

300 MW 煤粉锅炉氨燃料掺烧对锅炉烟气特性的影响分析

王翔¹, 王雪², 侯宗余³, 陈国庆⁴

(1. 介科学与工程全国重点实验室, 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190; 2. 北京清华工业开发研究院, 北京 100190; 3. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100190; 4. 低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室(国家能源集团科学技术研究院有限公司), 江苏 南京 210023)

摘要:【目的】氨掺烧对推动能源结构清洁低碳转型具有重要意义。为进一步研究掺氨比例变化对锅炉燃烧状况的具体影响, 【方法】本文以能量平衡为基础建立 300 MW 煤粉锅炉热力计算模型, 通过锅炉热力计算考察了不同氨掺烧比例下燃料消耗量、锅炉效率及烟气特性随氨燃料掺烧比例的变化规律; 进一步分析了炉膛辐射减弱系数和黑度随氨掺烧比例的变化规律。【结果】研究表明: 掺烧比例从 0 增大到 40%, 排烟热损失增加 5.3%, 锅炉效率下降 0.21%; 烟气体积增加 6.2%, 烟气中水含量增加 64.2%, 3 原子气体含量降低 41.4%; 水露点提高了 11.9%, 酸露点在掺烧比例为 40% 时达到最大值 135 °C; 理论燃烧温度降低 46 °C, 炉膛出口温度提高 8 °C; 火焰辐射减弱系数、火焰辐射吸收率、火焰黑度和炉膛黑度均随氨掺烧量增大而逐渐降低; 当燃煤发电机组的氨掺烧量为 43% 时, 碳排放量与同等容量的燃气发电机组碳排放量一致。【结论】研究结果可为氨煤混烧技术开发、锅炉受热面结构设计及污染物控制设备运行参数选取提供重要支撑。

关键词: 氨燃料; 烟气特性; 辐射传热; 热力计算

中图分类号: TK81

文章编号: 1674 - 8069(2025)02 - 0294 - 09

文献标志码: A

DOI 编号: 10.19944/j.eptep.1674 - 8069.2025.02.012

[引用本文格式] 王翔, 王雪, 侯宗余, 等. 300 MW 煤粉锅炉氨燃料掺烧对锅炉烟气特性的影响分析[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(2):294-302.

WANG Xiang, WANG Xue, HOU Zongyu, et al. Analysis of the effect of ammonia on 300 MW pulverized coal boiler fuel gas characteristics[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2025, 41(2):294-302.

Analysis of the effect of ammonia on 300 MW pulverized coal boiler fuel gas characteristics

WANG Xiang¹, WANG Xue², HOU Zongyu³, CHEN Guoqing⁴

(1. State Key Laboratory of Mesoscience and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Beijing Tsinghua Industrial R&D Institute, Beijing 100190, China; 3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 4. State Key Laboratory of Low-carbon Smart Coal-fired Power Generation and Ultra-clean Emission, (China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd.), Nanjing 210023, Jiangsu China)

Abstract: [Objective] Ammonia-coal co-firing is of great significance in promoting the clean and low-carbon transformation of energy structure. To study the influence of ammonia co-firing ratio on combustion characteristics, [Methods] a thermal calculation model of a 300 MW coal-fired boiler was set up based on the energy balance method. The changes in fuel consumption, boiler efficiency, and flue gas characteristics with ammonia ratios were investigated in this paper. Furthermore, the analysis of the variation of furnace radiation attenuation coefficient and blackness with ammonia ratios were also conducted. [Results] The results show that the ammonia ratio increases from 0 to 40%, the

收稿日期: 2024-12-20 录用日期: 2025-03-18

Received: 2024-12-20 Accepted: 2025-03-18

基金项目: 低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室开放课题

heat loss of exhaust gas increases by 5.3%, the boiler efficiency decreases by 0.21%, the flue gas volume increases by 6.2%, the water content in the flue gas increased by 64.2%, and the triatomic gas content decreased by 41.4%, the water dew point increases by 11.9%, the theoretical combustion temperature decreases by 46 °C, and the furnace outlet temperature increases by 8 °C. The acid dew point reaches a maximum value of 135 °C at 40% ammonia ratio. The flame radiation attenuation coefficient and flame radiation absorption rate, the flame and furnace blackness, gradually decrease with the increase of ammonia ratio in fuel. When the ammonia blending amount of coal-fired generating units is 43%, the carbon emission is consistent with the carbon emission of gas-fired generating units with the same capacity. [Conclusion] The results can provide important support for the development of ammonia-coal co-firing technology, the design of boiler heating surface, and the selection of operating parameters of pollutant control equipment.

Key words: ammonia fuel; flue gas characteristics; radiant heat transfer; thermal calculation

0 引言

中国是世界上最大的能源消费国和碳排放国^[1-2]。双碳目标下,燃煤发电除作为主力发电站外,还将作为波动性、间歇性新能源消纳的调峰电站,是保障中国电力安全的核心基础能源形式^[3-4]。因此,以煤炭为主的化石能源消耗仍将是碳达峰阶段的基本情景^[5]。燃煤发电作为主要的碳排放源之一,碳减排挑战巨大^[6]。近年来,氨作为一种可实现可再生能源大规模可靠存储的低成本储能介质受到了广泛关注^[7]。中短期内有望作为一种清洁的可再生零碳燃料实现含碳燃料的替代。鉴于煤炭是中国一次能源“主力军”的能源结构和煤电机组是电力系统“压舱石”的现状^[8],依托燃煤锅炉实现氨/氢与煤的灵活掺烧,是一种适合中国国情的燃煤发电机组低碳化技术路线。

氨的物理化学和燃烧特性与煤有很大差异,因此掺氨燃烧将对燃煤锅炉内的传热、燃烧及污染物排放控制造成显著影响^[9-11]。在工业尺度试验方面,国家能源集团搭建了 40 MW 氨煤混合燃烧试验系统,并开展了 0~25% 掺氨比(热值比)的氨煤混燃试验。研究表明,试验工况内,锅炉具有良好的稳燃与燃尽特性;锅炉分级燃烧可使氨煤混燃的 NO_x 排放低于燃煤工况。皖能集团开展了 300 MW 大比例掺氨燃烧试验,实现了 35% 掺氨比的平稳运行,锅炉效率与燃煤工况相当^[12]。现阶段现场试验更加注重于氨掺烧对燃烧和 NO_x 排放的影响,没有考虑氨燃料掺烧对烟气参数的影响^[13]。ZHANG 等^[14]人采用数值计算方法研究了炉膛传热特性随氨燃料掺烧比例的变化规律,结果表明随着掺氨比例的增加,颗粒辐射的减少会使炉内辐射传热量减少,对

流传热量略有增加。王一坤等^[15]采用热力计算的方法,分析了氨掺烧对炉内传热特性的影响,结果表明炉内理论燃烧温度有所下降,但由于烟气体积流量增加,使对流传热量增加。SOUSA 等^[16]通过数值计算得到火焰温度、辐射通量随着氨掺烧浓度的变化规律,结果表明火焰温度、辐射通量随着氨掺烧浓度的增加而降低。XU 等^[17]以某 600 MW 燃煤电站机组为研究对象,对不同燃料体系下的锅炉燃烧系统进行了模拟,分析了掺氨燃烧对烟气排放、热特性、烟损失和烟效率的影响。结果表明烟气含水量、烟气比热容随着掺氨浓度的升高而提高,掺氨燃烧改变了辐射和对流换热的热量分配。然而以上研究没有系统的对氨燃料掺烧后烟气成分及炉内辐射传热变化规律进行深入分析^[18-19]。

本文以 1 台 300 MW 煤粉锅炉为研究对象,以锅炉热力计算为基础,对煤粉锅炉掺烧氨燃料进行了校核计算和性能预测。考察了燃料消耗量、锅炉效率及烟气特性随氨燃料掺烧浓度的变化规律;进一步分析了炉膛辐射减弱系数随氨掺烧比例的变化关系。研究结果清晰的表述炉内辐射传热和锅炉排烟温度的变化规律,可为氨煤混烧技术开发、锅炉受热面结构设计及污染物控制设备运行参数选取提供重要支撑。

1 研究方法

1.1 研究对象及燃料设定

本文以某 300 MW 亚临界中间再热自然循环燃煤锅炉为计算案例。该锅炉为单炉膛燃烧器四角切圆布置,烟气挡板调温,配备双进双出钢球磨直吹式制粉系统,固态排渣。锅炉额定工况及主要工况基本设计参数如表 1 所示。

表1 锅炉主要工况基本设计参数

Table 1 Basic design parameters for main boiler operating conditions

名称	锅炉最大连续出力	锅炉额定工况
主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 025	899.32
过热蒸汽出口蒸汽压力/MPa	17.40	17.30
过热蒸汽出口蒸汽温度/℃	540	540
再热蒸汽蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	842	745
再热蒸汽出/进蒸汽压力/MPa	3.754/3.558	3.317/3.144
再热蒸汽出/进蒸汽温度/℃	327/540	315/540
给水温度/℃	279.5	271.1

炉膛是锅炉中的一个重要部件,采用传统的双烟道布置,炉膛四周采用膜式水冷壁。上炉膛内布置有屏式过热器、高温过热器、高温再热器与低温过热器,所有过热器、再热器与省煤器的管子均采用行列布置。烟道尾部有两台空气预热器。根据锅炉机组布置好炉膛的几何形状、受热面结构和和数量,根据已知的锅炉负荷和燃料种类,进行炉膛校核计算,得到燃料消耗量、空气量、烟气量级烟气温度的参数。炉膛校核计算过程中涉及到的主要结构参数如表2所示。

表2 炉膛主要结构参数

Table 2 Main structural parameters of the furnace

名称	数值
炉膛出口过热空气系数 α	1.25
烟气辐射层有效厚度 S/m	11
炉膛压力 P/MPa	0.10
炉膛平均热有效系数 ψ	0.35
火焰中心高度系数 M	0.40
飞灰颗粒平均粒径 $D_f/\mu\text{m}$	13
炉膛总面积 F/m^2	2 300

本文炉膛校核计算过程中,以锅炉最大连续出力工况下输入热量为基准,按照输入热量的百分比来折算需要的氨燃料消耗量,将氨与煤混合燃料折算为一种新燃料。按照热量比例关系及元素、发热量不变的原则^[20-21],混合燃料的元素成分及低位热值混合燃料按质量份额来折算。不同掺混比例下的混合燃料的元素分析和工业分析如表3所示。计

算过程中氨的低位发热量值为18.8 MJ/kg。

表3 氨与煤混合燃料收到基元素及工业分析

Table 3 Mixed fuel elements and industrial analysis

掺混比例 r	0	20%	40%	60%	80%
碳 $w(\text{Car})/\%$	47.84	38.78	29.47	19.91	10.09
氢 $w(\text{Har})/\%$	2.83	5.63	8.50	11.45	14.48
氧 $w(\text{Oar})/\%$	8.48	6.87	5.22	3.53	1.79
氮 $w(\text{Nar})/\%$	0.82	16.28	32.14	48.44	65.19
硫 $w(\text{Sar})/\%$	0.28	0.23	0.17	0.12	0.06
灰分 $w(\text{Aar})/\%$	15.65	12.69	9.64	6.51	3.30
水分 $w(\text{Mar})/\%$	24.10	19.53	14.85	10.03	5.08
挥发分 $V_{\text{ar}}/\%$	41.06	52.23	63.69	75.47	87.56
固定碳 $\text{FCar}/\%$	19.19	15.55	11.82	7.99	4.05
低位发热值 $Q_{\text{net,ar}}/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	17 576.39	17 808	18 046	18 290	18 541

1.2 热力计算方法

单位质量煤燃烧时理论上需要的空气量(O_2 浓度按21%体积计算)体积 V_0 可以表达为:

$$V_0=0.0889C_{\text{ar}}+0.2567H_{\text{ar}}+0.0333S_{\text{ar}}+0.0762H_{\text{ar}}-0.0333O_{\text{ar}} \quad (1)$$

式中: V_0 为理论燃烧干空气量, m^3/kg ; C_{ar} 、 H_{ar} 、 S_{ar} 、 N_{ar} 和 O_{ar} 分别为煤收到基C、H、S、N和O含量,%。

单位质量煤燃烧生成的烟气体积 V_g (标准状态下)计算如下:

$$V_g=V_{\text{dg}}+V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (2)$$

式中: V_g 为燃烧生成的烟气体积, m^3/kg ; V_{dg} 为干烟气体积, m^3/kg ; $V_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸气体积, m^3/kg ;

忽略锅炉气体不完全燃烧损失,单位质量煤燃烧生成的干烟气体积计算如下:

$$V_{\text{dg}}=V_{\text{RO}_2}+V_{\text{N}_2}+V_{\text{O}_2} \quad (3)$$

式中: V_{RO_2} 、 V_{N_2} 、 V_{O_2} 分别为组成干烟气的 RO_2 、 N_2 和 O_2 的体积, m^3/kg 。

$$V_{\text{RO}_2}=1.866\frac{C_{\text{ar}}+0.375S_{\text{ar}}}{100} \quad (4)$$

$$V_{\text{N}_2}=0.79\alpha V_0+0.008N_{\text{ar}} \quad (5)$$

$$V_{\text{O}_2}=0.21(\alpha-1)V_0 \quad (6)$$

式中: α 为过量空气系数。

参照锅炉反平衡热效率计算公式,通过计算锅炉的各项热损失,从而计算出锅炉热效率 η 。计算公式如下:

$$\eta=100-q_2-q_3-q_4-q_5-q_6 \quad (7)$$

式中: q_2 为排烟热损失,%; q_3 为气体未完全燃烧热

损失,%; q_4 为固体未完全燃烧热损失,%; q_5 为散热损失,%; q_6 为灰渣物理热损失,%。

参照烟气中水露点 T_{dew} 和酸露点 $T_{\text{dew-s}}$ 的计算方法^[22]:

$$T_{\text{dew}} = -35.957 - 1.8726 \ln P_w + 1.689 \ln^2 P_w \quad (2)$$

$$T_{\text{dew-s}} = 10.88 + 27.6 \log P_w + 10.83 \log P_{\text{SO}_3} + 1.06 (\log P_{\text{SO}_3} + 2.994)^{2.19} \quad (3)$$

式中: P_w 为水蒸气分压,Pa; P_{SO_3} 为 SO_3 分压,Pa。

2 结果与讨论

2.1 氨掺烧对燃料消耗量的影响

图 1 为锅炉总燃料消耗量与氨掺烧比例的关系。由图可知,纯煤粉作为燃料时,燃料消耗量为 31.5 kg/s,混合燃料作为燃料时(氨掺烧比例 40%),燃料消耗量为 28.86 kg/s。由于煤粉的低位发热量与氨的低位发热量相比较小,因此随着氨掺烧比例的增加,燃料消耗总量逐渐降低。火力发电厂用电消耗主要是在汽机系统的辅机或者锅炉上,其中制粉系统的厂用电量占电厂辅机电总用量 20% 以上^[23-24],因此随着氨燃料掺烧比例的增加,有利于降低厂用电率。除此以外,在燃料替代过程中需综合考虑煤粉消耗量减少对锅炉原制粉、供粉系统运行方式带来的影响。

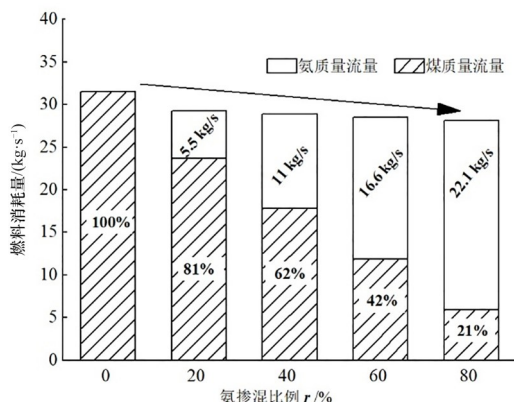


图 1 燃料消耗量与氨掺烧比例的关系

Figure 1 Relationship between fuel consumption and ammonia ratio

2.2 氨掺烧对锅炉效率的影响

为了研究氨掺烧对锅炉效率的影响,对锅炉反平衡热效率计算过程中各项热损失进行简化处理。假定空气预热器出口烟气温度为 133 °C, q_3 — q_6 数值一致,且不随氨燃料掺烧比例增加变化。锅炉效率

(按低位发热值)和排烟热损失随掺烧比例的变化规律如图 2 所示。由图 2 可知,随着氨掺烧比例的增加,锅炉排烟热损失逐渐增加,锅炉效率逐渐降低。当掺烧比例从 0 增大到 40%,排烟热损失从 3.97% 升高到 4.18%,锅炉效率(按低位发热值)从 94.03% 降低到 93.82%,降低了 0.21%。其主要原因:氨煤混合燃料燃烧后烟气中水蒸汽含量的增加使烟气焓值增加,造成同等工况下排烟热损失增加,降低了锅炉效率^[25-26]。

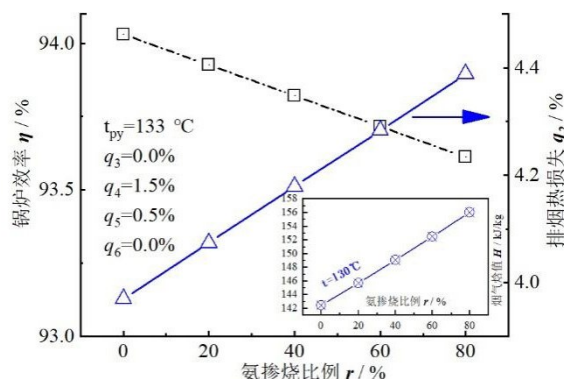


图 2 锅炉效率与氨掺烧比例的关系

Figure 2 Relationship between boiler efficiency and ammonia ratio

2.3 氨掺烧对烟气的影响

2.3.1 烟气量

不同掺混比例下的混合燃料完全燃烧后烟气量如图 3 所示。由图 3 可知,当混合燃料中氨比例从 0 增大到 40% 时,单位质量燃料燃烧过程消耗的理论空气量由 4.73 m³/kg 降低到 4.70 m³/kg,降低 0.6%;单位质量燃料燃烧后生成的实际烟气量由 6.29 m³/kg 增加到 6.68 m³/kg,增加 6.2%。结果表明:随混合燃料中氨比例的增大,燃烧需要的理论空气量逐渐降低,燃烧后生成的实际烟气量逐渐增大。其主要原因:混合燃料中 N、H 元素的增加导致燃烧后烟气中 N_2 和 H_2O 生成量的增大^[27]。因此,在氨煤混烧实际工程应用中应考虑氨、煤燃料差异对燃烧前—二次风供给量及燃烧后烟气量的影响。

2.3.2 露点

水露点和酸露点随氨掺混比例的变化规律如图 4 所示。由图 4 可知,水露点受氨燃料的影响较为明显,随混合燃料中氨比例的增加而增加,当混

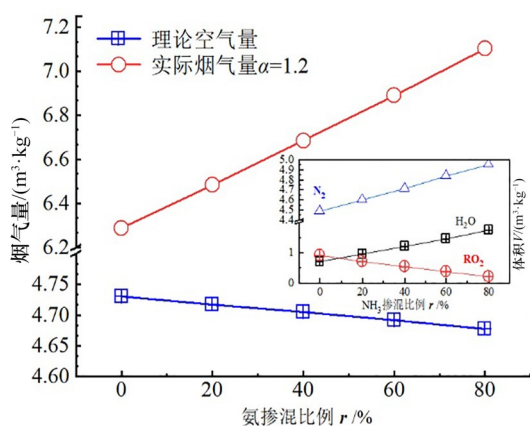


图3 烟气流与氨掺烧比例的关系

Figure 3 Relationship between flue gas flow and ammonia ratio

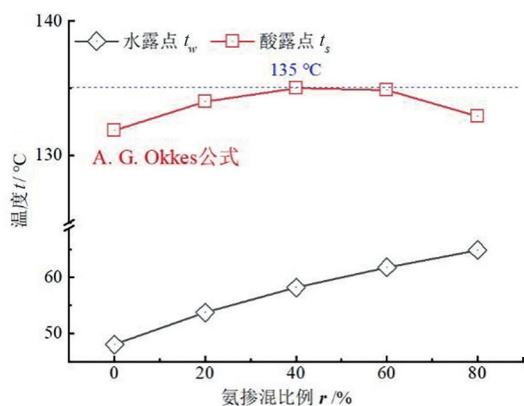


图4 露点与氨掺烧比例的关系

Figure 4 Relationship between dew point and ammonia ratio

合燃料中氨比例从0增大到40%时,水露点温度从48℃提高到了53.7℃,增大了11.9%。酸露点随氨比例的增加呈现非线性变化规律,随混合燃料中氨比例的增加先增大后减小,当氨比例从0增大到40%时,酸露点从131.9℃提高到最大值135℃,当氨比例继续增大到80%时,酸露点降低为132.9℃。其主要原因为酸露点与烟气中H₂O和SO₃浓度密切相关,酸露点随着H₂O和SO₃浓度的增大呈现非线性增大变化规律。而随着混合燃料中氨掺烧比例的增加,燃烧后烟气中H₂O含量增加而SO₃浓度降低,由H₂O和SO₃浓度变化导致的酸露点变化规律不一致,因此酸露点存在一最大值。研究结果表明,氨燃料掺烧会明显影响烟气中露点温度,因此低温省煤器、湿法脱硫塔等尾部烟气处理设备应充

分考虑燃料变化带来露点的变化^[28]。

2.3.3 烟气成分

混合燃料完全燃烧后烟气中主要气体成分组成如图5所示。由图5(a)可知,烟气中H₂O和RO₂等三原子气体的含量与氨燃料的掺混比例密切相关。当混合燃料中氨的比例从0增大到40%时,烟气中H₂O含量由10.9%增加到17.9%,增加了64.2%;烟气中RO₂等3原子气体含量由14.2%降低至8.2%,降低了41.4%。由于烟气中起辐射作用的主要是3原子气体,因此氨燃料加入后会对炉膛的辐射换热有明显影响^[29]。图5(b)为单位质量的混合燃料燃烧后烟气中水分组成。由图5(b)可知,混合燃料燃烧后烟气中水分主要来源于煤和氨两部分,随氨燃料比例的增大,煤燃烧生成的水分不断降低,氨燃烧生成的水分不断提高^[30]。

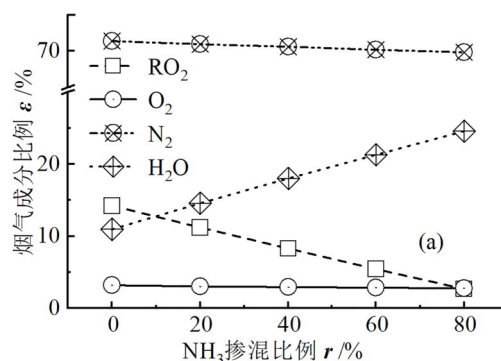
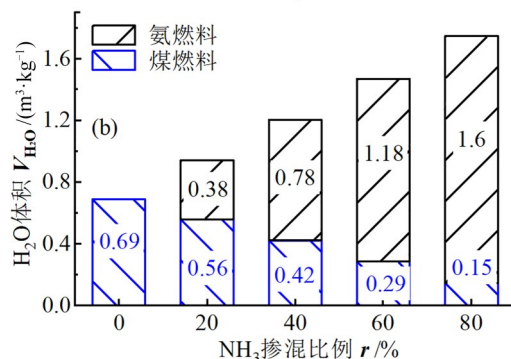
(a) 烟气成分与NH₃掺混比例对应关系(b) H₂O体积与NH₃掺混比例关系

图5 烟气成分与氨掺烧比例的关系

Figure 5 Relationship between gas components and ammonia ratio

由于氨燃料中存在大量的N元素,因此氨燃料燃烧过程中会生成大量的燃料型NO_x。同时,燃料型NO_x的生成量与运行、燃烧等参数密切相关^[31-34],因此难以对混合燃料燃烧过程中NO_x生成量进行定

量分析。本文主要讨论了混合燃料燃烧后烟气中尘、硫污染物随氨掺混比例的变化规律^[35-37],如图 6 所示。由图 6 可知,烟气中尘、硫污染物随氨掺混比例的增加而降低。当混合燃料中氨比例从 0 增大到 40% 时,颗粒物的排放浓度从 22 g/m³ 降低到 12.98 g/m³,SO₂ 的排放浓度从 0.89 g/m³ 降低到 0.52 g/m³,浓度均降低了约 41%。研究结果表明:除 NO_x 外,氨燃料掺烧极大的降低了烟气中 PM、SO_x 的排放浓度,因此现有的电除尘器、湿法脱硫塔等尾部烟气处理设备能够以较低的运行成本和较高运行效率实现污染物的超低排放。

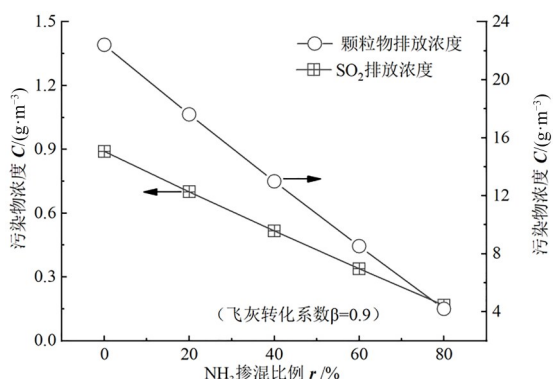


图 6 烟气中尘、硫污染物与氨掺烧比例的关系

Figure 6 Relationship between PM, SO_x and ammonia ratio

氨作为零碳燃料,利用氨煤掺烧可快速降低燃煤发电机组的碳排放强度。不同掺氨比例下碳排放量的计算结果如图 7 所示。由图 7 可知,燃烧过程中的碳排放量随着掺氨比例的增加呈线性下降。当氨掺烧比例为 40% 时,CO₂ 的排放量也降低 40%。与燃煤机组相比,燃气机组清洁低碳优势突出。通过计算可知,在氨掺烧量为 43% 时,可实现燃煤发电机组的碳排放量与同等容量等级的燃气发电机电碳排放量基本相等^[38-41]。

2.4 氨掺烧对排烟温度的影响

炉膛内同时存在着燃烧和传热过程。混合燃料燃烧后的理论燃烧温度和炉膛出口计算烟温如图 8 所示。由图 8 可知,当混合燃料中氨比例从 0 增大到 40% 时,炉膛理论燃烧温度随氨燃料掺烧比例的增大而降低,由 2 340 °C 降低至 2 294 °C;炉膛出口烟温随氨燃料掺烧比例的增大而增大,由 1 212 °C 增加至 1 220 °C。由计算结果可知,氨燃料掺烧后会直接影响炉膛热平衡,并在一定程度上会

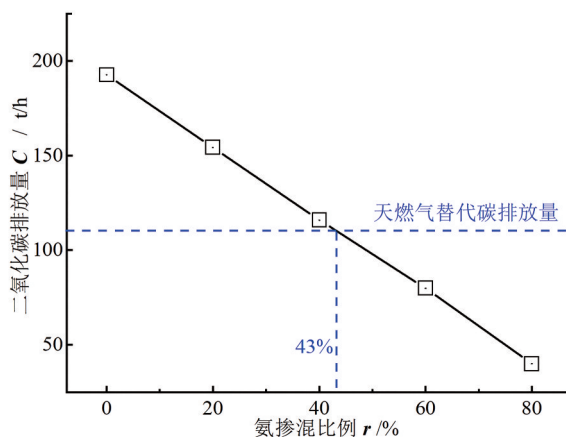


图 7 碳排放量与氨掺烧比例的关系

Figure 7 Relationship between carbon emissions and ammonia ratio

对原有汽水循环系统造成影响。因此在氨煤混烧实际工程应用中应重点考虑由于氨、煤燃料差异对炉膛换热系统造成的影响,需调整燃烧组织或优化受热面布置,避免出现各受热面换热量与设计值偏离过大的风险^[42-43]。

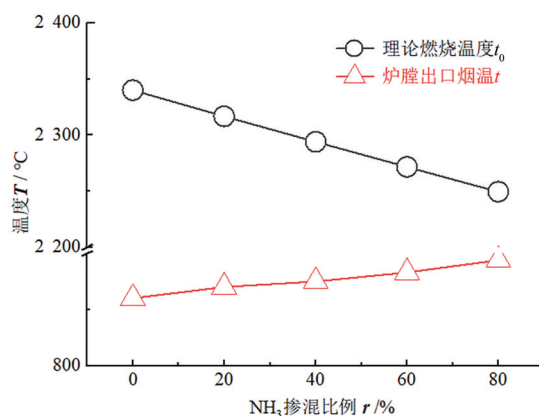


图 8 理论燃烧温度和炉膛出口烟温与氨掺烧比例的关系

Figure 8 Relationship between theoretical combustion and furnace outlet flue gas temperature and ammonia ratio

图 9 为炉膛辐射传热系数与氨掺烧比例的关系。炉膛内传热以辐射传热为主,对流传热占比很小。火焰一般由双原子气体(N₂、O₂、CO)、3 原子气体(CO₂、H₂O、SO₂)和悬浮固体粒子(炭黑、飞灰、焦炭粒子)所组成,火焰的辐射和吸收是在整个容积中进行的。其中双原子气体对热辐射是透明的,因此燃烧过程中火焰中 3 原子气体和各种悬浮的固体粒子对辐射传热有直接影响^[44]。对于 3 原子来说,氨燃

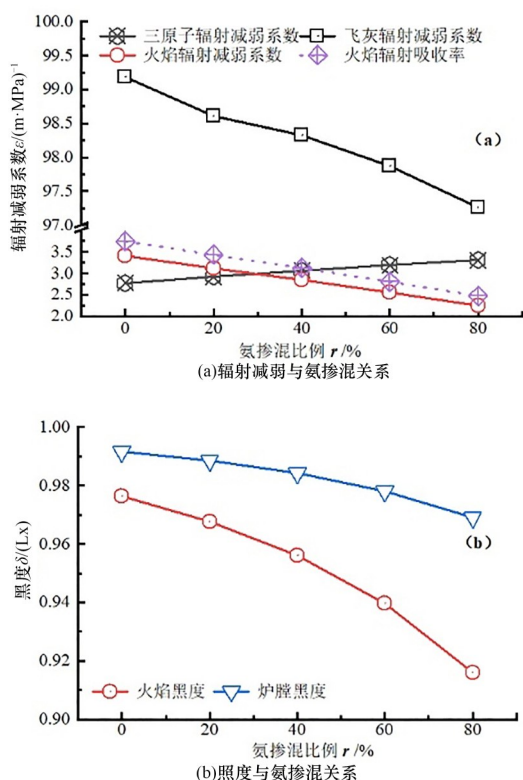


图9 炉膛辐射传热系数与氨掺烧比例的关系

Figure 9 Relationship between furnace radiation heat transfer coefficient and ammonia ratio

料掺烧使烟气中3原子浓度增大,因此3原子辐射减弱系数随氨燃料掺烧比例的增大而增大;对于飞灰颗粒来说,氨燃料掺烧使炉膛出口烟温降低,飞灰辐射减弱系数降低;结合3原子气体和飞灰颗粒浓度,计算得到火焰辐射减弱系数和火焰辐射吸收率随氨掺烧量增大而降低(如图9(a))。火焰黑度是反应炉内传热的重要参数,火焰黑度反映了炉内颗粒燃烧状况于煤粉颗粒的辐射特性。炉膛黑度是相应于火焰有效辐射的黑度,用来说明火焰与炉壁间辐射换热的关系。炉膛黑度与炉壁的热有效系数、炉排面积与炉膛总壁面积之比和火焰黑度有关。火焰黑度和炉膛黑度随氨掺混比例的增加逐渐降低,如图9(b)所示。

3 结论

双碳背景下,依托现有燃煤锅炉实现氨燃料与煤粉的灵活掺烧,是一条符合中国基本国情的燃煤发电低碳化技术路线。本文以300 MW煤粉锅炉热力计算为基础,对不同氨掺烧比例下煤粉锅炉的进

行了系统性校核计算和性能预测。考察了燃料消耗量、锅炉效率及烟气特性随氨燃料掺烧比例的变化规律;进一步分析了炉膛辐射减弱系数和黑度随氨掺烧比例的变化规律。

1)掺烧比例从0增大到40%,锅炉排烟热损失增加5.3%,锅炉效率下降0.21%;随着氨掺烧比例的增加,排烟热损失逐渐增加,锅炉效率逐渐降低;

2)掺烧比例从0%增大到40%,烟气量增加6.2%,水露点提高11.9%,酸露点存在一最大值,在掺烧比例为40%达到最大值135℃;在实际工程应用中,锅炉受热面、污染物处理设备应考虑由于氨、煤燃料差异对燃烧后烟气特性带来的变化。

3)随氨燃料掺烧比例的增大,燃烧烟气中水含量增大,PM、SO_x的排放浓度降低。现有的尾部烟气处理设备能够以较低的运行成本和较高运行效率实现污染物的超低排放。

4)掺烧比例从0增大到40%,燃烧温度降低46℃,炉膛出口温度提高8℃;氨燃料掺烧影响炉膛热平衡,需调整燃烧组织或优化受热面布置,避免出现各受热面换热量与设计值偏离过大的风险。

参考文献:

- [1] 朱法华, 徐静馨, 潘超, 等. 煤电在碳中和目标实现中的机遇与挑战[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(2): 79-86.
ZHU Fahua, XU Jingxin, PAN Chao, et al. Opportunities and challenge of coal power industry in the achievement of carbon neutrality goal[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(2): 79-86.
- [2] 潘荔, 陈忠, 石丽娜, 等. 燃煤机组负荷变化对碳交易的影响初探[J]. 电力科技与环保, 2022, 38(6): 492-499.
PAN Li, CHEN Zhong, SHI Lina, et al. Study on the impact of coal-fired power load change on carbon trading[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(6): 492-499.
- [3] 肖先勇, 刘俊勇. 专栏评述: 新型电力系统[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 1-2.
XIAO Xianyong, LIU Junyong. Column review: New type power system[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 1-2.
- [4] 冯伟忠, 李励. “双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 452-461.
FENG Weizhong, LI Li. Research h and practice on development path of low-carbon, zero-carbon and negative carbon transformation of coal-fired power units under "Double Carbon" targets[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 452-461.
- [5] 雍瑞生, 杨川箬, 薛明, 等. 氢能应用现状与前景展望[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 111-121.
YONG Ruisheng, YANG Chuanzan, XUE Ming, et al. Application status and prospect of ammonia energy[J]. Strategic Study of CAE,

- 2023,25(02): 111–121.
- [6] 赖诗妮, 江丽霞, 李军, 等. 含碳掺氨燃料的研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(9): 4603–4615.
- LAI Shini, JIANG Lixia, LI Jun, et al. Research progress of ammonia blended fossil fuel[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(9): 4603–4615.
- [7] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE A, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(1): 109–133.
- [8] 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197–2211.
- XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197–2211.
- [9] 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.
- [10] 朱京冀, 徐义书, 徐静颖, 等. 掺烧氨燃料对煤挥发分火焰特性及颗粒物生成的影响[J]. 发电技术, 2022, 43(6): 908–917.
- ZHU Jingji, XU Yishu, XU Jingying, et al. Effect of co-firing ammonia on coal volatile flame characteristics and particulate matter formation behaviors[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6): 908–917.
- [11] 底一, 黄骞, 马鹏, 等. 生物质掺氨燃烧特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6547–6552.
- DI Yi, HUANG Qian, MA Peng, et al. Experimental investigation on combustion characteristics of cofiring biomass with ammonia[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6547–6552.
- [12] 北极星电力网. 300 MW 机组 35% 掺氨, 实现了[EB/OL]. (2023–04–10)[2024–01–24]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1762778952342725811&wfr=spider&for=pc>.
- [13] 段伦博, 李天新. 氨燃烧特性及稳燃技术研究进展[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 41–54.
- DUAN Lunbo, LI Tianxin. Research progress of ammonia combustion characteristic and stable-combustion technology[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2022, 50(7): 41–54.
- [14] ZHANG J W, 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] 王一坤, 邓磊, 王涛, 等. 大比例掺烧 NH_3 对燃煤机组影响分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 185–192.
- WANG Yikun, DENG Lei, WANG Tao, et al. Influence of large scale coupled NH_3 power generation on coal-fired units[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 185–192.
- [16] SOUSA C J, SILVA V, EUSEBIO 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.
- [17] XU Y S, WANG H K, LIU X W, et al. Mitigating CO_2 emission in pulverized coal-fired power plant via co-firing ammonia: A simulation study of flue gas streams and exergy efficiency[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 256: 115328.
- [18] ZHU J J, LIU X W, XU Y S, et al. Probing into volatile combustion flame and particulate formation behavior during the coal and ammonia co-firing process [J]. Energy & Fuels, 2022, 36(16): 9347–9356.
- [19] 王爽奇, 田宇, 龚迎莉, 等. 330 MW 煤粉锅炉掺烧生物质气对锅炉性能的影响分析[J]. 电力学报, 2021, 36(5): 397–403.
- WANG Shuangqi, TIAN Yu, GONG Yingli, et al. Analysis on effect of boiler performance of mixed burning biomass gasification gas in a 330 MW pulverized coal boiler[J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(5): 397–403.
- [20] 贾培英, 殷亚宁. 300 MW 煤粉锅炉掺烧氢气的应用研究[J]. 电站系统工程, 2016, 32(2): 37–38.
- JIA Peiying, YIN Yaning. Study on co-combustion hydrogen in a 300 MW coal-fired boiler[J]. Power System Engineering, 2016, 32(2): 37–38.
- [21] 白岩, 郭风波, 汪伟. 某电厂锅炉直吹式制粉系统问题治理[J]. 东北电力技术, 2011, 26(3): 354–357.
- BAI Yan, GUO Fengbo, WANG Wei. The treatment of problem of direct firing pulverizing system in a power plant[J]. Northeast Electric Power Technology, 2011, 26(3): 354–357.
- [22] LI Y, FAN W D, WANG Y, et al. Characteristics of char gasification in staged oxygen-enriched combustion in a down flame furnace[J]. Energy & Fuels, 2016, 30: 1675–1684.
- [23] 岳峻峰, 肖杰, 秦鹏. 双进双出磨煤机降低磨煤电耗试验研究[J]. 热能动力工程, 2011, 26(3): 354–357.
- YUE Junfeng, XIAO Jie, QIN Peng. Experimental study of a dual inlet and outlet coal mill for reducing its milling power consumption[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(3): 354–357.
- [24] SOUSA C 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.
- [25] MERANER C, LI T, DITARANTO M, et al. Effects of scaling laws on the combustion and NO_x characteristics of hydrogen burners[J]. Combustion and Flame, 2020, 214: 407–418.
- [26] XIA Y, HADI K, HASHIMOTO G, et al. Effect of ammonia/oxygen/nitrogen equivalence ratio on spherical turbulent flame propagation of pulverized coal/ammonia co-combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(3): 4043–4052.
- [27] 蒋安众, 王罡, 石书雨, 等. 锅炉烟气酸露点温度计算公式的研究[J]. 锅炉技术, 2009, 40(5): 11–13+17.
- JIANG Anzhong, WANG Gang, SHI Shuyu. Discussion on calculation formulae of boiler's acid dew-point temperature of gas [J]. Boiler Technology, 2009, 40(5): 11–13+17.
- [28] 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.

- [29] REITER A J, KONG S C. Demonstration of compression-ignition engine combustion using ammonia in reducing greenhouse gas emissions[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(5): 2963–2971.
- [30] 吕强, 王儒儒, 李长兴, 等. 燃煤锅炉掺氨燃烧研究进展[J]. *节能技术*, 2023, 41(4): 324–331.
LYU Qiang, WANG Ruru, LI Changxing, et al. Research progress on co-firing ammonia in coal-fired boiler [J]. *Energy Conservation Technology*, 2023, 41(4): 324–331.
- [31] 陈达南, 李军, 黄宏宇, 等. 氨燃烧及反应机理研究进展[J]. *化学通报*, 2020, 83(6): 508–515.
CHEN Danan, LI Jun, HUANG Hongyu, et al. Progress in ammonia combustion and reaction mechanism [J]. *Chemistry*, 2020, 83(6): 508–515.
- [32] 康志忠, 张震卓, 丁先, 等. 氨煤混燃气相中NO生成的化学反应动力学分析[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(6): 844–850.
KANG Zhizhong, ZHANG Zhenhuo, DING Xian, et al. Chemical reaction kinetics analysis of NO generation in gas phase of ammonia-coal co-firing [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(6): 844–850.
- [33] TIAN J, WANG L, XIONG Y Q, et al. Enhancing combustion efficiency and reducing nitrogen oxide emissions from ammonia combustion: A comprehensive review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 183: 514–543.
- [34] ZHENG R, CHEN L, LI J G, et al. Optical study on the effects of wall and intake temperatures on ammonia combustion and emissions[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120(43): 24734–24742.
- [35] LI Y, FAN W D, GUO Q, et al. Numerical modeling of oxy-fuel combustion in a refractory-lined down flame furnace[J]. *Energy & Fuels*, 2013, 28: 155–162.
- [36] ZHAI Y F, LIU X W, ZHOU Z J, et al. Effect of ammonia co-firing ratio on the formation of condensable particulate matter in pollutants during coal/ammonia co-combustion [J]. *Fuel*, 2024, 356: 129579.
- [37] CHEN C, LIU D. Review of effects of zero-carbon fuel ammonia addition on soot formation in combustion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 185: 113640.
- [38] 高正平, 涂安琪, 李天新, 等. 面向零碳电力的氨燃烧技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(3): 173–184.
GAO Zhengping, TU Anqi, LI Tianxin, et al. Recent advances on ammonia combustion technology for zero-carbon power[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(3): 173–184.
- [39] ZHANG M M, CHEN Q, LIU N, et al. Kinetic insights into ammonia-hydrogen doped ignition and emission assisted by nanosecond pulsed discharge[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 78: 773–782.
- [40] 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): 2876–2886.
SI Tong, HUANG Qian, YANG Yuanping, 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): 2876–2886.
- [41] 刘峰, 冯少波, 赵兵涛, 等. 氨及掺氨燃烧过程机理与特性研究进展[J]. *化学工业与工程*, 2023, 40(6): 107–118.
LIU Feng, FENG Shaobo, ZHAO Bingtao, et al. Advances in process characteristics and mechanisms of ammonia combustion and co-firing [J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2023, 40(6): 107–118.
- [42] 罗俊伟, 张泽武, 查小健, 等. 高温预热氨煤掺混MILD燃烧反应特性[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 55(5): 31–38.
LUO Junwei, ZHANG Zewu, ZHA Xiaoian, et al. Reaction characteristics of coal/NH₃ co-combustion affected by the highly preheated temperature under MILD combustion mode[J]. *Journal of South China Normal University(Natural Science Edition)*, 2023, 55(5): 31–38.
- [43] 徐连兵, 陈璟, 魏书洲, 等. 大比例掺氨下煤粉火焰区喷氨位置对燃烧及NO生成特性的影响[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(9): 134–144.
XU Lianbing, CHEN Jing, WEI Shuzhou, et al. Effect of ammonia injection location in the pulverized-coal flame zone on combustion and NO formation characteristics under large proportion of ammonia blending conditions[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(9): 134–144.
- [44] 徐静颖, 朱鸿玮, 徐义书, 等. 燃煤电站锅炉氨燃烧研究进展及展望[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 55–65.
XU Jingying, ZHU Hongwei, XU Yishu, et al. Research progress and prospect of ammonia co-firing in utility coal-fired boiler [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(7): 55–65.



第一作者简介:王翔(1989—),男,副研究员,主要从事低碳能源及智慧化等方面的研究, wangxiang2022@ipe.ac.cn;



王雪(1989—),女,副研究员,主要从事氢氨等零碳能源产业规划及应用等方面的研究, wangxue@hycentre.org.cn;



侯宗余(1986—),男,副研究员,主要从事激光检测及能源系统相关技术研究, houzy@tsinghua.edu.cn;



陈国庆(1982—),男,教授级高级工程师,主要从事燃煤发电机组低碳节能技术等方面的研究, 12019471@ceic.com。

(编辑 林正根)