

旋流强度对氢气预混火焰CIVB回火的影响*

段冬霞^{1,2}, 黄辉³, 胡宏斌¹, 徐佳恒^{1,2}, 聂超群¹

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 为了研究旋流强度对氢气预混火焰燃烧诱导涡破碎 (CIVB) 回火的影响, 以便深入理解氢气的 CIVB 回火特点进而减弱回火, 首先采用二维轴对称模型, 并使用用户自定义函数 (UDF) 修改动量守恒方程来模拟旋流, 得到了不同旋流数下氢气预混火焰的 CIVB 回火极限, 然后从旋流强度对流场特性和火焰特性两方面的影响进行深入分析。结果表明: 对于无中心体旋流预混喷嘴中氢气火焰的 CIVB 回火, 旋流数从 0.409 增加到 0.432, 从流场条件分析, 旋流数增加使负切向涡量增加, 对回火起促进作用; 从火焰条件分析, 旋流数增加使氢气湍流火焰速度先增加后减小, 最后趋于猝熄, 对回火先起促进作用后起抑制作用。流场和火焰条件共同决定了旋流数对氢气预混火焰 CIVB 回火的影响趋势, 即旋流数增加先促进回火后抑制回火。

关键词: 燃烧诱导涡破碎回火; 旋流数; 氢气预混火焰; 负切向涡量; 湍流火焰速度

中图分类号: TK91 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 04-0819-08

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2018.04.012

Effects of Swirl Strength on CIVB Flashback in Hydrogen Premixed Flames

DUAN Dong-xia^{1,2}, HUANG Hui³, HU Hong-bin¹, XU Jia-heng^{1,2}, NIE Chao-qun¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to deepen understanding the flashback due to combustion induced vortex breakdown (CIVB) and prevent it, the effects of swirl strength on CIVB flashback in hydrogen premixed flames were investigated. Flashback limits of hydrogen premixed flames were obtained by numerical simulation with two-dimensional axisymmetric model and implementing user defined function (UDF) to simulate swirl by modifying the momentum conservation equations. Effects of swirl strength on flow aerodynamic characteristics and flame characteristics were analyzed in detail. The results are as follows: for hydrogen flames in the swirl-premixed nozzle without a centerbody, increase of swirl number from 0.409 to 0.432 enhances flashback due to the increase of negative azimuthal vorticity from the aspect of the flow conditions. From the aspect of the flame conditions, increase in swirl strength firstly enhances flashback and then prevents it, because the turbulent flame speed of hydrogen flame firstly increases with increasing swirl strength and then decreases, finally toward quenching. Both aspects together determine the effects of swirl strength on CIVB flashback in hydrogen premixed flames. That is, flashback is firstly enhanced and then prevented with increasing swirl strength.

Key words: Combustion induced vortex breakdown flashback; Swirl number; Hydrogen premixed flames; Negative azimuthal vorticity; Turbulent flame speed

* 收稿日期: 2017-01-20; 修订日期: 2017-03-26。

基金项目: 国家自然科学基金 (51406203)。

作者简介: 段冬霞, 女, 博士生, 助理研究员, 研究领域为燃气轮机燃烧室设计和数值模拟。E-mail: duandongxia@iet.cn

1 引言

为了实现工业燃气轮机的低排放,贫预混燃烧是目前天然气燃料应用中实现低 NO_x 排放目标的标杆^[1~3]。出于环境和能源安全的考虑,需要加快发展利用替代燃料,例如煤衍生的合成气、生物质气、垃圾填埋场气或IGCC处理气^[4,5],这些燃料包含大量的氢气,其反应性显著高于天然气,因此有较大的回火倾向。氢气的层流火焰速度大约是典型天然气的四倍,其湍流火焰速度和火焰抗拉伸能力也大得多,如何消减回火成为氢燃料燃机发展的挑战^[6]。

回火根据引发的原因一般可分为四种类型:边界层回火、湍流火焰在核心流中传播、燃烧不稳定引起回火以及燃烧诱导涡破碎(Combustion Induced Vortex Breakdown, CIVB)回火^[7]。其中,CIVB回火是旋流预混燃烧器中特有的且主要的回火形式^[8~10]。CIVB回火可以发生在湍流火焰速度处处小于流动速度的流场中,是流场和火焰相互作用的结果,因此凡是影响流场或火焰特性的因素都会影响CIVB回火^[11~14],包括旋流器、预混段等几何结构参数,以及空气质量流量、入口温度、压力、当量比、燃料组分等运行参数,其中,旋流数是最重要的影响因素之一^[15~17],也是很多CIVB回火相关研究的关注重点。

Konle^[18]设计了一个流通面积可调从而旋流数可调的无中心体径向旋流器,实验得到两种旋流水平下不同热功率下的CIVB回火临界当量比,结果显示旋流强度减弱,涡破碎减弱,回流区的位置向下游移动,CIVB回火临界当量比增加。Cheng^[19]在回火实验中以氢气-甲烷混合气为燃料,与形成回流区的强旋流燃烧器相比,未形成中心回流区的低旋流燃烧器有更高的抗回火性。Blesinger^[20]实验采用无中心体径向旋流器和天然气为燃料,预混管直径和长度缩小到原尺寸的0.7,根据旋流数的定义,出口直径缩小意味着旋流强度增加,通过回火机理的对比分析可以推断旋流数增加促进CIVB回火。Dam^[21]在合成气CIVB回火实验研究中,采用轴向旋流器和有圆锥形中心体的喷嘴结构,比较旋流强度为0.71和0.97下的回火极限,结果显示旋流强度增加反而抑制CIVB回火。研究者认为旋流强度较强的旋流器产生强度更大、界限更清楚的回流区,从而产生更稳定的流场削弱了回火。De^[22]使用大涡模拟和增厚火焰模型研究了旋流强度对CIVB回火的影响。采用中心体为圆柱的燃烧器,以氢气与甲烷混合气为燃料,比较了旋流数为0.38,0.82和1.76三种旋流强度下的CIVB

回火过程。结果显示:旋流强度增加,湍流强度增加,化学反应加强,从而促进回火。Baumgartner^[23]实验研究了非旋流和低旋流中回火的倾向和主要回火机制,在非旋流中火焰总是沿着壁面边界层回火,使用低旋流燃烧器在中低当量比下可以阻止边界层回火的发生,但在高当量比下容易发生CIVB回火,导致性能恶化。Sayad^[24]实验研究了可变旋流数(0~0.66)燃烧室中不同空气质量流量(75~200L/min)下不同氢体积分数(10%~90%) H_2/CH_4 混合物的回火,使用OH*高速光化学成像观察到三种类型的回火机制:当旋流数 ≥ 0.53 ,所有测试的燃料混合物都发生了CIVB回火;在低旋流数和较低空气流量下,会发生边界层回火以及自动点火引起预混管中火焰传播,而且不同机制下回火过程中火焰的传播速度显著不同。田晓晶^[15]使用RSM(Reynolds Stress model)湍流模型和Finite-Rate/Eddy-Dissipation燃烧模型比较了1.16和1.24两个旋流数下的CIVB回火极限。喷嘴结构为径向旋流器和渐扩中心体,燃料为氮气稀释的氢气。预混段出口截面流场显示,旋流数增加显著地提高了靠近中心体壁面区域的旋流强度,从而促进了CIVB回火的发生。Utschick^[25]基于氢气预混气的速度和燃料浓度来预测燃气轮机模型燃烧室的回火极限,总结出可以提高高活性燃料在高当量比下安全运行的措施:燃料最好沿整个后缘等速喷射以减小速度和浓度的波动;燃烧室流场特征速度应至少是火焰特征速度的两倍;通过调整轴向动量使回流区滞止点位于火焰筒中。其中调整轴向动量意味着改变了旋流的强度。

关于旋流数对CIVB回火影响的研究现状是:(1)燃烧器预混段结构不同,例如有无中心体及其不同形状的中心体,旋流数的影响规律可能不同;(2)采用的燃料不同,包括天然气、氢气-甲烷混合气、合成气、氮气稀释的氢气,旋流数的影响趋势和强度可能不同,还没有以纯氢气为燃料的研究;(3)多数研究只涉及两个旋流数,最多三个,比较的范围过于窄、不连续,得出的结论也都是简单的单调趋势,不是促进回火就是抑制回火;(4)由于CIVB回火的机理尚在研究之中,关于旋流数对CIVB回火的影响的分析深度还远远不够;(5)绝大多数研究者的结论是旋流数增加会促进CIVB回火,但是有些实验研究得出相反的结论。

鉴于以上不足,本文采用无中心体的喷嘴结构,以纯氢为燃料,火焰的稳定完全依赖于旋流形成的回流区,因此旋流强度是CIVB回火的关键影响参

数。通过数值模拟方法得到一系列不同旋流数下的 CIVB 回火极限,并进行详细分析。

2 数值计算及验证

燃烧器结构包括锥型旋流器、预混管和火焰筒三部分,预混管直径 $D=75\text{mm}$,如图 1 所示。为了验证模拟方法的准确性,而选用相同的入口条件^[26]:空气质量流量为 0.15kg/s ,入口压力为常压,入口温度为 573K 。由于在燃烧器中稳定的涡结构可以看作是轴对称的,因此对于 CIVB 回火的模拟可以简化为二维计算^[27,28]。

预混段中发生 CIVB 回火时,上游旋流器内的压力分布和速度分布会受到影响,又反过来影响回火,所以采用二维轴对称模型时计算域要包括旋流器。使用 UDF 在旋流器区域的轴向动量方程和切向动量方程中加入源项,使部分轴向动量转变成切向动量,同时保证能量守恒,从而来模拟旋流器的作用^[27]。

切向动量方程中加入体积力 F_θ ,旋流器区域的每个网格都会产生切向动量

$$\frac{F_\theta}{V} = A\rho u^2 \quad (1)$$

式中 A 为常数,取决于实际旋流器的旋流数,可由实验和三维数值计算来标定, A 正比于旋流强度。 ρ 和 u 分别是每个网格的密度和轴向速度。

2.1 数值计算

切向动量方程中加入体积力 F_θ ,使流场中加入了非物理功率 P

$$\frac{P}{V} = A\rho u^2 w \quad (2)$$

式中 w 是旋流器区域每个网格中由 F_θ 产生的切向速度。为了保证能量守恒,就需要相应地在轴向动量方程中加入体积力 F_u

$$\frac{F_u}{V} = -\frac{P}{V} \frac{1}{u} = -A\rho u w \quad (3)$$

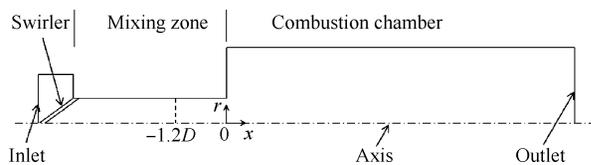


Fig. 1 2D axisymmetric model of burner

大涡模拟对流场细节的描述更优,但计算量巨大,而且非稳态雷诺平均纳维斯托克斯 (URANS) 模拟的回火极限与实验吻合,二维 URANS 在较小的计算成本下就能够重现 CIVB 回火极限^[28-30],因此在 Fluent 中采用二阶 RSM 湍流模型和 Finite-Rate/ Ed-

dy-Dissipation 燃烧模型进行非定常计算。采用 GE 公司在高氢预混器设计时所用的 1 步 Marinov 总包反应机理^[31],能够准确高效地计算出氢燃料的燃烧特性。化学反应速率 \dot{w} 为

$$\dot{w} = 1.8 \times 10^{16} \exp(-1761/T) [\text{H}_2][\text{O}_2]^{0.5} \text{ kmol/m}^3$$

由于 Finite-Rate/ Eddy-Dissipation 燃烧模型在高剪切应力区域会过高地估计反应速率,导致壁面发生非物理性回火,因此为了消除这种回火,使用 UDF 添加氢气的猝熄温度 800K ^[32]。先模拟某一旋流数下的无反应等温流场,然后模拟火焰稳定的热态工况,再由稳定火焰为初值不断增加当量比直至发生 CIVB 回火,得到回火极限;由稳定火焰为初值不断减小当量比直至发生熄火,得到熄火极限。

2.2 方法可靠性验证

如图 2 和 3 所示,网格总数由 7 万增加到 11 万,流场中 $x=-1.2D$ 上的轴向速度和切向速度分布的差别均不大于 1%,选择 7 万的网格精度已经足够。本文轴向速度的模拟值与实验测量值基本吻合,切向速度的预测趋势与实验基本一致,数值上有一定差别,偏差可能是由于 RSM 湍流模型在过大的速度梯度区域使用标准压力应变模型导致的,也可能是由于二维轴对称计算不能模拟涡核旋进运动导致的,但对轴线上的轴向速度和切向速度的预测比 Kiese-wetter 等^[27]的模拟值更接近实验值。

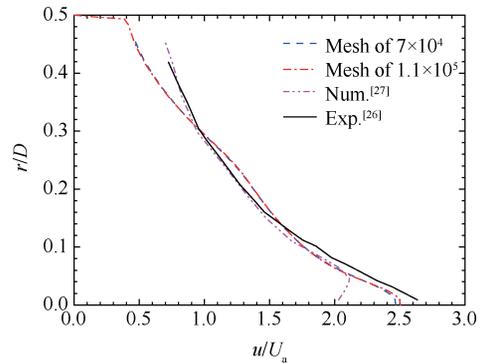


Fig. 2 Axial velocities at $x=-1.2D$

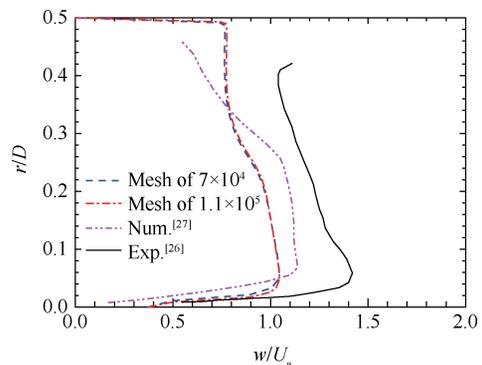


Fig. 3 Circumferential velocities at $x=-1.2D$

在此旋流强度下,采用甲烷为燃料,本文模拟捕捉到了 CIVB 回火的特征,如图 4 所示:随着当量比增加,火焰逐渐向上游传播,回流区发生涡破碎,火焰与涡不断向上游传播直到旋流器并稳定于此,图中细实线表示轴向速度为 0 的等值线,为回流区边界。这与实验观察^[26]和 Kieseletter 等^[27]的计算相符,而且本文计算所得的 CIVB 回火临界当量比为 0.83,与实验值相等,比 Kieseletter 等预测的更准确,这是因为本文模拟的轴线上的速度更接近实验值。

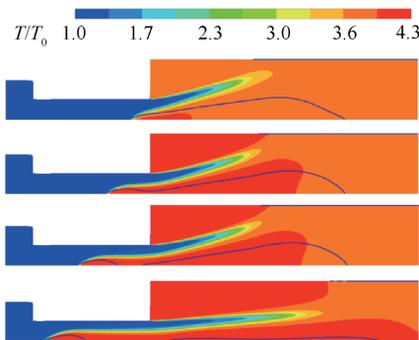


Fig. 4 Reaction process and recirculation zone during the CIVB flashback

3 计算结果与讨论

3.1 CIVB 回火极限

旋流强度用旋流数来表示^[33],旋流数定义为切向动量轴向流率与轴向动量轴向流率之比

$$Sn = \frac{\int_0^{0.5D} \rho u w r^2 dr}{0.5D \int_0^{0.5D} \rho u^2 r dr} \quad (4)$$

由式(4)计算得到采用不同 A 值模拟所得流场对应的旋流数,如图 5 所示, A 值与旋流数成正比。氢气预混火焰在不同旋流数下的 CIVB 回火临界当量比 $\Phi_{\text{cri-f}}$ 和熄火临界当量比 $\Phi_{\text{cri-q}}$ 如图 6 所示。根据这两个临界当量比,可以将图分成两个区域。I 区:随着旋流数从 0.409 增加到 0.425, $\Phi_{\text{cri-f}}$ 从 0.4 减小到 0.11,旋流数增加促进 CIVB 回火, $\Phi_{\text{cri-q}}$ 不变,两个临界值之间可以得到稳定火焰,稳定范围随着旋流数增加而减小。II 区:旋流数从 0.425 增加到 0.432, $\Phi_{\text{cri-f}}$ 从 0.11 增加到 0.24,旋流数增加抑制 CIVB 回火, $\Phi_{\text{cri-q}}$ 从 0.08 增加到 0.12,稳定范围随着旋流数增加而增加。

旋流数增加对氢气预混火焰 CIVB 回火的影响趋势是先促进后抑制,这与已有的研究结论不相同,主要有两方面的原因:(1)采用的燃料不同,与文献中的其它燃料相比,本文采用的氢气的湍流火焰速

度和抗拉伸能力大得多,更容易发生 CIVB 回火,从图 6 中也可以看出氢气在较低的当量比下就会发生 CIVB 回火。(2)比较的旋流数的范围和数据点数量不同,已有的研究只简单比较了两个或三个旋流数,这明显存在不足,如果在图 6 中任选两个或三个旋流数进行比较,不会得到一致的结论,也不会得到正确的结论。

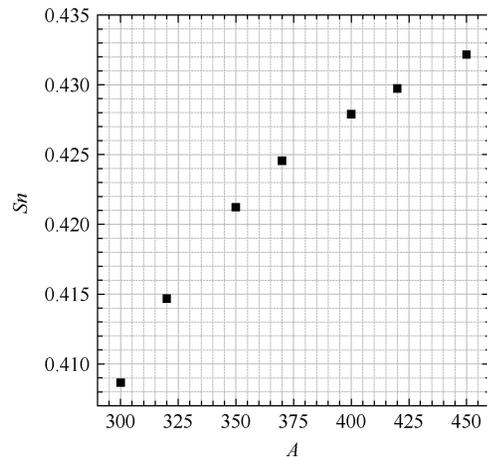


Fig. 5 Relationship between A and Sn

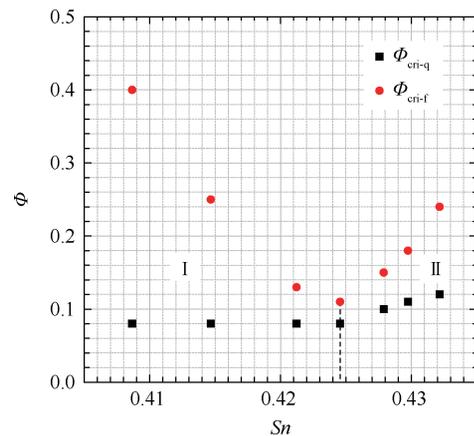


Fig. 6 CIVB flashback limits and blowout limits of hydrogen flames

Blesinger^[20]提出发生 CIVB 回火的两个必要条件为:燃烧热释放对气动的影响必须足够大以产生涡破碎,保证火焰通过破碎的涡进入到预混段;预混段中涡核内的火焰能够维持稳定,而不发生熄火。下面分别从旋流数对流场特性和火焰特性两方面的影响来深入分析。

3.2 负切向涡量分析

CIVB 回火过程中的一个重要特征就是涡破碎,因此使用涡量输运方程来描述流场

$$\frac{D\omega}{Dt} = (\omega \nabla) U - \omega (\nabla U) + \frac{1}{\rho^2} (\nabla \rho \times \nabla p) + \nu \nabla^2 \omega \quad (5)$$

涡量输运方程表达涡量的输运、产生和消耗,公式(5)右边依次表示涡量的拉伸项、膨胀项、斜压扭矩项、粘性耗散项。在二维流场中,涡量的拉伸项为0;膨胀项和斜压扭矩项仅存在于热态流场中;在高 Re 数流动中,粘性耗散项可忽略不计^[34]。因此,对于本文的二维等温流场的涡量只取决于边界条件,而热态流场的涡量取决于边界条件和燃烧条件。本文中边界条件的变化只有旋流数,燃烧条件的变化只有当量比。

图7显示了旋流数 $Sn=0.413$ 时流场中负切向涡量的分布特点,蓝线为轴向速度为0的等值线,代表回流区的边界;黑线为温度为1100K的等温线,代表火焰的锋面。图7(a)的等温流场中,回流区滞止点附近很小的区域内存在很强的负切向涡量,根据Bi-ot-Savart定律^[35],负切向涡量诱导出负的轴向速度 w_{ind}

$$w_{ind}(x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{r^2 \eta(r^*, x^*)}{[r^{*2} + (x - x^*)^2]^{1.5}} dr^* dx^* \quad (6)$$

式中 $x^* = x/r_0$, $r^* = r/r_0$, r_0 为回流区半径。正是由于负切向涡量诱导出负的轴向速度,才触发了VB,最终形成时均稳定的回流区,所以流场中负切向涡量的绝对值的最大值是一重要参数,在下面分析中用 $|\eta|_{max}$ 表示。在二维轴对称流场中,切向涡量的表达式为

$$\eta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial r} \quad (7)$$

旋流数增加,等温流场的 $|\eta|_{max}$ 增加,如图8所示。

图7(b)显示当量比 $\Phi=0.2$ 时,与等温流场相比 $|\eta|_{max}$ 有所增加,诱导回流区向上游移动一定距离,火焰附着在回流区附近,保持稳定。根据公式(5)分析, $|\eta|_{max}$ 增加是由于膨胀项和斜压扭矩项的作用。持续增加当量比至发生CIVB回火,在此过程中, $|\eta|_{max}$ 先缓慢增加,当 $\Phi > \Phi^*$ 时, $|\eta|_{max}$ 迅速大幅增加,当 $\Phi = \Phi_{cri-f}$ 时, $|\eta|_{max}$ 达到最大值,此时火焰充满整个预混段,如图9所示。当 $\Phi = \Phi^*$ 时,预混段出口处的回流区已经开始变窄,将要发生涡破碎,CIVB回火过程已经触发,如图7(c)所示。实际上, $\Phi_{cri-f} - \Phi^* = 0.003$, $\Phi^* \approx \Phi_{cri-f}$ 。

当 $\Phi = \Phi^*$ 即CIVB回火触发时,不同旋流数下流场的 $|\eta|_{max}$ 如图8所示,对应图6分为两个区域。I区:旋流数增加,回火触发时流场的 $|\eta|_{max}$ 处于同一水平 $C \approx 55000 s^{-1}$ 。II区:旋流数进一步增加,回火触发时流场的 $|\eta|_{max}$ 不断增加。可见,发生CIVB回火时流场

气动特性满足一定的涡破碎条件,即 $|\eta|_{max} \geq C$ 。如前文所述,流场的 $|\eta|_{max}$ 正比于旋流数,因此从流场涡破碎的角度分析,旋流数增加促进CIVB回火。

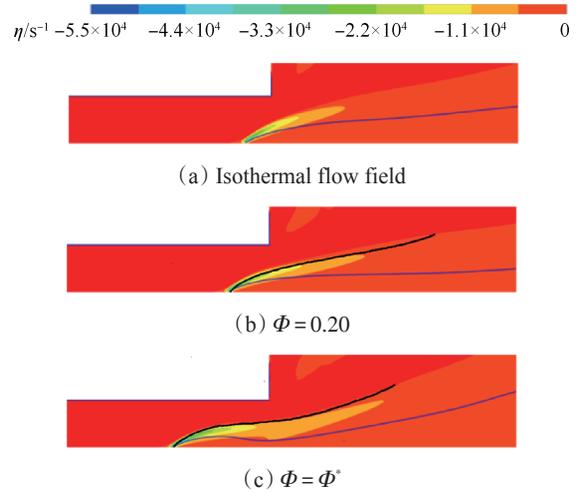


Fig. 7 Negative azimuthal vorticity distributions

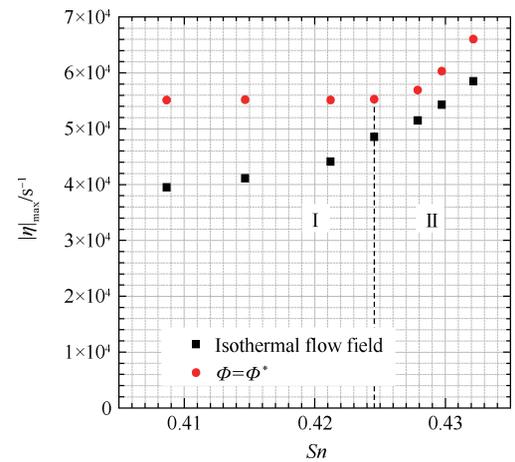


Fig. 8 $|\eta|_{max}$ at different swirl numbers

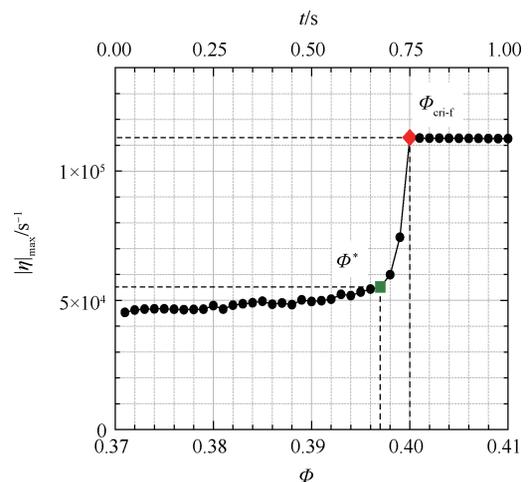


Fig. 9 $|\eta|_{max}$ during CIVB flashback

3.3 火焰燃烧特性分析

湍流火焰速度 S_T 是湍流脉动速度 u' 和层流火焰速度 S_L 的函数^[36]。Abdel-Gayed 等^[37]测量了常压下丙烷火焰在不同当量比下的 S_T 随 u' 的变化趋势, S_T 随着 u' 增加先增加, 达到最大值后减小, 整体趋势呈抛物线的形状, 然后因为火焰拉伸效应和局部熄火开始起主导作用而趋向猝熄。Kido 等^[36]测得各种燃料组分在不同当量比下的湍流火焰速度是湍流强度的函数, 显示 Le 数(热扩散系数与组分扩散系数之比)越小, u' 对 S_T 的影响越大。对湍流雷诺数大于 300 的湍流预混火焰的完全猝熄满足^[38]

$$Ka \cdot Le = 1.5 \quad (8)$$

式中 Ka 是 Karlovitz 数。由式(8)可知 Le 数越低, 火焰抗熄火能力越强。甲烷的 $Le \approx 1.0$, 而氢气的 $Le \approx 0.3$, 可见氢气具有优先扩散的特性, 使流场的 u' 对氢气的 S_T 和熄火特性影响更大。

旋流数对流场湍流强度的影响如图 10 所示, 旋流数增加, $x = -1.2D$ 截面上流场的 u' 有所增加, 回流区头部的脉动速度最大, 而且 u'_{\max} 随旋流数增加而增加的幅度最大, 因此对此处的湍流燃烧火焰有重要影响。旋流数增加, u'_{\max} 增加, 氢气预混火焰的 S_T 先增加后减小, 最后趋于猝熄, 图 6 II 区中旋流强度的逐渐增加, 足以产生涡破碎, 保证火焰通过破碎的涡进入到预混段, 但此区域涡核内熄火才是控制 CIVB 回火的最主要因素, 一旦在反应区内的已燃气体卷吸冷的未燃混合物导致熄火, CIVB 回火便会被阻止, 这时 CIVB 回火极限也就是进入预混段的涡核内火焰的熄火极限。图 6 中的熄火极限 $\Phi_{\text{ext-g}}$ 是指在火焰筒中正常燃烧的火焰的熄火极限, 从另一方面体现了旋流数通过影响湍流强度对火焰猝熄的影响。因此从湍流火焰燃烧特性的角度分析, 旋流数增加先促进 CIVB 回火后抑制回火。

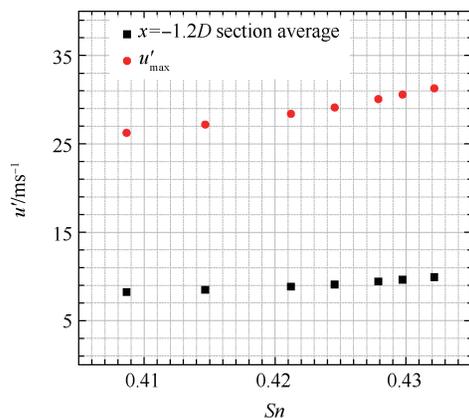


Fig. 10 Variation of turbulent intensity with swirl strength

对于氢气预混火焰的 CIVB 回火, 从流场涡破碎的角度分析, 旋流数增加促进回火; 从火焰燃烧特性的角度分析, 旋流数增加先促进回火后抑制回火。旋流数较低时, 等温流场的负切向涡量较小, 涡破碎条件占主导地位; 旋流数较大时, 一旦在反应区内的已燃气体卷吸冷的未燃混合物导致熄火, CIVB 回火便会被阻止, 因此涡核内熄火对回火的抑制作用占主导地位。在流场和火焰特性的共同作用下, 旋流数增加对氢气预混火焰 CIVB 回火的影响趋势是: 先促进回火后抑制回火。

提高氢气预混火焰的 CIVB 回火极限可以从两方面着手: (1) 减小旋流数, 通过减弱负切向涡量来抑制回火, 需要同时考虑对掺混均匀度和火焰长度的影响。(2) 增加旋流数, 通过增加湍流脉动速度使涡核内熄火来抑制回火, 此时要兼顾回流区的位置和熄火极限。

4 结论

通过本文研究, 得到以下结论:

(1) 对于无中心体旋流预混喷嘴中氢气火焰的 CIVB 回火, 旋流数从 0.409 增加到 0.432 先促进回火后抑制回火。

(2) 旋流强度改变使流场特性和火焰特性同时受到影响, 旋流数增加使流场的负切向涡量增加, 促进涡破碎; 旋流数增加也使湍流强度增加, 氢气湍流火焰速度随之先增加后减小, 最后趋于猝熄, 两方面共同决定了旋流强度对氢气预混火焰 CIVB 回火的影响趋势。

(3) 发生 CIVB 回火必须同时满足两个条件: ① 流场条件即负切向涡量必须足够大以产生涡破碎, 文中其数值约为 $5.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。② 火焰条件即涡核内火焰必须维持稳定而不发生熄火。

(4) 获得喷嘴旋流数对氢气预混火焰 CIVB 回火的影响趋势线后, 在拐点前减小旋流数或在拐点后增加旋流数均可提高 CIVB 回火极限。

参考文献:

- [1] Eroglu A, Döbellig K, Joos F, et al. Vortex Generators in Lean Premix Combustion [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, 123(1): 41-49.
- [2] Lefebvre A H, Ballal D R. Gas Turbine Combustion [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [3] Derek D R. Lean Combustion Technology and Control [M]. Boston: Academic Press, 2008.

- [4] Lieuwen T, McDonnel V, Petersen E, et al. Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustion Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130 (1): 011506-10.
- [5] 毛宗强. 氢能——21世纪的绿色能源[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [6] Boris E G, Mikhail V S, Sergey P M, et al. Thermo-Gas Dynamics of Hydrogen Combustion and Explosion [M]. *Berlin: Springer*, 2012.
- [7] Benim A C, Syed K J. Flashback Mechanisms in Lean Premixed Gas Turbine [M]. *Amsterdam: Elsevier*, 2015.
- [8] Kröner M, Fritz J, Sattelmayer T. Flashback Limits for Combustor Induced Vortex Breakdown in a Swirl Burner [R]. *ASME GT 2002-30075*.
- [9] Kröner M, Sattelmayer T, Fritz J, et al. Flame Propagation in Swirling Flows Effect of Local Extinction on the Combustion Induced Vortex Breakdown [J]. *Combustion Science and Technology*, 2007, 179(7): 1385-1416.
- [10] Konle M, Kiesewetter F, Sattelmayer T. Simultaneous High Repetition Rate PIV-LIF-Measurements of CIVB Driven Flashback [J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44 (4): 529-538.
- [11] Burmberger S, Hirsch C, Sattelmayer T. Designing a Radial Swirler Vortex Breakdown Burner [R]. *ASME GT 2006-90497*.
- [12] Shelil N, Griffiths A, Bagdanavicius A, et al. Flashback Limits of Premixed H₂/CH₄ Flames in a Swirl-Stabilized Combustor [R]. *ASME GT 2010-23623*.
- [13] Noble D R, Zhang Q, Shareef A, et al. Syngas Mixture Composition Effects upon Flashback and Blowout [R]. *ASME GT 2006-90470*.
- [14] 田晓晶, 崔玉峰, 房爱兵, 等. 预混段结构对氢燃料旋流预混燃烧诱导涡破碎回火极限影响的数值研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(8): 1276-1284.
- [15] 田晓晶, 崔玉峰, 邢双喜, 等. 预混段结构对旋流预混氢火焰回火形式影响的数值研究 [J]. *推进技术*, 2015, 36 (3): 345-351. (TIAN Xiao-jing, CUI Yu-feng, XING Shuang-xi, et al. Numerical Investigation on Effects of Mixing Zone Structure on Flashback Type for Swirl-Premixed Hydrogen Flame [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(3): 345-351.)
- [16] 田晓晶. 氢燃料旋流预混火焰燃烧诱导涡破碎回火特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [17] 田晓晶, 崔玉峰, 邢双喜, 等. 基于试验设计方法对氢燃料 CIVB 回火的多参数数值分析 [J]. *推进技术*, 2016, 37(6): 1098-1197. (TIAN Xiao-jing, CUI Yu-feng, XING Shuang-xi, et al. Numerical Investigation of Effects of Multi-Factors on CIVB Flashback for Hydrogen Fuel Based on Design of Experiments Method [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37 (6): 1098-1197.)
- [18] Konle M, Sattelmayer T. Interaction of Heat Release and Vortex Breakdown in Swirling Flames [C]. *Lisbon: Proceedings of the 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 2008.
- [19] Cheng R K, Littlejohn D, Strakey P A, et al. Laboratory Investigations of a Low-Swirl Injector with H₂ and CH₄ at Gas Turbine Conditions [C]. *Karlsruhe: Proceedings of the Combustion Institute*, 2009: 3001-3009.
- [20] Blesinger G, Koch R, Bauer H J. Influence of Flow Field Scaling on Flashback of Swirl Flames [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(3): 290-298.
- [21] Dam B, Corona G, Hayder M, et al. Effects of Syngas Composition on Combustion Induced Vortex Breakdown (CIVB) Flashback in a Swirl Stabilized Combustor [J]. *Fuel*, 2011, 90(11): 3274-3284.
- [22] De A, Acharya S. Parametric Study of Upstream Flame Propagation in Hydrogen-Enriched Premixed Combustion: Effects of Swirl, Geometry and Premixedness [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37: 14649-14668.
- [23] Baumgartner G, Sattelmayer T. Experimental Investigation of the Flashback Limits and Flame Propagation Mechanisms for Premixed Hydrogen-Air Flames in Non-Swirling and Swirling Flow [R]. *ASME GT 2013-94258*.
- [24] Sayad P, Schönborn A, Li M, et al. Visualization of Different Flashback Mechanisms for H₂/CH₄ Mixtures in a Variable-Swirl Burner [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2014, 137(3).
- [25] Utschick M, Eiringhaus D, Köhler C, et al. Predicting Flashback Limits of a Gas Turbine Model Combustor Based on Velocity and Fuel Concentration for H₂-Air Mixtures [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 139(4).
- [26] Fritz J, Kröner M, Sattelmayer T. Flashback in a Swirl Burner with Cylindrical Premixing Zone [R]. *ASME GT 2001-0054*.
- [27] Kiesewetter F, Hirsch C, Fritz J, et al. Two-Dimensional Flashback Simulation in Strongly Swirling Flows [R]. *ASME GT 2003-38395*.
- [28] Tangermann E, Pfitzner M. Numerical Investigation of Flame Flashback into Swirling Flow [R]. *ASME GT 2008-51081*.
- [29] 郑韞哲, 朱 民, 姜 羲. 合成气旋流预混燃烧的大涡模拟 [J]. *推进技术*, 2013, 34 (5): 665-671. (ZHENG Yun-zhe, ZHU Min, JIANG Xi. Large Eddy

- Simulation of Premixed Swirling Combustion with Synthesis Gases [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(5): 665-671.)
- [30] 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 Ze-jun, HE Xiao-min, GE Jia-wei, et al. Numerical Simulation of Flashback of Premixed CH₄/Air Flame[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(9): 1347-1354.)
- [31] Marinov N M, Westbrook C K, Pitz W J. Detailed and Global Chemical Kinetics Model for Hydrogen [J]. *Transport Phenomena in Combustion*, 1996, (1): 118-124.
- [32] Tian X J, Xing S X, Cui Y F, et al. CIVB Flashback Analysis of Hydrogen Flame Based on Azimuthal Vorticity at Mixing Zone Exit[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2014, 57(12): 2466-2474.
- [33] 林宇震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [34] 童秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [35] Brown G L, Lopez J M. Axisymmetric Vortex Breakdown Part 2, Physical Mechanisms[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 221: 553-576.
- [36] Kido H, Nakahara M, Nakashima K, et al. Influence of Local Flame Displacement Velocity on Turbulent Flame Velocity [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29: 1855-1861.
- [37] Abdel-Gayed R G, Bradley D, Hamid M N, et al. Lewis Number Effects on Turbulent Burning Velocity [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1984, 20: 505-512.
- [38] Abdel-Gayed R G, Bradley D. Combustion Regimes and the Straining of the Turbulent Premixed Flames [J]. *Combustion and Flame*, 1989, 76: 213-218.

(编辑: 史亚红)