

非预掺混氢/天然气烟气内循环燃烧特性研究

颜衍梯¹, 王勇², 刘芃芃¹, 赵硕², 韦耿², 卓建坤³, 姚强^{1,3}, 李水清³

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司

清洁燃烧与烟气净化四川省重点实验室, 成都 611731;

3. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 本文设计并实验研究了一种非预掺混氢/天然气烟气内循环低氮燃烧器, 以实现高比例氢气的灵活掺混、低 NO_x 排放和燃烧稳定性。通过改变掺氢比例, 研究发现 NO_x 排放量在 50% 掺氢时热值比达到最低值 71.3 mg/m^3 ($@3.5\% \text{O}_2$), 与未加入烟气内循环的参考燃烧器相比, 显著降低了 NO_x 排放水平。数值模拟分析揭示了燃烧器出口附近存在着内外两个回流区, 即以钝体为中心的内回流区, 以及炉膛外壁面作用下形成的外回流区, 这两个区域为燃烧器提供稳定的火焰锚定点, 确保了在 0 至 100% 掺氢比范围的稳定燃烧。掺氢比不会影响内、外回流区位置和大小, 只会影响回流气体速度大小。 NO_x 排放 50% 掺氢比时最低的关键是火焰结构发生了转变, 使高浓度 OH 、 O 活性自由基大幅减少, 进而降低了热力型 NO_x 排放。

关键词: 富氢燃气; 烟气内循环; 钝体燃烧

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)02-0212-09

Combustion Characteristics of Non-Premixed Hydrogen/Natural Gas Flue Gas Based on Flue Gas Internal Recirculation

Yan Kanti¹, Wang Yong², Liu Pengpeng¹, Zhao Shuo², Wei Geng²,
Zhuo Jiankun³, Yao Qiang^{1,3}, Li Shuiqing³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Clean Combustion and Flue Gas Purification in Sichuan Province, Dongfang Electric Group Dongfang Boiler Co., LTD., Chengdu 611731, China; 3. Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering,

Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this paper, a non-premixed hydrogen/natural gas flue-gas internal recirculation (FIR) low-nitrogen burner is designed and experimentally studied to achieve flexible blending with a high proportion of hydrogen, low NO_x emission, and combustion stability. By changing the hydrogen blending ratio, it was found that the NO_x emission reached the lowest value of 71.3 mg/Nm^3 ($@3.5\% \text{O}_2$) at 50% hydrogen blending, which significantly reduced the NO_x emission level compared with the reference burner without the addition of FIR. The numerical simulation analysis reveals that there exist two reflux zones near the burner outlet, namely the internal reflux zone centered on the bluff body and the external reflux zone formed under the action of the outer wall of the furnace. These two zones provide a stable flame anchor point for the burner and ensure stable combustion within the range of 0% to 100% hydrogen mixing ratio. The hydrogen blending ratio does not affect the position and size of the in-

收稿日期: 2024-05-04.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB4003900).

作者简介: 颜衍梯 (2000—), 男, 硕士研究生, 107552101427@stu.xju.edu.cn.

通信作者: 卓建坤, 男, 博士, 副研究员, zhuojk@tsinghua.edu.cn.

ternal and external reflux zones; instead, it only affects the velocity of the reflux gas. The key to the lowest NO_x emission at 50% hydrogen blending ratio is the change in flame structure, which greatly reduces the high concentration of active OH and O free radicals, and thus reduces the thermal NO_x emission.

Keywords: hydrogen enriched natural gas; flue-gas internal recirculation; bluff body combustion

在双碳战略背景下,随着我国天然气消费持续快速增长,其在一次能源消费总量中持续提高,2022年占比8.4%,其中工业占比高达42%;而2022年进口天然气的比例约占41%,突显了零碳燃料替代天然气对保障双碳目标和能源安全的重要作用^[1].由风光制备的绿氢,不仅是一种清洁零碳能源,还可作为储能介质有效消纳可再生能源.我国在《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》中提出:氢能是实现用能终端绿色低碳转型的重要载体.因此,天然气掺氢的灵活利用对实现双碳战略目标和保障国家能源安全具有重要意义.然而,氢气具有绝热火焰温度高、燃烧速率快等特点,天然气掺氢燃烧技术具有燃烧高效、清洁低碳等优点,是目前氢气燃烧最为实际可行的发展方向之一,但另一方面富氢燃气燃烧会产生高温区,导致现有天然气燃烧器直接掺氢时面临回火、 NO_x 排放高等问题^[2-4].因此,研究天然气掺氢低氮燃烧技术对实现氢气在工业中的应用具有重要价值.

烟气再循环(flue gas recirculation, FGR)被广泛认为是天然气最有效的低氮燃烧技术之一,可将 NO_x 排放量显著降低20%至80%.FGR一般分为烟气外循环(flue-gas external recirculation, FER)和烟气内循环(flue-gas internal recirculation, FIR).FIR是一种有效避免烟气再循环管道冷凝水腐蚀和风机结冰等问题、提高热效率和燃烧安全性的技术,其原理是通过燃烧器结构设计高速射流形成负压,卷吸周围烟气^[5].国内外学者在天然气燃烧烟气内循环应用上有大量相关研究.Shinomori等^[6]通过在煤油燃烧器外罩一个薄壁圆筒实现烟气内循环,发现当喷嘴与圆筒距离,即再循环空间从0 mm增加到30 mm,则 NO_x 排放量从 108×10^{-6} 急剧降低到 22×10^{-6} (当量比为1时),但进一步扩大再循环空间会导致燃烧的不稳定.杨琛琛^[7]在负压接触面的空气罩上打孔设计烟气内循环结构,优化后的燃烧器的燃烧效率达到了99.55%,比原型燃烧器的燃烧效率提高了3.28%, NO_x 排放量为 236.45 mg/m^3 (@3.5% O_2),比原型燃烧器减少了26.09%.程嘉颖等^[8]直接通过渐缩空气腔实现烟气内循环,数值模拟研究空气渐缩段出口直径对甲烷

扩散旋流燃烧的影响,发现卷吸率最高可达到50%.卷吸烟气后,降低了火焰温度,缩小了火焰高温区范围;氧浓度下降,导致火焰峰值温度降低.当氧体积分数从0.23降低到0.13时能实现超低氮排放.

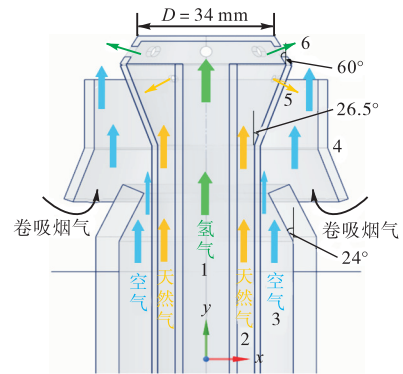
更常见的烟气内循环结构设计是在燃烧器内部空气缩口增设再循环通道,将高温烟气卷吸进燃烧器内部与空气混合,如Zhang等^[9]在内循环通道后接文丘里管和旋流器促进再循环烟气与预混气体的混合,CFD模拟得到不同热功率下卷吸率差异大,对回流区的影响大,燃烧器在功率为20 kW的情况下,实现了低 NO_x 排放和稳定燃烧.Lee等^[10]结合燃料分级、部分预混设计,实验表明 NO_x 排放总体随着功率的增大而减小,满功率 NO_x 排放约 15×10^{-6} (@4% O_2).Nhan等^[11]结合了富燃料和贫燃料的反应区分离设计,通过数值模拟发现由于FIR燃烧器主火焰中的最高温度显著降低,并且值班火焰附近的燃料含量较低,热力型和快速型 NO_x 排放显著减少,总 NO_x 优化后排放从 82×10^{-6} 降低至 9.7×10^{-6} (@3.5% O_2).王志宁^[12]结合燃料、空气分级,将 NO_x 排放从 $80 \sim 120 \text{ mg/m}^3$ 降为 $40 \sim 70 \text{ mg/m}^3$ (@3.5% O_2),在此基础上,再增添烟气外循环率大于20%时, NO_x 排放能低于 30 mg/m^3 .内循环低氮燃烧器相较传统外烟气再循环能将烟气再循环率从32%提升至50%,证明烟气内循环技术使燃烧更稳定. Shi等^[13]设计的多内循环通道低氮燃烧器实验表明,随着通道数增多,即再循环比例增大,每条途径的NO生成量减少,导致总NO生成量显著减少.特别地,热力型NO的形成显著减少,当通道数增加至12条,NO生成量甚至下降到接近零.这主要是由于火焰温度和氧原子浓度的降低.

以上关于FIR研究现状表明,FIR技术通过降低火焰温度和氧原子浓度大幅减少热力型 NO_x 排放,在工业燃气燃烧器上已经获得了相关应用.钝体在燃烧器设计中常充当稳定器的作用,流体动力学解释为在钝体后面形成尾流结构中回流区的热燃烧产物能持续点燃燃料和氧化剂混合物.因此,本文将在部分预混钝体燃烧器(partial premixed bluff body, PPBB)^[14]基础上,引入烟气内循环燃烧,为提高氢气

和天然气的灵活掺混,采用氢气和天然气非预混的方式,探究“钝体微扩散与烟气内循环”技术路径在工业富氢燃气燃烧的可行性,实现工业燃气燃烧器大比例掺氢、低氮、稳定燃烧,再通过数值模拟揭示不同掺氢比下火焰的流场、燃烧和污染物排放特性。

1 非预掺混氢/天然气烟气内循环燃烧器

本研究所设计的非预混氢/天然气烟气内循环燃烧器如图 1 所示,燃烧器由空气、天然气和氢气通道及其喷口组成. 氢气通道为直径 14 mm 的中心圆管,氢气喷口布置在内缩 60°、高 6.5 mm 的圆台锥面中部,8 个直径 3 mm 的喷口圆周均匀分布在锥面上,圆台顶面钝体直径 D 为 34 mm. 天然气通道由外径 28 mm 圆管和氢气管之间的圆环通道组成,天然气喷口布置在向外扩 26.5°、高 16.3 mm 的锥面上,由 10 个直径 1.5 mm 小孔组成,天然气喷口高度和空气通道出口截面平齐. 因此,天然气喷出将直接与空气进行混合,加强天然气与空气预混程度,预混合的量由燃料射流和空气横流之间的动量比控制,且与氢气小孔圆周交错布置,达到分散火焰,降低局部高温的效果. 空气通道布置在燃烧器最外侧,由缩口和内循环腔组成. 空气经过内缩 24°、高 10 mm 的缩口加速形成了负压,在内循环腔入口卷吸周围高温烟气混合,再与天然气部分预混,最后进入炉膛。



1—中心氢气圆管;2—天然气圆环;3—空气圆环;4—内循环腔;5—天然气喷口;6—氢气喷口

图 1 燃烧器结构
Fig.1 Burner structure

2 实验系统及数值模型

2.1 实验系统

如图 2 所示,50 kW 下行燃烧实验系统包括一次风、燃尽风(over fire air, OFA)系统、燃料系统、测量系统、DCS 控制系统、燃烧器和炉膛. 燃料系统中氢气来源于高压纯氢气瓶(99.999 9%纯度),天然气来源管道天然气. 所设计的燃烧器安装在下行炉的顶部,炉膛顶部为圆台扩口,尺寸为顶部直径 80 mm、底部直径 250 mm、高 85 mm. 下行炉总高为 7.2 m,内径为 250 mm. 实验中采用 ABB-EL3020 烟气分析仪获取烟气组分浓度,采用 S 型热电偶测量沿炉膛

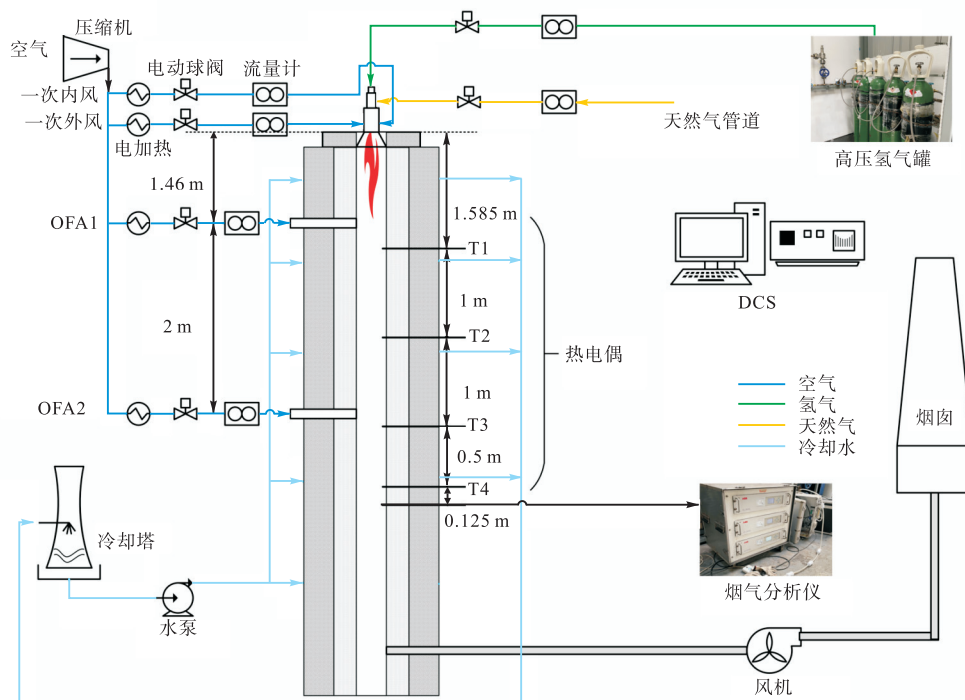


图 2 实验系统示意

Fig.2 Schematic diagram of the experimental system

高度的温度分布, 分别设为 T1、T2、T3 和 T4, 其测量范围为 0 ~ 1600 °C. 此外, 下行炉膛设置 OFA1 和 OFA2 两级燃尽风, 实验过程保持两级燃尽风量相等, 燃尽风比例定义为 OFA1 和 OFA2 风量之和与总风量的比值, 与燃烧器相连接的空气称为一次风, 所有的助燃风通过电加热器加热至 300 °C.

2.2 数值模型

使用 Ansys Fluent2022 进行燃烧数值模拟分析, 湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型及增强壁面近壁面处理, SIMPLE 算法用于实现压力与速度的耦合计算, 控制方程采用二阶迎风差分格式, 涡耗散概念模型 (eddy-dissipation concept, EDC) 用于求解湍流和化学反应之间的相互作用. GRI-Mech 2.11^[15] 化学反应机理用于模拟甲烷掺氢燃烧, 该机理包含 49 种组分和 277 个可逆反应, 能够准确预测化学动力学控制的活性自由基和中间组分. 辐射模型采用 DO 辐射模型, 基于灰气体加权平均模型计算燃烧产物的辐射吸收系数. 入口边界设定为质量流量入口, 空气入口温度设定为 573 K, 燃料成分为甲烷和氢气, 入口温度为 300 K, 出口为压力出口, 壁面温度根据实验测的

近壁面温度拟合函数 ($T = 1826.5 + 0.1573y (y < 0)$), $R^2 = 0.96$) 进行设定, 内部发射率 0.6.

建模前对实体燃烧器和炉膛进行简化, 如图 3 所示, 流体域覆盖从炉膛的圆台扩口到烟气分析仪测量口下游附近的区域, 总长度为 4335 mm, 出口面距离 OFA2 喷口 800 mm.



图 3 简化模型
Fig.3 Simplified model

为了提高网格质量和计算精度, 对燃烧器和燃尽风喷口、内循环区、回流区附近的网格进行局部加密, 如图 4(a) 所示. 通过对比不同网格数下轴向速度的分布差异, 进行网格无关性验证, 见图 4(b), 发现 140 万网格数在回流区、OFA1、OFA2 的轴向速度与 820 万网格数时差异较大, 而与 550 万网格数差异小于 2%. 因此, 最终确定了 550 万网格数用于后续的计算.

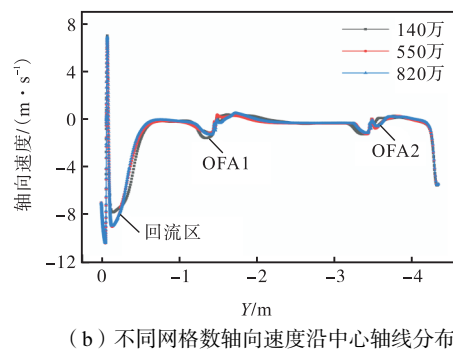
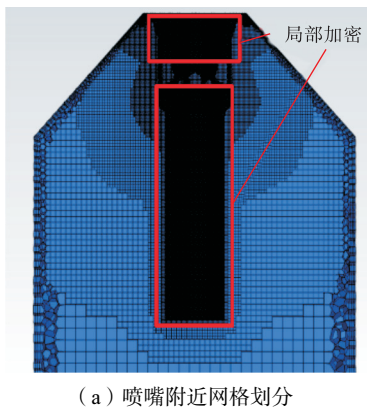


图 4 网格划分及无关性验证
Fig.4 Grid division and independence verification

3 结果与讨论

3.1 实验工况

实验研究掺氢比 P_H (热值掺氢比, 即氢气热值比上总燃料热值) 变化对污染物排放特性的影响. 在固定功率 50 kW、当量比 0.88、燃尽风比例为 38% 的基础实验条件下, 研究不同掺氢比下 NO_x 排放特性, 实验工况流量表如表 1 所示. 实验 NO_x 排放值统一换算至 3.5% 氧体积分数下, 如公式 (1) 所示.

$$\varphi_{NO_x} = \frac{21 - 3.5}{21 - \varphi_{O_2}} \times 2.05 \times (\varphi_{NO} + \varphi_{N_2O}) \quad (1)$$

式中: φ_{NO_x} 为 NO_x 排放值, mg/m^3 ; φ_{NO} 、 φ_{N_2O} 为 NO、

N_2O 的排放, 10^{-6} .

如图 5 所示, 随着掺氢比增大, 观察到 NO_x 排放下降至最低点后又上升的趋势. 具体而言, 当 P_H 从 20% 增加至 50%, NO_x 排放值从 $79.5 mg/m^3$ 下降至最低值 $71.3 mg/m^3$, 之后随着 P_H 的增加而持续上升, 直到 $P_H = 100%$ 时达到 $83.2 mg/m^3$. 值得注意的是, 在不同掺氢比例下, NO_x 排放最大值和最小值仅相差 16.7%, 其中与 $P_H = 20%$ 相比, 纯氢燃烧 NO_x 排放仅高 $3.7 mg/m^3$, 提高掺氢比 NO_x 排放不会显著增大, 并相较参考燃烧器部分预混纯体燃烧器的 NO_x 排放显著降低, 验证了燃烧器的高温烟气内卷吸和分级燃烧技术抑制了热力 NO_x 的生成. 图 5 中的数值模拟结果和实验测量相吻合, 预测了在 P_H 值 20% 至

100%范围内的 NO_x 排放随掺氢比变化的趋势,最大差范围. 相对误差为 P_H 为 100%工况的 10%,符合工程研究误

表 1 实验工况流量表

Tab.1 Flowmeter for experimental conditions

工况编号	掺氢比/%	氢气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	天然气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	主空气流量/(m ³ ·h ⁻¹)	OFA1 流量/(m ³ ·h ⁻¹)	OFA2 流量/(m ³ ·h ⁻¹)
PH ₂₀	20	3.5	4.4	35.1	10.8	10.8
PH ₅₀	50	8.8	2.7	33.0	10.1	10.1
PH ₇₀	70	12.3	1.6	31.6	9.7	9.7
PH ₁₀₀	100	17.6	0.0	29.5	9.0	9.0

定义卷吸率 η_{fir} 为内循环腔入口气体质量流量与内循环腔出口气体质量流量的比值,如图 6 所示, η_{fir} 与 P_H 呈正相关,卷吸率随着掺氢比的增加而增大, η_{fir} 从 P_H=0 的纯甲烷工况的 11.4%持续提升至 P_H=100%纯氢工况的 14.3%,进而抑制了氢比例增加带来的热力 NO_x 的生成.

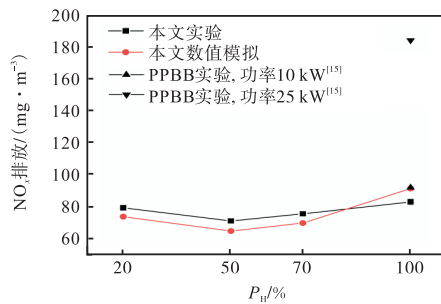


图 5 不同掺氢比的 NO_x 排放

Fig.5 Comparison of experiment and numerical simulation of NO_x emission with different hydrogen blending ratios

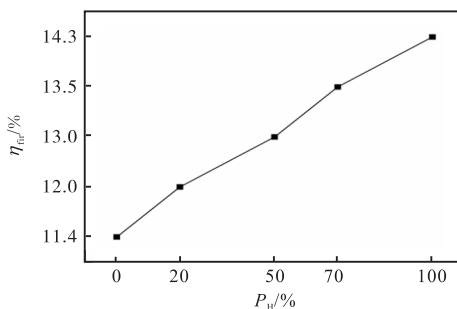


图 6 不同掺氢比对内循环烟气卷吸率的影响

Fig.6 Effect of different hydrogen blending ratio on entrainment rate

3.2 数值模拟燃烧特性分析

甲烷以垂直于燃烧器钝体内斜面的方式喷注到由空气和高温烟气组成的混合气流中,如图 7 所示,部分混合气流在钝体上方形成中心回流区,而燃料主要集中在这一内回流区内,形成了富燃料区;另一部分混合气流做为主射流喷射入炉膛,在炉膛外侧形成较大的外回流区,燃烧形成的高温烟气被输送至燃烧器的喷口附近,通过外部剪切层稀释助燃气,降低氧分压;同时,燃烧器外侧的高温烟气被燃烧器内的高

速射流空气卷吸入内循环腔,与空气混合,实现烟气内循环.中心回流区和炉膛四周外部大回流区的形成,为火焰的稳定低氮燃烧提供了有利的条件,是实现实验掺氢比 0~100%工况都能维持燃烧稳定的原因.

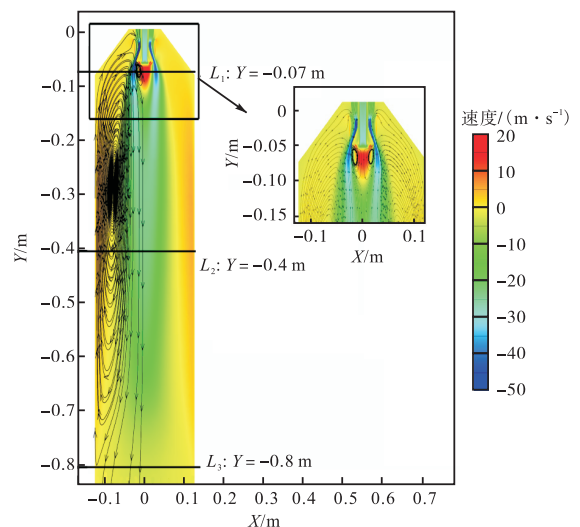


图 7 轴向速度分布云图和流线图

Fig.7 Axial velocity contours and flow diagram

为深入研究掺氢比对流场、温度径向分布的影响,在图 7 中 Z=0 平面沿轴向选择了 3 个特征径向截面:近钝体的 L₁、外部大回流区的 L₂ 以及近炉膛出口的 L₃.如图 8(a)所示,在钝体上形成的中心回流区,其轴向速度超过 16 m/s,尤其在 P_H=100%的工况下,轴线速度达到 21 m/s,明显高于其他工况,表明了纯氢工况下中心回流区进一步扩大,在中心回流区的反应更为剧烈.中心回流区的宽度约为 32 mm,接近钝体直径 D,而沿轴线的中心回流区长约 37.5 mm,略大于 D.轴向速度的两个最低点代表主气流,其中 P_H 为 0 和 20%的主气流轴向速度小于高掺氢比 P_H 为 50%、70%、100%的工况,这与甲烷、氢气在不同掺氢比下各自流量、喷注位置密切相关,该变化体现出在该区域的燃料流动与混合情况.炉膛内的大回流区轴向速度低于 4 m/s,为炉膛低速区,宽约为 64 mm,为 1.88D,长度约为 0.8 m.燃烧器的主气流绕过中心回流区,如图 8(b)所示,炉膛中心的速度

逐渐减小,外回流区逐渐缩小,在炉膛出口附近形成较为均匀的流场, (见图 8(c)). 值得注意的是,不同掺氢比工况下轴向速度为 0 的位置不变,说明回流区主要由燃烧器空气通道的喷口速度、钝体和炉膛结构决定,而掺氢比例的变化将不会直接影响炉膛内流场结构. 这一点与 Dutka^[14]的研究结果相一致,即影响回流区大小的是燃烧器几何结构. 然而,在受限空间内,炉膛的尺寸大小将直接影响着外回流区.

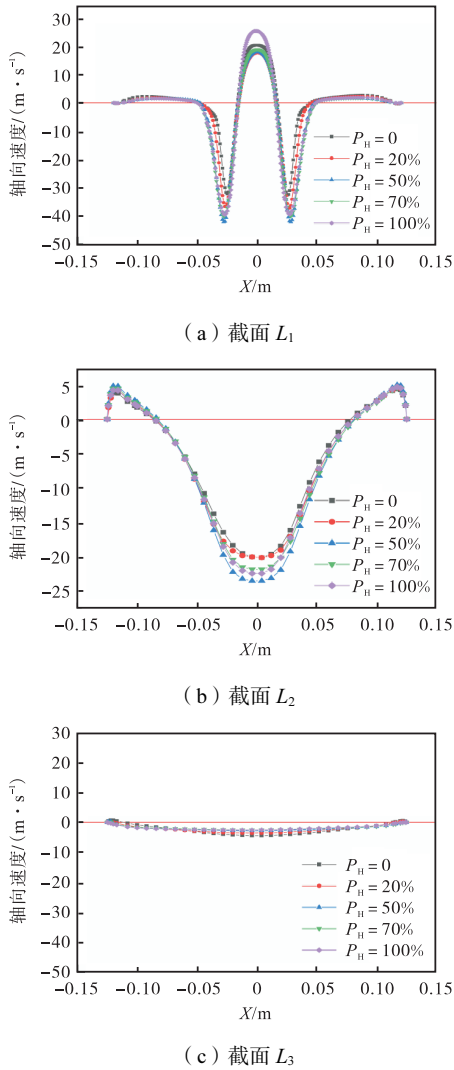


图 8 不同截面的轴向速度
Fig.8 Radial distribution of axial velocity at different heights

当量比分布云图如图 9 所示,在掺氢比 P_H 为 0、20% 工况下,甲烷由于具有较高的动量,在空气通道中射流深度较大,因此,在环形空气通道内存在着较高的当量比,并在空气射流中形成了当量比小于 0.8 的环形区域,并且随着掺氢比例的增加,该区域逐渐减小. 随着掺氢比增加到 P_H 为 50%、70% 和 100%,由于氢气以垂直于钝体外斜面的方式喷入到环形空气通道中,未能与空气充分混合,而是聚集在内回流区

剪切层附近,并回流分布在中心回流区域. 随着掺氢比 P_H 的增大,中心高当量比区的长度和面积均随之增大. 因此,对于高掺氢比,氢气的喷注速度和位置将影响着燃料和空气间的混合.

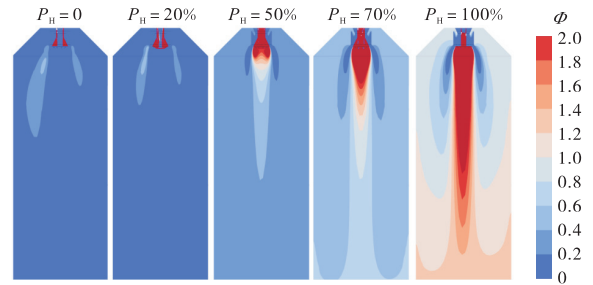


图 9 当量比云图
Fig.9 Equivalent ratio contours

燃烧火焰面可定义为当量比等于 1 的点的轨迹^[16]. 图 10 展示了不同工况下的火焰面,揭示了 3 种主要的火焰构成: 纯甲烷火焰、甲烷掺氢火焰、纯氢火焰. 甲烷以垂直于内锥面喷注到燃烧器内的环形空气通道内,并与空气部分预混,形成了由 10 瓣细长小火焰组成的部分预混火焰,该区域内整体当量比在 0.6~0.8 (图 9),等值面的温度低于其他掺氢燃烧工况. 氢气则从垂直于钝体外斜面喷注到气流中,在 $P_H = 20\%$ 时,由于氢气流量小,动量低,氢燃烧形成的火焰附着在钝体外斜面上,此时火焰面仍以甲烷火焰为主. 当 P_H 为 50%、70% 时,火焰面由外围 10 瓣细长甲烷火焰和中心的氢气火焰组成. 此时,氢气主要富集在中心回流区,随着掺氢比的增加,中心氢气火焰长度、体积增大,温度升高;

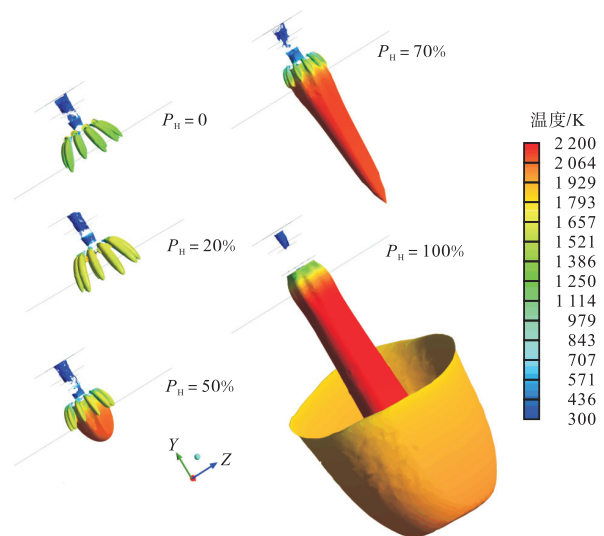


图 10 当量比 $\Phi = 1$ 等值面的温度分布
Fig.10 Temperature distribution on the iso-surface with equivalent ratio $\Phi = 1$

而甲烷由于射流动量的减小,射流深度逐渐减小,其火焰主要附着于内回流区的剪切面上,从图 10 中体现出附着在氢气火焰周围,并随着 P_H 的增大,其长度、体积减小,温度降低.当燃料完全改变为氢气时,未燃尽的氢气将随着炉膛大回流区卷吸到上游,火焰附着在外剪切层上.

OH 基是衡量甲烷和氢气火焰中燃烧反应的关键指标.如图 11 所示,氢气燃烧产生的 OH 基云图显示更明亮,其浓度显著高于纯甲烷燃烧,并且梯度更大,反映了氢气的高反应速率.在 P_H 为 0、20% 的工况下,OH 基分布主要集中在中心回流区附近,而高浓度 OH 基主要出现在内剪切层附近,中心 OH 基浓度较小.随着反应向下游扩散,高浓度 OH 基区域形成沿轴向浓度递减的尖三角形状.当掺氢比增加到 P_H 为 50%、70% 和 100% 时,高浓度 OH 基的分布出现分叉,由外及内分别对应甲烷和氢气火焰.随着 P_H 的增加,这些高浓度 OH 基区域变得更长、更宽.

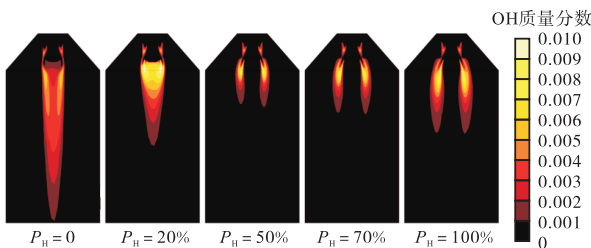


图 11 OH 质量分数云图
Fig.11 OH mass fraction contours

图 12 所示的温度分布云图揭示了高温区集中在炉膛中心区域,并且温度由中心向四周逐步降低.随着掺氢比的增加,高温区域的面积随之增大,进而使热力型 NO_x 的生成也相应增加.当在燃烧器中注入氢气时,由于氢火焰附着在钝体外斜面上,并与甲烷火焰重叠,使中心轴线温度在 L_1 截面上急剧增加, $P_H = 20\%$ 工况时温度高达 2400 K.随着掺氢比的增加到 P_H 为 20%、50%、100%,火焰逐渐出现分叉并集中在内剪切层附近(图 11),中心轴线温度逐渐降低.然而,在外回流区,烟气温度随着掺氢比的增加而增加,其中 20% 掺氢比与甲烷燃烧相比,温度增加了 100 K,随后温度增幅逐渐降低.如图 13 所示,在大回流区的 L_2 截面上,中心轴线温度的分布与 L_1 面相反,而在外回流区, L_1 和 L_2 截面的温度有相同的变化趋势.在较低掺氢比下,由于火焰面集中在燃烧器喷口附近,维持着较高的温升,如 $P_H = 20\%$ 相比于 $P_H = 0$ 时,温升为 200 K,而当 P_H 增加到 50%,温升降低到 100 K,随后继续增加掺氢比,变化幅度减缓.总体上 50% 掺氢比工况高温区面积适中,温度峰值

较低.

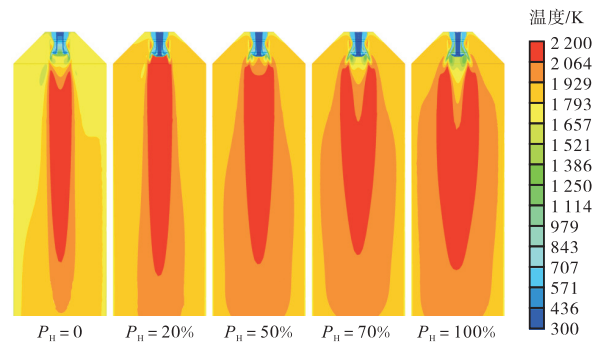
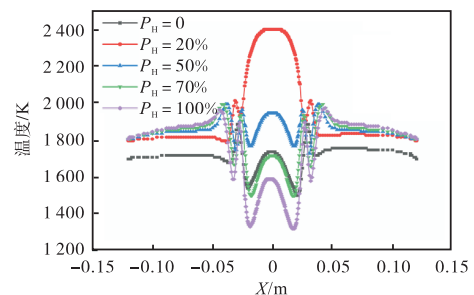
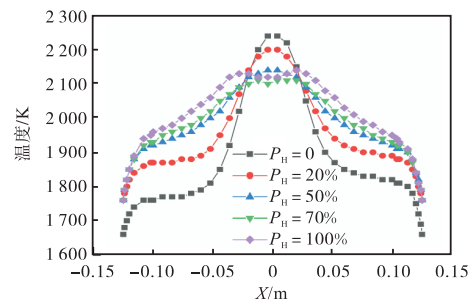


图 12 温度分布云图

Fig.12 Temperature distribution contours



(a) 截面 L_1



(b) 截面 L_2

图 13 温度在不同高度沿径向的分布

Fig.13 The radial distribution of temperature at different altitudes

由于较高的氢气火焰温度足以产生大量热力型 NO 和钝体上方内循环区的富燃料区域,根据扩展的 Zeldovich 机理,O 和 OH 自由基对 NO_x 的生成具有重要影响,尤其是 OH 基.从图 14 以看出, NO_x 体积生成速率云图与图 11 中的 OH 基浓度分布云图呈现出类似的模式,具有强相关性.在所有工况中 O 的质量分数也呈现了类似的分布,表明影响 NO_x 生成的主要因素是 OH、O 等自由基的分布,这与 PPBB 数值模拟研究^[17]结论是一致的.纯氢燃烧实验 NO_x 排放规律^[14]为:在 700 ~ 1050 °C 燃烧室温度范围内,10 kW 纯氢燃烧时, NO_x 排放量从低温到高温增加 1.55 倍,且 NO_x 排放随功率单调递增.如图 15 所示,将本实验纯氢燃烧 NO_x 排放与 PPBB 已知纯氢燃烧

工况进行比较,发现在 10 kW、700 °C 实验壁温(即 PPBB 纯氢燃烧 NO_x 排放最低工况)下,本实验的 NO_x 排放降低了 36.8%。而在 50 kW、20 °C 壁温条件下,通过模拟等停留时间放大和等速放大, NO_x 排放分别降低了 50.9%和 70.8%,成功实现了降低 PPBB 燃烧器富氢燃烧 NO_x 排放的目标。本研究设计燃烧器具有 13% 的高温烟气卷吸率,通过降低富氢燃气燃烧的温度峰值和高浓度 O、OH 自由基的面积,可显著降低 NO_x 排放,验证了 FIR 与 PPBB 燃烧器结合可以实现高比例掺氢、低氮、稳定燃烧的效果。

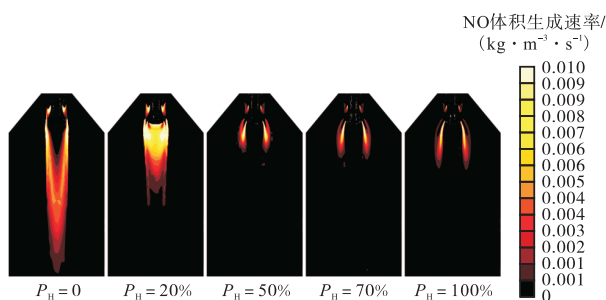


图 14 NO 体积生成速率分布云图

Fig.14 Volumetric NO rate distribution contours

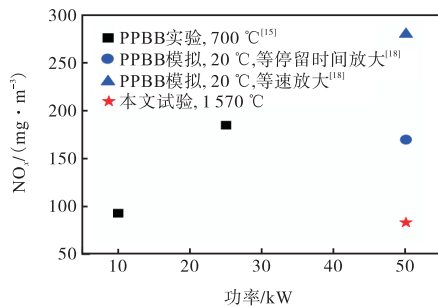


图 15 本文燃烧器与 PPBB 纯氢燃烧 NO_x 排放对比

Fig.15 The comparison between designed burner and PPBB of pure hydrogen combustion NO_x emission

4 结论

本文成功地将烟气内循环(FIR)技术与部分预混钝体燃烧器(PPBB)结合,设计了一款非预混氢/天然气烟气内循环燃烧器。实验和数值模拟的结果均表明,该燃烧器在高比例掺氢下能够实现低 NO_x 排放和稳定燃烧。主要结论如下:

(1) 卷吸率随掺氢比增大而略有增大,但整体影响较小,各掺氢比的卷吸率维持在 13% 左右。 NO_x 排放量随着掺氢比的增加呈现出先降低后上升的趋势,其中 50% 掺氢比时 NO_x 排放达到最低值,为 71.3 mg/m^3 。即使是在纯氢燃烧条件下, NO_x 排放量也仅比 20% 掺氢比时高出 3.7 mg/m^3 ,显著低于作为设计参考的 PPBB 燃烧器的 NO_x 排放水平,因此充

分展现了本研究设计的燃烧器在宽范围掺氢条件下的低氮燃烧特性。

(2) 在流场结构方面,存在中心回流区以及炉膛两侧的外部大回流区,其剪切层为燃烧器提供了稳定的火焰锚定点。实验结果表明,掺氢比的变动并不影响这些回流区的位置和大小,而是影响回流气体的速度。

(3) 随着掺氢比从纯甲烷燃烧逐步提升至纯氢燃烧,当量比、OH 基、温度分布都说明火焰结构在掺氢比为 50% 时发生了转变,这在火焰面中直观展示。由于 OH 基与 NO 的生成密切相关,50% 掺氢比时高浓度 OH 基的分布长度和面积最小,因此与其他掺氢比工况相比较,实现了最低的 NO_x 排放,验证了甲烷和氢气喷口位置差异所导致的火焰结构变化,对 NO_x 生成具有直接影响。

参考文献

- [1] 《中国天然气发展报告(2023)》编委会. 中国天然气发展报告(2023) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2023.
The Editorial Board of the China Natural Gas Development Report(2023). *China Natural Gas Development Report(2023)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023 (in Chinese).
- [2] Schiro F, Stoppato A, Benato A. Modelling and analyzing the impact of hydrogen enriched natural gas on domestic gas boilers in a decarbonization perspective[J]. *Carbon Resources Conversion*, 2020, 3: 122-129.
- [3] Choudhuri A R, Gollahalli S R. Combustion characteristics of hydrogen-hydrocarbon hybrid fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000, 25(5): 451-462.
- [4] Tang C, Zhang Y, Huang Z. Progress in combustion investigations of hydrogen enriched hydrocarbons[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 30: 195-216.
- [5] Zhu L, Wang X, Shen D. Review and perspectives of novel flue-gas internal recirculation combustion technology for low nitrogen emission: Fundamentals, performance, method, and applications for conventional fossil fuels and sustainable e-fuels[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(13): 8765-8780.
- [6] Shinomori K, Katou K, Shimokuri D, et al. NO_x emission characteristics and aerodynamic structure of a self-recirculation type burner for small boilers[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2):

- 2735-2742.
- [7] 杨琛琛. 烟气再循环天然气预混燃烧器性能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Yang Chenchen. Research on Performance Optimization of Flue Gas Recirculation Natural Gas Premixed Burners[D]. Harbin: Harbin Institute Technology, 2018 (in Chinese).
- [8] 程嘉颖, 宗超, 包晋榕, 等. 烟气内循环降低氮氧化物过程的模拟研究[J]. 煤炭转化, 2023, 46(4): 69-76.
Cheng Jiaying, Zong Chao, Bao Jinrong, et al. Numerical simulation of NO_x reduction process of internal flue gas recirculation[J]. *Coal Conversion*, 2023, 46(4): 69-76 (in Chinese).
- [9] Zhang L, Wu C, Zhang J, et al. Numerical simulation of the combustion characteristics in a flue gas internal recirculation burner[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(46): 42264-42271.
- [10] Lee C, Kim S, Kwon M. An experimental study on industrial boiler burners applied low NO_x combustion technologies[J]. *Journal of Clean Energy Technologies*, 2016, 4(6): 430-434.
- [11] Nhan H K, Kwon M, Kim S, et al. CFD investigation of NO_x reduction with a flue-gas internal recirculation burner in a mid-sized boiler[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33: 2967-2978.
- [12] 王志宁. 基于烟气再循环某 85t/h 燃气锅炉低氮燃烧特性的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
Wang Zhining. Study on Low Nitrogen Combustion Characteristics of 85 t/h Gas Boiler Based on Flue Gas Recirculation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [13] Shi B, Hu J, Peng H, et al. Effects of internal flue gas recirculation rate on the NO_x emission in a methane/air premixed flame[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 188: 199-211.
- [14] Dutka M, Ditaranto M, Løvås T. NO_x emissions and turbulent flow field in a partially premixed bluff body burner with CH₄ and H₂ fuels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(28): 12397-12410.
- [15] Frenklach M, Wang H, Goldenberg M, et al. GRI-Mech—An Optimized Detailed Chemical Reaction Mechanism for Methane Combustion[R]. GRI, 1995; No. GRI-95/0058.
- [16] 姚强, 李水清, 王宇(译). 燃烧学导论: 概念与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
Translated by Yao Qiang, Li Shuiqing, Wang Yu. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015 (in Chinese).
- [17] Meraner C, Li T, Ditaranto M, et al. Effects of scaling laws on the combustion and NO_x characteristics of hydrogen burners[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 214: 407-418.