DOI：10.13334/j.0258-8013.pcsee.231802　**文章编号**：0258-8013 (2025) 02-0424-09　**中图分类号**：TK 16　**文献标识码**：A

金属纤维表面燃烧器掺氢燃烧特性实验研究

王天天[1]，王志宁[2]，张杨鑫[2]，张扬[1*]，张海[1]，庞尔总[3]

(1. 热科学与动力工程教育部重点实验室(清华大学能源与动力工程系)，北京市 海淀区 100084;
2. 清华大学山西清洁能源研究院，山西省 太原市 030032;
3. 临沂市欧科节能技术有限公司，山东省 临沂市 276000)

Experimental Study of Characteristics of Hydrogen-enriched Natural Gas Combustion in Metal Fiber Surface Burner

WANG Tiantian[1], WANG Zhining[2], ZHANG Yangxin[2], ZHANG Yang[1*], ZHANG Hai[1], PANG Erzong[3]

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education (Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;
2. Shanxi Research Institute for Clean Energy, Tsinghua University, Taiyuan 030032, Shanxi Province, China;
3. Linyi Ouke Energy Saving Technology Co., Ltd., Linyi 276000, Shandong Province, China)

ABSTRACT: Facing the “carbon peak and carbon neutrality” target, the adaptability of hydrogen-enriched natural gas, as a low-carbon fuel, to existing natural gas-fired equipment has become a focus of attention. In this study, hydrogen-enriched natural gas combustion experiments are conducted on a 350 kW gaseous fuel-fired pilot furnace equipped with a metal fiber surface burner. The main attention is paid to the effects of changes in the hydrogen blending ratio (0%~30%) and the boiler heating load (25%~100%) on burner performances and pollutant emissions. The results show that when the heating load and blower speed remain unchanged, the excess air ratio of the furnace combustion increases, and NO_x, CO, and CO_2 decrease accordingly, as the hydrogen blending ratio increases. As the heating load increases, the metal fiber surface burner tends to be more in the blue flame mode. Besides, the NO_x emission decreases while the CO emission increases. Almost all the test cases after optimization in the experiments could satisfy the requirements that both NO_x and CO emissions are below 30 mg/m^3.

KEY WORDS: hydrogen-enriched natural gas; metal fiber surface burners; pollutant emissions; carbon emission reduction

摘要：双碳目标下，掺氢天然气作为一种低碳燃料，其在已有燃气设备上的适应性成为关注重点。该文在一台配有金属纤维燃烧器的 350 kW 燃气实验炉上进行掺氢燃烧实验，重点关注掺氢比(0%~30%)和负荷(25%~100%)变化对燃烧器运行性能和污染物排放的影响。结果表明，保证负荷和风机转速不变时，掺氢后炉膛燃烧的过量空气系数增加，NO_x、CO 和 CO_2 同时降低；随着负荷的增加，金属纤维燃烧器更趋向于蓝焰模式，NO_x 排放降低，CO 排放增加。实验过程中，基本上所有工况(经过优化后)均可以满足 NO_x 和 CO 排放都低于 30 mg/m^3。该文可为燃气锅炉掺氢燃烧工程实践提供一定的数据基础。

关键词：掺氢天然气；金属纤维表面燃烧器；污染物排放；碳减排

0 引言

随着我国双碳目标的提出，氢能作为一种无碳的二次能源受到广泛关注。目前，氢能在储运方面存在技术限制，将氢气掺混到天然气管网中形成掺氢天然气，并随管网输送到终端热用户进行燃烧利用，是大规模低成本利用氢能的潜在技术路径之一[1-2]。由于氢气和天然气的物理化学性质存在差异，如密度[3]、体积热值[4]、火焰传播速度[5]等，掺氢天然气在原有燃气设备上的适用性有待进一步探究。我国的燃气设备主要包括燃气轮机、内燃机、燃气锅炉和家用燃具等。燃气锅炉多用于工业及民用供热或热电联产领域，为实现该领域的碳减排目标，燃气锅炉掺氢燃烧也成为近年来的研究热点。

已有研究表明，天然气掺氢后会增加燃料的火焰传播速度，影响燃气锅炉的回火特性[6]，在掺氢比不高于 30%时，锅炉不会有明显的回火风险[7]。对于冷凝式燃气锅炉来说，天然气掺氢燃烧会增加烟

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFF0600604)。
National Key R&D Program of China (2021YFF0600604).

气中的水蒸气含量，提高锅炉的冷凝效率[8-10]；而对于非冷凝式燃气锅炉来说，在相同过量空气系数下，天然气掺氢燃烧有助于提高锅炉的热效率[11-12]。但是在同一过量空气系数下，氢气的绝热燃烧温度高于天然气，锅炉炉膛的燃烧温度升高，会造成 NO_x 排放增加[13-14]。同时，天然气掺氢后也会拓展燃料的可燃范围[15]，若考虑增大过量空气系数，则天然气掺氢后也会达到控制 NO_x 生成的目的[11,16]。

此外，燃烧器类型也会影响燃气锅炉的燃烧特性。金属纤维燃烧器主要由金属孔板和金属纤维组成，金属纤维表面有致密的孔隙结构，形成全预混微焰燃烧方式。同时，金属纤维的导热系数和辐射率较高，具有燃烧稳定和温度分布均匀的特点[17-18]。此外，由于金属纤维表面燃烧器采用全预混的燃烧方式，可以较为灵活地调节预混火焰的当量比控制火焰温度，且燃烧过程中火焰具有较大的比表面积，受到金属纤维表面一定程度的冷却，金属纤维表面燃烧的 NO_x 生成较少，在氮氧化物控制方面具有优势[19]，引发了学术界和产业界的广泛关注。

已有研究表明，掺氢天然气及一些低反应性燃料气体在陶瓷纤维表面燃烧器不做任何调整的情况下，均可稳定燃烧且实现低排放运行[20]。此外，在圆柱形不锈钢预混燃烧器表面加装金属纤维之后，天然气可以在更宽的当量比范围内稳定燃烧，且氮氧化物排放水平降低约 40%[21]。从污染物排放和热效率的角度综合考虑，相比于陶瓷纤维燃烧器和不锈钢翅片燃烧器，金属纤维燃烧器是更适合冷凝式燃气锅炉的燃烧器类型[22]。

虽然已经开展了掺氢天然气在燃气锅炉适用性的相关研究[11]，但是多为锅炉热力学建模和计算流体动力学(computational fluid dynamics，CFD)模拟研究，且数值模拟研究中较少关注燃烧器类型的影响。此外，在实验研究中，对于掺氢天然气在配有金属纤维这种燃烧器类型的燃气锅炉上的研究也鲜少报道。因此，本文设计并搭建 350 kW 冷凝式燃气锅炉实验系统，开展金属纤维表面燃烧器的天然气掺氢燃烧实验，重点关注掺氢比和锅炉负荷对锅炉热力学性能和污染物排放的影响，以期为燃气锅炉掺氢燃烧工程实践提供数据基础。

1　实验方法

1.1　燃气锅炉实验系统

本文设计并搭建 350 kW 燃气锅炉实验系统，如图 1 所示。系统由 350 kW 不锈钢锅炉本体、供气系统、烟气处理和测量系统、循环水系统组成。

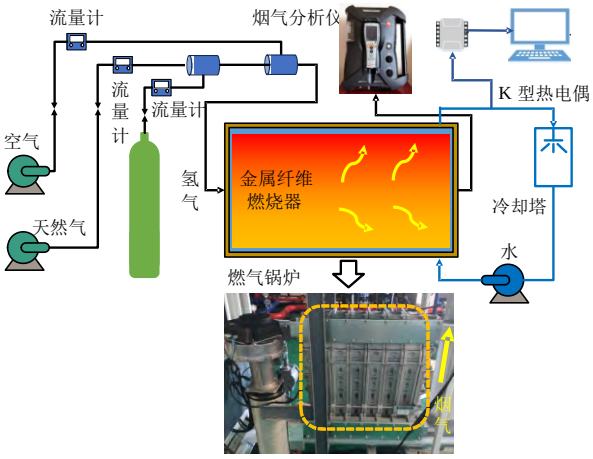


图 1　350 kW 燃气锅炉实验系统图

Fig. 1　Experimental system diagram of a 350 kW gas-fired boiler

锅炉本体中，炉膛由水冷鳍片管包围而成，呈卧式圆柱形布置。圆柱形炉膛的内径约为 330 mm，长度约为 800 mm。在锅炉前墙(圆柱形的底面)安装测试所用的金属纤维表面燃烧器。金属纤维表面燃烧器是直径为 85.6 mm，长度为 595 mm 的圆柱筒体，筒体侧面开孔并覆盖金属纤维，如图 2 所示。

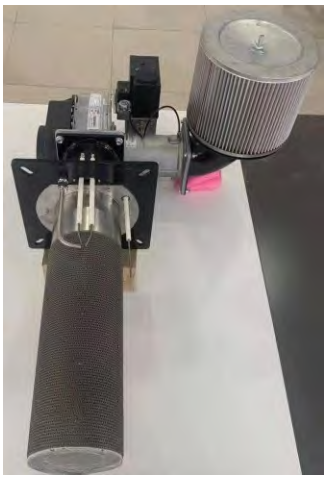


图 2　金属纤维表面燃烧器实物图

Fig. 2　Physical diagram of the metal fiber surface burner

供气系统包括天然气气源、氢气点供气源和空气，气体的流量由涡轮流量计结合电动执行阀组控制。天然气和氢气根据预定的掺混比例分别确定各自流量，经由氢气-天然气掺混器混合后形成掺氢天然气，再与空气在文丘里混合器中充分预混后送入金属纤维表面燃烧器。

燃料和空气在锅炉炉膛内燃烧，产生的高温烟气与锅炉内的水换热后冷却，经由烟气处理和测量系统排出室外。在锅炉出口烟囱中设置有烟气取样

枪，对烟气进行采样测量其中的 O_2、CO_2、NO_x、CO 组分和排烟温度。换热后锅炉热水经过冷却塔降温换热之后，再经水处理系统送回实验锅炉循环利用。

实验用到的测量仪器包括：1）涡轮流量计，用于测量天然气和氢气的体积流量；2）K 型铠装热电偶，用于测量锅炉出水温度和锅炉烟气冷凝后的排烟温度；3）TESTO 350 烟气分析仪，用于测量烟气中的 NO_x 和 CO 含量等。以上测量仪器的使用范围和精度如表 1 所示。

表 1 实验测量仪器范围及精度

Table 1 Range and accuracy of experimental measuring instruments

测量参数	测量仪器	测量范围	测量精度
T	K 型铠装热电偶	0~1 100℃	±1.5 ℃
V	涡轮流量计	0~15 m^3/h	±0.5% 测量值
V		0~50 m^3/h	±0.5% 测量值
O_2 含量	TESTO 350	0~25%	±0.2%
NO 含量		0~4 000 ppm	±5%测量值
NO_2 含量		0~500 ppm	±5%测量值
CO 含量		0~10 000 ppm	±5%测量值
CO_2 含量		0~50%	±0.3% ±1%测量值

1.2 实验工况设置

在燃气锅炉掺氢燃烧实验中，主要研究燃料掺氢比和锅炉负荷对于锅炉运行参数和烟气中主要污染物 NO_x 和 CO 排放的影响。需要说明的是，燃料掺氢比定义为燃料中氢气体积占燃料总体积的比例，如式(1)所示。

$$X_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{H_2} + V_{NG}} \tag{1}$$

式中 V_{NG}、V_{H_2} 分别为天然气和氢气的体积流量，m^3/h。

表 2 给出实验中自变量的取值范围，实验中掺氢比的变化范围在 0%~30%，锅炉负荷的取值分别为 87.5(25%负荷)、175(50%负荷)、262.5(75%负荷)和 350 kW(100%负荷)4 种工况。此外，空气流量由风机控制，4 种不同的锅炉负荷下对应的风机转速分别为 1 600、2 900、4 100、5 700 r/min。实验时室温为 25℃，在实验过程中其波动小于 5℃。每个工况稳定运行 5 min，记录一次数据，包括天然气流量、氢气流量、出水温度、排烟温度、NO_x 和 CO 排放值等。

表 2 实验变量取值范围

Table 2 Range of experimental variables

实验变量	取值范围
掺氢比 X_{H_2}	0%~30%
锅炉负荷 Q/kW	87.5/175/262.5/350
空气风机转速/(r/min)	1 600/2 900/ 4 100/5 700

1.3 掺氢天然气的燃料性质

由于天然气和氢气的物理化学性质存在差异，两者掺混之后形成的掺氢天然气的燃料性质也随着掺氢比的变化而变化。实验中所使用的天然气的组分特性如表 3 所示。

表 3 天然气组分及体积分数

Table 3 Natural gas components and volume fractions

燃料组分	体积分数/%	燃料组分	体积分数/%
甲烷	96.74	戊烷	0.15
乙烷	1.43	二氧化碳	0.5
丙烷	0.48	氦气	0.34
丁烷	0.35		

本文重点关注掺氢天然气的高位体积热值 Q_{HHV}、低位体积热值 Q_{LHV}、华白数 W 和层流火焰传播速度 S_L(过量空气系数 α=1.4，未燃气体温度 T_u=20℃)随掺氢比的变化情况，如表 4 所示。其中，华白数可根据式(2)计算得到。

$$W = \frac{Q_{HHV}}{\sqrt{\rho_f / \rho_{air}}} \tag{2}$$

式中 ρ_f 和 ρ_{air} 分别为掺氢天然气和空气的密度，kg/m^3。

表 4 掺氢天然气的燃料性质

Table 4 Fuel properties of hydrogen-enriched natural gas

掺氢比 X_{H_2}/%	Q_{HHV}/(MJ/m^3)	Q_{LHV}/(MJ/m^3)	W/(MJ/m^3)	S_L/(cm/s)
0	39.89	36.68	54.64	19.26
10	37.17	34.09	53.32	20.47
20	34.45	31.50	52.00	22.04
30	31.73	28.92	50.69	24.00
100	12.70	10.80	50.72	133.24

注：过量空气系数 α=1.4，未燃气体温度 T_u=20℃。

在本文实验所研究的掺氢比变化范围内，掺氢天然气的高位体积热值、低位体积热值和华白数都随着掺氢比的增大而减小。而在同一过量空气系数下，层流火焰传播速度随着掺氢比的增加而增加，在掺氢比较小时，增幅也较小。

2 结果与讨论

2.1 锅炉运行性能及参数的变化

首先，在改变燃料的掺氢比后，燃气锅炉的燃料流量和炉膛燃烧的过量空气系数随掺氢比和锅炉

负荷的变化情况如图 3 所示。需要说明的是，过量空气系数是指实际供给燃料燃烧的空气量与燃料在化学计量比下燃烧所需要的理论空气量之比。在燃气锅炉中，过量空气系数可根据式(3)计算得到。

$$\alpha = 21/(21 - X_{O_2}) \tag{3}$$

式中 X_{O_2} 为氧气在烟气中的体积分数，%，由 TESTO 350 测量得到。

随着掺氢比从 0 增加到 30%，氢气流量增加，天然气流量降低。在同一锅炉负荷下，为保证锅炉出力，由于掺氢后燃料的体积热值下降，所以燃料的总体积流量是增加的。此外，在同一锅炉负荷下控制空气流量的风机转速保持不变，则单位时间通过风机的空气量不变，即空气的体积流量不变。天然气在当量比下燃烧所需的空气量大于氢气对应所需的空气量，因此燃料掺氢后在炉膛燃烧的过量空气系数随着掺氢比的增加而逐渐增大。在本次实验中，为保证掺氢天然气在金属纤维燃烧器上的安全稳定燃烧，过量空气系数在 1.35~1.5 范围内变化。随着锅炉负荷的增加，对应天然气流量和氢气流量同时成比例增加。此外，锅炉炉膛内是微正压环境，表压小于 100 Pa。

通过锅炉的观火孔，利用 CMOS 相机拍摄不同掺氢比和锅炉负荷下掺氢天然气在金属纤维燃烧器上的火焰图像，如图 4 所示。

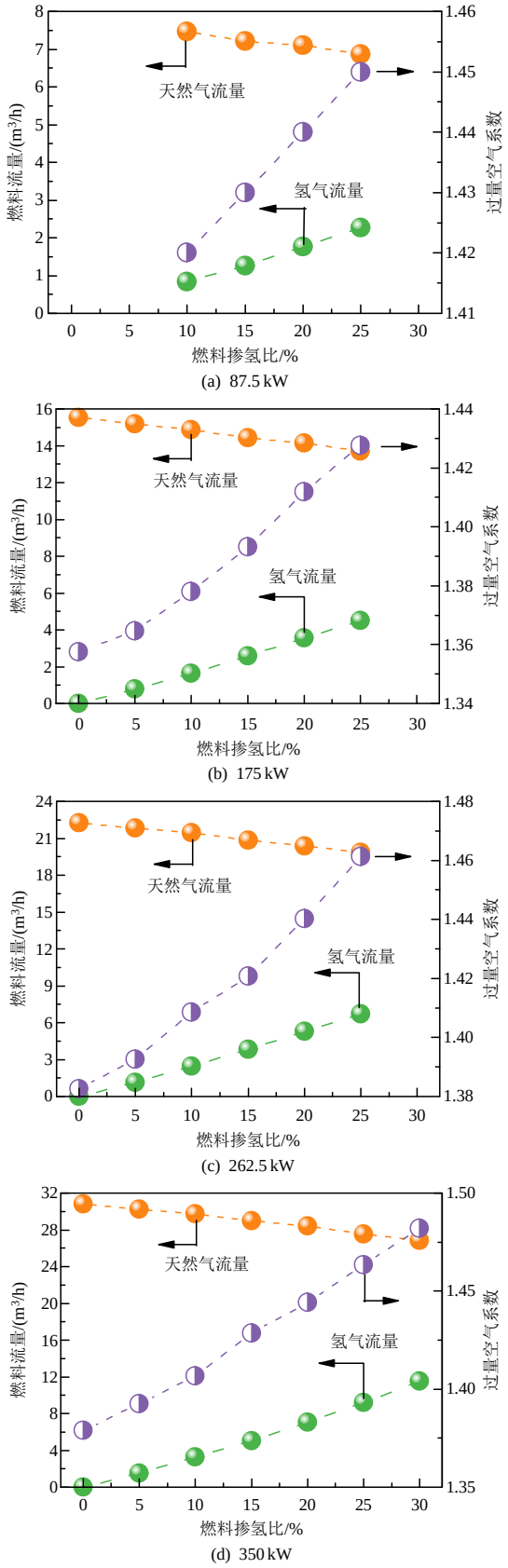


图 3　燃气锅炉在不同负荷下操作参数随掺氢比的变化

Fig. 3　Variation of operating parameters with hydrogen blending ratio of the gas-fired boiler at different loads

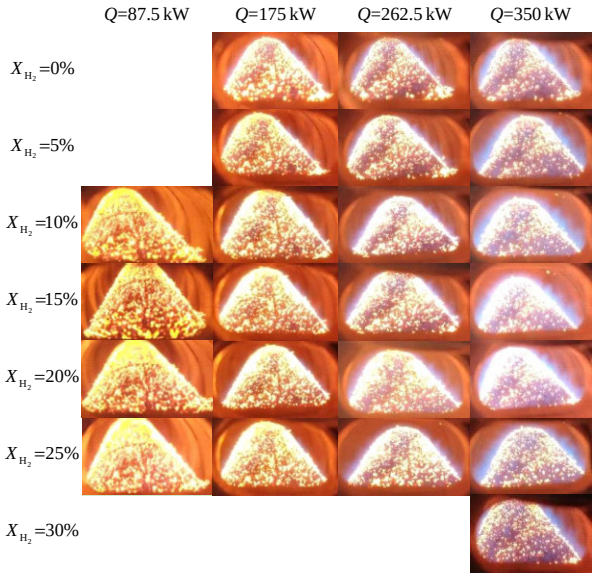


图 4　燃气锅炉在不同掺氢比和锅炉负荷下的火焰图像

Fig. 4　Flame images of the gas-fired boiler at different hydrogen blending ratios and heating loads

金属纤维存在两种燃烧模式：红外辐射模式和蓝焰模式[23]。在红外辐射模式中，火焰浸没在金属纤维内燃烧，金属纤维呈现红色，此时以辐射换热为主；在蓝焰模式中，火焰附着于金属纤维表面燃

烧，金属纤维表面有蓝色火焰，此时以对流换热为主[24]。其燃烧模式的变化主要与金属纤维燃烧器的预混气体出口流速和火焰传播速度的相对大小密切相关，可通过燃烧稳定性判据 K 值[20,25]进行表征，如式(4)所示。当 K 值较大时，火焰被吹出，附着在金属纤维表面，更容易形成蓝焰燃烧；当 K 值较小时，火焰浸没在金属纤维内，更容易形成红外辐射模式。

$$K = v_{\text{total}} / S_{\text{L}} \tag{4}$$

式中 v_{total} 为燃烧器内预混气体的出口流速，m/s，其具体数值可根据式(5)计算得到。

$$v_{\text{total}} = \frac{V_{\text{total}}}{S_{\text{burner}}} = \frac{V_{\text{NG}} + V_{\text{H}_2} + V_{\text{air}}}{3600\pi dL} \tag{5}$$

式中：V_{air} 为空气的体积流量，m^3/h；d 和 L 分别为燃烧器的直径和长度，m，前文已给出具体数值。

表 5 给出图 4 对应工况下计算得到的燃烧稳定性判据 K 值。通过将火焰图像与 K 值进行对照可以发现，在同一锅炉负荷下，随着掺氢比的增加，燃料流量增加，空气流量保持不变，预混气体总流量增加，在金属纤维燃烧器上出口流速增加。与此同时，掺氢比增加，过量空气系数也随之增加。通过模拟计算得到，在两者同时变化时，火焰传播速度会略有提升。当预混气体出口流速和火焰传播速度同时增加时，K 值基本上保持不变。对应图 4 中同一锅炉负荷下的火焰图像，其燃烧模式也基本上保持不变。

表 5 燃气锅炉在不同掺氢比和锅炉负荷下的 K 值

Table 5 K value of the gas-fired boiler at different hydrogen blending ratios and heating loads

掺氢比 X_{H_2}/%	Q=87.5 kW	Q=175 kW	Q=262.5 kW	Q=350 kW
0	—	1.86	2.82	3.90
5	—	1.83	2.82	3.89
10	1.07	1.82	2.81	3.88
15	1.06	1.81	2.85	3.93
20	1.07	1.82	2.84	3.92
25	1.06	1.81	2.84	3.92
30	—	—	—	3.88

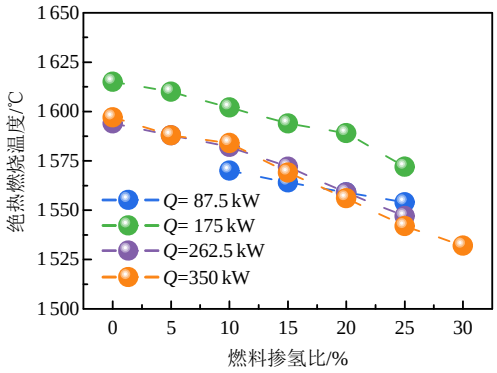
而当锅炉负荷从 87.5 增至 350 kW 时，燃料流量和空气流量同时增加，预混气体的出口流速增大。由于同一掺氢比下过量空气系数相近，火焰传播速度并没有明显变化。在这种情况下，K 值从 1.1 左右增至 3.9 左右，从图 4 中可以看出，金属纤维燃烧模式也更趋向于蓝焰燃烧。

燃气锅炉中高温烟气与水进行换热，根据实测数据计算得到，在不同掺氢比和锅炉负荷下掺氢天然气在炉膛的绝热燃烧温度 T_{ad}、烟气的露点温度 T_{dp}、燃烧效率 η_{rs} 和锅炉热效率 η_{th} 的变化如图 5 所示。其中，T_{ad} 根据燃料组分、过量空气系数等参数获得；T_{dp} 根据烟气中水蒸气分压建立的拟合关联式获得；η_{rs} 是通过烟气中 CO 组分计算得到气体不完全燃烧热损失，进而得到燃烧效率；而本文中锅炉热效率 η_{th} 根据正平衡计算得到，如式(6)所示。

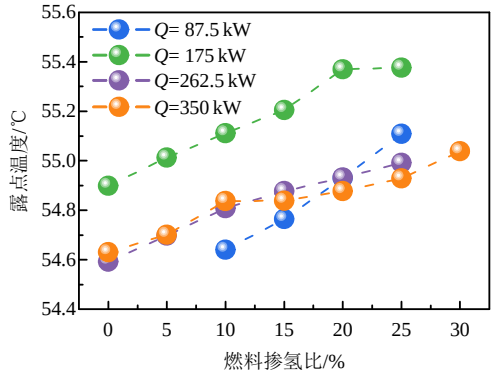
$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{water}}}{Q_{\text{fuel}}} = \frac{m_{\text{water}}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}})}{V_{\text{fuel}} Q_{\text{LHV}}} \tag{6}$$

式中：Q_{fuel} 为燃料所提供的热量，kW；Q_{water} 为锅炉中加热水的有效热量，kW；m_{water} 为水的质量流量，kg/s；h_{in} 和 h_{out} 分别为进水焓值和出水焓值，kJ/kg。

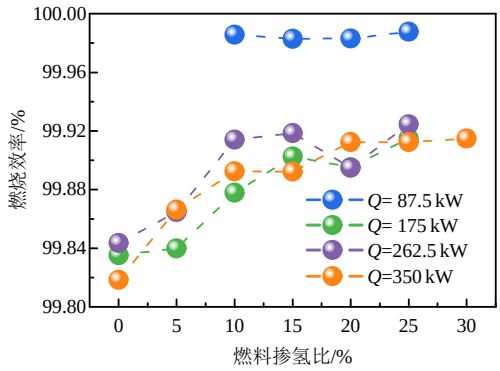
锅炉负荷不变时，燃料中掺氢比增加的同时过量空气系数也增大，掺氢天然气的绝热燃烧温度随着掺氢比的增加而下降，温度范围在 1 525~1 625℃之间，如图 5(a)所示。在这种情况下，根据锅炉实际运行经验，锅炉受热壁面温度一般低于 1 000℃，而实验中燃气锅炉整体受热面材料为不锈钢，耐温 1 200℃，可保证掺氢后锅炉安全运行。同时，随着掺氢比的增加，烟气中水蒸气的分压增大，露点温度升高，温度范围在 54.5~55.5℃之间，如图 5(b)所示。而锅炉尾部烟道中排烟温度均低于露点温



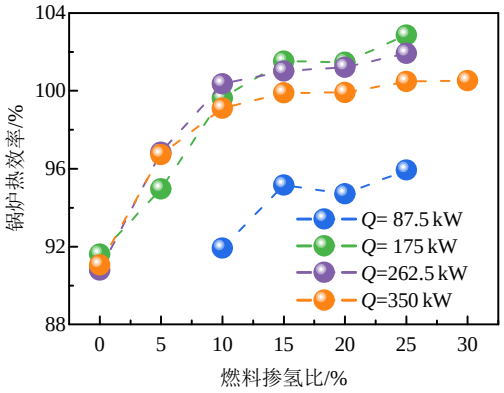
(a) 绝热燃烧温度



(b) 露点温度



(c) 燃烧效率



(d) 锅炉热效率

图 5　燃气锅炉在不同掺氢比和锅炉负荷下的关键参数变化

Fig. 5 Key parameters of the gas-fired boiler at different hydrogen blending ratios and heating loads

度，说明烟气中部分水蒸气发生冷凝。从图 5(d)中可以看出，掺氢比增加，锅炉烟气中更多的水蒸气潜热被利用，有助于锅炉热效率的提升。在部分工况下，实验中冷凝式锅炉的热效率甚至可超过100%，这是基于燃料低位发热量计算锅炉热效率的结果。此外，锅炉在 25%负荷下运行的整体热效率偏低。如图 5(c)所示，锅炉整体燃烧效率大于99.8%，说明气体不完全燃烧热损失较小。

2.2　锅炉污染物排放的变化

在实验过程中，利用 TESTO 350 测试烟气中主要污染物 NO_x 和 CO 随掺氢比和锅炉负荷的变化情况，分别如图 6、7 所示。需要说明的是，NO_x 和 CO 的排放值均折算到 3.5%氧气浓度下[26]。从图 6 中可以看出，在同一锅炉热负荷下，NO_x 随着掺氢比的增加而降低，这是因为在燃烧过程中炉膛的过量空气系数随着掺氢比的增加而增加，从图 5(a)中可知，掺氢天然气的绝热燃烧温度随着掺氢比和过量空气系数的同时增加而呈现下降趋势，说明实验过程中炉膛的燃烧温度随着掺氢比增加而逐渐下降，使得 NO_x 也呈现下降的趋势。

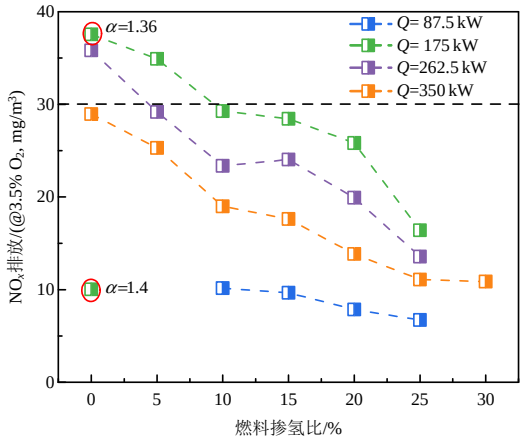


图 6　燃气锅炉在不同掺氢比和锅炉负荷下的 NO_x 排放

Fig. 6　NO_x emissions of the gas-fired boiler under different hydrogen blending ratios and heating loads

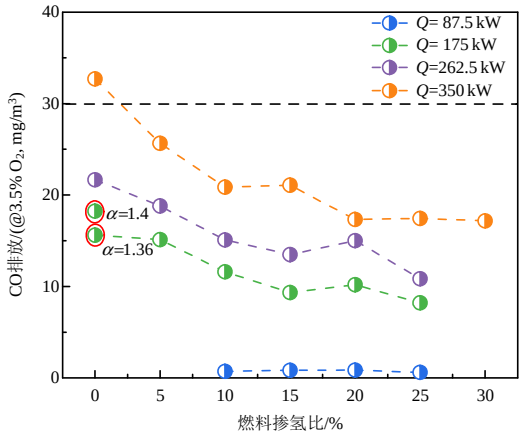


图 7　燃气锅炉在不同掺氢比和锅炉负荷下的 CO 排放

Fig. 7　CO emissions of the gas-fired boiler under different hydrogen blending ratios and heating loads

此外，在同一掺氢比下，随着锅炉负荷从 175 增至 350 kW，NO_x 排放逐渐降低。这是因为在 100%锅炉负荷下，燃烧器中预混气体的出口流速较大，燃料在金属纤维表面燃烧，呈现蓝焰模式，金属纤维燃烧器整体的温度相对较低。且预混气体流速较大，在炉膛高温区的停留时间就会缩短，这都有利于降低 NO_x 排放。而在较低的锅炉负荷下(Q=87.5 kW)，虽然火焰更贴近于金属纤维表面燃烧，但由于低负荷下炉膛的整体温度较低，因此 NO_x 排放也较低。

同时，由于实验中部分工况的 NO_x 排放高于 30 mg/m^3，因此，也对这些工况进行优化实验。以 Q=175 kW，X_{H_2}=0 为例，当过量空气系数 α 从 1.36 增至 1.4 时，NO_x 排放可从 37.6 降至 10.0 mg/m^3，CO 排放从 15.6 增至 18.2 mg/m^3(如图 7 所示)。这是因为在掺氢比不变时增加过量空气系数，一方面会降低燃烧温度，使得 NO_x 排放下降，另一方面会使

预混气体流速增加，烟气在高温区的停留时间缩短，造成燃烧反应不完全，使得 CO 生成量增加。

从图 7 可以看出，在同一锅炉热负荷下，CO 排放随着掺氢比的增加而降低。这是因为随着掺氢比增加，燃料中 C 元素的减少有助于降低 CO 的产生。此外，随着掺氢比的增加，过量空气系数同时增加，虽然炉膛高温区的温度降低，但过量空气系数的增加使得烟气中更多的热量被带到炉膛尾部换热区，炉膛尾部的烟气温度反而增加，这样也有助于燃料的完全燃烧，使得 CO 排放降低。

同一掺氢比下，随着锅炉热负荷的增加，CO 排放增加。这是因为锅炉热负荷增加使得预混气体出口流速增加，且变化幅度较大，这不仅缩短了预混气体在高温区的停留时间，而且金属纤维的整体温度也较低，不利于燃料的充分燃烧，因此 CO 排放增加。此外，在本实验工况范围内，CO 的排放几乎都在 30 mg/m^3 范围内。

同时，实验测量烟气中 CO_2 和 O_2 的体积分数。由于不同锅炉热负荷下的变化趋势近似，此处以锅炉额定负荷下的结果进行说明，如图 8 所示。当燃料中掺氢比从 5%增至 30%时，CO_2 的体积分数从 10.6%降至 8.8%，这说明天然气掺氢之后具有一定的碳减排潜力。O_2 的体积分数从 5.9%增至 6.8%，说明掺氢之后由于氢气燃烧所需要的空气较少，燃烧时过量空气系数增加，烟气中的氧含量也随之增加。

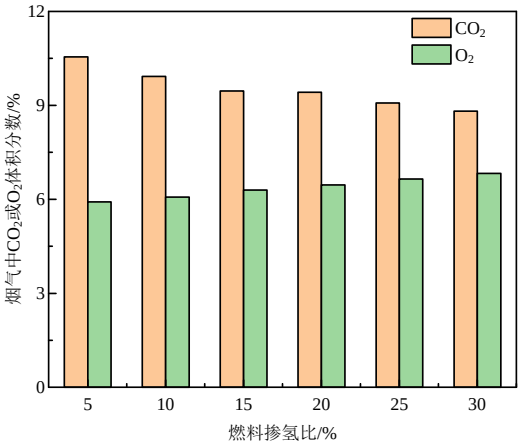


图 8 燃气锅炉额定负荷下烟气中 CO_2 和 O_2 体积分数随掺氢比的变化

Fig. 8 Volumetric fraction of CO_2 and O_2 in flue gas under rated load of the gas-fired boiler as a function of hydrogen blending ratio

此外，为验证烟气测量结果的准确性，在实验过程中用气袋对烟气进行采样，并用气相色谱仪(gas chromatograph，GC)进行分析，结果如图 9 所示，GC 可以获得烟气中主要的气体成分比例，包括 N_2、O_2 和 CO_2。测试结果如图 10 所示。N_2 是锅炉烟气中的主要成分，体积分数占比约为 68%，且随着掺氢比的增加，N_2 的体积分数基本上保持不变。当燃料中掺氢比从 5%增至 30%时，CO_2 的体积分数从 9.7%降至 8.1%，与 TESTO 350 结果相比，误差均在±10%以内。O_2 的体积分数从 5.7%增至 6.9%，与 TESTO 350 结果相比，误差均在±5%以内，可以进一步验证 TESTO 350 测量结果的准确性。

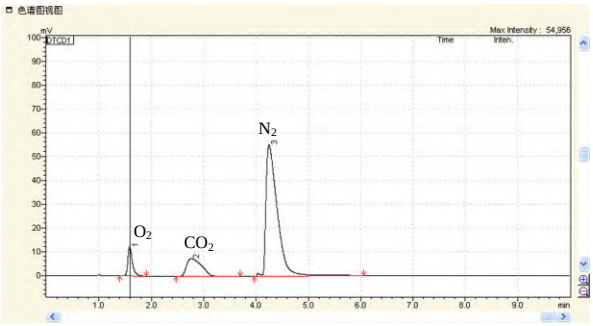


图 9 燃气锅炉额定负荷下烟气中主要气体成分测试

Fig. 9 Main gas composition in flue gas at rated load of the gas-fired boiler

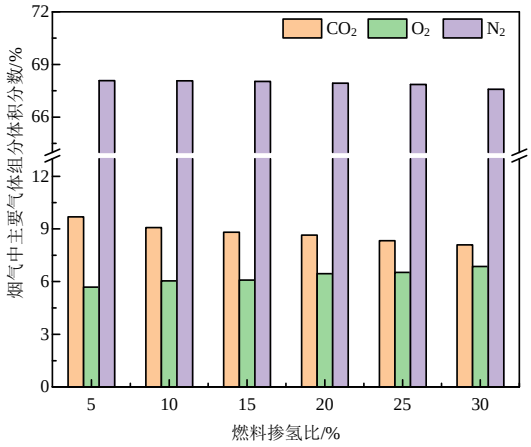


图 10 燃气锅炉额定负荷下烟气中主要气体体积分数随掺氢比的变化

Fig. 10 Volumetric fraction of main gas composition in flue gas under rated load of the gas-fired boiler as a function of hydrogen blending ratio

3 结论

本文通过在 350 kW 燃气锅炉上进行掺氢燃烧实验，观察不同掺氢比和锅炉负荷下金属纤维燃烧器的燃烧模式，测量锅炉运行参数和污染物排放的变化情况，得到主要结论如下：

1）实验过程中保证锅炉负荷和风机转速不变时，掺氢后所需燃料总流量增加，天然气流量降低，氢气流量增加，炉膛燃烧的过量空气系数也略有增

加，在 1.35~1.5 范围内变化。

2）金属纤维燃烧器在不同运行参数下有红外辐射和蓝焰两种燃烧模式，可用燃烧稳定性判据 K 值定量表征。在 25%锅炉负荷下，由于燃烧器出口预混气体流速较低，燃烧更趋向于红外辐射模式，K 值在 1.1 左右；在 100%锅炉负荷下，由于燃烧器出口预混气体流速较高，燃烧更趋向于蓝焰模式，K 值在 3.9 左右。

3）在同一锅炉负荷下，由于掺氢比和过量空气系数同时增加，NO_x 和 CO 排放同时降低；而随着锅炉负荷从 50%增至 100%，NO_x 排放降低，CO 排放增加。在 25%锅炉负荷下，锅炉 NO_x 和 CO 排放均较低。实验过程中通过调整工况，在掺氢比 0~30%、锅炉负荷 25%~100%范围内，基本上可同时满足 NO_x 和 CO 排放低于 30 mg/m^3 的要求。此外，烟气中 CO_2 的体积分数随着掺氢比的增加而降低，说明掺氢天然气作为燃料具有一定的碳减排潜力，未来可考虑进一步提高燃料中的掺氢比例。

参考文献

[1] 邱玥，周苏洋，顾伟，等．“碳达峰、碳中和”目标下混氢天然气技术应用前景分析[J]．中国电机工程学报，2022，42(4)：1301-1320．
QIU Yue，ZHOU Suyang，GU Wei，et al．Application prospect analysis of hydrogen enriched compressed natural gas technologies under the target of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE，2022，42(4)：1301-1320(in Chinese)．

[2] 谢敏，叶佳南，何知纯，等．考虑碳排放和混合燃烧特性的氢混燃机精细化建模及应用[J]．中国电机工程学报，2023，43(11)：4319-4339．
XIE Min，YE Jianan，HE Zhichun，et al．Refined modeling and application of hydrogen mixed gas turbine considering characteristics of carbon emission and co-combustion[J]．Proceedings of the CSEE，2023，43(11)：4319-4339(in Chinese)．

[3] HERNÁNDEZ-GÓMEZ R，TUMA D，LOZANO-MARTÍN D，et al．Accurate experimental(p, ρ, T) data of natural gas mixtures for the assessment of reference equations of state when dealing with hydrogen-enriched natural gas[J]．International Journal of Hydrogen Energy，2018，43(49)：21983-21998．

[4] TANG Chenglong，ZHANG Yingjia，HUANG Zuohua．Progress in combustion investigations of hydrogen enriched hydrocarbons[J]．Renewable and Sustainable Energy Reviews，2014，30：195-216．

[5] 郁鸿飞，李祥晟，郭菡．甲烷掺氢燃料反应动力学特性分析及机理验证[J]．中国电机工程学报，2024，44(9)：3563-3572．
YU Hongfei，LI Xiangsheng，GUO Han．Kinetic characteristics analysis and mechanism verification of hydrogen-doped methane fuel[J]．Proceedings of the CSEE，2024，44(9)：3563-3572(in Chinese)．

[6] 王天天，张海，张扬，等．掺氢天然气在燃气锅炉和灶具中的回火风险分析[J]．力学与实践，2022，44(3)：543-553．
WANG Tiantian，ZHANG Hai，ZHANG Yang，et al．Flashback risk analysis of hydrogen-enriched natural gas in boilers and domestic appliances[J]．Mechanics in Engineering，2022，44(3)：543-553(in Chinese)．

[7] JONES D R，AL-MASRY W A，DUNNILL C W．Hydrogen-enriched natural gas as a domestic fuel：an analysis based on flash-back and blow-off limits for domestic natural gas appliances within the UK[J]．Sustainable Energy & Fuels，2018，2(4)：710-723．

[8] LO BASSO G，NASTASI B，GARCIA D A，et al．How to handle the Hydrogen enriched Natural Gas blends in combustion efficiency measurement procedure of conventional and condensing boilers[J]．Energy，2017，123：615-636．

[9] BĂLĂNESCU D T，HOMUTESCU V M．Effects of hydrogen-enriched methane combustion on latent heat recovery potential and environmental impact of condensing boilers[J]．Applied Thermal Engineering，2021，197：117411．

[10] 于子龙，张立业，宁晨，等．天然气掺氢管道输运及终端应用[J]．力学与实践，2022，44(3)：491-502．
YU Zilong，ZHANG Liye，NING Chen，et al．Natural gas hydrogen mixing pipeline transportation and terminal application[J]．Mechanics in Engineering，2022，44(3)：491-502(in Chinese)．

[11] WANG Tiantian，ZHANG Hai，ZHANG Yang，et al．Efficiency and emissions of gas-fired industrial boiler fueled with hydrogen-enriched nature gas：a case study of 108 t/h steam boiler[J]．International Journal of Hydrogen Energy，2022，47(65)：28188-28203．

[12] 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．

[13] CELLEK M S，PINARBAŞI A．Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas，methane，hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels[J]．International Journal of Hydrogen Energy，2018，43(2)：1194-1207．

[14] BÜYÜKAKIN M K，ÖZTUNA S．Numerical

investigation on hydrogen-enriched methane combustion in a domestic back-pressure boiler and non-premixed burner system from flame structure and pollutants aspect [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2020，45(60)：35246-35256.

[15] MIAO Haiyan，LU Lin，HUANG Zuohua. Flammability limits of hydrogen-enriched natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2011，36(11)：6937-6947.

[16] ALLEN B，BOUTOT T，BULLERWELL J，et al. Hydrogen enriched natural gas(HENG)：generation and applications in combined heat and power generation and as a fuel for high efficiency boilers[C]//2010 AIChE Spring National Meeting. San Antonio：AlChE，2010.

[17] 石运鑫，谢敏，刘宏，等. 金属纤维燃烧技术研发现状[J]. 节能技术，2021，39(5)：452-459.
SHI Yunxin，XIE Min，LIU Hong，et al. Research and development status of metal fiber combustion technology [J]. Energy Conservation Technology，2021，39(5)：452-459(in Chinese).

[18] 安文旗，朱彤，潘登，等. 烟气再循环对金属纤维表面燃烧器 NO_x 排放和燃烧稳定性的影响[J]. 燃烧科学与技术，2019，25(4)：365-371.
AN Wenqi，ZHU Tong，PAN Deng，et al. NO_x emission characteristics and combustion stability of metal fiber surface burner with flue gas recirculation[J]. Journal of Combustion Science and Technology，2019，25(4)：365-371(in Chinese).

[19] 朱荣俊，潘登，高晗，等. 金属纤维燃烧器表面燃烧模拟研究[J]. 煤气与热力，2020，40(1)：36-42.
ZHU Rongjun，PAN Deng，GAO Han，et al. Study on surface combustion simulation of metal fiber burner[J]. Gas & Heat，2020，40(1)：36-42(in Chinese).

[20] COLORADO A，MCDONELL V. Surface stabilized combustion technology：an experimental evaluation of the extent of its fuel-flexibility and pollutant emissions using low and high calorific value fuels[J]. Applied Thermal Engineering，2018，136：206-218.

[21] SCHIRO F，STOPPATO A. Experimental investigation of emissions and flame stability for steel and metal fiber cylindrical premixed burners[J]. Combustion Science and Technology，2019，191(3)：453-471.

[22] YU B，KUM S M，LEE C E，et al. Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners[J]. Energy，2013，53：343-350.

[23] 同济大学，重庆大学，哈尔滨工业大学，等. 燃气燃烧与应用[M]. 4 版. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
Tongji University，Chongqing University，Harbin Institute of Technology，et al. Gas combustion and utilization[M]. 4th ed. Beijing：China Architecture & Building Press，2011(in Chinese).

[24] GOLOMBOK M，JARIWALA H，SHIRVILL L C. Gas-solid heat exchange in a fibrous metallic material measured by a heat regenerator technique[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，1990，33(2)：243-252.

[25] KORNILOV V N，SHAKARIYANTS S，DE GOEY L P H. Novel burner concept for premixed surface-stabilized combustion[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2012：Turbine Technical Conference and Exposition. Copenhagen：ASME，2012.

[26] 中华人民共和国环境保护部，国家质量监督检验检疫总局. GB 13271—2014 锅炉大气污染物排放标准[S]. 北京：中国环境科学出版社，2014.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China，General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine. GB 13271—2014 Emission standard of air pollutants for boiler[S]. Beijing：China Environmental Science Press，2014(in Chinese).

王天天

在线出版日期：2023-11-23。
收稿日期：2023-08-21。

作者简介：
王天天(1996)，女，博士，主要从事掺氢天然气高效燃烧利用方面的研究工作，tjwangtiantian96@163.com；
*通信作者：张扬(1986)，男，博士，副教授，主要从事低碳燃料燃烧技术、储能技术方面的研究工作，yang-zhang@tsinghua.edu.cn。

(编辑 张文鑫，张蕾)

 DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.231802

Experimental Study of Characteristics of Hydrogen-enriched Natural Gas Combustion in Metal Fiber Surface Burner

WANG Tiantian[1], WANG Zhining[2], ZHANG Yangxin[2], ZHANG Yang[1*], ZHANG Hai[1], PANG Erzong[3]

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education (Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University);2. Shanxi Research Institute for Clean Energy, Tsinghua University; 3. Linyi Ouke Energy Saving Technology Co., Ltd.)

KEY WORDS: hydrogen-enriched natural gas; metal fiber surface burners; pollutant emissions; carbon emission reduction

Facing the "carbon peak and carbon neutrality" target, the adaptability of hydrogen-enriched natural gas, as a low-carbon fuel, to existing natural gas-fired equipment has become a focus of attention. Among the equipment, gas-fired boilers are mostly used in industrial and civil heating or cogeneration fields. To achieve carbon emission reduction targets in these fields, hydrogen combustion in gas-fired boilers has also become a research hotspot in recent years.

In this study, hydrogen-enriched natural gas combustion experiments are conducted on a 350 kW gaseous fuel-fired pilot furnace equipped with a metal fiber surface burner. The experimental system diagram is shown in Fig. 1. Besides, the physical diagram of the metal fiber surface burner is shown in Fig. 2. The main attention is paid to the effects of changes in the hydrogen blending ratio (0%~30%) and the boiler heating load (25%~100%) on the boiler thermodynamic performances and pollutant emissions. The combustion stability criterion K is used to quantitatively characterize the combustion stability of hydrogen- enriched natural gas on the metal fiber surface burner. K is calculated according to (1).

$$K = \frac{v_{\text{total}}}{S_{\text{L}}} \tag{1}$$

where v_{total} is the outlet flow velocity of premixed gas in the metal fiber burner, m/s. S_{L} is the laminar flame speed of premixed gas, m/s.

The results show that when the heating load and blower speed remain unchanged, the excess air ratio in the furnace increases, and NO_x, CO, and CO_2 decrease accordingly, as the hydrogen blending ratio increases. As the heating load increases from 25% to 100%, the metal fiber surface burner tends to be more in the blue flame mode. The value of K increases from 1.1 to 3.9.

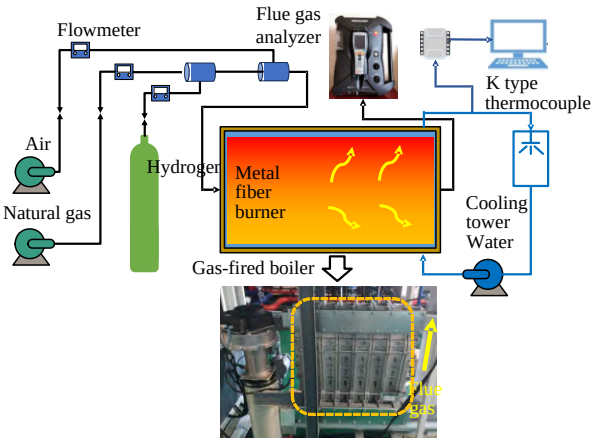


Fig. 1 Experimental system diagram of a 350 kW gas-fired boiler

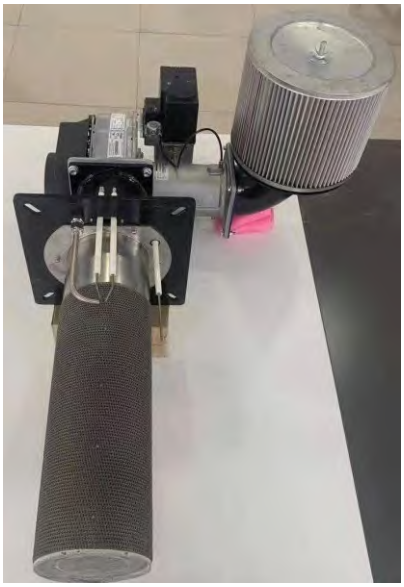


Fig. 2 Physical diagram of the metal fiber surface burner

Besides, the NO_x emission decreases while the CO emission increases. During the experiment, NO_x and CO emissions can be basically below 30 mg/m^3 under all working conditions after optimization. Additionally, hydrogen addition can reduce CO_2 emission, and a further increase in the hydrogen blending ratio in the fuel could be considered in the future.