

水蒸气稀释下富氢燃料/纯氧预混射流火焰回火特性

覃思博¹ 么强² 吕海陆¹ 张扬^{1,3} 张海¹

- 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;
- 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明, 650500;
- 清华大学山西清洁能源研究院, 太原 030032)

摘要 富氢燃料作为典型低碳能源, 在“双碳”大背景下受到广泛关注。微混燃烧及水蒸气稀释燃烧能显著降低富氢燃料回火风险。本文通过微混单喷嘴射流火焰实验, 获得了水蒸气稀释下不同富氢燃料回火边界的变化规律。实验发现, 所用富氢燃料的回火过程都呈现出边界层回火特征。水蒸气稀释比、燃料含氢量、当量比会对回火时刻的平均出口流速、层流火焰传播速度、喷嘴边缘温度等参数产生较大影响, 进而影响回火过程。基于边界层回火临界速度梯度理论建立了水蒸气稀释下不同富氢燃料微混单喷嘴射流火焰回火边界的预测模型, 模型预测值均能在定性及定量上符合实验值, 预测误差小于 17%。

关键词 富氢燃料; 回火; 稀释; 射流火焰; 模型

中图分类号: TK16 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2025)07-2415-12

Flashback Characteristics of Premixed Rich Hydrogen Fuel/Pure Oxygen Jet Flames Under Water Vapor Dilution

QIN Sibo¹ YAO Qiang² LÜ Hailu¹ ZHANG Yang^{1,3} ZHANG Hai¹

- Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
- Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
- Shanxi Research Institute for Clean Energy, Tsinghua University, Taiyuan 030032, China)

Abstract Rich hydrogen fuels, as a typical low-carbon energy source, have attracted significant attention under the “dual carbon” strategy. Micromixing combustion and water vapor dilution can significantly reduce the risk of flashback in rich hydrogen fuels. This study investigates the flashback boundaries of various rich hydrogen fuels under water vapor dilution through experiments with micromixing single-nozzle jet flames. The experiments reveal that the flashback processes of the tested rich hydrogen fuels exhibit boundary-layer flashback characteristics. Parameters such as the water vapor dilution ratio, hydrogen content in the fuel, and equivalence ratio significantly affect the mean outlet velocity, laminar flame propagation speed, and nozzle edge temperature at the flashback onset, thereby influencing the flashback process. A predictive model for the flashback boundary of micromixing single-nozzle jet flames under water vapor dilution was developed based on the critical velocity gradient theory of boundary-layer flashback. The model predictions qualitatively and quantitatively match the experimental results, with a prediction error of less than 17%.

Key words rich hydrogen fuel; flashback; dilution; jet flame; model

0 前 言

富氢燃料作为典型低碳能源, 在“双碳”目标的大背景下受到了学界及工业界的广泛关注, 其安全生产、运输与储存至关重要, 相关工业燃烧设备的合理设计、安全运行以及火灾、爆炸的防治不能

忽视, 因此全面研究富氢燃料的燃烧特性成为必要之举。

预混射流燃烧技术被广泛应用于实验和工程领域, 虽然其拥有低排放、燃烧效率高等许多优点, 但

收稿日期: 2025-02-17; 修订日期: 2025-06-24

基金项目: 国家科技重大专项 (No.P2022-A-II-006-003); 国家重点研发计划 (No.2021YFA0716201); 华能集团总部科技项目基础能源科技研究专项 (三)(No.HNKJ22-H105)-U22YYJC11

作者简介: 覃思博 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事稀释条件下富氢燃料的预混燃烧极限方向的研究工作。

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

是其存在回火及吹熄等燃烧不稳定现象,严重时甚至会损坏燃烧器结构。为了更有效地利用预混射流燃烧技术,针对富氢燃料,近年来发展的微混射流燃烧技术已被证实可以显著提升燃烧的安全性及稳定性。

微混合燃烧 (Micro-mixing combustion) 技术实质上是一种通过改变燃烧组织形式对火焰进行调控的燃烧技术,最初是德国亚琛应用技术大学研究人员针对燃气轮机燃用纯氢的背景提出的^[1]。为了使混合尺度最小化、混合强度最大化,他们把传统大直径喷嘴更换为数量众多的小直径微型喷嘴,以提升每个微型喷嘴的混合程度,进而使整体混合程度得到提升,最终提高燃烧效率。

微混燃烧因其独特的原理和结构特征,极大地降低了回火和自燃的可能性,非常适合用于富氢燃料。目前国外已基于微混燃烧技术研制出较成熟产品。德国亚琛应用技术大学^[2]开发了 1.6 MW 环形微混燃烧器,该燃烧器兼具预混燃烧低排放以及扩散燃烧不回火的特点。日本三菱日立公司^[3,4]开发了一种基于微扩散技术的多簇旋流燃烧器,其适用于富氢燃料燃烧,通过扩散与空气旋流促进混合,达到了稳定燃烧的效果。美国 GE 公司^[5,6]基于微混燃烧技术先后开发了多种多喷嘴燃烧器,并开展工业级的相关研究和应用,在 F 级燃机实验台上多种燃料的试验表明其各项性能表现优异。而我国针对微混燃烧技术的研究起步较晚,相关研究较为有限。华北电力大学 Zhang 等^[7,8]开发了阵列式排列的微混燃烧器,并使用该燃烧器研究了不同稀释条件下的富氢燃料燃烧特性。中科院工程热物理所 Liu 等^[9,10]设计了适用于富氢工况的射流多喷嘴微混燃烧器,并通过数值模拟对其流动特性及火焰稳定燃烧机理进行了研究。哈尔滨工业大学邱朋华等^[11,12]开发了适用于氢稀释燃烧的微混喷嘴,并通过实验对火焰的流动特性开展了研究。清华大学李丹等^[13]研究了微混燃烧器中来流预混均匀性对合成气湍流射流火焰回火特性的影响,并指出混合均匀性主要通过影响浓度分布进而改变壁面附近层流火焰传播速度。

除了微混燃烧技术,向反应物中添加稀释剂的稀释燃烧技术也是用于调控火焰的重要手段,其中水蒸气稀释是该技术的典型应用。目前,水蒸气稀释条件下的研究大多集中在传统碳氢燃料上,针对富氢燃料的研究较少。因而富氢燃料高水蒸气稀释燃烧体系研究在反应机理和基础燃烧特性方面仍有不足。国外研究方面,德国柏林工业大学 Tanneberger 等^[14]针对 30 kW 水蒸气稀释氢/氧燃烧器的流场

及排放特征开展了研究。国内方面,哈尔滨工业大学研究了水蒸气稀释下的氢/空气的湍流燃烧流动特性^[11,12]、NO 生成特性^[15]以及喷嘴直径、水蒸气稀释比和当量比等参数对火焰结构和燃烧动力学^[16]的影响。这些研究不仅深化了对富氢燃料燃烧过程中稀释效应的理解,还为燃烧器设计和操作优化提供了科学依据。

为了保证富氢燃料利用过程中的安全性,需要开展其火焰稳定性边界,如回火边界的研究。射流火焰中的回火现象指火焰在燃烧过程中向上游传播并进入预混区域的现象。发生回火时,预混区域的温度显著升高,对火焰的稳定性产生影响,严重时甚至会损坏燃烧器。射流火焰回火至少存在四种机制^[17-19]:中心流回火、燃烧不稳定回火、燃烧诱发旋涡破碎回火、边界层回火。近年来,对于层流射流火焰回火机制的研究主要围绕边界层回火机制展开。

边界层回火 (Boundary Layer Flashback, BLF) 是射流火焰或本生灯火焰的主要回火机制,文献中有较为广泛的研究。在正常工作的燃烧器中,上游来流气体速度一般大于火焰传播速度,因而在中心流区域不会发生火焰的向上传播。但在壁面附近,由于非滑动边界条件,靠近壁面的轴向流速较低,因而出现回火的潜在区域。考虑热损失、火焰拉伸及自由基消耗,反应难以自维持,故靠近壁面处的火焰燃烧速度随之降低^[20-22]。当局部燃烧速度超过局部气流速度时,因二者方向相反,火焰向上游传播,就会发生边界层回火。上述回火情况发生在距离壁面一定距离处,该距离被称为渗透距离 δ_p 。Lewis 和 Von Elbe^[23]基于该理论,提出临界速度梯度概念,用于描述边界层回火倾向,其表达式如式 (1) 所示:

$$g_c = \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{\text{wall}} \leq \frac{S_L}{\delta_p} \quad (1)$$

其中, g_c 为临界速度梯度, S_L 为火焰传播速度, δ_p 为渗透距离。

该模型假定了回火发生时的流速分布不受到火焰影响,且壁面附近的流速是线性的。临界速度梯度模型能较为准确预测层流状态下的边界层回火倾向,奠定了边界层回火研究理论基础。在此理论基础, Garside 等^[24]首次在亚大气压下了进行了回火实验, Edse^[25]首次研究了高压下的湍流边界层回火现象, Grumer 和 Harris^[26]探讨了预热温度对边界层回火的影响, Bollinger 和 Edse^[27]研究了喷嘴顶端温度对边界层回火的影响,而 Lee 和 T'ien^[28]则首次使用数值模拟方法对层流预混火焰在管道内的回火现象进行了研究。

随着对低碳燃料利用的兴趣增加, 学界近年来对边界层回火的研究主要集中在高氢含量燃料上。Lin 等^[29]对富氢燃料边界层回火中不同燃料组分的影响开展了研究, 发现富氢燃料回火倾向主要受湍流火焰速度影响。Davu 等^[30]研究了本生灯火焰中的合成气边界层回火现象, 结果表明, 混合燃料的回火倾向主要受氢气的回火特性的影响。Noble 等^[31]对合成气回火及吹熄特性开展了研究, 发现慢回火现象易在含氢量小于 60% 的条件下发生, 此时回火边界几乎与燃料含氢量无关, 火焰温度才是影响回火倾向的关键因素。

除了上述临界速度梯度模型外, 学界还在此基础上发展出 Peclet 数^[32]、Damköhler 数^[33,34]等无量纲准则数模型, 但这些模型依旧基于回火发生时的流速分布不受到火焰影响的假设, 因而在湍流流态中适用性较差。Eichler 等^[35]使用 μ -PIV 技术对层流及湍流边界层回火现象进行了实验研究, 同时开展了数值模拟, 指出边界层回火现象受到火焰-流动间相互作用强烈影响, 没有考虑这一作用的临界速度梯度模型在准确性上存在不足, 需进一步发展和完善边界层回火理论。

综上所述, 微混燃烧技术由于其独特的原理和结构特点, 在减少回火和自燃可能性方面表现出显著优势, 尤其适用于富氢燃料的燃烧。而水蒸气稀释作为一种重要的稀释燃烧技术, 也有效地调控了火焰行为。若能将微混燃烧技术与水蒸气稀释技术结合, 有望进一步优化富氢燃料的燃烧管理, 使其调控更为灵活可靠。然而, 目前关于水蒸气稀释微混燃烧的研究主要集中在传统碳氢燃料上, 对于富氢燃料的研究尚显不足, 其回火边界等燃烧特性仍需深入探索。同时, 针对水蒸气稀释下富氢燃料射流火焰回火边界的预测模型也需要进行建立。本文将水蒸气稀释下富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流火焰回火实验为基础, 获得水蒸气下富氢燃料/纯氧预混射流火焰的回火边界, 分析回火过程现象及其影响机制, 并根据实验数据建立回火边界预测模型, 为预测富氢燃料在不同稀释条件下的回火边界提供有效的计算工具。

1 实验方法

1.1 实验装置

基于微混单喷嘴射流火焰实验系统, 开展富氢燃料单喷嘴射流火焰回火边界实验研究, 实验系统示意图如图 1 所示。该实验系统主要由燃烧器模块、供气及流量控制模块、水蒸气发生模块、温度控制模块以及光学观测模块组成。燃烧器模块包含

中心喷嘴及微细喷嘴阵列。中心喷嘴为未燃混合气通道, 在本实验中采用 4 mm 内径的中心喷嘴。燃料、氧化剂及水蒸气通过文丘里管进行混合后通入中心喷嘴, 确保良好的混合均匀性。微细喷嘴阵列由 60 根内径为 1.2 mm、壁厚为 0.2 mm 的微细不锈钢管组成, 必要时可为中心喷嘴提供高温烟气伴流环境, 本文实验中未使用高温烟气伴流。供气及流量控制模块主要由气瓶、专用管路、质量流量控制器组成。燃料和氧化剂气体均通过气瓶气源提供, 通过 Alicat 质量流量控制器控制气体流量。由于涉及富氢燃料及氧气供应, 在模块中使用专用管路及专用阀门以保证安全。通过数据线将质量流量控制器与电脑进行连接通讯, 可实现实时记录并精确控制流量的功能。水蒸气发生模块主要由恒流注射泵及水蒸气发生器构成。高温水蒸气由水蒸气发生器配合恒流注射泵产生, 可实现 0~10 g/min 的水蒸气输出量, 水蒸气温度可控制在 100~500°C 之间。恒流注射泵可实现液态水的稳定给入, 以保证水蒸气的稳定供给。由于水蒸气在管道及燃烧器中易冷凝, 故在实验系统中设置了温度控制模块, 以避免水蒸气冷凝, 同时兼顾调节来流未燃混合物温度。该模块主要由伴热带、热电偶、温控器及保温系统组成。其中, 在水蒸气/氧气混合腔室、燃烧器上游管路、燃烧器周围处都设置了温度控制模块, 以分别控制各部分温度, 避免系统整体温度波动过大, 同时便于更换易损部件。由于纯氢工况预混射流火焰较难直接通过肉眼观察, 因此实验过程中利用一套“Z 形”高速纹影系统组成的光学观测模块观察纯氢/纯氧工况回火过程中流场的动态特性。该高速纹影系统主要由 1 个 LED 点光源、2 个直径约为 200 mm、焦距约为 1800 mm 的凹球面反射镜、

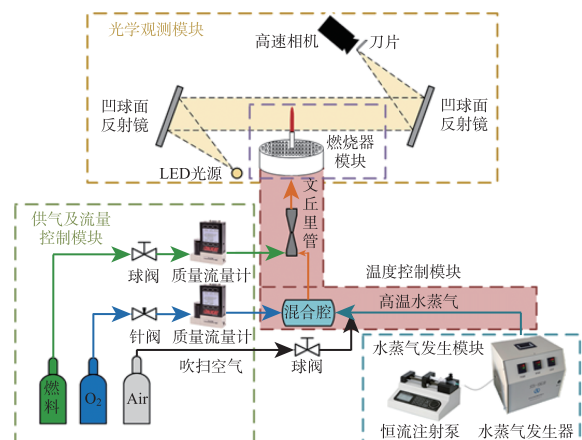


图 1 微混单喷嘴射流火焰实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the micromixing single-nozzle jet flame experimental system

刀口以及高速摄像机 (IDT NR3-S2) 组成。此外, 研究其它富氢燃料气预混射流火焰时, 火焰可以直接观测, 故直接利用高速摄像机 (参数同上) 对火焰图像进行记录。

1.2 实验方法

射流火焰回火现象受来流温度、喷嘴边缘温度等参数影响, 在实验中需要对相关参数进行测量及记录。在每次回火实验开始前, 为防止水蒸气冷凝在管路内及维持管壁温度, 使用小流量压缩空气进行吹扫。为了精确监控及记录温度变化, 使用便携式 K 型热电偶对来流未燃气体出口温度进行测量, 使用直径 $\phi = 0.5 \text{ mm}$ 的 K 型热电偶呈弹簧状缠绕在喷嘴出口外管壁处, 以对喷嘴边缘温度进行测量。两路热电偶连接到温度显示仪, 同时温度显示

仪通过数据线与电脑连接, 可将温度数据进行实时传输, 以便监控及保存。

实验时, 首先将吹扫的压缩空气切换为氧气, 氧气与大量水蒸气在小型混合腔混合后一同通入燃烧器管路。接着通入燃料气, 使其在燃烧器文丘里管混合段内与氧气及水蒸气进行混合, 而后三股来流形成的混合气从燃烧器的中心喷嘴中喷出。待来流气体及喷嘴边缘温度稳定后, 开始记录热电偶测量温度。

实验过程中的气体流量、平均出口流速、水蒸气稀释比及喷嘴边缘温度变化曲线如图 2 所示。首先使用便携式热电偶在喷嘴出口处对来流未燃混合物的温度进行测量, 当其温度稳定后时, 结束来流温度测量阶段, 开始点火。点火后, 如图 2(d) 中所

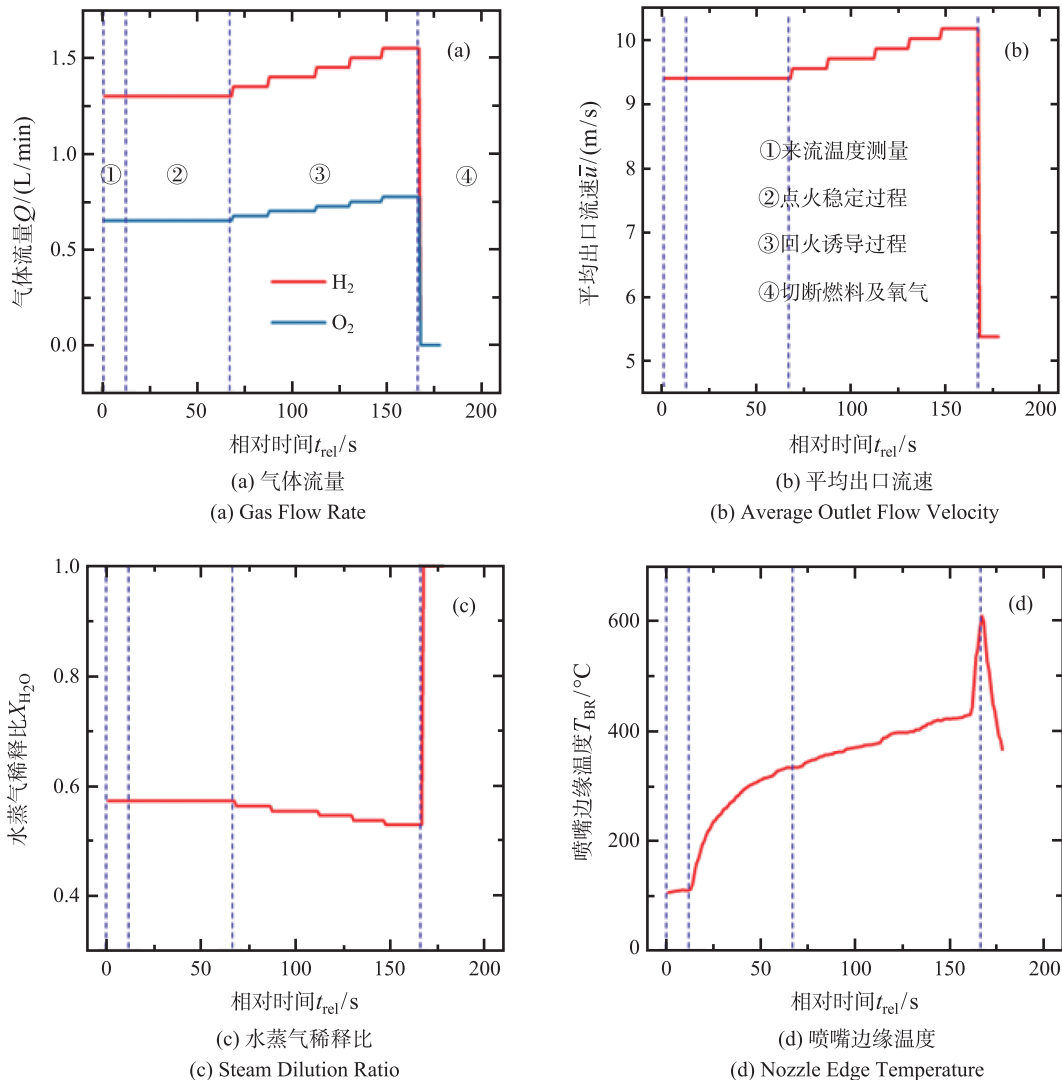


图 2 微混单喷嘴射流回火实验典型工况参数变化图 ($\text{H}_2/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$, $\phi = 1.0$, $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.573 \sim 0.529$)
Fig. 2 Variation of typical operating parameters in micromixing single-nozzle jet flame flashback experiment ($\text{H}_2/\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$, $\phi = 1.0$, $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.573 \sim 0.529$)

示, 喷嘴边缘温度 T_{BR} 先急剧上升, 后续趋于稳定。待 T_{BR} 稳定 (温度变化小于 1°C/s) 且未发生回火后, 保持当量比、水蒸气量不变, 增加燃料量 (0.05 L/min , 标准工况) 及对应氧气量以降低水蒸气稀释比, 使火焰不断逼近回火边界, 诱导回火现象发生。每次降低稀释比后, 当温度趋于稳定时, 若未发生回火, 则继续按上述步骤降低稀释比。当到达回火工况后, 喷嘴边缘温度无法趋于稳定, 温度梯度出现较大变化, 结合对火焰实时情况的判断确定是否回火。回火发生后, 为确保安全, 迅速关闭燃料气及氧气, 继续保持水蒸气通入, 此时水蒸气稀释比变为 1, 同时喷嘴边缘温度开始下降。后续尽快将氧气切换为压缩空气吹扫, 降低管壁温度及防止水蒸气冷凝。

每次实验后, 使用计算机对温度采集数据进行后处理。对于便携式热电偶测量的来流未燃气体温度数据, 取结束测量前 5 s 的温度平均值作为来流未燃气体温度; 对于管壁热电偶测量的喷嘴边缘温度数据, 取开始回火时刻前 10 s 的温度平均值作为回火时刻的喷嘴边缘温度 T_{BR} 。同时, 记回火时刻对应的喷嘴平均出口流速为回火平均出口流速 \bar{u}_{FB} , 其可作为表征回火现象的参数之一。

1.3 实验工况

在本文富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流回火实验中, 主要通过改变燃料种类、混合物当量比及调节水蒸气稀释比来探究组分变化对回火边界的影响。本文中, 定义混合物中的水蒸气稀释比 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 H_2O 在预混气体中的体积分数, 即

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{Fuel}} + V_{\text{O}_2}} \quad (2)$$

式中, V_{Fuel} 、 V_{O_2} 、 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为通入中心喷嘴的富氢燃料、 O_2 及水蒸气的体积流量 (L/min)。

在本文富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流回火实验中, 回火时刻喷嘴平均出口流速 \bar{u}_{FB} 可采用式 (3) 进行计算:

$$\bar{u}_{FB} = \frac{4(V_{\text{H}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}})}{\pi D^2} \quad (3)$$

其中, V_{H_2} 、 V_{O_2} 、 $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为通入中心喷嘴的 H_2 、 O_2 、水蒸气的体积流量 (L/min), D 为中心喷嘴直径 (mm)。

三种富氢燃料的体积分数组成如表 1 所示, 同时给出了燃料对应的高位热值。

为探究混合物在贫燃、化学当量、富燃状态下的回火边界, 选取的混合物当量比 ϕ 分别为 0.8 、 1.0 、 1.2 。本文中的回火边界实验在常温常压 (298 K ,

0.1 MPa) 下进行, 来流未燃气体温度控制在 $(150 \pm 5)^\circ\text{C}$ 范围内。

表 1 本文使用的富氢燃料体积组成及其高位热值 *HHV*
Table 1 The Volume Composition and Higher Heating Value (*HHV*) of the Hydrogen-Rich Fuels Used in This Study

燃料名称	$\text{H}_2/\%$	$\text{CH}_4/\%$	$\text{CO}/\%$	高位热值 <i>HHV</i> /(MJ/m^3)
燃料 1	100	0	0	12.11
燃料 2	90	10	0	14.67
燃料 3	93.5	0	6.5	12.10

2 数值模拟方法

2.1 绝热火焰温度计算

在本研究中, 绝热火焰温度 T_{ad} 计算依托 Chemkin Pro 软件 [36] 中的化学平衡和相平衡计算 (Chemical and Phase Equilibrium Calculations) 模块开展。在模块中输入工况对应的温度、压力及反应物组分等参数, 选择求解定压定焓 (Constant Pressure Enthalpy) 问题, 即可获得输入组分及对应工况的绝热火焰温度。

2.2 层流火焰传播速度计算

在本研究中, 层流火焰传播速度 S_L 的计算通过使用 Chemkin Pro 软件中的预混层流火焰传播速度计算 (Premixed Laminar Flame-Speed Calculation) 模块开展。该模块基于 PREMIX 反应器模型实现, 关于 PREMIX 反应器模型的介绍可从该软件的 Theory Manual 文件 [37] 中进一步获知。在设置界面中选择考虑热扩散效应, 组分扩散模型使用 Multi-component 模型, 同时通过在机理文件的 thermo 文件中添加 CH_4 、 CO 、 CO_2 和 H_2O 四项组分的吸收系数 (Absorption Coefficients), 以实现使用光学薄模型 (Optical Thin Model) 计算上述四组分辐射作用影响。随后在设置界面输入工况对应的未燃气体温度、压力、反应物组分及流速等信息, 即可计算得到层流火焰传播速度。

2.3 混合物物性计算

由于本研究涉及大量水蒸气稀释, 需要准确计算混合物的物性参数, 进而计算其它所需参数。本研究使用 Chemkin Pro 实现对混合物物性参数的计算。在操作界面中输入混合物的温度、组分、流量等参数进行计算, 便可求解获得该工况下混合物的分子量、质量密度、摩尔质量、动力黏度等物性参数。

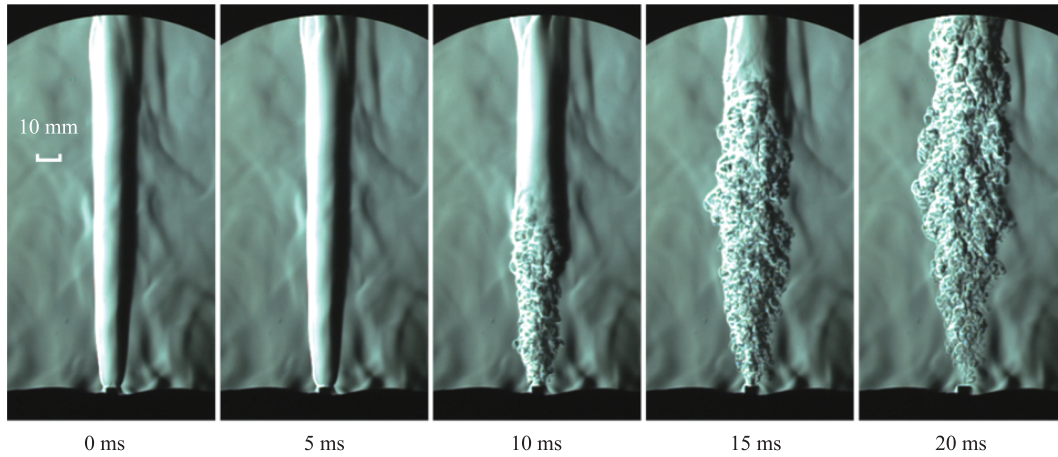


图3 水蒸气稀释下纯氢/纯氧微混单喷嘴射流火焰回火过程纹影图像

Fig. 3 Shadowgraph images of the flashback process of pure hydrogen/pure oxygen micromixing single-nozzle jet flames under steam dilution

3 结果与讨论

3.1 回火现象

由于水蒸气稀释条件下的纯氢/纯氧微混单喷嘴射流火焰的可见光辐射弱, 较难直接观测或用普通相机记录, 故使用纹影系统结合高速相机对纯氢工况火焰进行观测。实验中记录下的典型回火过程纹影图像如图3所示。从图中可以看出, 回火发生时, 火焰根部的三角形内核收缩, 喷嘴出口附近的燃烧流场中出现了大量涡结构, 并随着回火的进行继续向火焰下游发展, 同时喷嘴处发出较为尖锐的声音。火焰回火主要是局部火焰传播速度大于局部来流速度, 导致火焰向上游传播。从火焰纹影图像观察, 该过程的回火现象为边界层回火。

图4展示了水蒸气稀释下其它两种富氢燃料的回火过程图像。与纯氢/纯氧火焰不同, 由于两种富氢燃料中含有一定量的碳氢燃料, 故其火焰可直接观测, 不需要借助纹影设备进行观察。回火过程图像显示, 两种燃料射流火焰在回火前, 火焰根部同样存在明显的三角形内核。随着回火的发生, 火焰内核逐渐收缩, 同时喷嘴边缘边界层处火焰形态发生明显变化, 火焰逐渐向着上游传播, 其长度变短, 同时喷嘴处出现较为明显的尖锐声音。三种富氢燃料回火过程都呈现出边界层回火的特征, 即回火现象都先发生在喷嘴出口附近的边界层处, 进而影响整个火焰流场。

3.2 回火实验结果分析

图5展示了三种不同富氢燃料在不同当量比下回火平均出口流速 \bar{u}_{FB} 随水蒸气稀释比 X_{H_2O} 的变化情况。结果表明, 水蒸气稀释比的变化对回火平均出口流速 \bar{u}_{FB} 影响显著, 同种燃料的回火平均

出口流速都随稀释比增加而减小。同时燃料含氢量越高, 其同一稀释比下对应的回火平均出口流速越大。

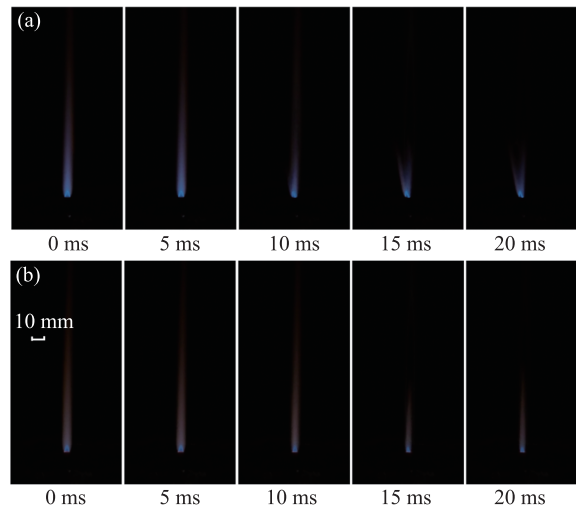


图4 水蒸气稀释下富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流火焰回火过程图像

(a) 90% H_2 + 10% CH_4 ; (b) 93.5% H_2 + 6.5% CO

Fig. 4 Flame images of the flashback process for hydrogen-rich fuel/pure oxygen micromixing single-nozzle jet flames under steam dilution

(a) 90% H_2 + 10% CH_4 ; (b) 93.5% H_2 + 6.5% CO

图6展示了三种不同富氢燃料在不同当量比下回火时刻喷嘴边缘温度 T_{BR} 随水蒸气稀释比 X_{H_2O} 的变化情况。温度测量结果同样表明, 水蒸气稀释比变化的影响显著, 都会使得喷嘴边缘温度随稀释比增大而明显降低。对三种燃料而言, 在同一稀释比下都呈现出高当量比对应的回火时刻喷嘴边缘温度越高的规律。

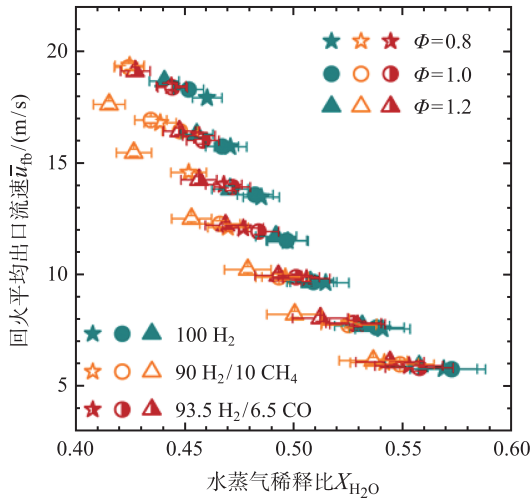


图 5 不同富氢燃料回火平均出口流速随水蒸气稀释比变化图
Fig. 5 Variation of average outlet flow velocity at flashback with steam dilution ratio for different hydrogen-rich fuels

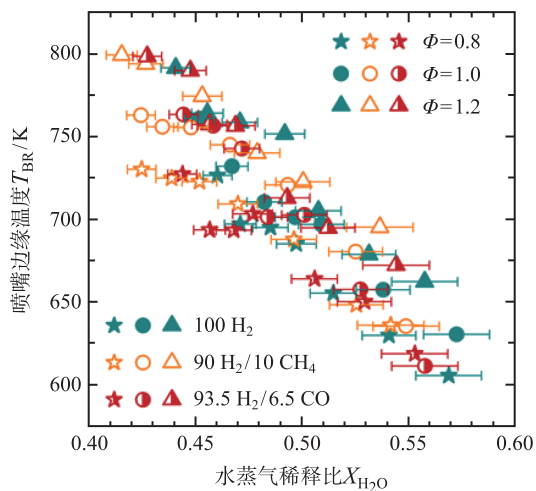


图 6 不同富氢燃料回火时刻喷嘴边缘温度随水蒸气稀释比变化图
Fig. 6 Variation of nozzle edge temperature at flashback moment with steam dilution ratio for different hydrogen-rich fuels

根据实验记录数据计算得到的回火时刻工况对应的雷诺数 Re_{FB} 如图 7 所示。计算结果显示, 本文回火实验中所有混合物的雷诺数 Re_{FB} 范围为 570~2000 之间。根据文献对管内流动的研究, 当 $Re \geq 3000$ 时, 可认为圆管内的流动处于湍流状态^[38-40]。因而本文回火实验对应工况都为非湍流状态, 且全部工况都处于层流状态 ($Re \leq 2300$ ^[41])。

边界层回火不仅与喷嘴边缘温度 T_{BR} 相关, 层流火焰传播速度 S_L 也会对该现象的发生产生影响。图 8 展示了数值模拟得到的各回火工况对应的层流火焰传播速度 S_L 及绝热火焰温度 T_{ad} 的计算结果。结果表明, 层流火焰传播速度与绝热火焰温度具有

较强的相关性, 水蒸气稀释比的变化会显著影响层流火焰传播速度, 进而影响回火过程。同时, 图 8 中呈现的层流火焰传播速度随稀释比变化趋势及随燃料含氢量的变化趋势与图 5 中回火平均出口流速的变化趋势高度一致, 说明层流火焰传播速度是影响边界层回火不可忽略的因素。

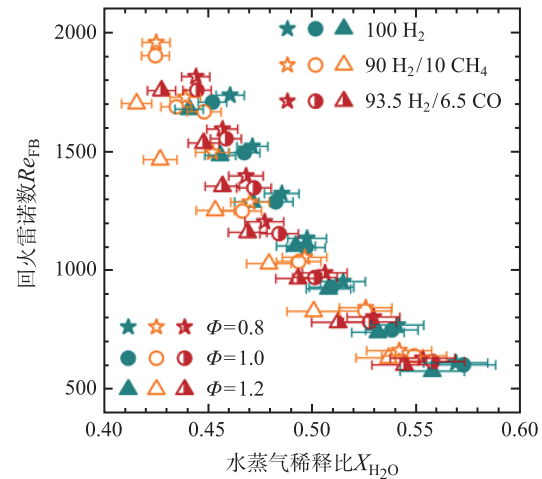


图 7 不同富氢燃料回火时刻工况对应的雷诺数 Re_{FB} 计算结果
Fig. 7 Calculated results of reynolds number Re_{FB} corresponding to operating conditions at flashback moment for different hydrogen-rich fuels

为了进一步探究回火平均出口速度 \bar{u}_{FB} 、层流火焰传播速度 S_L 、喷嘴边缘温度 T_{BR} 及火焰厚度 δ_{chem1D} 与水蒸气稀释比 X_{H_2O} 的关系, 选取燃料 1(100% H_2), $\Phi = 1$ 工况数据进行了无量纲化处理, 主要通过把某组参数中的各个数据除以该组内数据最大值实现, 所得结果如图 9 所示。其中, 火焰厚度 δ_{chem1D} 可由 PREMIX 模型计算层流火焰传播速度时所得温度分布进一步计算得到, 具体计算式为:

$$\delta_{chem1D} = \frac{T_b - T_u}{\max(dT/dx)} \quad (4)$$

其中, T_b 为燃烧后温度 (K), T_u 为未燃气体温度 (K)。

图 9 结果显示, 随水蒸气稀释比的增加, 边界层回火倾向降低的原因可以解释为层流火焰传播速度与喷嘴边缘温度的降低及火焰厚度的增加。其中, 当水蒸气稀释比从 0.452 升至 0.573 后, 回火出口平均速度降低约 70%, 层流火焰传播速度降低约 55%, 喷嘴边缘温度降低约 18%, 而火焰厚度增加约 17% 且出现指数增长趋势。基于该无量纲化分析结果, 可以认为层流火焰传播速度对水蒸气稀释下的富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流火焰边界层回

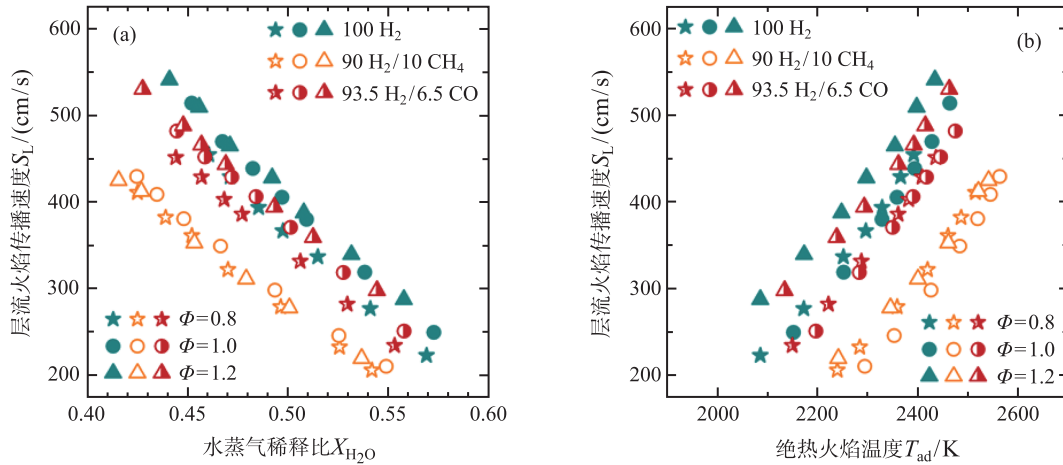


图 8 不同富氢燃料回火时刻工况对应的层流火焰传播速度 S_L 计算结果
(a) 随水蒸气稀释比的变化情况; (b) 随绝热火焰温度的变化情况

Fig. 8 Calculation results of laminar flame propagation speed S_L corresponding to the operating conditions at the flashback moment of different hydrogen-rich fuels
(a) Variation with steam dilution ratio; (b) Variation with adiabatic flame temperature

火倾向性影响最大，而喷嘴边缘温度的影响次之。

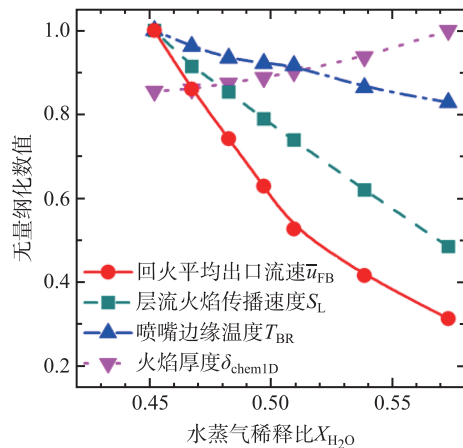


图 9 四种无量纲化参数随水蒸气稀释比变化关系图
($H_2/O_2/H_2O$ 混合物, $\Phi = 1$, $X_{H_2O} = 0.452 \sim 0.573$)

Fig. 9 Relationship between four dimensionless parameters and steam dilution ratio ($H_2/O_2/H_2O$ mixture, $\Phi = 1$, $X_{H_2O} = 0.452 \sim 0.573$)

3.3 回火边界预测模型建立

为了对水蒸气稀释下的富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流火焰回火边界进行更好的预测，选择使用本文回火实验得到数据进行回火边界预测模型的建立。本文观察到的回火现象均为边界层回火，如本文前言所述，Lewis 和 Von Elbe^[23] 建立的临界速度梯度理论可用于描述边界层回火倾向。虽然该概念忽略了火焰与流场间的相互作用，具有其局限性，但 Baumgartner 等^[42] 的实验研究表明，边界层回火刚开始发生时，火焰上游的流场大致保持不变，

故本研究依旧使用临界速度梯度理论建立回火边界预测模型。

根据临界速度梯度理论，实验工况的临界速度梯度表达式如式 (5) 所示：

$$g_{c,flow} = \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| = \frac{\tau_w}{\mu} = \frac{S_L}{\delta_p} \quad (5)$$

其中， $g_{c,flow}$ 为临界速度梯度 (s^{-1})， τ_w 为管道壁面剪切应力 (Pa)， μ 为动力黏度 (Pa·s)， S_L 为层流火焰传播速度 (cm/s)， δ_p 为渗透距离 (cm)。

利用 Darcy-Weisbach 摩擦方程，管道壁面剪切应力 τ_w 与回火平均出口流速 \bar{u}_{FB} 的关系式为^[41]：

$$\tau_w = \frac{1}{8} \rho f \bar{u}_{FB}^2 \quad (6)$$

其中， ρ 为混合物的密度 (g/cm^3)， f 为 Darcy-Weisbach 摩擦系数。

同时对于动力黏度 μ ，有

$$\mu = \rho \nu \quad (7)$$

式中， ρ 为混合物的密度 (g/cm^3)， ν 为混合物的运动黏度 (cm^2/s)，

将式 (6) 与式 (7) 代入式 (5)，可整理得到：

$$g_{c,flow} = \frac{1}{8} \frac{f}{\nu} \bar{u}_{FB}^2 \quad (8)$$

Cheng^[43] 用式 (9) 所示方程对所有流型 (层流、过渡流和湍流) 的 Darcy-Weisbach 摩擦系数 f 进

行了近似, 该摩擦系数主要取决于雷诺数 Re :

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{Re}{64}\right)^\alpha \left(1.8 \log \frac{Re}{6.8}\right)^{2(1-\alpha)\beta} \left(2 \log \frac{3.7D}{k_s}\right)^{2(1-\alpha)(1-\beta)} \quad (9)$$

且有

$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{Re}{2720}\right)^9\right]^{-1} \quad (10)$$

$$\beta = \left[1 + \left(\frac{Re \cdot k_s}{160 \cdot D}\right)^2\right]^{-1} \quad (11)$$

$$Re = \frac{\bar{u}_{FB} \cdot D}{\nu} \quad (12)$$

其中, k_s 为平均粗糙度高度 (m), 对于不锈钢圆管取 $k_s = 1 \times 10^{-6}$ m; D 为特征长度 (mm), 取为喷嘴出口直径 $D = 4$ mm。

利用式 (8)~(12), 便可计算本文射流边界层回火的实验临界速度梯度 $g_{c,flow}$, 计算结果如图 10 所示。由于实验临界速度梯度与回火平均出口流速的平方呈正相关关系, 故图 10 中实验临界速度梯度随水蒸气稀释比、燃料种类、当量比等参数变化的规律与前文图 5 中回火平均出口流速呈现的变化规律较为相似。

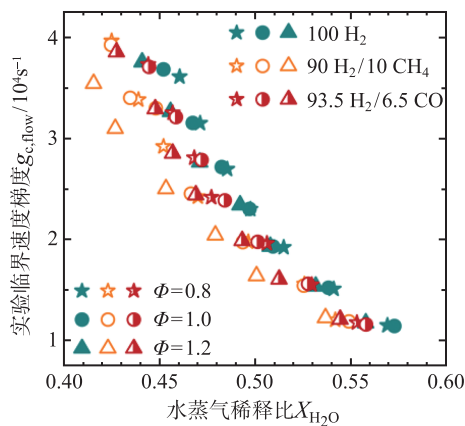


图 10 不同富氢燃料回火时刻工况对应的实验临界速度梯度计算结果

Fig. 10 Experimental critical velocity gradient calculation results corresponding to the operating conditions at the flashback moment of different hydrogen-rich fuels

基于图 9 中的无量纲化分析结果, 可以认为边界层回火倾向性影响最大的参数为层流火焰传播速度, 喷嘴边缘温度的影响次之, 而图 10 显示临界速度梯度也会随着水蒸气稀释比变化, 呈现负指数

相关关系。参考文献 [44] 中的方法, 建立与层流火焰传播速度 S_L 、喷嘴边缘温度 T_{BR} 及水蒸气稀释比 X_{H_2O} 相关的预测临界速度梯度 $g_{c,flame}$ 的计算模型, 其表达式为:

$$g_{c,flame} = k \cdot \left(\frac{S_L}{S_{L,ref}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{T_{BR}}{T_{ref}}\right)^\beta \quad (13)$$

式中, k 为与水蒸气稀释比相关的系数, 为了保持等式两边单位一致, 取其单位为 s^{-1} ; 同时为了对层流火焰传播速度及喷嘴边缘温度进行无量纲化处理, 引入参考层流火焰传播速度 $S_{L,ref}$ 及参考温度 T_{ref} , 取 $S_{L,ref} = 100$ cm/s, $T_{ref} = 298$ K; α 为无量纲火焰传播速度项的拟合指数, β 为无量纲喷嘴边缘温度项的拟合指数。

图 10 显示临界速度梯度会随着水蒸气稀释比呈现负指数相关变化的关系, 故将系数 k 与水蒸气稀释比 X_{H_2O} 的关系表示为:

$$k = A \cdot \exp(B \cdot X_{H_2O}) \quad (14)$$

其中, A 为指前拟合系数, 为保持单位一致, 取其单位为 s^{-1} ; B 为指数拟合系数。

取 $g_{c,flow} = g_{c,flame}$, 使用 Levenberg-Marquardt 算法对实验数据进行方程拟合, 得到式 (13) 及式 (14) 中的 α 、 β 、 A 、 B 四个拟合参数。表 2 展示了拟合得到的临界速度梯度模型参数。

表 2 拟合得到的边界层回火临界速度梯度模型参数

Table 2 Fitted model parameters of the boundary layer flashback critical velocity gradient

燃料名称	样本量 n	$A / 10^{-5} s^{-1}$	B	α	β	Re 范围	X_{H_2O} 范围
燃料 1	21	1.391	-5.794	0.6	0.3	775~1734	0.441~0.573
燃料 2	20	1.083	-5.283	0.6	0.3	631~1957	0.415~0.549
燃料 3	21	1.526	-6.097	0.6	0.3	601~1812	0.427~0.558

将拟合得到的参数代入式 (13) 及式 (14) 所示的临界速度梯度模型, 计算预测临界速度梯度 $g_{c,flame}$, 与实验临界速度梯度绘制在同一图表面, 并绘制误差线, 如图 11 所示。同时对计算得到的不同富氢燃料预测临界速度梯度 $g_{c,flame}$ 与对应的实验临界速度梯度 $g_{c,flow}$ 进行了误差分析, 主要通过计算平均绝对百分比误差 $MAPE_{avg}$ 、绝对百分比误差最大值 $MAPE_{max}$ 、绝对百分比误差最小值 $MAPE_{min}$ 及决定系数 R^2 实现, 计算结果如表 3 所示。

对于三种不同的富氢燃料, 代入不同拟合参数计算得到的临界速度梯度预测值 $g_{c,flame}$ 与实

验临界速度梯度 $g_{c,flow}$ 的平均绝对百分比误差 $MAPE_{avg}$ 均小于 8%，绝对百分比误差最大值 $MAPE_{max}$ 小于 17%，决定系数 R^2 均大于 0.936，表现出较好拟合程度。对于整体 62 个数据点而言，平均绝对百分比误差 $MAPE_{avg}$ 为 7.11%，决定系数 R^2 为 0.9397，表明本文建立的临界速度梯度模型 $g_{c,flame}$ 能较好地定性及定量预测实验临界速度梯度 $g_{c,flow}$ ，进而说明该临界速度梯度模型能较为准确地预测水蒸气稀释下的富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流火焰边界层回火倾向。

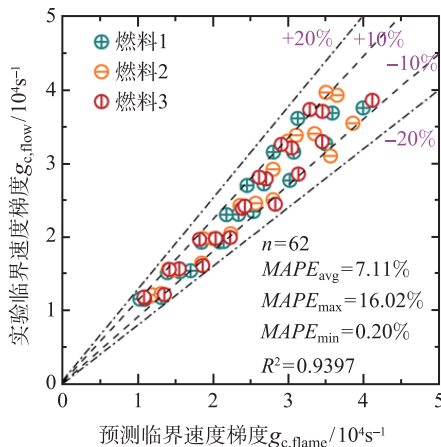


图 11 不同富氢燃料实验临界速度梯度与预测临界速度梯度对比图

Fig. 11 Comparison of experimental critical velocity gradient and predicted critical velocity gradient for different hydrogen-rich fuels

表 3 不同富氢燃料实验临界速度梯度 $g_{c,flow}$ 与预测临界速度梯度 $g_{c,flame}$ 误差分析结果

Table 3 Error analysis results of experimental critical velocity gradient $g_{c,flow}$ and predicted critical velocity gradient $g_{c,flame}$ for different hydrogen-rich fuels

燃料名称	样本数 n	$MAPE_{avg}/\%$	$MAPE_{max}/\%$	$MAPE_{min}/\%$	R^2
燃料 1	21	7.11	13.24	1.45	0.9449
燃料 2	20	6.84	15.07	0.74	0.9376
燃料 3	21	7.38	16.02	0.20	0.9366
总体	62	7.11	16.02	0.20	0.9397

4 结 论

本文使用微混单喷嘴射流火焰实验系统及射流火焰回火边界测量方法，对水蒸气稀释条件下三种典型富氢燃料：燃料 1(H_2)、燃料 2(90% H_2 + 10% CH_4)、燃料 3(93.5% H_2 + 6.5% CO) 的微混单喷嘴射流火焰的回火边界开展了研究，获得了选取的三

种典型富氢燃料回火边界数据序列，并据此建立了对应的回火边界预测模型，主要结论如下：

1) 三种富氢燃料气的回火过程都呈现出边界层回火特征，即回火现象都先发生在喷嘴出口附近的边界层处，进而扩展至整个火焰流场。

2) 实验结果表明，对于同种燃料，其回火平均出口流速都随水蒸气稀释比增加而减小；燃料含氢量越高，其在同一稀释比下对应的回火速度越大。此外，随着稀释比的增加，回火工况对应的喷嘴边缘温度明显降低。在同一稀释比下，三种燃料都呈现出高当量比对应的回火时刻喷嘴边缘温度越高的规律。

3) 无量纲化分析结果表明，层流火焰传播速度 S_L 及喷嘴边缘温度 T_{BR} 对富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流火焰边界层回火具有显著影响。

4) 基于边界层回火的临界速度梯度理论建立了富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流火焰回火边界预测模型。该模型与层流火焰传播速度 S_L 、喷嘴边缘温度 T_{BR} 及水蒸气稀释比 X_{H_2O} 相关，计算得到的回火工况实验临界速度梯度变化规律与回火平均出口流速变化规律高度一致。使用 Levenberg-Marquardt 算法对回火实验数据进行拟合，所得到的临界速度梯度模型能较好地定性及定量预测实验临界速度梯度，预测误差小于 17%，进而说明该临界速度梯度模型能较为准确地预测水蒸气稀释下的富氢燃料/纯氧微混单喷嘴射流火焰边界层回火倾向。

参 考 文 献

- [1] Funke H H W, Beckmann N, Keinz J, et al. 30 Years of Dry-Low-Nox Micromix Combustor Research for Hydrogen-Rich Fuels—An Overview of Past and Present Activities [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2021, 143(7): 071002
- [2] Funke H H W, Keinz J, Kusterer K, et al. Experimental and Numerical Study on Optimizing the DLN Micromix Hydrogen Combustion Principle for Industrial Gas Turbine Applications [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2015: V04AT04A008
- [3] Asai T, Koizumi H, Dodo S, et al. Applicability of a Multiple-Injection Burner to Dry Low-NOx Combustion of Hydrogen-Rich Fuels [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2010: 183-192
- [4] Dodo S, Asai T, Koizumi H, et al. Performance of a Multiple-Injection Dry Low NOx Combustor with Hydrogen-Rich Syngas Fuels [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(1): 011501
- [5] York W D, Ziminsky W S, Yilmaz E. Development and Testing of a Low NOx Hydrogen Combustion System for Heavy-Duty Gas Turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135(2): 022001

- [6] York W D, Romig B W, Hughes M J, et al. Premixed Pilot Flames for Improved Emissions and Flexibility in a Heavy Duty Gas Turbine Combustion System [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, Montréal, Canada, 2015
- [7] Zhang Y, Yang T, Liu X, et al. Reduction of Emissions From a Syngas Flame Using Micromixing and Dilution with CO₂ [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(11): 6595–6601
- [8] Zhang Y, Zhang H, Tian L, et al. Temperature and Emissions Characteristics of a Micro-Mixing Injection Hydrogen-Rich Syngas Flame Diluted with N₂ [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(36): 12550–12559
- [9] Liu X, Shao W, Liu C, et al. Numerical Study of a High-Hydrogen Micromix Model Burner Using Flamelet-Generated Manifold [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(39): 20750–20764
- [10] Liu X, Shao W, Liu Y, et al. Cold Flow Characteristics of a Novel High-Hydrogen Micromix Model Burner Based on Multiple Confluent Turbulent Round Jets [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(7): 5776–5789
- [11] Lyu Y, Xing C, Liu L, et al. Study of Turbulent Flame Characteristics of Water Vapor Diluted Hydrogen-Air Micro-Mixing Combustion [J]. *Renewable Energy*, 2022, 189: 1194–1205
- [12] Cao Z, Lyu Y, Peng J, et al. Experimental Study of Flame Evolution, Frequency and Oscillation Characteristics of Steam Diluted Micro-Mixing Hydrogen Flame [J]. *Fuel*, 2021, 301: 121078
- [13] 李丹, 吕海陆, 张杨, 等. 来流预混均匀性对湍流射流火焰回火特性的影响 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2023, 63(4): 560–571
LI Dan, LÜ Hailu, ZHANG Yang, et al. Effect of Gas Flow Mixing Uniformity on the Flashback Characteristics of Turbulent Jet Flames [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2023, 63(4): 560–571
- [14] Tanneberger T, Schimek S, Paschereit C O, et al. Combustion Efficiency Measurements and Burner Characterization in A Hydrogen-Oxyfuel Combustor [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(56): 29752–29764
- [15] Lu C, Zhang L, Cao C, et al. The effects of N₂ and Steam Dilution on NO Emission for a H₂/Air Micromix Flame [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(63): 27266–27278
- [16] Lu C, Zhang L, Jiang X, et al. The Flame Structure and Combustion Dynamics in a Steam Diluted H₂/Air Micromix Flame [J]. *Fuel*, 2024, 357: 129903
- [17] Lieuwen T, McDonell V, Santavicca D, et al. Burner Development and Operability Issues Associated with Steady Flowing Syngas Fired Combustors [J]. *Combustion Science and Technology*, 2008, 180(6): 1169–1192
- [18] Plee S L, Mellor A M. Review of Flashback Reported in Prevaporizing/Premixing Combustors [J]. *Combustion and Flame*, 1978, 32: 193–203
- [19] 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
- [20] Friedman R, Johnston W C. The Wall-Quenching of Laminar Propane Flames as a Function of Pressure, Temperature, and Air-Fuel Ratio [J]. *Journal of Applied Physics*, 1950, 21(8): 791–795
- [21] Bellenoue M, Kageyama T, Labuda S A, et al. Direct Measurement of Laminar Flame Quenching Distance in a Closed Vessel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(3): 323–331
- [22] Boust B, Sotton J, Labuda S A, et al. A Thermal Formulation for Single-Wall Quenching of Transient Laminar Flames [J]. *Combustion and flame*, 2007, 149(3): 286–294
- [23] Lewis B, Von Elbe G. Stability and Structure of Burner Flames [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1943, 11(2): 75–97
- [24] Garside J E, Forsyth J S, Townend D T A. The Stability of Burner Flames [J]. *J Inst Fuel*, 1945, 18: 175–85
- [25] Edse R. Studies on Burner Flames of Hydrogen-Oxygen Mixtures at High Pressures [M]. *Wright Air Dev Cent Tech Rep*, 1952: 52–59
- [26] Grumer J, Harris M E. Temperature Dependence of Stability Limits of Burner Flames [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1954, 46(11): 2424–2430
- [27] Bollinger L E, Edse R. Effect of Burner-Tip Temperature on Flash Back of Turbulent Hydrogen-Oxygen Flames [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1956, 48(4): 802–807
- [28] Lee S T, T'ien J S. A Numerical Analysis of Flame Flashback in a Premixed Laminar System [J]. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 273–285
- [29] 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
- [30] 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 & exhibit, 2005: 3585
- [31] Noble D R, Zhang Q, Shareef A, et al. Syngas Mixture Composition Effects Upon Flashback and Blowout [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2006: 357–368
- [32] Putnam A A, Jensen R A. Application of Dimensionless Numbers to Flash-Back and Other Combustion Phenomena [C]//Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena. Elsevier, 1948, 3(1): 89–98
- [33] Kurdyumov V, Fernandez-Tarrazo E, Truffaut J M, et al. Experimental and Numerical Study of Premixed Flame Flashback [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(1): 1275–1282
- [34] Eichler C, Sattelmayer T. Experiments on Flame Flashback in a Quasi-2D Turbulent Wall Boundary Layer for Premixed Methane-Hydrogen-Air Mixtures [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(1): 011503
- [35] Eichler C, Sattelmayer T. Premixed Flame Flashback in Wall Boundary Layers Studied by Long-Distance Micro-PIV [J]. *Experiments in fluids*, 2012, 52(2): 347–360
- [36] ANSYS Inc. ANSYS Chemkin-Pro Release 19.2 [CP/OL]. [2024-06-21]. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-chemkin-pro>
- [37] Reaction Design. ANSYS Chemkin Theory Manual 19.2

- [M]. San Diego: Reaction Design, 2018
- [38] Wagnanski I, Sokolov M, Friedman D. On Transition in a Pipe. Part 2. The Equilibrium Puff [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1975, 69(2): 283–304
- [39] Durst F, Ünsal B. Forced Laminar-to-Turbulent Transition of Pipe Flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 560: 449–464
- [40] Nishi M, Ünsal B, Durst F, et al. Laminar-to-Turbulent Transition of Pipe Flows Through Puffs and Slugs [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 614: 425–446
- [41] White F M, Ng C O, Saimek S. *Fluid Mechanics* [M]. McGraw-Hill, Cop, 2011
- [42] 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
- [43] Cheng N S. Formulas for Friction Factor in Transitional Regimes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(9): 1357–1362
- [44] Goldmann A, Dinkelacker F. Experimental Investigation and Modeling of Boundary Layer Flashback for Non-Swirling Premixed Hydrogen/Ammonia/Air Flames [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 226: 362–379