DOI: 10.19666/j.rlfd.202602042

660 MW 燃煤锅炉掺烧甲醇的模拟研究

韩宇斌，刘海玉，牛俊天，闫永宏，金 燕
（太原理工大学电气与动力工程学院，山西 太原 030024）

［摘 要］【目的】为实现大型燃煤电站锅炉低碳清洁燃烧，本文以甲醇作为替代燃料，对某 660 MW 超临界四角切圆燃煤机组锅炉开展甲醇掺烧数值模拟研究。【方法】论文探究了甲醇掺烧比例（0~30%）及喷入位置对炉内燃烧特性、烟气组分分布、污染物排放特性的影响规律。【结果】受甲醇高汽化潜热及燃烧产物中水蒸气增加烟气比热容的影响，炉膛温度随掺烧比例的增加而降低，30%掺烧比下温度下降 96 K，煤粉着火延迟，燃烧不充分，燃尽率下降，甲醇的无氮特性及对热力型 NO 的抑制作用使 NO 排放显著减少，甲醇燃烧会生成少量非常规污染物甲醛（CH_2O）；随甲醇喷入位置的上移，甲醇与氧气充分接触，燃烧更完全，燃烧中心集中于主燃区，主燃区温度上升约 81 K，燃尽风区域的温度下降约 70 K，同时主燃区上部的强还原区导致 NO 和 CH_2O 出口浓度显著降低。【结论】综合考虑燃烧和排放特性，15%为甲醇最佳掺烧比例，此时燃尽率为 97.51%，NO 出口质量浓度由 270.6 mg/m^3（标准工况下，下同）降至 216.5 mg/m^3（减排 20%），CH_2O 峰值质量浓度为 1.34 mg/m^3，出口质量浓度为 1.95×10^{-4} mg/m^3；在上层喷油口处喷入甲醇最佳，此时燃尽率为 97.52%，NO 出口质量浓度为 199.96 mg/m^3，CH_2O 峰值质量浓度为 2.13 mg/m^3，出口质量浓度为 1.2×10^{-4} mg/m^3。

［关 键 词］煤粉锅炉；甲醇；掺烧比例；喷入位置；数值模拟

［引用本文格式］韩宇斌，刘海玉，牛俊天，等. 660 MW 燃煤锅炉掺烧甲醇的模拟研究[J]. 热力发电，2026, 55(10): 152.
Han Y B, Liu H Y, Niu J T, et al. Simulation study on co-firing methanol in a 660 MW coal-fired boiler[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(10): 152.

Simulation study on co-firing methanol in a 660 MW coal-fired boiler

Han Yubin, Liu Haiyu, Niu Juntian, Yan Yonghong, Jin Yan
(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: [Objective] To achieve low-carbon and clean combustion in large-scale coal-fired power plant boilers, this paper takes methanol as an alternative fuel and conducts numerical simulation on methanol co-firing in a 660 MW supercritical tangentially-fired coal-fired boiler. [Methods] A comprehensive numerical simulation method was adopted to systematically investigate the influence of different methanol blending ratios and injection positions on the combustion and emission performance of the boiler. Specifically, the methanol blending ratio was set in the range of 0~30% (with 0 as the pure coal combustion reference group), and multiple typical injection positions (lower layer, middle layer, upper layer) were selected along the height of the furnace to simulate the co-combustion process. The simulation focused on analyzing the changes of in-furnace combustion characteristics (including furnace temperature distribution and burnout rate), flue gas component distribution (including the content of H_2O, CO and CO_2), and pollutant emission characteristics (including NO and CH_2O). [Results] The overall furnace temperature decreases with the increase of the co-firing ratio due to the combined effects of the high latent heat of vaporization of methanol and the increased specific heat capacity of the flue gas caused by water vapor in the combustion products. Specifically, the temperature drops by 96 K at a 30% co-firing ratio, resulting in delayed ignition of

收 稿 日 期：2026-02-26 修 回 日 期：2026-05-18 接 受 日 期：2026-05-18
基 金 项 目：山西省基础研究计划（202303021212056）；中国工程院院地合作项目（2021SX5）
Supported by: Fundamental Research Program of Shanxi Province (202303021212056); Academia-Local Cooperation Project of Chinese Academy of Engineering (2021SX5)
第一作者简介：韩宇斌（2001），男，硕士研究生，主要研究方向为煤的高效清洁利用，2496620499@qq.com。
通信作者简介：刘海玉（1981），男，教授，主要研究方向为煤的高效燃烧与污染防治、固体废物处理及资源化利用，liuhaiyu@tyut.edu.cn。

pulverized coal, insufficient combustion, and a decrease in burnout rate. NO emissions are significantly reduced owing to the nitrogen-free nature of methanol and its inhibitory effect on thermal NO. Methanol combustion produces a small amount of formaldehyde (CH_2O), an unconventional pollutant. As the methanol injection position moves upward, methanol comes into full contact with oxygen, leading to more complete combustion, and the combustion center is concentrated in the main combustion zone. The temperature in the primary combustion zone rises by approximately 81 K, while the temperature in the overfire air zone decreases by about 70 K. Concurrently, the strong reducing zone in the upper part of the main combustion zone leads to a significant decrease in the outlet mass concentrations of NO and CH_2O. [Conclusion] Considering both combustion and emission characteristics, 15% is identified as the optimal co-firing ratio. At this ratio, the burnout rate is 97.51%, the outlet NO mass concentration decreases from 270.6 mg/m^3 to 216.5 mg/m^3 (a 20% reduction), the peak CH_2O mass concentration is 1.34 mg/m^3 with an outlet mass concentration of 1.95×10^{-4} mg/m^3. Injecting methanol at the upper oil nozzle is the optimal configuration, where the burnout rate is 97.52%, the NO outlet mass concentration is 199.96 mg/m^3, the peak CH_2O mass concentration is 2.13 mg/m^3, and the outlet mass concentration is 1.2×10^{-4} mg/m^3.
Key words: coal-fired boiler; methanol; blending ratio; injection position; numerical simulation

全球能源体系正朝着高效化、低碳化方向深度转型，传统燃煤锅炉掺烧低/无碳燃料已成为能源清洁高效利用领域的研究热点[1-2]。甲醇在常温常压下呈液态，不仅被誉为“液态阳光”，还是一种极具潜力的氢能载体[3]。与氢气和氨气相比，甲醇的体积能量密度更高，在储存、运输及现有能源基础设施兼容性方面具备显著优势[4-5]。甲醇作为含氧燃料，具有着火温度低、燃烧反应速率快、无燃料型 NO_x 生成等理化特性[6]；作为典型低碳燃料，其在降低碳排放方面展现出巨大应用潜力[7]。

甲醇在降低 NO_x、SO_2 等常规污染物排放、改善燃烧性能方面具有显著优势。周春霄等[8]将燃煤锅炉改造为醇基燃料锅炉后，发现理论烟气量提高 0.784 m^3/kg，NO_x 排放质量浓度低于 20 mg/m^3，粉尘和二氧化硫排放可忽略不计。Liu 等人[9]将 20 t/h 燃煤锅炉改造为甲醇燃料热水锅炉后，发现锅炉烟灰颗粒排放量降低 71.2%，SO_2 排放量降低 97.8%，NO_x 排放量降低 61.9%。甲醇和其他燃料掺烧还能改善燃烧特性，大幅降低污染物排放[10-11]。

现有甲醇掺烧研究已形成多场景应用格局，在燃烧器及小型锅炉中，明确了甲醇混合燃烧特性及污染物排放规律。Xu 等人[12]提出氢气掺混甲醇代替天然气燃烧，可使锅炉的热效率提高 3.5%，NO_x 排放量减少 13.8%。Chen 等人[13]在 45 kW 燃烧炉中探究甲醇−煤粉混燃的 NO 排放特性，结果显示甲醇燃烧的 NO 排放量不超过煤粉燃烧时的 30%。Levy 等人[14]在旋流喷雾燃烧器中对比甲醇和煤油的燃烧特性，发现甲醇的 CO 排放量降低 77%，NO_x 排放量降低 75%。

尽管甲醇作为低碳含氧燃料在抑制常规污染物生成方面优势显著，但其燃烧过程仍会产生一系列非常规污染物。甲醛（CH_2O）作为甲醇燃烧过程中典型的中间氧化产物，主要由甲醇在炉膛内不完全脱氢反应生成，具有强刺激性与生物毒性，属于环境优先控制污染物。同时，CH_2O 的生成与消耗规律可直观反映甲醇在炉内的燃烧完全程度与反应路径，是甲醇清洁利用中必须重点关注的非常规污染物。Lyu 等人[15]分析甲醇在锅炉燃烧器内的燃烧和排放特性，发现 CH_2O 排放在当量比改变时变化不大，但随着喷射压力和初始燃料温度的升高而降低。张钊等[16]探究甲醇压燃发动机中低负荷下的常规和非常规排放特性，结果显示随着负荷增大，缸内燃烧温度和排气温度增高，降低了 CH_2O 的排放量。

目前，燃煤机组掺烧甲醇相关研究未涉及大型燃煤电站锅炉的燃烧特性和污染物排放规律研究。因此，本文采用 Fluent 软件对某 660 MW 燃煤机组锅炉掺烧甲醇的燃烧过程进行数值模拟，分析甲醇掺烧比例、喷入位置对锅炉燃烧特性、烟气组分分布及污染物排放规律的影响，得出最佳工况，填补大型燃煤锅炉甲醇掺烧下温度场−组分场−常规/非常规污染物协同控制的研究空白，为工程应用提供更全面的理论依据与数据支撑。

1 模型及方法

1.1 锅炉结构

本文研究对象锅炉型号为 SG-2027/25.4-M970，炉膛宽度 18 816 mm、深度 18 144 mm、高 65 400 mm。该锅炉采用四角切圆燃烧技术，沿炉膛高度布置 6 层煤粉燃烧器，每相邻 2 层一次风喷口之间设置有 1 层二次风喷口。主燃区顶部布置 2 层紧凑燃尽风喷嘴（CCOFA）和 4 层分离式燃尽风喷嘴（SOFA）。

其中，将 AB、CD、EF3 层二次风喷口中的喷油口改造为甲醇喷口，总体布置如图 1 所示。

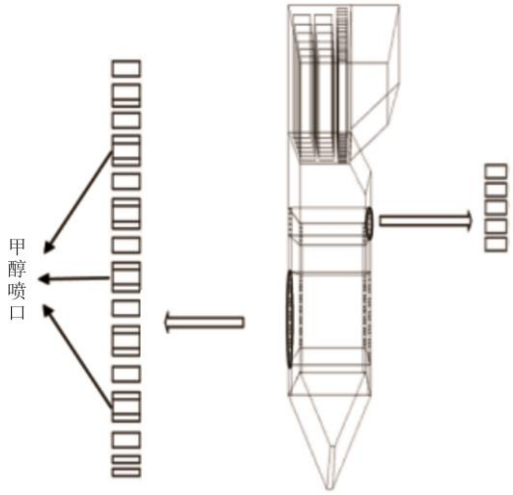


图 1 甲醇掺烧位置示意
Fig.1 Schematic diagram of the methanol co-firing positions

1.2 网格划分

本文利用 Fluent 软件自带的前处理软件 GAMBIT 对研究对象进行数学建模和划分网格。划分时适当的简化，燃烧器及各分喷口按矩形风道处理[17]。炉膛横截面网格划分如图 2 所示，对燃烧区和燃尽区横截面做加密处理。对其他区域，采用网格数目较少的结构化网格，生成的炉膛网格如图 3 所示。

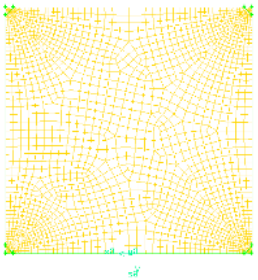


图 2 炉膛横截面网格划分
Fig.2 Grid division of the furnace cross-section

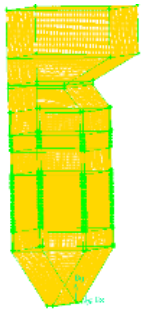


图 3 炉膛网格划分
Fig.3 Grid division of the furnace

构建了 78 万、97 万、125 万和 142 万 4 种网格数量模型。通过模拟不同网格数对炉膛温度及 NO 排放的影响，网格数量对炉膛温度和 NO 质量浓度的影响如图 4 所示。发现当网格数达到 125 万时计算结果趋于稳定，为兼顾计算准确性与资源消耗，选定 125 万网格进行模拟计算。

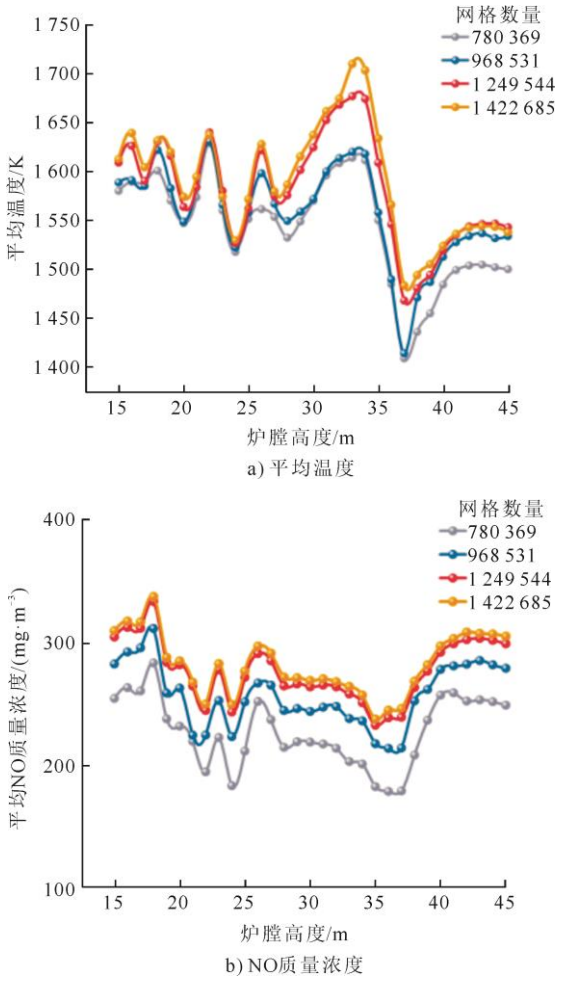


图 4 网格数量对炉膛温度和 NO 质量浓度的影响
Fig.4 Effect of grid number on furnace temperature and NO mass concentration

1.3 燃料特性

该锅炉设计煤种和甲醇的元素分析见表 1。可知甲醇的含氧量高达 50%，且不含 N 和 S，作为一种液体燃料，具有高挥发性和易燃性，相较于煤粉更容易燃烧，但热值较低[18]。纯煤粉工况下过量空气系数为 1.2，煤粉燃料消耗量为 324 t/h，理论空气量为 8.45 m^3/kg，锅炉每小时理论空气需求量为 2 737 800 m^3。甲醇的热值为 19.6 MJ/kg，理论空气量为 4.97 m^3/kg，掺烧甲醇后，为维持锅炉原有热输出，模拟计算得出的每掺烧 5%比例，每小时理论空气需求量减少 54 139.5 m^3。

表 1 设计煤种及甲醇元素分析
Tab.1 Ultimate analysis of the design coal and methanol

	C_{ar}/%	H_{ar}/%	O_{ar}/%	N_{ar}/%	S_{ar}/%	$Q_{net.ar}$/(MJ·kg^{-1})
设计煤种	52.19	3.39	5.80	0.90	2.10	20.15
甲醇	37.50	12.50	50.00	0	0	19.60

1.4 模型选取

实际燃烧过程涉及多个物理化学耦合过程，相关计算通过 Fluent 软件完成。燃用煤粉和甲醇时，燃料与空气流动按完全湍流处理，采用 Realizable k-ε 模型对锅炉燃烧特性进行数值模拟研究[19]。选用欧拉−拉格朗日法对气固两相进行处理[20]。采用 P1 辐射模型，能够比较准确进行煤粉锅炉中燃烧的数值计算[21]。煤粉挥发分析出模型为双方程竞争反应模型，气相燃烧模型采用组分输运模型中的有限速率燃烧模型，焦炭燃烧阶段采用动力−扩散燃烧模型。由于甲醇燃烧过程伴随着大量 CH_2O 的生成，为研究炉膛出口 CH_2O 的排放特性，选择 Li 机理[22]，该机理能明确描述 CH_2O 生成路径。图 5 为甲醇详细氧化燃烧反应的流程。

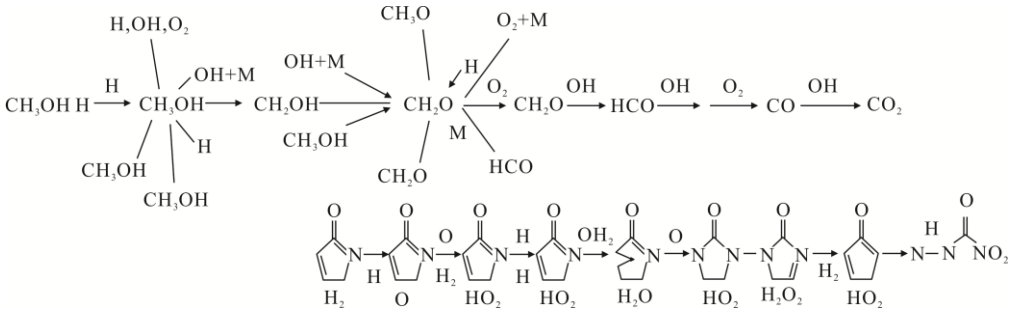


图 5 甲醇详细氧化燃烧反应流程
Fig.5 Flow chart of the methanol detailed oxidation and combustion reactions

该机理的核心逻辑是基于基元反应构建 CH_2O 生成路径，甲醇则可通过氧化或脱氢反应直接生成 CH_2O，明确了各基元反应的速率常数、热力学参数，适配 Fluent 软件的有限速率化学模型等反应求解器。在数值求解中，开启组分输运模型，将 Li 机理包含的全部气相组分与基元反应导入求解器，设置有限速率化学反应为主导，同时开启涡耗散模型以兼顾湍流混合对反应的影响，实现湍流流动与详细化学反应的双向耦合。通过定义各组分物性参数、反应速率指数及指前因子，使机理与炉内温度场、速度场、组分场实时耦合，从而实现对甲醇燃烧全过程及 CH_2O 质量浓度的定量预测。

1.5 模型验证

为验证模型的准确性，对锅炉最大连续蒸发工况（BMCR）进行数值模拟[23]。实际计算结果与数值模拟结果的对比如表 2 所示。炉膛出口温度、氧气浓度、NO 质量浓度相对误差均在 5%以内，说明了数值模拟选用的物理模型和计算模型较合理，模拟结果具有较高的准确性。

表 2 实际计算结果与模拟结果对比
Tab.2 Comparison between the actual calculated results and the simulated results

项目	出口氧量/%	出口烟温/K	NO 排放浓度(6% O_2)/(mg·m^{-3})
实际运行参数	3.60	1 304.00	263.58
数值模拟结果	3.65	1 320.19	270.60
相对误差/%	1.39	1.24	2.66

2 结果与分析

2.1 甲醇掺烧比例的影响

2.1.1 工况设置

由于甲醇和煤粉燃烧时的热值及理论空气量不同，掺烧一定比例甲醇时需要对锅炉的边界条件重新设置，具体参数如表 3 所示。在 AB、CD、EF 层原燃油喷口平均喷入甲醇，通过改变喷嘴截面积，保证煤粉与甲醇的喷射速度一致，消除对炉内流场的影响，喷入甲醇位置的二次风量应增大，以保证甲醇燃烧。

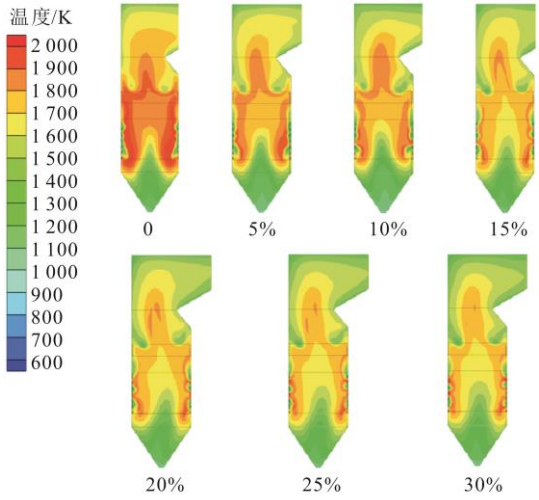
2.1.2 甲醇掺烧比例对燃烧特性的影响

掺烧比例对温度分布的影响如图 6 所示。

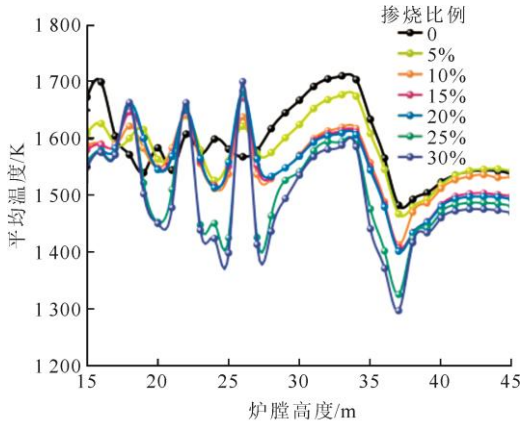
表 3 不同掺烧比例的边界条件

Tab.3 Boundary condition parameters of different blending ratios

掺烧工况	甲醇喷入量/(t h^{-1})	一次风速/(m s^{-1})	二次风速/(m s^{-1})	燃尽风速/(m s^{-1})
0	0	25.30	53.70	58.80
5%	16.65	24.25	52.79	57.30
10%	33.30	23.20	51.88	55.80
15%	49.95	22.15	50.97	54.30
20%	66.60	21.10	50.06	52.80
25%	83.25	20.05	49.15	51.30
30%	99.90	19.00	48.24	49.80



a) 炉膛中心截面温度场



b) 沿炉膛高度平均温度

图 6 掺烧比例对温度分布的影响

Fig.6 Effect of blending ratio on temperature distribution

分析图 6a)炉膛中心截面温度场可见，甲醇掺烧对炉内温度场呈“局部强化”与“全局降温”双重特性。“局部强化”是因甲醇分子含氧达 50% 且挥发性高，在喷口附近剧烈燃烧，大幅扩大 1 600~2 000 K 核心高温区并使火焰中心下移。“全局降温”是由于甲醇理论燃烧温度（约 1 580 K）低于煤粉（约 1 703 K），甲醇高汽化潜热造成燃料束末端低温，以及甲醇和富水烟气比热容大抑制炉膛升温。分析图 6b)可知：掺烧甲醇后主燃区温度峰值出现在甲醇喷口处，且随掺烧比例增加而升高；上部紧耦合燃尽风（CCOFA）补氧使温度逐步上升，进入缺氧还原区后短暂降至最低，SOFA 掺入让残余燃料燃尽，温度再度回升。受甲醇低热值影响，炉膛平均温度从纯煤粉工况的 1 593 K 降至 30%掺烧工况的 1 497 K，温差为 96 K。

根据不同工况锅炉进口燃料质量和出口未燃尽颗粒质量进行计算，得出各工况对应的燃尽率如图 7 所示。甲醇掺烧比例由 0 升至 30%，燃料的燃尽率显著下降，分别为 98.43%、97.89%、97.79%、97.51%、97.2%、96.93%、96.58%。高比例掺烧时，下降幅度略有增大，说明甲醇掺烧比例升高会造成炉膛温度过低，不利于煤粉焦炭燃尽，进而降低整体燃烧效率。

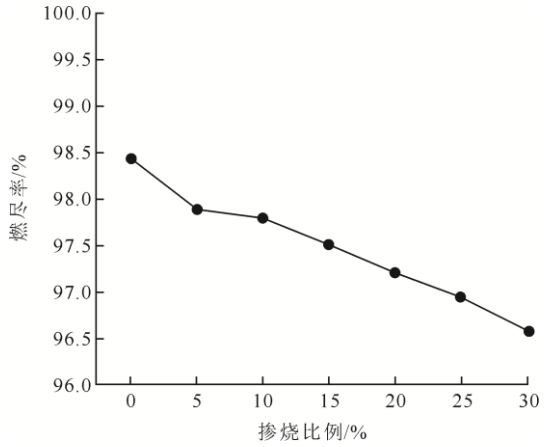


图 7 掺烧比例对燃尽率的影响

Fig.7 Effect of blending ratio on burnout rate

2.1.3 甲醇掺烧比例对烟气组分的影响

甲醇掺烧比例对烟气组分的影响见图 8。纯煤粉工况下炉膛 H_2O 摩尔分数曲线平稳，掺烧甲醇后，因其高含氢量和燃烧产水特性，甲醇喷口处 H_2O 含量出现峰值，炉膛整体水分含量上升，30%掺烧工况的 H_2O 摩尔分数较纯煤粉工况高 5.78%。受一、二次风喷口交错排列影响，炉内局部氧浓度波动，致使主燃区 CO、CO_2 含量呈现明显波峰波谷；后续 CCOFA 补氧推动燃料完全燃烧，CO 含量下降，进入还原区后因局部缺氧 CO 含量回升，最终在 SOFA 作用下残余燃料燃尽，CO 含量快速降至极低。主燃区 CO 含量随甲醇掺烧比例增加先升后降，低掺烧比时甲醇与煤粉竞争消耗有限氧气，造成煤粉燃烧不完全；掺烧比例进一步提高后，甲醇分子的含

氧特性及对燃烧的促进作用占据主导，主燃区燃烧条件得以改善。

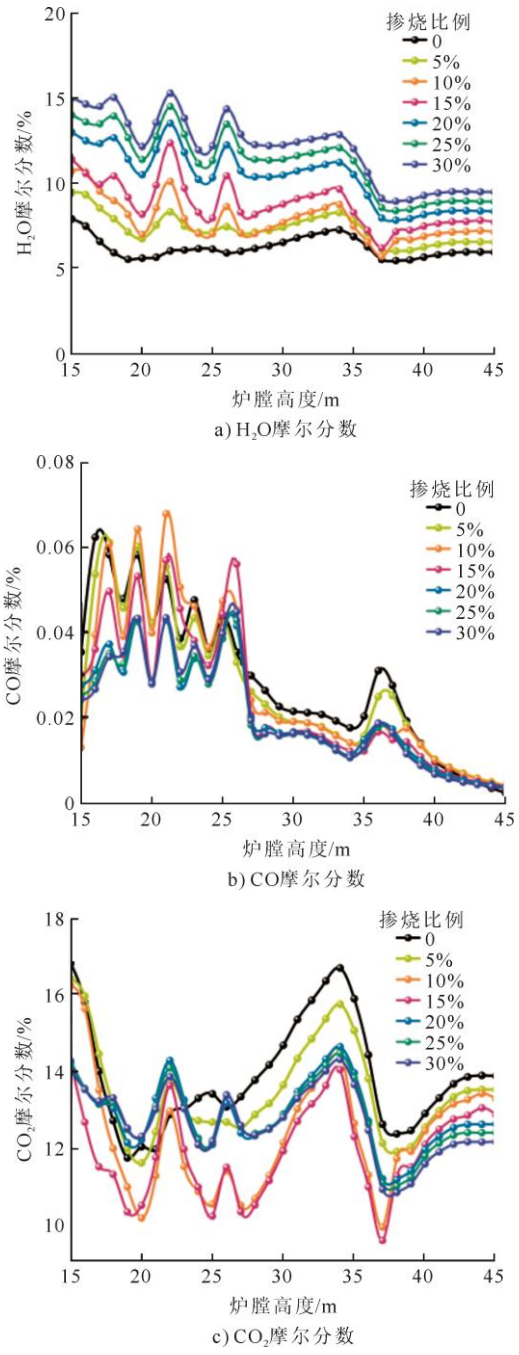


图 8 掺烧比例对烟气组分分布的影响

Fig.8 Effect of blending ratio on flue gas component distribution

2.1.4 甲醇掺烧比例对污染物排放的影响

根据图 9 对炉膛内 CH_2O 质量浓度分布的分析可知，CH_2O 质量浓度在甲醇喷口附近出现显著峰值，不同掺烧比例（5%~30%）的 CH_2O 峰值质量浓度分别为 0.54、1.03、1.34、4.32、10.06、12.55 mg/m^3，随后迅速衰减，这表明 CH_2O 的生成具有极强的局部性，紧贴甲醇喷入区。CH_2O 质量浓度的变化本质上反映了甲醇在炉内的两步氧化机制[24]，这与煤粉的燃烧路径截然不同。甲醇进入炉膛后，首先发生脱氢反应生成中间产物 CH_2O：

$$CH_3OH \xrightarrow{\text{脱氢}} CH_2OH \xrightarrow{\text{脱氢}} CH_2O \quad (1)$$

根据化学反应动力学，掺烧比例的提高增加了反应物甲醇的质量浓度，从而加快了中间产物 CH_2O 的生成速率，导致质量浓度峰值增高。生成的 CH_2O 并非最终产物，它需要进一步被氧化：

$$CH_2OH + OH \rightarrow HCO + H_2O \quad (2)$$

$$HCO + O_2 \rightarrow CO + HO_2 \quad (3)$$

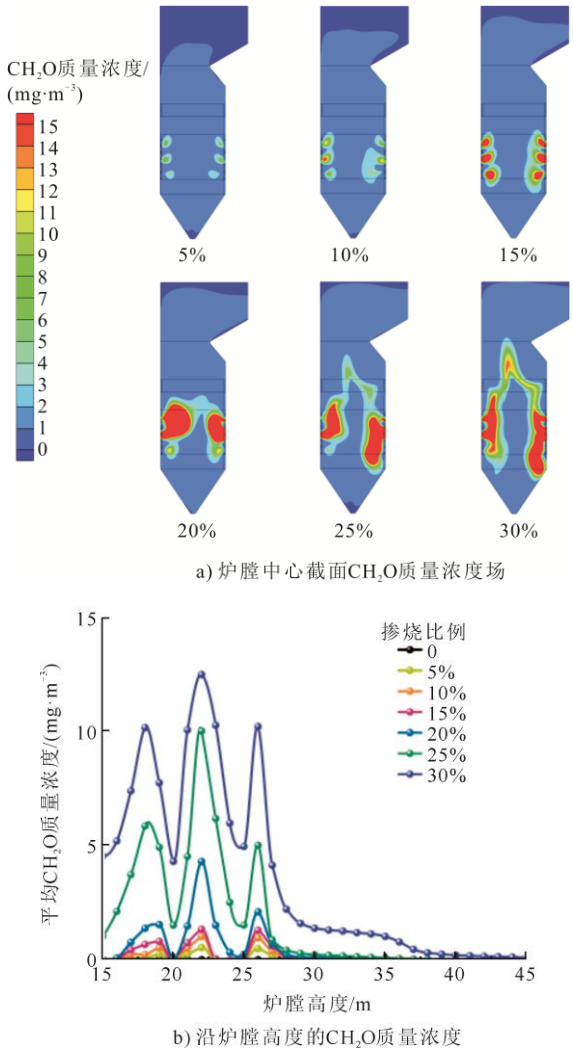


图 9 掺烧比例对 CH_2O 质量浓度分布的影响

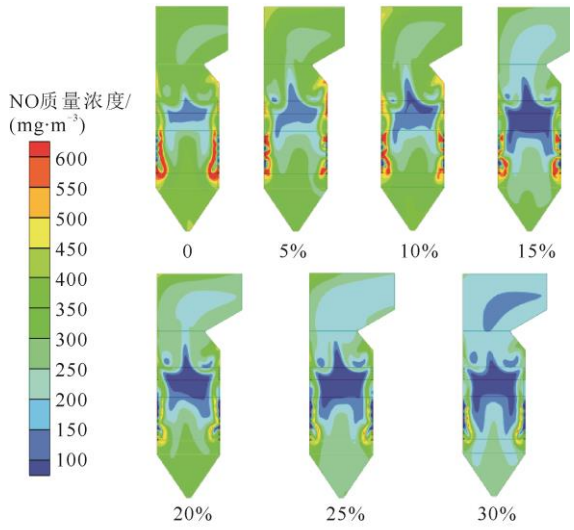
Fig.9 Effect of blending ratio on CH_2O mass concentration distribution

甲醇掺烧比为 15%以下时，煤粉燃烧产生的高温烟气提供了充足的初始自由基，甲醇分子作为替代燃料，其产生的 CH_2O 能被主燃区丰富的自由基迅速反应并转化为 CO。掺烧甲醇超过 15%后，随

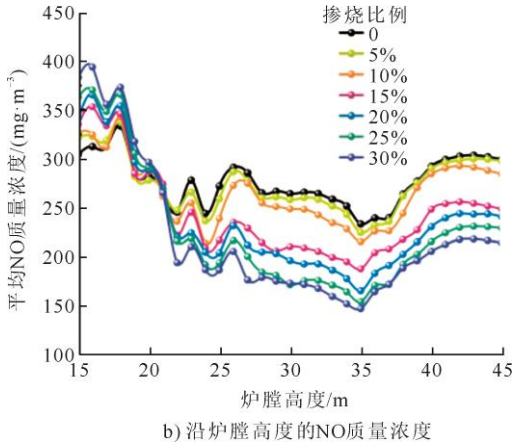
着甲醇占比增加，燃料中含氢量大幅提升，局部氧气消耗过快，大量甲醇消耗有限的自由基进行初期分解，导致用于氧化中间产物 CH_2O 的自由基相对不足，CH_2O 向 CO 转化的反应速率常数变小[25]，抑制 CH_2O 的氧化过程，造成 CH_2O 质量浓度急剧升高。

从图 10 甲醇掺烧比例对 NO 质量浓度分布的影响可见：主燃区内 NO 高质量浓度区集中在燃烧器喷嘴附近，该区域高温富氧促使燃料型 NO 大量生成，主燃区 NO 质量浓度出现峰值，且峰值随甲醇掺烧比例增加显著降低；CCOFA 至分离式燃尽风（SOFA）区域为还原性气氛，加之焦炭对 NO 的还原作用，该区域 NO 质量浓度逐步降低；燃尽区因 SOFA 风引入破坏还原性气氛，残余燃料充分燃烧形成局部高温，导致 NO 生成量回升，如 0%工况下 NO 质量浓度从最低值 232.98 mg/m^3 回升至 303.65 mg/m^3。提升甲醇掺烧比例可显著降低炉膛 NO 质量浓度，其抑制机理体现在甲醇为无氮燃料，掺入后稀释了燃料总氮含量，从源头减少燃料型 NO 生成基数。对于热力型 NO，虽然甲醇作为液态燃料，雾化后的微滴燃烧强度高，局部火焰温度高于纯煤粉燃烧，但甲醇的汽化潜热（约 1 100 kJ/kg）远高于煤粉，在喷入瞬间，大量吸收炉内热量转化为气态，且甲醇的热值较低，燃烧产生的理论烟气含水量高，增加了烟气的比热容，使炉膛整体温度场降低，从而抑制了热力型 NO。甲醇裂解产生大量的 H、OH 和 CH_i 自由基，也能够加速 NO 向 N_2 的转化，进一步降低 NO。

$$NO + CH_i \rightarrow N_2 + H_2O + CO_2 \quad (4)$$



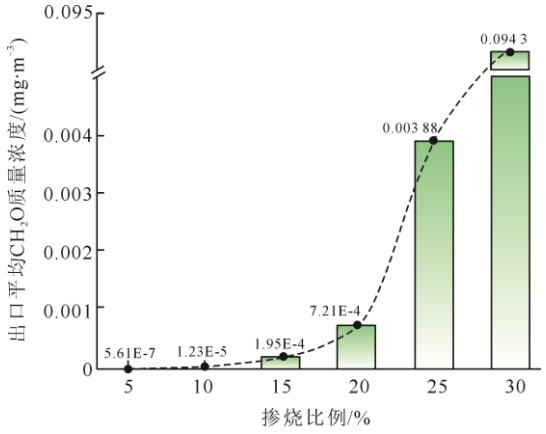
a) 炉膛中心截面NO质量浓度



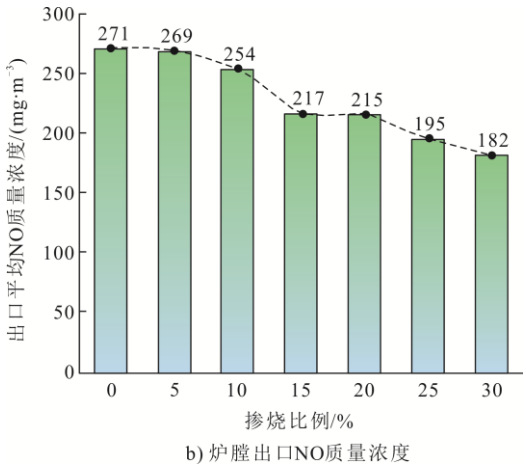
b) 沿炉膛高度的NO质量浓度

图 10 掺烧比例对 NO 质量浓度分布的影响
Fig.10 Effect of blending ratio on NO mass concentration distribution

甲醇掺烧比例对炉膛出口污染物质量浓度的影响如图 11 所示。



a) 炉膛出口CH_2O质量浓度



b) 炉膛出口NO质量浓度

图 11 掺烧比例对炉膛出口污染物质量浓度的影响
Fig.11 Effect of blending ratio on pollutant mass concentration at furnace outlet

CH_2O 排放随甲醇掺烧比例的增加呈现出明显的非线性增长趋势，掺烧比 5%~15%工况下出口 CH_2O 质量浓度处于 10^{-7}~10^{-4} mg/m^3 量级，CH_2O 质

量浓度低至可以忽略不计，说明在该区间内，甲醇近乎完全氧化。20%及以上工况时 CH_2O 质量浓度开始升高，尤其是 25%~30%，CH_2O 质量浓度增加了 24 倍。15%是保持低 CH_2O 排放水平的界限，一旦超过这个比例，对 CH_2O 的协同降解能力达到饱和，未燃尽中间产物将大量逃逸。

炉膛出口 NO 排放质量浓度呈现出显著下降趋势。然而，出口 NO 质量浓度的下降幅度有所变化，10%~15%掺烧比区间的下降幅度最大。

15%掺烧比下的炉膛温度略低于纯煤粉工况，既能有效改善火焰刷墙等问题，又可避免锅炉温度过低导致热效率下降，其燃尽率为 97.51%，说明煤粉焦炭燃尽充分，出口 NO 质量浓度为 216.5 mg/m^3，相较于纯煤粉工况的 270.6 mg/m^3 减少 20%，出口 CH_2O 质量浓度为 1.95×10^{-4} mg/m^3，几乎完全分解。综合考虑下，15%掺烧比例在维持良好燃烧状况和污染物减排之间达到了最佳平衡。

2.2 甲醇喷入位置的影响

2.2.1 工况设置

为了验证甲醇喷入位置对燃烧特性和污染物排放的影响，分别从 AB、CD、EF 层原燃油喷口喷入甲醇，边界条件设置如表 4 所示。

表 4 不同喷口位置的边界条件参数

Tab.4 Boundary condition parameters of different injection positions

甲醇喷入位置	甲醇喷入量/(t h^{-1})	甲醇喷入位置	一次风速/(m s^{-1})	二次风速/(m s^{-1})	燃尽风速/(m s^{-1})
AB	49.95	底部	22.15	50.97	54.3
CD	49.95	中间	22.15	50.97	54.3
EF	49.95	上部	22.15	50.97	54.3

2.2.2 甲醇喷入位置对燃烧特性的影响

喷入位置对温度分布的影响如图 12 所示。分析图 12a)炉膛中心截面温度场云图表明：甲醇从 AB 喷口喷入时，主燃区的高温区明显少于其他工况；从 CD 喷口喷入时，主燃区的整体高温区高于 AB 工况，但在上部炉中降低；从 EF 喷口喷入时，主燃区内的高温区最大，上部炉高温区最小。甲醇从 EF 层喷入时，更靠近 CCOFA 燃尽风区域，氧气补给更及时、更充足，甲醇燃烧更完全，放热更集中；底层煤粉在主燃区燃烧释放热量，甲醇在上层高温烟气中迅速转化为 H_2、CO 和大量活性自由基，能够显著加速残余煤粉和焦炭的氧化反应速率，使原本较慢的放热过程集中在这一区域发生，从而导致局部温度剧烈上升；上层喷入可避免底层喷入时氧气竞争和燃烧滞后，燃烧中心集中于主燃区，因此主燃区温度显著上升。

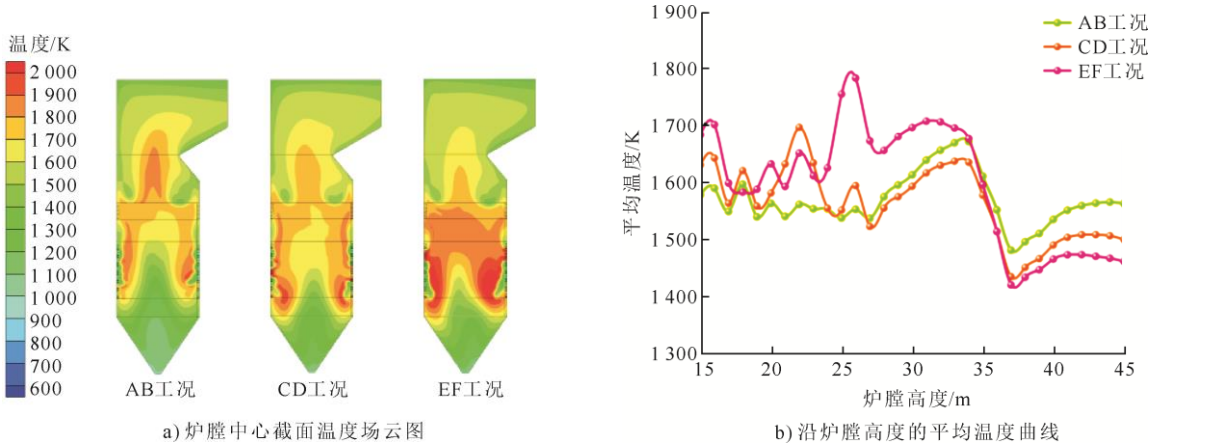


图 12 喷入位置对温度分布的影响

Fig.12 Effect of injection position on temperature distribution

对图 12b)沿炉膛高度的平均温度曲线的分析表明，甲醇从相应喷口进入炉内，该区域的温度升高，AB、CD、EF 3 种工况对应喷口处的温度分别为 1 594、1 694、1 781 K，主燃区平均温度分别为 1 581、1 599、1 662 K，温度相差 81 K。这是因为 AB 工况下大量甲醇的喷入导致底层燃烧器氧气供应不足，抑制了煤粉的燃烧，同时甲醇热值低且汽化潜热较大，导致温度下降；EF 喷口接近 CCOFA 区域，更

易得到氧气补充，甲醇燃料在该区域充分燃烧，因此温度更高。而在燃尽风区域，AB 工况的平均温度最高为 1 541 K，CD 与 EF 工况在该区域的平均温度分别为 1 493、1 471 K，该区域的温差为 70 K。

图 13 为甲醇喷入位置对燃尽率的影响。随着甲醇喷入位置的升高，燃尽率呈显著上升趋势。其中，AB 工况下燃尽率最低为 96.99%；而 EF 工况下燃尽率升高至 97.52%。这是由于上部炉温高，甲醇的喷入可强化煤粉着火与燃烧过程，延长煤粉颗粒在高温区的停留时间，所以甲醇喷入位置越靠近炉膛上部，越有利于炉内燃烧充分。

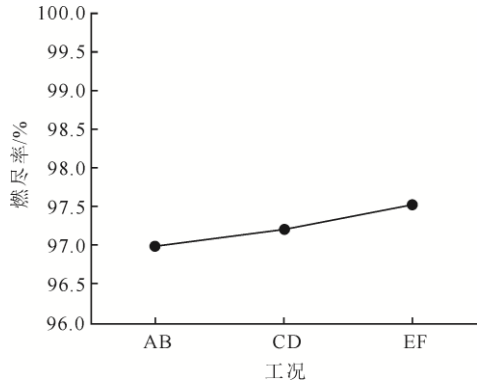
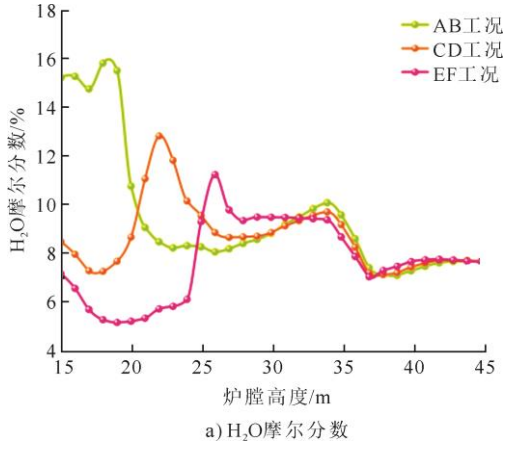


图 13 喷入位置对燃尽率的影响

Fig.13 Effect of injection position on burnout rate

2.2.3 甲醇喷入位置对烟气组分的影响

对图 14 喷口位置对烟气组分分布的影响分析表明，随着喷入位置的升高，H_2O 摩尔分数峰值降低。AB 工况在底层燃烧器喷入甲醇，导致该区域温度较低，燃烧不充分，CO 摩尔分数较高，主燃区 CO 摩尔分数为 0.048%；CD 工况在中层燃烧器喷入甲醇，主燃区的氧量充足，燃料充分燃烧，CO 摩尔分数最低为 0.04%；EF 工况在上层燃烧器喷入甲醇导致主燃区内存在大量未燃尽的煤粉颗粒，主燃区 CO 摩尔分数为 0.047%。



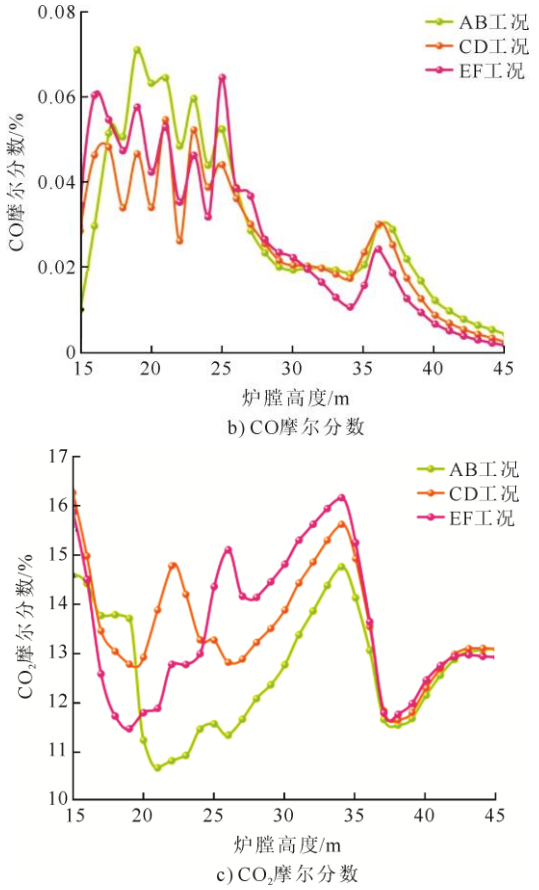
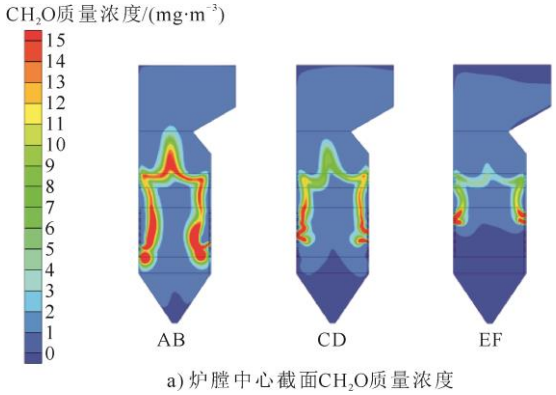


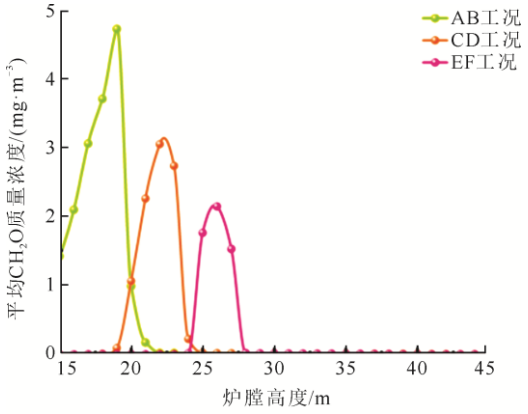
图 14 喷入位置对烟气组分分布的影响

Fig.14 Effect of injection position on flue gas component distribution

2.2.4 甲醇喷入位置对污染物排放的影响

图 15 为喷入位置对 CH_2O 质量浓度分布的影响。可以看出，随着甲醇喷口上移，CH_2O 峰值质量浓度也随之降低，分别为 4.7、3.03、2.13 mg/m^3。这是由于 AB 层位于燃烧器的底部，处于燃料气流的着火初期，燃料析出的吸热效应导致该区域的温度相对较低，抑制了 CH_2O 向 CO 转化的氧化反应速率，EF 层位于上层燃烧器，此时，主燃区内煤粉燃料燃烧释放了大量热量，极大地加速了 CH_2O 与 OH 自由基的反应。

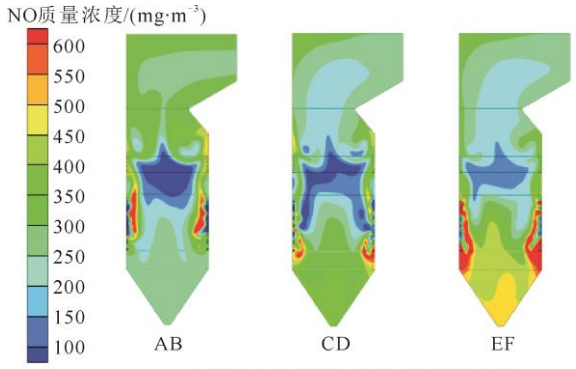




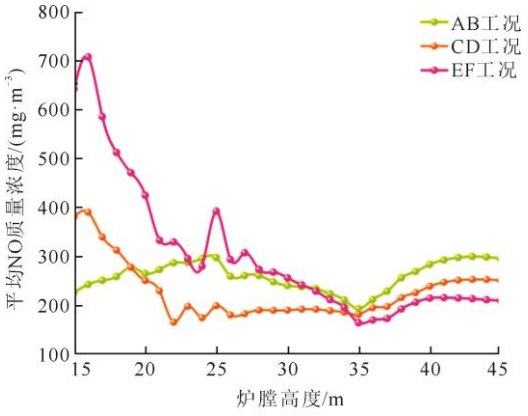
b) 沿炉膛高度的CH_2O质量浓度

图 15 喷入位置对 CH_2O 质量浓度分布的影响
Fig.15 Effect of injection position on CH_2O mass concentration distribution

图 16 为喷入位置对 NO 质量浓度分布的影响。图 16a)显示：AB 工况炉膛内 NO 高质量浓度区域面积最大、分布最广，说明炉内 NO 大量生成且未被有效还原；EF 工况的 NO 高质量浓度区仅集中在炉膛底层，主燃区上部和燃尽区的 NO 质量浓度处于低水平；CD 工况的 NO 质量浓度分布最均匀，状态介于前两者之间。



a) 炉膛中心截面NO质量浓度场云图

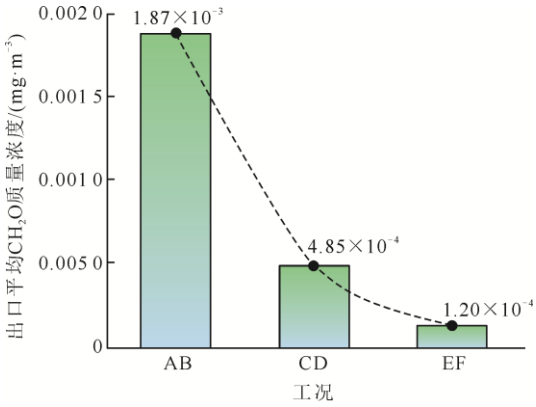


b) 沿炉膛高度的NO质量浓度曲线

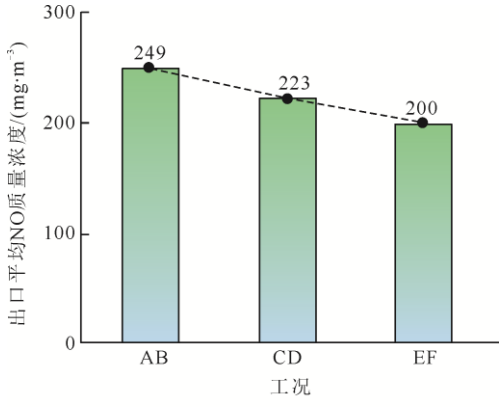
图 16 喷入位置对 NO 质量浓度分布的影响
Fig.16 Effect of injection position on NO mass concentration distribution

由图 16b)可见：主燃区内 AB、CD 工况 NO 质量浓度较低，EF 工况最高。原因是底层喷入甲醇燃烧会抢占局部氧气，加剧不完全燃烧，生成的 CO 也强化了还原性气氛；而在上层 EF 层喷入甲醇形成燃料分级，其下方煤粉燃烧生成大量 NO，甲醇作为无氮高挥发分燃料在 EF 层燃烧，会快速消耗区域内氧气并产生大量烃基自由基，在主燃区上部形成强还原区，下部生成的 NO 经该区域被还原为 N_2，因此 EF 工况的燃尽风区域 NO 质量浓度最低。

对图 17 炉膛出口污染物浓度的定量分析表明，3 种喷口位置的炉膛出口 CH_2O 平均质量浓度分别为 18.00×10^{-4}、4.85×10^{-4}、1.20×10^{-4} mg/m^3。炉膛出口 NO 平均质量浓度分别为 249.24、222.56、199.96 mg/m^3。在 EF 层喷入甲醇可以让炉内燃烧更完全，放热更集中，燃尽率升高至 97.52%，也可避免氧气竞争、燃烧滞后的问题，其出口 NO 平均质量浓度最低，相较于纯煤粉工况降低 26.1%，出口 CH_2O 平均质量浓度最低，相较于平均喷入降低 38.4%。



a) 炉膛出口CH_2O质量浓度



b) 炉膛出口NO质量浓度

图 17 喷入位置对炉膛出口污染物质量浓度的影响
Fig.17 Effect of injection position on pollutant mass concentration at furnace outlet

3 结 论

本研究以某台 660 MW 超临界切圆燃煤机组锅炉为对象，系统分析了甲醇掺烧比例和喷入位置对炉膛温度场、烟气组分场的影响规律。

1）炉膛平均温度随掺烧比例（0~30%）的增加，由 1 593 K 降至 1 497 K，燃尽率由 98.43%降至 96.58%；主燃区内 CO 质量浓度随着掺烧比例的增加呈现先升高后下降的趋势，在炉膛出口处浓度接近于 0；CH_2O 的生成量随掺烧比增加而上升，掺烧比例 30%工况的 CH_2O 峰值质量浓度为 12.55 mg/m^3；甲醇的掺入稀释了燃料中的总氮含量且降低炉膛整体温度，有效抑制了 NO 的生成。综合燃烧特性与减排效果，确定 15%为最佳掺烧比例，NO 出口质量浓度由纯煤粉工况的 270.6 mg/m^3 降至 216.5 mg/m^3，降幅达 20%，CH_2O 峰值质量浓度为 1.34 mg/m^3，出口质量浓度为 1.95×10^{-4} mg/m^3。

2）甲醇在 AB 层喷油口喷入时，易占据局部氧气，推迟煤粉燃烧，导致火焰中心上移；在 CD 层喷油口喷入时，炉膛温度分布和在 3 层喷油口平均喷入相似，但整体温度降低 12 K；在 EF 层喷油口喷入时，甲醇的高速射流导致火焰中心下移，有利于延长煤粉在高温区的停留时间，提高燃烧效率，燃尽率由 96.99%上升至 97.52%。提高喷入位置可显著降低 CH_2O 排放，CH_2O 的峰值质量浓度由底层喷入的 4.7 mg/m^3 降至上层喷入的 2.13 mg/m^3，出口质量浓度由 0.001 8 mg/m^3 降至 1.2×10^{-4} mg/m^3；随着喷入位置的升高，出口 NO 质量浓度从 AB 工况的 249.24 mg/m^3 逐步降至 EF 工况的 199.96 mg/m^3。

[参 考 文 献]

[1] 岳光溪, 张扬, 张建春, 等. 面向双碳目标的多元燃料循环流化床燃烧技术展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6844.
Yue G X, Zhang Y, Zhang J C, et al. Outlook for multiple fuel circulating fluidized bed combustion technologies for the dual carbon goals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6844.

[2] 司桐, 黄骞, 杨远平, 等. 煤炭掺氨燃烧基础研究与技术应用研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2876.
Si T, Huang Q, Yang Y P, et al. Advancements and future outlook in fundamental research and technological applications for ammonia co-firing with coal[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2876.

[3] Chudnovsky B, Lazebnikov A, Reshef M, et al. Methanol as a low-cost alternative fuel for the reduction of emissions[M]//Agarwal A K, Valera H, Pexa M, et al. Methanol. Singapore: Springer, 2021: 37.

[4] 张波, 张国军, 贾子秀, 等. 掺烧氢/氨对煤粉锅炉 NO_x 排放的影响[J]. 热力发电, 2025, 54(8): 124.
Zhang B, Zhang G J, Jia Z X, et al. Effect of co-firing hydrogen/ammonia on nitrogen oxides emissions from boilers[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(8): 124.

[5] Deka T J, Osman A I, Baruah D C, et al. Methanol fuel production, utilization, and techno-economy: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2022, 20(6): 3525.

[6] 吴杨, 刘海玉, 寇梦楠, 等. 基于 AHP-EWM 的甲醇与传统锅炉燃料对比分析[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 113.
Wu Y, Liu H Y, Kou M N, et al. Comparative analysis of methanol and traditional boiler fuel based on AHP-EWM[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 113.

[7] Tabibian S S, Sharifzadeh M. Statistical and analytical investigation of methanol applications, production technologies, value-chain and economy with a special focus on renewable methanol[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 179: 113281.

[8] 周春霄, 刘柏谦. 工业锅炉燃烧醇基燃料与燃煤的烟气特性比较[J]. 煤化工, 2019, 47(2): 26.
Zhou C X, Liu B Q. Comparison of boiler flue gas characteristics between alcohol-based fuel and coal-fired[J]. Coal Chemical Industry, 2019, 47(2): 26.

[9] Liu J, Zhao J, Zhu Q, et al. Methanol-based fuel boiler: design, process, emission, energy consumption, and techno-economic analysis[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 54: 103885.

[10] Zhou D Z, Yang W M, An H, et al. Application of CFD-chemical kinetics approach in detecting RCCI engine knocking fuelled with biodiesel/methanol[J]. Applied Energy, 2015, 145: 255.

[11] Guo Z W, Lu L L, Song E Z, et al. Real-time simulation of marine dual-fuel engine: development of 0-D full-engine model for methanol-diesel mixed combustion[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279(Part A): 127526.

[12] Xu W H, Jiang R H, Zhang B D, et al. Comparative assessment of hydrogen and methanol-derived fuel co-combustion for improved natural gas boiler performance and sustainability[J]. Sustainability, 2025, 17(3): 929.

[13] Chen J, Wang X, Fan W D, et al. Experimental study of NO emission in coal-methanol co-combustion under air-staged condition[J]. Journal of the Energy Institute, 2024, 117: 101835.

[14] Levy Y, Erenburg V, Roizman A, et al. Comparison of methanol and kerosene combustion in a swirl stabilized spray combustor[C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul: ASME, 2016: GT2016-56070.

[15] Lyu Y, Zhuang Y L, Wang Z S, et al. Emission characteristics of typical pollutants during methanol spray combustion in a boiler burner[J]. Fuel, 2026, 414: 138322.

[16] 张钊, 任晓娜, 吴洋亦, 等. 甲醇压燃发动机中低负荷下常规与非常规排放特性研究[J]. 环境科学学报, 2025, 45(8): 78.
Zhang Z, Ren X N, Wu Y Y, et al. Research on regulated and unregulated emission characteristics of methanol compression ignition engine at low and medium loads[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45(8): 78.

[17] Yao Q P, Li R Y, Wang Y K, et al. Feasibility analysis of coupling hydrogen-derived fuel on a coal-fired boiler for power generation[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(1): 477.

[18] Collazo J, Porteiro J, Patiño D, et al. Simulation and experimental validation of a methanol burner[J]. Fuel, 2009, 88(2): 326.

［19］Ding X, Li W F, Liu P Y, et al. Numerical calculation on combustion process and NO transformation behavior in a coal-fired boiler blended ammonia: effects of the injection position and blending ratio[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(76): 29771.

［20］Liu J H, Liu Z G, Wang L J, et al. Numerical simulation and experimental investigation on pollutant emissions characteristics of PODE/methanol dual-fuel combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2022, 231: 107228.

［21］Echi S, Bouabidi A, Driss Z, et al. CFD simulation and optimization of industrial boiler[J]. Energy, 2019, 169: 105.

［22］Olm C, Varga T, Valkó É, et al. Uncertainty quantification of a newly optimized methanol and formaldehyde combustion mechanism[J]. Combustion and Flame, 2017, 186: 45.

［23］Jing L, Zhao J, Wang H Y, et al. Numerical analysis of the effect of swirl angle and fuel equivalence ratio on the methanol combustion characteristics in a swirl burner[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 158: 320.

［24］曾明滔. 锅炉燃用甲醇及其裂解气的特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
Zeng M T. Characteristics research on mixed combustion of dissociated methanol in boiler[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

［25］黄粉莲, 朱广豪, 万明定, 等. 预喷耦合 EGR 对甲醇/柴油双燃料发动机燃烧和排放的影响[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(10): 4018.
Huang F L, Zhu G H, Wan M D, et al. Effects of combined pre-injection and EGR on combustion efficiency and emission reduction in methanol/diesel dual-fuel engines[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(10): 4018.

（责任编辑　杨嘉蕾）