

# “双碳”目标下的氨能源利用进展

肖通<sup>1</sup>, 张猛<sup>1</sup>, 宋鹏飞<sup>2</sup>, 曹冲<sup>2</sup>, 陈雷<sup>2</sup>, 黄佐华<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 绿色氢能全国重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 中石化广州工程公司, 广东 广州 510620)

**摘要:** 在全球“双碳”目标驱动的能源转型背景下, 可再生能源的波动性与氢能储运瓶颈催生了对高效能源载体的需求。氨( $\text{NH}_3$ ) 凭借其高储氢密度、易于液化储运、零碳排放及成熟的基础设施兼容性, 正成为极具发展潜力的能源载体之一。针对氨能源全价值链的技术进展与挑战, 系统综述了其规模化应用主要面临的两大瓶颈: 一是亟需以可再生能源驱动的绿氨合成路径替代传统高碳工艺; 二是氨燃料的低火焰速度、窄可燃极限及复杂的 $\text{NO}_x$ 生成机理制约了其在动力装置中的高效清洁利用。结果表明: 通过旋流燃烧、MILD 燃烧以及 $\text{H}_2/\text{CH}_4$  掺混等先进燃烧技术, 可有效提升燃烧稳定性并实现污染物协同控制, 燃烧技术可行性已在大型船舶内燃机、兆瓦级燃气轮机和大规模燃煤电厂掺烧等前沿工程示范中得到验证。随着绿氨生产成本的持续下降和相关政策支持力度的增强, 氨能源作为连接可再生能源电力与终端应用的理想燃料, 是实现交通、工业及电力等领域深度脱碳的关键战略路径。

**关键词:** 氨能源; 绿氨; 零碳燃料; 燃烧特性;  $\text{NO}_x$  控制; “双碳”目标

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2025.12.001

[引用本文格式] 肖通, 张猛, 宋鹏飞, 等. “双碳”目标下的氨能源利用进展[J]. 热能动力工程, 2025, 40(12): 1-19. XIAO Tong, ZHANG Meng, SONG Pengfei, et al. Progress in ammonia energy utilization towards achieving carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(12): 1-19.

## Progress in Ammonia Energy Utilization Towards Achieving Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals

XIAO Tong<sup>1</sup>, ZHANG Meng<sup>1</sup>, SONG Pengfei<sup>2</sup>, CAO Chong<sup>2</sup>, CHEN Lei<sup>2</sup>, HUANG Zuohua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049;  
2. SINOPEC Guangzhou Engineering Co., Ltd., Guangzhou, China, Post Code: 510620)

**Abstract:** Driven by global "dual carbon" goals, the energy transition requires an efficient energy carrier to overcome the intermittency of renewable energy and bottlenecks in hydrogen storage and transportation. Ammonia ( $\text{NH}_3$ ) has emerged as one of the potential energy carriers, owing to its high hydrogen storage density, ease of liquefaction storage and transportation, zero-carbon emissions, and compatibility with existing infrastructure. The technological progress and challenges of entire ammonia energy value chain were systematically reviewed. Large-scale application faced two primary bottlenecks. One was the urgent need to replace traditional carbon-intensive production with green ammonia synthesis from renewable energy, and the other was the need to overcome the problem of efficient and clean utilization in power plants constrained by low flame speed, narrow flammable limit and complex  $\text{NO}_x$  formation mecha-

收稿日期: 2025-09-25; 修订日期: 2025-10-09

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U24B2069); 国家自然科学基金面上项目(52173130)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (U24B2069, 52173130)

作者简介: 肖通(1997-), 男, 西安交通大学博士研究生。

通信作者: 张猛(1988-), 男, 西安交通大学副教授。

nisms of ammonia fuel. The results show that advanced combustion technologies, including swirl combustion, MILD combustion, and co-firing with  $H_2/CH_4$ , can effectively enhance the stability and collaboratively control the pollutants. The technical feasibility of these approaches is being demonstrated in large-scale marine engines, megawatt-class gas turbines, and co-firing applications in large-scale coal-fired power plants. It is concluded that, driven by falling production costs for green ammonia and increasing supportive policy intensity, ammonia energy represents a key strategic pathway to decarbonize the transport, industrial, and power sectors by effectively linking renewable energy electricity to end-use applications.

**Key words:** ammonia energy, green ammonia, zero-carbon fuel, combustion characteristics,  $NO_x$  control, carbon peaking and carbon neutrality goals

## 引 言

在全球应对气候变化与实现可持续发展需求的驱动下,构建以可再生能源为核心的零碳经济体系已成为国际社会的战略共识。然而,以风能、太阳能为代表的可再生能源固有的间歇性与波动性对能源系统的稳定运行构成严峻挑战,亟需高效、可持续的长周期储能技术。在此背景下,氢能作为理想的清洁能源载体备受关注,但其低密度、高逃逸性及昂贵的液化储运成本严重制约了规模化应用。

为突破上述瓶颈,氨凭借其高储氢质量分数、易于液化及与现有基础设施兼容的特性,提供了一条极具潜力的清洁能源载体技术路径<sup>[1]</sup>。氨的体积储氢密度是液氢的 1.5 倍,储运成本较低,且作为零碳燃料直接利用时无  $CO_2$  排放<sup>[2-3]</sup>。目前,氨能源的规模化应用面临两大挑战:一是传统合成氨工艺碳排放强度高,必须通过可再生能源驱动的绿氨合成技术实现全生命周期脱碳;二是氨燃料的低燃烧反应活性及易生成氮氧化物( $NO_x$ )的特性,制约了其在内燃机、燃气轮机等动力装置中的高效应用<sup>[4]</sup>。

除上述理化特性外,氨作为能源载体的独特优势更体现在其兼具传统工业基石与新兴能源载体的双重角色:一方面是维系现代工业的支柱产品,不仅用于制造氮肥,保障粮食安全,同时也是制造硝酸、尼龙等关键化学品及工业制冷剂的基础原料;另一方面,庞大且成熟的产业基础为氨作为能源载体的推广应用提供了可行性,氨在海运、发电等领域的多种技术发展路径已逐渐清晰。

为突破上述技术瓶颈,国际社会正从政策与技术两方面加速布局。欧盟通过立法将绿氨纳入零碳

燃料体系,日本则聚焦于氨在现有能源设施中的掺混应用,而中国正依托碳市场与产业政策引导其规模化部署。这些举措共同确立了绿氨在未来零碳能源体系中的战略价值。因此,本文将围绕绿氨合成路径、储运特性、关键燃烧技术及终端应用等方面展开系统性综述,旨在为氨能源的技术发展与实现规模化应用提供理论参考。

## 1 国际碳约束与中国减排政策

### 1.1 全球碳排放控制

全球气候治理正经历着前所未有的制度性变革。2015 年《巴黎协定》<sup>[5]</sup> 的签署标志着国际社会对温升控制的共同承诺,将全球平均气温升幅控制在  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内,并努力控制在  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内<sup>[6]</sup>。《巴黎协定》的相关要求加快推进了各国编制长期低碳排放战略(LTS)的工作进程<sup>[7]</sup>;截至 2019 年 7 月底,以美国<sup>[8]</sup>、德国<sup>[9]</sup>、法国<sup>[10]</sup>为代表的 12 个国家提交了“2050 碳中和”的 LTS 工作进程<sup>[11]</sup>;截至 2023 年,已有 138 个国家提交碳中和 LTS,涵盖全球 88% 的碳排放量和 90% 的国内生产总值(GDP)。其中,欧盟、美国、日本等主要经济体承诺在 2050 年实现净零排放,中国也提出 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的“双碳”目标,推动全球气候行动从政治共识转向技术实践。

2020 年 9 月,澳大利亚氨能源协会(AEA Australia)分会举办了第二届“氨 = 氢 2.0 会议”,倡议加强政府与行业之间的合作,并与日本和新加坡等国家建立绿氨有关的能源安全合作机制<sup>[12]</sup>。2020 年 11 月 24 日,欧盟第四次氢能网络会议提到要不断增加绿氨的生产,并在其发布的“非生物源可再生燃料”法案中明确了绿氢/氨等零碳燃料在低碳化经济体系中的重要地位<sup>[13]</sup>。2021 年 6 月,日本政

府在《实现 2025 年碳中和的绿色增长战略》中提到,预计 2030 年发电所需的氨年度用量将达到 300 万 t,到 2050 年将增至 3 000 万 t。2021 年 10 月,日本政府内阁在批准的《第六次能源基本计划》中预计,到 2030 年在日本电力的供应结构中,氢能 and 氨能占比 1%<sup>[14]</sup>。

### 1.2 中国双碳目标与能源转型策略

中国作为全球最大的能源消费国和碳排放国,能源结构长期以化石能源为主导,煤炭、石油和天然气约占一次能源消费总量的 80%<sup>[15]</sup>,能源结构转型和减碳计划迫在眉睫<sup>[16]</sup>。2023 年中国碳排放量约占全球总量的 30%<sup>[17]</sup>,其中 70% 来自煤炭相关活动,仅燃煤发电和供热环节排放就占全国总量的 45% 以上,占全球燃煤排放的 15%。

近年来,我国密集出台一系列政策<sup>[18-21]</sup>:2022 年 1 月《“十四五”新型储能发展实施方案》发布,拓宽了氢/氨储能应用领域,开展了依托可再生能源制氢(氨)的储能试点示范,以满足长周期、多时间尺度的储能应用需求。2022 年 2 月,《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南》提出,优化合成氨原料结构,增加绿氢原料比例,进一步研发可再生能源生产氨技术,降低合成氨生产过程的碳排放。2022 年 8 月,《工业领域碳达峰实施方案》明确要求大力发展绿色智能船舶,加强氨/氢等低碳零碳清洁能源装备研发,扩大绿色低碳产品供给<sup>[22]</sup>。2024 年 6 月,《煤电低碳化改造建设行动方案(2024 - 2027 年)》提出,2024 - 2027 年,通过电解水制取绿氢并合成绿氨,实施燃煤机组掺烧绿氨发电,以替代部分燃煤,改造后的煤电机组应具有掺烧 10% 以上绿氨的能力。2024 年 12 月,《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》明确指出,到 2027 年,中国清洁低碳氢将在绿氨合成、合成甲醇、炼化等行业实现规模化应用<sup>[23]</sup>。

### 1.3 中国碳交易政策与技术导向

中国的政策体系通过经济激励与制度建设协同推进。经济层面,全国碳交易市场为绿氨生产提供了直接的经济信号,但截至 2021 年 4 月,29.16 元/t 的成交均价相对偏低,对高成本绿氨的激励效用尚不充分。制度层面,自 2011 年起颁布的一系列法规逐步确立了配额管理体系,并于 2017 年正式启动全国市场,辅以配额分配、市场拍卖及财税激励等多种

机制。这些政策与《工业领域碳达峰实施方案》等产业规划相结合,共同引导合成氨行业由传统的灰氨向绿氨转型。

面对全球气候变化引发的贸易与技术格局重塑,中国必须在保障社会经济稳定的前提下,对外加强国际合作以推动碳税等政策协调<sup>[24]</sup>,对内加快完善碳交易市场,为实现“双碳”目标下的能源结构深度转型提供稳固支撑<sup>[25]</sup>。

## 2 氨的工业应用

### 2.1 氨的生产现状及发展趋势

现代工业合成氨技术源于哈伯 - 博世法(Haber-Bosch Process)<sup>[26]</sup>。该工艺虽实现了氨的大规模生产,但其固有的高碳属性,每生产 1 t 氨约排放 1.5 ~ 1.6 t CO<sub>2</sub>,使其成为占全球人为碳排放 1.2% 的重要排放源。考虑到全球非绿氨产量预计将从 1980 年的近 100 万 t 增长至 2050 年的 450 万 t,如图 1 所示<sup>[27]</sup>,合成氨生产过程的脱碳转型,已成为实现全球碳中和的关键议题。

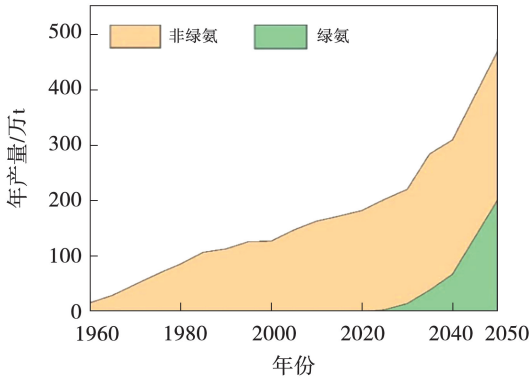


图 1 全球氨产量随年份变化

Fig. 1 Global ammonia production over time

为应对此挑战,依据制氢路径划分的低碳合成氨技术应运而生,主要可分为灰氨(基于化石燃料制氢)、蓝氨(化石燃料制氢耦合碳捕集与封存)和绿氨(利用可再生电力电解水制氢)。其中,全生命周期碳排放趋近于零的绿氨,被视为实现该行业脱碳的根本性技术解决方案,预计到 2050 年其产量占比将跃升至 45%。作为全球最大的合成氨生产国,中国的现状凸显行业转型的紧迫性与脱碳的巨大潜力。中国合成氨消费量及其增长率趋势如图 2 所示。

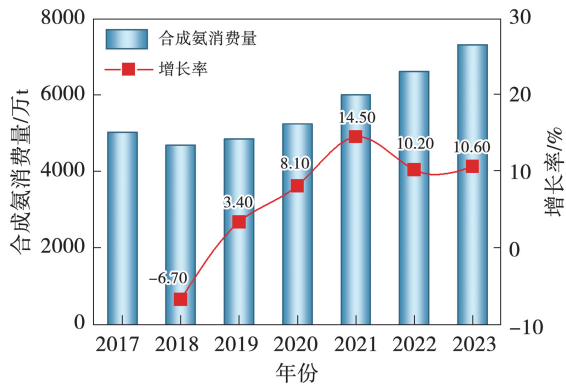


图 2 中国合成氨消费量及增长率趋势图

Fig. 2 Trend chart of synthetic ammonia consumption and growth rate in China

由图 2 可知,2021 年其消费量高达 5 989.64 万 t, 但原料结构中化石能源占比较高。

然而,绿氨的规模化应用仍受限于三大核心制约,分别是可再生能源的间歇性引起的成本波动、传统哈伯 – 博世工艺对动态氢源的适应性不足以及可再生能源富集区与化工产业布局的地域错配。因此,行业内形成的技术路径共识为短期蓝氨过渡、长期绿氨主导,并依托澳大利亚 – 日本绿氨供应链等国际贸易网络,逐步构建全球化的零碳氢能经济。图 3 为绿氨生产及使用全过程示意图。

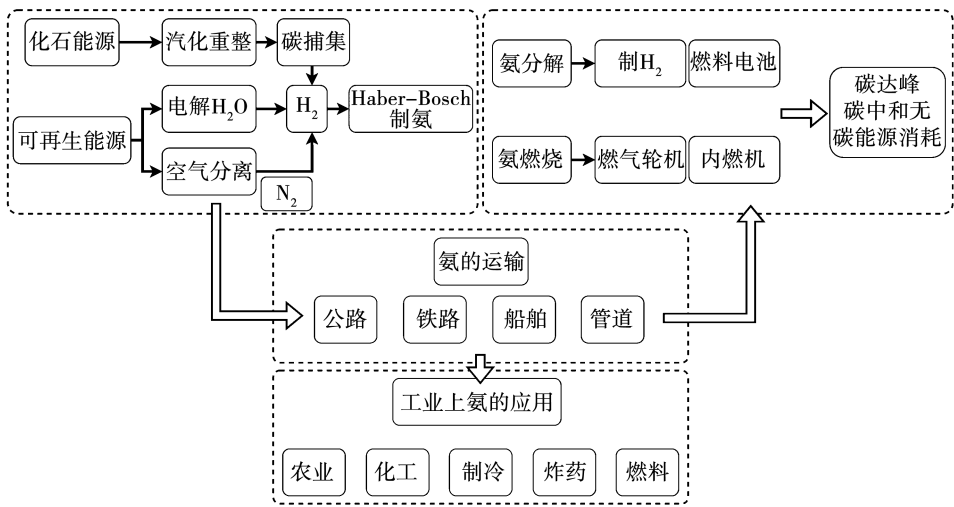


图 3 绿氨生产及使用全过程示意图

Fig. 3 Roadmap of green ammonia production and use

2.2 氨的储存与能量特征

作为能源载体的可行性,主要体现在其成熟的储运技术。物理特性方面,氨在常温下仅需中等压力即可液化(20 ℃下约 0.8 MPa),由此衍生出常温加压(用于陆路运输)与低温常压( -33 ℃,用于海运及大型仓储)两种成熟的储运技术方案,并形成了覆盖全球的立体化运输网络。能量特性则呈现出双重性,取决于对比的基准:一方面,氨是高密度的储氢介质(质量百分比为 17.6%)<sup>[28]</sup>,其在作为“储氢介质”(即对比液氢)时优势明显,其理论体积能量密度(约 4.32 (kW·h)/L)显著高于需深冷储存的液氢(1.55 (kW·h)/L);另一方面,在作为“直接燃料”(即对比化石燃料)时,其挑战也同样突出。图 4 直观地对比了多种能源的单位质量能量和能量密度。传统化石燃料(如汽油、柴油)位于图的右上象限,而氨(燃料电池)的单位质量能量和能量密度

均低于前者<sup>[29]</sup>。此外,氨的燃烧特性也带来了挑战。氨燃料的层流火焰速度较低,导致了点火困难和火焰不稳定等问题,这需要通过旋流、掺混等技术来解决。

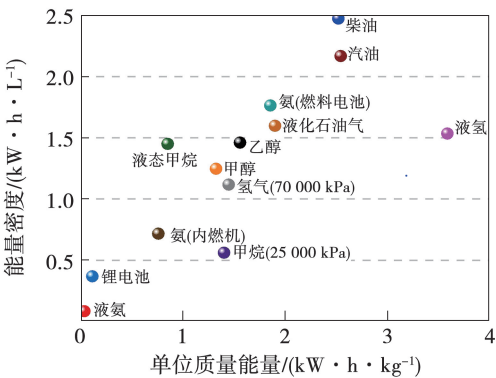


图 4 不同能量储存的单位质量能量和能量密度  
Fig. 4 Unit mass energy and energy density of different energy source storage



氨储运的最大优势在于服务于全球化肥产业的成熟液氨物流体系已经建成,全球主要港口普遍配有容量高达 4 万 t 的大型储罐及专用装卸设施。因此,高体积能量密度与现成的低成本物流基础设施构成了氨能源的核心优势,使其在内燃机、燃气轮机等动力设备上展现出巨大的应用潜力。

2.3 氨能源全流程能耗与碳排放特性

为科学评估不同合成氨技术路线的环境影响,并响应工信部 2023 年《合成氨行业规范条件》<sup>[30]</sup>等政策要求,生命周期评价(LCA)方法<sup>[31]</sup>被用于核算合成氨全过程碳足迹。李淳<sup>[32]</sup>的研究为煤制、天然气制和电解水制 3 种主流路线提供了清晰的对比基准。传统的煤制与天然气制合成氨在 LCA 框架下均属高碳的“灰氨”范畴,其生命周期涉及化石燃料的开采、运输<sup>[33]</sup>及燃烧等多个高排放阶段,碳足迹显著。基于可再生电力电解水制氢<sup>[34]</sup>的“绿氨”路线,从源头上切断了对化石燃料的依赖,其生命周期显著简化,碳足迹极低,代表了合成氨技术的可持续发展方向。

通过对煤制合成氨、天然气制合成氨、电解水制合成氨所呈现的全过程碳足迹数据分析可得,合成氨行业的脱碳并非对现有工艺的修补,其核心是从依赖化石原料转向绿色电力,这也是唯一能使该行业与国家“双碳”战略目标相契合的技术路径。

2.4 经济性分析

绿氨的经济性是决定其市场渗透率的关键因素。2020~2040 年绿氨的生产成本及预期估计如图 5 所示<sup>[35]</sup>。长期成本预测显示,绿氨具备显著的降本潜力,预计到 2040 年,其生产成本将降至 1 583~3 453 元/t,届时有望对采用传统化石能源制造的灰氨形成成本优势。

当前,绿氨生产成本主要由可再生电力成本与设备投资摊销构成。生产 1 t 绿氨约需消耗 10 500~12 000 kW·h 的电力。以一个年产 2 万 t 的绿氨系统为例,在风光电力成本为 0.16 元/(kW·h)的理想条件下,综合考虑电解槽、储氢、储电及空分等设施投资,估算的氨生产成本约为 3 800 元/t,绿氨合成成本参数如表 1 所示。

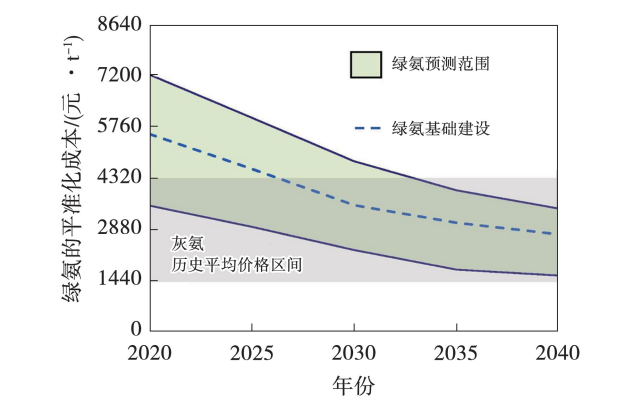


图 5 2020~2040 年绿氨的生产成本及预期估计  
Fig. 5 Green ammonia production cost and forecast estimation from 2020 to 2040

表 1 绿氨合成成本参数

参 数	数 值
氨合成装置年产量 $m_{\text{NH}_3}/\text{kg}$	$2 \times 10^7$
氨分子摩尔质量 $M_{\text{NH}_3}/(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	17
氢分子的摩尔质量 $M_{\text{H}_2}/(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	2
气体常数 $R/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	8.314
氢气输送温度 $T/\text{K}$	300
氢气输送压力 $p/\text{kPa}$	101.3
氢气需求量 $m_{\text{H}_2}/\text{kg}$	$5.90 \times 10^6$
氢气每年需要的摩尔量 $n_{\text{H}_2}/\text{mol}$	$2.94 \times 10^9$
氨合成每天消耗氢气体积 $V_d/(\text{Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	$1.97 \times 10^5$
氨合成每天消耗氢气体积 $V_d/(\text{Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	$1.97 \times 10^5$

然而,绿氨成本对电价极为敏感,谭厚章等人<sup>[36]</sup>的分析表明,当电价降至约 0.102 元/(kW·h)的临界点以下时,其燃料成本便可低于灰氨和天然气,当使用可再生能源富余电力(电价为 0.16 元/(kW·h))生产绿氨时,需要碳价达到 170 元/t 才可以实现 CO<sub>2</sub> 对灰氨和天然气的替代,如图 6 所示。技术路线上,高温电解(SOEC)则被认为是最具成本优势的电解水技术<sup>[37]</sup>。

液氨陆路运输方式经济型对比如图 7 所示。不同方式运输 1 kg 氢/氨的成本对比如表 2 所示。由图 7 和表 2 可知,除生产成本外,氨在物流环节也展现出显著的经济优势,其长距离管道或海运成本均远低于直接输送氢气,确立了“以氨运氢”的可行性<sup>[38-40]</sup>。因此,推动绿氨产业化的核心战略在于:

通过技术创新(如发展 SOEC)降低设备投资与能耗,同时最大化利用低成本可再生电力(如“弃电”)<sup>[41]</sup>,以使其逐步具备市场竞争力,加速能源经济的脱碳进程。

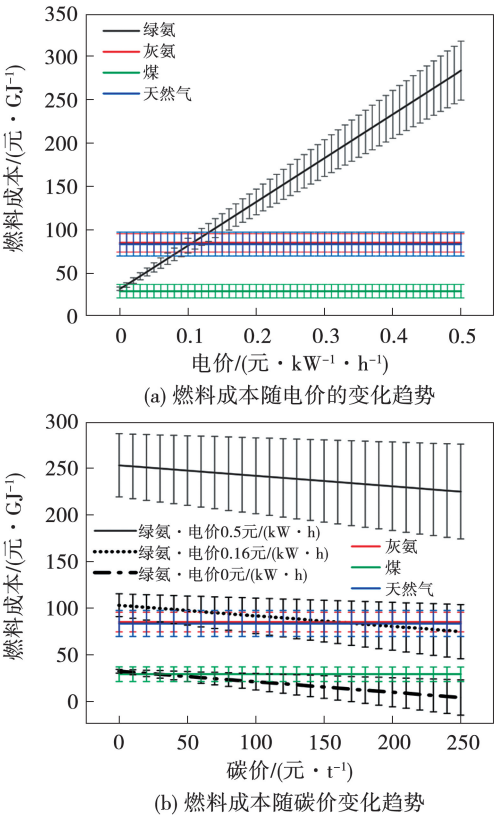


图 6 绿氨、煤、天然气、灰氨燃料成本随电价的变化趋势

Fig.6 Variation trend of fuel costs of green ammonia, coal, natural gas, and grey ammonia with electricity prices

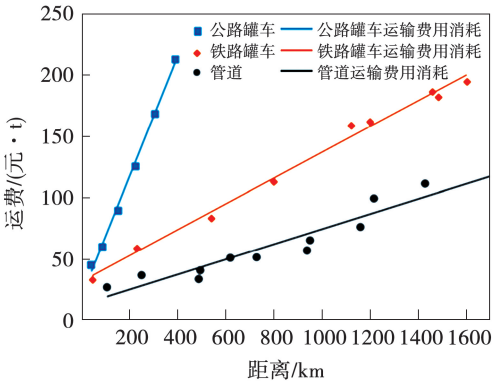


图 7 液氨陆路运输方式经济性对比

Fig.7 Economic comparison of liquid ammonia by land transportation

表 2 不同运输方式运输 1 kg 氢/氨的成本对比(元)

Tab.2 Cost comparison of 1 kg hydrogen/ammonia transported by different transportation modes (yuan)

运输方式	运输距离/km	
	200 ~ 2 000	2 000 ~ 3 000
管道运输氢	0.73 ~ 9.45	9.44 ~ 15.26
轮船运输氢	6.54 ~ 8.00	8.00 ~ 9.45
管道运输氨	0.73 ~ 5.81	5.81 ~ 7.27
轮船运输氨	0.73 ~ 1.45	0.73 ~ 1.45

2.5 氨的安全性

将氨作为规模化能源载体,必须正视并有效管控其安全与环境风险。在人体健康层面,氨是一种有毒且具腐蚀性的气体,其强烈的刺激性气味(气味阈值 $5 \times 10^{-6} \sim 50 \times 10^{-6}$ )可作为泄漏警示,但高浓度接触仍会对眼、皮肤和呼吸道造成严重化学损伤<sup>[42]</sup>,因此职业安全标准对其浓度上限有严格规定。在物理安全层面,氨不易点燃,但当其与空气混合的体积分数 V/V 达到爆炸极限(16% ~ 25%)后,遇火源仍有爆炸风险。在生态环境层面,氨泄漏会造成土壤酸化,也是形成酸雨和二次颗粒物 PM 2.5 的前体物。此外,氨的逸散还会通过在中环境中转化生成强效温室气体氧化亚氮( $N_2O$ ),从而产生间接增温效应。

3 氨燃料及其基础燃烧特性

氨作为一种极具潜力的零碳燃料,其在动力系统中的应用前景取决于能否有效应对其燃烧反应活性低与含氮污染物控制难这两大内在挑战。与传统碳氢燃料相比,氨的低层流火焰速度、窄可燃极限及高点火能等特性共同导致了其火焰稳定性差、点火困难等工程难题。同时,氨燃烧虽无碳排放,但其含有的氮元素会根据化学当量比  $\varphi$  的不同,分别在贫燃、富燃和化学计量比条件下,转化为  $NO_x$ 、逃逸  $NH_3$  以及  $N_2O$  等污染物<sup>[43]</sup>,形成了复杂的排放控制窗口。

3.1 层流火焰传播特性

氨燃烧最根本挑战源于层流火焰速度( $S_L$ )较低,氨/空气预混火焰层流燃烧速度随当量比变化趋势如图 8 所示。研究表明<sup>[44]</sup>,常压下  $NH_3$ /空气预混火焰的峰值  $S_L$ (当量比 1.1 附近)仅为 7 cm/s,约

为同条件下甲烷的 1/5,且该值随压力升高而显著降低,这主要是因为压力升高促进了链终止反应,消耗了对火焰传播至关重要的  $\text{NH}_2$  自由基。较低燃烧速率直接导致一系列稳定性问题,包括更长的熄火距离<sup>[45]</sup>和更低的火焰拉伸率<sup>[46]</sup>。熄火距离的增大意味着火焰更易受壁面热损失影响而吹熄,而火焰拉伸率的降低则表明其抵抗流动应变与变形的能力更弱。并且, $\text{NH}_3$ /空气混合物的有效刘易斯数 (Lewis Number) 通常大于 1,火焰在本质上倾向于热扩散稳定,这进一步抑制因火焰锋面褶皱带来的燃烧强化效应。这些内在特性共同导致氨火焰在湍流中极易发生局部熄灭,其缓慢的传播速率甚至会导致其火焰形态在重力场中因浮力作用而发生严重扭曲,呈现不规则的“水母状”形态<sup>[47]</sup>,如图 9 所示,图中  $p$  代表压力, $t$  代表燃烧时间。

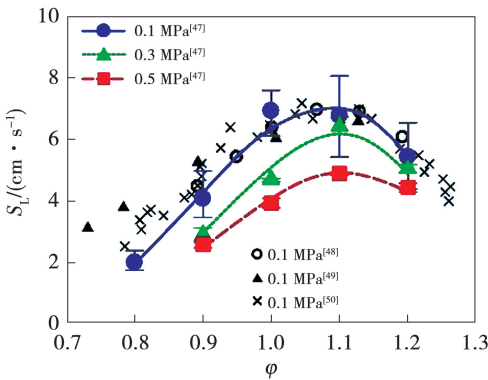


图 8 氨/空气预混火焰层流燃烧速度随当量比变化趋势  
Fig.8. Variation trend of ammonia/air premixed flame laminar burning velocity with equivalence ratio

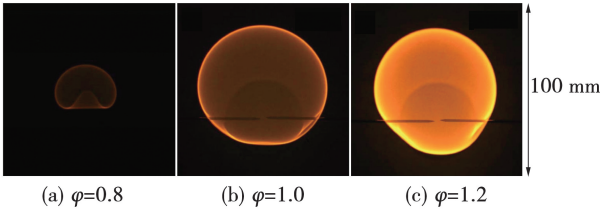


图 9 氨/空气预混火焰燃烧图像,  $p=0.1\text{ MPa}$ ,  $t=100\text{ ms}$   
Fig.9 Burning image of ammonia/air premixed flames at  $p=0.1\text{ MPa}$ ,  $t=100\text{ ms}$

3.2 湍流射流火焰基本特性

将氨燃料应用于实际工程,必然要面对湍流射流燃烧的复杂问题,因此阐明纯氨射流火焰的稳定性边界与内在机理至关重要。实验已证实纯氨射流火焰的稳定燃烧可行,但其稳定极限非常有限。

Hayakawa 等人<sup>[51]</sup>的研究表明,在一个 14 mm 本生灯上,于 0.2 ~ 0.3 MPa 压力下可以稳定燃烧,并获得火焰前沿光滑、发出橙色化学发光的稳定纯氨火焰,如图 10 所示。

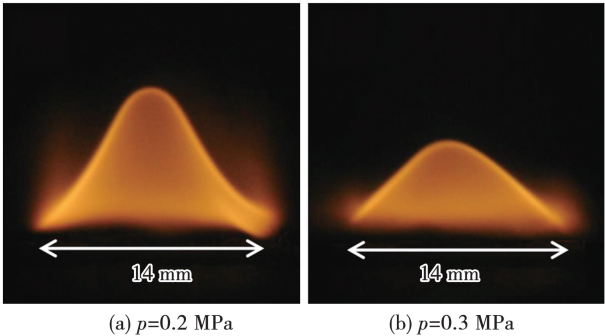


图 10 当量比条件下  $\text{NH}_3$ /空气预混火焰燃烧图像  
Fig.10 Burning image of ammonia/air premixed flame at stoichiometric condition

然而,其稳定燃烧的窗口对出口速度和压力变化极为敏感,增加压力会导致火焰高度显著降低,需要在合适的速度区间氨/空气火焰才能够稳定燃烧,反映了其燃烧特性对边界条件的依赖性强。该不稳定性的内在机理可归因于其火焰结构对湍流拉伸的敏感性。通过对  $\text{NH}$  和  $\text{OH}$  自由基的平面激光诱导荧光 (PLIF) 诊断发现<sup>[52-53]</sup>,氨火焰的内层为燃料消耗反应区,其中  $\text{OH}$  自由基的内边缘与  $\text{NH}$  层重合。随着湍流强度 (以 Karlovitz 数,  $Ka$  表征) 的增加,火焰反应区 ( $\text{NH}$  层) 会发生从平滑到褶皱,再到局部断裂的转变,如图 11 ~ 图 13 所示。

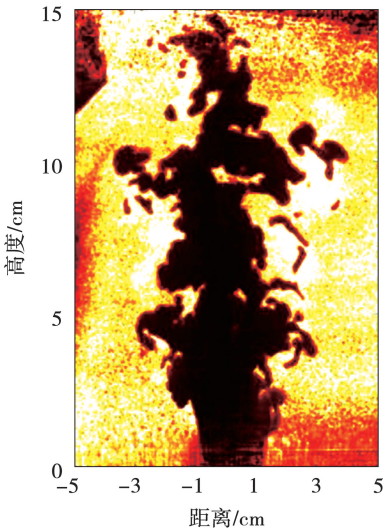


图 11 氨/空气典型  $\text{OH}$ -PLIF 图像  
Fig.11 A typical  $\text{OH}$  - PLIF image of ammonia/air



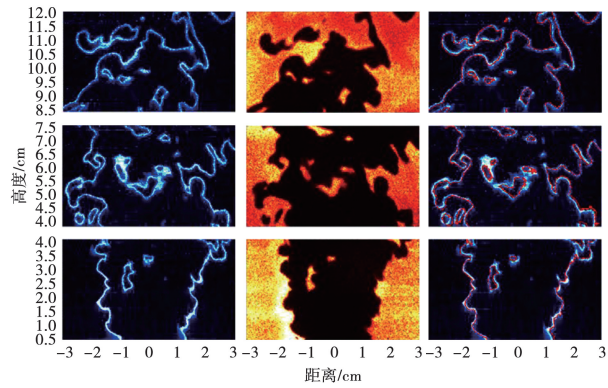


图 12 NH PLIF、OH PLIF 和 OH 内边缘与 NH 重合图像

Fig. 12 Snapshots of NH PLIF, OH PLIF and inner edge of OH overlaid on NH

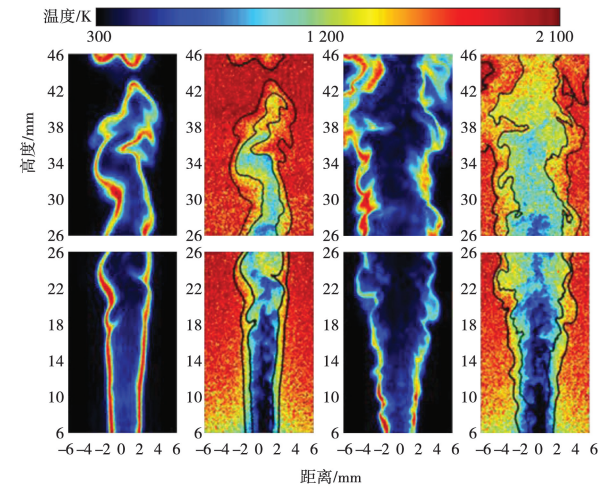


图 13 NH-PLIF 和温度分布的同时单张拍摄图像

Fig. 13 Simultaneous single-shot images of NH-PLIF and temperature distribution for the selected cases

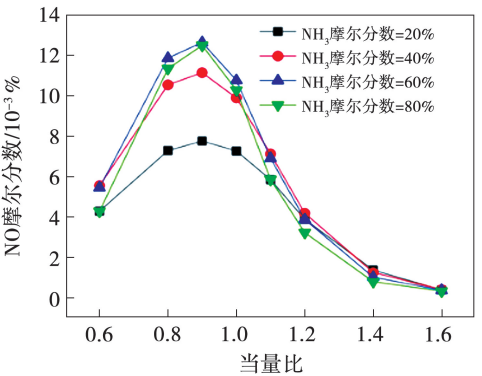
由图 11 ~ 13 可知,在高 Ka 数的火焰中,火焰锋面近燃烧器出口处变得更薄、更褶皱,而下游出现增厚现象。同时,预热区因湍流传热传质的增强而显著增宽,温度梯度降低,且湍涡旋对其影响大于对 NH 层的影响。最终,强烈的湍流拉伸会导致反应区不连续,即发生局部熄灭,从根本上解释了纯氨湍流火焰难以稳定的原因。

3.3 污染物生成分析

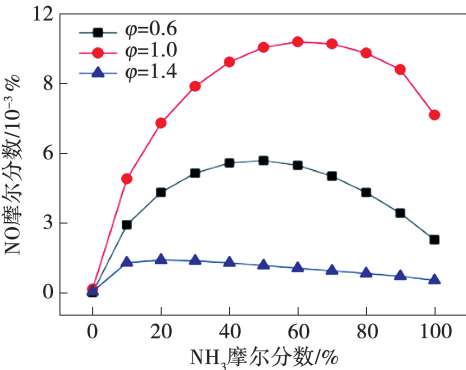
燃烧污染物控制是氨清洁利用的核心科学问题,其复杂性源于多条并存的  $\text{NO}_x$  生成路径。目前,氨燃烧的  $\text{NO}_x$  生成路径可归纳为 3 类:燃料型 (HNO 路径)、NNH 路径和热力型。其中,燃料型  $\text{NO}_x$  占据主导地位,其核心机理<sup>[54-55]</sup> 在于,  $\text{NH}_3$  在

OH 等自由基作用下经脱氢反应生成  $\text{NH}_i$  ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}$ ),随后通过 HNO 中间体进一步氧化为 NO。同时,NNH 路径则是通过  $\text{N}_2$  与 H 原子反应生成 NNH 中间体 ( $\text{N}_2 + \text{H} \rightarrow \text{NNH}$ ),随后被 O 原子氧化生成 NO 的过程,该路径在氨火焰富含 H 自由基的特性下通常被视为重要的  $\text{NO}_x$  生成补充机制。尽管存在多条路径,但由于主导的燃料型路径高度依赖于 OH 自由基浓度,因此  $\text{NO}_x$  的生成峰值通常出现在 OH 浓度最高的贫燃区域 (当量比  $\varphi \approx 0.9$ )<sup>[56]</sup>。而在浓燃条件下,OH 自由基浓度的降低则会显著抑制此路径,从而导致 NO 生成量降低<sup>[57]</sup>。相比大于 1 800 K 的高温下,由于氨火焰温度较低,空气中  $\text{N}_2$  导致的热力型  $\text{NO}_x$  贡献通常可忽略不计。

当氨与碳氢/氢气燃料掺混时,燃烧室内的反应路径会因燃料组分和中间产物池的改变而变得更复杂, $\text{NO}_x$  排放随氨掺混比例 ( $x\text{NH}_3$ ) 呈非线性变化<sup>[58]</sup>。Xiao 等人<sup>[59]</sup> 的数值模拟表明,随着  $\text{NH}_3$  比例的增加,CO 和  $\text{CO}_2$  摩尔分数呈单调下降趋势,验证了掺氨的降碳效果。 $\text{NH}_3/\text{CH}_4$  共燃产生的  $\text{NO}_x$  甚至可能高于纯氨或纯甲烷燃烧, $\text{NO}_x$  峰值主要出现在中高等掺混比 ( $x\text{NH}_3 \approx 0.6 \sim 0.8$ ) 区域,如图 14 所示。



(a) NO摩尔分数随当量比的变化



(b) NO摩尔分数随  $\text{NH}_3$  摩尔分数的变化



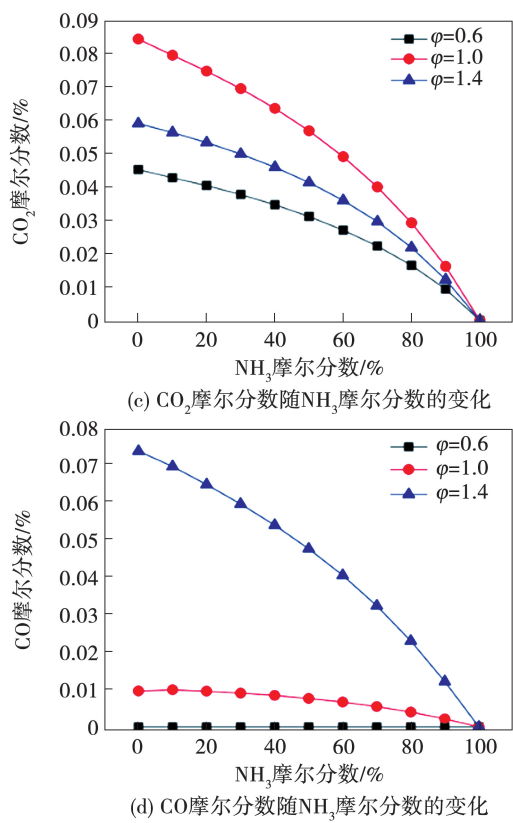


图 14 NH<sub>3</sub>/CH<sub>4</sub>/空气燃烧一维数值排放结果  
Fig. 14 One-dimensional numerical emission results of NH<sub>3</sub>/CH<sub>4</sub>/air combustion

Okafor 等人<sup>[60]</sup>通过在微型燃气轮机中的实验与模拟也揭示了类似的复杂性,即 NO<sub>x</sub> 的生成与局部温度场和当量比的耦合关系紧密,如图 15 所示。图中  $\varphi_{\text{pri}}$  表示一次正当量比,  $\varphi_{\text{overall}}$  表示全局当量比,  $x_{\text{NO}}$  表示 NO 的排放量。

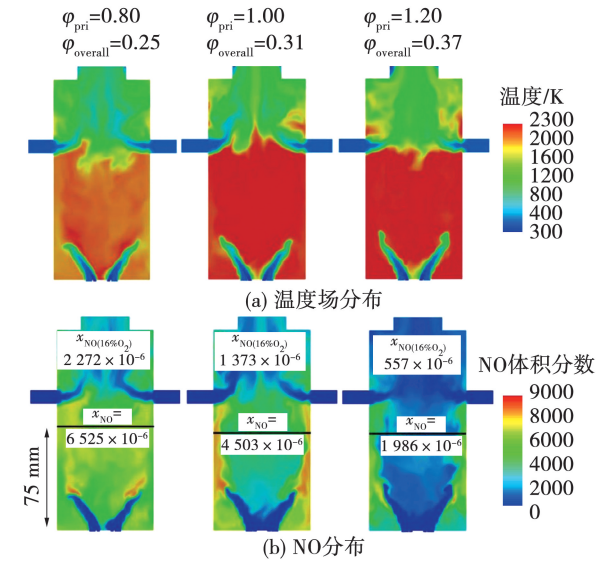


图 15 CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub>-空气两级非预混燃烧温度/NO 的 2D 分布  
Fig. 15 Computed 2D profiles of temperature and mole fraction of NO in two-stage non-premixed combustion of CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub>/air mixtures

其中氨在燃料总能量中的占比为 0.2, 而 Somarathne 等人<sup>[61]</sup>的模拟进一步指出, NO<sub>x</sub> 排放与压力也存在复杂的负相关性。

综上所述,对 NO<sub>x</sub> 生成机理的深入理解,揭示了氨清洁燃烧的核心问题,通过浓燃或分级燃烧等策略抑制 NO<sub>x</sub> 的生成,普遍会面临未燃 NH 逃逸的权衡问题。目前,该问题主要依赖于成本高昂的选择性催化还原后处理技术 (Selective Catalytic Reduction, SCR) 后处理技术。因此,需探索燃烧过程与催化反应协同的先进技术,例如开发高效的非贵金属催化剂,并结合 CFD 优化燃烧室设计,以实现高效燃烧与污染物的协同控制。

#### 4 氨燃料燃烧技术

当前,氨燃料燃烧研究多集中于特定工业燃烧器的应用层面。然而,实际燃烧系统多处于湍流状态,湍流效应会显著改变燃烧速率和吹熄极限等关键性能<sup>[62]</sup>。火焰的宏观燃烧表现是氨固有的燃料特性(如层流火焰速度、可燃极限等)与复杂湍流流动相互作用的结果<sup>[63-65]</sup>。鉴于氨燃料在实际应用中面临的点火困难、稳燃范围窄及 NO<sub>x</sub> 排放量大等本质缺陷,工业界已发展出多项针对性的燃烧强化策略:利用旋流燃烧技术强化气动稳燃、通过温和燃烧技术实现低氮排放以及开发液氨燃烧技术以适配其高密度存储特性。这些关键技术构成了克服氨燃料基础燃烧限制、实现高效动力转换的工程基石。

##### 4.1 旋流燃烧技术

旋流燃烧是克服氨燃料低反应活性、燃烧不稳及排放窗口窄等挑战的核心技术方向。该技术通过强化燃料与空气的混合,并利用中心回流区锚定火焰,以提升燃烧效率和稳定性<sup>[66-68]</sup>。

Hayakawa 等人<sup>[69]</sup>发现,增加旋流数可拓宽稳定边界,但氨火焰形态仍长于甲烷火焰,参见图 16。

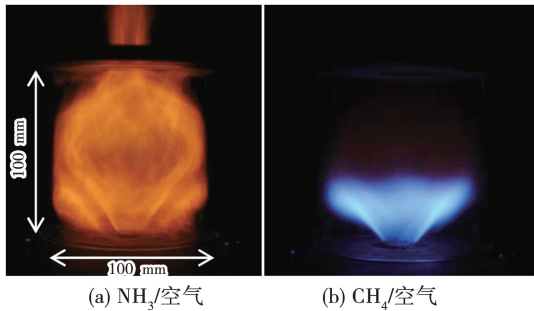


图 16 相同工况下 NH<sub>3</sub>/空气与 CH<sub>4</sub>/空气的火焰形态对比  
Fig. 16 Morphological comparison of stable NH<sub>3</sub>/air and CH<sub>4</sub>/air flames under the same operating conditions

氨火焰的  $\text{NO}_x$  排放特性与当量比密切相关:贫燃时  $\text{NO}_x$  高,富燃时  $\text{NO}_x$  急剧降低但  $\text{NH}_3$  逃逸增加。Okafor 等人<sup>[70]</sup>在分级燃烧中也观察到  $\text{NO}_x$  生成与  $\text{NH}_3$  逃逸的权衡效应,即富燃主燃区抑制  $\text{NO}_x$  后,逃逸的  $\text{NH}_3$  会在二次燃烧区被氧化。

为改善氨燃烧稳定性和排放,与  $\text{H}_2$  或  $\text{CH}_4$  等高活性燃料掺混是主流策略。Hussein 等人<sup>[71]</sup>发现,掺氢可将火焰从不稳定的“V”型转变为稳定的“M”型,但氢气的高反应活性也带来了回火风险<sup>[72]</sup>。Zhang 等人<sup>[73]</sup>则证实,掺混  $\text{CH}_4$  同样能扩大吹熄极限。此外,燃料掺混也改变了污染物路径,Pugh 等人<sup>[74]</sup>指出,在  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  燃烧中,通过注水或加压虽可降低  $\text{NO}_x$  生成,但也会增加  $\text{NH}_3$  逃逸。

采用等离子体等前沿辅助技术是另一强化氨燃烧的路径。Choe 等人<sup>[75]</sup>的研究表明,非平衡等离子体可延长稀燃吹熄极限并降低  $\text{NO}_x$  生成。Tang 等人<sup>[76]</sup>则利用滑行弧放电,在当量比低于 0.76 的稀燃工况下将  $\text{NO}_x$  显著抑制在  $100 \times 10^{-6}$  以下,展现了滑行弧放电技术在拓宽稳定边界和控制排放上的优势。

稳定性改善的根本机理在于对火焰吹熄极限的拓展。强旋流形成的内部回流区是核心稳定机制。Kobayashi 等人<sup>[77]</sup>指出,该区域通过输运高温产物和活性自由基至火焰根部,拓宽火焰稳定极限。火焰稳定边界受到多种因素综合影响, Lee 等人<sup>[78]</sup>研究证实,全局当量比与流速共同决定了火焰形态与拉伸特征,如图 17 所示。此外,燃烧器的几何结构直接影响回流区特性,而环境压力则通过改变火焰厚度与火焰速度进一步影响稳定性。

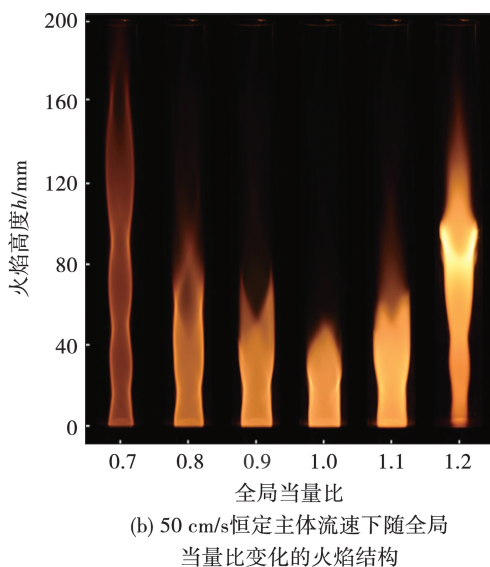


图 17 火焰稳定极限

Fig. 17 Flame stability limit

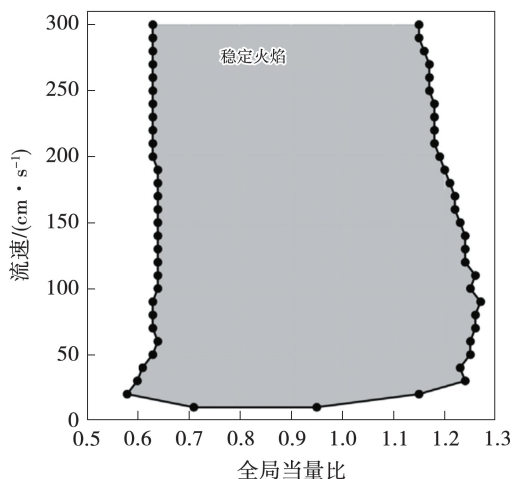
## 4.2 温和燃烧技术

中度或强低氧稀释温和燃烧是一种应对氨燃料挑战的新型燃烧策略<sup>[79]</sup>。该模式通过高度预热和强稀释,在高温、低氧环境下实现均匀、无火焰锋面的温和燃烧,能有效抑制  $\text{NO}_x$  生成<sup>[80]</sup>。这些特性恰好弥补了氨反应活性低、易生成  $\text{NO}_x$  的缺陷,使其成为极具潜力的技术路径<sup>[81]</sup>。

研究证实,纯氨温和燃烧具有低  $\text{NO}_x$  潜力<sup>[82]</sup>。数值模拟揭示了其机理与权衡关系,通过降低壁温或增加氮气稀释可使反应区更接近分布式燃烧状态,从而在抑制  $\text{NO}_x$  的同时,可能引起  $\text{N}_2\text{O}$  排放的增加<sup>[83]</sup>。Ariemma 等人<sup>[84]</sup>发现,在温和燃烧模式下注水,可在不影响燃烧稳定性的前提下有效降低  $\text{NO}_x$ ,尤其是在非预混工况下,形成的分层富氨区有助于  $\text{NO}_x$  还原。

对于  $\text{NH}_3$  与  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  掺混燃烧,温和燃烧模式因特有的烟气内循环稀释作用,展现出优于传统旋流的  $\text{NO}_x$  抑制效果<sup>[85]</sup>。Mousavi 等人<sup>[86]</sup>和 Ferrarotti 等人<sup>[87]</sup>研究表明,在与合成气混燃时,  $\text{NO}_x$  排放与  $\text{CO}$  浓度成反比,而在  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  混燃中,当量比约为 0.95 时,可同时实现低  $\text{NO}_x$  排放与低氨逃逸。

基于温和燃烧还发展出富氧温和燃烧等衍生技术,旨在结合富氧燃烧提高燃烧系统效率并便于碳捕集<sup>[88]</sup>。另一重要方向是与旋流燃烧结合, Sor-



(a) 预混氨气火焰的稳定性图

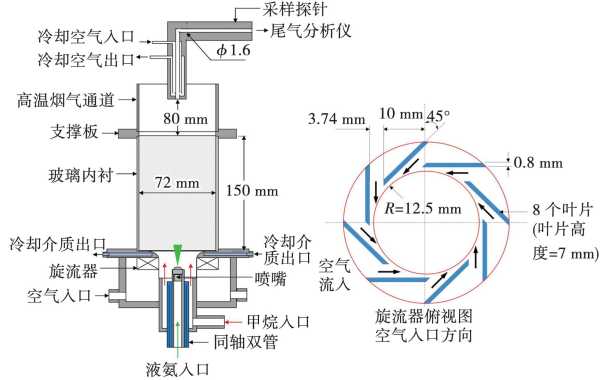
rentino 等人<sup>[89]</sup>发现,当反应器温度高于 1 300 K 时,高预热可保证稳定,低氧则抑制 NO<sub>x</sub>生成。该组合有望在化学计量比附近稳定燃烧,从而解决传统旋流燃烧中贫燃高 NO<sub>x</sub>与富燃高 NH<sub>3</sub> 逃逸的矛盾。

综上,温和燃烧通过其高温、低氧的分布式反应区,根本性地改变了氨的燃烧模式,为解决其稳定性和 NO<sub>x</sub>控制难题提供了有效方案。无论是纯氨、掺混燃料,还是与旋流、富氧技术结合,温和燃烧都在工业锅炉、燃气轮机等领域展现出巨大潜力,为低碳能源转型提供了重要技术支撑。

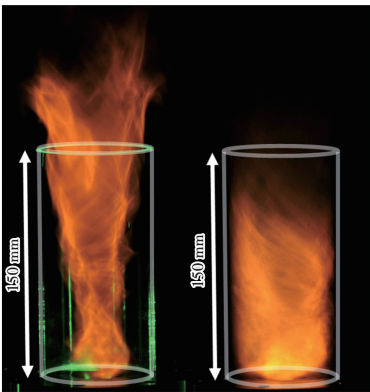
4.3 液氨燃烧技术

直接喷射液氨燃烧因能简化系统、缩短启动时间而具备显著工程优势,但这也 将燃烧问题从纯化学动力学扩展至复杂的液相雾化与蒸发物理过程。氨的低沸点特性使其喷雾易于发生闪沸(Flash Boiling),这一现象对燃烧过程具有双重影响。

闪沸的积极效应在于能促进液滴二次破碎,显著减小雾化粒径并加速蒸发<sup>[90]</sup>。然而,其负面效应源于氨极高的汽化潜热,蒸发过程强烈的吸热会导致局部温度骤降,在氨火焰速度本就较低的情况下极易引发淬熄,这是早期研究中难以稳定液氨火焰的根本原因。为克服此挑战,现代研究聚焦于气动稳定与化学改性两种工程对策。气动稳定方面,Okafor 等人<sup>[91]</sup>的研究证实,强旋流形成的中心回流区(CRZ)至关重要<sup>[92]</sup>,CRZ 能将高温产物和活性自由基输运至火焰根部,为液氨汽化提供能量。化学改性方面,与 H<sub>2</sub> 或 CH<sub>4</sub> 等高活性燃料掺混是关键手段,Somarathne 等人<sup>[93]</sup>的研究表明,掺混燃料能有效缩短火焰长度、提升整体稳定性。液氨燃烧器结构及燃烧特性如图 18 所示。



(a) 液氨燃烧器结构



(b) 液氨与氢气掺混燃烧

图 18 液氨燃烧器结构及燃烧特性

Fig. 18 Structure and combustion characteristics of liquid ammonia burners

由图 18 可知,直接燃烧液氨在紧凑、快速响应的动力系统中展现出巨大潜力,通过结合强旋流与燃料掺混可实现稳定燃烧。然而,该领域的基础研究仍不充分,尤其在高温高压下,液氨的蒸发、分解与燃烧耦合的复杂机理尚不明确。为此,仍需深入的实验与数值模拟研究,以揭示其内在规律,为工程应用的优化设计提供理论指导。

5 氨燃料动力装置技术应用

在“双碳”目标推动下,氨作为燃料的最终目标在于实现在不同的燃烧装备中的应用,涵盖内燃机、燃气轮机等动力装置,以及工业加热炉,工业锅炉等工业热能装备。

5.1 氨燃料内燃机

氨燃料内燃机的应用探索可追溯至 19 世纪 20 年代戈尔兹沃西·格尼爵士的开创性尝试<sup>[94]</sup>,并在二战及 20 世纪 60 年代的能源危机期间,作为化石燃料的替代品而备受关注<sup>[95-97]</sup>。进入 21 世纪,全球航运业的脱碳法规成为核心驱动力,极大加速了主流发动机制造商的商业化进程。

大型二冲程发动机制造商 MAN Energy Solutions 已成功验证其 4T50ME-X 型发动机的纯氨稳定燃烧,其技术路径主要采用成熟的选择性催化还原(SCR)系统对废气进行后处理以满足排放标准<sup>[98-99]</sup>。相关的船上整体布局方案也已提出,如图 19 和图 20 所示,显示出该技术路径已具备较高的技术成熟度。



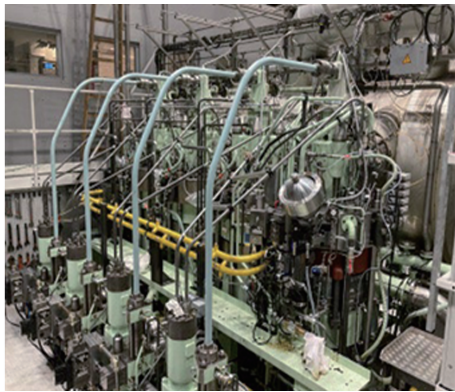


图 19 哥本哈根研发中心测试氨燃料发动机  
Fig. 19 Ammonia-fueled engine tested in MAN Energy Solutions' Research Centre Copenhagen (RCC)

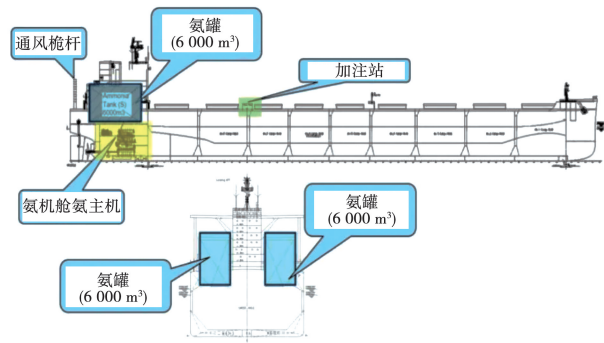


图 20 氨燃料船舶加注系统总体布置方案  
Fig. 20 Overall layout scheme of ammonia-fueled ship bunkering system

相比之下,另一主流制造商 WinGD 则在其新型 X-DF-A 氨燃料发动机上实现了燃烧本体的重大突破。X-DF-A 氨燃料发动机 52 缸径单缸 2025 年 1 月的测试结果显示<sup>[100]</sup>,发动机实现了与柴油相当的功率、转速和热效率(引燃油能耗占比约 5%),且机内  $\text{NO}_x$  排放较低, $\text{NH}_3$  逃逸小于  $10 \times 10^{-6}$ , $\text{N}_2\text{O}$  排放小于  $3 \times 10^{-6}$ ,表明该发动机仅需利用自身极低的氨逃逸作为还原剂,即可实现较低的  $\text{NO}_x$  排放,展现了优异的机内净化性能。

这些技术突破正迅速转化为商业订单,标志着氨燃料发动机已进入市场导入阶段。WinGD 已于 2025 年 6 月开始交付首批多缸发动机,将安装在包括 Exmar LPG、CMB. TECH 和天津西南海运在内的多家船东订购的液化石油气(LPG)/氨运输船和散

货船上<sup>[101]</sup>。主流制造商的成功研发与批量订单的落地,清晰地表明氨燃料内燃机作为航运业脱碳的关键技术之一,正从理论验证阶段走向规模化应用。

5.2 氨燃料燃气轮机

除内燃机外,氨燃料在燃气轮机发电领域同样展现出巨大潜力。日本产业技术综合研究所(AIST)率先开展了小规模验证工作,将一台 50 kW 级燃气轮机成功改造为可燃用纯氨的双燃料机组<sup>[102]</sup>。其核心技术在于设计了一款采用扩散燃烧的新型燃烧室<sup>[103]</sup>,AIST 的实验成功验证了该机组不仅能在  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$  掺混模式下稳定运行,更重要的是最终实现 100% 纯氨的稳定燃烧。在排放控制方面,虽然机内  $\text{NO}_x$  原始排放较高大于  $600 \times 10^{-6}$ ,但通过集成的 SCR 系统可将其浓度降至  $10 \times 10^{-6}$  以下。

在  $\text{NH}_3/\text{CH}_4$  双燃料燃烧试验中,通过向液体燃料喷射阀通入煤油的方式启动燃气轮机。在转速快速提升后,在维持发电机 75 000 r/min 转速的同时开始发电。稳定转速发电 26 kW 后,将甲烷送入气体燃料喷射阀进行甲烷燃烧,并停止煤油供给。即使在体积流量比为 1:2.5 的甲烷与氨(热值 1:1)的氨水混合后,也可以实现稳定的发电。之后,在控制供油量和转速的同时,逐步提高发电输出,在额定转速 80 000 r/min 时输出功率达到 41.8 kW,燃料进料量和发电输出功率的变化如图 21 所示。

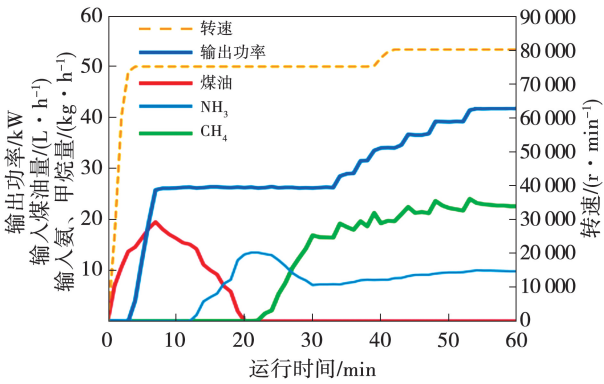


图 21 甲烷-氨双燃料燃烧试验中燃料进料量和发电输出功率的变化

Fig. 21 Change in fuel feed and power generation output in methane-ammonia bifuel combustion test

在氨气单燃料燃烧试验中,通过给煤油补燃的方式启动燃气轮机。然后通过增加氨气量,将燃



料过渡到氨气单燃料燃烧。同时对输出进行检查,并在额定转速为 80 000 r/min 时记录 41.8 kW 的发电输出,燃料进料量和发电输出功率的变化如图 22 所示。

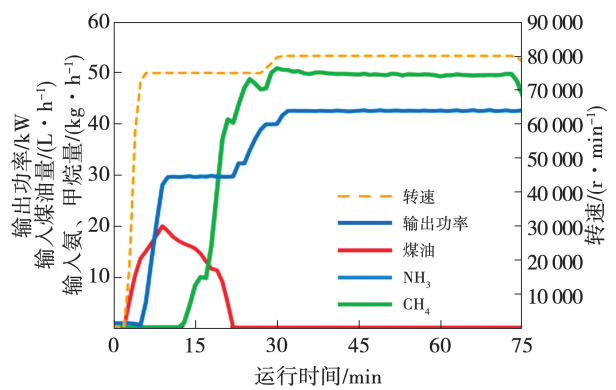


图 22 氨单燃料燃烧试验中燃料进料量和发电输出功率的变化

Fig. 22 Change in fuel feed and power generation output in ammonia mono-fuel combustion test

在 AIST 等机构完成基础验证之后,以石川岛播磨重工业株式会社 (IHI) 为代表的工业界则致力于将该技术向大型商用燃气轮机推广。继 2018 年实现 20% 氨/天然气混燃后,IHI 开发了一种可直接喷射液氨的新型空气分级燃烧室<sup>[104]</sup>,如图 23 所示。

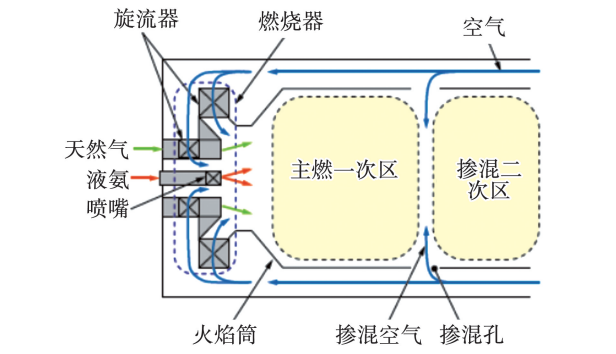


图 23 液氨新型燃烧室示意图

Fig. 23 Schematic diagram of a novel liquid-ammonia combustor

2022 年,该燃烧室在 IHI 2 000 kW 级的 IM270 燃气轮机上测试成功,取得了重大突破<sup>[105]</sup>,如图 24 所示。在氨燃料热值占比高达 70% ~ 100% 的工况下,温室气体减排超 70%,且 N<sub>2</sub>O 生成量也得到显著抑制。这一系列成功的工程验证,为 IHI 在

2025 年实现氨燃气轮机的商业化应用奠定了坚实基础。

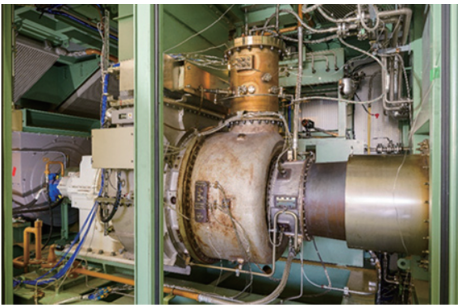
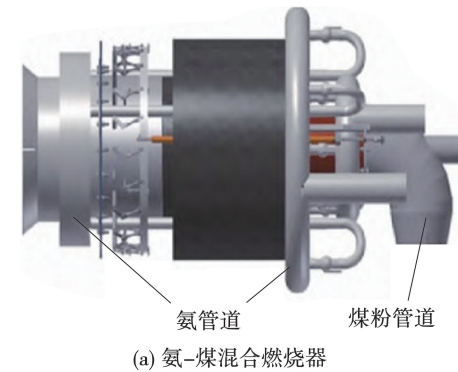


图 24 IHI 2 000 kW 级燃气轮机 IM270  
Fig. 24 IHI 2 000 kW gas turbine IM270

5.3 工业燃烧炉

氨燃料在工业热利用和大规模发电领域也取得了关键进展,特别是在中国和日本已开展了多个示范项目。中国仙湖实验室针对纯氨在工业高温窑炉中的应用进行了研究,成功研发出一款可在 3 ~ 45 kW 功率范围内稳定燃烧纯氨的新型燃烧器,其燃烧效率高达 99.9%。为实现超低 NO<sub>x</sub> 排放,该技术采用了燃烧器内的分级燃烧与燃烧后的 SCR 脱硝相结合的双重控制策略,最终可将 NO<sub>x</sub> 排放浓度稳定在 49 × 10<sup>-6</sup> 以下<sup>[106]</sup>。基于该技术成功烧制的“零碳绿色瓷砖”,标志着纯氨在工业高温热源领域的应用潜力已得到初步验证。

在更为关键的电力行业,氨煤混燃被视为燃煤电厂低碳转型的重要过渡方案。中国在此领域已取得显著成果,国家能源集团在 40 MW 燃煤锅炉上成功实现了高达 35% 氨热值占比的混烧<sup>[107]</sup>。氨煤混烧试验台如图 25 所示,氨煤混燃 NO<sub>x</sub> 生成控制机理可通过 10 MW 级燃烧测试台的数据结果得到进一步阐释<sup>[108]</sup>。





(b) 氨-煤混合燃烧装置

图 25 氨-煤混烧试验台

Fig. 25 Ammonia-coal co-firing test rig

10 kW 级燃烧测试炉试验系统如图 26 所示。该系统将氨喷入主燃区煤粉火焰的内部回流区,利用该区域高温还原性气氛抑制氨的氧化,从而降低  $\text{NO}_x$  生成。日本在氨煤混燃技术规模化商业示范方面走在前列,JERA 与 IHI 公司在 1 GW 级碧南火力发电厂 4 号机组上,示范了 20% 的氨混烧<sup>[106]</sup>,其专用的低  $\text{NO}_x$  燃烧器(如图 27 所示)同样利用了分级燃烧与将氨注入还原区的核心技术原理,达到降低  $\text{NO}_x$  排放、提高燃烧效率的效果。

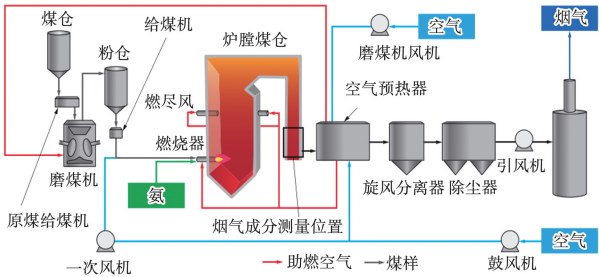


图 26 10 MW 级燃烧测试炉试验系统流程图

Fig. 26 Flowchart of test system of 10 MW combustion test furnace

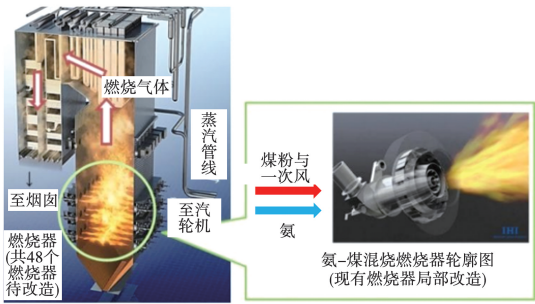


图 27 锅炉燃烧器结构示意图

Fig. 27 Schematic diagram of boiler burner structure

5.4 氨燃料电池

氨燃料电池可将氨的化学能直接转化为电能,因其燃料具备高氢密度、储运便利等优势而备受关注。然而,不同燃料电池对氨的化学兼容性存在显著差异,这直接决定了其技术路线与应用前景。

质子交换膜燃料电池(PEMFC)技术成熟、响应迅速,但其铂基催化剂对氨极为敏感。Fan 等人<sup>[109]</sup>的研究证实,即使浓度  $10^{-6}$  级的微量氨也会造成迅速且不可逆的催化剂中毒,导致性能严重衰退。因此,PEMFC 无法直接利用氨,必须采用“氨裂解-氢气提纯”的间接技术路径,从而增加了系统的复杂性与成本<sup>[110]</sup>。

高温固体氧化物燃料电池(SOFC)则与氨直接兼容<sup>[111]</sup>。在高于 600 °C 的工作温度下,氨可直接在 SOFC 的非贵金属阳极上原位裂解并参与反应<sup>[112]</sup>。Shy 等人<sup>[113]</sup>研究表明,提升温度( $>750\text{ °C}$ )与压力可有效提高氨转化率和功率密度。SOFC 无需纯氢的优势使其备受关注,但其高温运行带来的启停慢、材料耐久性问题仍是商业化推广的主要挑战。

碱性燃料电池(AFC)是另一条可行的直接氨燃料技术路线,且商业化程度较高。AFC 的碱性环境对氨不敏感,避免了催化剂中毒,显著降低了对燃料纯度的要求。以色列 GenCell 公司的 GenCell FOX 即是成功范例,该 4 kW 系统集成小于 700 °C 的低温氨裂解单元,可直接使用氨燃料<sup>[114]</sup>。其技术可靠性已在冰岛等地的长期( $>1\,500\text{ h}$ )恶劣环境现场测试中得到验证,展现出在离网供电领域的巨大潜力<sup>[115-117]</sup>。

6 结 论

在全球能源低碳转型的背景下,氨能源凭借其零碳排放、高储氢密度和良好的基础设施兼容性,已成为实现“双碳”目标的关键技术路径。本文综述了氨能源从合成、储运到燃烧应用的全价值链,系统分析其技术进展、核心挑战与未来发展方向。主要结论如下:

(1) 绿氨合成是氨能源脱碳的核心路径。该路径以可再生电力电解水制氢替代传统化石原料,从根本上解决了哈伯-博世工艺的高碳排放问题(当前中国化石能源占比 98%),是实现该行业与国家

“双碳”战略深度融合的根本途径;

(2) 氨作为能源载体具有储运优势与燃烧挑战的双重性。其高能量密度与低储运成本构成显著优势,而低火焰速度、窄可燃极限等燃烧特性则带来挑战。随着绿氨生产成本的持续下降,其作为高效氢载体的经济性日益凸显,正逐步克服其燃烧应用的技术障碍;

(3) 针对氨燃烧挑战,已形成以燃烧组织、燃烧模式创新和燃料改性为核心的技术体系。通过旋流燃烧实现气动稳定、MILD 燃烧实现低  $\text{NO}_x$  抑制 ( $<10 \times 10^{-6}$ ),以及掺混  $\text{H}_2/\text{CH}_4$  实现化学强化,可有效提升氨燃烧性能。这些技术策略的理论基础均源于对  $\text{HNO}$  作为  $\text{NO}_x$  关键前驱体的机理认知,并通过应用分级燃烧、富燃等手段进行调控;

(4) 氨能源的技术可行性已在不同工程领域应用中得到验证,商业化进程逐步加速。在船舶动力 (WinGD)、燃气轮机 (IHI)、工业燃烧 (仙湖实验室) 及燃料电池 (GenCell) 等领域的成功示范,标志其技术已日趋成熟。在国际碳中和与国家政策的双重驱动下,未来的发展需聚焦于构建“电-氢-氨”一体化的产业链、完善技术标准与安全体系,并向航空、长周期储能等新场景拓展。通过深化国际合作,有望加速氨能源从工程验证到全球商业化应用的全面过渡。

参考文献:

[1] ZAMFIRESCU C, IBRAHIM D. Using ammonia as a sustainable fuel[J]. Journal of Power Sources, 2008, 185(1): 459-465.

[2] 夏 鑫, 蔺建民, 李 妍, 等. 氨混合燃料体系的性能研究现状[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2332-2339.

XIA Xin, LIN Jianmin, LI Yan, et al. Research progress on performance and application of ammonia fuel on engines[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(5): 2332-2339.

[3] KOJIMA Y, YAMAGUCHI M. Ammonia storage materials for nitrogen recycling hydrogen and energy carriers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(16): 10233-10246.

[4] GROSS C W, KONG S C. Performance characteristics of a compression-ignition engine using direct-injection ammonia-DME mixtures[J]. Fuel, 2013, 103: 1069-1079.

[5] 联合国气候变化框架公约. 《巴黎协定》[EB/OL]. [2025-12-03]. <https://unfccc.int/zh/guojiyizhigongxian-ndc-zixun/balixieding>.

UNFCCC. The Paris Agreement [EB/OL]. [2025-12-03]. <https://unfccc.int/zh/guojiyizhigongxian-ndc-zixun/balixieding>.

[6] 陈 云. 全球气候变化背景下“双碳”战略与经济发展对立论

的批判及其重构[J]. 当代经济管理, 2023, 45(2): 17-24.

CHEN Yun. Criticism and reconstruction of the opposite theory of dual carbon strategy and economic development in the context of global climate change[J]. Contemporary Economic Management, 2023, 45(2): 17-24

[7] 陈 怡, 刘 强, 田 川, 等. 部分国家长期温室气体低排放发展战略比较分析[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(6): 633-640.

CHEN Yi, LIU Qiang, TIAN Chuan, et al. Comparison analysis of the long-term low greenhouse gas emission development strategies of main countries[J]. Climate Change Research, 2019, 15(6): 633-640.

[8] Government of the United States. United States mid-century strategy for deep decarbonization[EB/OL]. [2023-09-04]. <https://leap.unep.org/en/countries/us/national-legislation/united-states-mid-century-strategy-deep-decarbonization>.

[9] Government of Germany. Climate action plan 2050 [EB/OL]. [2025-04-01]. <https://www.bundesumweltministerium.de/en/publication/climate-action-plan-2050-en>.

[10] Government of France. The French national low-carbon strategy [EB/OL]. [2023-09-04]. <https://www.iea.org/policies/11729-low-carbon-national-strategy>.

[11] 张雅欣, 罗荟霖, 王 灿. 碳中和行动的国际趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 88-97.

ZHANG Yaxin, LUO Huilin, WANG Can. Progress and trends of global carbon neutrality pledges[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 88-97.

[12] 东方财富号. 全球主要国家氢能发展情况[EB/OL]. [2023-05-30]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/2023053012-2822832405010>.

Eastmoney. Development of ammonia energy in major countries worldwide[EB/OL]. [2023-05-30]. <https://caifuhao.eastmoney.com/news/20230530122822832405010>.

[13] Euractiv. Ammonia and the greening of EU industry [R/OL]. [2021-02-22]. [https://www.euractiv.com/special\\_report/ammonia-and-the-greening-of-eu-industry](https://www.euractiv.com/special_report/ammonia-and-the-greening-of-eu-industry).

[14] 中国科学院科技战略咨询研究院 (CASISD). 日本发布《第六次能源基本计划》[EB/OL]. [2022-02-07]. [https://casisd.cas.cn/zkcg/ydkb/kjczcxkb/2021/kjczcx202112/202202/t20220207\\_6352764.html](https://casisd.cas.cn/zkcg/ydkb/kjczcxkb/2021/kjczcx202112/202202/t20220207_6352764.html).

CASISD. Japan releases the sixth basic energy plan [EB/OL]. [2022-02-07]. [https://casisd.cas.cn/zkcg/ydkb/kjczcxkb/2021/kjczcx202112/202202/t20220207\\_6352764.html](https://casisd.cas.cn/zkcg/ydkb/kjczcxkb/2021/kjczcx202112/202202/t20220207_6352764.html).

[15] 周淑慧, 王 军, 梁 严. 碳中和背景下中国“十四五”天然气行业发展[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 171-182.

ZHOU Shuhui, WANG Jun, LIANG Yan. Development of China's natural gas industry during the 14th Five-Year Plan in the background of carbon neutrality [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 171-182.

[16] WELSBY D, PRICE J, PYE S, et al. Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world[J]. Nature, 2021, 597(7875): 230-234.



- [17] LIN B, GUAN C. Evaluation and determinants of total unified efficiency of China's manufacturing sector under the carbon neutrality target[J]. *Energy Economics*, 2023, 119: 106539.
- [18] 江文渊, 曾珍香, 张征云. 考虑“水-土-能-碳”关联的我国工农业碳排放效率及减排潜力研究[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(6): 120-129.
- JIANG Wenyuan, ZENG Zhenxiang, ZHANG Zhengyun. China's industrial and agricultural carbon emission efficiency and reduction potential considering the water-land-energy-carbon nexus[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(6): 120-129.
- [19] 喻小宝, 章天浩, 孔杰, 等. 双视角下城市碳减排效果评估方法与实证分析[J]. *生态经济*, 2023, 39(1): 50-56.
- YU Xiaobao, ZHANG Tianhao, KONG Jie, et al. Evaluation method and empirical analysis of urban carbon emission reduction effect from a dual perspective[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(1): 50-56.
- [20] 史丹, 叶云岭. 城市交通碳排放趋势与减排对策研究-以上海市为例[J]. *现代管理科学*, 2022, 10(4): 3-14.
- SHI Dan, YE Yunling. Research on the trend of urban traffic carbon emission and the countermeasures of emission reduction-Taking Shanghai as an example[J]. *Modern Management Science*, 2022, 10(4): 3-14.
- [21] 谢克昌. 面向 2035 年我国能源发展的思考与建议[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(6): 1-7.
- XIE Keshang. China's energy development for 2035: Strategic thinking and suggestions[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(6): 1-7.
- [22] 云点道林. 2023 中国绿氨产业研究与前景展望[EB/OL]. [2025-12-03]. <https://file.jgvoel.cn/124/upload/resources/file/440735.pdf>.
- Six Sigma Research. 2023 Research and prospect of China's green ammonia industry[EB/OL]. [2025-12-03]. <https://file.jgvoel.cn/124/upload/resources/file/440735.pdf>.
- [23] 东方财富网. 合成氨产业绿色转型迫在眉睫, 火电减排前景可期[EB/OL]. [2024-12-06]. <https://finance.eastmoney.com/a/202412063261347539.html>.
- Eastmoney.com. The green transformation of the synthetic ammonia industry is urgently needed, with promising prospects for emission reductions in thermal power[EB/OL]. [2024-12-06]. <https://finance.eastmoney.com/a/202412063261347539.html>.
- [24] 吴宏杰. 全球碳交易体系概述[J]. *中国拍卖*, 2022(10): 54-57.
- WU Hongjie. An overview of the global carbon trading system[J]. *China Auction*, 2022(10): 54-57.
- [25] 鲁书伶, 白彦锋. 碳税国际实践及其对我国 2030 年前实现“碳达峰”目标的启示[J]. *国际税收*, 2021(12): 21-28.
- LU Shuling, BAI Yanfeng. International practices of carbon taxation and its enlightenment to achievement of carbon peak in 2030[J]. *International Taxation in China*, 2021(12): 21-28.
- [26] 吴烨, 冯鸣谦, 方婧, 等. 化学链合成氨技术研究进展及展望[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(2): 92-106.
- WU Ye, FENG Mingqian, FANG Jing, et al. Research progress and prospect of chemical looping ammonia synthesis technology[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(2): 92-106.
- [27] JOSEPH S S, SAMUEL M S, GLIVIN G, et al. Production and utilization of green ammonia for decarbonizing the energy sector with a discrete focus on sustainable development goals and environmental impact and technical hurdles[J]. *Fuel*, 2024, 360: 130626.
- [28] ZAMFIRESCU C, DINCER I. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications[J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(5): 729-737.
- [29] 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.
- [30] 中华人民共和国工业和信息化部. 合成氨行业规范条件[EB/OL]. [2023-10-13]. [https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2023/art\\_d0454cb1972d4956b7c1248cb320a779.html](https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2023/art_d0454cb1972d4956b7c1248cb320a779.html).
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China (MIIT). Standard conditions for the synthetic ammonia industry[EB/OL]. [2023-10-13]. [https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2023/art\\_d0454cb1972d4956b7c1248cb320a779.html](https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/gg/art/2023/art_d0454cb1972d4956b7c1248cb320a779.html).
- [31] LI Y, JIN X, WANG G, et al. Construction and application of a carbon emission model for China's coal production enterprises and result analysis[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 10: 889877.
- [32] 李淳. 合成氨碳足迹评价和碳减排分析研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.
- LI Chun. Evaluation of carbon footprint of synthetic ammonia and research on carbon emission reduction[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.
- [33] 罗仁英. 煤制氢气生命周期碳足迹研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2020.
- LUO Renying. Life cycle carbon footprint analysis of hydrogen production from coal[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.
- [34] YU H, SHAO Z, HOU M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: Progress and suggestions[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2021, 23(2): 146.
- [35] CESARO Z, LVES M, NAYAK L 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.
- [36] 谭厚章, 周上坤, 杨文俊, 等. 氨燃料经济性分析及煤氨混燃研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 181-191.
- TAN Houzhang, ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, et al. Economic analysis of ammonia and research progress of coal-ammonia co-firing[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 181-191.
- [37] 何发明, 曾庆, 吴剑, 等. 天然气裂解制氢与水电解制氢合成氨工艺特性比较[J]. *化肥设计*, 2020, 58(2): 5-9.
- HE Faming, ZENG Qing, WU Jian, et al. Comparison of process characteristics in hydrogen production by natural gas cracking and



- by hydro-electrolysis for ammonia syntheses[J]. Chemical Fertilizer Design, 2020, 58(2): 5–9.
- [38] YANG C, OGDEN J. Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(2): 268–286.
- [39] World Integrated Trade Solution. Ammonia; Anhydrous imports by country in 2019 [EB/OL]. [2022-12-24]. <https://wits.worldbank.org/>.
- [40] 吴全, 沈珏新, 余磊, 等. “双碳”背景下氢-氨储运技术与经济性浅析[J]. 油气与新能源, 2022, 34(5): 27–33, 39.
- WU Quan, SHEN Juexin, YU Lei, et al. Analysis on the hydrogen-ammonia storage and transportation technology and economical efficiency against the “Dual-Carbon” background[J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(5): 27–33, 39.
- [41] 王中华, 郑淞生, 姚育栋, 等. 电催化分解氨制氢研究进展[J]. 化工学报, 2022, 73(3): 1008–1021.
- WANG Zhonghua, ZHENG Songsheng, YAO Yudong, et al. Research progress on electrocatalytic decomposition of ammonia for hydrogen production[J]. CIESC Journal, 2022, 73(3): 1008–1021.
- [42] KHUDHUR D A, ABDULLAH T, NORAZAHAR N. A review of safety issues and risk assessment of industrial ammonia refrigeration system[J]. Journal of Chemical Health and Safety, 2022, 29(5): 394–404.
- [43] 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.
- [44] ALVAREZ L F, SHAFFER J, DUMITRESCU C E, et al. Laminar burning velocity of ammonia/air mixtures at high pressures[J]. Fuel, 2024, 363: 130986.
- [45] POTTER A E, BERLAD A L. The effect of fuel type and pressure on flame quenching[J]. Symposium (International) on Combustion, 1957, 6: 27–36.
- [46] COLSON S, HAYAKAWA A, KUDO T, et al. Extinction characteristics of ammonia/air counterflow premixed flames at various pressures[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2016, 11: JTST0048.
- [47] HAYAKAWA A, GOTO T, MIMOTO R, et al. Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/air premixed flames at various pressures[J]. Fuel, 2015, 159: 98–106.
- [48] TAKIZAWA K, TAKAHASHI A, TOKUHASHI K, et al. Burning velocity measurements of nitrogen-containing compounds[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 155(1/2): 144–152.
- [49] PHAHI U J, ROSS M C, SHEPHERD J E, et al. Flammability limits, ignition energy, and flame speeds in  $H_2$ - $CH_4$ - $NH_3$ - $N_2$ - $O_2$ - $N_2$  mixtures[J]. Combustion and Flame, 2000, 123(1/2): 140–158.
- [50] ZAKAZNOV V F, KURSHEVA L A, FEDINA Z I. Determination of normal flame velocity and critical diameter of flame extinction in ammonia-air mixture[J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 1978, 14(6): 710–713.
- [51] HAYAKAWA A, GOTO T, MIMOTO R, et al. NO formation/reduction mechanisms of ammonia/air premixed flames at various equivalence ratios and pressures[J]. Mechanical Engineering Journal, 2015, 2(1): 14–00402.
- [52] FAN Q, LIU X, XU L, et al. Flame structure and burning velocity of ammonia/air turbulent premixed flames at high Karlovitz number conditions[J]. Combustion and Flame, 2022, 238: 111943.
- [53] FAN Q, LIU X, CAI X, et al. Structure and scalar correlation of ammonia/air turbulent premixed flames in the distributed reaction zone regime[J]. Combustion and Flame, 2022, 241: 112090.
- [54] MILLER J A, BRANCH M C, KEE R J. A chemical kinetic model for the selective reduction of nitric oxide by ammonia[J]. Combust Flame, 1981, 43: 81–98.
- [55] MILLER J A, BOWMAN C T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1989, 15: 287–338.
- [56] LINDSTEDT R P, LOCKWOOD F C, SELIM M A. Detailed kinetic modelling of chemistry and temperature effects on ammonia oxidation[J]. Combustion Science and Technology, 1994, 99: 253–276.
- [57] MEI B, ZHANG X, MA S, 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.
- [58] 张猛, 阮扬帆, 肖通, 等. 面向燃机的氨燃烧稳定性与污染物生成机理研究[J]. 工程热物理论, 2025, 46(9): 3061–3075.
- ZHANG Meng, RUAN Yangfan, XIAO Tong, et al. Ammonia combustion stability and pollutant generation mechanisms for combustion engines[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(9): 3061–3075.
- [59] XIAO H, VALERA-MEDINA A, BOWEN P J. Study on premixed combustion characteristics of co-firing ammonia/methane fuels[J]. Energy, 2017, 140: 125–135.
- [60] OKAFOR E C, SOMARATHNE K, RATTHANAN 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.
- [61] SOMARATHNE K, COLSON S, HAYAKAWA A, et al. Modelling of ammonia/air non-premixed turbulent swirling flames in a gas turbine-like combustor at various pressures[J]. Combustion Theory and Modelling, 2018, 22(5): 973–997.
- [62] LI T, DUAN Y, WANG Y, et al. Research progress of ammonia combustion toward low carbon energy[J]. Fuel Processing Technology, 2023, 248: 107821.
- [63] XIA Y, HASHIMOTO G, HADI K, et al. Turbulent burning velocity of ammonia oxygen/nitrogen premixed flame in  $O_2$ -enriched air condition[J]. Fuel, 2020(268): 117383.
- [64] LHUILLIER C, BREQUIGNY P, CONTINO F, et al. Experimental investigation on ammonia combustion behavior in a spark-ignition engine by means of laminar and turbulent expanding flames[J]. Pro-

- ceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5859–5868.
- [65] ALVAREZ L F, SHAFFER J, DUMITRESCU C E, et al. Laminar burning velocity of ammonia/air mixtures at high pressures[J]. Fuel, 2024, 363: 130986.
- [66] LEE J H, KIM J H, PARK J H, et al. Studies on properties of laminar premixed hydrogen-added ammonia/air flames for hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(3): 1054–1064.
- [67] CELLEK M S. The decreasing effect of ammonia enrichment on the combustion emission of hydrogen, methane, and propane fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(45): 19916–19934.
- [68] 阎维平. 洁净发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008. YAN Weiping. Clean coal power generation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [69] HAYAKAWA A, ARAKAWA Y, MIMOTO R, et al. Experimental investigation of stabilization and emission characteristics of ammonia/air premixed flames in a swirl combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(19): 14010–14018.
- [70] OKAFOR E C, SOMARATHNE K, HAYAKAWA A, et al. Towards the development of an efficient low- $\text{NO}_x$  ammonia combustor for a micro gas turbine[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 4597–4606.
- [71] HUSSEIN N A, VALERA M A, ALSAEGH A S. Ammonia-hydrogen combustion in a swirl burner with reduction of  $\text{NO}_x$  emissions[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2305–2310.
- [72] VALERA M A, PUGH D G, MARSH P, et al. Preliminary study on lean premixed combustion of ammonia-hydrogen for swirling gas turbine combustors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(38): 24495–24503.
- [73] ZHANG M, WEI X T, WANG J H, et al. The blow-off and transient characteristics of co-firing ammonia/methane fuels in a swirl combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5181–5190.
- [74] PUGH D, BOWEN P, VALERA M A, et al. Influence of steam addition and elevated ambient conditions on  $\text{NO}_x$  reduction in a staged premixed swirling  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  flame[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 5401–5409.
- [75] CHOE J, SUN W, OMBRELLO T, et al. Plasma assisted ammonia combustion; Simultaneous  $\text{NO}_x$  reduction and flame enhancement[J]. Combustion and Flame, 2021, 228: 430–432.
- [76] TANG Y, XIE D, SHI B, et al. Flammability enhancement of swirling ammonia/air combustion using AC powered gliding arc discharges[J]. Fuel, 2022, 313: 122674.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] MASHRUK S, XIAO H, VALERA M A. Rich-quench-lean model comparison for the clean use of humidified ammonia/hydrogen combustion systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 5: 4472–4484.
- [80] SI J, WANG G, SHU Z, et al. Experimental and numerical study on moderate or intense low-oxygen dilution oxy-combustion of methane in a laboratory-scale furnace under  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , and  $\text{H}_2\text{O}$  dilutions[J]. Energy Fuels, 2021, 35: 12403.
- [81] SORRENTINO G, SABIA P, BOZZA P, et al. Low- $\text{NO}_x$  conversion of pure ammonia in a cyclonic burner under locally diluted and preheated conditions[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113676.
- [82] ROCHA R C, COSTA M, BAI X S. Combustion and emission characteristics of ammonia under conditions relevant to modern gas turbines[J]. Combustion Science and Technology, 2021, 193(14): 2514–2533.
- [83] MOHAMMADPOUR A, MAZAHARI K, ALIPOOR A. Reaction zone characteristics, thermal performance and  $\text{NO}_x/\text{N}_2\text{O}$  emissions analyses of ammonia MILD combustion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(48): 21013–21031.
- [84] ARIEMMA G B, SABIA P, SORRENTINO G, et al. Influence of water addition on MILD ammonia combustion performances and emissions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5147–5154.
- [85] DING C, LI P, SHI G, et al. Comparative study between flameless combustion and swirl flame combustion using low preheating temperature air for homogeneous fuel  $\text{NO}$  reduction[J]. Energy Fuels, 2021, 35: 8181–8193.
- [86] MOUSAVI S M, LEE B J, KIM J, et al. On the effects of adding syngas to an ammonia-MILD combustion regime-A computational study of the reaction zone structure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52: 226–240.
- [87] FERRAROTTI M, BERTOLINO A, AMADUZZI R, et al. On the influence of kinetic uncertainties on the accuracy of numerical modeling of an industrial flameless furnace fired with  $\text{NH}_3/\text{H}_2$  blends: A numerical and experimental study[J]. Frontiers in Energy Research, 2020, 8: 597655.
- [88] 匡玉成. MILD 燃烧特性分析及数值模拟研究[D]. 北京交通大学, 2022. KUANG Yucheng. MILD combustion characteristics analyses and numerical simulations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [89] SORRENTINO G, SABIA P, BOZZA P, et al. Low- $\text{NO}_x$  conversion of pure ammonia in a cyclonic burner under locally diluted and preheated conditions[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113676.
- [90] COLSON S, YAMASHITA H, OKU K, et al. Study on the effect of injection temperature and nozzle geometry on the flashing transition of liquid ammoniaspray[J]. Fuel, 2023, 348: 128612.
- [91] 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.

- [92] 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  $\text{NO}_x$  control[J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2021, 7: 100038.
- [93] SOMARATHNE K, YAMASHITA H, COLSON S, et al. Liquid ammonia spray combustion and emission characteristics with gaseous hydrogen/air co-firing[C] // 13th Asia-Pacific Conference on Combustion, ADNEC, Abu Dhabi-UAE, 2021.
- [94] International Energy Agency (IEA). The future of hydrogen[R/OL]. Paris: IEA, 2019[2019-06-13]. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- [95] KROCH E. Ammonia-a fuel for motor buses[J]. *Journal of the Institute of Petroleum*, 1945, 31: 214-223.
- [96] GRAY J, DIMITROFF E, MECKEL N, et al. Ammonia fuel-engine compatibility and combustion[J]. *SAE Technical Paper*, 1966: 660156.
- [97] STARKMAN E S, NEWHALI H K, SUTTON R, et al. Ammonia as a spark ignition engine fuel: Theory and application[R]. *SAE International*, 1966.
- [98] Seatrade Maritime. Groundbreaking first ammonia engine test completed[EB/OL]. [2023-07-13]. <https://www.seatrade-maritime.com/product-service-news/groundbreaking-first-ammonia-engine-test-completed>.
- [99] MAN Energy Solutions. MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia[EB/OL]. [2023-10-01]. [https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/man-b-w-two-stroke-engine-operating-on-ammonia.pdf?sfvrsn=544dc811\\_10](https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/man-b-w-two-stroke-engine-operating-on-ammonia.pdf?sfvrsn=544dc811_10).
- [100] WinGD. WinGD records successful early running on X-DF-A ammonia-fuelled engine[EB/OL]. [2025-01-24]. <https://wingd.com/news-media/news/wingd-records-successful-early-running-on-x-df-a-ammonia-fuelled-engine>.
- [101] 信德海事网. WinGD 分享了氨燃料船舶主机的测试数据[EB/OL]. [2025-03-14]. <https://www.xindemarinews.com/topic/yazaishuiguanli/58809.html>.  
Xinde marine news. WinGD shared test data on ammonia-fueled marine main engines[EB/OL]. [2025-03-14]. <https://www.xindemarinews.com/topic/yazaishuiguanli/58809.html>.
- [102] IKI N, KURATA O, MATSUNUMA T, et al. Micro gas turbine firing ammonia[C] // Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines. Seoul, South Korea; American Society of Mechanical Engineers, 2016: V008T23A018.
- [103] KURATA O, IKI N, MATSUNUMA T, et al. Performances and emission characteristics of  $\text{NH}_3$ -air and  $\text{NH}_3$ - $\text{CH}_4$ -air combustion gas-turbine power generations[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3351-3359.
- [104] MASAHIRO U, SHINTARO I, TOSHIYUKI S. Development of liquid ammonia direct spray combustion gas turbine[J]. *IHI Engineering Review*, 2022, 55(1): 153956.
- [105] IHI.  $\text{CO}_2$ -free power generation achieved with the world's first gas turbine using 100% liquid ammonia[EB/OL]. [2023-09-04]. [https://www.ihico.jp/en/all\\_news/2022/resources\\_](https://www.ihico.jp/en/all_news/2022/resources_energy_environment/1197938_3488.html)
- energy\_environment/1197938\_3488.html.
- [106] IHI. JERA and IHI to start a demonstration project related to ammonia co-firing at a large-scale commercial coal-fired power plant[EB/OL]. (2021-05-24)[2023-09-04]. [https://www.ihico.jp/en/all\\_news/2024/resources\\_energy\\_environment/1200737\\_13691.html](https://www.ihico.jp/en/all_news/2024/resources_energy_environment/1200737_13691.html).
- [107] VALERA M A, VIGUERAS Z M, SHI H, et al. Ammonia combustion in furnaces: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 1597-1618.
- [108] HIROKI L, EMI O, TAKAHIRO K, et al. Development of co-firing technology of pulverized coal and ammonia for suppressing  $\text{NO}_x$  generation[J]. *Transactions of the JSME (in Japanese)*, 2020, 86(883): 1900363.
- [109] FAN Q, LIU X, XU L, et al. Flame structure and burning velocity of ammonia/air turbulent premixed flames at high Karlovitz number conditions[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111943.
- [110] 陈永珍, 韩颖, 宋文吉, 等. 绿氨能源化及氨燃料电池研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(1): 111-119.  
CHEN Yongzhen, HAN Ying, SONG Wenji, et al. Research progress of green ammonia energy and ammonia fuel cell[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(1): 111-119.
- [111] VAYENAS C G, FARR R D. Cogeneration of electric energy and nitric oxide[J]. *Science*, 1980, 208(4444): 593-594.
- [112] WOJCIK A, MIDDLETON H, DAMOPOULOS I, et al. Ammonia as a fuel in solid oxide fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 118(1/2): 342-348.
- [113] SHY S S, HSIEH S C, CHANG H Y. A pressurized ammonia-fueled anode-supported solid oxide fuel cell: Power performance and electrochemical impedance measurements[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 396: 80-87.
- [114] GenCell. GenCell FOX off-grid power solution[EB/OL]. [2023-09-04]. <https://www.gencellenergy.com/our-products/gen-cell-a5>.
- [115] GENCELL. Emergency communications system (ECS): GenCell energy to deploy its innovative A5 off-grid solution to power an advanced test unit at the Neydarlinan OHF ECS station in Iceland[EB/OL]. [2023-09-04]. <https://fuelcellworks.com/news/emergency-communications-systems-ecs-gencell-energy-to-deploy-its-innovative-a5-off-grid-solutions-at-the-neydarlinan-ohf-ecs-station-in-iceland>.
- [116] GenCell. Deutsche Telekom and GenCell Energy advance innovation collaboration towards carbon-free energy production for mobile sites[EB/OL]. (2022-02-21)[2023-09-04]. <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/telekom-and-gencell-energy-advance-innovation-collaboration-647808>.
- [117] GenCell. GenCell Energy, Simtel and Vodafone deploy GenCell FOX? field test at mobile site in Romania[EB/OL]. [2022-08-30]. <https://fuelcellworks.com/news/gencell-energy-simtel-and-vodafone-deploy-gencell-fox-field-test-at-mobile-site-in-romania>.