

煤炭掺氨燃烧基础研究与技术应用研究进展

司桐¹, 黄骞¹, 杨远平^{1,2}, 马鹏¹, 雷小洋¹, 李水清¹

(1. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617)

摘要: 能源安全和“双碳”目标影响着全球能源产业链供应链, 对我国能源电力系统的安全高效和绿色低碳转型提出了迫切的要求。为保障能源安全, 煤电在未来相当长一段时间内仍是我国电力供应安全及可再生能源消纳的重要支撑。为实现碳中和, 能源系统逐渐从主要依赖化石能源转向以可再生能源为主, 但可再生能源的间歇性、随机性、波动性特点使得电力系统调节更加困难, 系统平衡和安全问题更加突出。在这种情况下, 以氨为代表等零碳燃料在处理可再生能源的间歇性方面发挥着不可或缺的作用, 其既可作为长时大规模储能的载体来实现可再生能源大规模消纳, 又可灵活地用在锅炉等动力设备中直接替代燃用。然而, 由于零碳燃料与化石燃料在理化性质上的差异, 导致零碳燃料在燃用过程中存在如火焰稳定性差、易生成氮氧化物等问题, 给氨燃料的大规模利用带来了挑战。为此, 从煤炭掺氨燃烧的可行性、经济性和必要性出发, 对氨煤共燃的化学反应动力学、燃烧特性(着火、稳燃)和污染物生成特性(NO_x 、飞灰颗粒物和碳烟生成)进行了全面综述, 并讨论了以无量纲准则数为基础的燃烧器模化放大准则, 详细探讨了现有工业级氨煤燃烧器高效稳定燃烧控制策略, C—N燃料分级、空气分级及其联合控制均有效降低 NO_x 的排放, 未来融合人工智能、大数据及数字孪生等信息化技术, 有望从源头为下一代面向双碳战略的新型绿色动力发电系统的研发提供科学支撑和路径参考。

关键词: 氨煤共燃; 低碳; NO_x ; 分级燃烧; 模化放大; 人工智能

中图分类号: TQ534 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)06-2876-11

Advancements and future outlook in fundamental research and technological applications for ammonia co-firing with coal

SI Tong¹, HUANG Qian¹, YANG Yuanping^{1,2}, MA Peng¹, LEI Xiaoyang¹, LI Shuiqing¹

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: Energy security and the “dual carbon” goals are impacting the global energy industry and supply chains, presenting some urgent needs for the secure, efficient, and green low-carbon transformation of energy and power systems in China. To ensure energy security, the coal-fired power plant will remain an important support for electricity supply security and the integration of renewable energy for a considerable period into the future in China. To achieve carbon neutrality, the energy system is gradually shifting from primarily relying on fossil fuels to primarily relying on renewable en-

收稿日期: 2023-09-30 修回日期: 2023-12-28 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ZZ23.1476

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3701504); 国家自然科学基金资助项目(52306151); 中国博士后科学基金资助项目(2023M731892)

作者简介: 司桐(1993—), 男, 辽宁大连人, 助理研究员, 博士。E-mail: hdsitong@163.com

通讯作者: 李水清(1975—), 男, 山东济宁人, 教授, 博士。E-mail: lishuiqing@tsinghua.edu.cn

引用格式: 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.



移动阅读

ergy. However, the intermittency, randomness, and volatility of renewable energy make power system regulation more challenging, highlighting the issues of system balance and security. In this context, the zero-carbon fuels such as ammonia play an indispensable role in dealing with the intermittency of renewable energy. They can serve as carriers for long-term and large-scale energy storage to facilitate the large-scale integration of renewable energy and can also be flexibly used directly in power equipment such as boilers to replace fossil fuels. However, due to the differences in physical and chemical properties between zero-carbon fuels and fossil fuels, some challenges arise in the widespread utilization of ammonia fuel, such as poor flame stability and the generation of nitrogen oxides during combustion. Therefore, based on the feasibility, economy and necessity of ammoniac-coal co-combustion, this paper comprehensively reviews the chemical reaction kinetics, combustion characteristics (ignition, steady combustion) and pollutants characteristics (NO_x , fly ash particles and soot) of ammoniac-coal co-combustion, and discusses the scaling laws of burner based on the dimensionless number. The efficient and stable combustion control strategy of existing industrial grade ammonia-coal burners is discussed in detail. The C—N fuel separation, air staged and their joint control technology can effectively reduce NO_x emissions. In the future, artificial intelligence, big data and digital twin and other information technologies are integrated. It is expected to provide a scientific support and path reference for the research and development of the next generation of new green power generation system oriented to the dual carbon strategy from the source.

Key words: ammonia-coal co-combustion; low-carbon; NO_x ; staged combustion; module magnification; artificial intelligence

“双碳”战略的实施对能源生产过程的减污降碳提出了变革性的重大需求^[1]。其中,化石燃料发电去碳化是能源结构调整中最重要、最具挑战的环节,冶金、化工等其他高耗能行业碳中和的实现同样高度依赖于低碳绿电的快速发展。图 1 为面向碳中和背景下的电力生产流程,未来可再生能源将大幅取代化石燃料的发电份额。然而,大力发展可再生能源(如风电、光伏等)需克服其间歇性、随机性、波动性等问题,逐步实施碳达峰碳中和行动的关键则是新型能源体系的构建,而其最大挑战就是结合灵活调峰来解决可再生能源消纳难题^[2-3]。

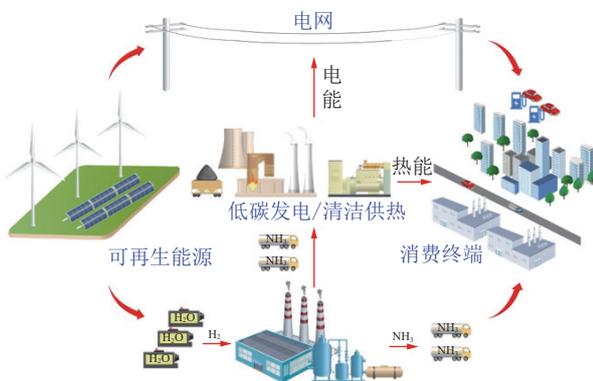


图 1 面向碳中和背景下的电力生产流程

Fig.1 Energy production processes in the context of carbon neutrality

近年来,氨作为一种可大规模、长周期应用的清洁能源载体备受关注。相比于氢,氨的体积热值和液化条件均优于氢,合成工艺成熟、制造成本低,且储存

和运输技术成熟。已有研究表明^[4],在储能设备的投资成本上,直接电池储电成本约为 500 元/MJ,储氢成本约为 23 元/MJ,储氨成本约为 0.18 元/MJ,可见储氨具备非常强的经济效益。特别是随着储能时间和规模的增加,氨的储能优势将进一步凸显。在能源利用效率上,电-氨-氨-电的理论能量利用效率仅为 14%,远低于储电或储氢的能源利用效率。因而,储电或储氢更适合于小规模、短周期的场景,而对应于大规模、长周期的电力生产场景,如电网调峰或燃煤电厂的储能和应用,氨的度电成本更低。进一步考虑氨显著的安全性优势,氨燃料被认为是极具潜力替代传统化石能源应用于锅炉、燃气轮机等动力设备的零碳燃料^[5-7]。目前,日本、欧盟、美国、英国等制定了“Ammonia-Fuel”的发展规划^[8]。

针对我国能源生产结构,2022 年煤炭消费量占能源消费总量的 56.2%,火电累计装机容量达 13.3×10^9 kW,占全国发电装机容量的 51.9%^[9]。在能源结构转型背景之下,煤炭的“压舱石”兜底作用将更加凸显,而燃煤单位发电量的 CO_2 排放显著高于石油和天然气。因此,依托现有燃煤机组进行掺氨混烧,被认为是符合我国国情的火电低碳化技术路线。日本较早开展了氨煤共燃可行性分析,认为当利用天然气生产的氨气时,煤+碳捕集和封存(Carbon Capture and Storage, CCS)、煤+20% 掺氨+CCS、纯氨燃烧 3 种技术路线的度电成本分别约为 1.2、1.3、1.1 元/(kW·h)^[10]。因此,即使是传统的氨生产方式,在零碳排放情景下,氨煤混燃仍在度电成本上具备与 CCS 竞争的潜力。从减

碳角度来看,只有绿氨会带来显著的碳减排,但现阶段可再生能源生产绿氨的成本(200~600 \$/t)仍较高,随着我国风光能源制氢成本逐年降低,绿氨的价格预计也将逐渐下降。据估计,若全球燃煤电厂采用 20% 的氨混燃,将会带来每年约 1.2 Gt 碳减排,约占 2021 年全球能源相关二氧化碳总排放量的 4%^[11]。此外,建设氨/氨储能与煤混燃的综合能源系统,能够有效实现电网调峰,促进可再生能源消纳^[12]。以 25% 的掺氨比为例,相比电化学储能的情景,此时整个综合能源系统的年运行成本和碳排放分别降低 8.59% 和 12.74%,体现了氨煤混燃在未来可再生能源为主体的能源体系中的作用。

然而,相比于化石燃料,氨燃料的清洁高效燃烧技术较不成熟,存在反应活性低、点火困难、火焰速度低,掺烧过程存在燃烧不稳定的风险^[13-14]。更具挑战的是,氨中富含氮元素使得 NO_x 的排放可达数千 ppm 级,且燃烧过程生成的 NO_x 对气氛高度敏感。因此,氨煤共燃技术发展的瓶颈在于:如何在实现高效持续稳定燃烧的同时高效抑制 NO_x 生成。工业应用上,虽然已有氨煤混燃在电站的终端应用,但其适用范围仍不明确,特别是面向当前深度调峰的需求,氨煤混燃宽范围调节的灵活性、稳定性和效率是一个挑战^[15]。

总体而言,利用氨替代煤炭的掺烧技术在减少碳

排放方面具有潜在优势,但仍面临诸多技术挑战。由于氨及掺氨燃烧的特殊性和复杂性,其燃烧过程机制、污染物影响参数、燃烧组织调控方法等的认知尚需深化。目前亟需开展氨煤共燃反应动力学模型、燃烧特性及污染物生成特性研究,形成先进的燃烧组织和调控方法,确保火焰稳定性和污染物排放的协同控制。为此,笔者阐述了氨煤共燃过程的混合-着火-稳燃机理,进而分析掺氨燃烧后污染物生成特性和宽范围调节过程中负荷及尺度效应对氨煤混燃的影响。

1 化学反应动力学

化学反应模型对深入理解氨煤非均相反应过程和燃烧器数值仿真至关重要,全面了解氨的热解和氧化机理仍是现代燃烧反应动力学的挑战之一。20 世纪 80 年代, MILLER 等^[16]通过对 NH_3/O_2 和 $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2$ 体系的燃烧实验提出了氨氧化的详细反应动力学模型,该模型的组分和反应数为 22、98。如图 2 所示, NH_3 主要通过 OH 和 H 自由基的脱氢反应消耗,而 HNO 是燃料型 NO 形成的重要中间体。在贫燃料条件下, O/H 自由基浓度较高,易于 NO 的形成;富燃条件下,则 NO 的生成相对较少, NH_3 中的氮主要转变为 N_2 。由于该机理中 NH_3 裂解路径的缺失,不能很好地预测富燃条件下氨的燃烧特性,后续众多学者基于该“先驱”模型对氨的氧化机理进行探讨。

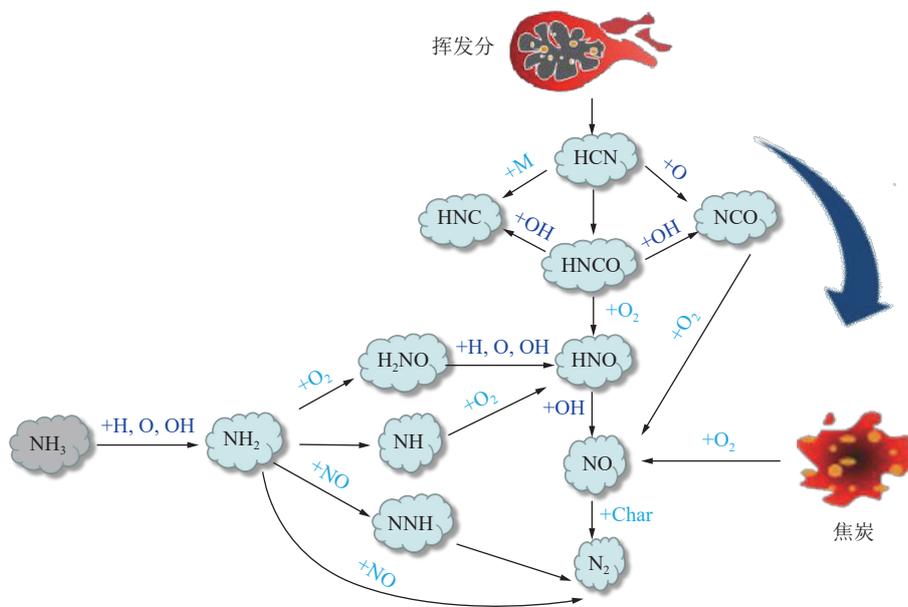


图 2 氨煤共燃过程中的氨氧化反应路径

Fig.2 Oxidation pathway of ammonia co-firing with coal

近期, ALNASIF 等^[17]通过已有的实验数据对文献报道的所有氨燃烧反应模型进行了对比评估,发现模型均无法很好地预测所有实验结果(如层流火焰速

度、点火延迟时间和 NO_x 排放),大部分模型只在有限的工况下表现出较好的预测能力,这意味着在开展掺氨燃料的数值模拟时,需要根据真实应用场景,选取

合适的反应模型。此外, 由于在模型发展过程中采用物种或反应的最精确参数并不一定会改进模型性能, 因此必须对模型参数进行优化。表 1 为目前较为常用的氨燃烧反应模型, 包含氨的裂解路径, 也对关键反应的动力学参数进行了更新。BERTOLINO 等^[18]基于“曲线匹配”的目标函数提出了一种新的数据驱

动方法, 优化了 STAGNI 等^[19]构建的氨热解和氧化模型, 该研究使用包含约 635 个氨燃烧的实验数据库对比模拟结果, 证明了所提出方法的有效性。未来通过此类数学方法和实验数据可评估模型中关键反应的动力学参数, 并结合机器学习进行参数的全局优化, 推动氨燃料反应模型的改进。

表 1 常用的氨燃烧反应模型

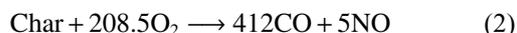
Table 1 Commonly used ammonia combustion reaction model

模型文献来源	(组分/反应数)/个	适用燃料	实验验证
KONNOV 等 ^[20]	127/1 207	NH ₃ /Air; NH ₃ /small hydrocarbon/O ₂ ; NH ₃ 热解	物种浓度
KLIPPENSTE 等 ^[21]	33/211	NH ₃ /Air; NH ₃ /small hydrocarbon/O ₂	物种浓度
GLARBORG 等 ^[22]	39/231	NH ₃ /NO ₂ /O ₂ ; NH ₃ 热解	点火延迟时间, 物种浓度
OKAFOR 等 ^[23]	59/356	NH ₃ /CH ₄ /Air	物种浓度, 层流火焰传播速度
STAGNI 等 ^[19]	31/203	NH ₃ /Air; NH ₃ 热解	物种浓度, 点火延迟时间, 层流火焰传播速度

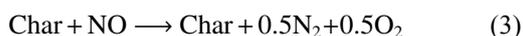
由于氨煤共燃过程涉及大量的非均相反应, 加之煤的组成复杂, 相比于纯氨燃烧的气相反应, 目前对于氨煤共燃机理的认识较为有限^[24]。煤焦通常被认为是由 3~7 个芳环形成的石墨团簇堆叠而成, 芳环边缘的碳原子有未成对电子, 量子化学计算中一般采用锯齿状的 Zigzag 构型对煤焦建模^[25-26]。反应模型方面, GLARBORG 等^[22, 27]建立了煤粉与含氧燃料燃烧过程的氮化学模型, 该模型包含 97 个物种和 778 个反应, 也包含了对煤粉流动混合、颗粒加热和脱挥发分、气固相反应的简化描述。在该反应模型中, 碳烟 (Soot) 和焦炭 (Char) 被确定为 C₁₆₆ 和 C₄₁₂N₅, 碳烟与 NO 的反应为



焦炭的氧化反应为



焦炭对 NO 的还原反应为



该模型对燃烧后 NO 的形成、煤和含氧燃料的燃烧提供了详细描述。根据该模型, 煤粉和常规燃料燃烧之间 NO 排放的差异主要归因于再燃效应以及燃料和氧气间混合模式的变化。随后, ISHIHARA 等^[28]基于该模型, 通过等效化学反应器网络 (Chemical Reactor Network, CRN) 模拟研究了燃煤锅炉中 NH₃ 共燃比对 NO 排放的影响, 该研究中燃煤锅炉被简化为一个反应器网络, 包括主燃区、燃烬区和焰后区。模拟结果表明, 随着共燃比的增加, NH₃ 发生反应的位置向下游移动, NO 峰值也倾向于向下游转移; NH₃ 在

反应器中几乎完全裂解, 大部分在主燃区就被消耗, 氨逃逸几乎为 0, 且与共燃比无关。该方法作为用于模拟复杂反应系统的替代工具在燃烧领域备受关注, CRN 网络模型的构建可通过使用简化动力学获得的 CFD 模拟, 进而根据温度、组成和速度的相似性, 将系统域任意分成典型代表性区域, 如图 3 所示。2021 年, TANIGUCHI^[29]建立了煤粉与氨、甲烷、氢等气体燃料共燃烧火焰传播速度的计算模型, 研究发现对于煤的燃烧, 随着颗粒粒径的减小或挥发分的增加, 其最大火焰传播速度增大; 然而, 由于热解反应的延迟, 煤的火焰传播速度通常低于气体燃料。基于 OKAFOR 等^[23]构建的氨燃烧反应模型, YADAV 等^[30]通过定义三元混合气 (氨、煤挥发分和焦炭废气) 分数并结合大涡数值模拟 (Large Eddy Simulation, LES) 方法研究了氨煤共燃体系, 模拟结果与实验结果一致性较好。与此同时, MELLER 等^[31]也采用相似方法比较了纯氨、纯煤和氨煤共燃的差异性, 模拟过程采用 2 个化学反应模型: 简化的煤燃烧 CRECK 机理 (120 组分, 1 551 步反应); 通过引入 NH₃ 详细氧化反应路径和煤挥发分反应新构建的机理 (129 组分, 1 644 步反应)。结果表明, 2 个模型对组分场和温度场的预测较好, 但对于纯氨和氨煤共燃, 新构建的机理对反应区域的预测有所改进。

综上, 当前研究热点主要集中在氨和煤的单一燃烧反应动力学方面, 而系统性地针对氨煤共燃反应动力学的研究较少, 不足以对燃煤锅炉的掺氨燃烧模拟提供支撑, 也难以实现燃烧反应路径的有效调控。现有的氨煤共燃模型存在关键反应路径缺失、工况覆盖范围较窄和预测精度较低等问题, 氨煤共燃机理的构

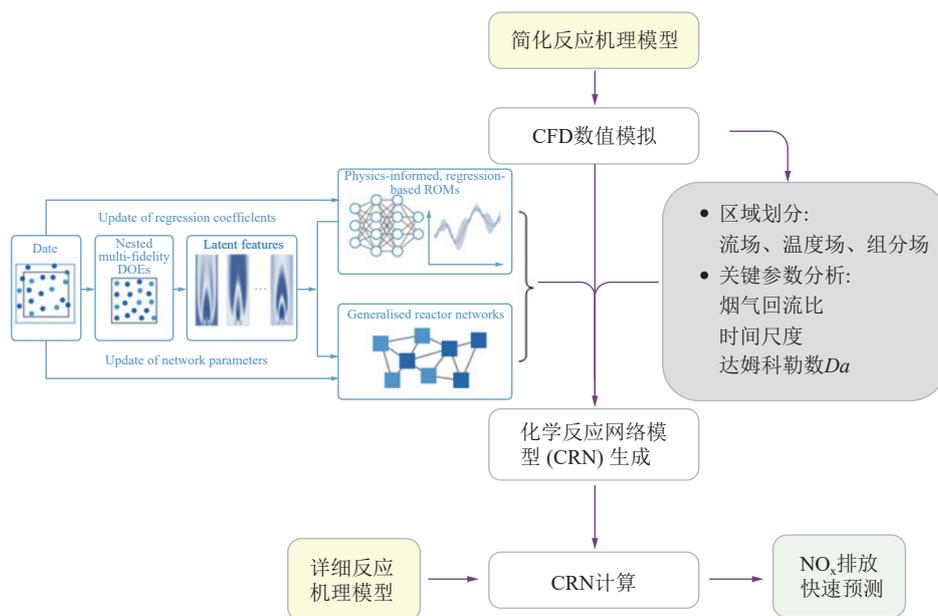


图3 CFD-CRN 计算方法构建流程

Fig.3 CFD-CRN calculation method construction flow chart

建和简化仍面临诸多挑战。此外,由于氨煤共燃反应的复杂性和参数计算的不确定性,发展宽工况下的高精度预测模型也需要借助人工智能方法。利用人工智能方法较强的跨尺度物理特征描述能力来辅助燃烧模型构建有着良好的应用前景,不仅可通过简化方程加快氨煤共燃反应的计算速度,而且也可通过参数优化拓宽氨煤共燃反应模型的应用场景。

2 燃烧特性

2.1 着火特性

氨作为气体燃料,其着火过程无论是预混燃烧还是扩散燃烧,当可燃气体和氧化剂混合到可燃范围内时,加入能量使得可燃混合气体达到着火临界温度时,着火便会发生。然而,相比其他气体燃料(如 CO 、 H_2 和 CH_4),在不加稳燃措施条件下,氨气难以稳定燃烧^[32-33]。煤粉作为固体燃料,其着火过程与气体燃料存在显著差异,着火过程存在均相、非均相以及联合着火3种模式,挥发分、加热速率、氧气体积分数、粒径等均会影响煤粉的着火模式^[34]。

对于氨煤共燃体系,其着火过程更加复杂。在两级平焰燃烧器中开展的不同掺氨比和不同氧气体积分数的氨煤混燃实验表明,当氨与煤混合进入高温环境中时,氨气与煤粉的着火取决于氨与局部氧气体积分数^[35]。当掺氨量低于40%时,并未发现氨气火焰,而当掺氨量高于40%时,出现氨气火焰,且氨气火焰总是先于煤粉着火,提高氧气体积分数有利于氨气燃烧,降低了氨气火焰的高度。对于煤粉燃烧,在低氧

气体积分数下,掺入氨气会导致煤粉的着火延迟时间先降低,而后略微上升,而在高氧气体积分数下,掺入氨气使得煤粉点火延迟时间增加。这其中可能有4个影响因素:①掺氨后,煤粉挥发分与氨的混合增强了均相点火;②氨火焰的形成加快了煤粉的加热过程;③掺氨后,煤粉数浓度降低,煤粉颗粒的加热速率加快;④氨与氧气反应,阻碍了煤粉颗粒的非均相反应。在高氧气体积分数下,煤粉颗粒更易发生非均相反应,因而掺入氨气后,氨对氧气的消耗使得煤粉颗粒表面的非均相反应难以发生,煤粉着火模式从非均相着火转变为均相着火,着火滞后。而在低氧气体积分数下,煤粉颗粒更倾向于均相着火,因而掺氨导致非均相着火更易发生,但在掺氨比较大时,随着氧气被氨消耗和煤粉析出总挥发分量减小,煤粉的挥发分着火滞后。

进一步的OH-PLIF诊断表明,氨煤混燃的反应特征时间与局部氧气体积分数密切相关。在高氧气体积分数时,氨煤混合物的反应特征时间随掺氨量的增加而下降,但在低氧气体积分数时,氨煤混合物的反应特征时间随掺氨量的增加而上升。时间尺度分析表明,在低氧气体积分数下,由于氨的反应特征时间要大于煤粉加热和热解特征时间,导致此时主导反应的是挥发分浓度^[36]。因此,随着掺氨量的增加,比氨更易反应的挥发分浓度下降,使得整个反应特征时间减少。在高氧气体积分数下,氨的反应特征时间要小于煤粉加热和热解特征时间,此时主导反应过程的是氨气,因此随着掺氨量的增加,整个反应特征时间减少^[37]。

2.2 稳燃特性

燃料的着火与稳燃是燃烧设备安全稳定运行的基础。氨火焰相比其他碳氢燃料更宽、更长。同时,氨火焰颜色因 NH_2^* 高温自发光而呈橘黄色,而碳氢燃料充分燃烧时,因 CH^* 高温自发光而呈淡蓝色,在燃烧不充分时由于碳烟的存在,火焰颜色为橘黄色^[38]。对于煤粉火焰,由于煤粉燃烧过程中碳烟的形成,煤粉火焰呈橘黄色,与氨气火焰颜色相近。因此,难以直接从颜色上区分氨煤混燃时火焰具体来自于哪种燃料的燃烧。

对于氨燃烧,由于氨的低火焰传播速度,导致氨火焰很难稳定燃烧,必须通过增加燃料停留时间、预热、其他燃料混燃或富氧等方式实现稳定燃烧。而对于煤粉燃烧过程,煤粉火焰传播依赖于煤粉热解析出的挥发分,通过挥发分的着火、放热和加热煤粉颗粒,实现煤颗粒或焦炭的引燃。因而,煤粉的火焰传播本身也需要诸多类似氨稳燃的措施。在氨煤混燃过程中,氨的加入如何影响火焰传播过程是值得关注的问题。已有许多学者开展了氨煤的基础燃烧特性研究。KHALID 等^[39]设计了球形火焰传播速度测量装置,利用像增强器和高速相机获得氨煤混燃过程中的 OH 自由基的空间分布演化规律,进而获得了湍流火焰传播速度,从而开展了湍流强度、煤阶和当量比对氨煤混燃湍流火焰传播速度的影响。值得注意的是,实验中采用的气氛条件为 $40\%\text{O}_2-60\%\text{N}_2$ 的富氧条件,以实现火焰传播。实验发现随着湍流强度和煤中挥发分提高,湍流火焰传播速度增大。在不同当量比条件下,氨与高挥发分烟煤混燃的火焰传播速度均高于煤粉和氨的火焰传播速度,特别在低当量比时,是煤粉、氨火焰传播速度的 3 倍和 2 倍。

此外,氨的热值通常比煤低,在入炉总热值不变的情况下,所需氨的质量要高于燃煤,在掺氨替代过程中将导致燃料管内的气体流量增大,掺氨量超过 40% 时,高速氨射流火焰完全穿透火焰内再循环区,降低了再循环区内的负压,形成细长的火焰。火焰结构的改变将直接影响炉膛内温度场及流场的分布,进而影响热流分布和传热方式。LIU 等^[40]针对不同掺氨比例下氨从旋流煤粉燃烧器中心进入时的火焰形貌进行了模拟,发现在掺氨量小于 10% 时旋流火焰保持不变,掺氨量为 20%~30% 时为射流火焰,回流区消失,进一步增大掺氨量为 50%,形成了类似蜡烛火焰形貌的火焰结构。TAMURA 等^[41]对不同氨喷口结构对氨从中心喷入旋流煤粉燃烧器后氨与回流区的关系进行模拟,发现氨喷口的角度和孔径影响氨是否会穿透回流区,从而影响火焰结构和 NO_x 排放量。

3 污染物排放特性

3.1 NO_x 排放及燃烬特性

污染物的防控是煤-氨清洁燃烧的关键。对氨燃烧来说,深入研究燃料 NO_x 的形成过程至关重要。一般来说,燃料 N 向 NO_x 的转化取决于火焰温度、化学计量数和燃料中的含 N 量;高温、高氧及燃料高含氮量促进了 NO_x 的释放。氨燃烧过程是自由基(主要是 O、H、OH 自由基)参与的复杂链锁反应,自由基的浓度对氨转化及 NO_x 的生成具有重要影响。在贫燃火焰中,自由基的大量存在可促进 NH_i 转化为 NO,从而提高 NO_x 的释放;相反,在富燃条件下,自由基浓度的减小抑制了燃料氮向 NO_x 的转化,同时富余的氨可作为还原剂降低 NO_x 的生成即选择性非催化还原 SNCR 过程。

近年来,采用激光诱导荧光(LIF)等先进的激光诊断技术来表征气相中 NO_x 生成的分布规律取得了很好的效果,但其无法揭示氮的复杂演变机制。结合复杂化学反应的计算流体动力学(CFD)方法可辅助捕获更准确的信息,来预测 NO_x 排放、湍流反应流、燃烧动力学等^[42]。但 CFD 模拟无法得到复杂燃烧体系详细的化学组分反应机制。为了精准预测燃料氮转化 NO_x 的释放量,诸多学者基于大量的研究工作提出了氨化学反应机理来预测火焰结构和 NO_x 生成,如 KONNOV、TIAN、GRI-Mech 3.0 等机理模型,模型中包含了超过 100 个物种和 1 200 个化学反应^[20,43-44]。由上述可知,煤-氨混合体系是多因素影响多组分参与的复杂自由基链锁反应过程。然而上述氨燃烧及机理模型研究均基于气相反应,尚无法直接应用到煤-氨混合燃烧体系中,且缺乏对氨的气固多相燃烧反应过程机理的认知。

目前研究氨煤共燃过程中的 NO_x 排放特性普遍采用高温管式炉或沉降炉手段,该方法能较好的模拟炉内高温环境。日本电力工业中央研究院首次使用带有单个燃烧器的 1.2 MW 卧式试验炉进行了添加 20% 氨(能量比)的煤-氨混烧实验,燃烧情况稳定且未明显增加 NO_x 排放量^[45]。同年,日本 IHI 公司在 10 MW 粉煤燃烧炉中进行了同比例的掺氨燃烧试验,试烧结果良好,且能够降低约 20% 的碳排放^[46]。此外,研究还发现,氨喷入位置的变化能够影响 NO_x 排放水平。采用数值模拟研究掺氨比例对煤-氨共燃体系燃烧区的影响发现,随氨喷入比例的提高,燃烧区火焰温度下降, NO_x 生成量降低,而氨的逃逸量升高,合理调控氨喷入比例和位置可很好的强化氨燃烧过程,降低 NO_x 排放量。近日,SEONG 等^[47]利用中试平台针

对循环流化床氨煤混燃的污染物排放特性进行研究,重点探讨了掺氨比和喷注位置的影响。试验结果表明,当氨从密相区(DBZ)注入时,随着掺氨量的增加,由于SNCR效应, NO_x 排放量低于纯煤粉燃烧,而CO量大大增加。当氨从布风区(WB)注入时,由于CO和 H_2O 发生的水煤气转移反应,CO和NO同时减少,NO还通过与炭的还原反应以及OH自由基反应而减少。此外,循环流化床本身的运行温度较低,氨燃料燃烧过程中生成的 N_2O 是值得注意的关键问题,开发一种具有成本效益的催化剂,能够同时减少NO和 N_2O ,是未来研究的重要领域。燃烧效率方面,WON等^[48]通过热力计算对550 MW流化床锅炉传热特性进行研究,结果显示在氨共燃过程中,辐射和对流传热量均减少,炉膛最高温度降低。随着氨共燃比的增加,主蒸汽和再热蒸汽温度的降低率提高。

我国在氨煤共燃方面起步较晚,但近年来发展速度较快。清华大学^[49]在25 kW自维持高温一维炉上通过旋流燃烧器进行了氨、煤和生物质混燃试验。结果表明,随着掺氨量的增加, NO_x 排放均呈增加的趋势,且调节一、二次风配比尤其是降低二次风的占比能够有效降低 NO_x 排放。此外,试验过程中几乎未检测到氨逃逸与 N_2O ,但掺氨量的增加会导致未燃尽碳的增加。浙江大学基于6 kW管式分级沉降炉,研究了氨气注入模式、掺氨比等因素对氨/煤掺烧烟气排放特性及燃料氮转化的影响规律。结果表明,预混和分级模式下 NO_x 生成规律差异显著,且在高温分级工况下掺氨能量比为20%时, NO_x 排放达到峰值^[50]。在工业尺度试验方面,国家能源集团设计并搭建了最大容量为40 MW燃煤锅炉氨煤混合燃烧试验系统,并开展了0~25%掺氨比(热值比)的氨煤混合燃烧试验^[51]。研究表明,在试验工况内,锅炉具有良好的稳燃与燃烬特性,氨煤混合燃烧条件下煤粉的燃烬优于燃煤工况;锅炉分级燃烧可使氨煤混合燃烧的 NO_x 质量浓度在高混氨比条件下低于燃煤工况,工业尺度试验研究验证了燃煤锅炉氨煤混合燃烧技术的可行性。皖能集团^[52]进行了300 MW大比例掺氨燃烧试验,实现了最高掺氨35%的平稳运行,最大掺氨量大于21 t/h,氨燃烬率达99.99%,氨逃逸率低于 2 mg/m^3 ,锅炉效率与燃煤工况相当。

综上,已有研究虽然讨论了氨煤共燃在 NO_x 排放和燃烬率方面的特性,但尚未形成一致性结论,影响效果尚不明确,这可能主要与燃烧温度、煤种及粒径分布差异有关。另一方面,氨煤共燃的关键核心在于随着规模的不断放大,局部热负荷过高使得 NO_x 源头控制更加严峻,揭示掺氨燃烧技术从实验室到工业规

模的跨尺度放大规律,对于形成兆瓦级燃烧器设计方案至关重要。

3.2 颗粒物与积灰特性

辐射传热和对流传热是锅炉炉膛主要的热交换方式,燃料属性的改变将导致炉内火焰结构、气体组成和物理性质(如密度、热容量和气体吸收系数等)发生变化,进而显著影响炉内的流量、温度和传热分布。而焦炭颗粒的辐射能力占在煤粉炉火焰总辐射力的25%~30%,灰粒的辐射能力占火焰总辐射力的40%~60%^[53]。因此,研究煤粉掺氨燃烧后颗粒物与积灰特性对于指导实际锅炉运行有重要意义。

牛芳等^[54]利用一维炉研究了氨与煤/生物质共燃过程中的灰沉积问题,试验结果表明掺氨后降低了灰的沾污强度,这为困扰高碱煤和生物质燃烧应用的积灰结焦问题提供了解决方案。同时,掺氨后飞灰颗粒物的生成总量也相应降低,尤其表现在直径小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 超细颗粒物的减少上,这可能与掺氨燃烧引起的温度降低有关。刘小伟等^[55]利用McKenna平焰燃烧器结合光学诊断技术对氨煤共燃过程中挥发分燃烧阶段进行采样表征,从颗粒数密度、粒径分布、微观结构等方面揭示了中碳烟颗粒的形成。 NH_3 掺烧会通过影响温度、碳氢组分浓度、 O_2 体积分数,进而影响煤燃烧火焰的挥发分释放与转化行为,最终影响碳烟的生成。掺烧 NH_3 促进了挥发分向碳烟的转化,导致生成的碳烟数量增多,体积分数增大,且延长了燃煤碳烟的团聚长大过程,抑制了碳烟氧化,使得碳烟团聚体尺寸增大,且这种演化行为与燃烧所处的气氛环境密切相关。因此,在氨煤混烧实际应用中,需合理调控各工况参数,使碳烟量处在一个合适的范围内。其余研究多集中于氨与气态燃料掺烧时碳烟的生成特性。

总之,目前氨煤共燃过程中固体污染物研究鲜有报道,亟需进一步研究火焰场内碳烟的生成特性,解决实际应用过程中的燃烧参数与工况变化动态匹配问题。

4 氨煤共燃途径调控策略

4.1 放大准则

燃烧系统的放大,即从实验室规模到工业规模的发展,是一个复杂且挑战性的过程。有效的放大准则能保证实验室规模研究的有效性,并进一步确保燃烧设备在大规模应用时保持高效率 and 低污染排放。因此,深入理解和应用燃烧系统放大规律及标准对于设计未来的燃烧系统,控制污染物和提高燃烧效率具有重要意义。

在20世纪90年代,放大问题开始受到学术界的

关注,但进入 21 世纪后焦点主要集中在实验室规模的研究上,较少探讨燃烧系统从实验室到工业规模的转换问题。近年来,随着对高效、低碳、低排放燃烧技术需求的增加,放大问题再次成为研究热点。国际火焰研究基金会 (IFRF) 与美国天然气研究院 (GRI) 针对天然气燃烧器合作开展了 SCALE-400 研究^[56],通过在 5 个不同尺度 (30 kW、300 kW、1.3 MW、4 MW、12 MW) 的气体燃烧器进行试验,建立了 NO_x 排放的放大模型,该模型对不同尺度和不同工况下的试验数据进行了验证,能够基于小尺度燃烧器预测工业尺度锅炉的性能。国际火焰研究基金会 (IFRF) SMART 等^[57]研究了恒定速度和恒定停留时间的放大准则对旋流煤粉燃烧器性能的影响,发现恒定速度缩放下 NO_x 排放更高,并归因于不同尺度下火焰点火和传播的差异。WEBER^[58]从流体流动、热传递和污染物排放的角度分析了关于小尺度火焰向工业级火焰放大的理论,指出恒定速度和恒定停留时间 2 种放大准则在两相燃烧问题下的局限性。之后深入探讨了大规模工业火焰的放大规律和建模方法,分析了进行放大研究时面对的主要问题,包括非侵入式激光测温与传统测温技术的差异,湍流与化学反应之间相互作用的复杂性,实验室规模实验数据对边界条件变化的敏感性,以及这些数据在开发工业规模 CFD 模型时的局限性,强调有必要基于工业数据对模型进行大规模修改和验证。无量纲数是分析放大过程中常用的另一种标度,如挪威科技大学 LØVÅS 团队^[59]基于 CFD 计算结果,采用六边形分形和燃烧状态图的方法,分析了不同尺度下燃烧的特征状态和 NO_x 排放特性。针对恒定流速和恒定停留时间 2 种放大准则,使用卡托维茨数 (Ka) 和达姆科勒数 (Da) 进行模态分析,总结出不同准则下放大时火焰特性和 NO_x 排放的变化规律。综上,有必要针对不同尺度燃烧器,开展几何特征、旋流方式及强度对各燃烧区域的流动特征、温度组分时空分布的影响研究,基于相似性度量建立燃烧特性跨尺度模化准则。

4.2 燃烧器调控策略

对于氨等活性低的绿色燃料,实现宽工况的低污染物排放与稳定燃烧协同匹配是首要解决的关键问题。目前氨煤共燃方式多以旋流混合为主,辅以燃料/空气中心分级、轴向分级等调控手段实现稳定高效低污染燃烧。中央电力工业研究院^[45]在 760 kW 的卧式炉上采用单只煤粉燃烧器探讨了煤粉掺氨燃烧的可行性,对比研究了氨轴向不同注入位置下 NO_x 的排放特性,发现 NO_x 浓度随掺氨量的增大而增加;且将氨通入低氧高 NO_x 区可显著抑制燃料型 NO_x 的生成。

随后,在 1.2 MW 实验台上同样采用氨气注入的方式开展实验与模拟研究,包括氨炉前与煤混合、通过将氨气枪插入煤粉燃烧器进行单独注入以及通过侧壁注入,发现侧壁注入下 NO_x 排放会随着混燃比的增加而增加。当氨气与煤一同注入煤喷嘴或通过氨气枪注入时,氨的掺混比高于 30% 时, NO_x 排放量才会有明显升高趋势。同时,模拟了不同氨枪结构对氨从中心喷入旋流煤粉燃烧器后氨与回流区的关系,发现氨喷口的角度和喷射速度会影响氨能否穿透回流区,进而影响火焰结构和 NO_x 排放量。总体而言,氨气喷枪的使用可在维持 NO_x 排放几乎不变的情况下,显著提高焦炭燃烬率,是氨煤混燃的一种较优的改造方案。

日本 IHI 公司研究了中心通氨的低氮旋流煤粉燃烧器掺氨燃烧后的污染物排放特性。在该燃烧器中氨气被注入到由煤燃烧和氨气的热裂解所创建的还原区域中,高温低氧环境促进了氨的热裂解,进而获得了低掺氨比下低于纯煤的 NO_x 排放量。同时,回流区的构建进一步加强了煤粉掺氨燃烧的稳定性。基于此燃烧器模型,采用 CRN 化学反应网络模型模拟了 1 000 MW_{th} 的商用锅炉煤粉掺氨燃烧过程^[28],并采用分级燃烧方式研究了氨通入火焰区的燃烧组织方式,掺氨比小于 20% 时能获得较低的 NO_x 排放,但进一步增大掺氨量, NO_x 排放成比例增加, NO_x 控制变得困难。国内烟台龙源设计开发了一种内混式氨煤混燃燃烧器,该燃烧器的特点是部分煤粉在煤粉管道内点燃释放热量为 NH_3 的着火提供稳定热源,同时燃烧器内析出的挥发分为燃烧反应提供了大量 O/H 自由基,强化了 NH_3 的着火与燃烧。在 40 MW 燃煤中试平台的试验结果显示,掺氨比为 0~25% 时,采用空气分级燃烧可显著降低氨煤混合燃烧的 NO_x 排放,但增加燃烬风率显著影响煤粉燃烬和锅炉效率,且燃烬风率高于 20% 后对 NO_x 排放降低效果不再显著^[15]。

综上,目前基于物理过程的氨煤共燃反应途径调控主要是针对单一燃料通过燃料流分级与配风匹配实现的,局限于“一案一策”的经验模式,燃料分级、空气分级之间的逻辑联系不明。因此,亟需深入研究氨的多级分级及氨的预分解或原位分解等过程的耦合,同时强化燃料/空气深度分级及风燃时空匹配,加强宽范围调节过程中的氨燃烧气氛的灵活性,有望成为低 NO_x 控制的关键。

5 结语与展望

构建以绿氨为清洁能源载体的新型电力生产体系将推动能源资源的低碳化、智能化。而掺氨燃烧过程的经济性和污染物高排放制约其规模化发展,同时

氨的引入对煤粉燃烧过程的影响机制尚不明确,进一步从技术上阻碍了煤炭掺氨的应用。本文归纳了有关煤炭掺氨燃烧化学反应动力学、燃烧特性及污染物生成特性相关研究成果,并对现有氨煤共燃高效稳定燃烧控制策略进行了总结,进而对未来的发展做了展望。

(1) 匹配真实场景的燃烧反应动力学模型建立。目前,当前研究热点集中在氨、煤单一燃烧反应动力学特性,而系统性地针对氨-煤动态掺混的燃烧反应动力学研究起步较晚,现有氨-煤共燃实验数据量较小,工况覆盖范围较窄。为了实现燃烧反应途径的合理调控,尽早探明燃烧化学反应机理是当务之急。然而,燃烧过程中的基元反应路径错综复杂、反应数目庞大,发展高预测性的反应动力学机理依然存在严峻挑战。因此,近年来人工智能开始被大量运用,以加快燃烧反应动力学模型的构建,快速准确地揭示反应动力学机理。

(2) 多场和尺度效应耦合的燃烧反应途径调控。实际动力装置内往往面临高温高压、流体流动以及传热传质等多重复杂物理化学过程,发展燃烧过程在线精准光学测量对认识动力装置燃烧反应机理和燃烧动力学调控至关重要;秒级的数学预测模型的发展是燃烧系统调控实现的关键,引入人工智能聚类等方法,为发展可兼容多燃烧器结构、多流场结构、多燃烧工况的通用 CRN 模型提供了新思路;基于模化理论,对燃烧过程的流动特征、混合-反应时间尺度的量纲分析,建立宽范围掺氨燃烧的低污染物和稳燃的操作相图,对指导煤炭掺氨燃烧技术的发展及应用至关重要。

(3) 构建智能化的掺氨燃烧污染物精准控制技术。制约氨作为零碳燃料规模化应用的技术挑战在于其高污染物排放,尤其是 NO_x 排放控制。充分利用氨燃料在富燃窄当量比 ($\varphi=1.10\sim 1.15$) NO_x 排放最低的特性,构建多级分解的污染物精准控制技术。同时,为满足负荷波动大、燃料调节广的锅炉发展,需要建立数据驱动的多源运行参数采集系统,并基于机理模型和大数据分析建立掺氨燃烧过程的实时能效模型,开展动态工况下的污染物与燃烧稳定性协同多目标运行寻优,根据可控参数的优化反馈,对掺氨燃烧过程的低排放进行精准控制。

致谢 感谢吴梓秋、王可轩 2 位研究生在撰写过程中的帮助。

参考文献(References):

[1] 於晨,葛磊,王海旭. 2023 中国氢能产业展望白皮书[R]. 波士顿咨

询公司, 2023.

- [2] 申建建,王月,程春田,等. 水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3871-3885.
SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Research status and prospect of generation scheduling for Hydropower-wind-solar energy complementary system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3871-3885.
- [3] 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.
- [4] 林今,余志鹏,张信真,等. 可再生能源电制氢合成氨系统的并/离网运行方式与经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 117-127.
LIN Jin, YU Zhipeng, ZHANG Xinzhen, et al. On-grid/Off-grid operation mode and economic analysis of renewable power to ammonia system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 117-127.
- [5] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69: 63-102.
- [6] CHEHADE G, DINCER I. Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel[J]. *Fuel*, 2021, 299: 120845.
- [7] 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 (Natural Science Edition), 2022, 50(7): 41-54.
- [8] CESARO Z, IVES M, NAYAK-LUKE R, et al. Ammonia to power: Forecasting the levelized cost of electricity from green ammonia in large-scale power plants[J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116009.
- [9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2022 年我国能源生产和消费相关数据[EB/OL]. [2023-03-02]. https://www.ndrc.gov.cn/fgz/hjzyzj/jnhx/202303/t20230302_1350587.html.
- [10] HIRAOKA K, FUJIMURA Y, WATANABE Y, et al. Cost evaluation study on low carbon ammonia and coal co-fired power generation[C]//NH₃ Energy+Topical Conference in AIChE Annual Meeting. 2018.
- [11] AGENCY I E. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities[M]. OECD, 2019.
- [12] ZHOU H, LI Y, LI N, et al. Conversions of fuel-N to NO and N₂O during devolatilization and char combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2019, 92(2): 351-363.
- [13] HAN X L, WANG Z H, COSTA M, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH₃/air, NH₃/H₂/air, NH₃/CO/air and NH₃/CH₄/air premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 206: 214-226.
- [14] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1): 109-133.
- [15] 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.
- [16] MILLER J A, SMOOKE M D, GREEN R M, et al. Kinetic modeling of the oxidation of ammonia in flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 1983, 34(1–6): 149–176.
- [17] ALNASIF A, MASHRUK S, SHI H, et al. Evolution of ammonia reaction mechanisms and modeling parameters: A review[J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2023, 15: 100175.
- [18] BERTOLINO A, FÜRST M, STAGNI A, et al. An evolutionary, data-driven approach for mechanism optimization: theory and application to ammonia combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 229: 111366.
- [19] STAGNI A, ARUNTHANAYOTHIN S, PRATALI MAFFEI L, et al. An experimental, theoretical and kinetic-modeling study of hydrogen sulfide pyrolysis and oxidation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 136723.
- [20] KONNOV A A. Implementation of the NCN pathway of prompt-NO formation in the detailed reaction mechanism[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(11): 2093–2105.
- [21] KLIPPENSTEIN S J, PFEIFLE M, JASPER A W, et al. Theory and modeling of relevance to prompt-NO formation at high pressure[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 195: 3–17.
- [22] GLARBORG P, MILLER J A, RUSCIC B, et al. Modeling nitrogen chemistry in combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 67: 31–68.
- [23] OKAFOR E C, NAITO Y, COLSON S, et al. Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of $\text{CH}_4\text{-NH}_3\text{-air}$ premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 187: 185–198.
- [24] LEE B H, BAE Y H, CHO S H, et al. Comprehensive technical review for fundamental characteristics and application of NH_3 co-firing with coal[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 474: 145587.
- [25] JIAO A Y, XU H T, LIU F, et al. Mechanistic study on the effect of ammonia co-firing with pulverized coal on NO formation and reduction[J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 282: 119306.
- [26] CHEN P, FANG Y, WANG P P, et al. The effect of ammonia co-firing on NO heterogeneous reduction in the high-temperature reduction zone of coal air-staging combustion: Experimental and quantum chemistry study[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 237: 111857.
- [27] ZHAO K, JENSEN A D, GLARBORG P. NO formation during oxy-fuel combustion of coal and biomass chars[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(7): 4684–4693.
- [28] ISHIHARA S, ZHANG J W, ITO T. Numerical calculation with detailed chemistry on ammonia co-firing in a coal-fired boiler: Effect of ammonia co-firing ratio on NO emissions[J]. *Fuel*, 2020, 274: 117742.
- [29] TANIGUCHI M. Flame propagation velocity for co-combustion of pulverized coals and gas fuels[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(7): 6305–6314.
- [30] YADAV S, YU P L, TANNO K, et al. Large eddy simulation of coal-ammonia flames with varied ammonia injection locations using a flamelet-based approach[J]. *Energy*, 2023, 276: 127546.
- [31] MELLER D, ENGELMANN L, WOLLNY P, et al. Evaluation of ammonia co-firing in the CRIEPI coal jet flame using a three mixture fraction FPV-LES[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(3): 3615–3624.
- [32] TANG Y, XIE D J, SHI B L, et al. Flammability enhancement of swirling ammonia/air combustion using AC powered gliding arc discharges[J]. *Fuel*, 2022, 313: 122674.
- [33] YANG Y P, HUANG Q, SUN J G, et al. Reducing NO_x emission of swirl-stabilized ammonia/methane tubular flames through a fuel-oxidizer mixing strategy[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(4): 2277–2287.
- [34] XU Y, AXT C, SONG M H, et al. Investigation on ignition behaviors of pulverized coal particles in a tubular swirl burner[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4179–4188.
- [35] MA P, HUANG Q, WU Z Q, et al. Optical diagnostics on coal ignition and gas-phase combustion in co-firing ammonia with pulverized coal on a two-stage flat flame burner[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(3): 3457–3466.
- [36] YUAN Y, LI S Q, LI G D, et al. The transition of heterogeneous-homogeneous ignitions of dispersed coal particle streams[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(9): 2458–2468.
- [37] XU Y, LI S Q, GAO Q, et al. Characterization on ignition and volatile combustion of dispersed coal particle streams: In situ diagnostics and transient modeling[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(9): 9850–9858.
- [38] MA P, HUANG Q, GAO Q, et al. Effects of Na and Fe on the formation of coal-derived soot in a two-stage flat-flame burner[J]. *Fuel*, 2020, 265: 116914.
- [39] 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.
- [40] LIU M Y, CHEN S, ZHU H W, et al. Numerical investigation of ammonia/coal co-combustion in a low NO_x swirl burner[J]. *Energy*, 2023, 282: 128358.
- [41] 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.
- [42] SCHLUCKNER C, GABER C, LANDFAHRER M, et al. Fast and accurate CFD-model for NO_x emission prediction during oxy-fuel combustion of natural gas using detailed chemical kinetics[J]. *Fuel*, 2020, 264: 116841.
- [43] TIAN Z Y, ZHANG L D, LI Y Y, et al. An experimental and kinetic modeling study of a premixed nitromethane flame at low pressure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 311–318.
- [44] XIAO H, HOWARD M, VALERA-MEDINA A, et al. Study on reduced chemical mechanisms of ammonia/methane combustion under gas turbine conditions[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(10): 8701–8710.
- [45] Central Research Institute of Electric Power Industry. Toward the realization of the use of ammonia in coal-fired power plants [EB/OL]. [2017–01–10]. http://criepi.denken.or.jp/press/pressrelease/2017/01_10press.pdf.
- [46] ZHANG J W, ITO T, ISHII H, et al. Numerical investigation on am-

- monia co-firing in a pulverized coal combustion facility: Effect of ammonia co-firing ratio[J]. *Fuel*, 2020, 267: 117166.
- [47] KIM S J, PARK S J, JO S H, et al. Effects of ammonia co-firing ratios and injection positions in the coal-ammonia co-firing process in a circulating fluidized bed combustion test rig[J]. *Energy*, 2023, 282: 128953.
- [48] KIM S I, LIM M, LEE Y, et al. Evaluation of effects of ammonia co-firing on the thermal performances of supercritical pulverized coal and circulating fluidized bed boilers[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 276: 116528.
- [49] MA P, HUANG Q, SI T, et al. Experimental investigation of NO_x emission and ash-related issues in ammonia/coal/biomass co-combustion in a 25 kW down-fired furnace[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(3): 3467–3477.
- [50] TAN J X, HE Y, ZHU R F, et al. Experimental study on co-firing characteristics of ammonia with pulverized coal in a staged combustion drop tube furnace[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(3): 3217–3225.
- [51] ZHANG W Z, LIU X, ZHANG C Q, et al. Industrial scale testing on the combustion and NO_x emission characteristics of ammonia cofiring in a 40 MW_{th} coal-fired boiler[J]. *Fuel*, 2024, 359: 130471.
- [52] 北极星电力网. 300 MW 机组 35% 掺氨, 实现了[EB/OL]. [2023-05-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1762778952342725811&wfi=spider&for=pc>.
- [53] 周强泰, 华永明, 赵伶俐. 锅炉原理[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [54] 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): 6547–6553.
- 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): 6547–6553.
- [55] 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.
- [56] HSIEH T C A, DAHM W J A, DRISCOLL J F. Scaling laws for NO_x emission performance of burners and furnaces from 30 kW to 12 MW[J]. *Combustion and Flame*, 1998, 114(1–2): 54–80.
- [57] SMART J P, MORGAN D J, ROBERTS P A. The effect of scale on the performance of swirl stabilised pulverised coal burners[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1992, 24(1): 1365–1372.
- [58] WEBER R. Scaling characteristics of aerodynamics, heat transfer, and pollutant emissions in industrial flames[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, 26(2): 3343–3354.
- [59] 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.