

DOI: 10.19666/j.rlfid.202409213

4 MW 锅炉氨煤混燃数值模拟及试验研究

马兆耀^{1,2}, 张向宇¹, 文海南^{1,2}, 刘雯³, 王志超¹, 余波²

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;

3.华能(天津)煤气化发电有限公司, 天津 300452)

[摘要] 燃煤掺氨燃烧是实现煤电机组减碳的重要路径之一, 为进一步探究高比例掺氨燃烧的可行性, 建立了氨煤混燃的机理模型, 采用计算流体力学(CFD)模拟计算了4 MW 机组锅炉氨煤混燃及纯氨燃烧过程, CFD 计算结果与试验数据误差小于3%。试验结果表明: 氨煤混燃时, 氨掺烧比例每提高20%, 火焰温度下降约30 °C, 二氧化碳体积分数降低约20%; 当掺氨比例从0增加到40%时, 炉膛出口NO质量浓度增加约77.33%, 飞灰含碳量由4.65%增加至6.16%; 氨掺烧比例从0增加到60%时NO质量浓度增加约136.44%; 氨煤混燃时过量空气系数选择1.15, 燃尽性和氮氧化物生成达到最优; 氨燃料分两级投入方式相比于不分级方式能够使炉膛出口NO体积分数降低31.07%; 与煤粉和氨煤混燃火焰相比, 纯氨燃烧时火焰温度低, 着火距离长且切圆直径较大, 纯氨燃烧时炉膛出口NO质量浓度为475 mg/m³, 逃逸氨量接近于0。

[关键词] 燃煤锅炉; 氨燃烧; 氮氧化物; 氨逃逸; 燃料分级

[引用本文格式] 马兆耀, 张向宇, 文海南, 等. 4 MW 锅炉氨煤混燃数值模拟及试验研究[J]. 热力发电, 2025, 54(5): 64-72.
MA Zhaoyao, ZHANG Xiangyu, WEN Hainan, et al. Numerical simulation and experimental study of ammonia-coal co-firing in a 4 MW boiler[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(5): 64-72.

Numerical simulation and experimental study of ammonia-coal co-firing in a 4 MW boiler

MA Zhaoyao^{1,2}, ZHANG Xiangyu¹, WEN Hainan^{1,2}, LIU Wen³, WANG Zhichao¹, YU Bo²

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2.School of Low-Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3.Huaneng (Tianjin) Coal Gasification Power Generation Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: Ammonia-coal co-firing is one of the important ways to achieve carbon reduction of coal-fired thermal power units, but the research on high proportion ammonia co-firing is rare. In order to further explore the feasibility of high-proportion ammonia co-firing, the mechanism model of ammonia-coal co-firing is established, and the ammonia-coal co-firing and pure ammonia combustion process of 4 MW boiler is simulated by using computational fluid dynamics (CFD) method. The error between CFD calculation results and experimental data is less than 3%. The experimental results show that, when ammonia is co-fired with coal, the flame temperature decreases by about 30 °C and the carbon dioxide volume fraction decreases by about 20% for every 20% increase in the co-firing ratio. When the ammonia co-firing ratio is increased from 0 to 40%, the NO volume fraction at the furnace outlet increases by about 77.33%, and the carbon content in fly ash increases from 4.65% to 6.16%; when it is increased from 0 to 60%, the NO volume fraction increases by about 136.44%. When excess air ratio of ammonia-coal co-firing is 1.15, the fuel burnout and nitrogen oxide generation are optimized. The two-stage input of ammonia fuel can reduce the NO volume fraction at the furnace outlet by 31.07% compared

收稿日期: 2024-09-22 网络首发日期: 2025-03-26

基金项目: 陕西省重点研发计划一般项目(2024GX-YBXM-458)

Supported by: General Projects under the Key Research and Development Program of Shaanxi Province (2024GX-YBXM-458)

第一作者简介: 马兆耀(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为燃烧数值模拟, 1294558268@qq.com。

通信作者简介: 张向宇(1984), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为低碳燃料掺烧技术, zhangxiangyu214@163.com。

with the ungraded input. Compared with the combustion flame of coal combustion and ammonia-coal co-firing, the flame temperature of pure ammonia combustion is lower, the ignition distance is longer and the tangent circle diameter is larger. When pure ammonia is fired, the NO mass concentration at the furnace outlet is 475 mg/m³, and the escaping ammonia concentration is close to 0.

Key words: coal-fired boiler; ammonia combustion; nitrogen oxides; ammonia escape; fuel staging

我国正在加快构建低碳、安全、经济的新型电力系统,为解决新能源的消纳问题和增强电网的调峰能力,利用新能源制备绿氢作为储能载体获得广泛关注^[1]。由于氢在储运过程中存在氢脆和泄漏的问题,因此发展绿氢的制备和使用技术,替代氢作为储能介质大规模存储可再生能源,不仅可以充分利用现有合成氨产业链的基础设施,也将有助于解决新能源消纳难题^[2]。

新能源制氢-合成氨-氨煤混燃可以实现新能源与火电深度耦合降碳,符合我国战略性新兴产业发展要求,可以成为解决化石能源替代、实现火电机组降碳的有效途径之一,十分契合我国以煤为主的能源体系,对助力我国实现“双碳”目标和氢能产业发展具有十分重要的战略意义^[3]。然而,氨煤混燃仍然存在一系列技术问题亟待解决,包括氮氧化物的生成机理和氨燃烧的反应机理尚不清晰^[4],氨燃料的反应性较低,火焰极限较窄,着火温度也更高^[5],氨气贫燃会产生较高的氮氧化物排放,富燃则会产生较高的氨逃逸。

国内外针对氨煤混燃开展了大量试验研究。日本 IHI 公司在 10 MW^[6]试验炉上开展了 25% 掺氨燃烧试验。Yamamoto 等人^[7]利用 760 kW 卧式试验炉研究了氨煤混燃掺烧比为 20% 条件下氨注入位置对 NO_x 排放的影响。闫卫东等^[8]在沉降炉上研究了掺氨燃烧对 NO_x 排放的影响,发现控制较低的温度和空燃比是抑制氨向氮氧化物转化的关键。汪鑫等^[9-11]分别在沉降炉和 45 kW 燃烧炉上研究了烟煤与氨混燃过程中,掺氨比例、空气分级方式和燃烧温度对燃烧特性和污染物排放的影响。王志超等^[12]利用一维火焰炉和着火炉等试验装置研究了氨与典型烟煤混燃时的燃烧特性,研究表明氨与煤预混燃不利于 NO_x 控制。牛涛等^[13]在 40 MW 机组燃煤锅炉上完成了氨掺烧比例为 25% 的中试验证。

数值模拟方法被广泛应用于探究氨煤混燃过程中的燃烧特性和污染物生成特性。Zhang 等人^[14]模拟研究了 8.5 MW 的燃煤锅炉掺烧比在 0~80% 内变化时 NO_x 和未燃尽氨的排放状况,发现随着掺氨比例增加,烟气温度下降对炉内的燃烧和燃尽特性产生了不利影响。金炜等^[15]模拟研究了在 1 050 MW

机组锅炉超低负荷运行时掺氨的影响,表明掺烧比增大及烟气温度降低会对燃烧产生负面影响。吕强等^[16]对 600 MW 电站锅炉进行了数值模拟,结果表明通过富氧燃烧可补偿掺氨导致的锅炉温度损失。

国内有多家电厂开展了氨煤混燃的示范研究。皖能铜陵电厂在 300 MW 煤电机组上实现了掺氨 10%~35%,机组在 100~300 MW 负荷下能平稳运行。台山电厂 630 MW 燃煤发电机组已完成高负荷下锅炉掺氨燃烧试验,氨燃尽率达到 99.99%。目前,国内相关试验的掺氨比例逼近 50%,更高比例掺氨燃烧的可行性仍需要开展进一步研究。

本文首先建立了氨燃烧的机理模型,对 4 MW 机组锅炉氨煤混燃及纯氨燃烧进行数值计算,并与试验数据进行对比,验证了数值模型在高比例氨煤混燃模拟中的准确性,为燃煤机组掺氨工程设计提供参考。

1 氨煤混燃机理模型及计算

1.1 氨煤混燃机理模型

煤和氨燃烧相关的反应机理及其动力学参数见表 1^[17]。混合物中的氢燃烧和水气反应见表 1 中 R3、R4。氨的热解和燃烧过程采用简化的 R8—R10 机理模型^[18]。气相湍流采用标准 $k-\epsilon$ 模型,辐射传热采用 P1 模型^[19],气体吸收系数的计算采用灰气体加权和 WSGGE 模型^[20],煤粉颗粒的运动采用拉格朗日的方法。假定煤粉粒子符合随机轨道模型且与气相耦合,计算过程中考虑颗粒间相互作用。焦炭表面燃烧过程采用多步表面反应模型,气相非预混燃烧过程采用有限速率/涡耗散模型,挥发分的燃烧采用两步均相反应^[21-22]。各配风入口设置为速度入口边界,炉壁为绝热边界,壁面发射率为 0.8。

氨在燃烧过程中既作为燃料又参与还原反应,因此采用多步化学反应模拟掺烧过程中 NO 的生成与转化过程。忽略快速型 NO 的生成,仅对热力型 NO 和燃料型 NO 的转化进行模拟^[23]。热力型 NO 生成采用 Extended Zeldovich 模型,使用部分平衡法计算中间产物 [O] 和 [OH] 的自由基;燃料型 NO 采用 HCN/NH₃/NO 反应体系,高温环境下将挥发性 N/焦炭 N 的比例设为 4:6,两者转化率都设为 1;挥发分

N 转换过程中 HCN/NH₃ 的比例设为 9:1, 焦炭 N 直接氧化为 NO^[24-25]。同时考虑了湍流中温度和 O₂ 组

分波动对 NO 形成的影响。最后, 选择 CO 和 H₂ 作为再燃气体, CH₃ 作为等效燃料进行模拟^[26-32]。

表 1 氨煤混燃的化学反应机理及动力学参数
Tab.1 Chemical reaction mechanism and kinetic parameters of ammonia-coal co-firing

编号	反应式	指前因子	活化能	温度指数	反应速率指数
R1	$\text{Vol}+0.234\text{O}_2\rightarrow 0.011\text{CO}+2.01\text{H}_2\text{O}+0.031\text{N}_2$	2.119×10^{11}	2.027×10^8	0	$a(\text{Vol})^{0.2}a(\text{O}_2)^{1.3}$
R2	$\text{CO}+0.5\text{O}_2\rightarrow \text{CO}_2$	2.240×10^{12}	4.180×10^7	0	$a(\text{CO})^1a(\text{O}_2)^{0.25}$
R3	$\text{H}_2+0.5\text{O}_2\rightarrow \text{H}_2\text{O}$	5.690×10^{11}	4.165×10^8	0	$a(\text{H}_2)^1a(\text{O}_2)^{0.5}$
R4	$\text{CO}+\text{H}_2\text{O}\rightarrow \text{CO}_2+\text{H}_2$	2.750×10^9	8.360×10^7	0	$a(\text{CO})^1a(\text{H}_2\text{O})^1$
R5	$\text{C}+\text{CO}_2\rightarrow 2\text{CO}$	0.006 35	1.620×10^8	0	$a(\text{CO}_2)^{1.3}$
R6	$\text{C}+\text{H}_2\text{O}\rightarrow \text{CO}+\text{H}_2$	0.001 92	1.469×10^8	0	$a(\text{H}_2\text{O})^1$
R7	$\text{C}+\text{O}_2\rightarrow \text{CO}_2$	0.002 00	7.900×10^7	0	$a(\text{O}_2)^{0.5}$
R8	$\text{NH}_3\rightarrow 0.5\text{N}_2+1.5\text{H}_2$	1.554 00	6.900×10^7	1.25	$a(\text{NH}_3)^1$
R9	$\text{NH}_3+\text{O}_2\rightarrow \text{NO}+\text{H}_2\text{O}+0.5\text{H}_2$	3.500×10^2	5.240×10^8	7.65	$a(\text{NH}_3)^1a(\text{O}_2)^1$
R10	$\text{NH}_3+\text{NO}\rightarrow \text{N}_2+\text{H}_2\text{O}+0.5\text{H}_2$	4.240×10^5	3.500×10^8	5.30	$a(\text{NH}_3)^1a(\text{NO})^1$

1.2 4 MW 氨煤混燃试验台

4 MW 燃烧试验台如图 1 所示, 本体为积木式结构、II 型炉, 四角切圆燃烧。燃烧器布置在炉膛四角, 包括 2 层一次风喷口和 3 层二次风喷口。部分空气通过燃尽风 (OFA) 喷口进入炉膛, 实现空气分级燃烧。炉膛高度为 10.876 m, 直径为 1.600 m。对切圆燃烧器进行改造, 在原燃烧器中心风位置插入氨气喷枪, 氨气通过煤粉火焰引燃。

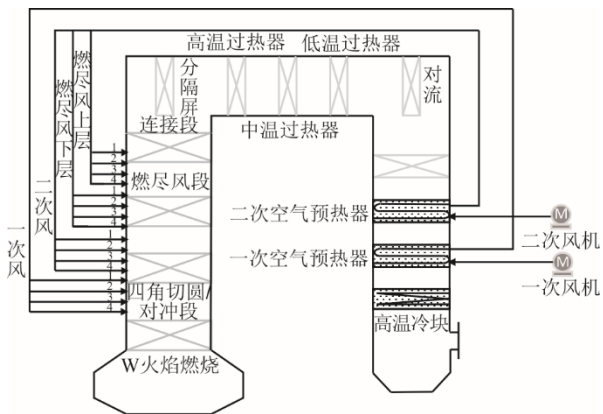


图 1 4 MW 锅炉总貌
Fig.1 General diagram of the 4 MW boiler

1.3 网格划分及无关性验证

4 MW 锅炉的几何模型及网格划分如图 2 所示, A 和 B 表示一次风入口, AA、AB、BB 表示二次风入口, AN1—AN5 表示氨喷口。燃烧器区域网格进行了加密处理, 构建了 3 套六面体网格, 网格数量分别为 922 180、1 587 661 和 2 018 081。通过纯煤燃烧进行网格独立性测试, 计算沿程平均温度、速度和氧量, 结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 模拟结果随网格数量的变化很小。考虑到计算

成本和精度, 选择 1 587 661 的网格系统进行数值计算。

1.4 试验工况

试验采用的氨纯度接近 100%, 热值为 18.60 MJ/kg, 试验煤种为沙尔湖煤, 沙尔湖煤的煤质分析见表 2。

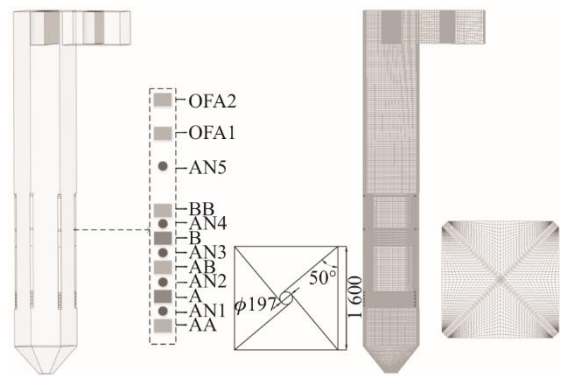
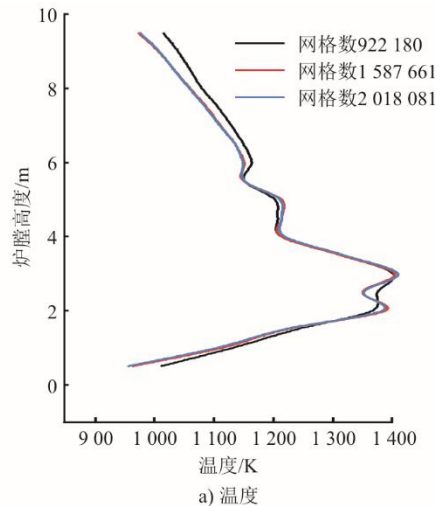


图 2 4 MW 锅炉网格划分 (mm)
Fig.2 Mesh division for the 4 MW boiler (mm)



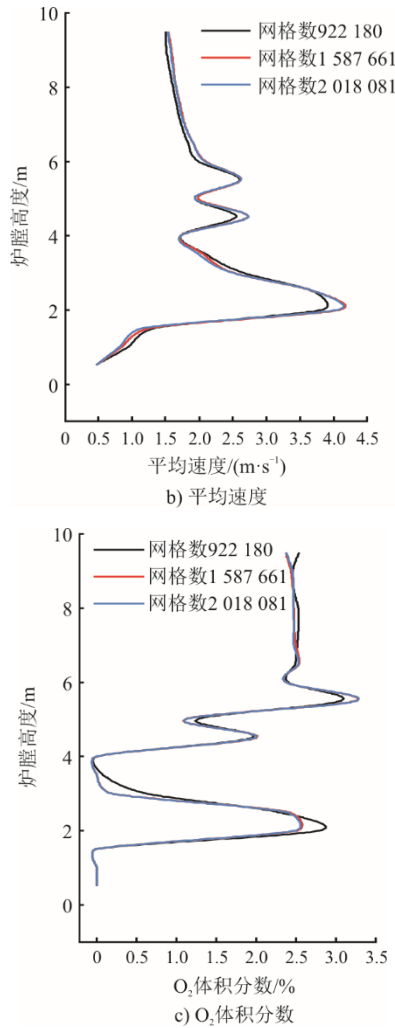


图 3 网格无关性验证
Fig.3 Mesh-independence verification

表 2 沙尔湖煤的煤质分析
Tab.2 Coal quality analysis of coal in Shaar Lake

工业分析/w%				元素分析/w%					$Q_{net, var}/$ (MJ·kg ⁻¹)
M_t	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	O_{ar}	S_{ar}	
17.80	19.06	22.85	40.29	46.21	2.29	0.49	14.07	0.08	16.21

试验过程中的主要运行参数见表 3，一次风温度为 252 °C，二次风和燃尽风的温度为 305 °C，送入氨气的温度为 25 °C，一次风、二次风和燃尽风的比率分别为 25%、45% 和 30%。

表 3 锅炉主要运行参数
Tab.3 Main operating parameters of the boiler

项目	数值
一次风率/%	25
一次风温/°C	252
二次风率/%	45
二次风温/°C	305
OFA 风率/%	30
OFA 风温/°C	305
氨气温度/°C	25

模拟计算的工况参数见表 4。保持锅炉热负荷不变，改变掺氨比例（均以热量计）、过量空气系数和掺氨位置计算了 9 组工况，其中工况 1—工况 5 及工况 8—工况 9 同时进行了试验，工况 9 掺氨比例为 40%，将氨燃料分级送入炉膛。

表 4 试验工况参数
Tab.4 Parameters of the experimental conditions

工况	锅炉负荷/ MW	掺氨比 例/%	过量空气 系数 α	总煤量/ (kg·h ⁻¹)	总氨量/ (m ³ ·h ⁻¹)
1	2.89	0	1.20	608.8	0
2	2.89	20	1.20	487.5	145.6
3	2.89	40	1.20	366.0	291.6
4	2.89	60	1.20	243.7	436.9
5	2.89	100	1.20	0	727.5
6	2.89	40	1.05	366.0	291.6
7	2.89	40	1.10	366.0	291.6
8	2.89	40	1.15	366.0	291.6
9	2.89	40	1.20	366.0	291.6 (分级)

2 结果与分析

2.1 不同掺氨比例的影响

图 4 给出了不同掺氨比下的炉膛温度云图。由图 4 可见，高温区主要集中在燃烧器喷口附近，呈对称分布。随着掺氨比例的提高，火焰最高温度逐渐减小。比较横截面切圆直径可以看出，相比于煤粉燃烧，氨气着火距离长，射流刚性小，形成的切圆不连续，且切圆直径大于煤粉火焰。

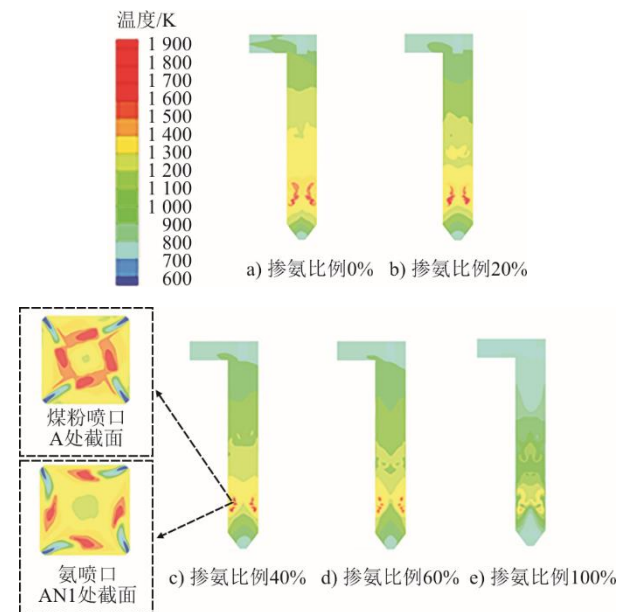


图 4 不同掺氨比例下炉膛温度分布
Fig.4 Temperature distribution in furnace with different ammonia co-combustion ratios

图 5 给出了不同掺氨比例下炉膛平均温度随炉膛高度分布。由图 5 可见, 模拟结果与试验测量数据吻合较好, 最大计算误差小于 1%。由于氨气的理论燃烧温度和热值低于煤粉, 掺氨比例每增加 20%, 燃烧温度降低约 30 °C。随着掺氨比例升高, 炉膛出口温度降低, 这与传统的热力计算结果中炉膛出口温度随掺氨比例增加略有升高的结论不同, 这主要是由于 4 MW 锅炉为近似绝热壁面, 不考虑烟气与水冷壁的传热。

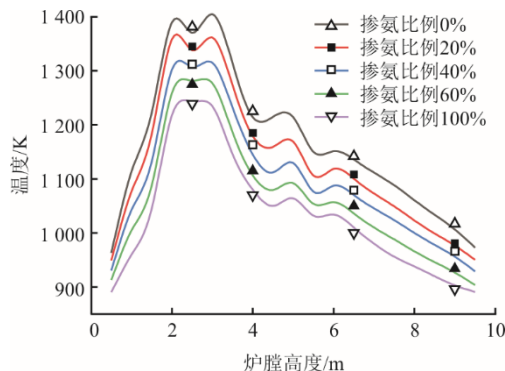


图 5 不同掺氨比例对火焰温度的影响

Fig.5 Effect of ammonia co-combustion ratio on flame temperature

燃烧过程中氧体积分数沿炉膛高度分布如图 6 所示。随着掺氨比例增加, 燃烧器喷口附近的氧气体积分数减少, 这一方面是因为氨气与氧气接触反应的速度更快, 另一方面是因为保持相同空气过量系数的条件下, 掺氨比例越高, 总风量越小。不同掺氨比例下炉膛出口的氧量趋于一致, 均保持在 3%左右, 计算结果与试验测量数据基本吻合。

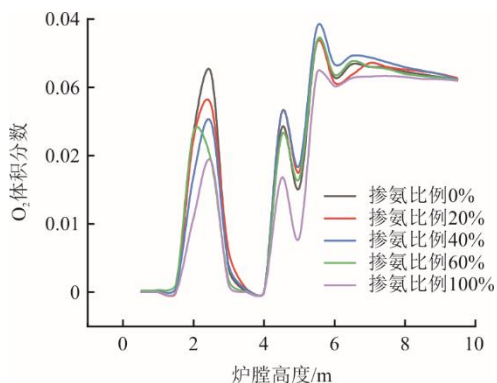


图 6 不同掺氨比例对 O₂ 体积分数分布的影响

Fig.6 Effect of ammonia co-combustion ratio on O₂ volume fraction distribution

图 7 显示了不同掺氨比例时 NO 体积分数随炉膛高度的变化。由图 7 可见, 煤粉和氨燃烧器喷口附近的 NO 体积分数很高, 这表明煤粉和氨在燃烧

初期生成了大量的氮氧化物。在炉膛连接段, 因为氧体积分数降低形成了还原性气氛, 生成的氮氧化物与氨发生还原反应, NO 体积分数下降并趋于稳定。当纯氨燃烧时, 主燃区的 NO 体积分数低于氨煤混燃, 燃尽风区域的 NO 体积分数介于掺氨比例 40%~60%。

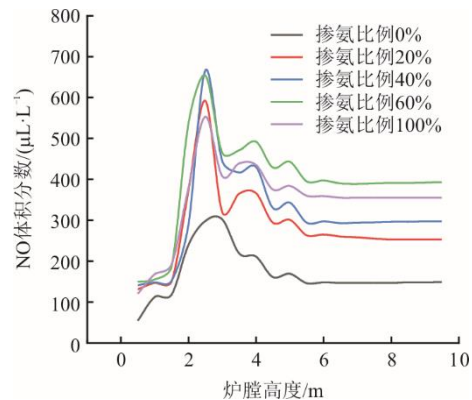


图 7 不同掺氨比例对 NO 质量浓度分布的影响

Fig.7 Effect of ammonia co-combustion ratio on NO mass concentration distribution

表 5 给出了不同工况下炉膛出口处 NO 质量浓度的计算结果与试验数据。计算结果与试验数据变化趋势基本一致, 最大计算误差小于 3%。随着掺氨比例增加, 炉膛出口 NO 质量浓度相比于纯煤燃烧显著增加。当掺氨比例从 0 增加到 40%时, NO 质量浓度增加约 77.33%, 从 0 增加到 60%时 NO 质量浓度增加约 136.44%。当纯烧氨时, NO 质量浓度反而低于氨掺烧比例 60%的工况。这表明氨中的燃料氮完全燃烧时生成 NO 的倾向较小, 因此纯氨燃烧的 NO 生成质量浓度并不会继续上升, 这与文献[27]结果一致。

表 5 不同工况下炉膛出口 NO 质量浓度模拟值

与试验值对比 单位: mg/m³

Tab.5 The simulation and test values of NO mass concentration at furnace outlet under different working conditions

	掺氨比例				纯氨
	0	20%	40%	60%	
试验值	225	344	399	532	475
模拟值	219	342	401	520	467

不同掺氨比例时炉膛出口飞灰含碳量的模拟值和试验值对比见表 6。可以看出, 随着掺氨比例的增加, 炉膛出口的飞灰含碳量升高, 这表明氨煤燃烧会对煤粉颗粒的燃尽性造成影响, 掺氨比例升高, 煤粉的燃尽性降低。

表 6 不同工况下炉膛出口飞灰含碳量模拟值与试验值对比
Tab.6 The simulation and test values of carbon content in fly ash at furnace outlet under different working conditions

	掺氨比例			
	0	20%	40%	60%
试验值/%	4.05	4.65	6.16	7.28
模拟值/%	3.97	4.52	6.21	7.49

不同掺氨比例下氨体积分数沿炉膛高度分布如图 8 所示。随掺氨比例增加，主燃区的氨体积分数明显提高。在氨煤混燃工况下，仅燃烧器喷口区域存在较高体积分数的氨，炉膛出口处的逃逸量很小，均低于 10^{-6} 数量级，表明即使在较高的氨气掺烧比例下，仍可以达到很高的氨燃尽率。

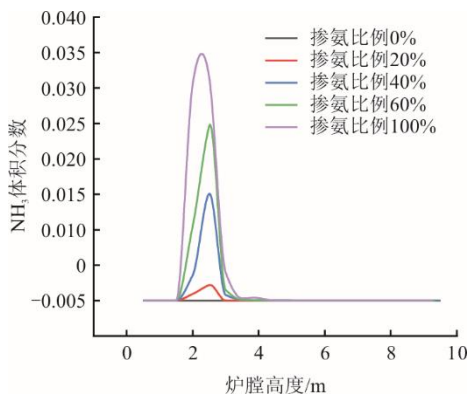


图 8 不同掺氨比例对氨体积分数分布的影响
Fig.8 Effect of ammonia co-combustion ratio on NH₃ volume fraction distribution

不同掺氨比时 CO₂ 体积分数随炉膛高度分布如图 9 所示。可以看出随着氨掺烧比例的增加，炉膛中的 CO₂ 体积分数明显下降，氨掺烧比例每提高 20%，炉膛出口 CO₂ 体积分数相比于纯煤燃烧降低约 20 百分点。

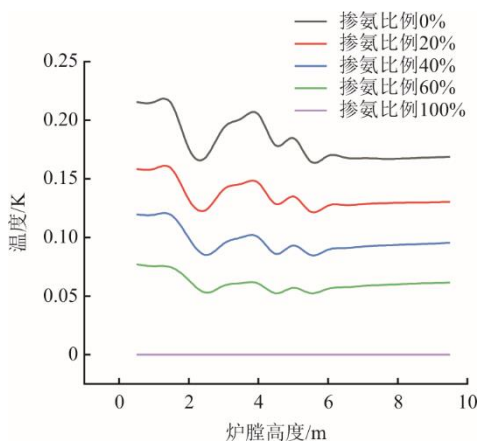


图 9 不同掺氨比例对 CO₂ 体积分数分布的影响
Fig.9 Effect of ammonia co-combustion ratio on CO₂ volume fraction distribution

2.2 过量空气系数的影响

在掺氨比例为 40% 工况下，研究了不同过量空气系数对火焰温度分布和污染物排放的影响。图 10 给出了不同过量空气系数下沿炉膛高度方向上的温度分布。由图 10 可以看出，在燃尽风比例不变时，随着过量空气系数增大，主燃区温度升高，当过量空气系数增加至 1.2 时燃尽风区域温度明显降低。

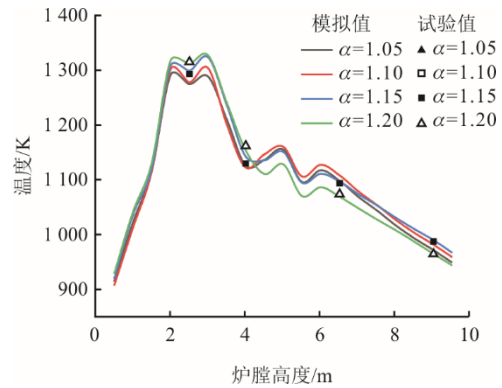


图 10 过量空气系数对氨煤混燃火焰温度的影响
Fig.10 Effect of excess air ratio on flame temperature of ammonia-coal co-combustion

不同过量空气系数下炉膛出口 O₂、NO、CO、飞灰含碳量和 NH₃ 质量浓度的试验值与计算值见表 7。

表 7 不同过量空气系数时炉膛出口 O₂、NO、CO、飞灰含碳量、NH₃ 质量浓度模拟值与试验值对比

Tab.7 The simulated values and test values of O₂, NO, CO and NH₃ mass concentrations at the furnace outlet with different excess air ratios

工况	O ₂ 体积分数/%	NO 质量浓度/(mg·m ⁻³)	CO 质量浓度/(mg·m ⁻³)	飞灰含碳量/%	NH ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)	
α=1.05	试验值	1.01	116	284	8.16	0.804
	模拟值					
α=1.10	试验值	1.53	143	201	7.22	0.179
	模拟值					
α=1.15	试验值	2.12	171	88	6.35	
	模拟值	2.05	172	89	6.28	0.122
α=1.20	试验值	3.05	399	17	6.16	
	模拟值	3.17	401	17	6.21	0.006

过量空气系数增大时，炉膛出口 NO 质量浓度升高，CO 质量浓度降低，飞灰含碳量同样降低。当过量空气系数从 1.10 增加到 1.15 时，NO 质量浓度从 143 mg/m³ (标况下，下同) 增加到 171 mg/m³，CO 质量浓度从 201 mg/m³ 减少到 88 mg/m³；进一步增加过量空气系数到 1.20 时，NO 质量浓度增加到 401 mg/m³。过量空气系数由 1.05 增大至 1.15 时，炉膛出口的飞灰含碳量下降明显；过量空气系数继

续增大至 1.20 时, 飞灰含碳量变化较小, 该变化趋势与文献[22]的研究结果一致。因此, 综合考虑燃尽性及氮氧化物排放质量浓度, 掺氨比例为 40% 时适宜的过量空气系数为 1.15。掺氨比例增加时, 应进一步减小燃烧的过量空气系数。

2.3 氨燃料分级的影响

在掺氨比例 40% 的条件下, 将 50% 的氨与煤粉一起通过煤粉燃烧器喷入, 另外 50% 的氨通过上方的氨喷口 AN5 喷入, 研究氨燃料分级燃烧对火焰温度和污染物排放的影响。图 11 给出了氨燃料分级燃烧时沿炉膛高度方向上的温度分布。由图 11 可见, 氨燃料分级投入后, 主燃区的温度降低, 燃尽风区域的温度上升。

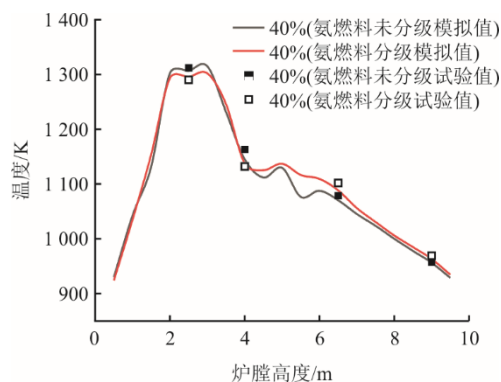


图 11 氨燃料分级对火焰温度的影响

Fig.11 Effect of ammonia fuel classification on flame temperature

图 12 给出了氨燃料分级燃烧和不分级燃烧时 NO 体积分数分布。由图 12 可见, 氨燃料分级后, 主燃区的 NO 体积分数最大值明显减少, 主燃区与燃尽风区域之间的 NO 体积分数呈缓慢下降趋势, 然后在连接段区域迅速减少, 最终趋于一个稳定值。

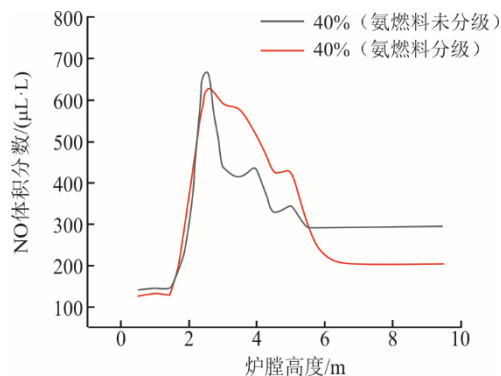


图 12 氨燃料分级对 NO 体积分数分布的影响

Fig.12 Effect of ammonia fuel classification on NO mass concentration distribution

不同掺氨位置时炉膛出口 O₂、NO、CO、飞灰

含碳量和 NH₃ 质量浓度的试验值与模拟值见表 8。由表 8 可以看出, 氨燃料分级投入对炉膛出口氧气含量影响不大, 但对 NO 的生成有较大的影响。当氨燃料分级后, 炉膛出口的 NO 质量浓度由 399 mg/m³ 降至 275 mg/m³, 炉膛出口的 CO 质量浓度由 17 mg/m³ 升至 32 mg/m³, 飞灰含碳量由 6.16% 降低至 4.13%, 说明氨燃料分级对燃料的燃尽性也有一定影响。由炉膛出口氨质量浓度的模拟值可以看出, 氨燃料分级会导致炉膛出口的 NH₃ 质量浓度增加, 但逃逸氨量很小可忽略不计。

表 8 氨燃料分级时炉膛出口 O₂、NO、CO、飞灰含碳量、NH₃ 质量浓度模拟值与试验值

Tab.8 The simulated values and test values of O₂, NO, CO and NH₃ mass concentration at furnace outlet during ammonia fuel classification

工况	O ₂ 体积分数/%	NO 质量浓度/(mg·m ⁻³)	CO 质量浓度/(mg·m ⁻³)	飞灰含碳量/%	NH ₃ 质量浓度/(mg·m ⁻³)
氨燃料分级	试验值	2.95	275	4.13	
	模拟值	2.84	277	4.05	0.001
氨燃料未分级	试验值	3.05	399	6.16	
	模拟值	3.17	401	6.21	0.006

3 结 论

本文通过数值模拟与 4 MW 机组锅炉试验相结合的方式, 研究了不同比例氨煤混燃对锅炉燃烧的影响, 验证了简化氨煤混燃模型的正确性, 主要结论如下。

1) 氨燃烧过程可以简化为包括氨热解、氨氧化、氨还原 NO 3 步反应, 利用简化的机理模型计算了 4 MW 机组锅炉氨煤混燃及纯氨燃烧, 计算结果与试验数据基本吻合, 最大计算误差小于 3%。

2) 氨煤混燃时随着掺氨比例升高, 火焰温度降低, 炉膛出口 NO 质量浓度升高, 二氧化碳质量浓度降低, 飞灰含碳量升高, 逃逸氨质量浓度变化较小均接近于 0。氨掺烧比例每提高 20%, 温度降低约 30 °C, 二氧化碳质量浓度降低约 20%。掺氨比例为 60% 时生成的 NO 质量浓度最大, 为 532 mg/m³。降低过量空气系数能够减少 NO 的生成, 但同时也会导致炉膛出口 CO 和氨质量浓度的增加, 综合考虑燃尽性和 NO 生成, 掺氨比例为 40% 时适宜的过量空气系数为 1.15, 并且掺氨比例增加时, 应进一步减小燃烧的过量空气系数。氨燃料分级投入能够将炉膛出口的 NO 质量浓度由 399 mg/m³ 降至 275 mg/m³。

3) 纯氨燃烧火焰温度低于煤粉和氨煤混燃火焰,着火距离长且切圆直径大于煤粉火焰。纯氨燃烧时炉膛出口 NO 质量浓度 475 mg/m³,氨逃逸量接近 0。

[参考文献]

- [1] 别朝红,王则凯,肖遥,等.双碳目标下新型电力系统发展展望[J].新型电力系统,2023,1(2):116-131.
BIE Zhaohong, WANG Zekai, XIAO Yao, et al. Outlook on the development of new power system under dual-carbon target[J]. New Type Power System, 2023, 1(2): 116-131.
- [2] WANG Q, HU Z, SHAO W, et al. The present situation, challenges, and prospects of the application of ammonia-coal co-firing technology in power plant boilers[J]. Journal of the Energy Institute, 2024, 113: 101531.
- [3] LEE B H, BAE Y H, CHO S H, et al. Comprehensive technical review for fundamental characteristics and application of NH₃ co-firing with coal[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 474: 145587.
- [4] 丁先,李汪繁,马达夫.燃煤机组耦合氨燃料燃烧特性及经济性探讨[J].热力发电,2022,51(8):20-28.
DING Xian, LI Wangfan, MA Dafu. Discussion on coal-fired units coupled with ammonia fuel: combustion characteristics and economy[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 20-28.
- [5] 谭厚章,周上坤,杨文俊,等.氨燃料经济性分析及煤氨混燃研究进展[J].中国电机工程学报,2023,43(1):181-191.
TAN Houzhang, ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, et al. Economic analysis of ammonia and research progress of coal-ammonia co-firing[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 181-191.
- [6] NAGATANI G, ISHI H, ITO T, et al. Development of co-firing method of pulverized coal and ammonia to reduce greenhouse gas emissions[J]. IHI Engineering Review, 2020, 53(1): 1-10.
- [7] YAMAMOTO A, KIMOTO M, OZAWA Y, et al. Basic co-firing characteristics of ammonia with pulverized coal in a single burner test furnace[C]//Proceedings of the 2018 AIChE Annual Meeting. Pittsburgh: PA, F, 2018: 542a.
- [8] 闫卫东,秦世泰,杨凯,等.氨-煤在沉降炉中掺烧试验及氨的氧化动力学[J].洁净煤技术,2023,29(9):127-133.
YAN Weidong, QIN Shitai, YANG Kai, et al. Experiment of ammonia-coal co-firing in a drop tube furnace and the kinetic modeling of ammonia oxidation[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(9): 127-133.
- [9] 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.
- [10] WANG X, FAN W, CHEN J, et al. Experimental study and kinetic analysis of the impact of ammonia co-firing ratio on products formation characteristics in ammonia/coal co-firing process[J]. Fuel, 2022, 329: 125496.
- [11] WANG X, FAN W, CHEN J, et al. Experimental study on effects of air-staged strategy and NH₃ co-firing ratios on NO formation characteristics in ammonia/coal co-firing process[J]. Fuel, 2023, 332: 126217.
- [12] 王志超,方亮,贾子秀,等.不同比例氨与煤混燃试验研究[J].热力发电,2023,52(7):41-47.
WANG Zhichao, FANG Liang, JIA Zixiu, et al. Experimental study on co-combustion of different ratios of ammonia with coal[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 41-47.
- [13] 牛涛,张文振,刘欣,等.燃煤锅炉氨煤混合燃烧工业尺度试验研究[J].洁净煤技术,2022,28(3):193-200.
NIU Tao, ZHANG Wenzhen, LIU Xin, et al. Industrial-scale experimental investigation of ammonia-coal cofiring in coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 193-200.
- [14] ZHANG J, 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.
- [15] JIN W, SI F, CAO Y, 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.
- [16] LYU Q, WANG R, DU Y, 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.
- [17] WANG Y, HE Y, WENG W, et al. Numerical simulation of ammonia combustion with coal in a 135 MW tangentially fired boiler[J]. Fuel, 2024, 3701: 131831.
- [18] WANG H, XU Y, LIU X, et al. Experimental and numerical study on the effects of coal on ammonia-N conversion behavior during ammonia-coal co-firing[J]. Fuel, 2024, 364: 131032.
- [19] WEI D, WU L, WANG T, et al. Numerical simulation of ammonia combustion with sludge and coal in a utility boiler: Influence of ammonia distribution[J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 111: 101409.
- [20] SOUSA CARDOSO J, SILVA V, EUSÉBIO D, et al. Numerical modelling of ammonia-coal co-firing in a pilot-scale fluidized bed reactor: Influence of ammonia addition for emissions control[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 254: 115226.
- [21] CARDOSO J S, SILVA V, CHAVANDO J A M, et al. Numerical modelling of the coal phase-out through ammonia and biomass co-firing in a pilot-scale fluidized bed reactor[J]. Fuel Communications, 2022, 10: 100055.
- [22] LI Y, FAN W. Effect of char gasification on NO_x formation process in the deep air-staged combustion in a 20 kW down flame furnace[J]. Applied Energy, 2016, 164: 258-267.
- [23] 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.
- [24] LI Y, FAN W D. Effect of char gasification on NO_x formation process in the deep air-staged combustion in a 20 kW down flame furnace[J]. Applied Energy, 2016, 164: 258-267.

- [25] STADLER H, TOPOROV D, FÖRSTER M, et al. On the influence of the char gasification reactions on NO formation in flameless coal combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(9): 1755-1763.
- [26] DU Y B, WANG C A, LV Q, et al. CFD investigation on combustion and NO_x emission characteristics in a 600 MW wall-fired boiler under high temperature and strong reducing atmosphere[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 126: 407-418.
- [27] 王华坤, 徐义书, 张保华, 等. 煤掺氨燃烧过程中 NO 生成特性和氨氮转化行为研究[J]. *能源环境保护*, 2023, 37(4): 30-37.
WANG Huakun, XU Yishu, ZHANG Baohua, et al. Study on NO formation characteristics and ammonia-nitrogen conversion behavior during ammonia-coal co-firing[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(4): 30-37.
- [28] 龚成, 花昌豪, 陈萍, 等. 掺烧氨对煤粉不同燃烧阶段 NO 生成特性的影响[J]. *煤炭转化*, 2024, 47(6): 91-101.
GONG Cheng, HUA Changhao, CHEN Ping, et al. Effect of ammonia-coal co-combustion on NO generation characteristics at different combustion stages[J]. *Coal Conversion*, 2024, 47(6): 91-101.
- [29] 朱生刚, 姚鑫, 崔立明, 等. 典型高碱煤灰对氨煤混燃中氨氧化反应特性的影响[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(5): 65-71.
ZHU Shenggang, YAO Xin, CUI Liming, et al. Effects of high-alkali coal ash on NO_x formation characteristics during ammonia and coal co-firing process[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(5): 65-71.
- [30] 韩静洋, 谢妍, 李君, 等. 氨煤混合比例对氨的 NO 生成/还原反应路径影响[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(8): 3046-3056.
HAN Jingyang, XIE Yan, LI Jun, et al. Study on the influences of NH₃/coal cofiring ratio on the NO formation reduction reaction pathways of NH₃[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(8): 3046-3056.
- [31] 陈萍, 花昌豪, 王佩佩, 等. 氨煤混燃 NO 生成机理研究[J]. *煤炭转化*, 2023, 46(4): 51-58.
CHEN Ping, HUA Changhao, WANG Peipei, et al. Study on NO formation mechanism of ammonia-coal co-combustion[J]. *Coal Conversion*, 2023, 46(4): 51-58.
- [32] 陈萍, 向军, 顾明言, 等. 氧体积分数对氨煤混燃 NO 生成特性的影响机理[J]. *煤炭转化*, 2025, 48(1): 90-100.
CHEN Ping, XIANG Jun, GU Mingyan, et al. Influence mechanism of oxygen volume fraction on NO formation characteristics in ammonia-coal co-combustion[J]. *Coal Conversion*, 2025, 48(1): 90-100.

(责任编辑 杨嘉蕾)