

来流预混均匀性对湍流射流火焰回火特性的影响

李丹, 吕海陆, 张扬, 张海, 周托, 吕俊复

(清华大学 能源与动力工程系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 微混燃烧器的可燃气体预混发生在距燃烧器喷嘴出口较近的地方, 可燃气体在喷嘴出口可能存在一定的不均匀性, 对回火的影响值得关注。使用高速摄像和纹影法实验观测了4种燃料预混方式对氢气(H_2)、一氧化碳(CO)和空气湍流射流火焰回火特性的影响, 并使用粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术测量了回火条件下的出口流场, 结果表明在不同预混方式下, 湍流射流火焰的回火都属于边界层回火, 混合均匀性不影响湍流射流火焰回火机理。高速摄像结果显示, 回火前接近化学当量状态下, 预混火焰周围呈蓝色且存在扩散火焰层, 而混合程度最劣条件下的一侧扩散火焰呈明显的橘红色, 加之回火开始于同侧, 表明该侧氢气浓度较高; 随着混合均匀性改善, 橘红色扩散火焰逐渐消失, 发生回火的起始位置呈随机性。通过纹影图像能较清晰地分辨回火发生的时刻和位置, 观测的回火过程用时与高速摄像结果一致。不同来流预混方式的回火速度范围存在一定差异, 来流混合程度差更容易发生回火。结合PIV测量结果分析表明: 来流预混形式对喷嘴附近气流速度场影响不大, 其对回火的影响主要体现在浓度分布的变化, 主要因素是壁面附近火焰传播速度的改变。

关键词: 富氢燃料气; 来流气体混合均匀性; 湍流射流火焰; 回火; 流场特性

中图分类号: 中图分类号: TP91 文献标志码: A 文章编号: 1000-0054(2023)04-560-00

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.25.006

燃料掺氢燃烧是一种低污染燃烧技术, 但由于氢气(H_2)火焰传播速度较快, 氢气的存在使预混燃烧发生回火(指火焰从燃烧室回传进入预混区的一种现象^[1-2])的风险大大增加。目前对预混火焰回火已开展了较多实验、模拟和理论研究工作, 如以火焰流动状态为依据, 可将预混火焰回火划分为层流和湍流火焰回火; 以燃料类型为参考, 则可将来流主要划分为碳氢燃料(C_xH_y)、碳氢燃料和氢气($C_xH_y + H_2$)混合物以及一氧化碳和氢气($CO + H_2$)混合物。在火焰回火特性方面, 研究内容涉及氢气掺混比例^[3-5]、喷嘴直径^[1, 5-8]、壁厚和材质^[1, 6]、燃烧器内部结构^[9-10]、旋流^[4, 11-12]、声激励^[3, 11]、来流温度^[13-14]和压力^[15-16]等因素。在实验研究中来流预混气体采用了多种混合方式, 如静置^[17]、使用三通管^[18]和混合室^[5]等混合气体方式。不论哪种预混方式, 现有研究都认为来流在燃烧器出口已达组分均匀状态, 忽略了预混方式对出口来流混合均匀性的影响。

在近代燃气轮机的燃烧系统中常采用预混燃烧方式, 燃料与空气(氧化剂)预混后以湍流射流的形式射入燃烧室, 燃料与空气的混合程度决定预混射流的点火性能、火焰稳定性和污染物排放等问题, 进而影响整体性能及其可靠性。已有研究表明, 喷嘴出口(简称喷嘴)气体的不均匀性对下游流场及其燃烧有重要影响。杨国华等^[19]利用丙酮平面激光诱导荧光(planar laser-induced fluorescence, PLIF)技术研究了不同速度比下直流离心喷嘴的气-气混合特性, 获得了喷嘴下游各种气体的混合比分布和浓度分布情况, 结果表明离心喷嘴与直流喷嘴的气流速度之比高于某一临界值时, 可获得较好的混合效果。俞瑜^[20]对低旋流部分预混燃烧器喷嘴的气体混合特性开展实验研究, 获得了不同驱动压力条件下气体的分布情况。周森^[21]通过示踪PLIF技术测量了非预混流场中燃料和空气之间的混合比分布特性, 分别获得了静止和动态空气条件下气体混合比分布的定量结果。Williams等^[22]对汽

收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-III-0018-0062); 国家自然科学基金项目(52176116); 清华大学山西清洁能源研究院创新种子基金(20182000335)。

作者简介: 李丹(1991—), 女, 博士研究生。

通信作者: 张扬, 副教授, E-mail: yang-zhang@tsinghua.edu.cn

油发动机中缸内的燃料/空气混合状态开展了实验研究。Lind 等^[23]以三乙胺和丙酮混合蒸汽作为示踪剂对内燃机中缸内燃料/空气混合比、温度、废气和空气浓度等开展了同步标定测量。此外,刘金彪^[24]研究了气体的混合均匀性对其爆炸特性的影响规律。

综上所述,此前已在多方面开展了非预混湍流射流火焰中气体混合特性的研究,但尚未出现关于预混气体来流混合均匀性对射流火焰回火特性影响的相关报道。微混燃烧器技术在燃气轮机中的应用日益普遍,该技术使用较小的喷管,且可燃气体预混发生在距燃烧器喷口较近处^[25-26],因此可燃气体在喷口可能存在一定的不均匀性,对回火的影响值得关注。本文以富氢一氧化碳(CO)和氢气混合气自发湍流射流火焰回火为研究对象,设计了4种氢

气、一氧化碳和空气的预混方式,考察了来流混合均匀性对湍流射流火焰回火特性的影响,研究成果可对燃烧装置及其防回火设计提供参考。

1 实验系统和方法

图1为实验系统示意图,实验系统主要包括气体供应、流量控制、气体混合、单喷嘴燃烧器、观察和测量等装置。单喷嘴燃烧器由石英管制成,内径为10 mm,长度为100 mm,以确保进行充分流动。燃料气体由一氧化碳(99.9%)和氢气(99.9%)组成,氢气体积分数为50%,氧化剂由压缩空气机提供,参考实际工业应用情况,选择贫燃(当量比 $\phi \approx 0.6$)和接近化学当量状态($\phi \approx 1.0$)2种工况开展实验。各路气体流量通过音速喷嘴流量计进行控制。

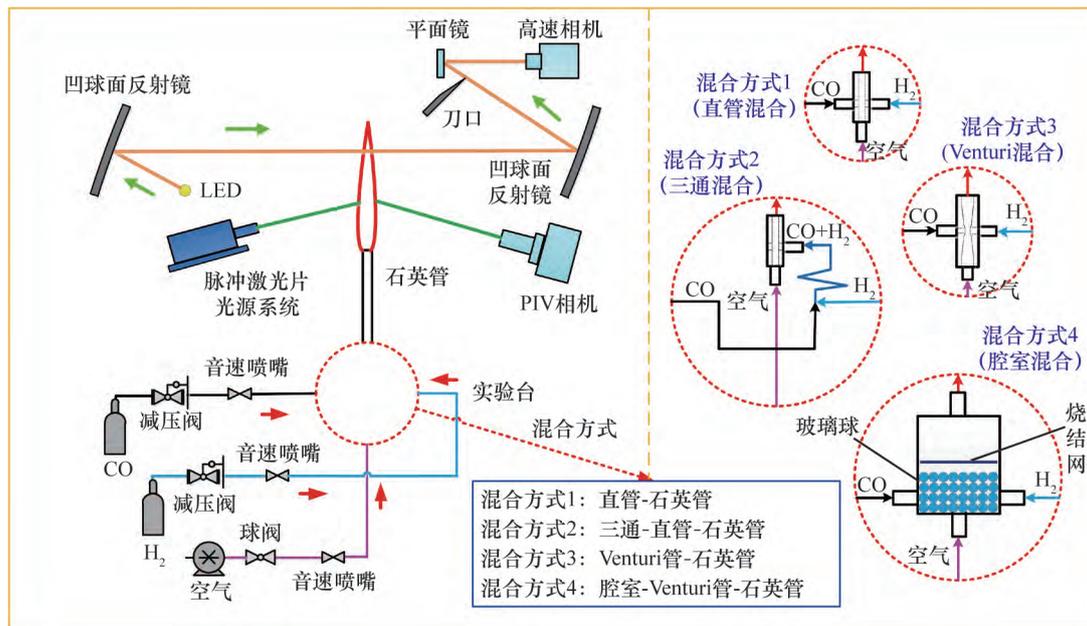


图1 实验系统示意图

为研究来流混合均匀性对湍流射流预混火焰回火特性的影响,通过设置不同的混合方式将氢气、一氧化碳和空气的混合定性分为4种,并按照混合方式1—4分别进行定义(见图1)。其中:混合方式1为直管混合,燃料(氢气、一氧化碳)和空气直接通过一个直管通入石英管中;混合方式2为三通混合,燃料首先通过三通接头汇入一段聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)管,然后再与空气通过直管通入石英管;混合方式3为Venturi混合,燃料和空气通过Venturi管通入石英管中;混合方式4为腔室混合,燃料和空气首先通入装有玻璃球和烧结网的腔室(约0.6 L)进行混合,之后再通过Venturi管通入石英管。混合点与喷口的距离大约

为140 mm,贫燃和接近化学当量状态下气流的停留时间分别约为0.016和0.012 s。随着混合方式1—4的升级,气体混合均匀性逐渐增强。

实验步骤如下:开启一氧化碳减压阀向燃烧器供气,调节流量至略高于设定值并同时点火,在喷口形成稳定的蓝色附着扩散火焰;开启氢气减压阀,调节流量至1.0—1.3 L/min,可观察到火焰高度降低,同时蓝色火焰中伴有橙红色火焰(主要由水蒸气辐射发光引起);快速调节空气流量至约10.0 L/min,确保获得稳定的附着预混火焰;将空气和氢气流量逐次交替调节至设定值;最后逐渐调节空气流量直至发生回火,定义此时的射流喷口平均气流速度为回火速度 U_f 。每组实验至少重复3

次, 实验中回火速度范围为 8~14 m/s, 回火发生时混合气体射流出口平均 Re 为

$$Re = U_t d / \nu. \quad (1)$$

其中: d 为喷嘴内径; ν 为混合气体的运动黏度(计算方法参见文[27]), Re 范围为 4 800~7 900。

确定回火现象的发生除通过实验现象直接观察外, 还在喷口附近外壁面处布置了一根 K 型热电偶(喷口上游约 2 mm)辅助观察回火发生时喷口边缘温度出现的突跃。

回火过程通过 NR3-S2 高速摄像机进行捕捉, 帧率设为 250 Hz。使用一套“Z 形”纹影系统观察回火过程中流场的动态特性, 主要包括 1 个 LED 点光源、2 个凹球面反射镜(直径约为 200 mm、焦距约为 1 800 mm)、1 个平面镜、刀口和高速摄像机(参数同上)。纹影图像反映的是流场折射率的一阶导数在空间的分布情况^[28]。利用二维粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)系统对喷口附近冷态流场的速度场进行测量, 波长为 532 nm 的激光光束由脉冲激光器发出, 脉宽最小可调至 nm 量级, 在观测区形成高约 20 mm、厚约 0.5 mm 的片光, 照亮流场中的示踪粒子, 示踪粒子为平均直径 3 μm 的甲基硅油油滴。使用互相关算法对 2 幅粒子图像进行计算, 以获得二维瞬态速度场信息。

2 结果与讨论

2.1 回火过程

图 2 所示为接近化学当量状态时, 气体不同混合方式下回火现象发生之前的湍流射流附着火焰图像。该工况下回火速度约为 12 m/s, 对应的射流出口平均 Re 约为 7 900。由图可知, 接近化学当量状态下蓝色预混火焰周围存在扩散火焰层, 且值得注意的是, 混合方式 1 中(见图 2a)扩散火焰右侧呈明显的橘红色, 为典型的氢气扩散火焰, 该现象表明火焰右侧氢气浓度较高; 混合方式 2 中(见图 2b)图像右侧的扩散火焰呈淡红色, 表明火焰右侧氢气浓度相较于混合方式 1 有所下降; 在混合方式 3 和 4 中(见图 2c 和 2d), 可见扩散火焰颜色已变得较为均匀。此外, 测量了不同混合方式下的蓝色预混火焰高度, 混合方式 1 的火焰高度大于 20 mm, 超出拍摄视场(见图 2a), 混合方式 2—4(见图 2b—2d)的火焰高度呈轻微下降趋势, 混合方式 4 的火焰高度约 16 mm。上述结果分别从定性和定量角度, 分析了由混合方式不同引起的气体混合均匀程度的变化。

图 3 所示为贫燃状态时气体不同混合方式下回火现象发生之前的湍流射流附着火焰图像, 回火速度约为 9 m/s, 对应的射流出口平均 Re 约为 5 700。随着混合方式的变化, 预混火焰高度变化趋势与接近化学当量状态时的结果(见图 2)相似, 不同之处在于, 贫燃状态蓝色预混火焰外围无明显的扩散火焰层, 难以通过火焰颜色判断气流混合的均匀性。

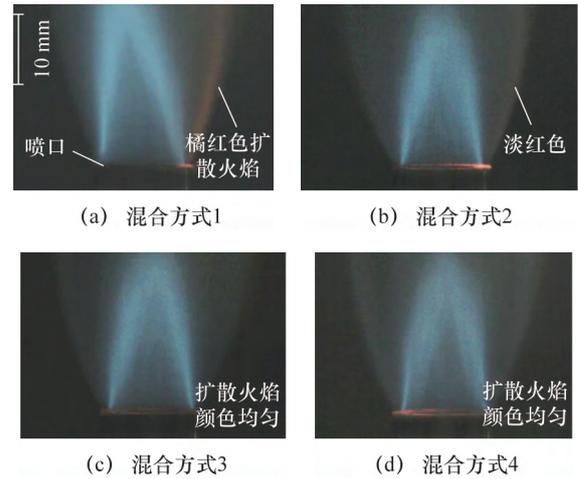


图 2 接近化学当量状态时不同混合方式下回火之前湍流射流附着火焰图像($U_t \approx 12$ m/s)

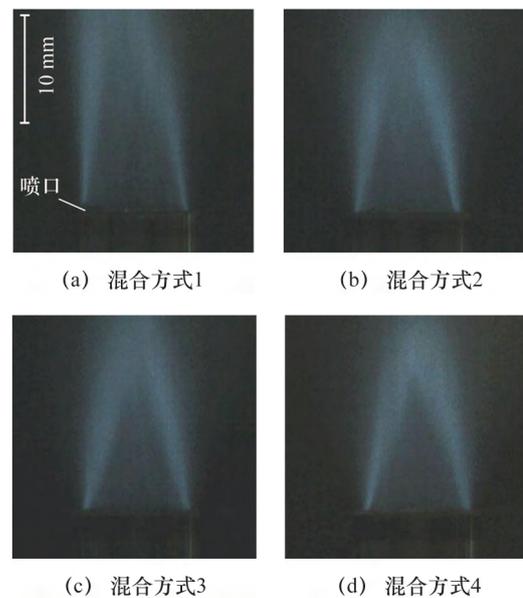


图 3 贫燃状态时不同混合方式下回火之前湍流射流附着火焰图像($U_t \approx 9$ m/s)

本实验条件下, 根据实验现象将湍流射流火焰的回火过程统一划分为“回火前”“回火中”和“回火后”3 个阶段: 将回火现象发生之前的阶段称为“回火前”; 当火焰根部开始向喷嘴上游方向传播时, 认为回火现象发生, 直至火焰完全进入管内或不再继续向管内传播时, 认为回火阶段结束, 并将这一过

程称为“回火中”;回火结束之后的阶段称为“回火后”。

图4给出了典型富氢燃料气湍流射流混合方式2和3预混火焰在接近化学当量状态下的回火过程图像,其中 t 表示时间。由图4a可知, $t=4\text{ ms}$ 时,附着在燃烧器喷口附近的火焰根部开始沿管壁一侧向管内移动,此时发生回火。该现象与层流射流火焰中发生的边界层回火相似,表明混合均匀性对湍流火焰回火机理影响不大。回火开始于右侧火焰根部,表明右侧火焰传播速度较高,进一步验证了混合方式2下火焰右侧氢气浓度较高的推论(见图2)。当 $4\text{ ms}\leq t\leq 24\text{ ms}$ 时,火焰沿管壁右侧逐渐向下传播; $t>24\text{ ms}$ 时,回火过程中火焰同时出现振荡和转动现象(沿管轴顺时针或逆时针转动); $t=48\text{ ms}$ 时,火焰完全回传进管内,回火阶段结束; $t>48\text{ ms}$ 为回火后阶段,火焰在管内任意位置不断振荡。由图4b可知,其回火过程与图4a的基本一致,但多次重复实验后发现在混合方式3下回火现象的起始位置表现出一定随机性,表明在该混合方式下局部区域单一气体浓度偏高的现象不明显,气流混合较为均匀。

图5为湍流射流贫燃状态下混合方式1和3预混火焰的回火过程。由图可知,除了火焰回传速度(可根据火焰回传入管内的距离和记录时间计算)存在差异外,整体回火现象以及回火过程中伴随的火焰振荡和转动特性均与图4类似。由于回火过程中火焰振荡较为剧烈,图5a“回火中”阶段用时明显长于图5b,与图4的接近化学当量状态结果相反,表明不同于回火速度,火焰回传速度随当量比变化的规律性不强。

图6为接近化学当量和贫燃状态下混合方式3的回火过程中喷嘴下游高温流场的纹影图像。由图可知,回火前和回火中阶段,射流离开喷口时都出现明显纹影条纹,条纹密度变化,表明此区域的温度场不均匀。纹影图像能较清晰地显示回火现象和回火的发生位置(见图6,黄色箭头标注处),回火发生时喷口附近的条纹会出现一定角度偏斜或一侧条纹明显减少的现象。随着回火的发生,喷口附近的条纹逐渐进入管内,不过此过程中也可能出现喷口附近条纹突然增多的现象(见图6b),主要由火焰

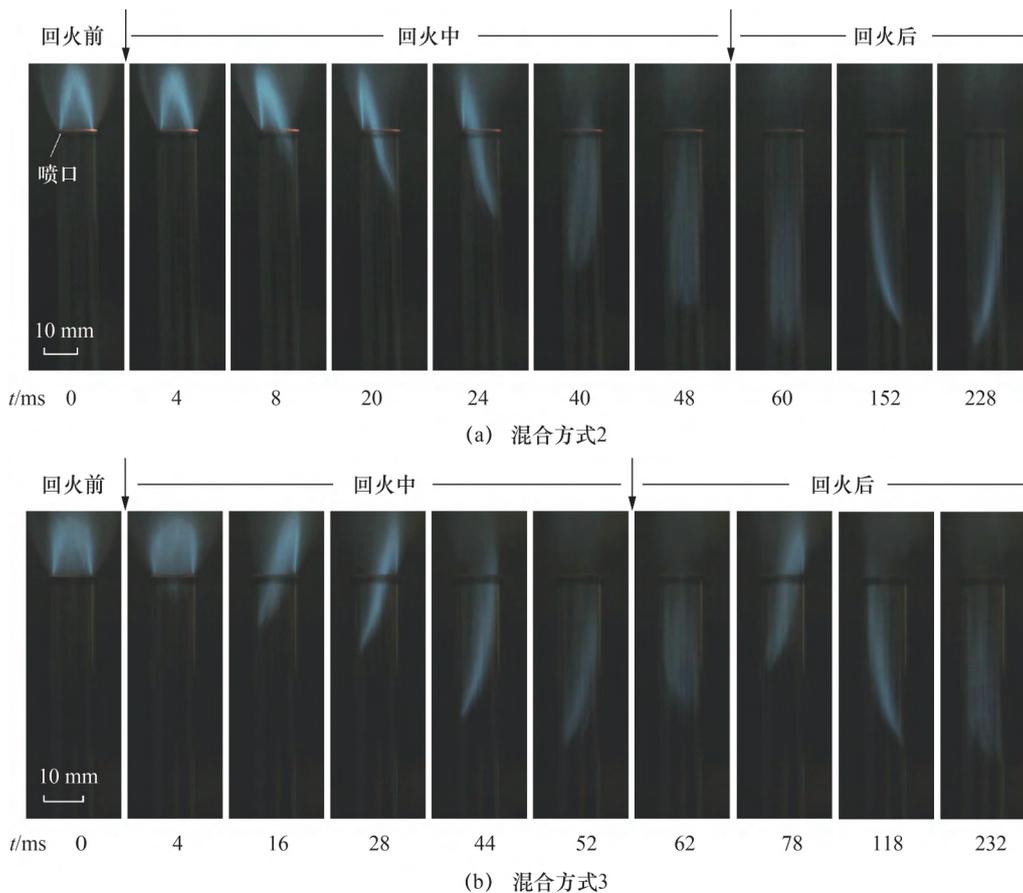


图4 接近化学当量状态的典型湍流射流预混火焰回火过程($U_f \approx 12\text{ m/s}$)

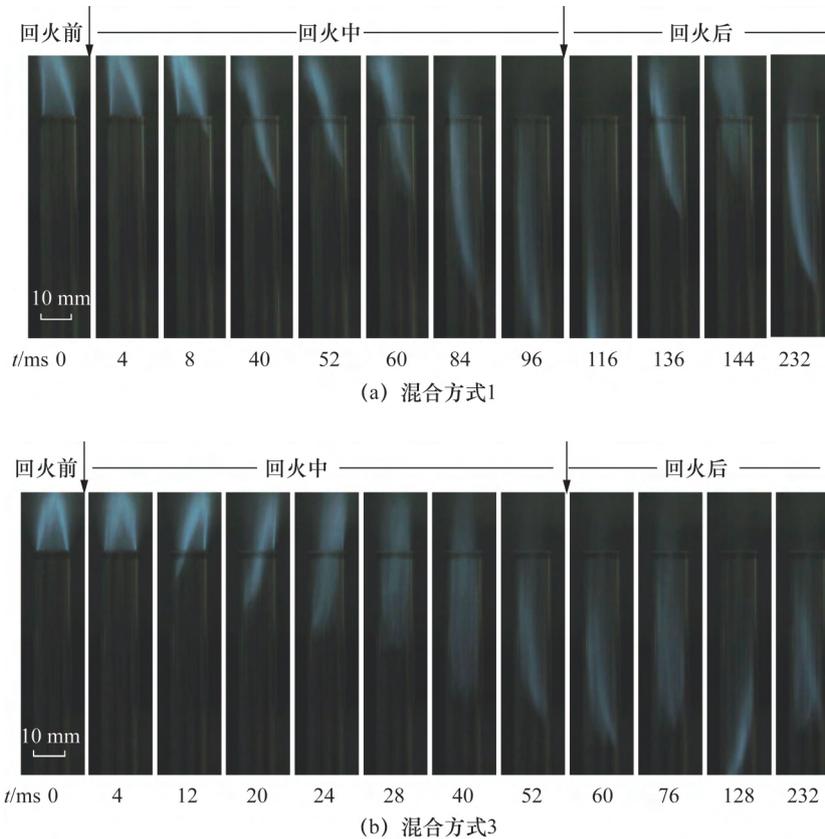


图5 贫燃状态下典型湍流射流预混火焰的回火过程($U_f \approx 9 \text{ m/s}$)

振荡所引起。回火过程中,喷嘴下游的高温流场变化显著,回火发生前,下游高温流场内包含少数大尺度涡结构,整体上紊流程度较低;随着回火的发生,尤其是回火后,喷嘴下游高温流场内逐渐出现了大量较小尺度的涡结构,表明湍流度显著增大,这与回火过程中火焰发生的振荡和转动现象密切相关。此外,对比纹影图像和直接拍摄图像可知,通过纹影图像判断得到的回火中的阶段与直接拍摄图像所得的结果基本一致。

图7为接近化学当量和贫燃状态下不同混合方式回火过程中火焰根部轴向位移 N 随时间的变化过程,图中实线与虚线表示重复实验中同种混合方式条件下的不同回火过程,不同的回火过程中火焰的行为有所差异。由图7a可知,在气体不同混合方式下轴向位移随时间的变化过程均为非线性,表明回火过程中火焰的回传速度并不均匀,如前所述,主要由回火过程中火焰发生的振荡和转动引起。此外,针对同一工况,经多次重复实验发现轴向位移随时间的变化过程存在较大不同,该现象的出现主要是因为回火过程中火焰的振荡形式和振荡幅度及转动方向和转动速度存在差异。由图7b可知,贫燃状态下轴向位移随时间的变化过程与图7a的接

近化学当量结果类似,但相较于接近化学当量状态,贫燃状态下存在回火过程更为顺畅的情况,此时火焰的回传速度也较为均匀。另外,由于火焰的振荡和转动特性,回传速度随混合方式的变化呈现无规律性。

图8为贫燃和接近化学当量状态下混合方式3回火发生前后喷口边缘温度 T 随时间的变化情况。由图可知,2种情况下回火发生时温度均出现突跃现象,由1节可知,该现象可作为判断回火现象发生的标志之一。

2.2 来流混合均匀性对回火特性的影响

如1节所述,本文利用不同混合方式将氢气、一氧化碳和空气之间的混合均匀性定性分为4种,并依次按混合方式1—4予以命名,其中混合方式1的混合程度最劣。实验过程按混合方式1—4(或4—1)的顺序开展,每一种混合方式重复3次以上实验。当调整混合方式时,首先将燃料和空气流量调至上一个混合方式的回火工况,此时若未出现回火,则通过微调空气流量至回火发生,重复多次实验获得该混合方式下的回火速度和当量比范围。

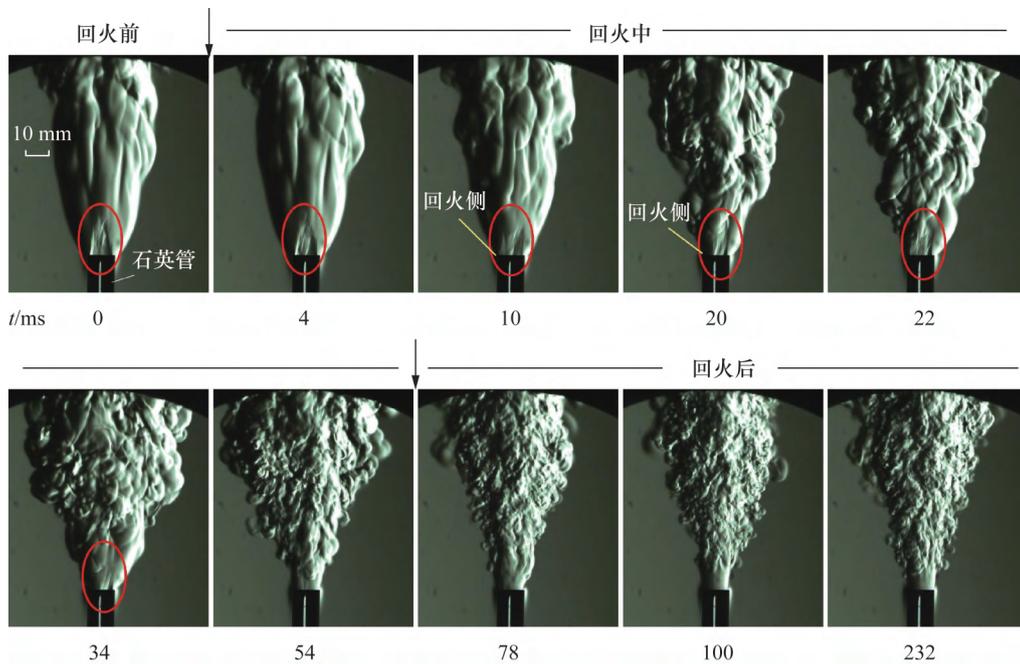
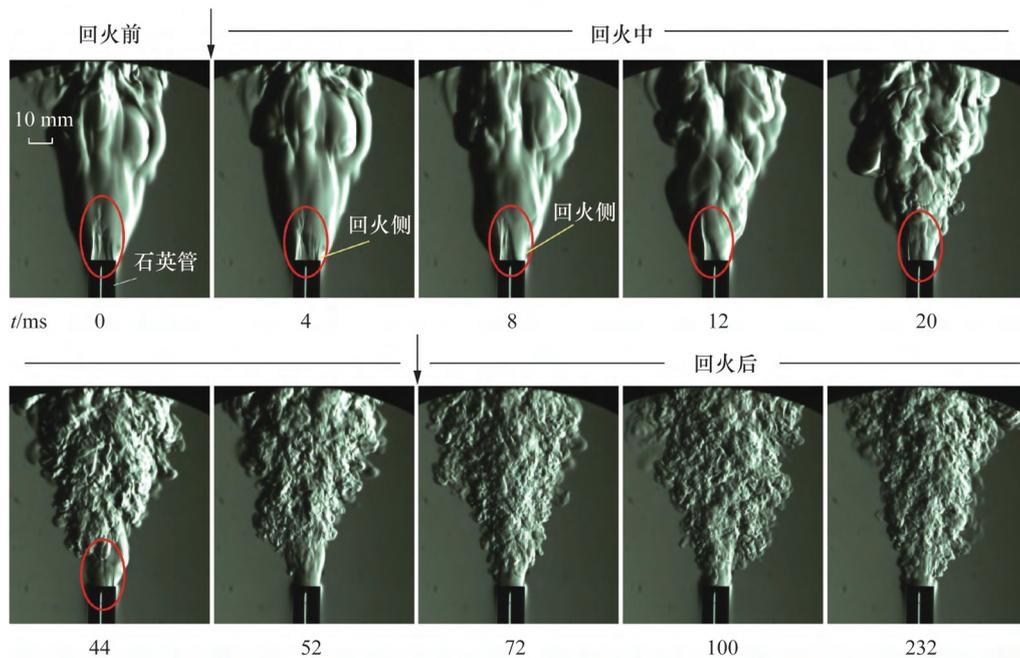
(a) 接近化学当量状态下 ($U_f \approx 12$ m/s)(b) 贫燃状态下 ($U_f \approx 9$ m/s)

图6 混合方式3湍流射流预混火焰回火过程中喷嘴下游高温流场的纹影图像

图9给出了不同氢气体积分数下混合气体(一氧化碳+氢气)层流预混火焰传播速度 S_L 随当量比的变化曲线,该曲线通过Chemkin软件计算获得,与文[29—30]的结果一致。图10a显示了接近化学当量状态时,不同混合方式下湍流火焰回火速度和当量比的范围,其中 U_j 为喷嘴出口平均气流速度。回火速度越高,表示越容易回火。由图10a

可知,不同混合方式下的回火速度存在显著差异,尤其是将燃料和空气直接通入燃烧器(混合方式1)与在燃烧器上游增加混合装置(混合方式2—4)这2类情况之间差异更为显著,在当量比增加约0.12时,回火速度反而下降约1.2 m/s。这表明湍流射流火焰的回火特性受燃料/空气之间混合均匀性的影响显著。据2.1节可知,本实验条件下湍流射流

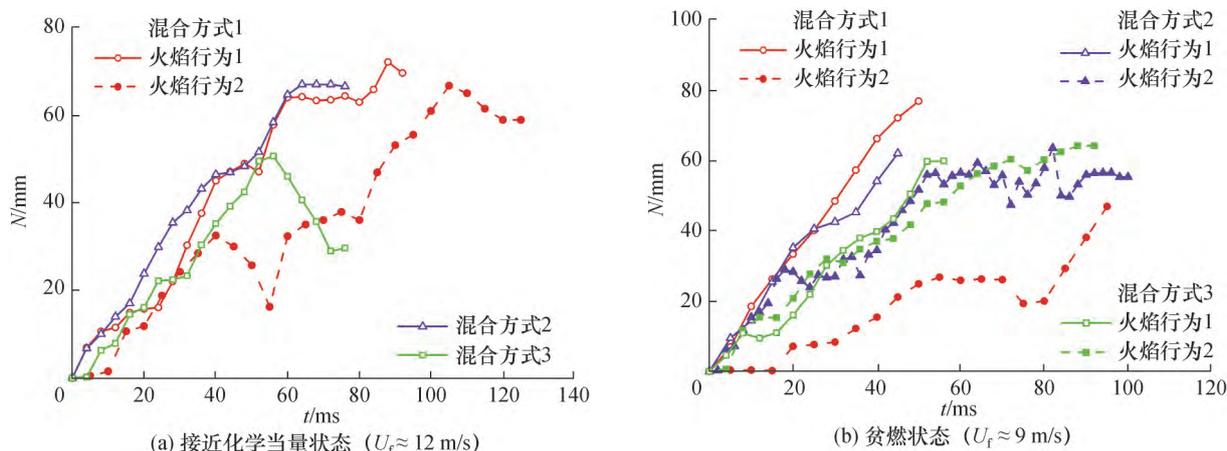


图7 回火过程中火焰根部轴向位移随时间的变化

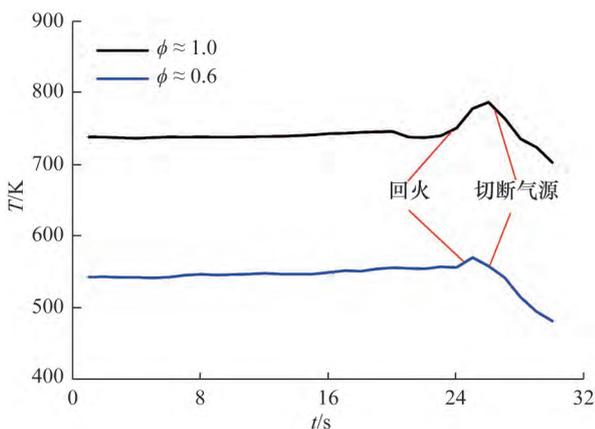


图8 混合方式3回火发生前后喷口边缘温度随时间的变化

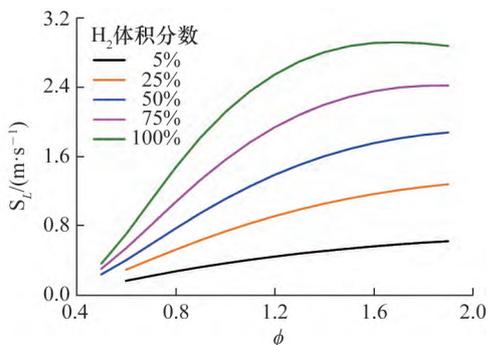


图9 一氧化碳和氢气预混气中不同氢气体积分数下层流预混火焰传播速度随当量比的变化

火焰回火的主要原因是喷口边缘附近的湍流火焰传播速度超过了局部气流速度(边界层回火)。在混合方式1条件下(见图1),3种气体仅靠沿途的湍流涡团和扩散进行混合,实验现象表明(见图2a),该混合条件下喷口附近一侧的氢气浓度偏高,由于氢气火焰传播速度比一氧化碳大得多(见图9),该条件下回火相对容易,且回火从氢气给入侧开始。混

合方式2的湍流火焰回火速度大幅下降。由于氢气和一氧化碳在燃烧器上游有所混合,则在喷口边缘附近的燃料中,氢气体积分数相较于混合方式1明显减小,使在该条件下局部湍流火焰传播速度小于混合方式1(见图9)。

混合方式4可进一步增加气体混合程度,由图10a可知,混合方式4的湍流火焰回火速度范围得到明显拓展,出现该现象的原因可能有3种:1)混合更均匀后,喷口边缘区域的燃料中氢气体积分数更接近掺入量50%,相比混合方式1可能有轻微下降;2)在混合方式3和4条件下,喷口边缘附近燃料/空气当量比更接近初始计算值,而在混合方式1条件下,燃料与空气的混合并不充分,喷口边缘附近的当量比可能明显大于初始计算值,甚至在很大程度上超过了混合方式3和4的结果;3)不同混合方式下喷口边缘处的局部气流速度可能也存在轻微的差别,具体细节将在本节后续的讨论中呈现。上述几种原因也可能相互耦合引起局部湍流火焰速度或局部来流速度出现轻微下降。

图10b为贫燃状态时不同混合方式下湍流火焰回火速度和当量比的范围。由图可知,不同混合情况下,湍流火焰回火速度的变化趋势大致与图10a相似。与图10a中接近化学当量状态的结果相比,图10b贫燃状态下混合方式1—4中回火速度和当量比的变化范围更窄(即: $\phi \approx 1.0$ 时,当 U_f 变化2.86 m/s,则 ϕ 变化0.32; $\phi \approx 0.6$ 时,当 U_f 变化1.74 m/s,则 ϕ 变化0.13);且混合方式2相较于混合方式1,回火速度和当量比分别减小和增大了约0.94 m/s和0.07,明显小于接近化学当量状态的结果。

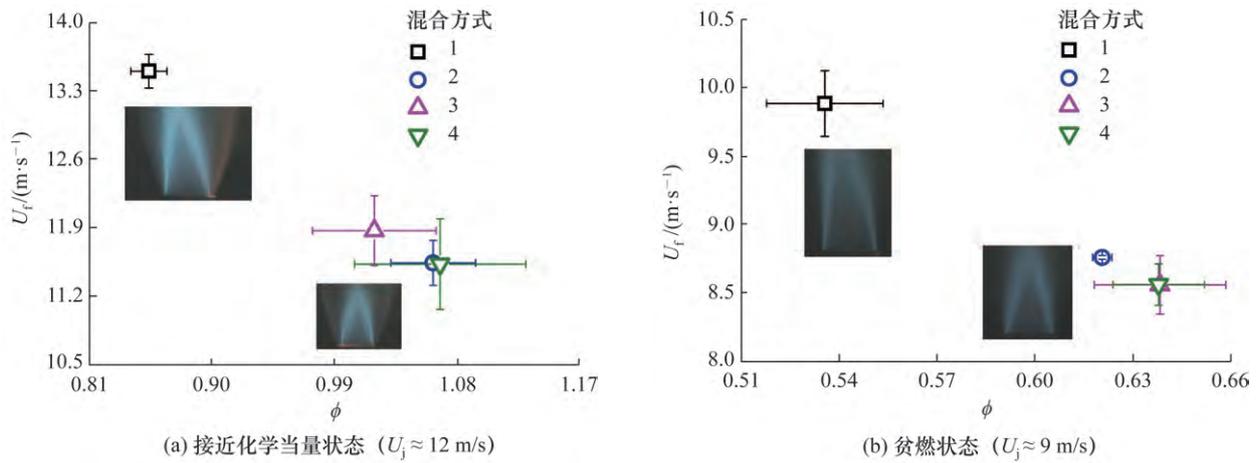


图 10 不同混合情况下回火速度与当量比范围

燃烧器喷口处来流速度场对于回火的发生至关重要^[7]。本文利用二维 PIV 技术测量了不同混合方式下贫燃和接近化学当量状态时燃烧器喷口附近的冷态气流速度,以考察混合均匀性的影响。选择 2 个平面开展实验,分别是中轴面 plane_0 和与之平行的一个平面 plane_1,二者之间垂直距离为 2.5 mm。图 11 所示为混合方式 1 喷口附近中轴面的典型的 PIV 图像和相应的速度矢量图,其中 r 和 h 分别表示中轴面的径向和轴向坐标。由图可知,湍流射流从喷嘴喷出并向下游发展,此过程中周围静止空气被不断卷吸进入射流内部区域。

图 12 所示为混合方式 1 下贫燃和接近化学当量状态时喷口附近不同高度处的轴向气流速度 u_h 分布情况。由图可知,喷口附近轴向气流速度沿径向呈帽状分布,为典型的圆管射流结果。此外,轴向高度为 2、8 和 12 mm 的气流,尤其是贫燃状态

下的气流速度变化不大。基于此,下文对不同混合方式下的速度分布特性作进一步分析时,选取 plane_0 或 plane_1 中轴向坐标介于 2—12 mm 之间的高度均合理。另外,对比图 12a 和 12b, plane_0 中轴向速度值较大,与实际情况相符。

图 13 为轴向坐标为 10 mm 接近当量和贫燃状态时不同混合方式下喷口附近 plane_1 归一化的轴向气流速度 u^* ($u^* = u_h / u_{max}$, u_{max} 为最大轴向气流速度)沿径向的分布。由于各混合方式下的结果差异较小,为醒目起见,图中仅对混合方式 1、2 和 4 结果进行比较。由图可知,不同混合方式下归一化速度均呈帽状分布,可见预混气体混合均匀性对喷口附近归一化速度分布的形状影响不大。值得注意的是,随着混合程度增大,相应归一化速度分布曲线出现略微地收缩,贫燃状态下的结果更为明显,如图 13b 所示,这将导致偏离中心轴线位置处

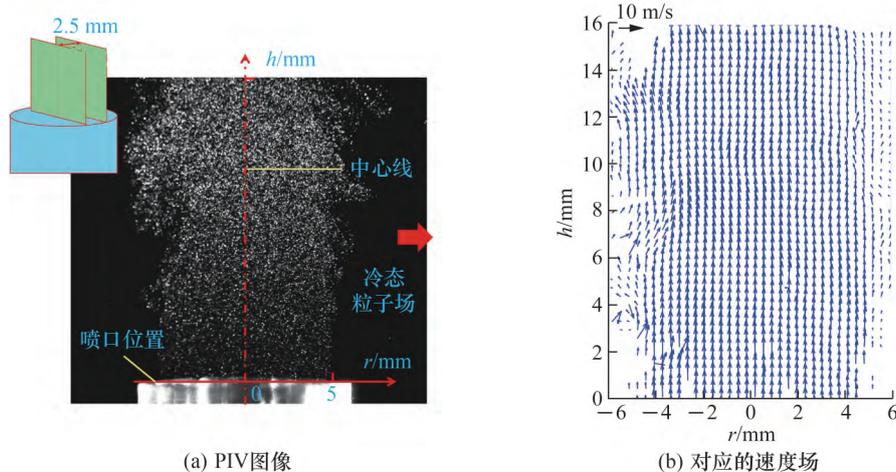


图 11 喷口附近典型 PIV 图像及对应的速度场(混合方式 1, plane_0, $\phi \approx 0.85$, $U_j \approx 13.5$ m/s)

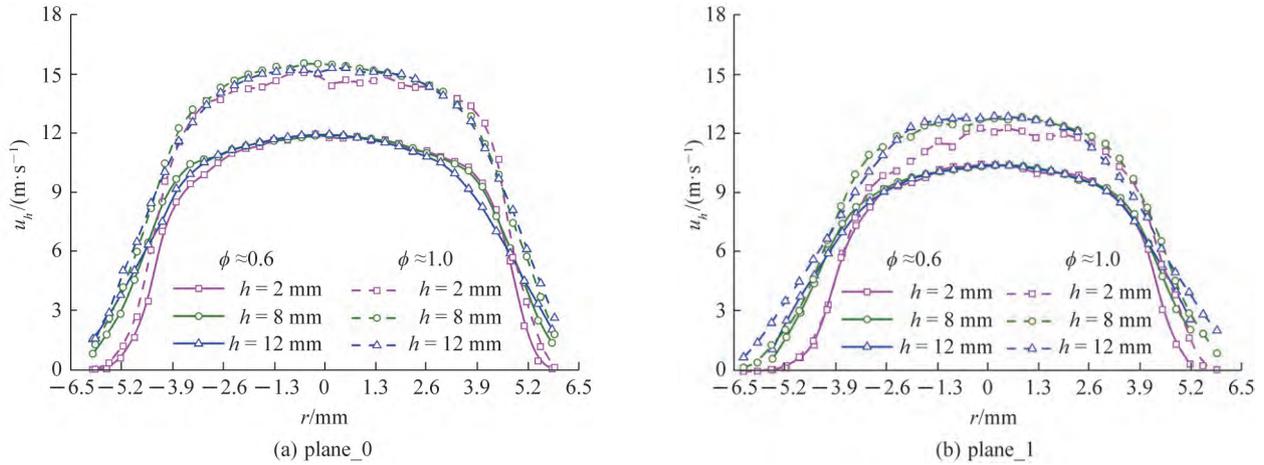


图 12 贫燃和接近化学当量状态时喷口附近不同高度处的轴向气流速度分布(混合方式 1)

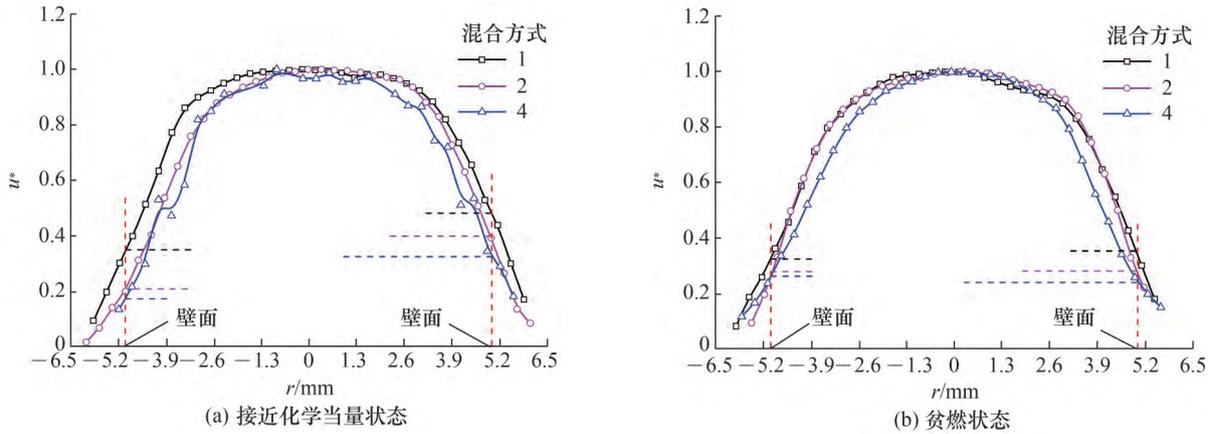


图 13 不同混合方式下喷口附近 plane_1 归一化的轴向气流速度径向分布(h = 10 mm)

的气流归一化速度在不同的混合情况下存在一定差异。对于壁面附近区域,较大的混合程度对应较小的气流归一化速度,这本应有利于回火的发生,然而实验结果显示,气体混合越均匀,回火现象反而越难出现。根据上述结果可推测,混合不均匀更容易发生回火的主导原因是壁面附近的局部当量比变化引起火焰的传播速度增加,而非气体流速的变化。湍流燃烧速度 S_{Tur} 与层流燃烧速度 S_{Lam} 、湍流脉动速度的均方根 u'_{rms} 和湍流积分尺度 X_{Tur} 等因素有关,表示为

$$S_{Tur} = S_{Lam} + 0.62S_{Lam}^{0.5} u'_{rms}^{0.5} (u'_{rms}^{0.5} X_{Tur} / \nu)^{[31]} \quad (2)$$

本实验中不同混合情况下,气体的运动黏度变化较小,此外,火焰根部与喷口之间的轴向距离变化也较小,即湍流积分尺度的变化可忽略,表示为

$$X_{Tur} = 0.07h^{[32]} \quad (3)$$

那么,对壁面附近的局部湍流燃烧速度起主导作用的即为层流燃烧速度和(或)湍流脉动速度的均方根。表 1 给出了混合方式 1、2 和 4 下贫燃和接近当量状态时壁面附近区域的湍流脉动速度均方根值,取轴向坐标为 10 mm 处射流边界附近 3 个点的平均值。由表 1 可知,不同混合条件下脉动速度均方根值变化较小,其中接近化学当量状态时数据差异较大,可能是实验误差所致。综合以上结果,推测壁面附近局部当量比改变引起层流燃烧速度变化,进而导致当地火焰传播速度发生差异是气体混合均匀性影响回火现象的主要原因。

表 1 不同混合方式下壁面附近区域的湍流脉动速度均方根

ϕ (约数)	$u'_{rms} / (m \cdot s^{-1})$		
	混合方式 1	混合方式 2	混合方式 4
$\phi \approx 0.6$	1.46	1.49	1.61
$\phi \approx 1.0$	3.12	2.46	2.82

3 结 论

本文设计了4种不同的气体混合方式,研究氢气、一氧化碳和空气来流混合均匀性对湍流射流火焰回火特性的影响。主要结论如下:

1) 不同混合方式下湍流火焰回火机理与层流边界层回火相同,来流混合均匀性对湍流射流火焰回火机理无影响。

2) 接近化学当量状态的湍流预混火焰周围存在扩散火焰层,回火发生前,混合情况最差的火焰一侧呈明显的橘红色且回火从此侧发生,表明该侧氢气浓度较高。随着混合程度增强,扩散火焰层橘红色逐渐消失,同时回火起始位置呈随机性。

3) 根据喷口附近的纹影图像条纹变化可较为清晰地分辨回火发生的起始时间和位置,且观测到的回火过程用时与高速摄像结果较为一致。

4) 来流混合程度差更容易发生回火,且壁面附近局部当量比变化引起局部火焰传播速度的改变是来流预混方式影响回火的主导因素。

参考文献 (References)

- [1] LEWIS B, VON ELBE G. Stability and structure of burner flames [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1943, 11(2): 75—97.
- [2] 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 W P, LI Y B. Progress in mechanisms and numerical simulation of flame flashback for gas turbine [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(5): 385—401. (in Chinese)
- [3] DAVU D, FRANCO R, CHOUDHURI A, et al. Investigation on flashback propensity of syngas premixed flames [C]// 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Tucson, USA: AIAA, 2005: 1—11.
- [4] SYRED N, ABDULSADA M, GRIFFITHS A, et al. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners [J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1): 106—110.
- [5] 胡舸, 魏胜, 廖世勇, 等. 甲烷及掺氢甲烷预混火焰的稳定性 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(12): 4402—4406.
- HU G, WEI S, LIAO S Y, et al. Stabilization of methane and air premixed flames with and without hydrogen addition [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4402—4406. (in Chinese)
- [6] BOLLINGER J E, EDSE R. Effect of burner-tip temperature on flash back of turbulent hydrogen-oxygen flames [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1956, 48(4): 802—807.
- [7] LEE S T, TIEN J S. A numerical analysis of flame flashback in a premixed laminar system [J]. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 273—285.
- [8] 田颖, 徐纲, 宋权斌, 等. 贫燃料预混燃烧的回火特性研究 [J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(5): 871—874.
TIAN Y, XU G, SONG Q B, et al. Flashback characteristics of lean premixed combustion [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(5): 871—874. (in Chinese)
- [9] THIBAUT D, CANDEL S. Numerical study of unsteady turbulent premixed combustion: Application to flashback simulation [J]. *Combustion and Flame*, 1998, 113(1—2): 53—65.
- [10] BAUMGARTNER G, BOECK L R, SATTELMAYER T. Experimental investigation of the transition mechanism from stable flame to flashback in a generic premixed combustion system with high-speed micro-particle image velocimetry and micro-PLIF combined with chemiluminescence imaging [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(2): 021501.
- [11] DAM B, LOVE N, CHOUDHURI A. Flashback propensity of syngas fuels [J]. *Fuel*, 2011, 90(2): 618—625.
- [12] 乔英杰, 毛荣海. 贫油预混预蒸发燃烧室回火现象的大涡模拟 [J]. *航空学报*, 2014, 35(6): 1505—1512.
QIAO Y J, MAO R H. Large eddy simulation of flashback phenomenon in a lean premixed prevaporized combustor [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(6): 1505—1512. (in Chinese)
- [13] PAGE D, SHAFFER B, MCDONELL V. Establishing operating limits in a commercial lean premixed combustor operating on synthesis gas pertaining to flashback and blowout [C]// ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. Copenhagen, Denmark: ASME, 2012: 647—656.
- [14] FINE B. Effect of initial temperature on flash back of laminar and turbulent burner flames [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1959, 51(4): 564—566.

- [15] FINE B. The flashback of laminar and turbulent burner flames at reduced pressure [J]. *Combustion and Flame*, 1958, 2(3): 253–266.
- [16] LIN Y C, DANIELE S, JANSOHN P, et al. Turbulent flame speed as an indicator for flashback propensity of hydrogen-rich fuel gases [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(11): 111503.
- [17] KHITRIN L N, MOIN P B, SMIRNOV D B, et al. Peculiarities of laminar-and turbulent-flame flashbacks [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1965, 10(1): 1285–1291.
- [18] SCHEFER R W. Hydrogen enrichment for improved lean flame stability [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2003, 28(10): 1131–1141.
- [19] 杨国华, 洪流, 李鳌, 等. 丙酮平面激光诱导荧光技术在喷嘴混合研究中的应用 [J]. *实验流体力学*, 2008, 22(4): 23–28.
- YANG G H, HONG L, LI A, et al. Application of acetone planar laser-induced fluorescence in research on mixing characteristics of injector [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2008, 22(4): 23–28. (in Chinese)
- [20] 俞瑜. 气体引射式无焰燃烧的数值模拟和实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- YU Y. Experimental study and numerical simulation of gas flameless combustion induced by the inner structure [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
- [21] 周淼. 基于丙酮平面激光诱导荧光气流混合比测量研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- ZHOU M. Research on measurements of air mixing ratio using acetone planar laser induced fluorescence [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [22] WILLIAMS B, EWART P, WANG X W, et al. Quantitative planar laser-induced fluorescence imaging of multi-component fuel/air mixing in a firing gasoline-direct-injection engine: Effects of residual exhaust gas on quantitative PLIF [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(10): 1866–1878.
- [23] LIND S, TROST J, ZIGAN L, et al. Application of the tracer combination TEA/acetone for multi-parameter laser-induced fluorescence measurements in IC engines with exhaust gas recirculation [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3783–3791.
- [24] 刘金彪. 可燃气体混合均匀性对其爆炸特性的影响研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- LIU J B. Study on the influence of the mixing uniformity of combustible gas on its explosion characteristics [D]. Taiyuan: North University of China, 2018. (in Chinese)
- [25] 李迎春, 郑光华. 航空燃气涡轮发动机氢燃料研究历史和低污染燃烧技术发展 [J]. *航空动力学报*, 2012, 27(3): 572–577.
- LI Y C, ZHENG G H. Review of study history and low emission combustion technology development on aero gas turbines fuelling hydrogen [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(3): 572–577. (in Chinese)
- [26] 仇园, 张哲巖, 雷福林, 等. 单管微混燃烧器燃料/空气掺混规律研究 [J]. *热能动力工程*, 2022, 37(5): 62–71.
- QIU Y, ZHANG Z D, LEI F L, et al. Study on fuel/air mixing law of single tube micro mixing burner [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(5): 62–71. (in Chinese)
- [27] Colorado State University. Transport property evaluation [Z/OL]. [2022-10-12]. <http://navier.engr.colostate.edu/code/code-2/index.html>.
- [28] SETTLES G S. Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media [M]. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [29] DONG C, ZHOU Q L, ZHAO Q X, et al. Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures [J]. *Fuel*, 2009, 88(10): 1858–1863.
- [30] JITHIN E V, RAGHURAM G K S, KESHAVAMURTHY T V, et al. A review on fundamental combustion characteristics of syngas mixtures and feasibility in combustion devices [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 146: 111178.
- [31] GÜLDER Ö L. Turbulent premixed flame propagation models for different combustion regimes [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1991, 23(1): 743–750.
- [32] GAUTAM T. Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air [J]. *Combustion Science and Technology*, 1984, 41(1–2): 17–29.

Effect of gas flow mixing uniformity on the flashback characteristics of turbulent jet flames

LI Dan, LÜ Hailu, ZHANG Yang, ZHANG Hai, ZHOU Tuo, LÜ Junfu

(Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of the Ministry of Education,
Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: [Objective] Modern gas turbine combustors often adopt premixed combustion technology for lower NO_x emissions. In premixed combustion, the flame flashback is an important issue, particularly for hydrogen-rich fuels burned in micromix burners. The combustible gas in the micromix burner is mixed near the burner nozzle outlet, resulting in a nonuniform species mole fraction in micromix turbulent jets. This mixing-induced nonuniformity of the species deserves careful investigation for its impact on the flame flashback. [Methods] By designing four mixing modes (MM 1—4) of H_2 , CO, and air, this work experimentally studied the effect of gas flow mixing conditions on the flashback characteristics of turbulent premixed jet flames. MM 1: H_2 , CO, and air directly enter the nozzle through a straight tube. MM 2: H_2 and CO flow into a section of PVC (Polyvinyl chloride) pipe through a tee joint and then mix with air through a straight tube. MM 3: H_2 , CO, and air directly enter the nozzle through a Venturi tube. MM 4: H_2 , CO, and air enter a chamber equipped with flow conditioning components (sintered metal plate, glass balls, etc.) and then enter the nozzle through a Venturi tube. From MM 1 to MM 4, the degree of the corresponding mixing uniformity of H_2 , CO, and air increased. The flashback phenomenon is captured using a high-speed camera integrat with the schlieren method. The flow field near the burner exit is measured using particle image velocimetry. [Results] The results showed that the onset of the flame flashback at different fuel/air mixing modes always occurs near the burner wall, similar to the classical “boundary layer flashback” phenomenon. High-speed camera images indicated that the near-stoichiometric premixed flame was blue, surrounded by a diffusion flame layer before flashback. For the worst mixing mode, the region of this diffusion flame layer where the flashback starts appeared orange, indicating higher hydrogen concentration in this region. Upon changing to better mixing conditions, the orange diffusion flame disappeared, and the starting point of the flashback was not specific on one side. Under this fuel-lean condition, no surrounding diffusion flame layer appeared, and thus the mixing uniformity could not be directly evaluated through the flame color. As the mixing uniformity was improved, the flashback velocity decreased. The velocity distributions near the burner exit at different mixing modes were top hat-shaped, suggesting that the influence of the mixing conditions on the velocity distribution was unclear. [Conclusions] The mixing-induced nonuniformity of the species has little effect on the flame flashback mechanism. Schlieren images clearly distinguish the onset and position of the flashback. The flashback process observed from schlieren images agrees well with the high-speed camera result. The flashback flow velocity differs among mixing modes, and the flashback is more likely to occur when the mixing condition is worse. The effect of mixing conditions on the flashback is mainly due to the change in the flame propagation speed near the burner rim. The results of this study shed light on the antiflashback burner design.

Key words: hydrogen-rich gaseous fuel; fuel/air mixing uniformity; turbulent jet flame; flashback; flow field characteristics

(责任编辑 汤梅)