

纯氢旋流燃烧及其污染物排放特性的实验研究

马立新¹, 于榕榕¹, 李国能^{2,*}, 刘亚杰¹, 李强盛²,

靳士振¹, 赵丹³, 黄珂楠²

(1. 天津华电福源热电有限公司, 天津 301700; 2. 浙江科技大学 能源与环境系统工程系, 浙江 杭州 310023; 3. 坎特伯雷大学 工程学院 机械工程系, 新西兰 克赖斯特彻奇 8140)

摘要: 为开发零碳燃料微型燃烧系统, 设计和测试了一种微型纯氢旋流燃烧器。该燃烧器采用非预混燃烧模式和低流阻设计, 旋流叶片一体化成型, 配备预热环形流道, 旋流强度为 0.76, 流动阻力小于 86 Pa, 能够在较宽的化学当量比和较大的输入功率范围内高效运行, 并实现碳氢气体燃料与纯氢燃料的灵活切换。基于数值模拟, 研究了微型旋流燃烧器内的空气动力学特性, 结果表明, 该燃烧器在出口处形成良好的高速区和回流区, 中心回流区呈轴对称分布, 可有效卷吸下游高温烟气, 从而实现稳定的旋流燃烧。通过实验, 详细研究了化学当量比(0.3~0.6)和输入功率(495~990 W)对微型纯氢旋流燃烧温度分布和污染物排放浓度的影响规律。结果发现, 开发的燃烧器在化学当量比为 0.3~0.6 时可高效稳定运行, 随着化学当量比的增加, 烟气温度先上升后下降。当输入功率为 990 W 时, 化学当量比为 0.3、0.4、0.5 和 0.6 的 7 个测点的平均温度分别为 1 182、1 277、1 376 和 1 256 K, 并在化学当量比为 0.5 时达到最高值, 测点最高温度为 1 579 K。输入功率显著影响烟气温度, 随着热负荷的增加, 烟气温度不断上升。在化学当量比为 0.5, 输入功率为 990 W 时, NO 的排放浓度达到 140.6 mg/m³。在相同输入功率下, 降低化学当量比能显著降低 NO 浓度; 当化学当量比为 0.3、输入功率为 990 W 时, 氢气能完全燃尽, 同时 NO 排放浓度降至 60.3 mg/m³, 较化学当量比为 0.5 时的 140.6 mg/m³ 降低了 57.1%。纯氢火焰在有光源环境下透明, 肉眼难以观测; 在无光源条件则显示出微弱的发光特性, 火焰呈现橙红色, 周围有微弱的蓝紫色, 主要是燃烧中间产物导致。随着输入功率的增加, 纯氢火焰功率高度不断提升。当输入功率为 495 W 时, 火焰锚定在燃烧器出口平面; 当输入功率达到 990 W 时, 火焰高度可超过 3 cm。

关键词: 微型旋流燃烧; 纯氢燃烧; 化学当量比; 输入功率; 污染物排放浓度

中图分类号: X701

文献标识码: A

Experimental Investigation of Pure Hydrogen Swirl Combustion and Its Pollutant Emission Characteristics

MA Lixin¹, YU Rongrong¹, LI Guoneng^{2,*}, LIU Yajie¹, LI Qiangsheng²,
JIN Shizhen¹, ZHAO Dan³, HUANG Kenan²

(1. Tianjin Huadian Fuyuan Thermal Power Co., Ltd., Tianjin 301700, China; 2. Department of Energy and Environment System Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 3. Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Canterbury, Christchurch 8140, New Zealand)

Abstract: To develop a micro combustion system for carbon-free fuels, the micro pure-hydrogen swirl combustor was designed and tested. This combustor is able to operate efficiently across a wide range of

收稿日期: 2025-01-17

修回日期: 2025-03-11

接受日期: 2025-03-13

DOI: 10.20078/j.eep.20250404

基金项目: 浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划资助项目(2024C03116); 华电集团华电电力科学研究院科技资助项目(CHDER/QRZX-CG-2024-0012)

第一作者: 马立新(1970—), 男, 山东枣庄人, 工程师, 主要研究方向为燃机燃烧调整。E-mail: 13752575212@139.com

*通讯作者: 李国能(1981—), 男, 广东广州人, 教授, 主要研究方向为燃烧控制及分布式发电。E-mail: 109026@zust.edu.cn

equivalence ratios and input power levels, and to seamlessly switch between hydrocarbon gas fuels and pure hydrogen. The combustor features the non-premixed combustion mode and a low-flow-resistance design, incorporating integrated swirl blades and a preheated annular flow channel. The swirl number is 0.76, and the flow resistance is less than 86 Pa. The aerodynamic characteristics of the micro swirl combustor were explored through numerical simulations. The results demonstrate that well-distributed high-velocity zones and recirculation regions are formed at the combustor outlet. The central recirculation zone exhibits an axisymmetric distribution, effectively entraining downstream hot flue gases and thereby achieving stable swirl combustion. Experimental investigations were carried out to study the effects of the equivalence ratio (0.3 – 0.6) and input power (495 – 990 W) on the temperature distribution and pollutant emissions of pure-hydrogen combustion. The results show that the developed micro swirl combustor operates efficiently and stably within the tested equivalence ratio range. When the input power is 990 W, the average temperatures measured at seven monitoring points at equivalence ratios of 0.3, 0.4, 0.5, and 0.6 are 1 182, 1 277, 1 376, and 1 256 K, respectively. The highest flue gas temperature is achieved at an equivalence ratio of 0.5, with a maximum measured temperature of 1 579 K. The input power rate has a significant impact on the flue gas temperature, with higher heat release rates resulting in increased temperatures. At an equivalence ratio of 0.5 and a heat release rate of 0.62 MW/m², the NO emission concentration reaches 140.6 mg/m³. Reducing the equivalence ratio while maintaining the same heat release rate significantly lowers NO emissions. For instance, at an equivalence ratio of 0.3 and an input power of 990 W, the NO concentration drops to 60.3 mg/m³, representing a 56.2% reduction, while ensuring complete hydrogen combustion. The flame of pure hydrogen appears transparent and is difficult to observe with the naked eye under illuminated environments. In the absence of ambient light, it exhibits weak luminescence primarily caused by combustion intermediates, manifesting as an orange-red color. Surrounding this orange-red region, a faint bluish-purple hue can be observed. The flame height of pure hydrogen increases continuously with increasing input power. When the input power reaches 495 W, the hydrogen flame becomes anchored at the exit of the micro swirl combustor. At an elevated input power of 990 W, the flame height exceeds 3 cm while maintaining stable combustion dynamics.

Keywords: Micro swirl combustion; Pure hydrogen combustion; Equivalence ratio; Input power; Pollutant emission concentration

0 引 言

碳达峰和碳中和是我国能源供给结构转型的重大挑战和需求, 当前我国能源生产正在快速转向光伏和风能^[1-2], 利用不稳定的光伏电和风电大规模制取 H₂ 是一种前景广阔的能源利用路径^[3-4]。随着《中华人民共和国能源法》的正式实施, H₂ 作为一种清洁能源载体, 将得到广泛利用, 因此, 研发 H₂ 的终端利用技术迫在眉睫。除化工领域之外, 电力生产和交通领域被认为是极具潜力的 H₂ 利用终端^[5], 包括燃料电池^[6]、掺氢或纯氢燃气轮机^[7]、纯氢内燃机^[8]等。设计和开发高性能的纯氢气燃烧器是 H₂ 终端利用技术重要基础, 是推进

纯氢燃气轮机、纯氢内燃机以及基于合成燃料^[9]的新型热电联供^[5]的核心技术, 其技术挑战包括回火、热声不稳定、NO_x 浓度高、压力损失以及部件冷却等问题^[10]。

当前研发纯氢燃烧器尚处于起步阶段, 相关研究文献较少。在纯氢燃烧的速率、火焰形态、效率和污染物生成方面, SOLANA PÉREZ 等^[11]研究了在燃烧功率为 30 kW, 运行化学当量比为 0.7 条件下, 工业顺序燃烧器内纯氢火焰的混合和稳燃特性, 实验发现其火焰温度介于 850~1 100 K 之间, 燃料和空气的混合特性对纯氢的火焰形态具有重要的影响作用。XU 等^[12]采用数值模拟研究了体积比介于 0~60% 的稀释 H₂O 对纯氢火焰

NO 生成的作用机制,发现了稀释 H_2O 可以有效降低工作压力为 1~25 个大气压下纯氢火焰的 NO 生成浓度。LEITE 等^[13]采用多种激光测量手段研究了内燃机中稀薄纯氢火焰的燃烧特性,实验发现纯氢火焰对化学当量比的敏感性相对于丙烷火焰有所降低,进一步的测量发现纯氢火焰表现出更快的增长速率和更低的循环变化率。DONG 等^[14]发现在化学当量比为 1 的条件下,没有预热的纯氢火焰速度是天然气火焰速度的 6 倍,达到 2.1 m/s。DYBE 等^[15]开发了一种湿式双旋流燃烧器,实现纯氢和纯天然气之间的自由切换,并大幅度降低了 NO_x 的排放浓度。刘泓芳等^[16]通过粒子图像测速技术和羟基平面激光诱导荧光技术研究了纯氢阵列微管预混火焰的结构及其湍流燃烧速度,结果表明氢气微预混火焰归一化湍流燃烧速度达到 7~11 m/s,为火焰面积比为 3.5~5.5 的 2 倍,表明氢气火焰局部燃烧速度超过了层流燃烧速度。徐智良等^[17]采用 FLUENT 软件模拟了不同条件下的纯氢天然气扩散火焰的燃烧特性,表明 H_2 浓度与火焰高度及火焰温度具有高度的关联性。余世达等^[18]优化了纯氧-纯氢燃烧 Graz 循环,在同等输入参数下,其循环效率可增加 0.5%。

在纯氢燃烧不稳定机理及其控制研究方面,LE 等^[19]开发了一种多层空气助燃的纯氢燃烧器,详细测试了其火焰稳定特性、燃烧效率和 NO_x 排放特性。欧阳广^[20]实验结果表明,当家用燃气中掺氢比例达到 55% 时,火焰稳定性明显下降;当掺氢比例达到 60% 时,燃气具发生熄火保护。汪硕峰等^[21]测试了稀燃条件下纯氢发动机怠速燃烧

和循环变动特性,结果表明过量空气系数对燃烧的有效压力、循环变动和燃料能量流量均有重要的影响。李炳涛等^[22]通过调节微管长度、数目比例、阵列方式等参数,控制了纯氢预混阵列微管燃烧不稳定。

综上所述,国内外对纯氢燃烧器的研究尚处于起步阶段,仍需大量的探索和研究。此外,上述研究均采用空压机或压缩空气瓶提供助燃空气,鲜有报道采用低功耗的鼓风机实现纯氢燃烧。本研究报道了一种一体成型的低流阻微型旋流燃烧室,可采用微型低功耗鼓风机驱动,实现了 100% 的纯氢燃烧。实际应用时需要检测鼓风机的风压,从而控制氢气的断通。本文详细研究了化学当量比和输入功率对燃烧温度和污染物浓度的影响规律,为氢能的大规模终端利用提供有价值的实验数据和燃烧器设计方案。

1 实验方法

1.1 微型旋流燃烧器结构

微型旋流燃烧器的总体直径为 56 mm,高度为 39 mm,采用 6061T6 铝合金在数控加工中心精密加工获得,其结构尺寸及丙烷火焰形貌如图 1 所示。微型旋流燃烧器由燃烧器主体、氢气多孔喷嘴组件、盖板和堵头组成。燃烧器主体如图 1 (b)所示,开孔实现预热腔与旋流空气腔的气流连接,其空气气流的组织和 H_2 的流通通道如图 1(a)所示。空气通过空气入口进入预热腔预热,进而进入旋流空气腔,最后流经旋流器形成旋转气流。旋流器由 6 片倾斜角度为 23° 、高度为 5 mm

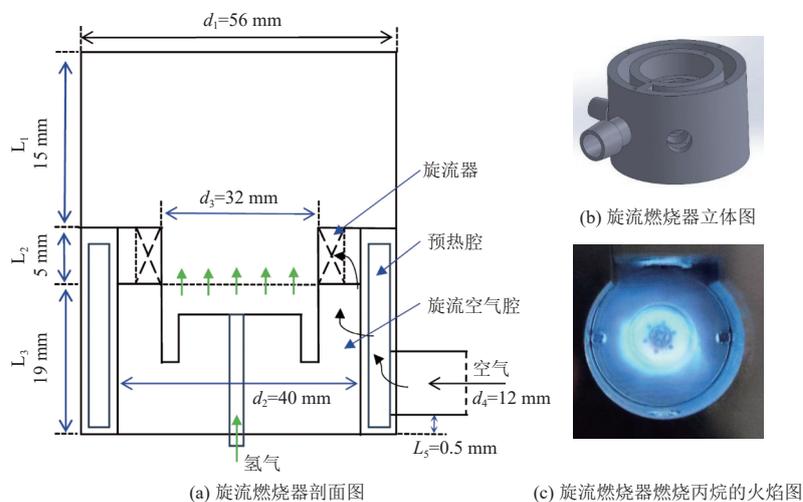


图 1 微型旋流燃烧器的结构及其丙烷火焰形貌

Fig. 1 Configuration of micro swirl combustor and its propane flame shape

的叶片组成,为燃烧器主体的一部分,基于数控加工获得,一体化成型,无需安装,从而确保了旋流叶片角度的准确性。 H_2 通过燃料入口进入燃料腔,通过6个直径为2 mm的燃料喷嘴从中心垂直喷出,与旋流气流进行混合和燃烧。微型旋流燃烧器的流道设计采用数值模拟优化流动阻力,避免局部大阻力区,从而可以采用微型低功率鼓风机驱动燃烧器工作。本文设计的微型旋流燃烧器属于非预混燃烧组织方式,从根本上避免了 H_2 回火或闪燃问题。由图1(c)可知,在燃用丙烷时,火焰均匀,呈现出淡蓝色,表明燃烧器的空气组织情况良好。在实际测试时,燃料为 H_2 ,可实现纯氢的燃烧。

1.2 实验台架

图2为实验台架示意图, H_2 由氢气钢瓶提供,纯度为99.99%,由Alicat质量流量控制器控制流量,控制精度为0.6%。燃烧空气通过空压机、空气储罐、除尘除湿装置和Alicat质量流量控制器控制。烟气中的 NO_x 浓度通过Testo 340电化学烟气分析仪测量,其精度为 $\pm 6.7 \text{ mg/m}^3$ (0~133.9 mg/m^3)或 $\pm 5\%$ (100~2 677 mg/m^3)。Testo 340电化学烟气分析仪将待测气体经过除尘、去湿后进入传感器室,经渗透膜进入电解槽,使在电解液中被扩散吸收的气体在规定的氧化电位下进行电位电解,根据耗用的电解电流求出其气体的浓度。采用直径为4 mm的S型热电偶测量温度,型号为WRP-100,传感头裸露,偶丝直径0.3 mm,测温范围为0~1 600 $^{\circ}\text{C}$,测温精度为 $\pm 0.25\%$ 。燃烧室沿着高度方向(y 方向)距离燃烧器出口平面32.5、42.5、47.5、57.5、72.5、88.5、103.5 mm安装热电偶测点。由于传感头裸露,测温结果需要经过辐射修正,修正公式为 $h\pi d^2(T - T_m) = \varepsilon\sigma\pi d^2(T_m^4 - T_w^4)$,其中 T 为烟气温度, K; T_m 为热电偶测量值, K; T_w 为燃烧室壁面温度, K; d 为热电偶测点直径, m; ε 为热电偶测点的发射率; σ 为斯蒂芬—波尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。燃烧稳定后开展相关数据采集,稳定性定义为测点温度在5 min内的波动值小于5 K。所有的温度信号采用动态数据采集仪进行采集,采样频率为100 Hz,采集精度为 $\pm 0.1\%$ 。温度值为连续10 min测量数据的数学平均值。烟气成分为3次独立测量的数学平均值。本文设计的微型旋流燃烧器可通过一个微型鼓风机实现燃烧驱动,微型鼓风机的功耗小于1 W。由于本文开展更为精确的测量工作,需要精确控

制化学当量比,采用空压系统提供燃烧空气。在实际应用时,图2的空气供给系统(含空压机、储气罐、除尘除湿器和质量流量控制器)可替换为微型鼓风机,通过调节鼓风机的电压或频率实现助燃空气流率的控制。

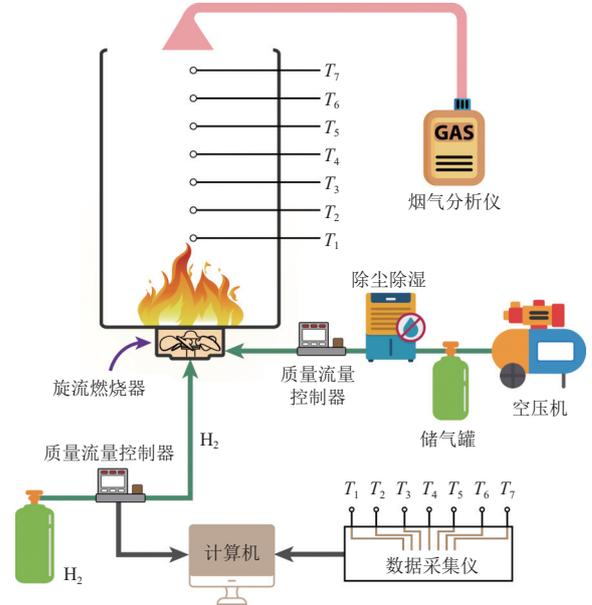


图2 微型旋流燃烧器纯氢燃烧性能实验台架

Fig. 2 Experimental setup of pure hydrogen combustion based on a micro swirl combustor

1.3 参数定义

输入功率(q_{in})定义为 H_2 的体积流率与其体积低位发热量的乘积。 H_2 的体积低位发热量为 9.9 MJ/m^3 [23]。基于输入功率可得到燃烧室截面热负荷(q_{in}/A),其中 A 为燃烧室的横截面积(0.01596 m^2)。化学当量比(φ)是控制燃烧过程的核心参数,定义见式(1):

$$\varphi = \frac{(V_{H_2}/V_{air})_{actual}}{(V_{H_2}/V_{air})_{stochiometric}} \quad (1)$$

式中:分子表示实际工作时的燃料与空气比,分母表示化学当量比为1.0时的燃料与空气比, V_{H_2} 和 V_{air} 分别为燃料中 H_2 和空气的流率,单位为 mL/s 。

旋流强度(S_w)是旋流燃烧器的一个重要参数,其定义见式(2):

$$S_w = \frac{2\pi\rho \int_0^R WrUdr}{2\pi\rho \int_0^R UrUdr} \quad (2)$$

式中: W 和 U 分别为切向速度和轴向速度, m/s ; r 为半径, m; R 为旋流燃烧器出口的半径,为0.026 m; ρ 为空气的密度, kg/m^3 。

燃烧效率(η_{fuel})定义见式(3):

$$\eta_{\text{fuel}} = \frac{(V_{\text{H}_2} - V_{\text{H}_2f})}{V_{\text{H}_2}} \quad (3)$$

式中: V_{H_2f} 为烟气中 H_2 的流率, mL/s。烟气中的 H_2 流率通过氢气报警器进行测量, 其报警阈值为 5 mg/m^3 。当氢气报警器不报警时, 认为 H_2 燃烧效率为 100%。

1.4 实验步骤及实验工况

首先, 启动空气压缩系统, 通过质量流量控制器设定燃烧空气流率, 启动数据采集系统、水泵和散热风扇。其次, 打开氢气钢瓶减压阀, 通过 Alicat 质量流量控制器设定 H_2 的流率, 点火。再次, 通过调节 H_2 的流率获得不同的输入功率, 通过设定空气流率获得不同的化学当量比。最后, 测量各个点位的温度和烟气中的 NO_x 浓度。实验探索了化学当量比和输入功率对纯氢旋流燃烧的燃烧特性及污染物排放特性的影响, 其实验工况见表 1。

2 流场分析

为分析微型旋流燃烧器的流场, 探明其空气动力学特性, 采用 ANSYS FLUENT 14.0 进行全尺

表 1 纯氢旋流燃烧火焰及其污染物排放特性的实验工况

Table 1 Experimental conditions for the pure hydrogen combustion characteristics and its pollutant emissions in the micro swirl combustor

序号	$V_{\text{H}_2}/(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$	q_m/W	$q_m/A/(\text{MW}\cdot\text{m}^{-2})$	$V_{\text{air}}/(\text{mL}\cdot\text{s}^{-1})$	φ
1	100.0	990	0.62	397	0.6
2	100.0	990	0.62	477	0.5
3	100.0	990	0.62	595	0.4
4	100.0	990	0.62	793	0.3
5	50.0	495	0.31	238	0.5
6	66.7	660	0.42	317	0.5
7	83.3	825	0.52	398	0.5

寸建模和数值模拟, 含燃烧室在内的网格数量为 647 万。当计算网格数量为 327 万、501 万、568 万和 647 万时, 获得的旋流强度分别为 0.781、0.774、0.767 和 0.762, 说明流动模拟已实现网格无关性。为了更好地模拟旋转流场, 采用雷诺应力湍流模型, 所有壁面均设置为 WALL 条件。图 3 为微型旋流燃烧器的动压分布和流场。由图 3(a)

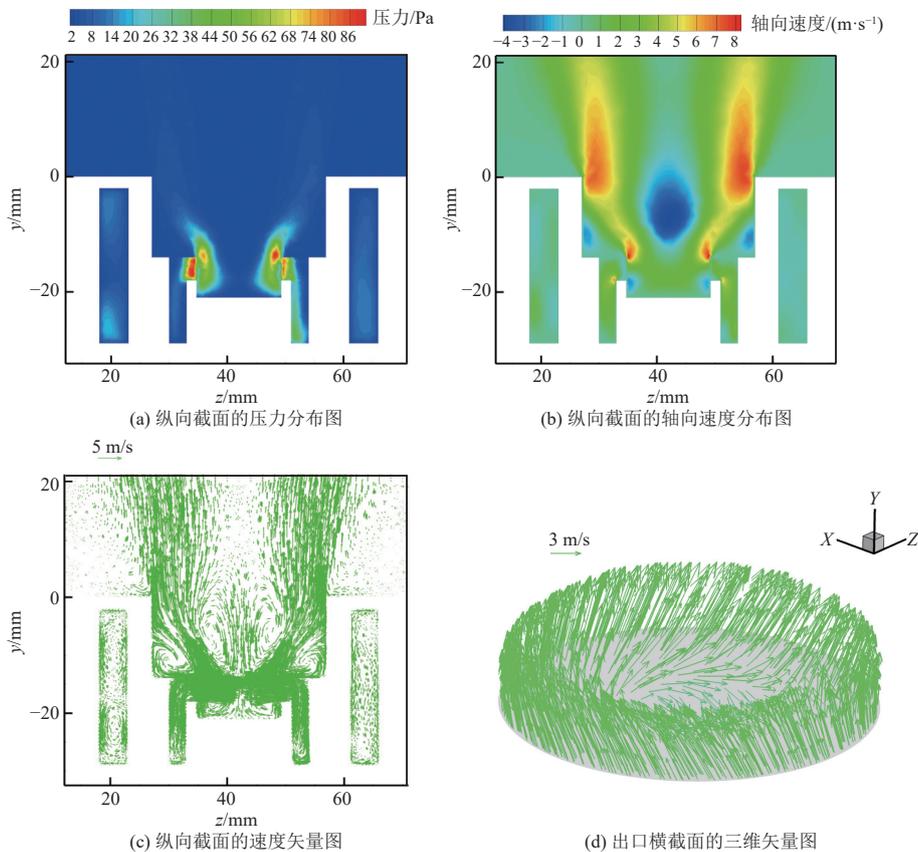


图 3 微型旋流燃烧器动压分布和流场的数值模拟结果

Fig. 3 Dynamic pressure distribution and flow field of the micro swirl combustor

可知,高动压区域位于旋流叶片及其出口区域,最大的动压仅为 86 Pa,说明微型旋流燃烧器的流道设计合理,从而可采用微型低功耗鼓风机驱动燃烧。由图 3(b)可知,微型旋流燃烧器出口处形成良好的高速区和回流区,最大轴向速度达 8 m/s,高于 H_2 的燃烧速度 2.1 m/s^[14],中心形成轴对称回流区,实现稳燃,最大回流速度为 4 m/s,说明能有效卷吸下游高温烟气,从而实现稳定的旋流燃烧。燃烧器截面的速度矢量图如图 3(c)所示,除中心回流区之外,旋流燃烧器安装到燃烧室时,在靠近燃烧室壁面和安装底面的区域形成了一个涡环,从而进一步卷吸高温烟气进行稳燃。图 3(d)为微型旋流燃烧器出口横截面的三维矢量图,由此可见其气流的三维方向,在中心处产生回流区以实现稳燃。

图 4 为微型旋流燃烧器出口横向 [(0.035, -0.001, 0.04)→(0.065, -0.001, 0.04)] 的切向速度和轴向速度的分布情况。由图 4 可知,最大切向速度达到 4 m/s,呈现出逆时针旋转流动。轴向速度呈现出“双肾型”分布,最大正向轴向速度接近 8 m/s,最大回流速度大于 2 m/s。根据式(2),计算得微型旋流燃烧的旋流强度约为 0.76。上述旋流强度为出口平面以下 1 mm 横截面的数值模拟统计值,且未经过实验测量结果的验证,后续可开展三维激光粒子测速进一步验证和研究其流动特性。对于本文中的旋流流动,其数值模拟不涉及气液固多相流动、复杂传热和化学反应,因此采用成熟的 ANSYS FLUENT 软件对其流动进行基本的数值模拟,在实现网格无关性后具备参考作用。从本文的研究结果和结论可知,一定的旋流

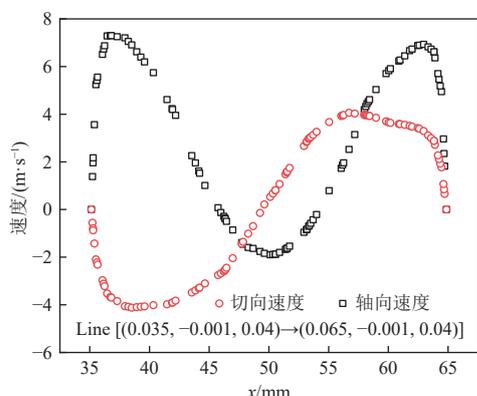


图 4 微型旋流燃烧器出口横线的切向速度和轴向速度的分布

Fig. 4 Tangential and axial velocity distributions at the horizontal line of the outlet of micro swirl combustor

强度误差对研究结果和结论不产生影响。通过数值模拟获得其流场,可用于分析其基本的流动状况和旋流强弱。

3 实验结果及分析

3.1 化学当量比对纯氢旋流燃烧温度场的影响

图 5 展示了化学当量比为 0.3、0.4、0.5 和 0.6,输入功率为 990 W 时燃烧室内的温度分布曲线,此时燃烧室截面热负荷为 0.62 MW/m²。当化学当量比小于 0.9,烟气中的残留 H_2 浓度即可小于氢气报警器的报警浓度(5 mg/m³),说明此时 H_2 已完全燃烧。当化学当量比为 0.7、0.8 和 0.9 时,氢气火焰呈红色,且火焰高于 100 mm,说明在这些化学当量比下的燃烧过程需要在较长距离内完成燃烧。因此,本文研究了化学当量比为 0.3、0.4、0.5 和 0.6 时的温度分布情况,此时的火焰在有光源的情况下透明无色。由图 5 可知,本文设计的微型旋流燃烧器性能优异,在化学当量比为 0.3 时,仍保持 100% 的燃尽率。在上述的化学当量比下,测点的温度呈现逐步下降的趋势,说明在这些化学当量比下火焰的高度均小于 32.5 mm,锚定在微型旋流燃烧器的出口。此外,化学当量比对本文开发的微型旋流燃烧器的纯氢燃烧火焰温度有重要的影响。在化学当量比为 0.5 时,其燃烧后的烟气温度(32.5 mm 处)最高,达到 1 579 K;在化学当量比为 0.3 时,其烟气温度(32.5 mm 处)最低,为 1 331 K,二者相差达 248 K。由此可见,在实现纯氢完全燃尽的条件下,越低的化学当量比,其烟气温度越低,意味着纯氢火焰锋面的温度越低,有利于控制污染物的生产浓度。由图 5 可知,随着测点位置的增高,其烟气温度越低,例如化学当量比为 0.5 时,最高烟气温度为 1 579 K,最低烟气温度为 1 200 K,相差达 379 K。由此可见,燃烧室的壁面散热效果显著,有效降低了燃烧后的烟气温度。此外,化学当量比为 0.6 时的最高烟气温度为 1 407 K,比化学当量比为 0.5 时的最高烟气温度 1 579 K 低 172 K,说明在化学当量比为 0.5 时,本文开发的微型旋流燃烧器的燃烧区域最为集中,产生了最高的烟气温度。从对污染物的控制角度出发,则需要尽可能降低高温烟气区域。由图 5 可见,化学当量比为 0.3、0.4、0.5 和 0.6 的 7 个温度测点的平均温度分别为 1 182、1 277、1 376 和 1 256 K,由此可以推测化学当量比为 0.5 时的 NO 排放浓度最高。

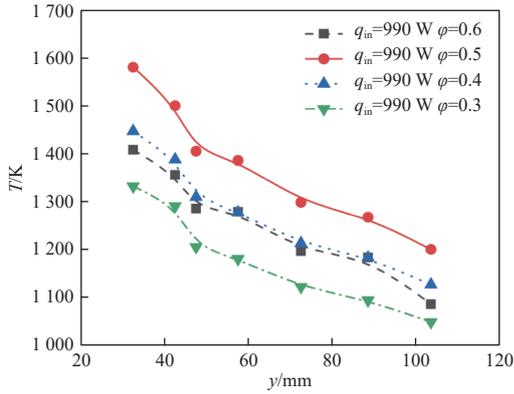


图 5 化学当量比对微型旋流燃烧器纯氢燃烧温度场的影响

Fig. 5 Influence of the equivalent ratio on the temperature distribution of pure hydrogen combustion in micro swirl combustor

3.2 输入功率对纯氢旋流燃烧温度场的影响

图 6 展示了化学当量比为 0.5, 输入功率为 495、660、825 和 990 W 时燃烧室内的温度分布曲线, 此时燃烧室截面热负荷依次为 0.31、0.42、0.52 和 0.62 MW/m²。燃烧室截面热负荷反映了燃烧室内的温度水平和 H₂ 在燃烧室内的停留时间, 当前的燃烧室截面热负荷与大型燃气轮机燃烧筒(约 5 MW/m²)相比仅为十分之一。本研究设计的旋流燃烧系统为常压燃烧系统, 并非大型燃气轮机的高压燃烧系统, 旋流燃烧系统的截面热负荷仍低于当前大量应用的常压燃气供热锅炉(约 1.2 MW/m²)^[24]。由图 6 可知, 烟气温度随着输入功率的减低迅速降低, 输入功率为 990、825、660 和 495 W 时, 测量获得的最高烟气温度分别为 1 579、1 428、1 345 和 1 205 K。在 1 579 K 的烟气温度下, 燃烧室已经被加热得通红, 接近材料能承受的极限, 因此本文没有进一步提高燃烧室的截面热负荷。7 个测点的平均温度分别为 1 376、1 272、1 165 和 1 031, 由此可见整个燃烧室内的温度水平较高。由于目前燃烧室壁面没有布置取热设备(如燃气锅炉的水冷壁等), 温度水平较高, 其污染物生产水平预期较高。后续工作可通过设计布置取热设备的燃烧室, 探索更高截面热负荷条件下的纯氢火焰温度和污染物生产浓度。由于燃烧室壁面的自然散热作用, 燃烧室出口处的烟气温度明显低于上游温度, 最高烟气温度与出口烟气温度的差值均超过了 300 K。通过分析图 5 和图 6, 本文开发的微型旋流燃烧器可以

在较宽的化学当量比和较大的输入功率范围内高效工作, 可以基于该微型旋流燃烧器开发高性能的微型温差发电机^[25]。

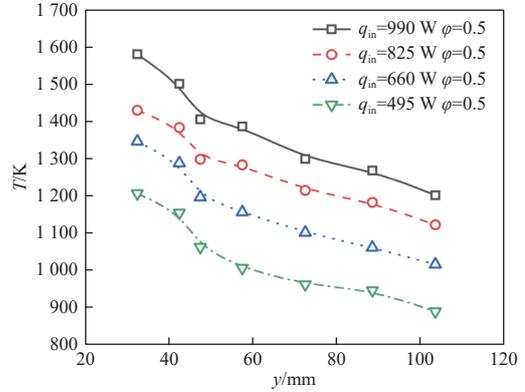


图 6 输入功率对微型旋流燃烧器纯氢燃烧温度场的影响

Fig. 6 Effect of the input power on the temperature distribution of pure hydrogen combustion in micro swirl combustor

3.3 化学当量比和输入功率对污染物生产的影响

图 7 展示了化学当量比为 0.3、0.4、0.5 和 0.6, 输入功率为 495、660、825 和 990 W 时烟气中的 NO 和 NO_x 的排放浓度。与第 3.1 和第 3.2 节的讨论一致, 较高的温度水平导致了污染物排放浓度的增加, 化学当量比为 0.5, 输入功率为 990 W 工况下, 最高的 NO 和 NO_x 浓度分别达到了 140.6 mg/m³ 和 147.3 mg/m³。综合比较图 6 和图 7 可知, 纯氢火焰的污染物的排放浓度与烟气水平温度水平呈正相关。由图 7 分析, 当化学当量比为 0.3, 输入功率为 990 W 时, NO 和 NO_x 浓度分别达到了 57.6 mg/m³ 和 60.3 mg/m³, 远低于最高值。由此可见, 为实现更低的污染物排放, 可尽可能降低化学当量比。当化学当量比为 0.5 时, 输入功率 495、660、825 和 990 W 对应的 NO 浓度分别为 140.6、135.2、101.8 和 67.0 mg/m³。值得注意的是, 当燃烧室壁面增加取热设备后, 如增加水冷壁或安装温差发电模块后, 其高温烟气部分将迅速降低, 此时将大幅度降低 NO_x 的生成浓度。当化学当量比为 0.2 时, 燃烧变得不稳定, 因此没有采集该工况下的相关数据。对于纯氢燃烧, NO 和 NO_x 均为热力型氮氧化物, 与火焰锋面的 H⁺ 和 OH⁻ 浓度高度相关^[26-27], 这与 H₂ 较高的活泼性相关。后续的研究可以参考采取湿式纯氢燃烧技术, 以进一步降低 NO_x 的生成浓度。

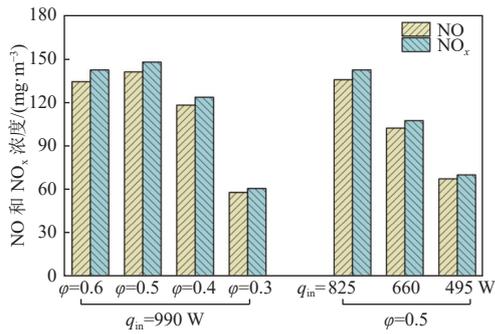


图7 化学当量比和输入功率对微型旋流燃烧器纯氢燃烧污染物排放的影响

Fig. 7 Effect of the equivalent ratio and input power on the pollutant emissions of pure hydrogen combustion in micro swirl combustor

3.4 纯氢旋流火焰的可视化

纯氢火焰在有光源的环境中无法肉眼观测,因此难以判断其燃烧的持续性,这对推广应用造成一定阻碍。本研究在无光源的环境中成功观测到其微弱的火焰,根据拍摄的火焰图片,可提取其

相关特征,如火焰轮廓等。基于 ImageJ 对图像进行灰度化,人工确定火焰区域的灰度值,按火焰与背景灰度值之差的 10% 设定为阈值,自动提取火焰轮廓。原始火焰图片和火焰轮廓如图 8 所示。纯氢火焰在无光源环境中存在微弱的发光特性,其发光特性主要是燃烧中间产物导致,呈现出橙红色,在橙红色四周呈现出微弱的蓝紫色。蓝紫色的出现意味着 NO_x 的生成^[28-29]。图 8 展示了输入功率为 495、660、825 和 990 W 时的火焰形态,随着输入功率的增加,其火焰高度不断增加。当输入功率为 495 W 时,纯氢火焰锚定在微型旋流燃烧器出口平面;当输入功率达到 990 W 时,纯氢火焰的高度可达到 3 cm 以上,此时的火焰高度与图 5 测量的结论一致,即燃烧后的烟气温度的最高,达到 1 579 K,因为此时的测点最靠近火焰尾焰。无光源环境中的纯氢火焰形态将为后续相关研究工作提供参考。

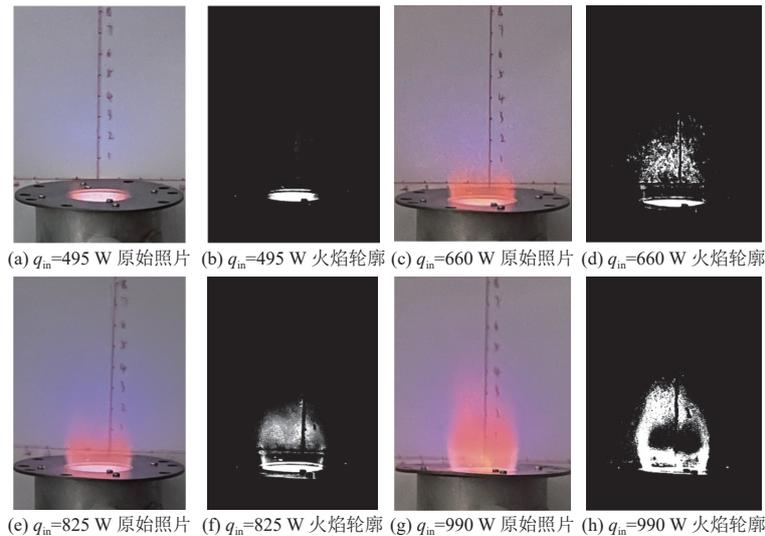


图8 无光源环境下纯氢火焰的形态

Fig. 8 Photographs of the pure hydrogen combustion flames in the dark environment

4 结论

本文报道了一种微型纯氢旋流燃烧器,采用非预混燃烧组织方式和低流阻设计,旋流强度为 0.76,流动阻力小于 86 Pa,可实现碳氢气体燃料和纯氢燃料的自由切换。研究了化学当量比(0.3~0.6)和输入功率(495~990 W)对微型纯氢旋流燃烧温度分布和污染物排放浓度的影响规律,获得了以下结论。

(1) 微型纯氢旋流燃烧器可在较低的化学当

量比(0.3)下实现完全燃烧,在燃烧室壁面没有安装取热设备的条件下,烟气温度的最低至 1 331 K。

(2) 本文开发的微型纯氢旋流燃烧器工作范围宽,在化学当量比介于 0.3~0.6,输入功率介于 495~990 W 的条件下均可实现 H₂ 完全燃烧。

(3) 在化学当量比为 0.5,输入功率为 990 W 时,NO 排放浓度达到 140.6 mg/m³;降低化学当量比可显著降低 NO 排放浓度。在化学当量比为 0.3,输入功率为 990 W 时,NO_x 的排放浓度降低到 60.3 mg/m³,降幅达到 57.1%。

(4) 纯氢火焰在有光源的环境中透明, 肉眼难以观测; 在无光源条件存在微弱的发光特性, 其发光特性主要是燃烧中间产物导致, 呈现出橙红色, 在橙红色四周呈现出微弱的蓝紫色。

(5) 本文开发的微型纯氢旋流燃烧器具有低流动阻力, 可使用微型低功耗鼓风机驱动, 且纯氢旋流燃烧的烟气温度高, 最高达 1 579 K, 适合开发温差发电机等微型分布式发电系统。

参考文献 (References):

- [1] WANG Y, WANG R, TANAKA K, et al. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China[J]. *Nature*, 2023, 619(7971): 761-767.
- [2] 徐江荣, 宋奥, 洪佳璇, 等. 低碳背景下氢应用现状与前景展望 [J]. *能源环境保护*, 2023, 37(1): 65-73.
XU Jiangrong, SONG Ao, HONG Jiaxuan, et al. Application status and prospect of hydrogen under low carbon background[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(1): 65-73.
- [3] LE T T, SHARMA P, BORA B J, et al. Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 54: 791-816.
- [4] ISHAQ H, DINCER I, CRAWFORD C. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(62): 26238-26264.
- [5] HWANG J, MAHARJAN K, CHO H. A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: Achievements and future challenges[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(74): 28629-28648.
- [6] PRAMUANJAROENKIJ A, KAKAÇ S. The fuel cell electric vehicles: The highlight review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(25): 9401-9425.
- [7] BORETTI A. Towards hydrogen gas turbine engines aviation: A review of production, infrastructure, storage, aircraft design and combustion technologies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 88: 279-288.
- [8] LU Chun, CHEN Wei, ZUO Qingsong, et al. Numerical investigation on gaseous fuel injection strategies on combustion characteristics and NO emission performance in a pure hydrogen engine[J]. *Fuel*, 2024, 363: 130911.
- [9] NEMMOUR A, INAYAT A, JANAJREH I, et al. Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A literature review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(75): 29011-29033.
- [10] ETN Global. Hydrogen gas turbines – The path to a zero emissions gas turbine[R/OL]. [2025-01-01]. <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/01/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf>.
- [11] SOLANA PÉREZ R, SHCHERBANEV S A, CIANI A, et al. Effect of mixing on the anchoring and combustion regimes of pure hydrogen flames in sequential combustors[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2023, 145(3): 031026.
- [12] XU Shunta, XI Liyang, TIAN Songjie, et al. Numerical investigation of pressure and H₂O dilution effects on NO formation and reduction pathways in pure hydrogen MILD combustion[J]. *Applied Energy*, 2023, 350: 121736.
- [13] LEITE C R, BREQUIGNY P, BORÉE J, et al. Comparative analysis of cycle-to-cycle variabilities and combustion development in an optical spark-ignition engine fueled by pure hydrogen and propane: Insights from chemiluminescence and PI[J]. *Proceedings of the International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics*, 2024, 21: 1-18.
- [14] DONG Chen, ZHOU Qulan, ZHANG Xiaoguang, et al. Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/natural gas/air mixtures[J]. *Frontiers of Chemical Engineering in China*, 2010, 4(4): 417-422.
- [15] DYBE S, YASIR M, GÜTHE F, et al. On the demonstration of a humid combustion system performing flexible fuel-switch from pure hydrogen to natural gas with ultra-low NO_x emissions[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2024, 146(5): 051018.
- [16] 刘泓芳, 蔡骁, 王金华, 等. 纯氢阵列微管预混火焰结构及湍流燃烧速度测量 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(12): 69-77.
LIU Hongfang, CAI Xiao, WANG Jinhua, et al. Structure of pure hydrogen array microtube premixed flame and measurement of turbulent burning velocity[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(12): 69-77.
- [17] 徐智良, 王露, 金浩, 等. 纯氢/掺氢管道小孔泄漏射流燃烧数值模拟 [J]. *石油与天然气化工*, 2024, 53(6): 135-140.
XU Zhiliang, WANG Lu, JIN Hao, et al. Numerical simulation of jet combustion with small hole leakage in pure hydrogen/hydrogen-doped pipelines[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2024, 53(6): 135-140.
- [18] 余世达, 胡博, 李雪松, 等. 改进型纯氧-纯氢燃烧 Graz 循环优化与参数影响规律 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(10): 3962-3975.
YU Shida, HU Bo, LI Xuesong, et al. Optimization and parameter influence of a revised Graz cycle with pure oxygen and hydrogen fuel[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(10): 3962-3975.
- [19] LE D K, KWON H, LEE M J. Numerical and experimental investigation of the correlation between inlet flow rates, temperature, and NO_x emissions in pure hydrogen combustion[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 259: 124748.

- [20] 欧阳广. 纯氢/掺氢天然气家用燃气具测试平台设计及燃烧实验 [D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2023: 45-53.
OUYANG Guang. Design of a testing platform for pure hydrogen/hydrogen doped natural gas domestic gas appliances and combustion experiment [D]. Yueyang: Hunan Institute of Science and Technology, 2023: 45-53.
- [21] 汪硕峰, 纪常伟, 张肇, 等. 稀燃纯氢发动机怠速燃烧与循环变动试验 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 12-15+94.
WANG Shuofeng, JI Changwei, ZHANG Bo, et al. Combustion and cycle-by-cycle variation of pure hydrogen-fueled spark ignition engine at idle and lean conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 12-15+94.
- [22] 李炳涛, 昌运鑫, 谢法, 等. 纯氢预混阵列微管燃烧器振荡被动控制研究 [J/OL]. 推进技术: 1-15(2024-11-08) [2025-01-01]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=TJJS20241106005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LI Bingtao, CHANG Yunxin, XIE Fa, et al. Pure hydrogen premixed combustion oscillation passive control of arrayed micro-tube burner [J/OL]. Journal of Propulsion Technology: 1-15 (2024-11-08) [2025-01-01]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=TJJS20241106005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [23] NREL. A comparison of hydrogen and propane fuels. DOE/GO-102009-2813[R/OL]. [2024-12-28]. <https://www.hydrogen.energy.gov>.
- [24] 郑金航. 燃气锅炉锅筒开裂泄漏失效原因分析与探讨 [J]. 市场监管与质量技术研究, 2023(4): 19-23.
ZHENG Jinhang. Analysis and discussion on failure causes of cracking and leakage of gas-fired boiler drum[J]. Market Regulation and Quality Technology Research, 2023(4): 19-23.
- [25] LI Guoneng, FAN Yiqi, LI Qiangsheng, et al. A review on micro combustion powered thermoelectric generator: History, state-of-the-art and challenges to commercialization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 207: 114897.
- [26] OKAFOR E C, SOMARATHNE K D K A, HAYAKAWA A, et al. Towards the development of an efficient low-NO_x ammonia combustor for a micro gas turbine[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 4597-4606.
- [27] WANG Guoqing, GUIBERTI T F, CARDONA S, et al. Effects of residence time on the NO_x emissions of premixed ammonia-methane-air swirling flames at elevated pressure[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(4): 4277-4288.
- [28] SCHEFER R W, KULATILAKA W D, PATTERSON B D, et al. Visible emission of hydrogen flames[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(6): 1234-1241.
- [29] MEULEMANS M, DUROCHER A, VERSAILLES P, et al. How well do we know thermal-NO? An investigation of NO formation in flames over a wide temperature range[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(1): 521-529.