

“绿氢绿氨制备和高值化利用”专题

掺氨燃料先进清洁燃烧技术研究进展及探讨

杨远平¹, 马佳琪¹, 王茜¹, 司桐², 王翔³, 李水清²

(1. 北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617; 2. 清华大学能源与动力工程系热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084; 3. 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家实验室, 北京 100190)

摘要: 氨作为协调电力需求响应与可再生源能间歇性的理想清洁能源载体备受国际范围关注。目前, 氨燃烧技术的发展面临低排放、多燃料兼容、宽负荷调节和多场景应用的需求, 而现有基于传统碳氢燃料的燃烧技术难以匹配氨的高效利用。探寻组织优化与智能化的掺烧技术是提升氨清洁高效燃烧的着力点。首先分析了掺氨燃烧面临的主要技术挑战, 并归纳了不同工况下氨燃烧过程氮转化路径及 NO_x 生成抑制机理。在此基础上, 总结了现有主要氨燃烧的技术特点、燃烧调控机制及应用现状; 从分级分区燃烧组织方式、时空混合特征、燃料改性及智能设计预测与调控等方面, 探讨提升多燃料/氨清洁高效燃烧性能的可行性方案及技术路线。结果表明: 通过含氮燃料与碳氢燃料燃料-氧化剂分级分区燃烧, 同时结合氨燃料改性, 协同实现温度-氧浓度-停留时间的优化匹配, 或将成为掺氨燃料稳定清洁燃烧的高效手段。此外, 实验室尺度到工业级燃烧室模化技术的突破, 以及 AI 技术的接入, 能够加速实现掺氨燃烧技术的工业化。研究为多燃料掺氨燃烧技术及燃烧器的开发设计提供了理论及技术借鉴。

关键词: 掺氨燃烧; 低 NO_x 技术; 组织调控; 混合优化; AI 赋能

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)03-0029-12

Research progress and discussion on advanced multi-fuel/ammonia combustion technologies

YANG Yuanping¹, MA Jiaqi¹, WANG Xi¹, SI Tong², WANG Xiang³, LI Shuiqing²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: Ammonia, as an ideal clean energy carrier for balancing power demand response and renewable energy intermittency, has garnered international attention. Currently, the development of ammonia combustion technology faces demands for low emissions, multi-fuel compatibility, wide load regulation, and multi-scenario applications. Existing combustion technologies based on traditional hydrocarbon fuels struggle to efficiently utilize ammonia fuel. The focus of enhancing the clean and efficient combustion of ammonia lies in the exploration of optimization strategies for combustion structure and intelligent combustion technology. First, the main technical challenges of ammonia-blended combustion are analyzed, and then the nitrogen conversion pathways and NO_x suppression mechanisms under various conditions are summarized. Based on this, the paper reviews the technical characteristics, combustion control mechanisms, and current application status of major existing ammonia combustion technologies. Furthermore, it explores feasible schemes and technical routes to enhance the clean and efficient combustion performance of multi-fuel/ammonia mixtures from aspects such as staged and zoned combustion organization, fuel decomposition, spatiotemporal mixing characteristics, and intelligent prediction and design control. The results indicate that the implementation of staged and zoned combustion strategies for nitrogen-containing fuels and hydrocarbon fuels in their respective reactions with oxidizers, concurrently incorporating the modification of ammonia fuel, and

收稿日期: 2024-12-19; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.BB24121901

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFB4003903); 北京市教委一般资助项目 (KM202310017008, KM202210017008)

作者简介: 杨远平 (1990—), 男, 江苏徐州人, 助理研究员。E-mail: yangyuanping1@163.com

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

引用格式: 杨远平, 马佳琪, 王茜, 等. 掺氨燃料先进清洁燃烧技术研究进展及探讨 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 29-40.

YANG Yuanping, MA Jiaqi, WANG Xi, et al. Research progress and discussion on advanced multi-fuel/ammonia combustion technologies [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 29-40.



synergistically attaining the optimal matching of temperature, oxygen concentration, and residence time, holds the potential to emerge as an efficacious means for the stable and clean combustion of ammonia-blended fuels. Furthermore, the advent of breakthroughs in the scaling-up technologies that bridge the gap from laboratory-scale to industrial-grade combustion chambers, in conjunction with the seamless integration of AI technology, is anticipated to expeditiously propel the industrial realization of ammonia combustion technology. The aim is to provide theoretical and technical references for the development and design of multi-fuel ammonia-blended combustion technologies and burners.

Key words: ammonia co-combustion; low NO_x combustion technology; organizational control; mixture optimization; AI empowerment

0 引言

“双碳”目标下，零碳能源系统的实现依赖于风电、光伏等可再生能源的规模化发展。而为了有效协调电力需求响应与间歇性可再生能源带来的能源供应安全性问题^[1-2]，须建立具有规模性和长期性的能量储存解决方案。研究表明，利用高能量密度燃料的化学能（例如氢、甲烷、氨和基于醇的燃料）储能方式在技术及经济上具有突出优势^[3-4]。该路线既可作为高化石能源向零碳能源转型过渡的“桥梁”，又可进一步成为耦合可再生能源的“压舱石”。众多储能燃料介质中，氨具有不含碳、载氢量高、易液化、单位储能成本低等优点；加之氨规模化生产、储运体系成熟，基础设施齐备，大规模集中利用安全风险远低于氢，使得氨作为零碳燃料引发全球广泛关注^[5-6]。目前，日本、欧盟多国、澳大利亚等已将其列入国家能源战略规划，并在燃气发电和供热上着重发展“氨经济”^[7-8]。国家发改委、国家能源局发布的《“十四五”新型储能发展实施方案》中提出，依托可再生能源制氢（氨）的氢（氨）储能等试点示范，将探索风光氢储等源网荷储一体化和多能互补的储能发展模式列入“十四五”新型储能区域示范^[9]。因此，发展以氨为氢能载体的 power-to-power 技术已成为国际清洁能源一个具有前瞻性、颠覆性、战略性的重要发展方向^[2,10-11]。

与传统碳氢燃料相比，氨燃烧强度低（火焰传播速度仅为甲烷的 1/5）、可燃范围窄、燃烧稳定性差^[12-15]；更具挑战的是，氨含有氮，燃烧时 NO_x 排放高达 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ ^[16-17]。针对氨燃烧不稳定问题，一种常用对策是引入其他活性燃料（如氢气，甲烷，合成气等）强化氨燃烧。已有研究证实，氨火焰添加体积分数为 60% 的甲烷时，与纯氨/空气火焰相比，燃烧速度提高了 3 倍以上^[18-19]。另外，预热反应物^[20]及强旋流稳燃技术对增强氨火焰稳定性也具有良好的效果。日本 Okafor 教授团队将空气预热到 500 K，即使纯液态氨也能够向在径向旋流燃烧器中稳定燃烧^[21]。旋流产生的回流作用可以有效地将热量和活性自由基输送到新鲜燃料中，从而显著提升火焰稳定性^[22-24]。例如，在一个旋流数

为 3.3 的切向旋流燃烧器上，纯氨火焰能够在当量比为 0.65 ~ 1.15 的范围内稳定燃烧^[25]。基于现有研究，氨燃烧火焰稳定性问题可以通过灵活调整燃烧器结构和操作参数来解决。然而，目前太阳能和风能的规模化发展对动力设备负荷的随动匹配能力提出了更高要求，使得掺氨燃烧面临宽负荷发展需求，这也对掺氨燃烧火焰的稳定性带了更大的挑战。

针对 NO_x 排放问题，已有研究提出了分级燃烧、烟气循环、无焰燃烧、催化燃烧等多种燃烧技术，在 NO_x 排放控制方面取得了一定成效：其中典型的“富燃-淬冷-贫燃”（RQL）分级燃烧技术可将纯氨或掺氨燃料燃烧过程 NO_x 排放降至 10^{-3} 以下^[26-28]。从日本 Okafor 教授团队研究结果来看，根据燃烧器结构不同该分级方式获得的最优 NO_x 排放的一级燃烧当量比范围在 1.1 ~ 1.3^[26-29]。然而，氨燃烧过程 NO_x 生成与排放对所处环境气氛、温度以及燃料-空气混合特性高度敏感，燃烧环境小幅波动将极大影响尾气中 NO_x 排放的浓度。例如，初级最优当量比为 1.3 时， NO_x 排放量约 50×10^{-6} （ O_2 体积分数为 16% 时），当量比波动至 1.2 时， NO_x 排放量陡升至约 560×10^{-6} （ O_2 体积分数为 16% 时）^[26]，波动幅度高达十余倍。导致氨/掺氨分级燃烧过程低 NO_x 排放窗口较为狭窄，这对工业应用场景下掺氨燃烧过程精细化调控提出了较高的要求，同时也降低了燃烧过程工况波动、负荷调节的余量。解决上述问题的关键是如何通过燃料-空气的时空组织优化及风燃的混合匹配构造适于氨燃烧的最优环境。此外，燃气轮机、锅炉等动力及热力设备低碳化的共同需求，推动煤、天然气、氢气和工业合成气等多元燃料的掺混燃烧，掺氨燃烧技术多场景适应性及匹配性需求同样突出。目前，掺氨燃料稳定低 NO_x 燃烧机理及调控研究方面已取得较好的成果，而如何精准调控掺氨燃料燃烧过程的多燃料、宽负荷调节的适应性并拓宽低 NO_x 燃烧窗口仍是氨燃烧利用所面临的关键技术挑战。

为此，笔者将对掺氨燃料燃烧过程 NO_x 生成及抑制机理相关研究进行综述。在此基础上，阐述现有掺氨燃料 NO_x 控制技术及应用研究现状，进而探讨降低掺氨燃料燃烧 NO_x 排放并拓宽其排放窗口的

可行性路径及技术措施, 为含碳掺氨燃料先进燃烧技术(低排放、宽负荷、多燃料)的开发及应用提供一定的理论和技术借鉴。

1 氨/掺氨燃料燃烧 NO_x 生成及抑制机理

理想情况下氨完全燃烧产物为氮气和水, 是清洁零污染燃料。然而, 由于氨中燃料氮的存在, 导致其燃烧过程中燃料型 NO_x 生成量异常的高; 同时由于氨火焰温度较低热力型 NO_x 几乎可忽略不计。因此, 氨燃烧过程燃料型 NO_x 的生成与排放是其规模化应用中面临的关键问题之一。

通常, 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 N 的含量^[30-32]; 高温、高氧及高燃料氮含量促进 NO_x 生成。从微观层面, 氨燃烧过程是自由基参与的复杂链锁反应, 自由基浓度与氨转化及 NO_x 生成有着强关联性^[33], 氨/掺氨燃烧过程部分反应历程如图 1 所示。在氨贫燃火焰中, 大量氧化性自由基(主要为—O—、—OH)的存在促进 NH_i (i=1, 2) 氧化生成中间组分 HNO, 并进一步氧化生成 NO (图 1a); 相反, 在富燃条件下, 由于—O—、—OH 等自由基相较于—H—自由基占比明显偏低, NH₃ 更倾向进行持续脱氢反应, 产生—NH₂、=NH、≡N 自由基并与 NO 发生还原反应, 降低 NO 的生成^[34-35]; 同时富余的氨也可作为还原剂降低 NO_x 的排放(SNCR)^[36-37]。利用氨燃料对 NO_x 进行选择非催化还原的热力降 NO_x 方法驱动了 NH₃ 燃烧研究早期发展, 同时也对后续分级燃烧中利用 NH₃ 富燃实现 NO_x 脱除的技术提供了研究思路和方法。

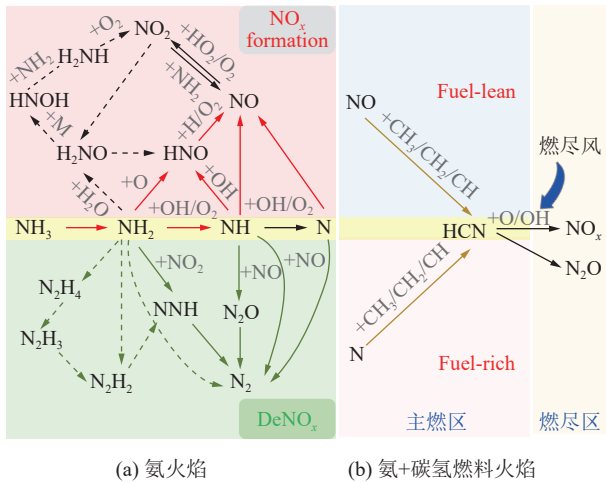


图 1 不同氨掺混燃料燃烧 NO_x 生成反应机理^[26, 37-38]

Fig. 1 NO_x formation mechanisms in combustion of different ammonia-blended fuels^[26, 37-38]

特性, 氨与不同燃料掺烧(如天然气^[13, 39]、汽油^[40]和煤粉^[41-42]等)成为掺氨燃烧技术初期发展的重点。微型燃气轮机燃烧试验发现, CH₄-NH₃-空气混合物比 NH₃-空气混合物具有更高的燃烧效率和热效率^[13]。然而, 已有研究表明氨-甲烷混燃生成的 NO_x 远高于纯氨^[17]。从机理层面: ① 含氨火焰中, 碳氢化合物的掺烧能够产生更多的 O/H 自由基, 促进 NH_i 氧化形成 NO 的反应途径^[17, 43-45]; ② 掺混碳氢燃料后, C_xH_y 与≡N 自由基或 NO 反应生成 HCN (图 1b), 由于 HCN 比 NH₃ 更易被氧化成 NO, 在二级贫燃空气作用下加剧 NO_x 及 N₂O 的生成^[22, 35]。从 NO_x 生成反应路径来看, 碳氢燃料与含氮燃料相互作用产生的氧化性自由基及含氮中间体促进了氮元素向 NO_x 转化, 因而理论上碳-氮燃料分区分级燃烧相较于单独的掺混燃料空气分级更有利于 NO_x 控制。

总的来说, 氨/掺氨燃料燃烧过程大量活性自由基(—O—、—OH、NH_i、C_xH_y、HNO 和 HCN 等)的共存使得反应体系经历复杂的氧化-还原过程。其中, 影响氨燃烧 NO_x 生成的关键因素是关键含氮中间体的生成与氧化, 以及与之共存的活性氧化组分浓度^[46-48]。因此通过燃烧组织方式和配风的优化来调控或抑制关键中间产物(NHO 和 HCN 等)的生成与氧化、强化 NH_i 对 NO_x 的还原及氨的高温预分解是削弱 NO_x 生成并拓宽低 NO_x 排放窗口的关键。此外, 随着人工智能的快速发展与技术应用的深入, 为氨清洁燃烧技术的开发与燃烧调控提供了更高维度的手段。基于以上分析, 图 2 进一步总结了提升掺氨多元燃料燃烧稳定与低 NO_x 排放调控可行性路径。

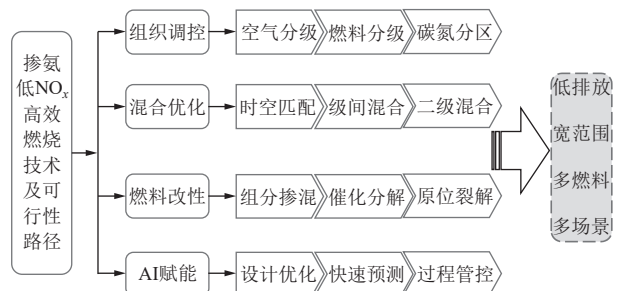


图 2 掺氨低 NO_x 清洁高效燃烧技术及可行性路径

Fig. 2 Low-NO_x clean and efficient combustion technology with ammonia blending and feasibility pathways

2 掺氨多元燃料低 NO_x 燃烧调控技术研究进展及技术探讨

针对引言总结的掺氨多元燃料燃烧面临的技术挑战, 本节在综述现有掺氨燃烧调控技术基础上,

另一方面, 由于混合燃料可显著改善氨的燃烧

结合对氨燃烧过程氮转化路径的分析理解,进一步总结不同技术调控特性,将理论分析拓展到技术应用层面,进而提出更清洁高效的掺氨燃料燃烧可行性技术方案,以期为掺氨多元燃料清洁高效燃烧技术的优化和开发提供参考。

2.1 从单一级向多级分区分级燃烧发展

氨低 NO_x 燃烧的基础在于控制绝大部分氨在还原性气氛下燃烧,在合适的温度和停留时间下可有效抑制 NO_x 生成反应通道,现有氨燃烧技术的构建大都基于此。其中,采用分级燃烧策略来实现掺氨燃料稳定低 NO_x 燃烧协同控制是近几年氨清洁燃烧重要的研究方向。富燃-快混-稀燃的空气分级燃烧策略就是该低 NO_x 燃烧原理的具体体现^[46]。其燃烧过程分为2个阶段:①主燃区内,部分空气与全部燃料在富燃条件下燃烧,这既能抑制 NO_x 生成路径,又能保持高反应稳定性;②进入二级区域,二级空气通过稀释喷嘴与燃烧产物快速混合,促使混合物从富燃向贫燃转变,进一步消耗主燃区未燃尽的可燃组分,如图3a所示。日本 OKAFOR 团队^[47]利用该分级技术在 230 kW 燃气轮机模型燃烧器上研究了液氨/甲烷/空气火焰稳定性和排放特性,验证了两级富-贫燃对控制掺氨火焰排放的有效性。卡迪夫大学采用分级燃烧策略同样改善了 NH_3/H_2 旋流火焰的排放性能^[48]。

然而,该燃烧组织方式尾部排放特性对两级区域的当量比分布和混合过程高度敏感,初级燃烧区内当量比偏低无法构造足够富燃条件来切断 NO_x 生成通道,而当量比过高则会造成进入二级区域未燃尽氨的含量高,在高度贫燃条件下生成大量 NO_x ^[27,47-48]。此外,次级燃烧区混合特征同样显著影响尾部排放特性。具体而言,混合不均匀将导致 NH_3 逃逸升高,而充分混合又将未燃尽氨暴露在强氧化环境下,强化了氨向 NO_x 的转化。其最终结果正如引言部分所述,该燃烧组织方式的低 NO_x 操作窗口较为狭窄,初级当量比的小幅波动以及二级区域流场结构的变化,都可能显著增加 NO_x 的排放。这给工业级燃烧器的灵活性调节带来了极大挑战。

作为气体燃料,氨供给策略和相应的空气分配特性可以影响氨的双重功能之间的转化:既能作为 NO_x 的生成源,也可作为 NO_x 的还原剂。因此,结合另一种有效的燃料分级低 NO_x 燃烧组织方式,为掺氨燃料的清洁燃烧提供了可行的解决方案,如图3b所示。通过在主燃烧区后添加 NH_3 或 CH_4 等还原性燃料,燃料分级技术能够在燃烧过程中创造还原条件,从而有效减少主燃烧区产生的 NO_x 排放。例如,韩国能源研究院^[25]利用切向管状旋流燃

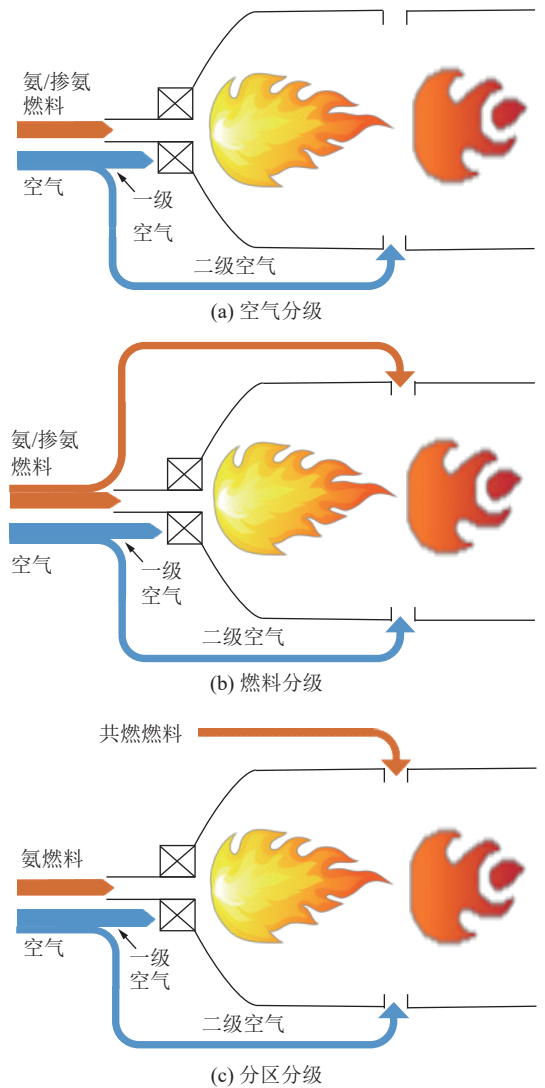


图3 不同轴向分级燃烧组织方式示意

Fig. 3 Illustration of various axial staged combustion configurations

烧器研究了纯氨贫-贫的燃料分级燃烧组织方式在降低 NO_x 排放的表现。该策略将少量的氨(小于10%)注入主燃区出口处,贫燃条件下能够激活氨的热脱硝过程还原初级氨贫燃时产生的 NO_x ,在较优工况下达到了接近80%的 NO 减排率,但获得的尾部 NO_x 排放仍高于 150×10^{-6} (O_2 体积分数为15%)。同样地,VIJRUMBANA等^[49]利用化学反应动力学模拟方法探讨了氨燃料分级方案,实现贫燃条件下 NH_3/CH_4 火焰 NO_x 减排量 $200 \times 10^{-6} \sim 2\,000 \times 10^{-6}$,但减排后的 NO_x 排放量依然较高(均高于 $1\,500 \times 10^{-6}$)。理论上,当主燃区出口温度接近 NO 有效还原的临界点时,分级氨的注入激活了热脱硝过程,可显著降低 NO 排放。然而,采用氨分级燃烧降低 NO_x 排放的策略对主燃区产生的 NO_x 浓度及烟气温度具有高度依赖性,分级氨的量需精确匹配主燃区 NO_x 的生成量,否则将造成 NO_x 还原不充

分或氨逃逸的发生;此外,在氨分级燃烧过程中,确保氨气均匀分布到燃烧区域同样关键,不均匀分布可能导致部分区域 NO_x 未能完全还原,从而影响整体的 NO_x 还原效果。

鉴于空气分级和氨燃料分级策略在二级氨贫燃区内 NO_x 生成与还原过程难以精准控制。将甲烷作为分级还原燃料能够切断二级区域 NO_x 的生成源,理论上可更灵活的调控二级燃烧区火焰。笔者前期探讨了中心氨射流火焰与周向甲烷切向旋流火焰耦合的燃料径向分级燃烧组织方式下的 NO_x 排放特性,总体贫燃下可将 NO_x 排放控制在 $600 \times 10^{-6} \sim 900 \times 10^{-6}$ 内,相较于 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{空气}$ 预混火焰 NO_x 呈数量级降低;同时氨逃逸小于 10×10^{-6} [50]。KAUST 采用径向双旋流燃烧器研究了 $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{空气}$ 甲烷分级燃烧过程 NO_x 排放特性,进一步揭示了中心氨火焰富燃结合径向贫燃甲烷火焰对控制 NO_x 生成的有效性;并且相比于 NH_3/CH_4 混合燃料,中心纯氨火焰的 NO_x 排放量最低 [51]。此外,通过对上述径向分级燃烧火焰的—OH、— NH_2 自发光信号分析,氨火焰与甲烷火焰交界面处存在着强的相互作用,周向氧化性自由基侵入氨火焰,导致交界面处 NO_x 生成量尤为高 [40-41]。

结合氨燃烧 NO_x 生成机理,我们发现活性掺混燃料燃烧过程能够产生更多的—O—、—OH 等氧化性自由基,与氨火焰相互作用后能够促进 NO_x 的生成 [50-52]。此外,火焰中碳-氮元素的相互作用过程能够促进 HCN 的 NO_x 生成路径,进一步增加 NO_x 的生成。因此,将氨与掺混燃料完全分开进给,即含氮燃料和碳氢燃料分开单独进给,实现氨富燃火焰与贫燃碳氢燃料燃烧过程在空间及时间尺度上分区分级,如图 3c 所示。笔者与清华大学李水清团队合作,系统研究了甲烷在一二级间的分级比对 NO_x 排放影响,发现随着甲烷分级比例升高,尾部 NO_x 排放量显著降低。具体而言,在一级当量比 1.1、总当量比 0.7、掺氨能量比 0.5 时, NO_x 由氨-甲烷完全混合空气分级燃烧时的 1310×10^{-6} (O_2 体积分数为 3.5%),降低至燃料碳-氮完全分离下的 288×10^{-6} (O_2 体积分数为 3.5%)。与此同时,在一级当量 1.05-1.3 范围内燃烧出口 NO_x 排放均低于 1000×10^{-6} (@3.5% O_2),极大拓宽了低 NO_x 燃烧窗口 [53],如图 4 所示。因此,基于碳-氮分区分级的燃烧组织方式将氨与碳氢燃料燃烧过程解耦,削弱了 NO_x 生成,有望成为宽范围多燃料掺氨清洁燃烧可行技术方案。

为实现掺氨燃烧更低的 NO_x 排放控制,已有研究提出了更多级的分区分级燃烧策略。例如,

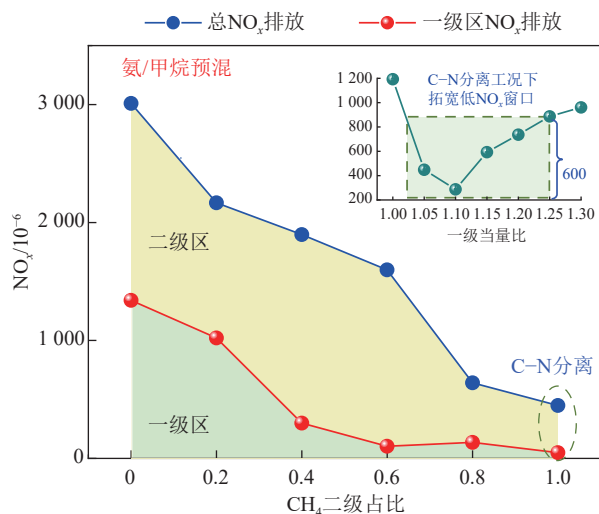


图4 燃料碳-氮分离过程对掺氨燃烧 NO_x 排放影响

Fig. 4 Influence of the fuel carbon-nitrogen separation process on NO_x emissions from ammonia-blended combustion

Vijrumbana 等 [54] 研究了 lean-rich-lean 燃料/空气三级分级掺氨燃烧过程 NO_x 排放特性,该组织方式中一级和二级保持在最优 NO_x 排放当量比下,模拟发现该分级方式优于传统的富-贫燃烧策略。潘卫国等 [55] 提出了一种带有可调节轴向空气分级段的掺氨多级旋流燃烧器。将 3 个旋流器同轴设计在 1 个燃烧器中,3 个旋流器可分别进气、分别向燃烧室内喷入气体,可实现多燃料掺氨,多燃烧模式的组合。合肥综合性国家科学中心能源研究院提出了一种基于热催化裂解、多级分区燃烧和等离子体助燃的氨燃烧器,该燃烧器采用四级火焰强关联稳焰方式。第一级为预燃级火焰引燃主燃级火焰;第二级为热催化裂解模块产生氨氢氮混合气,供给主燃级模块、第一驻涡燃烧级模块、轴向分区燃烧级模块和第二驻涡燃烧级模块,促进各级火焰稳定;第三级为第一驻涡燃烧级火焰促进主燃级火焰稳定;第四级为第二驻涡燃烧级火焰与主燃级火焰促进轴向分级燃烧火焰稳定 [56]。此外,在一些先进的燃烧系统研究中,通过多个旋流器组合形成多个分级燃烧区域,比如有预燃级旋流区、主燃级旋流区以及多个辅助燃烧旋流区等,实现了燃料在不同区域根据需求进行逐步燃烧,从而达到更好的燃烧效率和污染物控制效果 [57]。但由于燃烧过程的高度复杂性,能否满足低 NO_x 燃烧仍需进一步研究。

2.2 掺氨燃料多组分时空混合优化调控

燃烧组织方式的调节是在燃料燃烧前所施加的控制措施,而对掺氨燃料多组分的时空混合优化则是在燃烧过程实施的调控策略,在稳燃及降低 NO_x 排放方面同样发挥关键作用。时空混合可通过调整燃烧室的几何形状、体积、喷嘴位置、喷射角

度和涡流产生装置等参数,优化空气与燃料燃烧过程的混合和反应时间匹配,进而获得较优的空气-燃料混合效果。例如,前期开展的氨切向旋流预混燃烧与非预混快速混合燃烧的研究中发现,相较于预混燃烧,快速混合方式在抑制 NO_x 排放方面具有更好的表现^[50]。其本质就是燃料与氧化剂反应时间尺度和混合时间尺度的优化匹配。

基于燃料与氧化剂的混合来调节燃料氮的转化过程的思路,日本电力中央研究院(CRIEPI)在760 kW卧式炉中研究了氨不同轴向注入位置对煤粉混合燃烧后尾部 NO_x 排放的影响,发现当氨注入入口距燃烧器1.0 m时, NO_x 排放与无氨注入的煤粉燃烧相当,而将氨注入位置向下游移动导致 NO_x 排放升高^[12]。随后日本IHI公司在1.2 MW实验台上开展了氨不同掺混方式(燃烧前混合、氨枪插入煤粉燃烧器单独注入及侧壁注入)和注入位置的实验与模拟研究(图5),当氨与煤粉在燃烧器喷嘴内混合或通过氨气枪喷射时,掺氨比例低于30%时不会显著增加 NO_x 排放;而从侧壁喷射氨时,由于 NO_x 还原所需的停留时间较短,即使掺混比例较低也会导致 NO_x 排放增加^[41]。此外,氨喷嘴的设计(喷嘴孔径和角度)决定了氨流的穿透深度和混合效果,进而影响煤粒的氧化程度和未燃碳的排放。在气相火焰中,垂直喷射的燃料混合效果较差,导致火焰不稳定和 NH_3 排放增加,而增加喷射角度可扩展富燃稳定性极限并降低 NH_3 和 NO_x 排放^[34]。因此合理的时空匹配对强化氨的燃烧与De- NO_x 过程具有显著作用。

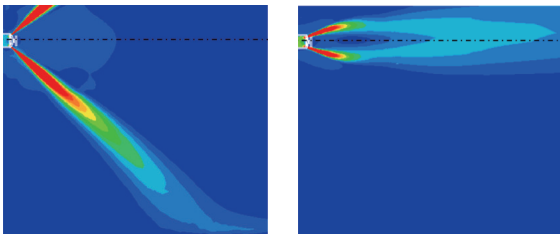


图5 氨不同注射角度和速度下的火焰结构和掺混特性^[41]

Fig. 5 Flame structure and mixing characteristics of ammonia at different injection angles and speeds^[41]

根据3.1节的讨论,分级燃烧作为实现掺氨燃烧低 NO_x 排放的一种潜在途径,其 NO_x 排放量很大程度上取决于一级未燃尽氨在二级的氧化情况,即级间混合效果。LI等^[58]通过化学反应器网络对掺氨燃料富-贫分级燃烧过程进行了建模研究,发现 NO_x 排放与富燃区域当量比密切相关,较差的级间混合可能导致 NO_x 显著增加。其深层原因在于混合恶化时燃料型 NO_x 变化不大,而热力型 NO_x 则急

剧增加。而笔者前期对比研究分区分级两级旋切燃烧过程发现,燃料分级情况下二级强旋流甲烷火焰可将一级未燃尽氨卷吸至中心高温低氧回流区,削弱氨与周向空气混合效果,使氨处于相对较富燃状态^[53],能够获得了更低的 NO_x 排放,但仍存在较明显的甲烷火焰和氨火焰的相互作用,如图6所示。因此,级间混合效果对 NO_x 排放仍需进一步研究。

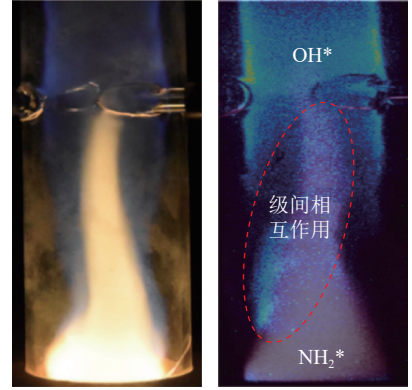


图6 甲烷-氨燃料分级燃烧过程级间相互作用

Fig. 6 Inter-stage interaction in the staged combustion process of methane-ammonia fuel

鉴于分级空气与主燃区烟气混合特性在 NO_x 排放控制中的关键作用,已有研究开始关注分级空气注入位置、速度及喷口数量对火焰稳定性及 NO_x 排放影响。在相对较大的分级空气比(>30%)和较小的分级空气高度(<80 mm)下,分级空气对主燃区的冲击效应较为显著,破坏了主燃区的局部富燃气氛形成贫燃区,从而增加 NO_x 的生成^[59]。同时,二次空气的流量和注入孔的几何形状是维持燃烧稳定性和减少 NO_x 排放的重要控制参数。研究表明,当二次空气流量超过一定阈值时,初级火焰容易出现低频纵向脉动,导致 NO_x 排放增加,甚至可能引发火焰熄灭^[60]。通过增加注入孔的数量(保持直径不变),可在较高的二次空气流量下维持火焰的稳定性,同时不增加 NO_x 和 N_2O 的排放。OSAMU等^[61]通过增加二次稀释孔面积,可使 NO_x 排放减少近2/3,同时未燃 NH_3 也显著降低。

综上,燃烧室内、级间及二级空气的混合优化对控制掺氨燃烧过程火焰稳定性及 NO_x 排放同样具有重要作用,如何优化燃料-空气-燃烧过程的时空混合匹配或将成为掺氨燃烧重点研究内容之一。

2.3 燃料/燃烧过程改性协同控制掺氨燃烧过程稳燃与低 NO_x

上述针对氨燃烧过程的调控聚焦在燃烧侧的调控,燃料的改性及燃烧过程组分的优化同样能够在燃烧端强化火焰稳定性并抑制 NO_x 生成,从而适应

更宽范围、更灵活的燃烧调节。

已有研究表明向空气-燃料或燃烧室中注入水蒸气可降低氨-空气、氨-氢-空气燃烧过程 NO_x 排放潜力^[48]。该措施原理是降低燃烧区火焰温度来控制热力型 NO_x 的生成路径,因而具有恶化火焰稳定性的风险。当水蒸汽添加量 $>3\%$ 时就容易引起纯氨火焰的熄灭^[62]。因此,水蒸气加注较适用于高活性燃料与氨掺混燃烧的情形,如氨-氢-空气、氨-甲烷-空气等。对于纯氨燃烧体系,等离子体辅助成为火焰稳燃与低 NO_x 协同控制的重要手段之一。利用气体分子在等离子体环境中放电后产生的自由电子、激发态、活性自由基等具有高反应活性粒子参与,可将旋流预混氨火焰贫燃吹熄极限由 $0.7 \sim 0.8$ (无等离子体)拓展至 $0.3 \sim 0.4$ ^[63],极大提升了负荷调节的能力;与此同时,等离子体局部热效应强化了氨的裂解,进而增强火焰中 NH_2 自由基的生成,促进高温区 NO_x 还原过程,从而降低 NO_x 的生成^[64]。综上,通过添加惰性组分调节燃烧温度控制氨燃烧 NO_x 排放问题,需与活性燃料掺混和等离子体辅助等措施耦合,以实现稳燃与低排放的协同控制。

基于燃料改性的氨稳燃措施研究中,氢气被认为是较理想的介质。这是因为 H_2 可直接通过 NH_3 制备并直接参与燃烧,无需增加额外燃料源,省去掺混燃料的制备、储运成本。目前,通过氨制氢强化燃烧的方式主要有2种,分别为氨炉外热裂解或催化分解,炉内原位热裂解。对于氨炉外部分分解制备 $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ 混合燃料工艺的研究,清华大学李水清等^[65-66]研发了一款氨燃料快速热解分级喷射枪,将热解后混合燃料高速喷出;合肥综合性国家科学中心能源研究院朱晓慧等^[67]提出了一种用于氨气催化裂解装置,氨在裂解腔体内部进行催化裂解,得到的氨氢混合气应用到发动机系统中。本质上,氨炉外分解并进一步燃烧与氨掺混氢气燃烧十分相似,区别在于原料进入炉内的温度不同。因此,通过调整合适的氨分解比例,可使混合火焰的绝热温度、火焰速度和释热率达到与甲烷火焰相当的水平,极大拓宽氨火焰的稳燃区间^[68-69]。此外,由于氨部分分解以及燃烧过程的强化,利于氨的燃尽。然而,氢气的混燃同时增加了一O—和—OH 自由基含量、提高了火焰温度,导致燃料型和热力型 NO_x 排放量均增加^[68]。因此,需要降低火焰温度,同时采用更合理的分级策略来控制 NO_x 的生成。例如,上述提到的火焰加湿,以及3.1节中氨氢混合气与氨的燃料分级和分区分级燃烧。

炉外氨分解过程需要单独的设备及催化剂,并

且分解过程吸热,需要在一定的高温条件下进行,增加了系统投资和运行的成本。鉴于此,基于炉内的氨高温热裂解协同实现氨燃烧强化及低排放策略被提出。氨炉内热裂解程度强烈依赖于当地温度及氧浓度,高温低氧促进氨的脱氢反应,进而在富燃条件下利用 NH_i 强化 De- NO_x 路径。其中,在氨增氧富燃条件下,火焰温度的显著升高可促进氨的自发裂解,提高燃料的整体裂解率,并减少富燃区域残余 NH_3 的排放;当进一步耦合分级燃烧方式后能够显著拓宽低排放窗口^[70]。

为尽可能通过燃烧组织方式的调整实现氨炉内高效裂解,可采用原料预热、高温烟气提升氨燃烧区域局部温度并降低氧浓度,进而促进氨的原位高温裂解。高温烟气环境可来源于活性燃料燃烧的焰后区域、烟气循环、回流区等;其中,将氨注入活性燃料燃烧焰后区能更宽范围地调控烟气温度、流量及氧含量等参数,从而更加灵活地匹配氨的分解燃烧,提升氨燃烧负荷调节能力,并拓宽低 NO_x 燃烧窗口。为此,ZHANG等^[71]采用 ReaxFF 分子动力学模拟、密度泛函理论(DFT)与 Chemkin 动力学建模相结合的方法,揭示了氨分解的温度依赖机制,提出并验证了新的反应路径与中间体,改进了传统动力学模型。在氨原位与分解方面,ALFAZAZI等^[72]采用报道了一种在新型钝体燃烧器回流区中原位裂解氨气的新方法,能够增强火焰稳定性并减少污染物排放,同时节省了将氨气裂解为氢气和氮气所需能量的15%。此外,华中科技大学刘小伟^[73]团队提出一种内置高速空气射流阵列结构的新型掺氨旋流燃烧器结构,以实现炉内氨预分解后燃烧和分级燃烧,结果表明通过调控总过量空气系数使氨热解发生区域沿炉膛轴向逐渐延伸,火焰前部高温缺氧区增大,促进氨受热预分解为 N_2 和 H_2 ,减少氨中燃料氮直接转化形成 NO_x 。然而,针对该燃烧方式下氨裂解特性、尾部 NO_x 排放规律,以及火焰稳定和低污染的协同参数优化的相关研究甚少,有待进一步深入研究。

2.4 基于 AI 赋能的氨燃烧技术开发与过程管控

氨掺混燃烧, NO_x 排放和火焰稳定性的协同控制是燃烧器设计开发的关键。早期,燃烧设计主要借助大量实验数据汇编和经验相关性的发展,这在一定程度上可实现燃烧过程的优化,但也存在明显局限。例如,优化目标过于单一、适用范围有限且未考虑所有可调运行参数对目标参数的影响等;此外,真实燃烧环境通常非常恶劣,复杂的燃烧诊断方法难以应用^[74-75]。这些都将导致燃烧优化缺乏准确性和系统性,使得新燃烧技术及燃烧器设计优化

过程缓慢且昂贵。

随着计算机技术的发展,数值模拟已成为研究和设计燃烧系统的重要工具。而燃烧系统涉及多种时间和空间尺度的复杂过程,需求解复杂的湍流模型及详细的反应动力学机制,其能量方程、动量方程、组分运输及化学反应之间存在高维非线性^[76-78]。尽管湍流燃烧模型已在工业界得到广泛应用,但其当前的预测能力仍未达到新设计和法规标准的要求,尤其在污染物排放和运行稳定性限值方面尚存在不足。因此,在燃烧室设计、开发和性能分析中,亟需一种快速、全面、可靠的应用于燃烧技术开发、设计、预测及过程管控的技术手段,如图7所示。

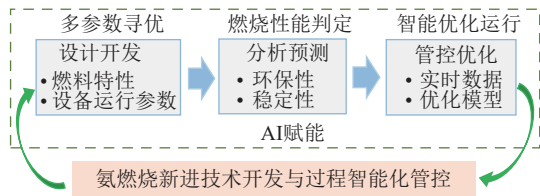


图7 AI赋能的氨燃烧技术开发与过程智能管控流程

Fig. 7 Schematic diagram of AI-enabled ammonia combustion technology development and process control

随着人工智能(AI)技术的飞速发展,以机器学习为代表的人工智能方法在“多尺度、高维数”问题的数据驱动建模方面表现优异,为氨燃烧的燃料设计、燃烧过程预测以及新型燃烧技术开发提供了有力工具。

对于新兴燃料氨与传统燃料掺混燃烧过程,目前的燃烧设备仍需要大量工作来验证其适应性。通过人工智能和机器学习技术,可以构建基于燃料物理和化学性质的燃烧性能指标与燃烧设备之间的优化关系,进而探索具备最佳性能的混合燃料成分,实现燃料的优化设计^[79-80]。同样地,现有燃烧设备在进行掺氨燃烧的改造与优化时,同样需要大量的实验和数值模拟工作。利用机器学习(如遗传算法、粒子群优化算法、贝叶斯优化等)进行燃烧器几何参数优化,通过输入特征(如喷嘴形状、旋流叶片角度、管径等)和输出目标(如最低 NO_x 排放、最高热效率),训练AI模型以确定最佳设计参数,从而减少实验和模拟次数,能够快速探索更大的设计空间,找到全局最优解^[81-82]。目前,GE公司正在开发一种支持人工智能和机器学习的逆向设计框架,该框架能够利用性能指标来创建更优化的工业燃气轮机气动部件设计方案,将设计周期从一年缩短到几个月。TIAN等^[83]利用人工智能对氨替代天然气的稳燃极限进行建模和模拟,采用基于粒子

群优化算法的神经网络建立了甲烷-氨燃烧模型,分析稳燃极限特性,并与BP神经网络和支持向量机方法进行了比较。模拟结果与物理模型数据对比表明,粒子群优化神经网络算法的有效性最好,能准确预测不同工况下甲烷-氨燃料的燃烧特性曲线。应用机器学习技术还可以预测氨/氢/空气混合物的层流燃烧速度^[84]。通过减少实验不确定性,利用机器学习模型辅助分析氨发动机性能。结果表明,人工神经网络算法优于支持向量回归,可以有效地学习发动机控制变量与氨发动机性能之间的关系^[85]。此外,使用极限学习机(ELM)来预测输出变量,并将多目标粒子群优化(MOPSO)算法与ELM算法相结合,求解双目标问题,能够为进一步优化氨燃烧过程,降低排放提供了理论依据^[86]。

在燃烧侧,XING等^[87]首次利用密度泛函理论结合反应分子动力学模拟获得的数据,开发了专门用于氨和氨氢燃烧系统的神经网络模型,着重分析了原子构型的作用力、关键反应的反应能以及 NO_x 排放特性。该方法显著缩短了模拟时间,并且预测结果与实验数据具有良好的一致性。SAITO等^[82]基于神经常微分方程的化学反应计算方法,对氨燃烧进行了数值模拟,涵盖了零维自燃反应、一维自由传播火焰和二维时间演化平面射流火焰。通过将点火延迟时间、层流燃烧速度、温度以及各化学组分的质量分数分布与详细化学动力学计算结果进行对比,验证了该方法的有效性。此外,基于机器学习的无监督聚类和图扫描算法对CFD数据进行后处理,进而构建化学反应器网络模型(CFD-CRN)的秒级燃烧快速预测方法也受到了广泛关注^[88-92]。

上述秒级数学智能预测模型的发展为工业燃烧系统的过程控制奠定了基础。通过结合模拟和测量数据,该模型能够实时预测燃烧过程的动态演变,并作为软传感器使用。进而,基于AI的控制算法(如深度强化学习算法)可实时监测燃烧过程中的多种参数(如温度、压力和排放等),并动态调整燃烧器的操作参数(如空燃比、喷射角度等),从而实现自适应优化控制^[93]。

3 结 论

1) 分级分区燃烧调控和燃料改性是提升稳定性和 NO_x 排放的核心路径。燃烧侧,通过分级分区燃烧架构将含氮燃料与碳氢燃料空间解耦,优化耦合空气分级、燃料分级等技术,实现温度-氧浓度-停留时间的精准协同调控,或将成为提升多燃料掺氨燃烧稳定性和拓宽低 NO_x 排放窗口的可行性方案。燃料侧,通过炉外或炉内氨分解生成氢直接参与燃

烧, 可有效增强火焰稳定性。其中, 将氨注入到活性燃料燃烧焰后区的多级分解策略, 理论上可更加灵活地调控烟气的温度、流量和氧含量, 进而更有效地匹配氨的分解与燃烧过程, 对提升氨燃烧负荷调节能力及拓宽低 NO_x 燃烧窗口更具灵活性。

2) AI 驱动的燃烧系统优化为清洁燃烧技术提供了突破性路径。基于物理信息神经网络与迁移学习的多物理场耦合模型, 可显著降低实验和模拟工作量, 快速探索优化路径, 缩短燃烧室设计周期。进一步集成燃烧数字孪生系统, 基于先进控制理论和智能算法的燃烧系统运行策略, 实时监测和调整燃烧系统的运行参数, 开发高效的数据采集和管理方法, 从而提升 AI 模型的训练效率和预测精度, 提前调整燃料供应和空气流量等参数, 确保燃烧的稳定性和经济性。然而, 该技术体系仍面临小样本条件下燃烧模态迁移规律的泛化难题, 亟需通过多模态数据融合(实验-模拟-文献数据)构建覆盖宽工况域的燃烧知识图谱。

3) 工程化应用需突破多场景、多尺度技术壁垒。首先, 提升掺氨燃烧工艺及燃烧器的适应性, 设计和开发能够适应宽负荷变化的燃烧器; 拓宽燃烧种类, 提高其对不同燃料特性的适应性, 以满足不同用户和应用场景的需求。其次, 建立从实验室尺度到工业规模的燃烧器放大准则, 开展大规模的示范工程和应用研究, 积累运行经验和数据, 为含碳掺氨燃料在发电行业的广泛应用提供技术支持和保障。

参考文献 (References):

[1] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革 [J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1010-1018.
HUANG Zhen, XIE Xiaomin. Energy revolution under vision of carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1010-1018.

[2] GIDDEY S, BADWAL S P S, MUNNINGS C, et al. Ammonia as a renewable energy transportation media[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(11): 10231-10239.

[3] IEA. Net Zero by 2050-A Roadmap for the Global Energy Sector[R]. 2021.

[4] 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.

[5] CHEHADE G, DINCER I. Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel[J]. Fuel, 2021, 299: 120845.

[6] JIANG L L, FU X Z. An ammonia-hydrogen energy roadmap for carbon neutrality: Opportunity and challenges in China[J]. Engineering, 2021, 7(12): 1688-1691.

[7] IEA. Ammonia technology roadmap[R/OL]. 2021 [2024-11-19]. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>.

[8] Royal Society. Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store[R/OL]. 2020 [2024-11-19]. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/green-ammonia/green-ammonia-policy-briefing.pdf>.

[9] Yamamoto A, Kimoto M, Ozawa Y, et al. Basic co-firing characteristics of ammonia with pulverized coal in a single burner test furnace[R]. 2018. <https://ammoniaenergy.org/presentations/basic-co-firing-characteristics-of-ammonia-with-pulverized-coal-in-a-single-burner-test-furnace/>.

[10] VALERA-MEDINA A, AMER-HATEM F, AZAD A K, et al. Review on ammonia as a potential fuel: From synthesis to economics[J]. Energy & Fuels, 2021, 35(9): 6964-7029.

[11] Trevor Brown. Ammonia for energy storage: a “revolutionary disruption” [R/OL]. 2017 [2024-11-19]. <https://www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-for-energy-storage-a-revolutionary-disruption/>.

[12] 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.

[13] KURATA O, IKI N, MATSUNUMA T, et al. Performances and emission characteristics of NH_3 -air and NH_3 CH_4 -air combustion gas-turbine power generations[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(3): 3351-3359.

[14] 陈磊, 沈洁, 江贻满, 等. 介质阻挡放电辅助氨/空气预混旋流燃烧试验 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(3): 1-7.
CHEN Lei, SHEN Jie, JIANG Yiman, et al. Experimental study on premixed ammonia/air swirl combustion assisted by dielectric barrier discharge[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(3): 1-7.

[15] 张屿, 赵义军, 曾光, 等. 氨燃料强化燃烧技术研究进展 [J]. 能源环境保护, 2023, 37(5): 129-144.
ZHANG Yu, ZHAO Yijun, ZENG Guang, et al. A review of the research progress of ammonia combustion enhancement technology[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(5): 129-144.

[16] KANG L W, PAN W G, ZHANG J K, et al. A review on ammonia blends combustion for industrial applications[J]. Fuel, 2023, 332: 126150.

[17] KHATEEB A A, GUIBERTI T F, ZHU X R, et al. Stability limits and exhaust NO performances of ammonia-methane-air swirl flames[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, 114: 110058.

[18] HAN X L, WANG Z H, COSTA M, et al. Experimental and kinetic modeling study of laminar burning velocities of NH_3 /air, NH_3/H_2 /air, NH_3/CO /air and NH_3/CH_4 /air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2019, 206: 214-226.

[19] OKAFOR E C, NAITO Y, COLSON S, et al. Experimental and numerical study of the laminar burning velocity of CH_4 - NH_3 -air premixed flames[J]. Combustion and Flame, 2018, 187: 185-198.

[20] CHEN Y F, ZHANG B, SU Y, et al. Effect and mechanism of combustion enhancement and emission reduction for non-premixed pure ammonia combustion based on fuel preheating[J]. Fuel, 2022, 308: 122017.

- [21] OKAFOR E C, YAMASHITA H, HAYAKAWA A, et al. Flame stability and emissions characteristics of liquid ammonia spray co-fired with methane in a single stage swirl combustor[J]. *Fuel*, 2021, 287: 119433.
- [22] AN Z H, ZHANG M, ZHANG W J, et al. Emission prediction and analysis on CH₄/NH₃/air swirl flames with LES-FGM method[J]. *Fuel*, 2021, 304: 121370.
- [23] FÜZESI D, WANG S Q, JÓZSA V, et al. Ammonia-methane combustion in a swirl burner: Experimental analysis and numerical modeling with Flamelet Generated Manifold model[J]. *Fuel*, 2023, 341: 127403.
- [24] ZHANG J Q, SUI C J, ZHANG B, et al. Effects of swirl intensity on flame stability and NO emission in swirl-stabilized ammonia/methane combustion[J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2023, 14: 100138.
- [25] LEE T, GUAHK Y T, KIM N, et al. Stability and emission characteristics of ammonia-air flames in a lean-lean fuel staging tangential injection combustor[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 248: 112593.
- [26] OKAFOR E C, SOMARATHNE K D A, RATHANAN R, et al. Control of NO_x and other emissions in micro gas turbine combustors fuelled with mixtures of methane and ammonia[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 211: 406–416.
- [27] LI Z X, ZHANG Y, ZHANG H. Kinetics modeling of NO_x emission of oxygen-enriched and rich-lean-staged ammonia combustion under gas turbine conditions[J]. *Fuel*, 2024, 355: 129509.
- [28] ARIEMMA G B, SORRENTINO G, RAGUCCI R, et al. Ammonia/methane combustion: Stability and NO_x emissions[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 241: 112071.
- [29] SOMARATHNE K D K A, OKAFOR E C, HAYAKAWA A, et al. Emission characteristics of turbulent non-premixed ammonia/air and methane/air swirl flames through a rich-lean combustor under various wall thermal boundary conditions at high pressure[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 210: 247–261.
- [30] 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.
- [31] ZARE GHADI A, LIM H. Enhancing ammonia combustion performance using hydrogen peroxide-enriched air: A computational fluid dynamics analysis[J]. *Energy*, 2024, 304: 132203.
- [32] YANG Y N, HORI T, SAWADA S, et al. Numerical investigation on the effects of air-staged strategy and ammonia co-firing ratios on NO emission characteristics using the Conjugate heat transfer method[J]. *Fuel*, 2024, 368: 131591.
- [33] MEI B W, ZHANG X Y, MA S Y, et al. Experimental and kinetic modeling investigation on the laminar flame propagation of ammonia under oxygen enrichment and elevated pressure conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 210: 236–246.
- [34] OKAFOR E C, SOMARATHNE K D K A, HAYAKAWA A, et al. Towards the development of an efficient low-NO_x ammonia combustor for a micro gas turbine[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4597–4606.
- [35] DAOOD S S, JAVED M T, GIBBS B M, et al. NO_x control in coal combustion by combining biomass co-firing, oxygen enrichment and SNCR[J]. *Fuel*, 2013, 105: 283–292.
- [36] NORMANN F, ANDERSSON K, LECKNER B, et al. Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, 35(5): 385–397.
- [37] ZHANG X Y, MOOSAKUTTY S P, RAJAN R P, et al. Combustion chemistry of ammonia/hydrogen mixtures: Jet-stirred reactor measurements and comprehensive kinetic modeling[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 234: 111653.
- [38] ZHU X R, DU J G, YU Z, et al. NO_x emission and control in ammonia combustion: State-of-the-art review and future perspectives[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(1): 43–60.
- [39] 吉龙娟, 王金华, 胡光亚, 等. CH₄/NH₃/空气预混稀燃火焰结构及吹熄特性实验研究 [J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(5): 517–526.
- Ji Longjuan, Wang Jinhua, Hu Guangya, et al. Structure and blow-off characteristics of lean premixed CH₄/NH₃/air flames[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(5): 517–526.
- [40] LIU S, LIN Z L, QI Y L, et al. Combustion and emission characteristics of a gasoline/ammonia fueled SI engine and chemical kinetic analysis of NO_x emissions[J]. *Fuel*, 2024, 367: 131516.
- [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] 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.
- [43] ZHANG M, AN Z H, WANG L, et al. The regulation effect of methane and hydrogen on the emission characteristics of ammonia/air combustion in a model combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(40): 21013–21025.
- [44] OKAFOR E C, NAITO Y, COLSON S, et al. Measurement and modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 204: 162–175.
- [45] LI Y P, SUN J G, HUANG Q, et al. Effects of fuel/air distribution on the NH₃/CH₄ flame stability limit and NO_x emission in a dual-annular burner[J]. *Combustion and Flame*, 2024, 268: 113606.
- [46] Peterson C O, Sowa W A, Samuelsen G S, et al. Performance of a model rich burn-quick mix-lean burn combustor at elevated temperature and pressure[R]. NASA Technical Reports Server, 2002.
- [47] OKAFOR E C, KURATA O, YAMASHITA H, et al. Liquid ammonia spray combustion in two-stage micro gas turbine combustors at 0.25 MPa; Relevance of combustion enhancement to flame stability and NO_x control[J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2021, 7: 100038.
- [48] PUGH D, BOWEN P, VALERA-MEDINA A, et al. Influence of steam addition and elevated ambient conditions on NO_x reduc-

- tion in a staged premixed swirling NH_3/H_2 flame[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 5401–5409.
- [49] VIJRUMBANA Y, SHANKAR SINGH A, LEE B J, et al. Chemical kinetic analysis to study the potential of fuel staging in reducing the emissions from NH_3/CH_4 -air combustion at different pressures[J]. *Fuel*, 2023, 339: 127404.
- [50] 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.
- [51] ELBAZ A M, ALBALAWI A M, WANG S X, et al. Stability and characteristics of NH_3/CH_4 /air flames in a combustor fired by a double swirl stabilized burner[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(4): 4205–4213.
- [52] 余鸣宇, 罗光前, 姚洪. 氨/二甲醚燃料分级燃烧的排放特性 [J]. *力学学报*, 2023, 55(12): 2741–2749.
YU Mingyu, LUO Guangqian, YAO Hong. A study on emission characteristics of NH_3/dme flames in a fuel staging combustor[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2023, 55(12): 2741–2749.
- [53] YANG Y P, HUANG Q, SI T, et al. Expanding low NO_x emission range of NH_3/CH_4 flames via fuel nitrogen/hydrocarbon separation in two-stage tangential swirling burner[J]. *Fuel*, 2025, 385: 134029.
- [54] VIJRUMBANA Y, SRINIVASARAO M, OKAFOR E C, et al. Chemical kinetics of Lean – Rich – Lean fuel-air staged NH_3/H_2 -air combustion for emission control[J]. *Fuel*, 2025, 383: 133813.
- [55] 潘卫国, 亢连伟, 王文欢, 等. 一种带有可调节轴向空气分级段的掺氨多级旋流燃烧器 [P]. 中国专利: 202310055041. X, 2023-02-03.
- [56] 李振阳, 林启富, 刘成周, 等. 一种基于多级分区燃烧、等离子体助燃的高功率氨燃烧器 [P]. 中国专利: 202411159901.5, 2024-08-22.
- [57] 陈炫午, 曾清华, 甘晓华. 航空发动机高温升燃烧室技术分析 [J]. *推进技术*, 2023, 44(2): 8–22.
CHEN Xuanwu, ZENG Qinghua, GAN Xiaohua. Analysis of combustion technology of high temperature rise for aero engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(2): 8–22.
- [58] LI Z X, LI S H. Effects of inter-stage mixing on the NO_x emission of staged ammonia combustion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(16): 9791–9799.
- [59] TU Y J, ZHANG H Y, GUIBERTI T F, et al. Experimental and numerical study of combustion and emission characteristics of NH_3/CH_4 /air premixed swirling flames with air-staging in a model combustor[J]. *Applied Energy*, 2024, 367: 123370.
- [60] AVILA JIMENEZ C D, MACFARLANE A, YOUNES M, et al. Effects of secondary air injection on the emissions and stability of two-stage NH_3 - CH_4 -air swirl flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1-4): 105723.
- [61] KURATA O, IKI N, INOUE T, et al. Development of a wide range-operable, rich-lean low- NO_x combustor for NH_3 fuel gas-turbine power generation[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4587–4595.
- [62] PUGH D, VALERA-MEDINA A, BOWEN P, et al. Emissions performance of staged premixed and diffusion combustor concepts for an NH_3 /air flame with and without reactant humidification[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, 143(5): 051012.
- [63] 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.
- [64] CHOE J, SUN W T, OMBRELLO T, et al. Plasma assisted ammonia combustion: Simultaneous NO_x reduction and flame enhancement[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 228: 430–432.
- [65] CHOE J, SUN W T. Experimental investigation of non-equilibrium plasma-assisted ammonia flames using NH_2^* chemiluminescence and OH planar laser-induced fluorescence[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(4): 5439–5446.
- [66] 李水清, 宋民航, 黄睿, 等. 一种氨燃料快速热解分级喷射枪: CN113864783A[P]. 2021-12-31.
- [67] 朱晓慧, 陈龙威, 王先义, 等. 一种用于氨气催化裂解的装置 [P]. 中国专利: CN202410514075.5, 2024-07-30.
- [68] AN Z H, ZHANG W J, ZHANG M, et al. Experimental and numerical investigation on combustion characteristics of cracked ammonia flames[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(8): 7412–7430.
- [69] 黄文仕, 王智雄, 林立, 等. 基于氨预分解的氨扩散燃烧模拟研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(2): 479–488.
HUANG Wenshi, WANG Zhixiong, LIN Li, et al. Simulation on ammonia diffusion combustion based on ammonia pre-decomposition[J]. *China Industrial Economics*, 2025, 45(2): 479–488.
- [70] LIU Z D, ZHANG Y, LI W, et al. Self-promoted fuel pyrolysis under oxygen enrichment enables clean and efficient ammonia combustion[J]. *The Innovation Energy*, 2024, 1(1): 100006.
- [71] ZHANG H, HU Y T, LIU W Y, et al. Update of the present decomposition mechanisms of ammonia: A combined ReaxFF, DFT and chemkin study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 90: 557–567.
- [72] ALFAZAZI A, ES-SEBBAR E T, KUMAR S, et al. Effects of ammonia *in situ* partial cracking on the structure of bluff-body non-premixed flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1-4): 105697.
- [73] 余荣浩, 徐义书, 王华坤, 等. 分级空气高速射流对煤掺氨燃烧中氨预分解与 NO_x 生成影响 [J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(5): 72–84.
YU Ronghao, XU Yishu, WANG Huakun, et al. Effect of staged air with a high-speed jet on ammonia pyrolysis and NO_x formation in an ammonia-coal co-firing flame[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(5): 72–84.
- [74] 顾顾, 钟文琪, 石岩, 等. 基于 CFD 数值模拟和 AI 算法的燃气轮机燃烧优化 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(3): 545–554.
GU Qi, ZHONG Wenqi, SHI Yan, et al. Combustion optimization of gas turbine based on CFD numerical simulation and AI algorithm[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(3): 545–554.
- [75] DÚBAL S, BERKEL L L, DEBIAGI P, et al. Chemical reactor

- network modeling in the context of solid fuel combustion under oxy-fuel atmospheres[J]. *Fuel*, 2024, 364: 131096.
- [76] KHODAYARI H, OMMI F, SABOOHI Z. A review on the applications of the chemical reactor network approach on the prediction of pollutant emissions[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2020, 92(4): 551-570.
- [77] 母滨. 贫预混燃烧室 NO_x 排放的化学反应器网络模型数值研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2019.
- [78] CHEN Y F, SU Y, SUI C J, et al. Flame and emission characteristics of preheated ammonia combustion based on chemical reaction network[J]. *Fuel Processing Technology*, 2023, 242: 107652.
- [79] SARATHY S M, ERAQI B A. Artificial intelligence for novel fuel design[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1-4): 105630.
- [80] KUZHAGALIYEVA N, HORVÁTH S, WILLIAMS J, et al. Artificial intelligence-driven design of fuel mixtures[J]. *Communications Chemistry*, 2022, 5(1): 111.
- [81] KESGIN U. Genetic algorithm and artificial neural network for engine optimisation of efficiency and NO_x emission[J]. *Fuel*, 2004, 83(7-8): 885-895.
- [82] YANG M Y, KIM S, SUN X, et al. Deep-learning-based reduced-order modeling to optimize recuperative burner operating conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121669.
- [83] TIAN L, LI J X, NIE Y H, et al. Artificial neural network based modeling of novel low-carbon energy combustion[C]//2024 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET). Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 324-327.
- [84] CIHAT EMRE Ü, HERFATMANESH M R, VALERA-MEDINA A, et al. Applying machine learning techniques to predict laminar burning velocity for ammonia/hydrogen/air mixtures[J]. *Energy and AI*, 2023, 13: 100270.
- [85] LIU Z T, LIU J L. Machine learning assisted analysis of an ammonia engine performance[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022, 144(11): 112307.
- [86] ZHANG Z Q, HU J Y, WANG Y G, et al. An artificial intelligence-based strategy for multi-objective optimization of diesel engine fueled with ammonia-diesel-hydrogen blended fuel[J]. *Energy*, 2025, 318: 134701.
- [87] XING Z H, JIANG X. Neural network potential-based molecular investigation of pollutant formation of ammonia and ammonia-hydrogen combustion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489: 151492.
- [88] SAITO M, XING J K, JUN N G, et al. Data-driven simulation of ammonia combustion using neural ordinary differential equations (NODE)[J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2023, 16: 100196.
- [89] SAVARESE M, CUOCI A, DE PAEPE W, et al. Machine learning clustering algorithms for the automatic generation of chemical reactor networks from CFD simulations[J]. *Fuel*, 2023, 343: 127945.
- [90] INNOCENTI A, ANDREINI A, BERTINI D, et al. Turbulent flow-field effects in a hybrid CFD-CRN model for the prediction of NO_x and CO emissions in aero-engine combustors[J]. *Fuel*, 2018, 215: 853-864.
- [91] LEONG C C, BLAKEY S, WILSON C W. Genetic algorithm optimised chemical reactors network: A novel technique for alternative fuels emission prediction[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2016, 27: 180-187.
- [92] 耿俊杰, 田园, 孙逸凡, 等. 基于化学反应器网络方法的燃气轮机燃烧室 NO_x 排放研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(12): 4657-4669.
- GENG Junjie, TIAN Yuan, SUN Yifan, et al. Investigation on NO_x emission characteristics of gas turbine combustor based on chemical reactor network method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(12): 4657-4669.
- [93] PARENTE A, SWAMINATHAN N. Data-driven models and digital twins for sustainable combustion technologies[J]. *iScience*, 2024, 27(4): 109349.