

文章编号:1674-7607(2025)02-0182-08

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.230735

650 MW 电站燃煤机组氨煤混燃模拟研究

姚向昱¹, 蒋慧卿¹, 王宁泽², 李芳芹^{2,3}, 曾卓雄^{2,3}, 潘卫国^{2,3}

(1. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 上海 200063;

2. 上海电力大学 能源与机械工程学院, 上海 201306;

3. 上海非碳基能源转换与利用研究院, 上海 200240)

摘要: 以某 600 °C 超超临界 650 MW 电站燃煤机组为研究对象, 结合 650~700 °C 超超临界电站煤粉锅炉的总体方案, 以 NH₃ 替代部分燃煤, 对 NH₃ 与煤在锅炉中混合燃烧进行了模拟研究。探究了不同 NH₃ 混燃比下炉膛内温度、物质分布规律, 以及不同混燃比和 NH₃ 喷入方式对 NO_x 排放的影响。结果表明: 随着 NH₃ 混燃比增加, 炉膛中心火焰温度明显降低, 高温区域减少, 炉膛内火焰温度整体呈下降趋势, 这主要是因为 NH₃ 理论火焰温度较低, 因此会延长低温射流, 着火延迟; 在 NH₃ 喷口位置 NH₃ 浓度达到峰值, 随着燃烧进行, NH₃ 基本被消耗完, 在炉膛出口不会出现氨逃逸现象; 在空气分级燃烧下, 炉膛主燃区域 O₂ 浓度低, 有利于 NH₃ 还原反应的发生; 随着 NH₃ 混燃比增加, 炉膛出口 NO_x 排放浓度降低, 这是由于炉膛内 NH₃ 会和 NO 发生还原反应, 抑制了 NO 的生成; 在 NH₃ 以不同方式喷入炉膛时, 发现使用油枪喷口喷入时炉膛出口 NO_x 浓度较低, 这是因为油枪喷口位置更靠近主燃区。

关键词: 燃煤锅炉; 氨煤混燃; 燃烧特性; NO_x 排放

中图分类号: TK229.6

文献标志码: A

学科分类号: 470.10

Simulation Study on Ammonia-Coal Mixed Combustion of 650 MW Coal-fired Power Plant Unit

YAO Xiangyu¹, JIANG Huiqing¹, WANG Ningze², LI Fangqin^{2,3},
ZENG Zhuoxiong^{2,3}, PAN Weiguo^{2,3}

(1. China Electric Power Engineering Consulting Group East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200063, China; 2. School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Institute of Non Carbon Based Energy Conversion and Utilization, Shanghai 200240, China)

Abstract: Taking a coal-fired unit of a 600 °C ultra supercritical 650 MW power plant as the research object, combined with the overall plan of the coal-fired boiler of the 650-700 °C ultra supercritical power plant, the simulation study was conducted on the mixed combustion of NH₃ and coal in the boiler by replacing part of the coal with NH₃. The temperature and material distribution of NH₃ in the furnace at different mixing ratios, as well as the effects of different mixing ratios and NH₃ injection ways on NO_x emissions

收稿日期: 2023-12-07 修订日期: 2024-03-13

基金项目: 上海市科技计划资助项目(20dz1205103); 中国电力工程顾问集团有限公司科研资助项目(DG2-J01-2023); 上海市 IV 类高峰学科“能源科学与技术”资助项目

作者简介: 姚向昱(1978—), 男, 正高级工程师, 工程硕士, 研究方向为火电厂热机设计、烟气污染物治理。

王宁泽(通信作者), 男, 硕士研究生, E-mail: 634946102@qq.com。

were explored. Results show that as the NH_3 mixing ratio increases, the flame temperature at the center of the furnace decreases significantly, the high-temperature area reduces, and the flame temperature inside the furnace shows an overall downward trend, this is mainly due to the lower theoretical flame temperature of NH_3 , which prolongs the low-temperature jet and causes the delay of ignition. At the NH_3 nozzle position, the NH_3 concentration reaches its peak. As combustion progresses, NH_3 is basically consumed, and there will be no ammonia escape at the furnace outlet. Under air staged combustion, the low oxygen concentration in the main combustion zone of the furnace is conducive to the occurrence of NH_3 reduction reaction. As the NH_3 mixed fuel ratio increases, the NO_x emission concentration at the furnace outlet decreases, which results from the reduction reaction between NH_3 and NO in the furnace, inhibiting the generation of NO . When NH_3 is sprayed into the furnace in different ways, the NO_x concentration at the furnace outlet is lower when using the oil gun nozzle for injection. This is because the position of the oil gun nozzle is closer to the main combustion zone.

Key words: coal-fired boiler; ammonia coal mixed combustion; combustion characteristic; NO_x emission

在双碳目标背景下,我国持续推动能源结构转型,致力于提高清洁能源占比,以应对环境污染和气候变化等问题。然而,可再生清洁能源发电技术存在不稳定性和成本高昂等问题,使得近零排放的风光发电取代燃煤发电的主导地位仍存在技术过渡期。当前,我国煤电装机容量占比约 43.8%,仍然是我国电力的主要来源^[1]。

NH_3 作为零碳清洁燃料,具有易制备、易储存运输等优点,在燃煤锅炉中采用 NH_3 /煤混烧是一种可行的降低 CO_2 排放的手段^[2]。目前,国内外针对氨燃料参与燃烧的研究尚处于起步阶段,仅有少数研究人员开展了数值模拟和实验研究。Zhang 等^[3]通过计算流体力学(CFD)模拟方法对 8.5 MW 燃烧设备进行不同比例混氨混烧模拟。Tamura 等^[4]对台式炉开展燃烧实验研究,分析了分别从不同位置(侧墙、氨枪燃烧器、燃煤喷口)注入 NH_3 时 NO_x 的排放水平。马仑等^[5]以 20 kW 沉降炉为研究对象,研究了不同氨注入位置对燃烧及 NO_x 排放的影响。Lyu 等^[6]针对 600 MW 前后墙对冲燃煤锅炉进行不同比例氨混燃模拟研究,采用了空气分级燃烧技术。汪鑫等^[7]在一台燃烧炉中研究了在空气分级燃烧情况下不同燃尽风位置对 NO_x 减排的影响。Jin 等^[8]对 1 050 MW 燃煤锅炉进行了低负荷下氨煤混燃模拟,研究了不同燃尽风比(4%~24%)对锅炉稳燃和 NO_x 排放的影响。

在目前已有的研究中,大多 NH_3 是和一次风混合后喷入的。本文以某 600 °C 超超临界 650 MW 电站燃煤机组为研究对象,结合 650~700 °C 超超临界电站煤粉锅炉的总体方案,在每层燃烧中心位置建立独立的 NH_3 喷口,研究在空气分级燃烧条件

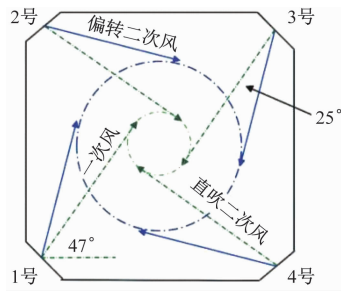
下,不同 NH_3 混燃比对炉膛内温度分布和物质分布的影响,以及不同 NH_3 喷入方式对 NO_x 排放的影响,以期为今后 NH_3 /煤混燃方法的实际应用提供参考。由于更高参数的 650~700 °C 锅炉总体方案与现有超超临界锅炉类似,本研究不仅适用于现有参数的大容量电站煤粉锅炉,还适用于 650~700 °C 参数的电站煤粉锅炉。

1 研究对象及模型建立

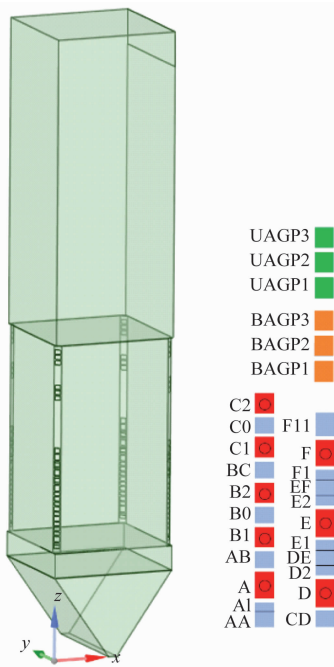
图 1 为本数值模拟研究中使用的 650 MW 超超临界燃煤锅炉机组模型。该锅炉机组采用四角切圆燃烧方式,采用空气分级燃烧技术,其炉膛长、宽、高分别为 17.71、17.71 和 91.2 m。燃烧器采用四角切圆的布置形式,配备 6 台磨煤机,在锅炉运行时 1 台磨煤机备用。主燃烧器包含 8 层煤粉燃烧器,分别为 A、B1、B2、C1、C2、D、E 和 F。同时,共有 14 层二次风喷口,分别为 AA、AI、AB、B0、BC、C0、CD、DII、DE、EI、EII、EF、FI、FII,其中 DII、EI、EII、FI 为偏置二次风,这些偏置二次风采用顺时针的偏角布置方式,形成启旋风。此外,有 2 组燃尽风均分 3 层布置,分别为低位燃尽风(BAGP1~BAGP3)和高位燃尽风(UAGP1~UAGP3)。燃尽风通过水平摆动调整逆时针的偏角,形成消旋二次风。还有 3 组油枪喷口分别位于 AB 层、B0 层、DE 层的中心位置。由于过热器和再热器对燃料燃烧不会产生影响,因此在本模拟研究中进行了简化处理。

2 工况设计及边界条件

为了研究 NH_3 以独立喷口喷入锅炉的方式对锅炉的影响,在每层煤粉燃烧器中心位置建立了与



(a) 切圆布置结构



(b) 燃烧器结构图

图 1 锅炉模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the boiler model

油枪尺寸相同的 NH_3 喷口。

本次模拟共设计了 7 个不同的工况,用于探讨大型锅炉在空气分级燃烧下, NH_3 混燃比和 NH_3 喷入方式对燃烧特性的影响。工况参数见表 1,其中工况 1 为纯燃煤工况,工况 2~工况 5 为不同混燃比下 NH_3 从 NH_3 喷口送入,在 10% 混燃比时,仅 B1 层 NH_3 喷口喷氨,随着混燃比每增加 10%,就依次向上多开启 1 层 NH_3 喷口喷氨。在每种工况下,输入炉膛的总热量和炉膛内总空气量保持不变。其中,一次风温、二次风温和燃尽风温分别为 349、621 和 621 K,一次风率、二次风率和燃尽风率分别为 21.54%、74.46% 和 38.00%。模拟采用设计煤种晋北煤,煤的工业分析和元素分析见表 2,煤粉的粒度分布遵循 Rosin-Rammler 分布^[9],煤的低位发热量为 21.97 MJ/kg,本研究中使用的 NH_3 低位发热量为 18.60 MJ/kg。

3 网格划分及网格无关性验证

根据锅炉实际尺寸建立了模型,并对其进行了网格划分。本文采用结构化网格,模拟网格如图 2 所示。为了验证网格无关性,在工况 1 下分别对网格数为 65 万、88 万、163 万的模型进行模拟,以检查网格数量对模拟结果的影响。

图 3 为不同数量网格模型模拟得到的炉膛高度方向横截面的平均烟气温度。由图 3 可以看出:不同网格数下炉膛高度方向横截面的平均烟气温度水平差异较小,整体趋于一致。表 3 为在工况 1 下采

表 1 模拟工况

Tab. 1 Simulated working conditions

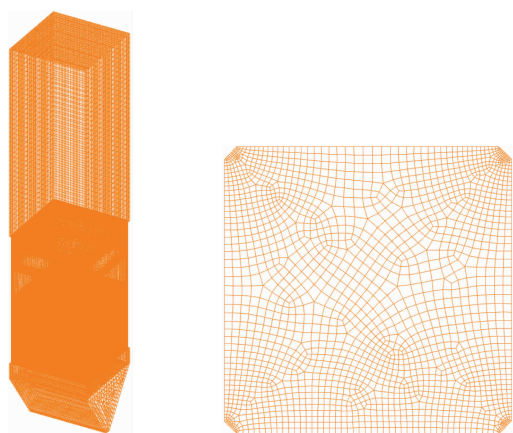
工况	NH_3 混燃比/%	NH_3 喷入方式	燃料质量流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)		一次风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	NH_3 流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
			煤	NH_3		
1	0		64.91	0	24.43	0
2	10	NH_3 喷口	58.41	7.67	24.43	69.77
3	30	NH_3 喷口	45.43	22.99	24.43	69.77
4	50	NH_3 喷口	32.45	38.33	24.43	69.77
5	70	NH_3 喷口	19.47	53.66	24.43	69.77
6	30	油枪喷口	45.43	22.99	24.43	104.65
7	30	随一次风	45.43	22.99	26.36	26.36

表 2 煤质分析

Tab. 2 Coal quality analysis

单位:%

工业分析				元素分析				
$w(V_{\text{ar}})$	$w(\text{FC}_{\text{ar}})$	$w(A_{\text{ar}})$	$w(M_{\text{ar}})$	$w(C_{\text{ar}})$	$w(H_{\text{ar}})$	$w(O_{\text{ar}})$	$w(N_{\text{ar}})$	$w(S_{\text{ar}})$
26.85	44.62	14.53	14.00	57.09	3.66	8.88	1.22	0.62



(a) 模拟区域的 3D 网格图 (b) 主燃烧区域的网格界面图

图 2 模拟网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulated grid

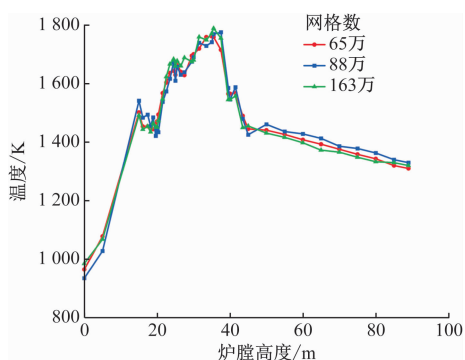


图 3 不同网格数量下平均温度分布

Fig. 3 Average temperature distribution at different number of grids

表 4 化学反应动力学参数

Tab. 4 Kinetic parameters of chemical reactions

燃烧类型	序号	化学反应	指前因子 A	温度指数 n	活化能 E/(J·kmol ⁻¹)	参考文献
煤粉燃烧	1	$C_{1.6}H_{2.7}O_{0.41}N_{0.064}S_{0.014} + 1.28O_2 \longrightarrow 1.6CO + 1.35H_2O + 0.0324N_2 + 0.0143SO_2$	2.119×10^{11}	0	2.027×10^8	[10]
	2	$CO + 0.5O_2 \longrightarrow CO_2$	2.239×10^{12}	0	1.702×10^8	[11]
	3	$H_2 + 0.5O_2 \longrightarrow H_2O$	3.900×10^{17}	0	1.700×10^8	[12]
NH ₃ 燃烧	4	$NH_3 \longrightarrow 0.5N_2 + 1.5H_2$	0.185	1.25	6.900×10^7	[13]
	5	$NH_3 + O_2 \longrightarrow NO + H_2O + 0.5H_2$	3.500×10^3	7.65	5.240×10^8	[14]
	6	$NH_3 + NO \longrightarrow N_2 + H_2O + 0.5H_2$	4.240×10^5	5.30	3.500×10^8	[14]

计,NO_x 在炉膛中的分布对流动、传热和燃烧过程几乎没有影响^[15]。因此在获得收敛的温度场、速度场和组分浓度场后添加 NO_x 子模型,采用燃烧后后处理的方法来计算炉膛内 NO_x 浓度。本研究中仅考虑了热力型 NO_x 和燃料型 NO_x,采用 β 概率密度函数(β-PDF),考虑了湍流中温度和物质成分波动对 NO 形成的影响^[16]。采用扩展的 Zeldovich 机理来描述热力型 NO_x 的形成,并使用部分平衡方法估计 O 和 OH 自由基的局部浓度。在 NH₃ 和煤共烧的情况下两者都会生成燃料型 NO_x,NH₃-N 通过

表 3 网格无关性验证
Tab. 3 Grid independence verification

网格数	炉膛出口		
	烟温/K	O ₂ 质量分数/%	NO _x 质量浓度/(mg·m ⁻³)
65 万	1 265	6.72	589
88 万	1 277	6.83	578
163 万	1 281	6.56	567

用不同网格数量模拟得出的炉膛出口烟温、炉膛出口 O₂ 质量分数和 NO_x 质量浓度。综合考虑计算精度和效率,本模拟研究选取 88 万网格数进行模拟。

4 数学模型

采用 ANSYS FLUENT 软件进行模拟计算,气相湍流模型采用 Realizable k-ε 模型,关于传热过程,采用 P1 辐射模型进行炉膛内辐射换热计算。

4.1 燃烧模型

煤的燃烧过程可分为 3 个步骤:煤粉热解、气相燃烧和焦炭燃烧。煤粉热解采用双方程竞争反应模型,气相燃烧反应采用有限速率/涡耗散模型,焦炭燃烧则采用表面反应模型。煤粉颗粒的运动采用拉格朗日随机轨道模型。采用 3 个化学反应来描述 NH₃ 的燃烧和热解。相关反应及参数见表 4。

4.2 NO_x 模型

与主要烟气成分相比,NO_x 的浓度可以忽略不

燃烧产生燃料型 NO。煤粉燃烧过程中将焦炭 N 和挥发性 N 的质量分数比设为 6:4,焦炭 N 直接氧化为 NO,90% 的挥发性 N 转换为 HCN,其余转换为 NH₃,之后 HCN 和 NH₃ 被氧化为 NO,最后产生的 NO 通过还原产生 N₂^[17-20]。

5 结果和讨论

5.1 NH₃ 混燃比对温度分布的影响

图 4 为不同混燃比下炉膛中心纵截面的温度云图,其中 x 轴为炉膛宽度方向,y 轴为炉膛高度方

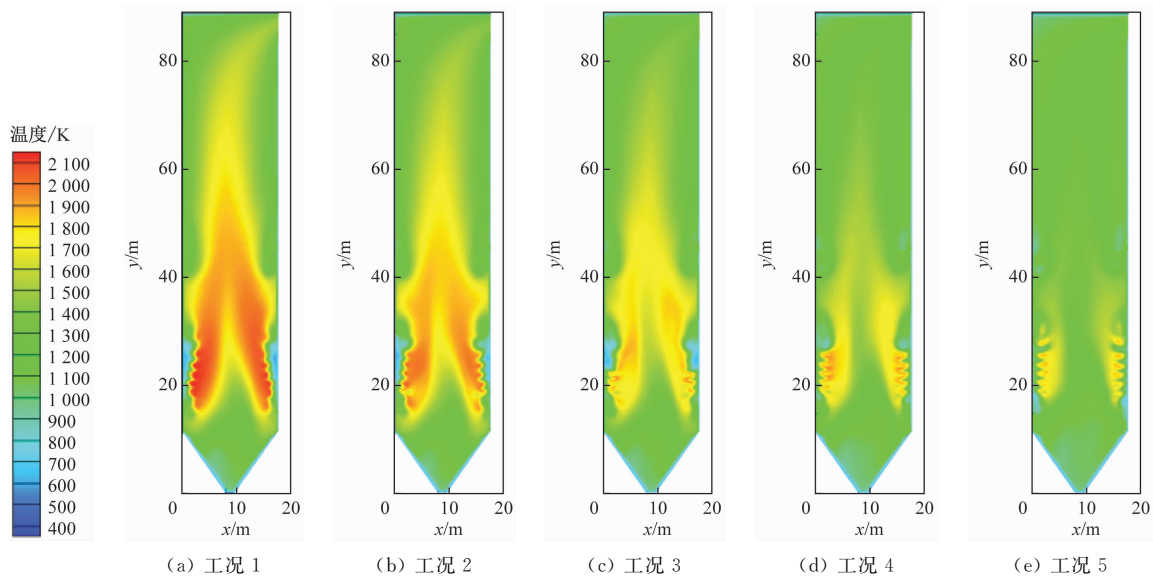


图 4 不同混燃比下炉膛中心纵截面的温度云图

Fig. 4 Temperature cloud map of the longitudinal section at the center of the furnace under different mixed fuel ratios

向。沿炉膛高度方向横截面的平均烟气温度如图 5 所示。在 18~30 m 内可以观察到较高温,对应主燃区域,煤粉和 NH_3 燃烧产生大量热。随着 NH_3 混燃比增加,炉膛中心火焰温度明显降低,高温区域减少。炉膛内烟气温度有一定波动,整体呈下降趋势。由图 5 可以明显看出, NH_3 从 NH_3 喷口喷入时, NH_3 喷口区域温度相比燃煤工况有一定程度降低,这主要是因为 NH_3 理论火焰温度较低,因此会延长低温射流,使着火延迟,这对燃烧稳定性是非常不利的,在高比例 NH_3 混燃时可能会出现燃烧不稳定、炉膛熄火等问题。锅炉出口烟度随 NH_3 混燃比的增加而降低,这是因为随 NH_3 混燃比增加,烟气比定压热容增加,烟气量变大,因此在总输入热量相同时烟气的温度有所降低,且随 NH_3 混燃比增加,炉膛中火焰长度明显降低,高温区域远离炉膛出口位置,炉膛出口烟温降低。

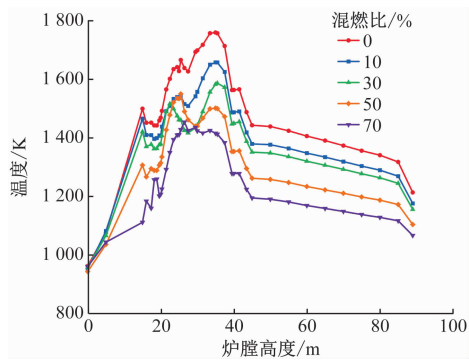


图 5 不同混燃比下平均烟气温度

Fig. 5 Average flue gas temperature under different mixed fuel ratios

5.2 NH_3 混燃比对物质分布的影响

图 6 为沿炉膛高度方向主燃区(16~32 m)横

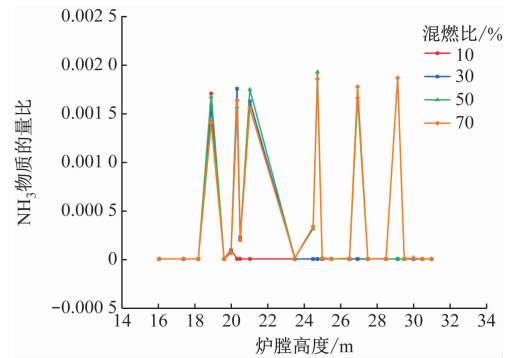


图 6 不同混燃比下 NH_3 平均物质的量比

Fig. 6 Average NH_3 molar ratio under different mixed fuel ratios

截面的 NH_3 平均物质的量比。在燃煤工况下,由于 NH_3 浓度忽略不计,故图中仅显示 NH_3 混燃工况对应横截面平均物质的量比。

由图 6 可以看出:当 NH_3 混燃比为 10% 时,其峰物质的量比仅在 18.91 m 位置(对应 B1 层 NH_3 喷口)出现。随着 NH_3 混燃比的增加, NH_3 峰物质的量比出现的点位增多,且对应于每层 NH_3 喷口所在位置。这表明 NH_3 在 NH_3 喷口处被快速消耗。随着 NH_3 混燃比的增加,炉膛内平均火焰温度降低,但炉膛烟道温度远高于 NH_3 的燃点(924 K)。这代表锅炉中有足够的时间和空间使 NH_3 完全反应,因此不会出现 NH_3 逃逸现象。

图 7 为沿炉膛高度方向横截面的 O_2 平均物质的量比。由图 7 可以看出:在主燃区, O_2 平均物质的量比急剧下降,这是因为在空气分级燃烧下,处于主燃区(A 层~E 层)内的 NH_3 和煤在燃烧时会消耗大量 O_2 ,致使该区域的 O_2 浓度达到最低值。由于 F 磨煤机处于备用状态,在此期间没有燃料进

入,经过 2 层二次风(F1、F2)补充 O₂ 后,O₂ 浓度小幅上升。在主燃区域和燃尽风区域中间位置,未燃尽燃料继续消耗 O₂ 燃烧,O₂ 浓度降低。随后,在燃尽风区域(37.62~44.25 m)补充 O₂,此时燃料基本被消耗完,O₂ 平均物质的量比在上升后趋于稳定。

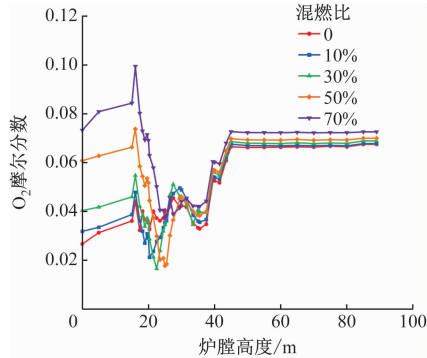


图 7 不同混燃比下 O₂ 平均物质的量比
Fig. 7 Average O₂ molar ratio under different mixed fuel ratios

图 8 为沿炉膛高度方向横截面的 CO₂ 平均物质的量比。由图 8 可以看出:随着 NH₃ 混燃比增加,CO₂ 平均物质的量比显著降低,因为 NH₃ 是无碳燃料,燃烧不会产生 CO₂,在 NH₃ 混燃比为 70% 时,炉膛出口 CO₂ 平均物质的量比仅为燃煤工况的 30% 左右。

5.3 NH₃ 混燃比对 NO_x 生成的影响

NH₃ 中含有 N 元素,NH₃ 和 O₂ 发生氧化反应(NH₃+O₂→NO+H₂O+0.5H₂)会使 NO 生成量增加,同时 NH₃ 又会和 NO 发生还原反应(NH₃+NO→N₂+H₂O+0.5H₂)抑制 NO 的生成,因此 NH₃ 混燃对 NO_x 的生成和还原过程有着显著影响。

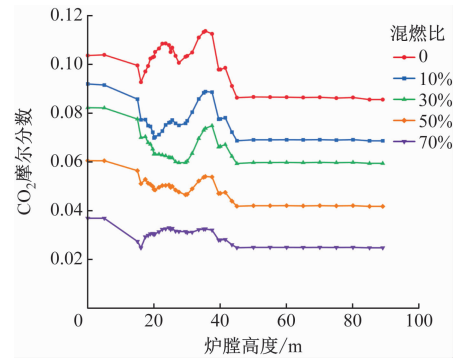


图 8 不同混燃比下 CO₂ 平均物质的量比
Fig. 8 Average CO₂ molar ratio under different mixed fuel ratios

图 9 为不同混燃比下炉膛中心纵截面的 NO 物质的量比云图。由图 9 可以看出:最高 NO 物质的量比主要集中在燃烧器喷口附近,并且随着 NH₃ 混燃比的增加,炉膛内 NO 浓度水平逐渐降低。在每一层 NH₃ 喷口位置,NO 物质的量比相较于纯燃煤工况有所降低。这是因为随着 NH₃ 混燃比的增加,炉膛内温度水平降低,使得热力型 NO 的生成量减少,而且空气分级燃烧和 NH₃ 的还原作用使炉内呈现还原性氛围,促使 NO 被还原成 N₂。在燃尽风区域,随着 O₂ 的大量注入,NO 被稀释,此后未燃尽燃料燃烧会产生少量 NO。

图 10 为不同 NH₃ 混燃比下炉膛出口 NO_x 排放质量浓度。由图 10 可以看出:随着 NH₃ 混燃比增加,炉膛出口 NO_x 排放质量浓度有所降低,这对于 NO_x 减排是有利的。

5.4 不同 NH₃ 喷入方式对 NO_x 的影响

图 11 为沿炉膛高度方向横截面的平均烟气温

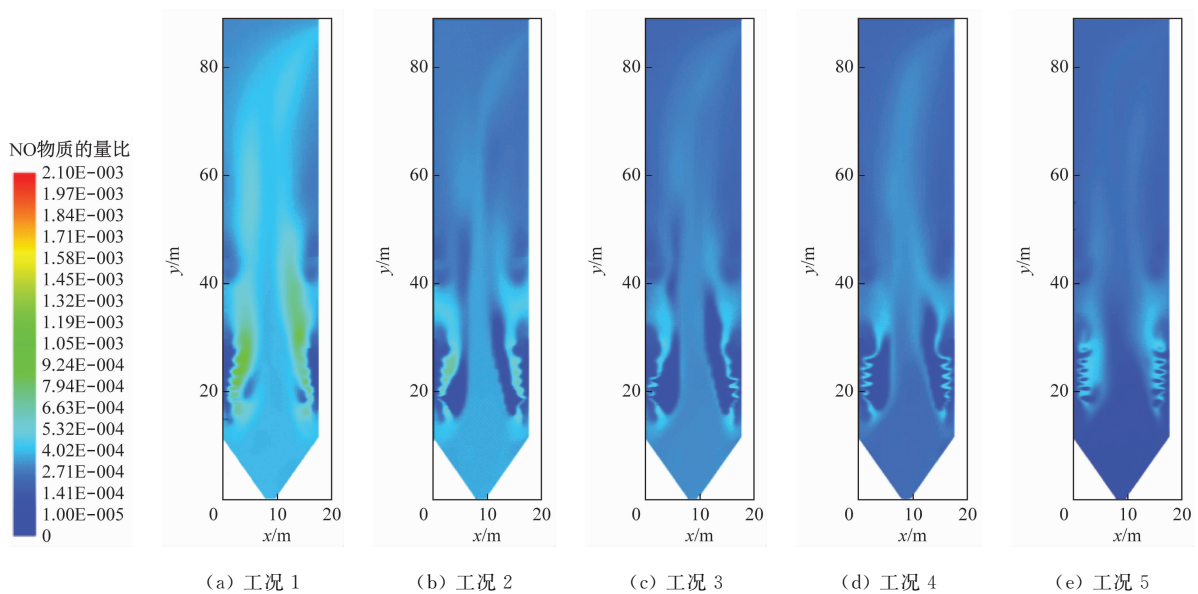


图 9 不同混燃比下炉膛中心纵截面 NO 物质的量比分布云图

Fig. 9 Cloud map of NO molar ratio distribution in the longitudinal section of the furnace center under different mixed fuel ratios

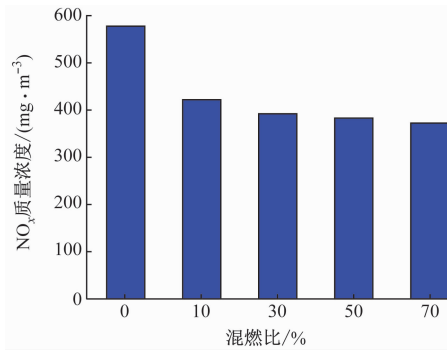


图 10 不同混燃比下炉膛出口 NO_x 质量浓度

Fig. 10 NO_x mass concentration at furnace outlet with different mixed fuel ratios

度。由图 11 可以看出:在相同 NH₃ 混燃比条件下,炉膛内的平均温度变化不大,高温烟气主要集中在主燃区。当 NH₃ 与一次风预混后送入炉膛时,相较于 NH₃ 以油枪喷入和 NH₃ 喷口喷入时温度波动范围小。这是因为 NH₃ 和一次风预混稀释了 NH₃,而当 NH₃ 以油枪喷入和 NH₃ 喷口方式喷入时,高浓度的 NH₃ 会集中在某几层喷口处,由于 NH₃ 理论火焰温度较低,使得这几层 NH₃ 喷口处的温度出现明显降低,之后随着煤粉燃烧释放出大量热量,温度又会上升。

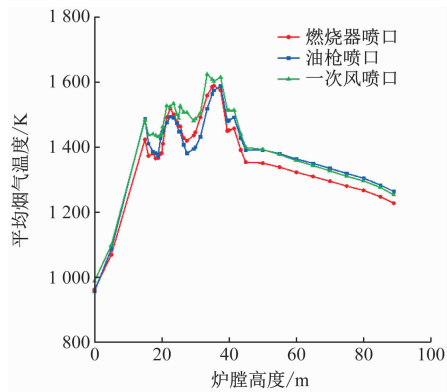


图 11 炉膛高度方向横截面的平均烟气温度

Fig. 11 Average flue gas temperature in the cross-section of the furnace height direction

图 12 为炉膛出口处的 NO_x 排放情况。由图 12 可以看出: NH₃ 由 NH₃ 喷口和油枪喷口喷出时,其 NO_x 排放质量浓度低于一次风喷口喷出时的情况。这可能是因为当 NH₃ 浓度较高时,能够形成更好的还原性氛围,促进还原反应(NH₃ + NO → N₂ + H₂O + 0.5H₂)的发生。当 NH₃ 混燃比为 30% 时,油枪喷口喷氨位置相较于燃烧器喷口喷氨位置更接近于主燃区。结合图 11 可以看出,油枪喷口喷氨时 NO_x 排放质量浓度略微低于 NH₃ 喷口喷氨时的

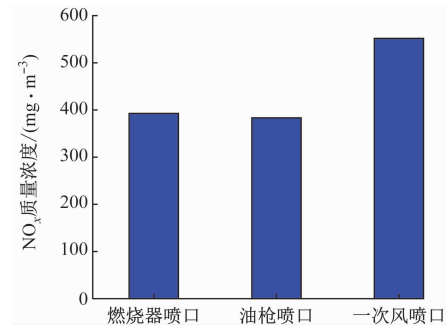


图 12 炉膛出口处的 NO_x 质量浓度

Fig. 12 NO_x mass concentration at the furnace outlet

情况。因此,建议喷氨位置靠近主燃区,这样不仅能够实现高效燃烧,还能有效抑制 NO 的生成。

6 结论

(1) 随着 NH₃ 混燃比的增加,炉膛中心火焰温度呈现出明显降低的趋势,高温区范围也随之减少。炉膛内火焰温度存在一定波动,但整体呈下降趋势。这主要是因为 NH₃ 理论火焰温度较低,因此会延长低温射流,进而导致着火延迟,对燃烧稳定性不利。

(2) 在 NH₃ 喷口的位置, NH₃ 浓度达到峰值。随着燃烧进行, NH₃ 基本被消耗完,在炉膛出口处不会出现氨逃逸现象。

(3) 在空气分级燃烧的条件下,炉膛主燃区域的 O₂ 浓度较低,有利于 NH₃ 还原反应的发生。

(4) 随着 NH₃ 混燃比增加,炉膛出口 NO_x 排放质量浓度降低,这是由于炉膛内 NH₃ 会和 NO 发生还原反应(NH₃ + NO → N₂ + H₂O + 0.5H₂),抑制了 NO 的生成。

(5) 当 NH₃ 以不同方式喷入炉膛时,使用油枪喷口喷入时,炉膛出口 NO_x 浓度较低。这是因为油枪喷口位置更靠近主燃区,因此建议喷氨位置设置在靠近主燃区的地方,这不仅能够实现高效燃烧,还能有效抑制 NO 的生成。

参考文献:

[1] 孙月巧, 郑宏飞, 孔慧. 碳中和背景下煤电转型关键技术与展望[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1013-1023.
SUN Yueqiao, ZHENG Hongfei, KONG Hui. Key technologies and prospects of coal power transformation under carbon neutrality background[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1013-1023.

[2] 李晨鹏, 李政, 刘培, 等. 应用无碳氨的氨煤混燃机组平准化电力成本计算[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1042-1050.

- LI Chenpeng, LI Zheng, LIU Pei, et al. Levelized cost calculation of electricity in ammonia-coal co-combustion unit using green ammonia[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2022, 42(11): 1042-1050.
- [3] ZHANG Juwei, ITO T, ISHII H, et al. Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: effect of ammonia co-firing ratio [J]. **Fuel**, 2020, 267: 117166.
- [4] TAMURA M, GOTOU T, ISHII H, et al. Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2 MW-thermal pulverised coal firing furnace[J]. **Applied Energy**, 2020, 277: 115580.
- [5] 马仑, 方庆艳, 张成, 等. 深度空气分级下煤粉耦合氨燃烧及 NO 生成特性[J]. **洁净煤技术**, 2022, 28(3): 201-213.
- MA Lun, FANG Qingyan, ZHANG Cheng, et al. Combustion and NO formation characteristics of pulverized coal co-firing with ammonia in a deep-air staging condition[J]. **Clean Coal Technology**, 2022, 28(3): 201-213.
- [6] LYU Qiang, WANG Ruru, DU Yongbo, et al. Numerical study on coal/ammonia co-firing in a 600 MW utility boiler[J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2023, 48(45): 17293-17310.
- [7] 汪鑫, 陈钧, 范卫东. 燃煤电站锅炉掺氨燃烧与排放特性综述[J]. **洁净煤技术**, 2022, 28(8): 25-34.
- WANG Xin, CHEN Jun, FAN Weidong. Review on combustion and emission characteristics of coal-fired utility boilers ammonia/coal co-firing[J]. **Clean Coal Technology**, 2022, 28(8): 25-34.
- [8] JIN Wei, SI Fengqi, CAO Yue, et al. Numerical research on ammonia-coal co-firing in a 1 050 MW coal-fired utility boiler under ultra-low load: effects of ammonia ratio and air staging condition [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2023, 233: 121100.
- [9] 李可君, 李芳芹, 任建兴, 等. 富氧燃烧对投运混煤锅炉低负荷稳燃性的影响[J]. **热能动力工程**, 2023, 38(5): 88-96.
- LI Kejun, LI Fangqin, REN Jianxing, et al. Influence of oxygen enriched combustion on low load combustion stability of mixed coal boiler[J]. **Journal of Engineering for Thermal Energy and Power**, 2023, 38(5): 88-96.
- [10] CHOI M, PARK Y, LI Xinzhuo, et al. Numerical evaluation of pulverized coal swirling flames and NO_x emissions in a coal-fired boiler: effects of co-and counter-swirling flames and coal injection modes[J]. **Energy**, 2021, 217: 119439.
- [11] DROSATOS P, NIKOLOPOULOS N, NIKOLOPOULOS A, et al. Numerical examination of an operationally flexible lignite-fired boiler including its convective section using as supporting fuel pre-dried lignite[J]. **Fuel Processing Technology**, 2017, 166: 237-257.
- [12] LIU Jingzhang, CHEN Sheng, LIU Zhaohui, et al. Mathematical modeling of air-and oxy-coal confined swirling flames on two extended eddy-dissipation models[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2012, 51(2): 691-703.
- [13] MONNERY W D, HAWBOLDT K A, POLLOCK A E, et al. Ammonia pyrolysis and oxidation in the Claus furnace[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2001, 40(1): 144-151.
- [14] BROUWER J, HEAP M P, PERSHING D W, et al. A model for prediction of selective noncatalytic reduction of nitrogen oxides by ammonia, urea, and cyanuric acid with mixing limitations in the presence of CO [J]. **Symposium (International) on Combustion**, 1996, 26(2): 2117-2124.
- [15] WANG Chang'an, CHEN Meijing, ZHAO Pengbo, et al. Investigation on co-combustion characteristics and NO_x emissions of coal and municipal sludge in a tangentially fired boiler [J]. **Fuel**, 2023, 340: 127608.
- [16] SMOOT L D, SMITH P J. Coal combustion and gasification[M]. New York, USA: Springer, 1985.
- [17] NARUSE I, YAMAMOTO Y, ITOH Y, et al. Fundamental study on N₂O formation/decomposition characteristics by means of low-temperature pulverized coal combustion[J]. **Symposium (International) on Combustion**, 1996, 26(2): 3213-3221.
- [18] VISONA S P, STANMORE B R. Modeling NO_x release from a single coal particle I. formation of NO from volatile nitrogen [J]. **Combustion and Flame**, 1996, 105(1/2): 92-103.
- [19] VISONA S P, STANMORE B R. Modeling NO_x release from a single coal particle II. formation of NO from char-nitrogen[J]. **Combustion and Flame**, 1996, 106(3): 207-218.
- [20] SONG Y H, BEÉR J M, SAROFIM A F. Reduction of nitric oxide by coal char at temperatures of 1 250-1 750 K [J]. **Combustion Science and Technology**, 1981, 25(5/6): 237240.