DOI: 10.19666/j.rlfd.202509060

基于神经网络优化的低负荷生物质气掺烧锅炉数值模拟研究

王志浩[1]，韩学义[1]，高涣庭[2]，陈宣龙[1]，龚　勋[2]
（1. 华电湖北发电有限公司，湖北　武汉　430061；
2. 华中科技大学煤燃烧与低碳利用全国重点实验室，湖北　武汉　430074）

［摘　　要］【目的】为研究锅炉低负荷条件下生物质气掺烧对燃烧稳定性及炉内参数的影响，以某660 MW四角切圆锅炉为对象，提出稳定性指标，并结合数值模拟与人工神经网络开展研究。【方法】在100%、70%、50%和30%负荷下对纯煤与掺烧工况进行对比分析。【结果】结果表明：掺烧工况温度稳定系数 M_T 与基准工况偏差小于3.9%，低负荷条件下炉内燃烧总体稳定；当负荷由100%降至70%，纯煤工况主燃区平均温度下降147.87 K，而掺烧工况仅下降69.37 K，温度衰减更缓；在30%负荷下，掺烧工况还原区与燃尽区 NO_x 体积分数分别为0.051 2%和0.044 4%，低于纯煤工况的0.093 3%和0.078 6%，其他参数波动幅度更小；进一步构建人工神经网络预测模型描述炉内参数间的复杂关系，纯煤与掺烧工况温度、CO_2 和 NO_x 预测回归系数 R^2 均大于0.96。【结论】该研究可为生物质气化掺烧锅炉低负荷运行优化与参数预测提供支撑。

［关　键　词］低负荷燃烧稳定性；生物质气；掺烧；人工神经网络

［引用本文格式］王志浩，韩学义，高涣庭，等. 基于神经网络优化的低负荷生物质气掺烧锅炉数值模拟研究[J]. 热力发电，2026, 55(6): 154-163.　WANG Zhihao, HAN Xueyi, GAO Huanting, et al. Numerical simulation study of a low-load biomass gas co-firing boiler optimized using artificial neural networks[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(6): 154-163.

Numerical simulation study of a low-load biomass gas co-firing boiler optimized using artificial neural networks

WANG Zhihao[1], HAN Xueyi[1], GAO Huanting[2], CHEN Xuanlong[1], GONG Xun[2]
(1. Hubei Huadian Power Generation Co., Ltd., Wuhan 430061, China;
2. State Key Laboratory of Coal Combustion, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of biomass gas co-firing on combustion stability and in-furnace parameters under low-load conditions, a 660 MW tangentially fired boiler was taken as the research object to carry out the study. A stability index was proposed, and a combined approach of numerical simulation and artificial neural network (ANN) was employed. [Methods] Comparative analysis was conducted between pure coal and co-firing conditions at loads of 100%, 70%, 50%, and 30%. [Results] The results show that the deviation of the temperature stability coefficient (M_T) under co-firing is less than 3.9%, indicating stable combustion at low load conditions. When the unit load decreases from 100% to 70%, the average temperature in the main combustion zone drops by 147.87 K for pure coal and 69.37 K for co-firing, indicating a slower temperature decay. At 30% load, the NO_x volume fractions in the reduction and burnout zones under co-firing are 0.051 2% and 0.044 4%, which are lower than 0.093 3% and 0.078 6% under pure coal combustion condition, with smaller fluctuations of other parameters. Furthermore, an artificial neural network (ANN) model was developed to describe the complicated relationships among in-furnace parameters, and the results show that the regression coefficients R^2 for temperature, CO_2 volume fraction, and NO_x volume fraction predictions are all greater than 0.96 in both pure coal and co-firing conditions. [Conclusion] This study provides support for optimization and prediction of low-load operation in biomass

收 稿 日 期：2025-09-19　修 回 日 期：2025-11-04　接 受 日 期：2025-11-18
基 金 项 目：中国华电发电有限公司科技项目（CHDKJ23-02-79）
Supported by: Science and Technology Project of China Huadian Power Generation Co., Ltd. (CHDKJ23-02-79)
第一作者简介：王志浩（1976），男，硕士，正高级工程师，主要研究方向为能源低碳利用，121739275@qq.com。
通信作者简介：龚勋（1982），男，博士，教授，主要研究方向为可再生能源耦合燃煤发电技术，gx@hust.edu.cn。

gasification co-firing boilers.
Key words: low-load combustion stability; biomass gas; co-firing; artificial neural network

生物质气化耦合燃煤发电技术因可再生性与协同降碳潜力，被认为是煤电低碳化与增强调峰能力的重要路径[1-2]。相较于直接耦合，间接耦合将还原性生物质气体喷入炉膛进行燃烧，避免了直接耦合引起的炉膛壁面腐蚀问题，也解决了并联耦合发电投资成本高的问题，因而受到广泛关注。

在新能源高比例并网背景下，火电低负荷、变负荷运行成为常态。针对变负荷条件下燃煤锅炉的运行特性，已有相关研究。Chang 等人[3]研究了切向燃烧煤粉锅炉在不同负荷下的温度场和污染物排放，分析了燃烧器倾角对炉内燃烧和 NO_x 排放的影响。Ma 等人[4]引入了燃烧稳定指数，衡量不同负荷下氧量对主燃区温度与稳定性的影响。在气态燃料掺烧稳燃方面，Han 等人[5]对 2 MW 中式重油炉合成气的 NO_x 还原特性进行了模拟研究，证明 3%、7%碳氢化合物对 NO_x 有显著还原效果。然而，低负荷运行数据较少，数据驱动方法逐渐成为重要补充。针对数据单一而导致训练模型预测不够全面和准确的问题，Shi 等人[6]提出利用计算流体动力学（CFD）模拟更大变量范围的样本工况，与 DCS 数据共建训练集。彭潮等[7]基于煤粉组分对着火温度的复杂影响，通过随机森林模型建立了以着火温度为目标输出的预测模型。由于锅炉燃烧机理建模复杂，机器学习建立的映射模型受到广泛关注[8]。

基于此，本文提出一种低负荷稳燃衡量指标，并对低负荷纯煤以及生物质气耦合燃煤工况运行特性进行分析，将数值模拟数据作为数据集，通过人工神经网络建立对应的预测模型，实现低负荷场景下 CFD 与 ANN 的耦合优化预测。

1 低负荷稳燃指标

1.1 模型

研究对象为某电厂 660 MW 四角切圆锅炉，主燃烧区由 6 组燃烧器（A—F）及 7 组二次风燃烧器组成，OFA 系统由 3 组 SOFA 喷嘴组成，在还原区引入一组再燃风喷嘴以及生物质气喷嘴。计算域从冷灰斗到水平烟道口，并基于 Gambit 划分结构化与非结构化混合网格，具体如图 1 所示。

锅炉燃用煤种为神府东胜煤，煤质分析如表 1 所示，低位热值为 20 520 kJ/kg，生物质燃气成分见表 2。本文基于 Fluent 进行数值模拟，锅炉内复杂的燃烧及流动过程通过湍流燃烧模型（realizable k-ε）、气相反应模型（non-premixed）、颗粒运动模型（DPM）、挥发分及焦炭燃烧模型（two-competing-rates 和 diffusion/kinetic）、辐射模型（P-1）进行描述，NO_x 的生成量采用后处理方式计算，主要考虑燃料型 NO_x 与热力型 NO_x，对于 NO_x 后处理计算过程使用再燃模型。

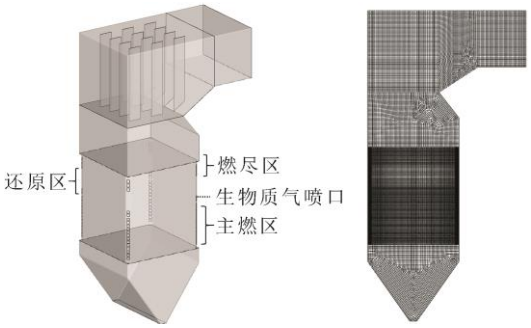


图 1 锅炉几何模型及网格
Fig.1 Geometric model of the boiler and mesh generation

表 1 煤质分析　　单位：w/%
Tab.1 Coal quality analysis

工业分析				元素分析				
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C	H	O	N	S
4.92	32.58	35.26	27.24	52.41	3.43	5.29	0.73	0.64

表 2 生物质燃气组成
Tab.2 Composition of the biomass gas

组成成分	数值
N_2 体积分数/%	40.31
CO 体积分数/%	25.48
CO_2 体积分数/%	7.99
H_2 体积分数/%	21.51
CH_4 体积分数/%	0.45
H_2O 体积分数/%	4.26
LHV（标况）/(MJ m^{-3})	5.70

为确保模型准确性，基于锅炉实际运行数据进行模型验证，结果见表 3。验证结果误差属于控制范围之内，证明模型选择具备可行性。网格无关性验证见图 2，后续研究采用 260 万网格数。

表 3 模型验证
Tab.3 Model validation

	实际值	模拟值	相对误差
炉膛出口温度/K	1 314	1 271	3.38%
炉膛出口 CO_2 体积分数/%	14.6	14.95	2.34%

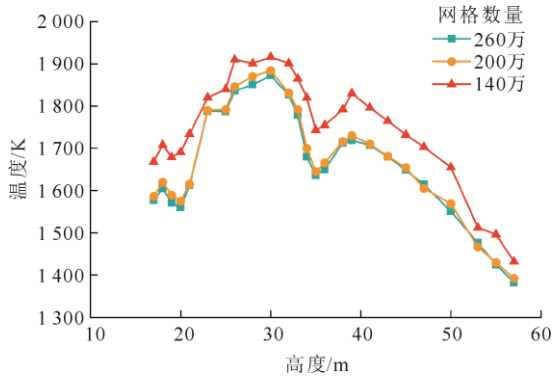


图 2 网格无关性验证
Fig.2 Mesh independence verification

1.2 运行工况

本研究中，同负荷工况依据总热量不变计算，即掺烧比定义为热量比[9]。工况包括纯煤工况（pure coal，PC）和生物质气掺烧工况（biomass co-firing，CO），生物质掺烧工况的热量掺烧比例为 5%，其他参数见表 4。

1.3 低负荷稳燃指标 1 分析

四角切圆锅炉稳定燃烧的理论流动特征表现为螺旋上升气流，其温度场与速度场在炉膛横截面上呈绝对均匀对称分布[10-12]，因此锅炉横截面上距离四边相同距离 L 处的 4 个点的参数值理论上一致。本文选择 7 个喷口截面，每个截面取不同距离 L（6 个）对应的 4 个点的参数 A 的最大值 A_{max} 与最小值 A_{min} 之比为 M_i，并取均值 M 作为衡量锅炉内部稳定性的评价指标。理论上 M=1，M 越接近 1 说明炉内流动及燃烧越趋于稳定。

工况 1 与实际吻合良好，则认为工况 1 处于稳定状态，因此将其作为基准，通过比较其他工况与工况 1 的 M 值偏离程度来判断其是否稳定。每个工况基于速度 V 与温度 T 作为参数 A 计算 M 值，即速度稳定系数 M_V 与温度稳定系数 M_T，具体如图 3 所示。

表 4 纯煤/生物质气掺烧工况运行参数
Tab.4 Operating parameters for pure coal and biomass gas co-firing conditions

项目	工况 1/工况 1a	工况 2/工况 2a	工况 3/工况 3a	工况 4/工况 4a
负荷/%	100	70	50	30
单燃烧器煤耗/(kg s^{-1})	3.087/2.929	2.220/2.109	1.604/1.523	0.980/0.937
过量空气系数	1.200/1.190	1.300/1.263	1.340/1.320	1.420/1.398
一次风风速/(m s^{-1})	27.400/26.040	19.740/18.780	13.340/12.670	13.340/12.670
二次风风速/(m s^{-1})	55.600/53.120	40.260/38.620	27.120/25.760	15.500/14.720
燃尽风风速/(m s^{-1})	58.100/55.090	53.380/80.710	38.950/37.000	16.020/15.220
总风量/(m^3 s^{-1})	501.60/487.55	390.86/379.68	290.95/282.71	189.74/184.17

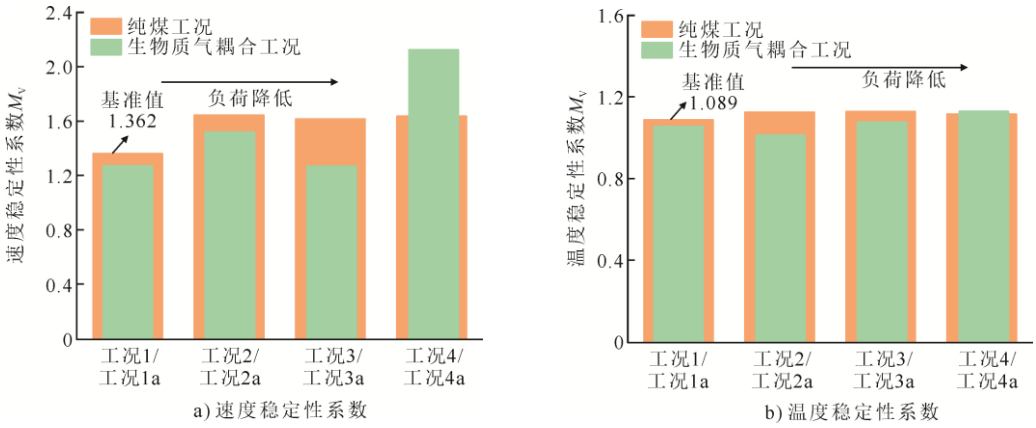


图 3 低负荷炉内稳定性衡量参数 M
Fig.3 Stability index M for low-load combustion conditions

基于速度场分析，M_{V1}—M_{V4} 分别为各纯煤工况下的速度稳定系数，其中 M_{V1} 为 1.362，M_{V2}—M_{V4} 均大于 M_{V1}，M_{V2} 最大，为 1.645；M_{V1a}—M_{V4a} 分别为生物质气掺烧各工况下的速度稳定系数，M_{V1a} 与 M_{V3a} 小于 M_{V1}，M_{V2a} 与 M_{V4a} 则大于 M_{V1}，其中 M_{V4a} 与 M_{V1} 的偏差达到了 56.6%。基于温度场分析，M_{T1}—M_{T4} 分别为各纯煤工况下的温度稳定系数，其中 M_{T1} 为 1.089，而 M_{T4a} 达到最大值

1.131，所有 M_T 与 M_{T1} 偏差在 3.9%以内。为了进一步确定炉内流动及燃烧稳定性，将所有工况速度云图与温度云图进行可视化对比分析，具体如图 4 和图 5 所示。

从速度云图可知工况 1 时炉内流动四角切圆明显且充满度和均匀性高，说明其流动稳定，也证明了将 M_{V1} 作为基准值的合理性[13]。对于工况 4 与工况 4a，炉内流动强度大幅度降低，连续性较差且出现速度断层现象，但整体来看依旧能保持微弱的螺旋上升及四角切圆的流动趋势。各工况的流动分布并未出现严重的失稳现象，因此可以认为全部工况流动状态趋于稳定。但是工况 4a 的 M_{V4a} 值偏差达到了 56.6%，说明其流动虽然稳定，但已接近失稳临界状态。

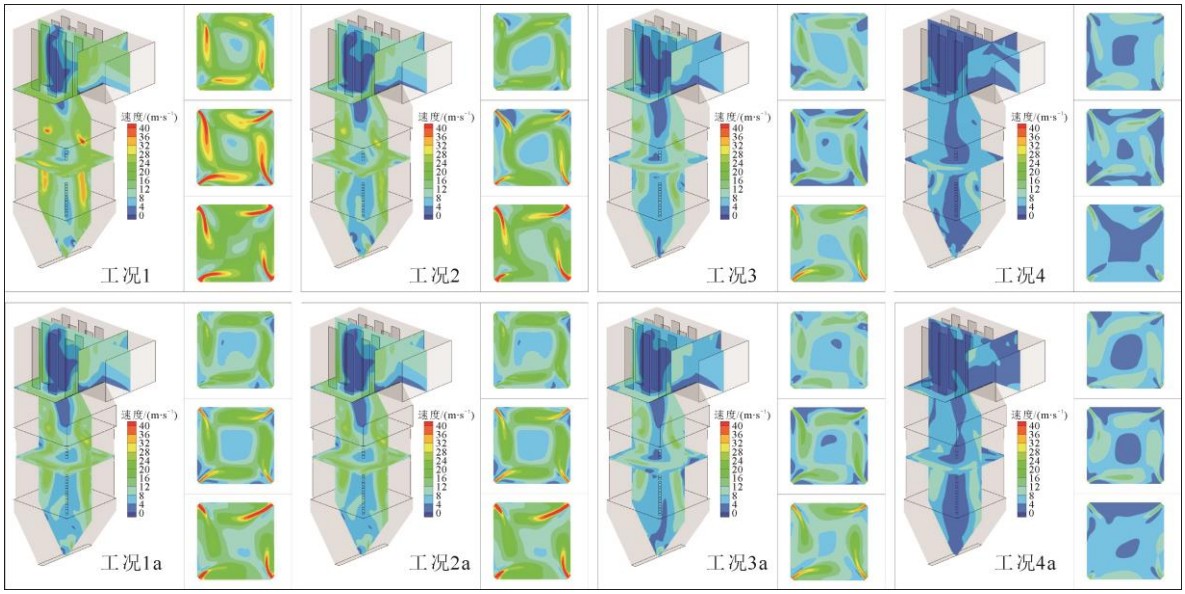


图 4 速度云图

Fig.4 Velocity contours

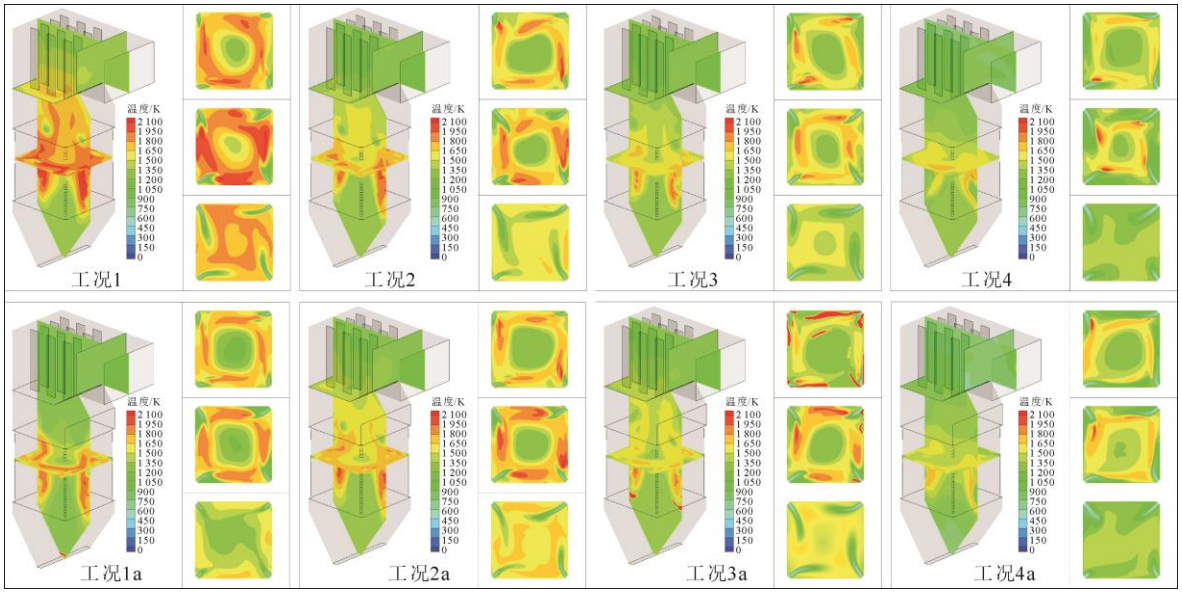


图 5 温度云图

Fig.5 Temperature contours

从温度云图可知，各工况燃烧横截面均呈现明显的四角切圆，结合各工况的 M_T 值均与工况 1 相差不大，因此可说明各工况燃烧情况是稳定的。

1.4 低负荷稳燃指标 2 分析

煤粉着火温度以及着火距离可以反映炉内局部燃烧的稳定性，着火温度定义为最大颗粒温度梯

度（dT/dx）的第 1 个点[14]，燃烧器喷口距离该点的距离即为着火距离[15]。除了温度值外，还记录了沿燃烧器喷口方向的 CO 体积分数，并基于 CO 体积分数峰值与着火点之间的距离 L 来衡量煤粉燃烧速率，L 越小说明燃烧速率越快[16]。此外，基于国内学者对煤粉着火的实验研究[17-18]，着火温度范围几乎都为 800~1 500 K。本文所有工况距离燃烧器喷口不同位置温度分布都基于第 1 层燃烧器组计算，结果见表 5。由表 5 可知，整体上纯煤和生物质气掺烧工况均随着负荷降低，炉内着火距离增加。这是由于低负荷下煤粉吸收的对流热和辐射热减少，延缓着火时间从而导致着火距离增加，局部稳定性下降[19]。此外，所有工况对应着火温度也均在 800~1 500 K。

表 5 燃烧器燃烧情况
Tab.5 Burner combustion characteristics

工况	着火温度/K	着火距离/m	L/m
工况 1	1 020	1.88	1.370
工况 2	1 340	2.00	0.925
工况 3	1 500	2.30	1.198
工况 4	1 290	3.25	0.888
工况 1a	1 100	1.91	1.440
工况 2a	1 360	2.66	1.130
工况 3a	1 400	1.90	0.780
工况 4a	1 125	2.80	1.220

分析 CO 体积分数峰值与着火点之间的距离 L，除了工况 1a 略大于工况 1 以外，其余 L 值均小于工况 1，说明燃烧器喷口附近煤粉燃烧反应速率都在稳定燃烧范围内。因此，本文所有工况的流动以及燃烧都具备稳定性。

2 低负荷运行特性分析

2.1 温度场分析

纯煤/生物质气掺烧工况沿炉膛高度温度分布如图 6 所示。由图 6 可知，当负荷从 100%降至 70%时，纯煤工况主燃区沿高度的平均温度变化为 147.87 K，而生物质气工况主燃区平均温度变化为 69.37 K，比纯煤工况下降 53.09%。

通过对比同负荷下纯煤与生物质气工况炉内温度分布可知，各负荷下纯煤工况主燃区平均温度均大于同负荷生物质气工况，除了工况 1 和工况 1a 之间相差 86.75 K，其余工况差异均在 10 K 以内。

尽管低负荷下燃烧稳定性差，但工况 4 与工况 4a 单位高度温升为 34.88 K/m、35.25 K/m，大于其他工况。这是因为主燃区工况 4 与工况 4a 风煤比大于其他工况，增加风煤比使得单位质量煤粉燃烧更加充分，但受限于低负荷煤粉总量少，因此工况 4 与工况 4a 温度绝对值反而最小。

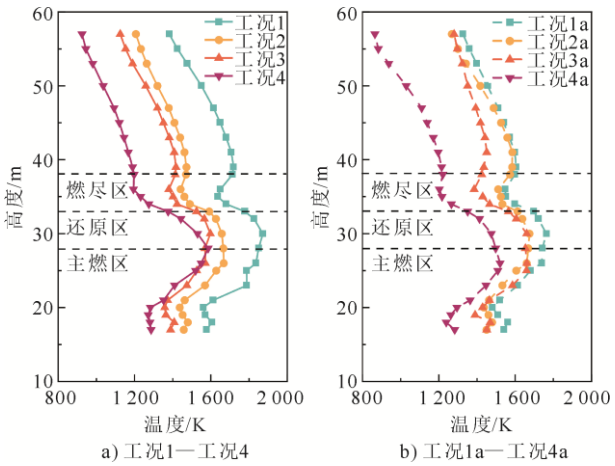


图 6 纯煤/生物质气掺烧工况沿炉膛高度温度分布
Fig.6 Temperature distributions along the furnace height direction under pure coal/biomass gas co-firing conditions

2.2 烟气组分分析

2.2.1 O_2 分布分析

炉内 O_2 的分布可以反映其燃烧情况，低负荷纯煤/生物质气掺烧工况沿炉膛高度 O_2 分布如图 7 所示。对比图 5 与图 7 可知，主燃区以及燃尽区 O_2 体积分数降低的位置与温度升高的位置一致。工况 4 与工况 4a 主燃区单位高度 O_2 体积分数消耗速率为 0.744%/m、0.567%/m，远大于其他工况（0.154%/m~0.262%/m）。由温度场分析可知，这是因为低负荷炉内风煤比增加促进煤粉燃烧。

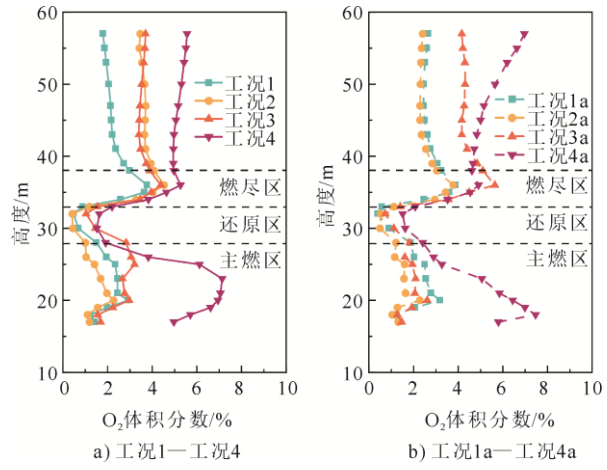


图 7 低负荷纯煤/生物质气掺烧工况沿炉膛高度 O_2 分布
Fig.7 Distributions of O_2 volume fraction along the furnace height direction under low-load pure coal/biomass gas co-firing conditions

对比同负荷生物质气掺烧工况与纯煤工况炉内 O_2 分布可知，除了工况 4 和工况 4a，主燃区 O_2 平均体积分数以及变化趋势差异不大，而工况 4 与工况 4a 主燃区 O_2 平均体积分数大于其他工况，说明同负荷下生物质气掺烧各工况燃尽区 O_2 平均体积分数均小于纯煤工况，低负荷尤为明显。

2.2.2 CO 及 CO_2 分布分析

低负荷纯煤/生物质气掺烧工况沿炉膛高度 CO 与 CO_2 分布如图 8 所示。由图 8 可知，工况 4 与工况 4a 整体的 CO 含量与主燃区底部的 CO_2 含量远低于其他工况。基于上述对燃烧器着火距离的分析可知，低负荷（30%额定负荷）时煤粉着火距离增加导致燃烧推迟，使得主燃区底部 CO、CO_2 含量低，又因工况 4 与工况 4a 单位高度温升大以及 L 小，局部燃烧效率高，结合低负荷煤粉量少，所以导致工况 4 与工况 4a 整体 CO 含量最少。

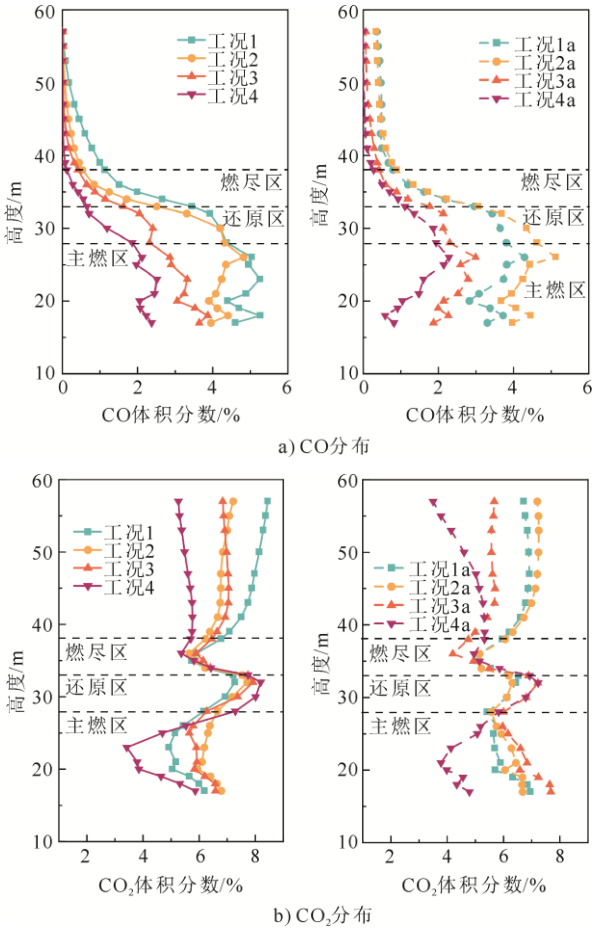


图 8 低负荷纯煤/生物质气掺烧工况沿炉膛高度 CO 与 CO_2 分布

Fig.8 Distributions of CO and CO_2 volume fractions along the furnace height direction under low-load pure coal/biomass gas co-firing conditions

从图 8 可知工况 4 与工况 4a 在主燃区中上部 CO_2 增加量（0.047 0%、0.058 9%）远大于其他工况（0.007 4%~0.017 7%），这是因为主燃区中上部风煤比更大且 O_2 含量更多，促进 CO 与 O_2 反应生成 CO_2。

通过对比相同负荷变化范围内的纯煤工况与生物质气工况可知，随着负荷降低，生物质气工况炉内整体 CO 和 CO_2 含量变化幅度要更小。

2.2.3 NO_x 分布分析

相关研究表明，生物质气掺烧可以降低 NO_x 排放[20-21]。低负荷纯煤/生物质气掺烧工况沿炉膛高度 NO_x 分布如图 9 所示。由图 9 可知，煤粉在主燃区上部（26~30 m）充分燃烧产生了大量燃料型 NO_x 和热力型 NO_x，NO_x 体积分数达到最大。而工况 3a 和工况 4a 的炉内 NO_x 体积分数整体并无起伏，呈现逐渐降低的趋势。结合图 5 可知工况 3a 和工况 4a 在主燃区下部（17 m）因煤粉颗粒聚集产生了 2 000 K 左右的局部高温区，热力型 NO_x 显著增长，工况 3a 尤为明显，因此工况 3a 和工况 4a 在主燃区下部 NO_x 体积分数达到最大值。

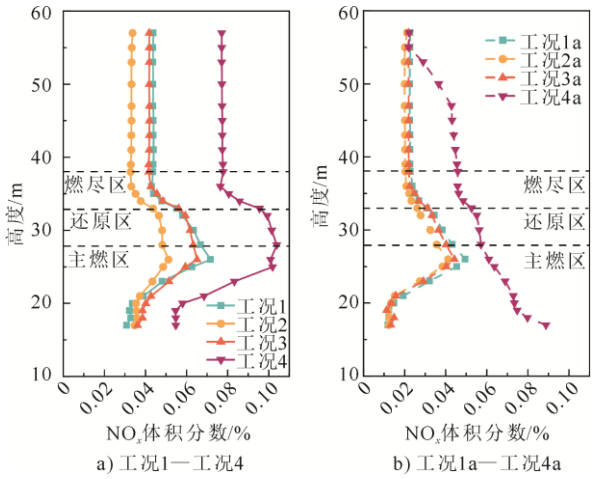


图 9 低负荷纯煤/生物质气掺烧工况沿炉膛高度 NO_x 分布

Fig.9 Distributions of NO_x volume fraction along the furnace height direction under low-load pure coal/biomass gas co-firing conditions

工况 4a 还原区以及燃尽区平均 NO_x 体积分数分别为 0.051 2%、0.044 4%，而工况 4 还原区以及燃尽区平均 NO_x 体积分数分别为 0.093 3%、0.078 6%，说明低负荷生物质气掺烧可降低 NO_x 的生成。

3 人工神经网络模型

基于深度调峰过程中各参数多变性引起的燃烧失稳现象，人工智能技术为锅炉参数预测与燃烧工况优化提供了解决方案。人工神经网络（artificial

neural network）能够无需描述数学关系式的学习输入与输出之间的映射关系，当有足够多的神经元时理论上可以拟合任意函数[22-23]。由于锅炉燃烧过程中包含多参数的复杂非线性关系，传统数值方法难以实现高精度实时预测，因此本研究基于 PyTorch 构建人工神经网络锅炉燃烧预测模型。

3.1 低负荷纯煤锅炉预测模型

本文采用 4 层人工神经网络模型，其中数据预处理及划分、超参数调优如表 6 所示[24-25]。低负荷纯煤锅炉模型输入特征分别为负荷、一次风风速、二次风风速、燃尽风风速、过量空气系数、一次风温、二次风温、燃尽风温、炉膛高度、主燃区风煤比、燃尽区风煤比共 11 个，输出特征分别为温度 T、O_2 体积分数、CO 体积分数、CO_2 体积分数、NO_x 体积分数共 5 个。引入炉膛高度作为输入特征一方面是为了实现任意截面平均温度等参数预测，另一方面是为了扩大数据集提高模型预测精度[26]。

表 6 低负荷纯煤锅炉人工神经网络模型
Tab.6 The ANN model for low-load pure coal boiler

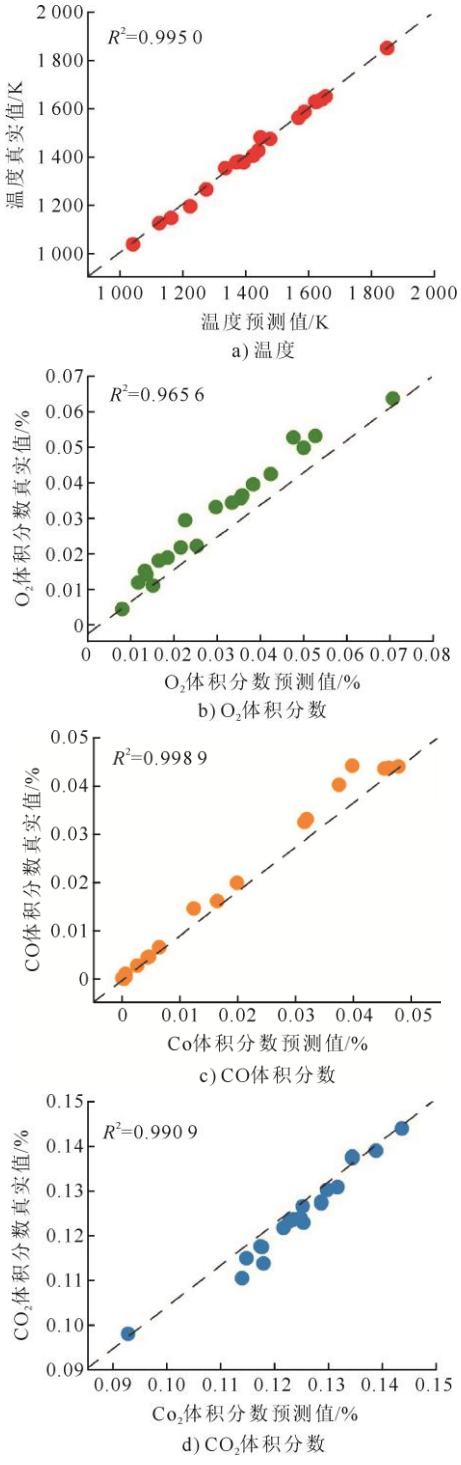
类型	函数	数值
归一化方法	StandardScaler	训练集：测试集=7:3
激活函数	logsigmoid、logsigmoid	
隐藏层层数		2
隐藏层神经元数		第一层：32，第二层：47
优化器及参数	RMSprop（lr，alpha）	Lr=0.000 9，alpha=0.99
损失函数	MSELoss	
迭代次数		6 000

低负荷纯煤锅炉模型测试集预测如图 10 所示。由图 10 可知，除了 O_2 体积分数预测结果的回归系数 R^2 为 0.965 6，其余输出特征预测结果的回归系数 R^2 均大于 0.99。测试集样本并不包含于模型所学习的样本中，说明该人工神经网络模型具备良好泛化性能。

由图 7、图 8 及分析可知，随着炉膛高度变化，炉内 O_2 体积分数和 CO 体积分数变化剧烈，其中 CO 体积分数差异可达 10^3 数量级，这可能是导致 O_2 体积分数预测回归系数偏小的原因，但 CO 体积分数预测回归系数却高达 0.998 9，证实模型的良好泛化性能。

3.2 低负荷生物质气耦合燃煤锅炉预测模型

低负荷生物质气耦合燃煤锅炉人工神经网络同样采用 4 层神经网络，并结合超参数优化方法，构建了具有良好性能的预测模型，其最终模型参数见表 7。针对掺烧模型，对 logsigmoid、hardsigmoid、ReLU、Leaky ReLU、GeLU、tanh、CeLU 等激活函数开展了系统对比。结果表明 hardsigmoid 在 3 项输出（温度 T、CO_2 体积分数、NO_x 体积分数）上取得最优 R^2（0.957、0.954、0.971），综合表现最优，故确定为最终激活函数。数据集由 2 部分构成：CFD 数值模拟 25 个工况×25 个炉膛高度，共 625 组样本；电厂 DCS 运行数据 480 组。整体采用 7:3 的分层留出法划分训练/测试集。



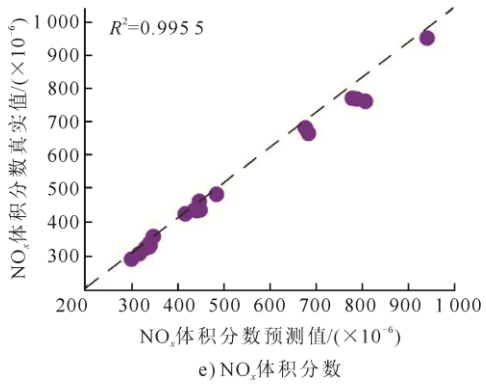


图 10 低负荷纯煤工况人工神经网络模型预测结果
Fig.10 Prediction results of the ANN model for low-load pure coal working conditions

表 7 低负荷生物质气耦合燃煤锅炉人工神经网络模型
Tab.7 The ANN model for the low-load biomass gas co-firing boiler

项目	内容	
隐藏层层数	3 层	
隐藏层神经元数	450，450，350	
激活函数	hardsigmoid	
优化器及参数	RMSprop	学习率：0.001；alpha=0.9
Epoch	1 500	
Batch-size	10	
数据归一化方法	StandardScaler	

相较于纯煤燃烧工况，该模型在输入特征上新增了再燃风风速、生物质气速度与再燃风温 3 个变量，输出特征保持一致，均为 5 个。由于本文不同负荷下生物质气掺烧工况掺烧比一致，故不考虑掺烧比的影响。

低负荷生物质气耦合燃煤锅炉人工神经网络模型如下：温度 T 预测结果回归系数 R^2 为 0.963，其他参数预测结果回归系数 R^2 均大于 0.96，NO_x 体积分数预测结果回归系数 R^2 达到 0.975，该模型同样具备良好泛化性能。模型部分预测数据如表 8 所示。相对于纯煤模型，生物质气掺烧燃煤模型精度略低。

表 8 部分模型预测参数
Tab.8 Prediction parameters of some models

输出特征	T	CO_2 体积分数	NO_x 体积分数
回归系数 R^2	0.963	0.962	0.975
均方根误差 δ_{RMSE}	29.170	0.280	27.510
平均相对误差 δ_{MRE}	1.450	1.850	4.750

由上述分析可知，随着负荷降低，生物质气掺烧工况整体上各参数变化情况小于纯煤工况，这导致生物质气掺烧工况数据集样本凸包较小，因此生物质气耦合燃煤锅炉模型学习样本涉及的范围较小，最终可能导致其预测精度略低于纯煤模型。

为进一步分析低负荷生物质气耦合燃煤锅炉预测模型在空间分布上的预测精度，图 11 展示了部分预测参数（温度、CO_2 体积分数与 NO_x 体积分数）随炉膛高度变化的真实值与预测值对比情况。从图 11 中可以看出，温度 T 与 CO_2 体积分数的预测结果与实测值高度重合，拟合效果良好。虽然 NO_x 体积分数在炉膛下部区域存在一定离散性，但整体预测值与实测值的重合度依然较高，其相关系数高，说明模型能够较为准确地捕捉其在空间分布上的变化趋势，表现出良好的预测能力。

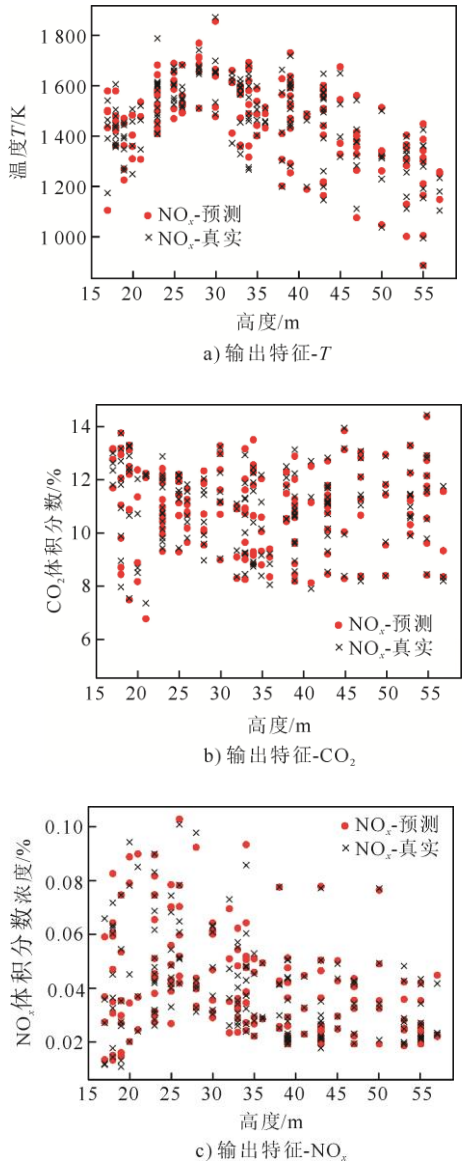


图 11 部分预测值与真实值对比
Fig.11 Comparison between some predicted values and real values

4 结 论

1）本研究提出了低负荷稳燃指标 M，通过速度稳定系数 M_V 与温度稳定系数 M_T 来衡量燃烧稳定性。结果表明，不同工况下的 M_V 值和 M_T 值相对稳定。在低负荷掺烧工况中，M_{V4a} 偏差达到 56.6%，接近失稳临界；而温度稳定系数 M_T 值变化较小，表明各工况在低负荷下具备较好的燃烧稳定性。

2）各工况炉内不同高度温度值、O_2 体积分数等参数分布情况复杂。低负荷下生物质气掺烧有助于炉内燃烧，并降低 NO_x 生成，掺烧工况还原区和燃尽区 NO_x 体积分数分别为 0.051 2%和 0.044 4%，低于纯煤工况。而对于相同负荷变化的幅度，生物质气掺烧工况的参数波动比纯煤工况小。

3）基于数值模拟计算数据构建低负荷下纯煤工况以及生物质气掺烧工况人工神经网络模型。模型结果表明，纯煤工况模型的 R^2 值大于 0.99，掺烧工况模型在 T、CO_2 体积分数、NO_x 体积分数的预测中均表现优异，R^2 值分别为 0.963、0.962、0.975，误差较小，说明低负荷纯煤工况以及生物质气掺烧工况模型均具备良好泛化性能。

4）面向工程应用方面，在保持机组现有 O_2 约束与安全边界的前提下，低负荷（30%~50%额定负荷）工况下，建议风煤比较纯煤工况提高约 5%~10%，并优先通过二次风/燃尽风分配实现；70%额定负荷及以上工况可与纯煤工况大体一致。一次风不宜过度提高，以避免着火距离增加与局部失稳。

[参 考 文 献]

[1] 周义, 张守玉, 郎森, 等. 煤粉炉掺烧生物质发电技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(6): 26-34.
ZHOU Yi, ZHANG Shouyu, LANG Sen, et al. Research progress of biomass blending technology in pulverized coal furnace for power generation[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(6): 26-34.

[2] 苏鑫, 刘静, 陈冠益, 等. 煤耦合生物质气化发电技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(6): 2261-2278.
SU Xin, LIU Jing, CHEN Guanyi, et al. Progress in coal-coupled biomass gasification technology for power generation[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(6): 2261-2278.

[3] CHANG J, ZHOU Z J, MA X R, et al. Computational investigation of hydrodynamics, coal combustion and NO_x emissions in a tangentially fired pulverized coal boiler at various loads[J]. Particuology, 2022, 65: 105-116.

[4] MA D F, ZHANG S Y, HE X, et al. Combustion stability and NO_x emission characteristics of three combustion modes of pulverized coal boilers under low or ultra-low loads[J]. Applied Energy, 2024, 353: 121998.

[5] HAN S H, CHANG D, YANG W. Numerical study on the reburning characteristics of biomass syngas in a 2 MW pilot scale heavy oil furnace[J]. Fuel, 2016, 181: 277-285.

[6] SHI Y, ZHONG W Q, CHEN X, et al. Combustion optimization of ultra supercritical boiler based on artificial intelligence[J]. Energy, 2019, 170: 804-817.

[7] 彭潮, 兰彦冰, 邹春, 等. 煤粉富氧燃烧着火温度预测的优化随机森林(GA-RF)模型[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 71-76.
PENG Chao, LAN Yanbing, ZOU Chun, et al. Prediction of ignition temperature of pulverized coal under oxy-fuel combustion condition based on optimized random forest (GA-RF) model[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 71-76.

[8] 曹歌瀚, 黄亚继, 徐文韬, 等. 基于机器学习的燃煤锅炉分工况建模与燃烧优化[J]. 锅炉技术, 2023, 54(5): 41-47.
CAO Gehan, HUANG Yaji, XU Wentao, et al. Modeling and online combustion optimization of coal-fired boiler under different working conditions based on machine learning[J]. Boiler Technology, 2023, 54(5): 41-47.

[9] CHEN X, ZHANG C X, CHEN X L, et al. Performance analysis of a novel biomass gasification system coupled to a coal-fired power plant based on heat and water recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 299: 117822.

[10] 段佛元. 660 MW 煤粉炉气体再燃特性及 NO_x 排放研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020: 1.
DUAN Foyuan. Study on characteristics and NO_x emission of gas reburning in a 660 MW coal-fired boiler[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020: 1.

[11] 张卫东. 600 MW 燃煤锅炉生物质气再燃污染物排放研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021: 1.
ZHANG Weidong. Research on pollutant emissions of biomass gas reburning in a 600 MW coal-fired boiler[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021: 1.

[12] 张程俞. 660 MW 燃煤锅炉再燃特性分析及污染物排放[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022: 1.
ZHANG Chengyu. Analysis of re-burning characteristics and pollutant emission in a 660 MW coal-fired boiler[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022: 1.

[13] 王小涛. 300 MW 燃煤锅炉掺烧生物质气的数值模拟及优化分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 1.
WANG Xiaotao. Numerical simulation and optimization analysis of biomass gas mixed burning in a 300 MW coal-fired boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 1.

[14] RIAZA J , KHATAMI R , LEVENDIS Y A, et al. Single particle ignition and combustion of anthracite, semi-anthracite and bituminous coals in air and simulated oxy-fuel conditions[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(4): 1096-1108.

[15] 聂欣, 吕明, 周志军, 等. 煤粉气流在高温空气中着火距离的数值试验研究[J]. 热力发电, 2010, 39(3): 13-18.
NIE Xin, LÜ Ming, ZHOU Zhijun, et al. Test study on ignition distance of pulverized coal flow in the high-temperature air[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(3): 13-18.

[16] 马达夫, 刘平元, 张守玉, 等. 超低负荷下运行氧量对切圆锅炉燃烧稳定性和 NO_x 排放特性的影响[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 174-184.
MA Dafu, LIU Pingyuan, ZHANG Shouyu, et al. Effect of boiler operation oxygen on combustion stability and

NO_x emission characteristics of a tangentially fired boiler under ultra-low load[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 174-184.

[17] 刘国伟, 董芃, 别如山. 煤粉高温富氧无油点火实验和数值模拟研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(11): 833-840.
LIU Guowei, DONG Peng, BIE Rushan. Experimental study and numerical simulation on high-temperature oxygen-enriched oil-free pulverized coal ignition[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(11): 833-840.

[18] ZENG Z K, ZHANG T Y, ZHENG S K, et al. Ignition and combustion characteristics of coal particles under high-temperature and low-oxygen environments mimicking MILD oxy-coal combustion conditions[J]. Fuel, 2019, 253: 1104-1113.

[19] FANG Q Y, MUSA A A B, WEI Y, et al. Numerical simulation of multifuel combustion in a 200 MW tangentially fired utility boiler[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(1): 313-323.

[20] 钟布依, 严祯荣, 朱水兴, 等. 生物质气耦合燃气加热炉的 NO_x 和 CO_2 生成协同规律研究[J]. 动力工程学报, 2025, 45(5): 747-754.
ZHONG Buyi, YAN Zhenrong, ZHU Shuixing, et al. Study on synergistic generation law of NO_x and CO_2 in biomass gas-coupled gas heating furnace[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(5): 747-754.

[21] 任德军, 陈刚, 张寅, 等. 1 000 MW 超超临界双切圆混煤燃烧锅炉还原性气氛数值模拟[J]. 动力工程学报, 2023, 43(1): 14-23.
REN Dejun, CHEN Gang, ZHANG Yin, et al. Numerical simulation on reducing atmosphere for a 1 000 MW ultra-supercritical double tangential circular mixed coal combustion boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(1): 14-23.

[22] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. Communications of the ACM, 2012, 60(6): 84-90.

[23] 姚金坤, 姚博. 基于人工神经网络的锅炉燃烧智能化系统[J]. 热能动力工程, 2020, 35(3): 249-255.
YAO Jinkun, YAO Bo. Intelligent boiler combustion system based on artificial neural network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 249-255.

[24] WEI H, LUO K, XING J K, et al. Predicting co-pyrolysis of coal and biomass using machine learning approaches[J]. Fuel, 2022, 310: 122248.

[25] WEI H, XING J K, LUO K, et al. Predicting tobacco pyrolysis based on chemical constituents and heating conditions using machine learning approaches[J]. Fuel, 2023, 335: 126895.

[26] YUVAL J, O'GORMAN P A. Stable machine-learning parameterization of subgrid processes for climate modeling at a range of resolutions[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3295.

（责任编辑　邓玲惠）