加适用。而吹熄主要受到来流速度的影响, 且吹熄发生与火焰根部的再燃和吹灭过程相关, 需要瞬态模拟才能较为精确捕捉, 对此 2 种模拟方法得到的结果差别很小。因此, 在以下的模拟计算中湍流模型都采用 RSM, 氧化剂选择富氧空气。

2.2 回熄火判断准则数分析

Putnam^[15]在临界速度梯度模型基础上提出了无量纲的 Peclet 数 (*Pe*), 可作为回火是否发生的判断依据, 其表达式为:

$$Pe_J = \frac{\bar{u}d}{\alpha} \tag{5}$$

$$Pe_F = \frac{S_L d}{\alpha} \tag{6}$$

$$\alpha = \lambda / \rho c_p \tag{7}$$

式中, *Pe_J* 和 *Pe_F* 分别为表示基于来流平均速度的 Peclet 数和基于火焰传播速度的 Pelect 数, *S_L* 表示混合物的层流火焰传播速度, \bar{u} 表示来流平均速度, *d* 表示燃烧器特征尺寸, α 为混合物的热扩散系数, λ 为导热系数, *c_p* 为定压比热容。

对于一定的燃烧器, 回火或吹熄发生时 *Pe_J* 和 *Pe_F* 具有如下关系:

$$Pe_J = C Pe_F^2 \tag{8}$$

式中 *C* 为常数。

另外, 有一种基于 Damköhler 数的回火预测模型^[1]。该模型在考虑了火焰速度和厚度变化等因素的基础上做了改进。Damköhler 数 (*Da*) 定义为:

$$Da = \frac{\tau_{res}}{\tau_{chem}} \tag{9}$$

$$\tau_{res} = \frac{d}{u} \tag{10}$$

$$\tau_{chem} = \frac{\delta_L}{S_L} = \frac{\alpha}{S_L^2} \quad (11)$$

式中, τ_{res} 为流动混合时间, τ_{chem} 为化学反应时间, δ_L 为层流火焰厚度。

将式(10)和式(11)代入式(9), 得到

$$Da = \frac{dS_L^2}{\alpha u} = \frac{Pe_F^2}{Pe_j} \quad (12)$$

由式(12)可知, Da 与 Pe 是等价的。 Da 的定义本身为反应物停留时间和化学反应时间的比值, 可用来表征吹熄发生。

使用 Damköhler 数对模拟结果进行分析, 用旋流通道出口截面统计平均得到 Da , 取倒数作为判断回火的无量纲数; 用预混旋流出口后 10 mm 的截面统计平均得到 Da , 作为判断吹熄的无量纲数。

图 7 给出了氧化剂为 25%O₂+75%N₂ 时, 燃烧室进口速度为 0.95~1.44 m/s 范围, 回火前 1/ Da 随甲烷混合分数的变化趋势, 以及 2.17~4.30 m/s 范围吹熄前 Da 随甲烷混合分数的变化趋势。

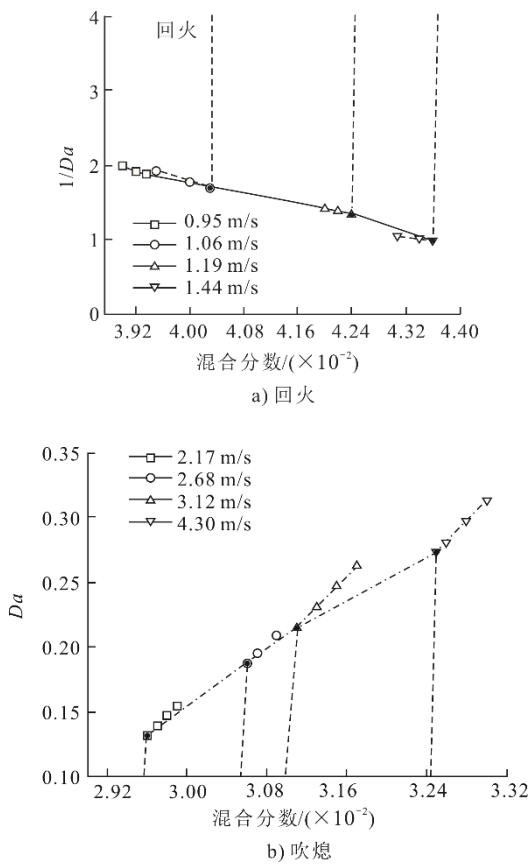


图 7 不同进口速度时准则数随混合分数变化趋势
Fig.7 Change of the dimensionless number versus mixture fraction at different inlet velocities

由图 7 可以看出: 在回火、吹熄发生的临界混合分数处, Da 数值会发生突变; 将各临界点连接起来, 发现基本处于同一趋势线, 在回火和吹熄发生前的准则数变化趋势也较为一致。由此可知, 对于同一旋流燃烧器, 其稳定燃烧混合分数(当量比)极限可以用无量纲数 Da 表征。只需要根据少数试验或模拟得到无量纲数 Da 和混合分数的关系结果, 即可预测其他操作条件下回火、吹熄临界点。

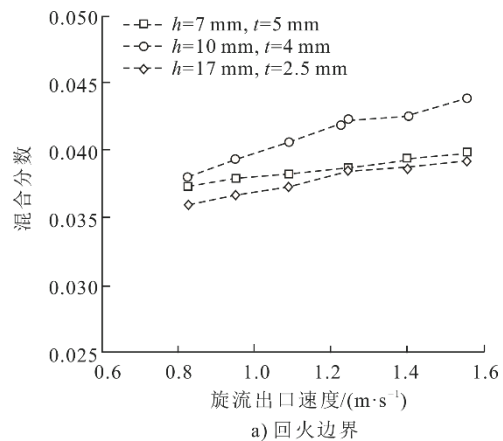
2.3 结构参数对回熄火边界的影响

魏星^[16]研究表明, 旋流器高度的增加会降低回火发生的临界当量比, 使得角回流区回火现象更易发生。仅改变旋流器的高度会对几何旋流数产生影响。因此根据几何旋流数计算式(式(1)), 保持其他结构参数不变, 同时改变 h 和 t , 维持几何旋流数 1.35 不变, 得到 2 种新结构。其结构参数见表 3。

表 3 设计的 2 组旋流器结构参数
Tab.3 The structural parameters of two designed swirl generators

S_g	n	$d_i=d_o/mm$	d_p/mm	t/mm	h/mm
1.35	4	28	21.5	7	5
1.35	4	28	21.5	2.5	17

在氧化剂为 25%O₂+75%N₂ 的条件下, 保持进出口边界条件不变, 针对 2 种结构分别模拟得到其回熄火边界。图 8 为采用 3 种结构(含原结构)时回熄火边界随预混气流速的变化。由图 8 可见, 对 3 种结构, 随流速的增加, 回火发生时的临界混合分数增大(缩小回火区间), 吹熄发生时的临界混合分数也增大(增大吹熄区间)。在这 3 种结构中, $h=10$ mm、 $t=4$ mm 组合的回火区间最小, 而吹熄区间最大; $h=7$ mm、 $t=5$ mm 组合的回火区间和吹熄区间都较为适中。



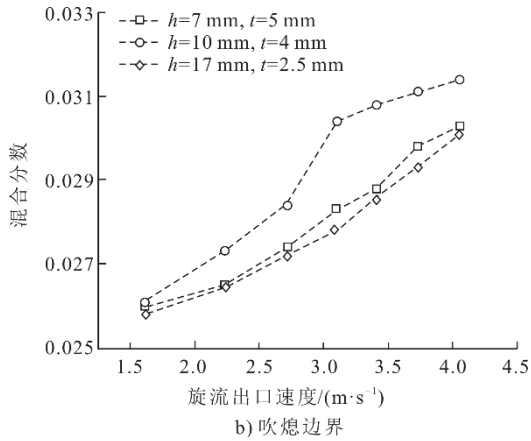


图 8 3 种结构的回火和吹熄边界
Fig.8 The flashback and blow-off boundaries of three structures

图 9 为 3 种结构在典型工况下回火前后的速度场（左图为稳定、右图为回火）。

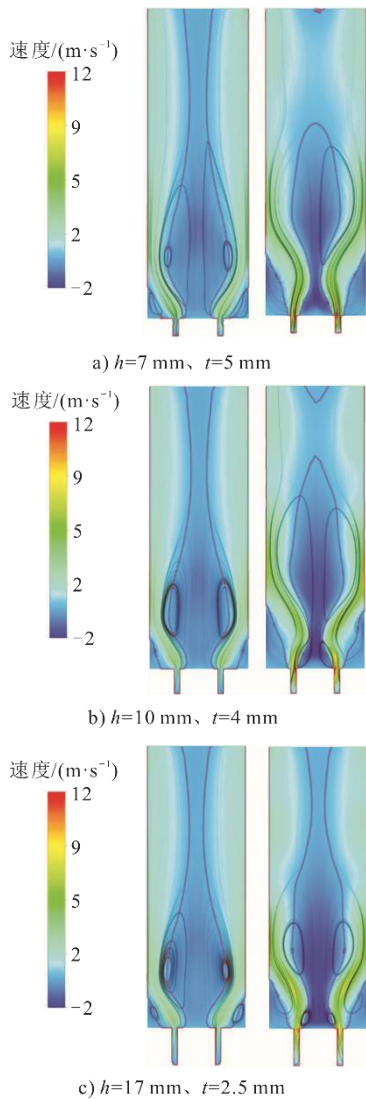


图 9 3 种结构回火发生前后的轴向流线
Fig.9 The axial streamline diagram before and after flashback for three structures

对比图 9a)—图 9c)可以发现，在回火前后流场会发生很大变化。随火焰回到预混通道，角回流区会扩大，中心回流区则先向内收缩继而扩张到壁面在下游形成稳定的 2 个回流区，且轴向速度为 0 的等值线在回火前后会发生较大变化，回流区随着 h 和 t 的变化逐渐增大。3 种结构中， $h=10\text{ mm}$ 、 $t=4\text{ mm}$ 组合的角回流区速度最大而中心回流区速度最小。即随旋流器出口长度 h 的增大、宽度 t 缩小，回火边界对应的角回流区速度先增大到某临界值，后因 t 缩小产生的影响使得角回流区速度减小。

图 10 为吹熄前后的速度场（左图为稳定、右图为吹熄）。为便于比较，使用相同范围内轴向速度流线（闭合细线）与轴向速度为 0 的等值线（对称粗线）来分别标识。

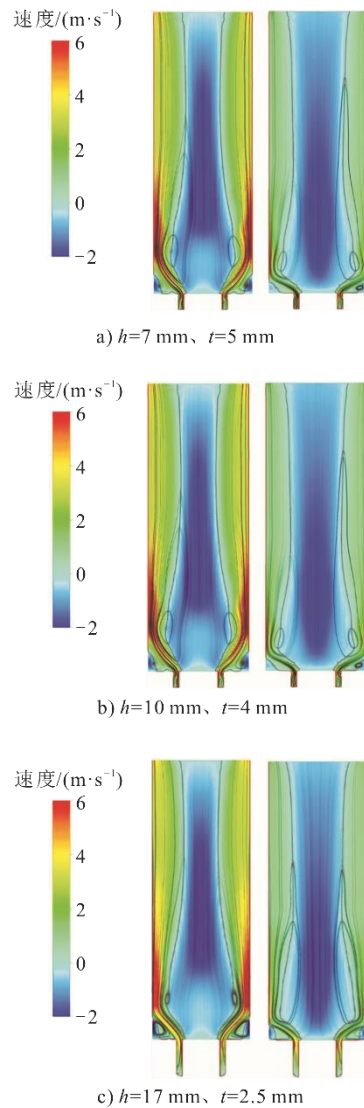


图 10 3 种结构吹熄发生前后的轴向流线
Fig.10 The axial streamline diagram before and after blow-off for three structures

对比图 10a)—图 10c)可发现,吹熄发生前后所对应的流场结构变化不大且 0 轴向等值线区域也变化很小,但速度变化较为明显。由稳定燃烧到吹熄发生,由于吹熄后燃烧室恢复冷态,压力和速度都会下降,角回流区受到压缩。对比 3 个结构吹熄后的流场结果可以发现, $h=10\text{ mm}$ 、 $t=4\text{ mm}$ 组合的 2 个中心回流区更集中贴近壁面,且有明显的角回流区。结构改变对于吹熄后流场的影响主要体现在中心回流区,角回流区的变化并不明显,这也和吹熄后燃烧室内压力和速度下降有关。在吹熄发生前,随着结构变化,角回流区和中心回流区间的剪切层会先轴向缩短,随后拉长最终贴附于壁面,因此燃烧室的直径也会限制速度场的发展,壁面对速度分布的影响有待下一步验证。

3 结 论

1) 回熄火的发生可使用燃烧室特殊位置温度变化时对应的混合分数来表示。随混合分数增加,燃烧室会由稳定燃烧状态逐渐发生回火,反之则会由稳定燃烧状态逐渐发生吹熄。

2) 对比 2 种湍流模型发现,雷诺应力模型比 Realizable $k-\varepsilon$ 模型预测回火边界更准确,而 2 种模型对于吹熄边界的模拟结果差别较小。

3) 回火和吹熄发生前后,预混通道出口的 Da 会有明显变化,可据此判断回熄火的发生。根据少数试验或模拟得到无量纲数 Da 和混合分数的关系结果,可预测其他操作条件下回火、吹熄临界点。

4) 保持几何旋流数不变,同时改变旋流器长度 h 和进口宽度 t 时,会改变吹熄和回火的边界,并且对回火和吹熄区间的影响作用相反。进口流速对回火和吹熄边界的影响较大。对所研究的旋流器结构,可能存在最优 h 和 t 组合使得由回火到吹熄构成的稳定燃烧区间最大。这部分内容有待进一步研究和实验验证。

[参 考 文 献]

[1] 张文普,李宇斌.燃气轮机燃烧回火机理与数值模拟的研究进展[J].燃烧科学与技术,2016,22(5):385-401. ZHANG Wenpu, LI Yubin. Progress in mechanisms and numerical simulation of flame flashback for gas turbine[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(5): 385-401.

[2] LIEUWEN T, MCDONELL V, PETERSEN E, et al. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, auto ignition and instability[C]. ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2006: 2-4.

[3] LIEUWEN T, MCDONELL V, PETERSEN E, et al. Fuel

flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, auto ignition, and stability[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(1): 011506.

[4] KIESEWETTER F, KONLE M, SATTELMAYER T. Analysis of combustion induced vortex breakdown driven flame flashback in a premix burner with cylindrical mixing zone[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, 129(4): 929-936.

[5] 吴泽俊,何小民,葛佳伟,等.甲烷/空气预混火焰回火特性数值模拟[J].推进技术,2015,36(9):1347-1354. WU Zejun, HE Xiaomin, GE Jiawei, et al. Numerical simulation of flashback of premixed CH_4/air flame[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(9): 1347-1354.

[6] DAWSON J, GORDON R, KARIUKI J, et al. Visualization of blow-off events in bluff-body stabilized turbulent premixed flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1559-1566.

[7] KARIUKI J, DAWSON JR, MASTORAKOS E. Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(8): 2589-2607.

[8] CHAUDHURI S, KOSTKA S, RENFRO M W, et al. Blowoff dynamics of bluff body stabilized turbulent premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(4): 790-802.

[9] STÖHR M, BOXX I, CARTER C, et al. Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2): 2953-2960.

[10] CAVALIERE D E, KARIUKI J, MASTORAKOS E. A comparison of the blow-off behaviour of swirl-stabilized premixed, non-premixed and spray flames[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2013, 91(2): 347-372.

[11] 张玮杰,王金华,郭实龙,等. $\text{CH}_4/\text{空气}$ 预混稀燃临吹熄火焰结构研究[J].燃烧科学与技术,2019,25(5):389-394. ZHANG Weijie, WANG Jinhua, GUO Shilong, et al. Study on flame structure of lean premixed CH_4 close to blow-off[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2019, 25(5): 389-394.

[12] JERZAK W, KUŹNIA M. Experimental study of impact of swirl number as well as oxygen and carbon dioxide content in natural gas combustion air on flame flashback and blow-off[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 46-54.

[13] SAYAD P, SCHÖNBORN A, KLINGMANN J. Experimental investigation of the stability limits of premixed syngas-air flames at two moderate swirl numbers[J]. Combustion and Flame, 2016, 164: 270-282.

[14] SHELIL N. Flashback studies with premixed swirl combustion[D]. Cardiff: Cardiff University, 2009: 18-23.

[15] PUTNAM A A. Application of dimensionless numbers to flash-back and other combustion phenomena[J]. Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, 1949, 3(1): 89-98.

[16] 魏星.贫燃预混燃烧火焰形态与流场研究[D].大连:大连理工大学,2017:40-48. WEI Xing. Flame shape and flow field research of lean premixed combustion[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 40-48.

(责任编辑 刘永强)