

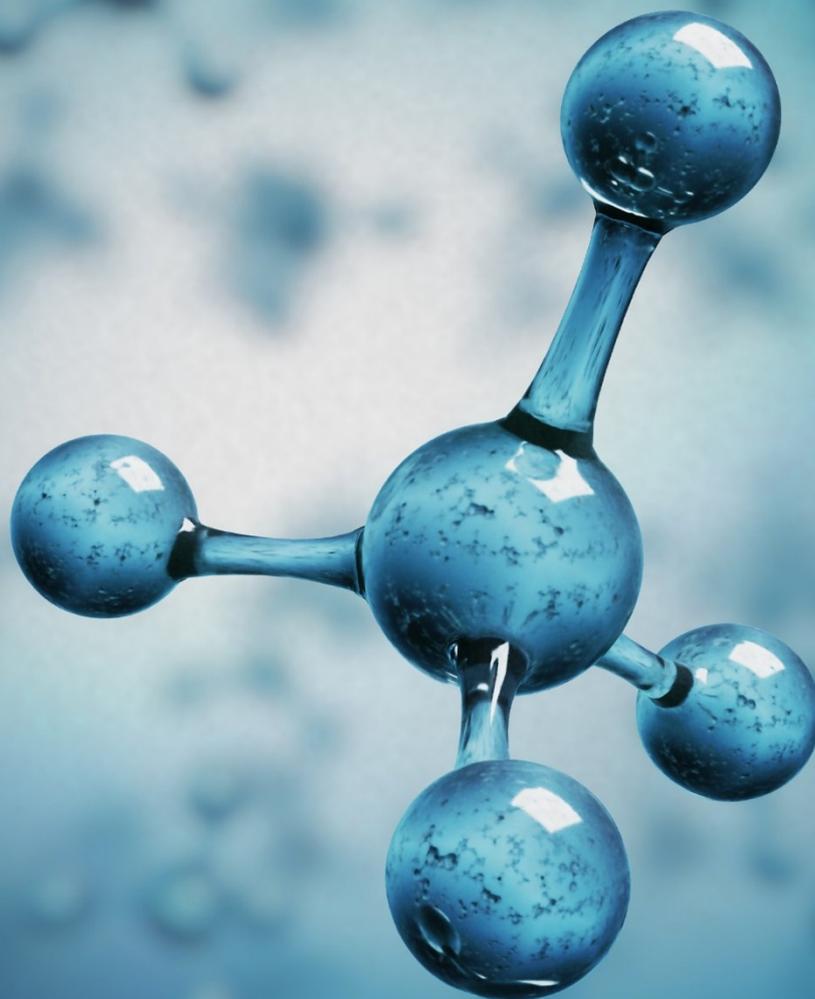
▶ 前沿交叉研判



氨氢融合新能源交叉前沿与 颠覆性创新技术战略研究报告

氨氢融合新能源交叉前沿与颠覆性创新技术战略研究 项目组

国家自然科学基金委与中国科学院联合资助



2024

专家组成员与报告撰写人员信息

1. 专家组成员信息（按姓氏字母顺序排名）

成会明 中国科学院院士、中国科学院深圳先进技术研究院
陈 勇 中国工程院院士、中国科学院广州能源研究所
程一兵 澳大利亚工程院院士、佛山仙湖实验室
何雅玲 中国科学院院士、西安交通大学
李应红 中国科学院院士、空军工程大学
李 骏 中国工程院院士、佛山仙湖实验室、清华大学
南策文 中国科学院院士、清华大学
申长雨 中国科学院院士、国家知识产权局
苏宝连 比利时皇家科学院院士、欧洲科学院院士、比利时那慕尔大学
谢在库 中国科学院院士、中国石化集团
赵东元 中国科学院院士、复旦大学
邹志刚 中国科学院院士、南京大学
郑津洋 中国工程院院士、浙江大学
张清杰 中国科学院院士、武汉理工大学、佛山仙湖实验室

2. 报告撰写人员

战略研究报告

前 言：薛勃飞 佛山仙湖实验室；张 莉 武汉理工大学；张清杰 武汉理工大学、佛山仙湖实验室

第 1 章：蒋三平 佛山仙湖实验室；苏宝连 比利时那慕尔大学；谢在库 中国石化集团

第 2 章：王 宇 佛山仙湖实验室、武汉理工大学；程一兵 佛山仙湖实验室

第 3 章：刘玉新 佛山仙湖实验室；李 骏 佛山仙湖实验室、清华大学

第 4 章：吴 云 空军工程大学；李应红 空军工程大学

第 5 章：张 华 中国联合重型燃气轮机技术有限公司

第 6 章：陆群杰 佛山仙湖实验室；黄 改 佛山仙湖实验室；黄 华 佛山仙湖实验室；顾超华 浙江大学；李书欣 武汉理工大学、佛山仙湖实验室

政策咨询报告：杨新春 中国科学院深圳先进技术研究院；张 莉 武汉理工大学；薛勃飞 佛山仙湖实验室；程一兵 佛山仙湖实验室；成会明 中国科学院深圳先进技术研究院；张清杰 武汉理工大学、佛山仙湖实验室

摘要

近年来，氢能应用在燃料电池汽车技术和产业、关键材料和零部件、氢能基础设施建设等方面取得了重大进展。然而，在氢能的大规模应用方面，包括大规模储存、长距离运输和应用安全管理，仍然存在重大瓶颈和困难，阻碍了全球氢能产业的发展。

本报告提出将氨与氢作为新能源或能源载体进行创新结合的交叉科学技术前沿——即“氢氨融合新能源”——及其相关重点研究方向。氢氨融合新能源是指以氨和氢作为直接能源或能源载体的新型能源系统。氢和氨（NH₃）均为零碳燃料。它们均可通过可再生能源获取，并能相互转化：绿氢可合成绿氨，绿氨裂解可高效制氢；二者可在不同应用场景单独使用，也可混合协同使用。

氨是一种高效的储氢介质，其质量储氢密度高达 17.6%，并且易于液化（常压下-33 摄氏度或室温下 1 兆帕可液化）。液氨大规模储存和长距离运输的基础设施已经相当完善，更重要的是，NH₃ 和 H₂ 都是零碳燃料。氢氨融合新能源战略的成功实施，将为氢能的大规模应用和真正产业化提供完整的解决方案。

氢氨融合新能源已成为全球清洁能源领域具有前瞻性和战略性的发展方向。2019 年，氨能源协会（AEA）提出了“氨=氢 2.0”（Ammonia = Hydrogen 2.0）的新理念，旨在通过氨推动氢经济，具体指“利用绿氨构建能源出口产业”。世界各国，包括日本、韩国、荷兰、挪威、澳大利亚等，都在制定发展氢氨融合新能源的计划。中国也提出了将氢和氨纳入储能载体的规划。

氢氨融合新能源科学技术是能源科技、材料科学与工程、化学化工、动力工程及工程热物理、交通运输工程等多学科交叉融合的重大前沿领域。发展高温工业窑炉氨氢零碳燃烧技术、氨氢零碳运载装备技术、航空发动机及燃气轮机氨氢零碳燃烧技术、氨氢高温燃烧氮氧化物排放控制技术 etc 颠覆性技术，能够开辟氢能新的重大应用场景，并为高温制造业、交通运输、发电等行业实现碳达峰碳中和目标提供创新性和颠覆性技术。

本报告探讨了五个重点研发方向，包括：低成本、大规模绿色合成氨技术；面向高温制造业的氨氢零碳燃烧技术；交通运输装备氨氢零碳技术；航空发动机及燃

气轮机氨氢零碳燃烧技术和氨氢融合新能源安全技术与标准战略研究，同时也讨论了这些领域的关键科技挑战。

本报告还提出了发展氨氢融合新能源的政策建议，旨在加强交叉科学技术前沿问题的研究，为解决氢能储运技术面临的重大难题以及拓展氢能应用场景的挑战提供战略指引。

Abstract

In recent years, a significant progress in hydrogen energy applications has been made in fuel cell vehicle technologies and industries, key materials and components, and hydrogen infrastructure construction. However, in terms of large-scale hydrogen energy applications, including large-scale storage, long distance transportation, and safety in hydrogen distribution network, significant bottlenecks and difficulties still exist, hindering the development of the hydrogen energy industry globally.

In this strategic study, we put forward an interdisciplinary science and technology frontier of innovative combination of ammonia and hydrogen as new energy or energy carriers, i.e. ammonia-hydrogen new energy, and its associated key research directions. Ammonia-hydrogen new energy refers to a new energy system with ammonia and hydrogen as direct energy or energy carriers. Both hydrogen and ammonia (NH₃) are carbon-free fuels. They can be obtained through renewable energy, and they can be converted into each other; Ammonia can be synthesized through green hydrogen, and hydrogen can be efficiently prepared by green ammonia cracking, and the two can be used separately in different application scenarios, or they can be mixed and utilized synergistically.

Ammonia is an efficient hydrogen storage medium, with a hydrogen mass fraction of 17.6% and can be liquefied easily at -33 Celsius degree at atmospheric pressure or 1 MPa at room temperature. The large-scale storage and long distance transportation infrastructure of liquid ammonia are well developed. More importantly, both NH₃ and H₂ are zero-carbon fuels. The successful implementation of the ammonia-hydrogen new energy strategy will provide a complete solution to the large-scale application and true industrialization of hydrogen energy.

Ammonia-hydrogen new energy has become a forward-looking and strategic development direction in the field of clean energy worldwide. In 2019, Ammonia Energy Association (AEA) put forward the new concept of “Ammonia = Hydrogen 2.0,” aiming at promoting hydrogen economy via ammonia, specifically “Building an energy export

industry using Green Ammonia.” Countries around the world are making plans to develop ammonia-hydrogen new energy, including Japan, South Korea, the Netherlands, Norway, Australia, etc. China also puts forward a plan to include hydrogen and ammonia as energy storage vectors.

Ammonia-hydrogen new energy science and technology is a major frontier in multidisciplinary interdisciplinary fields, including energy science and technology, material science and engineering, chemistry and chemical engineering, power engineering and engineering thermophysics, transportation engineering, etc. Developing high-temperature industrial kiln ammonia-hydrogen zero-carbon combustion technology, ammonia-hydrogen zero-carbon transportation equipment technology, ammonia-hydrogen zero-carbon combustion technologies for aircraft engines and gas turbines, ammonia-hydrogen high-temperature combustion nitrogen oxide emission control technology and other disruptive technologies can open up new major application scenarios of hydrogen energy, and provide innovative and disruptive technologies for high-temperature manufacturing, transportation, power generation and other industries to achieve carbon peaking and carbon neutrality targets.

In this study, five key research and development areas are discussed, including low-cost, large-scale green ammonia production technologies; ammonia-hydrogen zero-carbon combustion technologies for high-temperature manufacturing industry; ammonia-hydrogen zero-carbon technologies for vehicles applications; ammonia-hydrogen zero-carbon combustion technologies for aircraft engines and gas turbines; ammonia-hydrogen safety technologies and standards. Critical science and technology challenges in these areas are also discussed.

This study also puts forward policy proposals to strengthen the researches of interdisciplinary frontiers of scientific and technological issues, so as to provide strategic guidelines to solve the major difficulties facing hydrogen energy storage and transportation technologies and to address challenges in expanding and implementing application scenarios of hydrogen energy.

目录

摘要	I
Abstract	III
前 言	1
参考文献	2
第 1 章 绿氨低成本规模化制备技术战略研究	3
1.1 基于绿电绿氢的 HB 先进合成氨技术	3
1.2 规模化合成氨新技术	4
1.3 展望	5
参考文献	6
第 2 章 高温工业氨氢零碳燃烧技术战略研究	8
2.1 氨氢燃料基本理化特性及氨燃料工业应用的主要挑战	8
2.2 氨工业燃烧关键技术	10
2.3 展望	11
参考文献	11
第 3 章 氨氢融合零碳交通运输装备战略研究	13
3.1 氨氢融合交通运输车辆发展现状及趋势	13
3.2 氨氢融合重型运输车辆技术需求	14
3.3 氨氢融合动力系统关键技术	15
3.4 展望	16
参考文献	16
第 4 章 氨氢融合零碳航空发动机技术战略研究	18
4.1 氨氢融合航空发动机发展现状	18
4.2 氨氢融合航空发动机关键技术	20
4.3 展望	21
参考文献	21
第 5 章 燃气轮机氨氢零碳燃烧技术战略研究	24

5.1 氢燃气轮机发展现状	24
5.2 氢燃气轮机关键技术	26
5.3 氨燃气轮机关键技术	27
5.4 氨催化裂解技术	27
5.5 展望	28
参考文献	28
第 6 章 氨氢融合新能源安全技术与标准战略研究.....	31
6.1 氨氢融合新能源安全技术和标准发展现状及挑战	31
6.2 氨氢融合新能源安全和标准关键技术	33
6.3 展望	34
参考文献	35
我国氨氢融合新能源颠覆性技术及产业发展政策咨询报告	37
一、建议将氢能纳入国家能源规划及能源体系	37
二、建议启动“一带一路”沿线国家氨氢能源国际合作工程	38
三、建议实施氨氢融合新能源重点区域示范工程	38
四、建议国家加强氨氢融合新能源基础研究，设立氨氢融合新能源技术发展专 项	39
参考文献	40

前 言

氨氢融合新能源是国际清洁能源领域前瞻性和战略性发展方向。氨氢融合新能源指的是：以氨和氢作为直接能源或能源载体的新能源体系。氢和氨（ NH_3 ）都是零碳清洁能源，都可以通过可再生能源获得，二者可以相互转化；通过氢可以合成氨，通过氨裂解可以高效制备氢，二者在不同应用场景可以分别使用，也可以混合使用、协同增效^[1-3]。

2022年3月23日，国家发改委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》，明确了氢能是国家能源体系的重要组成部分。最近二十多年来，我国和国际上在氢能基础设施建设、氢能关键材料与核心部件、氢能汽车产业发展、氢能储运技术等方面取得了长足进展。但目前在世界范围内，氢能产业发展仍然面临着氢跨区域、高安全、低成本、大规模储运难的重大瓶颈^[4]；科技部在“十四五”氢能技术国家重点研发计划重点专项中，将纯氢与天然气掺氢管道输运技术和液氢储运技术列入支持计划。另一方面，扩大氢能的重大应用场景仍然是氢能产业发展面临的重大挑战^[2]。

2014年，日本政府将氢能技术列入国家战略性创新计划（SIP），并制定了氨燃料技术2021-2050发展路线图^[2]。2017年，在国际能源署（IEA）的能源技术展望（Energy Technology Perspectives）中，IEA将氨定义为能量载体。IEA认为利用可再生能源制氢制氨、利用氨进行氢储运，是最具经济竞争力的技术路线。同年，美国能源部先进能源研发规划（APRA-E）启动了“可再生能源制备高能量液体燃料计划（REFUEL）”，其中16个项目中有13项都聚焦于氨燃料。美国其他研发机构也开展了绿氨合成、氨内燃机、氨轻型车应用、公共政策制定等方面的研究。英国牛津大学（Oxford University）和卡迪夫大学（Cardiff University）开展了氨在储能和燃烧领域的应用研究。澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）、蒙纳士大学（Monash University）等机构联合制氨制氢公司，成立了“氨能联盟”。世界第二大制氨公司亚拉（Yara）宣布将在西澳大利亚建造太阳能制氨示范工厂。韩国正在打造全球第一氢氨发电国，并将2022年定为“氢氨发电元年”。欧盟2020年公布氢能欧洲计划，并制定了氨氢能源发展计划；荷兰制定了海上风电和太阳能制氨计划，挪威全球第一艘氨燃料动力油轮投入运营^[2,4]。我国国家发改委、国家能

源局 2022 年 2 月发布《“十四五”新型储能发展实施方案》，将规模化发展氢(氨)高能量密度储能技术纳入该实施方案。

氨氢融合新能源科学技术是多学科交叉领域的重大前沿，为解决氢能储运的重大难题提供有效途径，为高温制造、交通、发电等行业实现“双碳”达标提供颠覆性创新技术。氨氢融合新能源科学与技术涵盖可再生能源绿氨制备科学技术、高温工业窑炉氨氢融合零碳燃烧科学技术、氨氢融合零碳交通运输装备科学技术等，是能源科学与技术、材料科学与工程、化学与化学工程、动力工程与工程热物理、交通运输工程等学科交叉领域的重大前沿，也是这些交叉领域的挑战性难题^[1]。

本战略研究报告在“国家自然科学基金委员会-中国科学院前沿交叉研判战略研究联合项目”的支持下，提出氨氢融合新能源领域的交叉前沿科学技术问题及重点研究方向，同时提出加强交叉前沿科学技术问题研究和推动产业化发展的重要政策建议，为抢占氨氢融合新能源技术产业的全球制高点提供战略性方向引领。

参考文献

- [1] 张莉, 薛勃飞, 刘玉新, 王宇, 吴云, 张华, 杨新春, 何帅, 蒋三平, 李骏, 张清杰. 氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究. *科学通报*, 2023; 68: 3107-3112.
- [2] Valera-Medina A, Xiao H, Owen-Jones M, David WIF, Bowen PJ. Ammonia for power. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2018; 69: 63-102.
- [3] MacFarlane DR, Cherepanov PV, Choi J, Suryanto BHR, Hodgetts RY, Bakker JM, Vallana FMF, Simonov A. A roadmap to the ammonia economy. *Joule*, 2020; 4: 1186-1205.
- [4] Aziz M, Wijayanta AT, Nandiyanto ABD. Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization. *Energies*, 2020; 13: 3062(1-25)

第 1 章 绿氨低成本规模化制备技术战略研究

太阳能和风能是商业化程度最高的可再生能源技术，截止到 2022 年，我国光伏发电和风电装机量已分别达到 3.9 亿千瓦和 3.7 亿千瓦，其绿电成本约为 0.3-0.4 元/度，且有望继续降低。然而，光伏发电和风电因天气条件、时间、地点和季节而异，导致并网困难，弃风弃光现象严重，因此迫切需要开发基于绿电的清洁能源载体和规模化储能新技术。氢气作为可再生能源的载体，是一种清洁能源，可以通过燃料电池技术高效率地转化为电能，也可以作为零碳燃料，且其使用过程中不排放温室气体。然而，地球上并不存在天然氢气资源，必须通过碳氢化合物（如天然气重整）或电解水来生产氢气。但由于氢气的密度为自然界最小，液化温度极低（-253℃），其储运成为大规模实施氢基能源路线或“氢经济”的最大技术和经济障碍。

氨（NH₃）具有体积能量密度高（13.6 GJ·m⁻³）、氢含量高（17.65 wt% H₂）和易于储运的特点（常压下-33℃或常温下 0.8 MPa 即变为液氨），是极具潜力的储氢介质和零碳燃料，可规模化低成本储存可再生能源。由于氨是农业和粮食生产必不可少的肥料，全球年产量超过 1.8 亿吨，因此氨的储存和分销已达到商业和全球规模。

传统的合成氨工艺（Haber-Bosch 法，简称 HB 法）已有一百多年的历史，其工艺过程需要高温（约 500℃）和高压（30MPa），我国合成氨的原料 70%来自于煤，因此是一种高能耗、高排放工业。开发基于绿电绿氢的 HB 先进合成氨技术和电化学规模化合成氨新技术是我国“双碳”战略的迫切和重大需求。

1.1 基于绿电绿氢的 HB 先进合成氨技术

氨作为一种农业化肥，其传统生产工艺是 Haber-Bosch (HB) 工艺（发明于 1909 年），该工艺以铁基催化剂为基础，在高温（400-500℃）和高压（15-30 MPa）条件下进行生产，其 CO₂ 年排放量约占全球总排放量的 1.5%，年消耗的能源约占全球能源消耗量的 2-3%^[1]。传统合成氨工艺过程中 CO₂ 的排放直接来源于天然气或煤制氢，间接来源于非绿电的能源消耗。因此，传统 HB 工艺生产的氨被称为“灰氨”。

在 HB 工艺中，利用可再生能源电解水产生的绿氢替代天然气裂解或煤气化产生的氢，可减少 50% 的 CO₂ 排放量。利用可再生能源的绿电为 HB 工艺提供高温高压所需要的能源，再结合绿氢，则所制备的氨被称为“绿氨”。

基于绿电绿氢的 HB 先进合成氨工艺关键技术之一是高效率、低能耗、规模化电解水制氢技术。电解水制氢的方法主要包括碱性水电解法（AWE）、质子交换膜水电解法（PEMWE）和高温固体氧化物电解池（SOEC）^[2]。其中，SOEC 由于其成本低、热力学和动力学性能优良、转换效率极高，因此受到了广泛的关注。

基于绿电绿氢的 HB 先进合成氨工艺的一个关键技术是降低温度和压力，减少整个 HB 过程的能耗。20 世纪 70 年代初，英国石油公司和 M.W. Kellogg 公司联合开发了一种新型碳支撑的钌催化剂（Ru/C）。Kellogg 公司应用这种新型 Ru 基催化剂，能够在较低温度（370-400 °C）和较低压力（5-10MPa）条件下生产合成氨，从而显著节约能源和成本。英国华威大学开发出新型无 Ru 阳离子掺杂铈氧氮化物的铁基催化剂，从而提高了氨合成中铁催化剂的稳定性和活性^[3]。福州大学对 CeO₂ 支撑的 Ru 催化剂在氨合成中的改性开展了大量工作^[4,5]，在 400 °C 和 10 MPa 条件下，NH₃ 产率达到 0.11 mol NH₃/g/h^[4]。

1.2 规模化合成氨新技术

除 HB 法，其他合成氨的方法包括电化学、等离子体辅助、化学循环及间接法。

电化学合成绿氨的方法，主要指利用风能和太阳能等可再生能源获得的绿电，在常温常压下的电解质溶液或可传导质子的高温固体电解质中，通过电化学（包括光电化学）方法合成绿氨的技术。氨的电化学合成可在常温常压水溶液电解池或在高温常压基于氧离子或质子传导的固态电解池中进行。总的来说，电化学氨合成的反应装置可分为三类：非分离式、分离式和基于膜电极组件的电化学反应器。电化学合成氨的主要挑战是氨产率非常低（ 10^{-10} - 10^{-9} mol/s·cm²），其原因是，在温和条件下 N≡N 键断裂的固有能垒高、N₂ 溶解度低以及析氢反应（HER）的高度竞争性。在电化学合成氨中，活化惰性氮气是提高氨产量的关键。其中，基于质子穿梭的新型锂-氮还原反应电池，其法拉第效率（FE）达到 69%，氨产率为 53 nmol/s·cm²^[6]。虽然还没有证明其大规模合成的可行性，但这是一种极具潜质的新技术。

等离子体辅助氨合成（PAAS）和化学循环氨合成（CLAS）是另外两种合成氨

的方法。PAAS 通过等离子体与催化剂的协同作用实现氨的合成，但是 PAAS 工艺能耗大，在不考虑制氢能耗的情况下，利用 N_2 和 H_2 进行等离子催化合成氨的能源成本高于基于化石燃料的 HB 工艺^[7]。CLAS 是通过金属氢化物和酰亚胺的硝化和氢化两个化学循环反应来合成氨^[8]。CLAS 工艺的可扩展性的主要问题包括：其硝化和氢化过程都需要很高的温度、金属氢化物和酰亚胺原料的经济性及对湿气的敏感性。

最近，佛山仙湖实验室与湖南大学等机构联合开发了一种间接合成氨的方法，即二氧化碳循环固氮绿色合成氨^[9]。在此新工艺中，二氧化碳与氮气在碳酸氢钾溶液中催化合成尿素，之后尿素催化裂解得到氨和二氧化碳。这个过程中释放的二氧化碳被氢氧化钾溶液捕获形成碳酸氢钾，如此形成一个完整的二氧化碳循环固氮合成氨的过程。此新工艺合成氨的方法，绕过在常规直接电化学途径必须打开 $N\equiv N$ 键，实现了尿素和氨的高速率合成。理论上，在大电流 (100 mA/cm^2) 下，氨的合成速率可以达到 $10^{-6}\text{ g/cm}^2\text{min}$ ，远高于现在光电/电化学在水溶液中还原氮气合成氨的速率 ($10^{-10}\text{ g/cm}^2\text{min}$)。这种二氧化碳循环固氮绿色合成氨的方法，二氧化碳循环利用率超过 90%，且该循环过程是可持续的，有望实现规模化生产绿氨。

另外，从量大面广的人畜粪便制备绿氨，也是绿氨制备方面值得考虑的一个技术路径^[10]。

1.3 展望

从长远来看，氨作为可再生能源载体的前景有赖于通过新的催化和/或电催化工艺在氨的绿色合成方面实现技术创新和突破。氨的催化和电催化合成所面临的主要挑战是如何有效激活惰性氮反应物，以及如何在实用和工业水平上扩大氨的生产规模。化学反应器的产率与催化剂的重量有关，而电化学反应器的产率则与电极表面的几何面积有关。尽管使用纳米级电极可以扩大电极的反应面积，但这对电化学反应器的放大是一个巨大的技术挑战，尤其是在基于水电解质的电解池中。采用固体电解质电池配置、利用固体电解质电池的堆叠能力优势，可以大大减少规模化问题的技术障碍。

二氧化碳循环固氮绿色合成氨的方法是可循环持续的过程，具有实用化规模生产绿氨的应用前景，其关键技术是发展高效稳定的催化二氧化碳与氮气合成尿

素的电化学催化剂，特别是多元素的单原子催化剂^[9]。

参考文献

- [1] Wang L, Xia MK, Wang H, Huang KF, Qian CX, Maravelias CT, Ozin GA. Greening Ammonia toward the Solar Ammonia Refinery. *Joule*, 2018; 2: 1055-1074.
- [2] Sapountzi FM, Gracia JM, Weststrate CJ, Fredriksson HOA, Niemantsverdriet JW. Electrocatalysts for the generation of hydrogen, oxygen and synthesis gas. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2017; 58: 1-35.
- [3] Humphreys J, Lan R, Chen S, Walker M, Han Y, Tao S. Cation doped cerium oxynitride with anion vacancies for Fe-based catalyst with improved activity and oxygenate tolerance for efficient synthesis of ammonia. *Appl. Catal. B*, 2021; 285: 119843 (1-15) .
- [4] Lin B, Liu Y, Heng L, Wang X, Ni J, Lin J, Jiang L. Morphology Effect of Ceria on the Catalytic Performances of Ru/CeO₂ Catalysts for Ammonia Synthesis. *Ind. Eng Chem. Res.*, 2018; 57: 9127-9135.
- [5] Lin B, Fang B, Wu Y, Li C, Ni J, Wang X, Lin J, Au C-T, Jiang L. Enhanced Ammonia Synthesis Activity of Ceria-Supported Ruthenium Catalysts Induced by CO Activation. *ACS Catal.*, 2021; 11: 1331-1339.
- [6] Suryanto BHR, Matuszek K, Choi J, Hodgetts RY, Du HL, Bakker JM, Kang CSM, Cherepanov PV, Simonov AN, MacFarlane DR. Nitrogen reduction to ammonia at high efficiency and rates based on a phosphonium proton shuttle. *Science*, 2021; 372: 1187-1191.
- [7] Chang F, Gao WB, Guo JP, Chen P. Emerging Materials and Methods toward Ammonia-Based Energy Storage and Conversion. *Adv. Mater.*, 2021; 33: 2005721.
- [8] Gao WB, Guo JP, Chen P. Hydrides, Amides and Imides Mediated Ammonia Synthesis and Decomposition. *Chin. J. Chem.*, 2019; 37: 442-51.
- [9] Zhang XR, Zhu XR, Bo SW, Chen C, Qiu MY, Wei XX, He NH, Xie C, Chen W, Zheng JY, Chen PS, Jiang SP, Li YF, Liu QH, Wang SY. Identifying and tailoring C-

N coupling site for efficient urea synthesis over diatomic Fe–Ni catalyst, *Nat. Comm.*, 2022; 13: 5337(1-9).

- [10] Garcia-Gonzalez MC, Vanotti MB, Szogi AA, Recovery of Ammonia from swine manure using gas-permeable membrane: effect of aeration, *J. Environ. Manage.*, 2015; 152,19-26.

第2章 高温工业氨氢零碳燃烧技术战略研究

火力发电、建材、金属加工、冶金等高温工业的深度脱碳主要有两种技术方向：一是采用可再生能源替代和基于绿电的电气化高温热工装备，二是利用基于可再生零碳燃料的高温热工装备^[1]。近年来，尽管基于太阳能和风能的绿电产能有了快速增长，但高温工业全面电气化所需装机容量巨大，短期内电网承载能力难以满足日益增长的迫切需求，同时大规模工业生产的连续性与绿电的间歇性也存在一定矛盾。此外，电气化窑炉以辐射传热为主导的传热方式难以与现有成熟窑炉产线结构和生产工艺匹配，短期内进行大规模工业窑炉电气化改造存在巨大经济性挑战。这些是当前高温工业燃烧窑炉不可替代的重要原因。

采用氢、氨零碳燃料替代化石燃料是高温工业实现碳减排最直接、最有效、最经济的方式。图 2-1 给出了在天然气中掺混不同比例氨气/氢气的减排效果，可以看出通过调节掺混比例，可以在不同阶段实现燃料经济性和减碳效果的最佳平衡，采用零碳氨氢燃料是高温制造业实现从“碳达峰”逐步过渡到“碳中和”的重要途径。

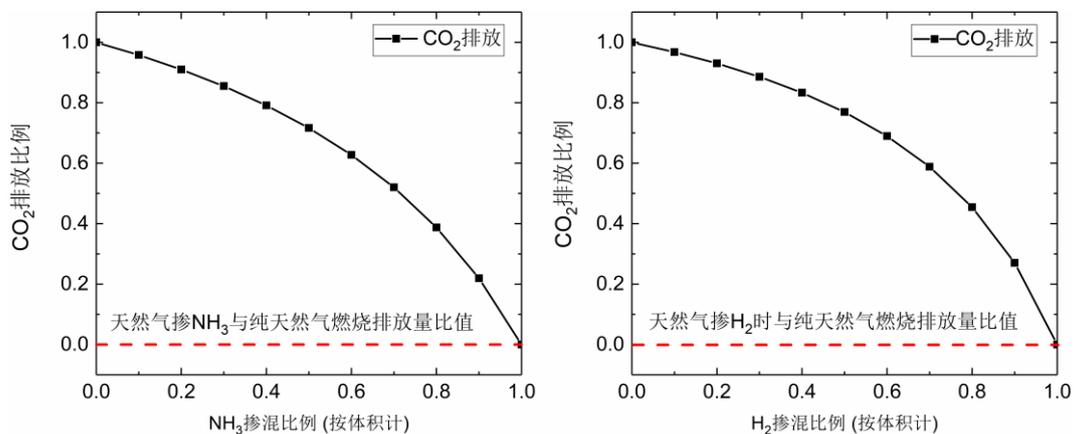


图 2-1 天然气掺混不同体积比氨气/氢气下归一化 CO₂ 排放比例

2.1 氨氢燃料基本理化特性及氨燃料工业应用的主要挑战

氢气燃烧速度快、可燃范围宽，但其低体积能量密度、易燃易爆以及由于液化温度极低(-253℃)引起的高昂储运成本等特性限制了它作为工业燃料的广泛应用。

作为氢载体的氨，体积能量密度高^[2]，化学活性较低，工业应用安全性方面优于氢气。同时氨气作为化工生产原料已经有上百年历史^[3]，相关的制备工艺、储存运输设备、基础设施、安全标准和法规比较完善，储运成本远低于氢气，是一种极具应用潜力的零碳燃料^[4]。然而，氨气在燃烧应用时仍存在一些挑战，表 2-1 给出了氨气、氢气和天然气的理化特性。对比发现，氨气的热值和燃烧速度较低，这给高功率氨火焰稳定性带来极大挑战，同时氨气的着火温度高、可燃范围窄，不利于实现稳定点火和完全燃烧。此外，氨气中的氮原子在燃烧过程中会产生大量的燃料型氮氧化物（NO_x），需要严格加以控制。因此，开发高效、高稳定性、低 NO_x 排放的氨气燃烧技术是实现氨燃料工业应用的必要前提。

表 2-1 氨气、氢气和天然气的理化特性^[2]

燃料	氨 (NH ₃)	氢气 (H ₂)	天然气 (CH ₄)
沸点 (1 atm, °C)	-33.4	-253	-161
凝结气压 (25°C, atm)	9.90	N/A	N/A
低热值 (LHV, MJ/kg)	18.6	120	50.0
质量化学计量比	6.0	34.3	17.1
最大层流燃烧速度 (m/s)	0.07	2.91	0.37
绝热火焰温度 (°C)	1800	2110	1950
可燃极限 (当量比)	0.63- 1.40	0.10- 7.1	0.50- 1.70
最低自燃温度 (°C)	650	520	630

在日本战略性创新推进计划（SIP）的支持下，日本企业联合高校开展了大量氨工业燃烧研究^[5]，走在了世界前列。2017 年水岛发电厂在 155MW 煤粉发电锅炉中首次实现了煤粉掺氨混烧（热量比为 0.6%-0.8%）^[6]。2021 年 3 月，IHI 公司在 2MW 的燃气轮机中实现了天然气掺液氨（掺混比例 70%）直接燃烧的示范试验^[7]。2023 年 7 月 Asahi 玻璃公司在平板玻璃窑炉中成功进行了世界上第一个以氨为燃料的玻璃生产示范试验^[8]。

国内方面，2021年佛山仙湖实验室联合佛山欧神诺陶瓷有限公司和佛山市德力泰科技有限公司开展了30米长氨燃料辊道中试窑炉的研发，并于2022年12月成功出炉了全球首块零碳纯氨燃料烧制的建筑瓷砖，通过三级降氮措施，成功将NO_x（NO/NO₂）排放控制在17mg/m³，远低于地方和国家标准限值^[9]。2022年1月，国家能源集团下属的龙源电力在40MW煤粉发电锅炉中实现了煤粉掺氨混烧^[10]。2022年4月，由合肥综合性国家科学中心能源研究院与皖能集团合作研制的8.3MW纯氨燃烧器在皖能股份铜陵发电有限公司300MW火电机组点火成功，并稳定运行超过2个小时^[11]。

2.2 氨工业燃烧关键技术

氨燃料可靠点火与稳定燃烧关键技术。氨气点火能量高、热值较低、燃烧速度低，对于工业级大规模应用而言，解决高燃气通量（即高功率）下的可靠点火和稳定燃烧问题极具挑战。因此，需要研究氨气稳定燃烧机制及燃烧强化技术，主要包括：1)旋流-钝体稳燃技术：在燃料出口附近形成热量和活性自由基聚集的回流区，延长燃料滞留时间，增强燃烧反应强度，实现氨气的充分稳定燃烧；2)升温助燃技术：通过烟气回热预热未燃混合气，提高燃料反应活性、燃烧速度及点火成功率；3)催化-等离子体预裂解技术：通过氨燃料的部分裂解提高混合气中H₂比例，降低点火能量，提高燃烧速度；4)灵活高能点火技术：结合计算流体动力学仿真优化点火位置及点火方式，使点火电弧附近混合气组分在氨气的可燃极限范围内，保障可靠点火；5)氨燃料与传统气/液/固燃料的混合燃烧技术。

NO_x生成及排放控制技术。相比天然气等传统碳氢燃料，氨燃烧火焰的NO_x排放可呈量级增加。因而，在氨燃烧工业应用中需要通过燃烧组织和烟气还原等多级控制技术实现高温氨燃料燃烧的超低NO_x排放，具体包括：1)分级燃烧技术：研究一级燃烧当量比、二级空气掺混位置、总当量比等参数的影响，优化燃烧器设计，在保证氨气完全燃烧的情况下降低通过燃料型NO路径产生的NO_x，实现NO_x的源头控制；2)选择性非催化还原技术(SNCR)：研究喷氨量、喷氨位置、喷氨角度等参数对NO_x还原的影响规律，形成精准喷氨调控策略；3)选择性催化还原技术(SCR)：研究催化剂类型及载量、催化剂布置位置等的影响，研制高效、低成本的NO_x处理设备。

氨燃烧污染物检测关键技术。氨气着火及燃尽相对困难，可能存在烟气痕量 NH_3 逃逸问题，需要实时监控。此外，氨火焰中燃烧产物水蒸气($\text{H}_2\text{O}(\text{g})$)的浓度范围远高于传统碳氢燃料，大量存在的高温水汽对传统烟气检测方法尤其是高精度痕量氨检测带来了新的挑战，对氨火焰烟气高精度在线检测提出了更高的要求，具体包括：1) 高温高湿痕量氨逃逸检测方法与工业级激光气体传感器技术；2) 宽动态范围、多组分 NO_x (NO_2 、 NO 和 N_2O) 计量方法与检测技术；3) 基于烟气组分检测的氨燃烧反馈控制技术。

氨火焰高温工艺过程适应性。氨燃烧后的烟气主要组分为 $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 和 N_2 ，不含辐射特性较强的碳质颗粒物和 CO_2 ，因而氨火焰辐射传热强度可显著低于传统碳氢燃料火焰，这将对依赖火焰热辐射进行加热的生产工艺（如发电锅炉）带来一定影响。此外，由于基础燃烧特性的区别，氨火焰的几何形貌与传统碳氢火焰显著不同，这对高温火焰与工质直接交互实现工质加热的生产工艺（如金属加热炉）也会产生影响。因此，需要深入研究工业炉的能量传输机制，研发高效全炉燃烧、流动及传热数值模拟方法，对因燃料改变带来的炉内热流传递进行分析和优化，厘清氨燃烧工业炉能量传输机制、传热特性对炉内温度分布以及工艺和产品质量的影响。

2.3 展望

采用零碳氨氢燃料替代化石燃料是高温工业实现碳减排的重要技术途径。发展氨氢零碳燃烧技术不仅可实现高温工业“双碳”达标，而且还将有利于规模化消纳弃光弃风资源，促进绿氢绿氨高效制备以及氨氢新材料和高端装备等新兴产业的发展，为我国经济高质量增长注入新动力。

参考文献

- [1] 张莉, 薛勃飞, 刘玉新, 王宇, 吴云, 张华, 杨新春, 何帅, 蒋三平, 李骏, 张清杰. 氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究. *科学通报*, 2023; 68: 3107-3112.
- [2] Kobayashi H, Hayakawa A, Somarathne KDKA, Okafor EC. Science and technology of ammonia combustion. *Proc. Combust. Inst.*, 2019; 37: 109-133.

- [3] Liu HZ. Ammonia synthesis catalyst 100 years: Practice, enlightenment and challenge. *Chin. J. Catal.*, 2014; 35: 1619-1640.
- [4] MacFarlane DR, Cherepanov PV, Choi J, Suryanto BHR, Hodgetts RY, Bakker JM, Vallana FMF, Simonov A. A roadmap to the ammonia economy. *Joule*, 2020; 4: 1186-1205.
- [5] Brown T. Japan's Road Map for Fuel Ammonia. 2021-02-25.
<https://www.ammoniaenergy.org/articles/japans-road-map-for-fuel-ammonia/>.
- [6] Yoshizaki T. Test of the co-firing of ammonia and coal at mizushima power station (in Japanese). *J. Combust. Soc. Jpn.*, 2019;61: 309-312.
- [7] IHI becomes world's first to attain 70% liquid ammonia co-firing ratio on 2000-kilowatt-class gas turbine. 2021-03-26.
https://www.ihico.jp/en/all_news/2020/resources_energy_environment/1197060_2032.html#:~:text=IHI%20Corporation%20announced%20today%20it%20has%20raised%20the,with%20natural%20gas%20while%20constraining%20nitrogen%20oxide%20emissions.
- [8] Atchison J. Ammonia fuel for glass production demonstrated in Japan. 2023-09-19.
<https://www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-fuel-for-glass-production-demonstrated-in-japan/>.
- [9] 全球首块零碳氨燃料烧制绿色瓷砖在佛山出炉. *科技日报*, 2022-12-23.
<http://www.stdaily.com/index/kejixinwen/202212/4445975acea649489a839deb3691edc8.shtml>.
- [10] 牛涛, 张文振, 刘欣, 胡道成, 王天堃, 谢妍, 王赫阳. 燃煤锅炉氨煤混合燃烧工业尺度试验研究. *洁净煤技术*, 2022; 28: 193-200.
- [11] 汪芳, 陈秋远. 皖能铜陵发电公司: 国内首创 8.3 兆瓦纯氨燃烧器在 30 万千瓦火电机组点火成功. *中国电力企业管理*, 2022; 12: 96.

第3章 氨氢融合零碳交通运输装备战略研究

我国交通运输领域碳排放约占全国碳排放的 10.4%，其中道路车辆占交通运输领域碳排放的 86.7%。商用车是我国道路车辆碳排放的重要来源，其保有量占比仅约 12.5%，碳排放占比却高达 55.4%，其中商用重卡在商用车碳排放中占比约 83.5%^[1]。

商用重卡在降碳技术上利用传统节能技术存在一定局限性，柴油内燃机热效率提至 55%-60% 已是发展上限^[2]。此外，在商用重卡全面开展新能源技术应用与推广以达到减碳预定目标方面，也存在很大技术瓶颈。如纯电重卡，受电池能量密度低、续驶里程短、载重利用率低、低温适应性差、充电时间长等因素制约，不能适应大多数使用场景；氢燃料电池重卡，受氢能物理特性及其产业生态影响，氢在应用中会出现储运难、氢价高、氢站网络布局不足等问题。近年来氢能运输产业化发展迟缓。

内燃机在未来相当长时期仍将是重型商用卡车的主导动力，由此零排放内燃机将成为重型卡车实现碳中和的重要发展方向。

3.1 氨氢融合交通运输车辆发展现状及趋势

2020 年，韩国 SK Innovation Co.、亚马逊气候基金、英国风险投资 AP Ventures 和沙特阿美联合投资成立 Amogy，专注于氨氢能源应用相关技术开发和应用，提供基于氨、无排放、高能量密度的电力解决方案，旨在实现重型运输部门的脱碳。

佛山仙湖实验室李骏院士工作站与一汽解放合作开发的国内首台氨氢融合重型车辆内燃机于 2023 年 6 月 28 日成功点火^[3]，标志着我国在液氨内燃机开发设计、燃烧系统构建以及电控高压共轨氨燃料供给系统核心部件的技术创新上迈出了重要一步。2023 年，由福大紫金氢能科技股份有限公司和厦门金龙联合汽车工业有限公司共同打造了全国首辆氨氢燃料电池客车。

氨氢将会成为交通运输车辆理想的绿色燃料之一^[4]。但氨作为车用燃料仍存在一些技术难点：氨高效裂解制氢需要消耗较高能量，导致“氢-氨-氢-电”转换效率不高；稳定燃烧和 NO_x 排放控制方面存在较高的技术挑战；氨有毒性和腐蚀性，在生产、储运和使用环节中需要有效地解决泄漏和腐蚀问题。

3.2 氨氢融合重型运输车辆技术需求

氨氢融合动力应用场景：需求功率大，车辆额定功率 $\geq 320\text{kW}$ ；寿命要求高，车辆全生命周期行驶里程 ≥ 180 万公里，耐久性指标 ≥ 3 万小时；燃料经济性要求高，燃料成本占运营成本 50%以上，动力系统效率成为最重要的产品竞争力；续航里程要求长，长途重载车辆最大续航里程 $\geq 1500\text{km}$ ；动力响应要求快，0-90%最大功率（0-300kW）响应时间不超过 1s。

氨氢融合动力适用性：氨是零碳燃料，载氢密度高^[5]；易液化、易储运且基础设施完善；体积能量密度高于液氢；成本低、安全性高^[6]。重型运输车辆是氨氢融合动力主要应用对象^[7-8]，涉及公路重载运输车、工程自卸车、专用及改装车、特种车、大客车等多领域车型。

氨氢融合动力车辆车载储氨系统需求：基于车辆工况温度及氨液化工作压力，储氨箱工作温度在 $-30-50^{\circ}\text{C}$ 范围，最大工作压力要大于 50°C 时氨的饱和蒸汽压 2.03MPa，以减少蒸发损失量。液氨有毒、易燃、易爆、易挥发且有腐蚀性，车载储氨箱应具备防泄漏、防腐蚀和防振动等功能。

氨氢融合动力车辆车载氨供给系统需求：氨燃料供给系统涉及液氨高压缸内直喷、氨氢混合气低压预燃喷射、混合气进气道喷射等多个环节^[9-10]，进气量计量难度高，需要开发供给系统多路氨供给及燃料喷射所需的精准计量与控制技术。同时需开发液氨高压直喷供给系统、氨氢混合气低压预喷供给系统、高压气态氨裂解单元（DU）供给系统^[11]、混合气进气道喷射系统等专用氨燃料供给系统。

氨氢融合动力车辆车载氨内燃机系统需求：高性能、高可靠、高适应性等是对氨内燃机系统最基本的要求，其中关键指标及难点是高功率瞬态响应能力。

氨氢融合动力车辆车载氨后处理系统需求：主要是针对废气中的氮氧化物（NO_x）排放和残余氨，包括高效选择性催化还原（SCR）系统、精确控制系统和安全可靠的氨泄露检测系统^[12]。

氨氢融合动力车辆车载氨制氢系统需求：动态响应速度快（功率为 350kW 的发动机，制氢速率指标为 0.42g/s）；氨裂解温度低（低于 400 度）；装置体积小。

氨氢融合动力车辆整车技术需求：优化各运行工况下最适宜的动力构型；统筹车载氨制氢系统、废热回收系统、热管理系统、多轴多电机驱动系统、动力电池系

统等在整车层面的能量管理；聚焦整车动态协同控制技术，以实现整个动力系统的高动态能量供给响应。

3.3 氨氢融合动力系统关键技术

车载储氨系统关键技术。长途重载车辆采用氨作为燃料，其储氨箱容积需大于 2m^3 。氨受热易挥发，车载储氨箱要避免日光暴晒、远离热源。根据重型车辆使用特点及氨性能特征，以经济、高效、安全为基线，需要综合考虑车辆底盘空间布置要求，研究箱体的材料、形状、容积及布置。

车载氨供给系统关键技术。研究液氨喷雾在缸内的射流发展规律，以及背压、流量、温度等对液氨高压缸内直喷闪急沸腾喷雾的形态、粒径分布、液滴及气体速度场的影响规律，并探明塌缩机理，构建喷射参数与喷雾特性量化关系；研究闪急沸腾喷雾与缸内气流运动的相互作用机制，以及喷射时刻、多阶段喷射、喷射持续时间等对混合气浓度时空分布的影响机制，并构建燃料多相流的流量计量模型，建立基于流量计量反馈的燃料供给系统跨域协同控制方法；研究预燃室融合燃料中压供给、发动机液氨高压缸内直喷，分析稳态和瞬态工况下的迟滞等特性，并建立系统控制模型，采用流量计量反馈方法构建供给系统控制策略。

车载氨内燃机系统关键技术。为实现氨氢融合燃料大功率零碳内燃机高热效率目标，基于燃料喷雾与混合气形成特性、基础燃烧特性、数值模拟和内燃机台架实验，研究以氨氢融合方式加速氨燃料燃烧方法，揭示基本燃烧规律，提出氨氢融合高效燃烧的内燃机燃烧策略。研究重点在于氨氢融合燃料化学反应动力学机理^[13-14]、氨氢融合燃料预混多源射流点火方法及燃烧原理和氨氢融合燃料内燃机高效燃烧热力循环及调控。

车载氨后处理系统关键技术。通过额外装置来转换泄露的氨，排气管路可通过改善热绝缘和提高SCR中气体温度来提高转化效率，从而优化排气系统；通过具有高灵敏度、快速响应、免受背景气体干扰的测量方式实时准确地反映氨的变化，开发并应用有效的氨泄漏预警控制系统；研究氨燃料燃烧污染物形成机制和 N_2O 生成反应路径，采取正确燃烧策略防止 N_2O 形成；综合考虑发动机操作参数、氨供应、催化剂活性和温度等因素，进行系统级的控制和调整，通过优化燃烧室结构、燃烧过程控制、燃料喷射系统等措施，以降低氮氧化物的生成和排放。

车载氨制氢系统关键技术。研究开发满足小体积、高通量车载需求的低温、低能耗、高效氨裂解催化剂及反应装置^[15]；研究开发低成本、高反应通量和高稳定性的膜反应器氨裂解分离单元，以及相对独立的氨裂解系统和利于实现小型化的变压吸附氢分离装置所形成的氨裂解分离单元。

3.4 展望

经过各相关领域的技术研究与论证，氨氢融合零碳动力是实现交通运输装备达成碳中和目标最为合适的路径之一。氨氢融合零碳动力及车辆不仅有助于有效解决纯电力车辆、氢燃料电池动力车辆在技术实现和运营经济上所存在的难解问题，而且此项技术的上下游产业链与传统内燃机产业链相似度很高，有助于延长传统内燃机产业，让传统内燃机再次焕发活力。

参考文献

- [1] 欧国立, 宁静, 促进我国公路运输绿色低碳发展的政策与路径, *可持续发展经济导刊*, 2022; 7:39-42.
- [2] Amar P, Li J, Volvo SuperTruck 2: Pathway to Cost-Effective Commercialized Freight Efficiency, 2019-06-12, <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/volvo-supertruck-ii-pathway-cost-effective-commercialized-freight-efficiency>.
- [3] 佛山仙湖实验室李骏院士工作站与一汽解放合作研发的氨氢融合直喷零碳内燃机全球首发点火成功, 2023-06-28, <http://xianhulab.com/gzdt/1221.html>
- [4] Rouwenhorst KHR, Van der Ham AGJ, Mul G, Kersten RA. Islanded ammonia power systems: Technology review & conceptual process design. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2019; 114:109339(1-15).
- [5] Wang G, Mitsos A, Marquardt W. Conceptual design of ammonia-based energy storage system: system design and time-invariant performance. *AIChE Journal*, 2017; 63: 1620-1637.
- [6] Bicer Y, Dincer I. Life cycle assessment of ammonia utilization in city

- transportation and power generation. *J. Clean. Prod.*, 2017; 170:1594-1601.
- [7] Palys MJ, Daoutidis P. Using Hydrogen and Ammonia for Renewable Energy Storage: A Geographically Comprehensive TechnoEconomic Study. *Comput. Chem. Eng.*, 2020; 136: 106785.
- [8] Kandemir T, Manfred F. The Haber-Bosch Process Revisited: On the Real Structure and Stability of "Ammonia Iron" under Working Conditions. *Angew. Chem.*, 2013; 52:12723-12726.
- [9] Mørch CS, Bjerre A, Gøttrup MP, Sorenson SC, Schramm J. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: engine performance and analysis of a proposed fuel system. *Fuel*, 2011; 90:854-864.
- [10] Frigo S, Gentili R. Analysis of the behaviour of a 4-stroke SI engine fuelled with ammonia and hydrogen. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2013;38:1607-1615.
- [11] Kyunghyun R, Zacharakis-Jutz G. Performance enhancement of ammonia-fueled engine by using dissociation catalyst for hydrogen generation. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2014; 39:2390-2398.
- [12] Lesmana H, Zhang ZZ, Li XM, Zhu MM, Xu WQ, Zhang DK. NH₃ as a Transport Fuel in Internal Combustion Engines: A Technical Review. *J. Energy Resour. Technol.*, 2019; 141: 070703-070703(1-12).
- [13] Dimitriou P, Javaid R. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2020; 45: 7098-7118.
- [14] Gray JT, Dimitroff E, Meckel, N, Quillian R. Ammonia Fuel Engine Compatibility and Combustion. *SAE Trans.*, 1967; 75: 785-807.
- [15] Ezzat MF, Dincer I. Development and assessment of a new hybrid vehicle with ammonia and hydrogen. *Appl. Energy*, 2018; 219:226-239.

第 4 章 氨氢融合零碳航空发动机技术战略研究

航空运输业是世界碳排放的重要贡献者之一。航空排放的二氧化碳占世界总碳排放量的 2%，对气候变化的影响占到总影响的 3.5%^[1]。仅 2018 年，全球航空碳排放就达到了 10.4 亿吨，这一数字还在随着航空运输业的高速发展而快速增长。国际民航组织（ICAO）制定了“国际航空碳抵消及减排机制（CORSIA）”，计划从 2021 年到 2035 年分阶段实施，旨在为全球航空业设定统一的减排目标、实施方案与方法以及市场化的减排机制^[2]。2021 年，航空运输行动小组（ATAG）也发布声明承诺：全球民航运输业将在 2050 年实现净零碳排放目标^[3]。

航空运输业实现净零排放目标，关键在于航空动力技术的减碳创新发展。氨氢融合零碳航空发动机对航空动力技术减碳创新发展意义重大。本章梳理了氨氢融合零碳航空发动机的发展现状与关键技术，旨在为解决航空领域实现零碳排放重大难题提供技术指引，为航空运输业未来零碳发展路线提出战略性建议。

4.1 氨氢融合航空发动机发展现状

在航空领域减少碳排放，主要依赖于三种方法：提高现有能量利用率、利用替代能源以及使用碳捕捉、封存和利用技术。这三种方法中，零碳替代能源是航空运输业实现净零排放的最有效办法。国际航空运输协会（IATA）在第 77 届年会上通过了“全球航空运输业于 2050 年实现净零碳排放”的决议，其中明确航空燃料革新是未来航空运输业零碳发展的主要方向。美国在 2021 年发布的《航空气候行动计划》，以可持续航空燃料（SAF）为核心，制定了零碳航空发展路线图^[3]。欧洲在 2020 年发布的《氢动力航空》和 2022 年发布的《洁净天空 II》报告中，都明确支持氢动力飞机研究^[5]。

氢能航空近年来得到了快速发展。2020 年 9 月，法国空客公司发布了以氢为首选能源的 ZEROe 概念飞机^[6]；2021 年 12 月，英国 ATI 公司公布了 FlyZero 概念飞机，并在次年 3 月发布了采用氢燃料发动机的详细技术方案^[7]；同年，罗罗公司开展了首次氢燃料涡轮发动机试车^[8]；2023 年 ZeroAvia 公司开展了搭载有最大氢燃料电池飞机的试飞工作^[9]。

尽管氢能飞机概念和计划前景良好，但也面临着巨大挑战。液氢需要在温度为-253°C的储罐中储存，氢的质量能量密度约是传统航空煤油的3倍，但其密度仅为煤油的9%，储存同等能量的燃料箱体积约为常规飞机油箱的4倍^[10]，这将导致储罐体积和重量巨大，将显著影响飞机设计。以C919、A320、B737等窄体客机为例，氢动力飞机布局与当前最为常见的翼吊式飞机布局将会有很大的差异，必须引入鸭翼以对抗飞机重心后移^[11]。除了储运难题，氢燃料易燃易爆，自燃浓度范围非常宽（4%~75%），且金属存在“氢脆”现象，对燃料保存、运输、加注和使用都提出了极高的安全保障要求，由此也会带来额外的经济支出^[12]。解决纯氢能源航空动力应用存在的问题，需要研发颠覆性技术，氨氢融合动力则是零碳航空动力的一条重要技术路径。

氨氢融合航空发动机目前有氨氢燃料电池和氨氢涡轮发动机两条技术路线，其适用范围有显著差异（图4-1）。氨氢燃料电池适用于短航程、小载客量航空需求；氨氢涡轮发动机则适用于中远航程、大载客量飞行。长远来看，氨氢涡轮发动机是氨氢融合航空动力发展的战略重点。

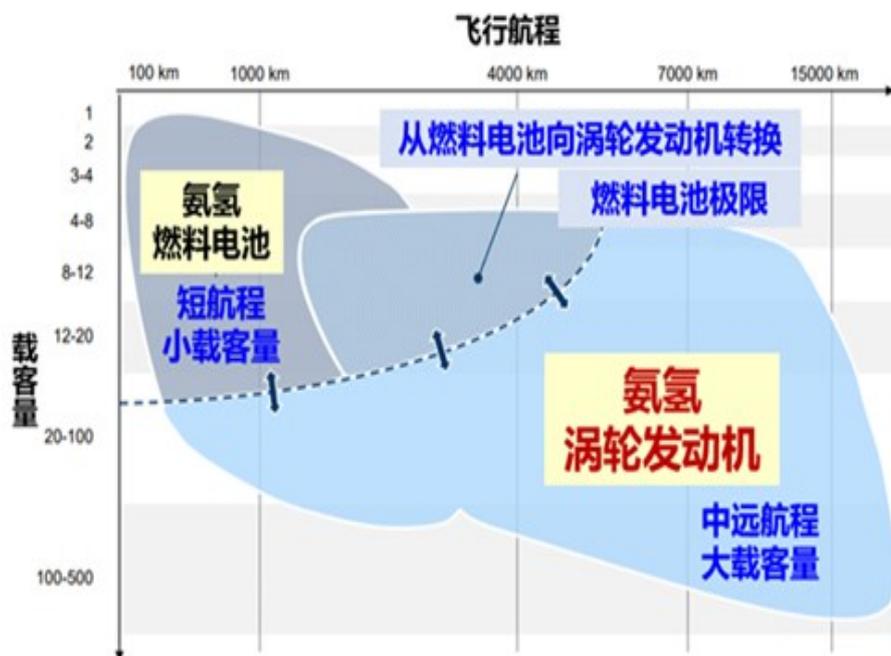


图 4-1 载客量-飞行航程图谱

近年来,国外提出了多种氨氢涡轮发动机概念方案。英国反应发动机公司 2020 年提出了与传统航空煤油涡轮发动机类似的氨燃料发动机方案^[13]。2021 年,美国雷神公司在美国能源部支持下开展了液氨燃料涡轮电推进系统研究^[14]。2022 年 8 月,中佛罗里达大学在美国航空航天局的资助下联合美国主要航空研发制造商,开展了面向窄体客机的氨能航空项目,分为基础原理研究、技术展示和全尺寸飞行与地面测试三个阶段^[15]。

我国对氨氢融合航空发动机研究尚处于萌芽阶段,包括基于氨燃料的涡轮电混合动力系统^[16]、氨氢混合物燃烧反应动力学与 NO_x 生成动力学机制^[17]、氨燃烧调控研究^[18]等。

4.2 氨氢融合航空发动机关键技术

氨氢融合航空发动机研发是复杂的系统工程,需要综合考虑液氨特性、燃料控制、低污染燃烧、传热冷却、安全适航、配套设施因素,突破先进高效循环氨氢航空动力总体设计和高稳定低污染燃烧室设计技术。目前地面氨氢动力的裂解、换热设备难以直接在重量、体积敏感的航空发动机上直接应用,氨氢融合航空动力还需要突破轻质液-气换热和高效裂解等关键技术。

先进高效循环氨氢航空动力总体设计: 在航空发动机本体设计方面,需要考虑氨燃料特殊性质,攻克非常规热力循环、基于轻质材料和高效涡轮机方案的高推重比设计、低燃料消耗、低 NO_x 排放、长寿命、系统集成、数值模拟与实验验证等新技术难题;在机载氨氢燃料输送方面,需要考虑机载氨氢燃料在不同压力和温度下物理特性的变化差异,实现机载氨氢流量快速调控;在机载氨氢存储方面,要重新设计低温可复用的液氨储罐并突破储罐随形设计技术,解决常规储罐占用机体空间和显著降低航程的问题。

高稳定低污染燃烧组织技术: 在氨氢反应动力学方面,亟需开展高分辨率实验、高精度量子化学建模和工程尺度建模工作,发展高精度、高通用性氨燃烧模型,克服当前普遍存在的 NO_x 浓度、火焰传播速度、着火延迟时间难以同时预测准确的问题;在燃烧室设计方面,考虑到燃料型 NO_x 是氨燃烧氮氧化物污染的主要来源,需要着力创新微混燃烧、分级燃烧等新型组织方式;在安全适航方面,极端条

件下氨氢融合航空发动机的点熄火特性是个未知数，需要着力发展以等离子体点火助燃为代表的新兴技术，拓宽点熄火边界。

轻质高效液气换热与裂解技术：在氨轻质高效液气换热技术方面，液氨燃料需转化为气氨，进而输送到裂解室或燃烧室，液气氨换热技术直接关系到燃料高效利用、能源效率、飞机性能和安全性。为此，必须突破高效热传导材料、紧凑型换热器、基于轻质材料和结构的轻量化设计技术，并合理设计热回收系统，将废热用于提供额外的动力或改善系统效率。在氨轻质高效裂解技术方面，传统的催化剂裂解方案难以适应航空环境，以波音 B737 为例，耗氨率约为 7.5 吨/每小时，催化装置体积需大于 30 立方米，机载难度大^[15]。因此，亟需发展等离子体与高性能催化剂协同裂解等革命性轻质高效裂解技术，实现快速冷启动。

4.3 展望

零碳航空发动机的发展是未来大国的竞争热点，当前正处于技术路径选择的关键交叉路口，系统谋划与论证氨氢融合零碳航空动力的未来发展愈加重要。氨氢融合零碳航空动力发展有赖于“战略研究”与“技术研发”双发驱动，挖掘与培育颠覆性技术；需要包含民航、能源、工信、科技、航空、航发、化工等多部门的“同频共振”；需要氨氢内燃机、燃气轮机与航空发动机研究“一体统筹”，纯氢航发、氨氢融合航发“相互促进”。

参考文献

- [1] Lee DS, Fahey DW, Skowron A, Allen MR, Burkhardt U, Chen Q, Doherty SJ, Freeman S, Forster PM, Fuglestvedt J, Gettelman A, Leon RR, Lim LL, Lund MT, Millar RJ, Owen B, Penner JE, Pitari G, Prather MJ, Sausen R, Wilcox LJ. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environ.*, 2021; 244: 117834(1-29).
- [2] International Civil Aviation Organization. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>.

- [3] International Civil Aviation Organization. ICAO welcomes new net-zero 2050 air industry commitment. <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ZH/ICAO-welcomes-new-netzero-2050-air-industry-commitment.aspx>.
- [4] Federal Aviation Administration:Aviation Climate Action Plan. <https://www.faa.gov/sustainability/aviation-climate-action-plan>.
- [5] European Commission: Clean Sky 2 - the largest research programme for aviation ever launched in Europe. <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/projects/success-stories/all/clean-sky-2-largest-research-programme-aviation-ever-launched-europe>.
- [6] ZEROe Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft. <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe>.
- [7] Aero Space Technology Institute. FlyZero. <https://www.ati.org.uk/flyzero>.
- [8] Rolls-Royce announces leading-edge hydrogen programme and developments in hybrid-electric research. <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases.aspx>.
- [9] ZeroAvia Flight Testing Hydrogen-Electric Powerplant. <https://zeroavia.com/flight-testing/>.
- [10]Verstraete D. *The Potential of Liquid Hydrogen for long range aircraft propulsion.Dissertation of Cranfield University, 2009.*
- [11]王翔宇. 英国零碳飞行发展远景分析.*航空动力* 2022;3:24-27.
- [12]Ball M, Wietschel M. The future of hydrogen—opportunities and challenges. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2009; 34: 615-627.
- [13]Reaction Engines. <https://reactionengines.co.uk/>.
- [14]Zero-carbon Ammonia-Powered Turboelectric (ZAPTurbo) Propulsion System. <http://www.arpa-e.energy.gov/technologies/projects/zero-carbon-ammonia-powered-turboelectric-zapturbo-propulsion-system>.
- [15]University of Central Florida News:UCF to Lead \$10M NASA Project to Develop Zero-Carbon Jet Engines. <https://www.ucf.edu/news/ucf-to-lead-10m-nasa-project-to-develop-zero-carbon-jet-engines/>.
- [16]徐乐根, 毛军逵, 梁凤丽, 王在兴, 杨孟林. 直接氨 SOFC-GT 混合动力系统

性能及航空应用. *航空动力学报*, 2023, doi:10.13224/j.cnki.jasp.20220346

- [17] Yin GY, Wang CJ, Zhou M, Zhou YJ, Hu EJ, Huang ZH. Experimental and kinetic study on laminar flame speeds of ammonia/syngas/air at a high temperature and elevated pressure. *Front. Energy*, 2022; 16: 263-276.
- [18] Sun JG, Huang Q, Tang Y, Li SQ. Stabilization and Emission Characteristics of Gliding Arc-Assisted NH₃/CH₄/Air Premixed Flames in a Swirl Combustor. *Energy Fuels*, 2022; 36: 8520-8527.

第5章 燃气轮机氨氢零碳燃烧技术战略研究

燃气轮机（燃机）传统上使用天然气或柴油为燃料，以氢氨为燃料的燃气轮机技术属于产业发展的前沿技术。在使用绿氢绿氨实现能源的零碳转型方面，燃气轮机产业技术将会起到重要作用，预计将在以下三个领域有比较大的发展。

（1）**交通运输**。氨可以作为微（小）燃机的燃料，为采用混合动力技术的车辆、船舶，甚至航空飞行器提供电能。混合动力是目前移动动力技术发展的大趋势，运载工具正由传统的机械驱动改变为电力驱动。由于氨的能量密度高于动力电池，氨燃机混合驱动的运载工具将为交通领域脱碳提供另一条技术路线。

（2）**微网发电**。氨可作为微型和小型燃机的燃料（~500kW-5MW）进行发电。燃机具有效率高、占地面积小、燃料灵活、余热利用率高等优势，可为分布式微网提供能源的高效梯级利用，推动能源结构的全面转型。

（3）**大电网发电**。重型燃机（>50MW）大规模集中式发电的应用场景，需要氢氨的大规模储存和大规模（管道）运输，但需要通过示范工程解决管道和阀件的氢脆、腐蚀、泄漏的光纤传感在线检测、应用端氢气与天然气掺混浓度精准计量、经济性等关键问题。

5.1 氢燃气轮机发展现状

燃气轮机作为动力在各经济领域有广泛的应用。燃氢燃机对于减少碳排放和实现碳中和的目标至关重要。氢燃气轮机发电具有如下优势：（1）大规模持续稳定地消纳氢能，节约氢运输成本；（2）可以快速启动氢的应用从而刺激氢能产业规模的高速成长；（3）兼容不同含氢工质、兼容劣质氢，对氢的纯度要求不高，可以降低制氢和储氢的成本；

国际主要燃气轮机原始设备制造厂家^[1,2]都对燃氢燃机的前途充满信心，将其作为技术发展的首要任务。目前正在运行的燃机都可以不同程度地使用掺氢燃料。老型号的工业燃机一般可以燃烧更高比例的氢燃料，如果使用燃料的稀释技术，如加氮气或蒸汽掺混，这些机器甚至具有燃烧纯氢的能力。但是，新型、先进、高效燃机的干式低碳燃烧器则相对比较局限，只有小比例掺氢能力。具体见下表 5-1。

表 5-1 主流厂商代表机型燃氢能力^[3]

厂商	代表机型燃氢能力	
	机 型	燃氢适应性
GE	HA 级	0-50%
	F 级	0-100%
	B/E 级	0-100%
	航改	0-65%
	航改	0-65%
西门子	HL 级	0-30%
	H 级	0-30%
	F 级	0-30%
	航改	60%
三菱	F/J 级	0-30%
	B/D 级	0-100%
安萨尔多	GT36(H 级)	0-50%
	GT26(F 级)	0-30%
贝克休斯	GE10-1	0-100%
	NovalLT-16	0-100%
曼能源	THM	0-50%
索拉	Titan130/ Taurus60	0-60%
川崎	MIA	0-100%

由表可见,小型工业燃机(效率比较低),如三菱的 B/D 级、贝克休斯的 NovalLT-16、川崎的 MIA 具有燃烧纯氢的能力。但是在数百兆瓦级的高效低氮重型燃机型号中,只有 GE 的微混燃烧器和安萨尔多 GT36 的两级燃烧器有相对高一些的氢掺混能力,可到 50%。基本上国际主流的高效低氮重型燃机目前都不具备大量氢气的掺混能力。真正高效低氮氧化物排放的氢燃烧技术还有待进一步开发,以 GE 公司的微混燃烧器为代表的技术是实现这个目标可行的技术方向。

氨燃机目前还在研发阶段,没有成熟的商业化产品。

5.2 氢燃气轮机关键技术

具有扩散火焰且使用氮气或蒸汽稀释的燃烧系统是目前可以燃烧 100%氢气的技术。然而该系统有两个缺点，一是与没有稀释的系统相比，效率下降；二是与贫预混技术相比，NO_x 排放高。应对这两个问题的技术路线可以有以下两个方面。

氢燃烧技术

干式贫预混燃烧技术(Dry Low NO_x, 即 DLN)是目前天然气燃烧的主流燃烧技术，是现代低排放（NO_x）高效燃机的基础^[5]，具有更高的发展潜力。然而，在使用含氢量很高的燃料时，该技术目前还不够成熟。

DLN 有望使燃料在 0-100% 氢含量的条件下运行，但实现这个目标，还需要开展以下几个方面的工作，以应对与燃料中高氢含量带来的挑战^[6]。

第一是控制氮氧化物。与天然气及燃烧产物相比，由于氢的比重较低，在同等水平的透平点火温度和质量流量的条件下（保证同等的功率和效率），氢的绝热火焰温度更高，且氢燃烧的组织形态和温度场分布不同，这样一般会导致更高的 NO_x 排放。通常可以减少额定输出功率来降低火焰温度，但这样会导致燃机效率和功率的下降，因此，需要开发新型燃烧器来解决排放问题；**第二是回火。**与天然气相比，富氢燃料燃烧的火焰速度更快，点火延迟时间更短，因此必然会增加回火的风险。在现代重型燃机的设计中，进气温度的提高会导致回火风险加大，需要在燃烧组织和保护方面采取措施；**第三是燃烧不稳定性。**在热声震荡模态和频率方面，与天然气火焰相比，氢火焰的热声特征明显不同。因此，与使用天然气相比，使用富氢燃料的现代燃气轮机燃烧震荡风险会增加，燃烧室结构的设计和声学抑制器技术的研究有助于降低振动的水平；**第四是可靠性与寿命。**对于纯氢燃烧，烟气中水份的增加会使燃气轮机热通道部件的传热系数更高，导致热通道部件的工作温度上升，同时温度梯度升高还会导致热应力增加。由于现代先进燃机的材料能力都基本上用到了极限，对小幅度温度升高也会很敏感。此外，由于含水率较高，可能更容易发生热腐蚀，这对工程设计提出了新的挑战。

新型循环技术

另外一个技术开发的思路是重新审视燃机的传统结构。因为现代燃机技术是为燃烧天然气而设计的，如果是燃烧氢气，而且氧气的供应也经济可行，具体的场

景如利用可再生能源的电解水制氢技术。这个技术的特点是在制氢的同时也生成作为副产品的氧气，而且氢气和氧气的量是匹配的。这样，作为逆反应，纯氧燃烧（Oxy-combustion）的燃机技术是一个可以探索的方向。研究表明^[7,8]，如果采用封闭式循环，水蒸汽作为工质，实行分流再压缩，优化系统的各部件匹配，通过分析计算，在燃用氢燃料时，联合循环效率可达 70% 以上。这个过程没有 NO_x 的生成，是真正的无任何副作用的电力生产过程。

5.3 氨燃气轮机关键技术

虽然目前市场上还没有成熟的氨燃气轮机产品，但是氨被广泛地认为是可行的燃气轮机燃料^[9,10]。氨的体积能量密度高，与甲醇和二甲醚相当，比液氢高约 50%。氮氧化物（NO_x）排放是氨燃机的主要问题，但氨燃烧产物不含碳及其它有害污染物，如 CO₂、CO、HCs（碳氢化合物）、SO_x 和颗粒物等。

氨直接燃烧污染物排放控制技术是氨燃气轮机的关键技术，可行的技术路线主要有两条。一是把氨裂解为氢气和氮气，然后进行燃烧。氨燃气轮机与氢燃气轮机不同之处是用氢气和氮气的混合气作为燃料，燃料中氮气相当于稀释气体，有助于污染物排放的抑制。另一条路径是富燃-猝熄-贫燃（Rich-Quench-Lean, RQL）分级燃烧技术^[11,12]。

RQL 把燃烧分成两级，第一级燃烧采用富燃（Rich），第二级采用贫燃（Lean），中间一级注入冷气把第一级燃烧的烟气降温。减少 NO_x 排放的主要思路是：富燃由于氨气较多，NO_x 的产生受到抑制；而在贫燃区，氨气有一定的还原 NO_x 的功能，从而整个污染物的排放受到控制。RQL 燃烧室可以采用中心分级的设计方案，其预燃区、富燃区、贫燃区三个反应区的当量比和停留时间是关键参数，燃烧的污染物排放可以通过优化关键参数进行控制。

5.4 氨催化裂解技术

如上所述，燃气轮机烧氢气是可行的技术路线。若采用氨裂解制氢路径，氨燃气轮机需要配置氨裂解装置，因此氨裂解技术是氨燃气轮机的关键技术^[13]。根据燃气轮机系统的特点，可以采用裂解和燃烧一体化技术，从而提高系统的热电转换效率。

燃气轮机中的氨蒸发和裂解关键技术包括：利用余热进行液氨蒸发；利用余热在相对低的温度（500°C）下进行预裂解或部分裂解；将预裂解里残余的氨气在催化剂的作用下在高温环境（800 °C）进行最后的裂解，确保参与燃烧的混合气中氨气成分少于一定的比例，为低排放燃烧提供基础。

氨燃气轮机中高效氨裂解系统的设计需要综合考虑七个关键因素，包括反应温度、催化元素的活化能、反应时间、催化剂的表面积、反应压力、温度场和流场及催化剂表面的选择性等，同时建立高保真的系统催化反应模型，再结合燃气轮机燃烧室的特点，进行一体化设计和系统优化，实现近零残留氨气的裂解和 NO_x 排放达标，并达到轻量化和经济性的要求。

5.5 展望

发展使用氢氨燃料的燃气轮机产业是能源领域深度脱碳的重要技术路线，实现这一目标的关键是控制氢氨燃烧的污染物排放。微混燃烧技术是解决氢燃烧的有效路径，为高效低排放的燃氢重型燃气轮机的产业化奠定基础。氨燃料的燃气轮机技术在交通运输领域将会有较好的应用前景，主要的挑战来自氨裂解技术。基于新型高效低成本催化剂（如高熵合金催化剂^[14]）的催化裂解技术，将为氨燃机的轻量化和低排放提供可能。

参考文献

- [1] GE Gas Power: Hydrogen fueled gas turbines, <https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines>
- [2] Siemens: Renewable hydrogen for Germany's heavy industry, <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/stories/renewable-hydrogen-trailblazer.html>
- [3] ETN Global: Hydrogen gas turbines - the path towards a zero-carbon gas turbine, 2020, <https://etn.global/wp-content/uploads/2020/01/ETN-Hydrogen-Gas-Turbines-report.pdf>
- [4] Oberg S, Odenberger M, Johnsson F, Exploring the competitiveness of hydrogen-

- fueled gas turbines in future energy systems, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2022; 47: 624-644.
- [5] Davis LB, Black SH, Dry Low NO_x Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines, GE Power Systems, GER-3568G,
https://www.ge.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/resources/reference/ger-3568g-dry-low-nox-for-hdgt.pdf
- [6] York WD, Ziminsky WS, Yilmaz E. Development and Testing of a Low NO_x Hydrogen Combustion System for Heavy-Duty Gas Turbines, *J. Eng. Gas Turbine. Power*. 2013; 135: 022001(1-8).
- [7] Kindra V, Rogalev A, Oparin M, Kovalev D, Ostrovsky M. Research and Development of the Oxy-Fuel Combustion Power Cycle for the Combined Production of Electricity and Hydrogen, *Energies*, 2023; 16(16): 5983
- [8] 中国联合重型燃气轮机技术有限公司内部报告:高效、零排放先进燃气轮机联合循环系统研究, 2023.
- [9] *GE Gas Power: Ammonia as a gas turbine fuel*, 2021,
https://www.ge.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/images/gas-new-site/future-of-energy/GEA34985-ammonia-power-gen.pdf
- [10] Masanori Yuri, MHI Energy Transition and Ammonia firing Gas Turbine, Presentation at Ammonia Energy APAC 2023,
https://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2023/08/Masanori-Yuri_APAC-2023.pdf
- [11] Mashruk S, Xiao H, Valera-Medina A, Rich-Quench-Lean model comparison for the clean use of humidified ammonia/hydrogen combustion systems, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2021; 46(5): 4472-4484
- [12] Herbinet O, Bartocci P, Dana AG, On the use of ammonia as a fuel – A perspective, *Fuel Comm.*, 2022; 11: 100064(1-16).
- [13] Lucentini I, Garcia X, Vendrell X, Llorca J. Review of the Decomposition of Ammonia to Generate Hydrogen, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2021; 60(51): 18560–18611.

[14]Xie PF, Yao YG, Huang ZN, Liu ZY, Zhang JL, Li TY, Wang GF, Shahbazian-Yassar R, Hu LB, Wang C. Highly efficient decomposition of ammonia using high-entropy alloy catalysts, *Nat. Comm.*, 2019; 10: 4011(1-12).

第6章 氨氢融合新能源安全技术 with 标准战略研究

在氨氢融合新能源中，以绿氢为基础的氨能，兼具高效氢能储运介质和高应用潜力零碳燃料的双重属性。在绿氢供应体系下，氨能与氢能二者可以相互转化，在高效储运、应用场景拓展等方面形成融合发展^[1-3, 17]。氢具有易漏易燃易爆的特性同时临氢环境会造成材料的氢脆和氢渗透失效，而氨的腐蚀、易漏、可燃特性则会导致材料的腐蚀破坏和燃烧爆炸。因此，构建氨氢融合新能源的制、储、输、用全产业链安全和标准体系是其发展的关键核心。在此背景下，开展氨氢融合新能源安全技术 and 标准战略研究，将为该新能源全产业链的建立和完善提供重要保障。

本章在分析国内外氨氢安全技术 and 标准发展现状的基础上，分别从氢、氨及氨氢融合方面系统总结了目前安全和标准研究面临的问题、风险和挑战，并对我国氨氢融合新能源安全技术发展及标准体系完善提出了建议。

6.1 氨氢融合新能源安全技术 and 标准发展现状及挑战

在氢方面，氢气具有密度小、扩散系数大、点火能量低、燃烧和爆炸范围宽、燃烧火焰速度快、易漏易燃易爆的特性。另外，设备长期在高压氢气环境下运行，临氢金属材料易因氢脆、非金属材料易因氢渗透和老化而产生性能劣化。因此，目前氢安全领域重点关注材料相容性问题、氢泄漏与扩散、氢燃烧与爆炸等带来的风险及防控问题^[4]。其中，材料耐久性检测及评价是高压氢系统安全可靠运行的基础保证。国际上和我国已初步形成了高压氢环境下材料、零部件和系统的安全检测能力^[5]，但仍需进一步提升氢储运装备材料在液氢等极端服役条件下的测试与评价能力。部分氢储运装备以及氢燃料车辆的安全和标准体系如 GB/T 34583-2017、UN GTR13、ECE R134、GB/T 24549-2020 等已初步形成。氢泄漏与扩散研究包括检测技术有了一定的发展，目前尚不成熟。对于氢燃烧与爆炸包括自燃机理等方面的研究有一定进展。氢能应用方面，目前还缺乏全寿命周期安全和可靠性评价技术、在线检测与监控技术及维修周期和方法标准。

宏观管理上的氢风险评价已形成快速风险评级（RRR）和量化风险评价（QRA）^[6]两种方法。RRR 为经验式的定性风险评估，而 QRA 是对风险的定量评价。QRA 可以科学地评价风险值，现阶段已成为氢风险评价的主流方法^[6-8]，但仍

需进一步提高模型的准确性及模拟条件的合理性。氢能产业消防安全的多数基础性研究成果尚无转化为有效的消防安全技术与装备，距离市场化应用仍有一定距离^[9]。

氢能标准体系的建设在国内外都有较大发展。国家标准委等六部委联合发布的《氢能产业标准体系建设指南（2023 版）》，构建了氢全产业链标准框架体系，如图 6-1 所示。目前，对于气态氢相关标准已逐步填补空白，但在氢能装备性能验证和评价，特别是氢能在不同行业应用等方面还存在不足。现在的目标是，到 2025 年，制修订氢能国家标准、行业标准 30 项以上。

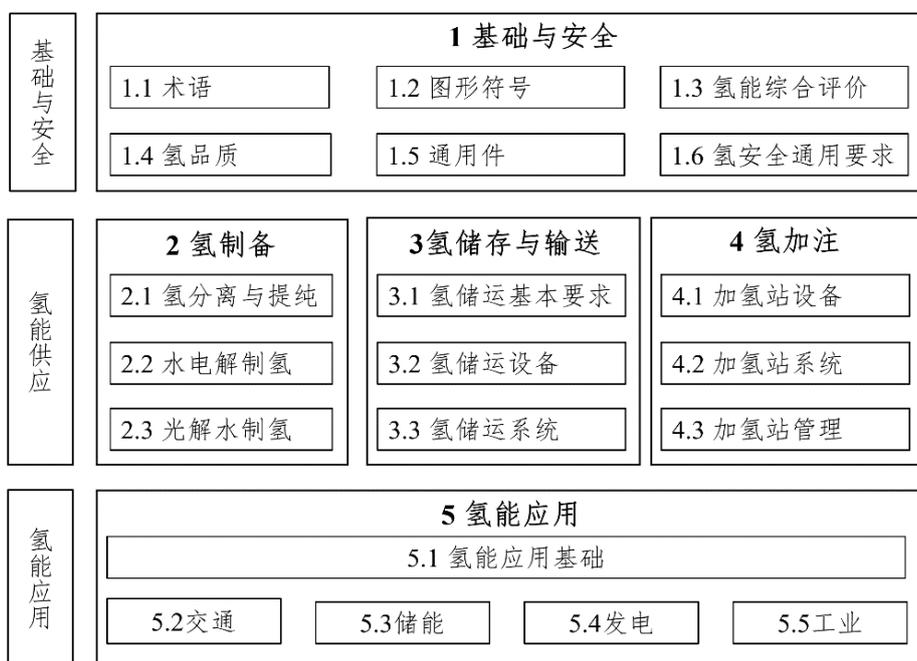


图 6-1 氢能产业标准体系结构图^[10]

在氨方面，氨在常温下为无色刺激性气体，根据国家标准 GB6944-2012，液氨属于第 2.3 项毒性危险化学品。根据 GB/T 18218-2009 的规定，10 吨以上液氨为重大危险源。在液氨利用环节中可能的失效形式，以金属材料的腐蚀泄漏及其引起的燃烧爆炸为主^[11, 12]。此外，由于氨具有腐蚀性，极易溶于水且气化潜热高，高浓度的氨会刺激、腐蚀呼吸道，造成腐蚀性伤害^[13]，GB/T 536-2017 将液氨划为强腐蚀性有毒物质。

对于液氨规模存储，我国相应的设计制造与检测标准体系较为完备，但因存储

规模和使用场地等不同，在安全管理等方面存在差异。以万吨级化工园区为例，除需开发并选择与氨有良好相容性的材料和设计制造高品质储氨装备外，还需针对危险区域制定风险防控方案、建立和完善装备运行管理体系，并形成多元化和多层次的监测和应急管理策略和装备体系。

在氨氢融合新能源方面，作为高效储氢介质和燃料，在非化工园区（如市区等人员密集区）存储液氨 10 吨以上，目前我国尚未出台明确规定。同时也缺少安全风险评估、安全防控与管理、环保评价等方法和技术标准。

在长输液氨管道方面，液氨管道建设多借鉴成熟油气管道经验，尚未有统一的液氨管道设计标准。国际上以美国 CFR Title 49 Part 195-2022《危险液体管道运输》联邦安全条例、ASME B31.3-2020 等设计标准为参考依据。国内则缺乏液氨管道设计标准，仍以原油长输管道设计规范为参照实施，如 SYJ 14-1985 和 GB 50028-2020 等。由于液氨管道输送在相态控制、工艺流程、腐蚀防护、泄漏风险等方面与现有油气管道输送存在明显差异，因此需要在腐蚀和应急防护、安全管理和监测技术等提出更高要求，并需制定相应安全技术要求和标准。

在氨能源的应用方面，氨作为燃料和氨能的开发目前国内外都刚列入战略性创新计划。我国尚未把氨能纳入国家能源规划和能源体系。因此，氨氢零碳燃烧在高温制造业、交通运输装备、航空发动机、燃气轮机等方面的安全技术研发和标准体系都刚起步，基本处于空白。

在氨氢融合新能源方面，目前作为新能源领域的前瞻性发展方向，各方面技术包括安全和标准的研发刚刚开始。以氨和氢作为直接能源或能源载体并相互转化、协同使用的安全技术和标准处于空白。

6.2 氨氢融合新能源安全和标准关键技术

在氢能源方面，进一步完善高压氢系统耐久性检测及评价技术，强化高压氢和液氢等极端氢环境下材料、零部件和系统的安全检测能力。进一步提升氢储运装备材料在液氢等极端服役条件下的基础测试与评价能力、氢储运装备的在线检测与监测技术。研发氢气泄漏检测关键技术、系统地开展氢燃烧与爆炸、氢喷射火、自燃机理等研究，为事故预防和后果减缓措施设置提供依据。在氢能的应用方面，开发全寿命周期的安全和可靠性评价技术及在线检测与监测技术，建立氢能装备

和系统的维修周期和维修方法标准。发展强化“材料+部件+装备+系统”的全链条检测能力与评估体系。进一步完善氢风险评价方法特别是 QRA。按照国家发布的《氢能产业标准体系建设指南（2023 版）》，逐步完善全产业链标准体系。

在氨能源方面，首先开展氨作为传统化工原料和作为氨能源在制、储、输、用全产业链中安全技术和标准体系的差异研究，并针对氨能的特殊性开发安全技术和建立标准体系。针对液氨作为高效储能介质和燃料在非化工园区规模存储，开发安全风险评估、安全防控与管理、环保评价等方法 and 标准。对长输液氨管道，基于液氨输送管道易受到超压、老化和腐蚀、外部撞击等导致管道破裂而发生氨泄漏扩散的特殊因素，开展腐蚀和应急防护、安全管理和监测技术等方面研究，并在定量风险评价等方面制定相应技术标准。在氨能源的应用方面，研究把氨能纳入国家能源体系的安全和标准需求，开展共性安全技术研发和标准体系建设工作。同时，按照不同行业的特殊需要，开展氨氢零碳燃烧在高温制造业、交通运输装备、航空发动机、燃气轮机等方面的行业安全技术和标准研发。推动国家发布氢能产业标准体系建设指南。

在氨氢融合新能源方面，研究以氨和氢作为直接能源或能源载体并相互转化和协同使用下的特殊安全问题，如氢和氨的耦合效应带来的安全风险。在氢能和氨能产业标准体系基础上，建立氨氢融合实际应用场景的补充标准体系。

6.3 展望

没有安全就没有产业！系统地研发氨氢融合新能源的制、储、输、用全产业链安全技术和标准体系是该前瞻性和战略性领域发展的关键。目前氢能已列入国家能源规划和能源体系。氨能，兼具氢能高效储运介质和零碳燃料的双重属性，已广泛列入战略性创新计划。国内外在氨能的规模储运和零碳燃烧技术方面的不断发展，特别是氨能安全技术和相关标准的开发，将为氨能纳入国家能源规划和能源体系提供有力保障。构建完善氨氢融合新能源全产业链安全和标准体系将支撑和推动该战略性领域的快速发展。

参考文献

- [1] 徐也茗, 郑传明, 张韫宏. 氨能源作为清洁能源的应用前景. *化学通报*, 2019; 82(3): 214-220.
- [2] 雍瑞生, 杨川箬, 薛明, 聂凡, 赵兴雷. 氨能应用现状与前景展望. *中国工程科学*, 2023; 25(2): 111-121.
- [3] 李卫东, 李逸龙, 滕霖, 尹鹏博, 黄鑫, 李加庆, 罗宇, 江莉龙. “双碳”目标下的氨能技术与经济性研究进展. *化工进展*, 2023; 1-18.
<https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-0066>
- [4] 郑津洋, 刘自亮, 花争立, 顾超华, 王赓, 陈霖新, 张一苇, 朱盛依, 韩武林. 氢安全研究现状及面临的挑战. *安全与环境学报*, 2020; 20(1): 106-115.
- [5] 郑津洋, 周池楼, 顾超华, 李智远, 赵永志, 徐平, 张林, 刘鹏飞. 高压氢气环境材料耐久性试验装置的研究. *太阳能学报*, 2015; 36(5): 1073-1080.
- [6] 李志勇, 潘相敏, 马建新. 加氢站氢气事故后果量化评价, *同济大学学报(自然科学版)*, 2012; 40(2): 286-291.
- [7] Middaha P, Hansen OR. CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels. *Int. J. Hydrog Energy*, 2009; 34(14): 5875-5886.
- [8] Li ZY, Pan XM, Ma JX. Quantitative risk assessment on 2010 Expo hydrogen station. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2011; 36(6): 4079-4086.
- [9] 陈晔, 李毅, 纪超, 刘昶亚. 浅谈国内外氢能源产业消防安全现状. 2020 中国消防协会科学技术年会论文集. DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.065589.
- [10] 国家标准化管理委员会, 氢能产业标准体系建设指南(2023 版).
- [11] 王海宁, 杨威, 黄惟, 李海航. 面向液氨泄漏应急救援区域的 XGBoost 预测方法研究. *安全与环境学报*, 2023; 23(5): 1482-1489.
- [12] 何汶静. 氨燃爆危险性与处置方法探讨. *消防科学与技术*, 2016; 35 (7): 1023-1025.
- [13] Kojima Y. Safety of ammonia as a hydrogen energy carrier. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.213>
- [14] 陈学东, 范志超, 陈永东, 崔军, 章小浒, 王冰, 艾志斌. 我国压力容器设计

制造与维护的绿色化与智能化. *压力容器*, 2017; 34(11): 12-27.

[15]张莉, 薛勃飞, 刘玉新, 王宇, 吴云, 张华, 杨新春, 何帅, 蒋三平, 李骏, 张清杰. 氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究. *科学通报*, 2023; 68: 3107-3112

[16]Regulation No 134 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV).

[17]United Nations Global Technical Regulation No.13 on Hydrogen and Fuel Cell Vehicles.

我国氨氢融合新能源颠覆性技术及产业发展政策咨询报告

氨氢融合新能源技术的产业化是解决氢能产业发展面临的氢跨区域、高安全、低成本、大规模储运难的重大瓶颈和拓展氢能新的重大应用场景的有效途径，对于推动我国高温制造、交通、冶金、建筑、发电等高耗能行业深度脱碳和转型升级具有重大意义^[1]。我国应尽早将氢能纳入国家能源战略体系，启动“一带一路”沿线国家氨氢能源国际合作工程以及建设氨氢融合新能源重点区域示范工程等，奋力抢占氨氢融合新能源技术产业的全球制高点。

针对我国氨氢融合新能源颠覆性技术及产业发展，我们建议如下：

一、建议将氢能纳入国家能源规划及能源体系

建议国家在氢能已经纳入国家能源体系的基础上，尽快将氢能纳入国家能源规划和能源体系。根据我国国情，开展氢能资源调研，从保障能源安全的角度，制定氢能中长期发展规划与产业化应用路线图；利用多种渠道发展氢能制、储、输、用全链条新技术；培育持续稳定的市场需求，积极推广氢能应用。加快氨氢融合新能源安全检测技术、安全评价方法与标准研究，加快制定相应的安全标准与规范。

当前，我国煤合成氨占整个合成氨工业 70%以上^[2]。全球范围内，绿氨合成技术与氨分解制氢技术在经济性与应用性方面仍面临挑战。根据我国国情，建议国家尽早开展氢能资源调查，就氢能的来源、去向、能耗、碳排放量、储运能力、生产能力、企业状况、全国分布状况、价格走势、新技术开发与使用情况等进行全面调查分析，制定科学合理的氢能中长期发展规划与产业化应用路线图。建议国家通过设立专项研发资金、自主研发先进技术、开展国际合作等多渠道发展氢能制、储、输、用全链条技术，尤其要重视低成本绿氨合成技术、氨气及氨氢混合气燃烧技术和一站式氨裂解制氢加氢技术等氢能应用技术研发，积极布局大型储氨站的规划和建设，保障氨能源的分布和集中供应。建议国家采取减税、补贴、奖励、融资、贷款、设立产业基金等多种方式，积极推广氨和氨混氢作为燃料替代天然气，积极推广氢能应用，培育持续稳定的市场需求。建议国家积极鼓励企业、高校、科研院所等机构广泛开展氢能科普宣传，向全社会展示氢能的环保性、安全性和高效性，提升公众的认可度。

对氢能的大规模产业化应用而言，构建全国统一的标准体系至关重要。建议国家联合能源供应商、设备制造商、运输商、学术界等加快氨氢融合新能源安全监测技术、安全评估方法、机制研究，尽快制定相应的安全标准与规范。将氨作为能源产品，参照天然气管管理方式，相应调整对氨能和氨氢融合新能源制、储、运、用的应急管理和土地使用政策，规范和支持分布式氨制氢加氢一体站的建设和管理。

建议国家从我国能源利用与二氧化碳排放总体考虑，将氢能与氨能纳入碳税、碳交易体系。只有把氢能、氨能等能源形式市场化，这些新型的能源才能真正发展起来。

二、建议启动“一带一路”沿线国家氨氢能源国际合作工程

“一带一路”沿线石油、天然气输出国正在谋求从化石能源出口向清洁能源出口的转型^[9]，如沙特的“2030 愿景”计划用氨氢替代石油出口，打造万亿级新能源市场。液氨海运技术已非常成熟，全球已有 120 多个液氨运输码头^[10]。建议我国加强能源领域的国际合作，在液氨进口和合成氨制备技术出口等领域，实现中国“一带一路”倡议与沿线国家新能源政策（如沙特“2030 愿景”）的国际对接，以保障我国氨能源长期稳定的供应。

三、建议实施氨氢融合新能源重点区域示范工程

氨氢融合新能源重点区域示范工程是指以氨氢为基础能源，使用领先技术建设产业、交通、消费、生态等全链条要素，实现区域内碳排放降低并趋于零碳排放的综合性示范工程。

我国西北地区可再生能源极为丰富，2022 年西北地区光伏发电和风电总装机容量分别达到 75.89GW 和 83.09 GW，上网电价为 0.24-0.35 元/度，但本地对绿电的消纳能力不足，弃光弃风现象严重^[3]。建议国家通过财政支持和政策引导等方式，组织全国优势科研和产业力量联合攻关，突破利用廉价绿电大规模低成本制备绿氢绿氨的关键技术，建立绿氢绿氨储能示范基地，建立液氨从西部运送到东部的管道输运示范工程。

我国东南沿海海上风电资源丰富，海上风电装机总量已达到 30.61GW，其中广东、福建、浙江分别为 8.04 GW、3.4 GW、3.55 GW。据预测到 2030 年，海上

风电度电成本可降到 0.2 元以下，但海上风电上网困难，消纳能力严重不足，难以作为东南沿海经济发达地区提供廉价的绿电。建议国家在沿海地区建立绿氢绿氨储能示范基地和液氨管道输运示范网络。

建议国家加强政策引领，就开展氨氢融合新能源重点区域示范工程的总体目标、关键任务、重点区域、监管机制、财政、金融、奖励等出台政策性文件，引导并鼓励经济基础好、资源禀赋优越的地区，结合当地实际，优先布局氨氢融合新能源区域示范工程，积极推动绿氨生产、氨氢零碳燃烧、大型储氨站、一站式氨裂解制氢加氢、氨氢燃料电池等氨氢融合新能源技术集成应用和创新驱动，助力实现国家能源结构快速转型、经济发展向更高水平迈进。

四、建议国家加强氨氢融合新能源基础研究，设立氨氢融合新能源技术发展专项

加强氨氢融合新能源方面的基础研究，包括高通量氨氢电化学反应动力学、氨氢内燃机及燃气轮机的燃烧动力学和动力系统协同控制理论、氨氢融合工业窑炉零碳燃烧机理及控制理论等；支持发展绿氨低成本规模化制备技术、高温工业氨氢零碳燃烧技术、氨氢融合零碳航空发动机及燃气轮机技术、氨氢融合零碳重型商用车与船舶装备技术、氨氢融合安全技术与标准，形成我国颠覆性产业技术，抢占全球制高点。

参考文献

- [1] Valera-Medina A, Xiao H, Owen-Jones M, David WIF, Bowen PJ. Ammonia for power. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2018; 69: 63-102.
- [2] 熊亚林, 刘玮, 高鹏博, 董斌琦, 赵铭生. “双碳”目标下氢能在我国合成氨行业的需求与减碳路径. *储能科学与技术*, 2022; 11(12): 4048-4058.
- [3] 牛叔文, 王义鹏, 曲玮, 强文丽. 西部地区风电产业的困境与出路—关于“弃风限电”的思考. *科技导报*, 2017; 35(10): 11-12.
- [4] 张莉, 薛勃飞, 刘玉新, 王宇, 吴云, 张华, 杨新春, 何帅, 蒋三平, 李骏, 张清杰. 氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究. *科学通报*, 2023; 68(23): 3107-3112.
- [5] Bartels JR. A feasibility study of implementing an ammonia economy. Master Thesis. Ames: Iowa State University, 2008.
- [6] Leighty WC, Holbrook JH. Alternatives to electricity for transmission, firming storage, and supply integration for diverse, stranded, renewable energy resources: Gaseous hydrogen and anhydrous ammonia fuels via underground pipelines. *Energy Procedia*, 2012; 29: 332-346.
- [7] 毕马威中国: 固碳、储氢、航运燃料、掺混发电: 绿氨行业概览与展望. 2022. <https://kpmg.com/cn/zh/home/insights/2022/12/overview-and-prospect-of-green-ammonia-industry.html>
- [8] 陈文艳. 液氨长输运管道泄漏风险分析及对策研究. 硕士学位论文. 北京: 首都经济贸易大学, 2011.
- [9] Salam MA, Khan SA. Transition towards sustainable energy production-A review of the progress for solar energy in Saudi Arabia. *Energy Explor. Exploit.*, 2018; 36: 3-27.
- [10] Nayak-Luke RM, Forbes C, Cesaro Z, Banares-Alcantara R, Rouwenhorst KHR. Chapter 8: Techno-economic aspects of production, storage and distribution of ammonia. In the book of *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*. Cambridge: Academic Press, 2020; pp191-207.