

氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究

张莉^{1†*}, 薛勃飞^{2,3†*}, 刘玉新^{2,3}, 王宇^{1,2,3}, 吴云⁵, 张华⁶, 杨新春⁷, 何帅^{2,3}, 蒋三平^{2,3}, 李骏^{2,3,4}, 张清杰^{1,2,3*}

1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070;
2. 佛山仙湖实验室, 佛山 528216;
3. 国家能源氢能及氨氢融合新能源技术重点实验室, 佛山 528216;
4. 清华大学车辆与运载学院, 北京 100084;
5. 空军工程大学航空动力系统与等离子体技术国家重点实验室, 西安 710038;
6. 上海电机学院机械学院, 上海 200240;
7. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: zhanglihy@whut.edu.cn; xuebofei@xhlab.cn; zhangqj@whut.edu.cn

2022年3月23日, 国家发展和改革委员会、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20多年来, 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国内外取得了长足的进展。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^[1-4], 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运输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^[4]。

本文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的重要政策建议, 为解决氢能储运面临的重大难题和扩大氢能的重大应用场景提供战略性方向引领。

1 氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究的意义

1.1 氨氢融合新能源已成为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(NH₃)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; 通过绿氢可以合成绿氨, 通过绿氨裂解可以高效制备绿氢, 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^[5]。

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(<https://>



张莉 工学博士, 研究员, 美国密歇根大学物理系访问学者, 武汉理工大学科学技术发展院副处长。长期从事科研管理战略研究及新能源材料的相关研究工作。



薛勃飞 2006年毕业于中国科学院物理研究所, 获得理学博士学位。2006~2021年, 在澳大利亚从事可再生能源方面的研究。2021年2月加入佛山仙湖实验室, 从事氢能源、新能源材料相关研究。

www.ammoniaenergy.org/articles/japans-road-map-for-fuel-ammonia/). 2019年, 全球氨能源联盟提出“Ammonia=Hydrogen 2.0”新理念, 打造氨/氢能源新体系。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



张清志 中国科学院院士, 材料科学家, 从事新能源材料及器件和先进复合材料研究. 科技部第一届国家基础研究战略咨询委员会委员(2020~), 国家自然科学基金委员会重大研究计划“功能基元序构的高性能材料”专家组组长(2020~2027年), 国家能源氢能与氨氢融合新能源技术重点实验室主任, 广东佛山仙湖实验室理事长、主任, 中国大飞机先进材料创新联盟副理事长.

了海上风电和太阳能制氢计划, 挪威全球第一艘氨燃料动力油轮投入运营^[6,7]. 我国国家发展和改革委员会、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.

1.2 氨氢融合新能源技术为解决氢能储运的重大难题提供有效途径

氢气在常压下液化温度为 -253°C , 液化能耗很高. 气态氢气的储运密度很低, 一辆40 t氢气运输车(20 MPa), 只能运输氢气约250 kg, 氢气的经济运输半径小于200公里. 氨是高效储氢介质^[5], 含氢质量分数17.6%. 合成氨已有100多年的历史^[8]. 氨在常压 -33°C 或室温下1 MPa即可液化. 液氨的储运技术、基础设施、运输标准都很成熟, 可通过公路、水路和长距离管道运输, 且运输成本低廉(公路运输成本仅为氢气的1%, 水路和管道运输成本仅为氢气的1%)^[9]. 液氨作为氢的高效储运介质可以将氢的经济运输半径从150~200公里增加至数千公里以上^[10]. 但传统合成氨是通过高温高压(400~500 $^{\circ}\text{C}$, 15~20 MPa) Haber-Bosch(H-B)合成法, 消耗大量天然气资源、产生高 CO_2 排放. 传统液氨裂解制氢技术存在能耗高、反应条件苛刻、制氢纯度低以及无法实现车载原位高效制氢等突出问题, 其挑战主要是高效低温催化剂及小型化、强化传热传质反应器的设计制造. 传统氨氢分离工业上主要采用变压吸附技术或钯膜分离技术来实现, 该技术设备体积大、能耗高(变压吸附30%~40%、钯膜分离25%~35%)、但含氨富氢气体中氢具有理论氧化电位接近于标准零电位的特征, 因此, 氨氢分离正在向高效电化学分离方向发展(能耗可低于10%), 挑战在于耐氨质子交换膜、抗氨中毒电催化剂的材料支撑.

通过开发规模化低成本可再生能源绿氨制备、液氨安全低成本运输、一站式低能耗高效裂解制氢加氢、小型车载氨裂解分离系统(DSU)等氨氢融合新能源技术, 为解决氢能跨区域、高安全、低成本、大规模储运的重大难题提供有效途径.

1.3 氨氢融合新能源技术为我国高温制造、交通、发电等行业实现“双碳”达标提供颠覆性创新技术

氨和氢是两种仅有的具有工业应用价值的零碳燃料. 目前我国高温制造、交通、发电等行业使用的燃料主要是天然气、煤等化石能源, 是碳排放的主要来源^[11,12], 其中高温制造(建材、钢铁)、交通、发电行业的碳排放分别约占我国总碳排放的28%、10%、38%, 对低碳和零碳燃料及其工业燃烧技术提出了迫切和重大需求. 纯氢、纯氨和高比例混氢、混氢燃料在开放式高温工业窑炉和封闭式内燃机或燃气轮机中的工业燃烧技术研究在世界范围内尚处于起步阶段^[13], 并且硅酸盐建筑材料和金属材料的工业窑炉氨氢燃烧过程与材料成型成性过程协同控制技术在世界范围内还处于空白. 通过开发高温工业窑炉氨氢融合零碳燃烧技术、氨氢融合零碳交通运输装备技术、氨高温燃烧氮氧化物排放物控制技术 etc 颠覆性技术, 可以开辟氢能新的重大应用场景, 为我国高温制造、交通、发电等行业实现“双碳”达标提供颠覆性创新技术.

1.4 氨氢融合新能源科学技术是多学科交叉领域重大前沿

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, 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) 规模化低成本可再生能源绿氨制备是可再生能源到电能再到化学能的转换过程, 其核心学科领域是高效能源转化材料与储能技术和化学反应动力学, 涉及能源科学与工程、材料科学与工程、化学与化学工程、界面物理与化学等学科的交叉.

(2) 高温工业窑炉氨氢融合零碳燃烧技术是以氨氢为零碳燃料在高温工业窑炉中(硅酸盐材料高温窑炉、冶金工业窑炉等)实现高效稳定燃烧和材料成型成性协同优化控制的过程, 其核心学科领域是氨氢融合零碳燃烧科学技术和高性能硅酸盐材料与金属材料零碳制备技术, 涉及材料科学与工程、能源科学与工程、动力工程与工程热物理等学科的交叉.

(3) 氨氢融合零碳交通运输装备技术是以氨氢为零碳燃料在内燃机或燃气轮机中实现高效稳定复合燃烧和动力系统协同控制的过程, 其核心学科领域是氨氢融合内燃机复合燃烧动力学和新型动力系统协同控制理论, 涉及动力工程与工程热物理、化学与化学工程、交通运输工程等学科的交叉.

2 氨氢融合新能源交叉科学前沿颠覆性创新重点方向

2.1 绿氨低成本规模化制备技术

绿氨低成本规模化制备涵盖两种重大前沿技术^[8,14]：(1) 锂介导电化学氮还原合成绿氨，是一种“间歇式”电化学生成氨的过程^[14]，借助锂介导活化 N_2 ，促进 N_2 的解离。这种绿氨合成方式，是常温低压(1~2 MPa)电催化反应过程，其优势是氨的高产率和转换效率，可实现电化学生多池相联组装，但规模化制备绿氨的可能性还有待验证；(2) 高温固体电解质电化学-化学合成绿氨，是一种“固定床”型的电化学生成绿氨的新理念^[15]。这种“固定床”型的优势是：中温条件下，可使用淡水或海水蒸汽为质子源；通过全气相反应和全固态材料，催化产氨效率高；通过电化学生多池并联组装，易于规模化制氨。目前初步计算结果表明，由4个反应堆叠加形成的电化学生成氨反应系统(每个反应堆4万片电极、每片电极 5 cm^2 、电化学生产率为 $100\text{ mg}/(\text{h cm}^2)$)，绿氨年产能约为700 t。

绿氨低成本规模化制备的关键是催化方法学变革、高效催化剂开发，将引领以新型高效能源转化材料为核心的材料科学技术新方向和以高通量电化学反应动力学为核心的化学与化工新方向。

2.2 高温制造业氨氢零碳燃烧技术

高温制造业(建筑陶瓷、金属加工等)氨氢零碳燃烧技术涵盖以下核心技术：(1) 在宽功率和宽掺混比范围，氨的可靠点火与高效稳定燃烧技术；(2) 高温工业窑炉氮氧化物(NO_x)排放与氨逃逸的有效控制技术；(3) 在高温、高湿烟气氛下，氨燃料工业窑炉污染物快速响应、高精度、高灵敏度在线检测技术；(4) 利用烟气余热实现氨气在线部分裂解的氨氢混合燃烧技术；(5) 高温工业窑炉氨氢火焰与材料成型成性工艺过程协同控制技术^[9]。

通过高温工业窑炉氨氢融合零碳燃烧技术的研究与突破，引领以氨氢融合零碳燃烧科学技术为核心的动力工程与工程热物理学科新方向的发展，引领以高性能硅酸盐材料与金属材料零碳制备技术为核心的材料科学技术新方向的发展，同时氨氢融合零碳燃烧技术可以用于发电与供热行业“双碳”达标，引领能源科学技术新方向的发展。

2.3 氨氢融合零碳交通运输装备

氨氢融合零碳交通运输装备涵盖以下核心技术：(1) 氨氢融合燃料重整与供给技术，包括预燃点火、氨裂解、氨喷射、氢分离、氢提纯等；(2) 氨氢融合零碳发动机创新技术，包括液态氨缸内直喷技术、进气无中冷/热废气再循环(EGR)技术、多源射流点火技术、车载氨裂解制氢/氨氢混合气技术、燃烧系统技术、缸内缸外协同排放控制技术、交叉灵活氨氢喷射策略技术等；(3) 氨氢融合零碳车辆创新

技术，包括高效率的整车动力与驱动系统构型性能优化技术、氨氢融合(混)动力系统构型技术、氨氢融合复合动力系统构型技术、氨氢融合复合动力底盘集成技术等^[8]。

交通运输装备发动机缸内直喷引燃技术除了预燃点火引燃外，压燃引燃也是途径策略之一。纯氨只有在大于35高压缩比的实验条件下才可以实现压燃，所以工程上一般采用柴油压燃来引燃氨。压燃引燃存在两个方面的难题：一是在这样高的压缩比下，工程实现上有一定困难；二是因柴油燃料含碳，难以实现净零排放，需要增加碳排放后处理装置。

通过对氨氢融合零碳交通运输装备技术的研究和突破，引领以氨氢融合内燃机复合燃烧动力学为核心的动力工程与工程热物理学科新方向的发展，引领以氨氢融合新型动力系统协同控制理论和DSU为核心的交通运输工程学科新方向的发展。

2.4 航空发动机和燃气轮机氨氢零碳燃烧技术

航空发动机氨氢零碳燃烧技术涵盖以下核心技术：(1) 机载氨轻质高效裂解技术，包括高性能催化剂与等离子体协同裂解、快速冷启动、富燃等离子体预热裂解、高温蜂窝催化剂快速裂解、氨氢快速分离技术等；(2) 氨氢航空发动机零碳、低 NO_x 燃烧技术，包括新型燃烧组织与燃烧室设计、 NO_x 排放控制、反应动力学过程高分辨测试和高精度建模等；(3) 氨氢航空发动机在极端条件下的等离子体点火助燃技术。

燃气轮机氨氢零碳燃烧技术涵盖以下核心技术：(1) 燃气轮机纯氧氢燃烧先进循环系统优化设计；(2) 氨氢燃气轮机干法低排放微混燃烧技术(DLE)；(3) 富燃-猝熄-贫燃(RQL)技术在氨氢燃气轮机中的创新发展，包括利用燃气轮机排烟温度将液氨气化预裂解、开发氨裂解燃烧一体化技术、利用燃烧室的高温对氨气进行预裂解、解决 NO_x 排放和燃烧室冷却的难题^[9]。

通过航空发动机和燃气轮机氨氢零碳燃烧技术的研究和突破，引领高端装备零碳与低碳重大前沿技术的发展。

3 加快氨氢融合新能源发展的政策建议

3.1 将氢能纳入能源战略规划

建议将氢能纳入我国新能源体系。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。

3.2 加快启动“西氨东输”工程

液氨已有长距离管道运输成熟技术，美国海湾中央液氨

管道全长3057公里、已运行50年;俄罗斯陶里亚蒂至乌克兰奥德萨液氨管道全长2471公里、已运行40年,每年输运液氨130~300万吨^[9,16]。我国现有天然气输运管道78万公里(每百公里造价2.01亿人民币)^[17],但目前仅有液氨输运管道161.7公里(每百公里造价2.24亿人民币)^[18]。我国西部可再生能源丰富,可建设大规模廉价绿氢绿氨生产基地。建议国家通过财政支持和政策引导,组织全国优势科研和产业力量联合攻关,建设从西部到东部的液氨管道输运网络,加快启动“西氨东输”工程,以满足我国东部、南部对氨氢新能源的迫切和重大需求。

3.3 加快启动“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^[19],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^[20]。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。

致谢 中国科学院-国家自然科学基金委学科发展战略研究联合项目(L2224040)和国家自然科学基金委重大研究计划(92063000)资助。感谢项目专家组成员南策文院士、何雅玲院士、成会明院士、赵东元院士、谢在库院士、邹志刚院士、李应红院士、郑津洋院士、程一兵教授、苏宝连教授对本项目的指导。

推荐阅读文献

- 1 He Y L, Li Y S. Frontiers and challenges in hydrogen energy (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 2113–2114 [何雅玲, 李印实. 氢能技术科技前沿与挑战. 科学通报, 2022, 67: 2113–2114]
- 2 Pu L, Yu H S, Dai M H, et al. Research progress and application of high-pressure hydrogen and liquid hydrogen in storage and transportation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 2172–2191 [蒲亮, 余海帅, 代明昊, 等. 氢的高压与液化储运研究及应用进展. 科学通报, 2022, 67: 2172–2191]
- 3 Cao J W, Tan X F, Geng G, et al. Current status and prospects of hydrogen storage and transportation technology (in Chinese). *Acta Petrol Sin Petrol Proc Sec*, 2021, 37: 1461–1478 [曹文军, 覃祥富, 耿嘎, 等. 氢气储运技术的发展现状与展望. 石油学报(石油加工), 2021, 37: 1461–1478]
- 4 Ren X, Dong L, Xu D, et al. Challenges towards hydrogen economy in China. *Int J Hydrogen Energy*, 2020, 45: 34326–34345
- 5 Aziz M, Wijayanta A T, Nandiyanto A B D. Ammonia as effective hydrogen storage: A review on production, storage and utilization. *Energies*, 2020, 13: 3062
- 6 MacFarlane D R, Cherepanov P V, Choi J, et al. A roadmap to the ammonia economy. *Joule*, 2020, 4: 1186–1205
- 7 Morlanés N, Katikaneni S P, Paglieri S N, et al. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies. *Chem Eng J*, 2021, 408: 127310
- 8 Liu H. Ammonia synthesis catalyst 100 years: Practice, enlightenment and challenge. *Chin J Catal*, 2014, 35: 1619–1640
- 9 Bartels J R. A feasibility study of implementing an ammonia economy. Master Dissertation. Ames: Iowa State University, 2008
- 10 Li X G. Status and development of hydrogen preparation, storage and transportation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 425–436 [李星国. 氢气制备和储运的状况与发展. 科学通报, 2022, 67: 425–436]
- 11 Xu B, Zhong R, Hochman G, et al. The environmental consequences of fossil fuels in China: National and regional perspectives. *Sustain Dev*, 2019, 27: 826–837
- 12 Wu Q, Tu K, Zeng Y F. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1884–1898 [武强, 涂坤, 曾一凡. “双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考. 科学通报, 2023, 68: 1884–1898]
- 13 Cardoso J S, Silva V, Rocha R C, et al. Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines. *J Clea Prod*, 2021, 296: 126562
- 14 Suryanto B H R, Matuszek K, Choi J, et al. Nitrogen reduction to ammonia at high efficiency and rates based on a phosphonium proton shuttle. *Science*, 2021, 372: 1187–1191
- 15 Zheng J, Jiang L, Lyu Y, et al. Green synthesis of nitrogen-to-ammonia fixation: Past, present, and future. *Energy Environ Mater*, 2022, 5: 452–457
- 16 Leighty W C, Holbrook J H. 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 Proc*, 2012, 29: 332–346
- 17 Wang X Q, Wang B Q, Wang B, et al. The current situation and development trend of China's long distance natural gas pipeline (in Chinese). *Petrol Plan Design*, 2018, 29: 1–6 [王小强, 王保群, 王博, 等. 我国长输天然气管道现状及发展趋势. 石油规划设计, 2018, 29: 1–6]

- 18 Chen W Y. Leaking risk analysis and countermeasure research of liquid ammonia long-distance pipelines (in Chinese), Master Dissertation. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2011 [陈文艳. 液氨长输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]
- 19 Salam M A, Khan S A. Transition towards sustainable energy production—A review of the progress for solar energy in Saudi Arabia. *Energy Explor Exploitation*, 2018, 36: 3–27
- 20 Nayak-Luke R M, Forbes C, Cesaro Z et al. Chapter 8—Techno-economic aspects of production, storage and distribution of ammonia. In: *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*. Cambridge: Academic Press, 2020. 191–207

Summary for “氨氢融合新能源交叉科学前沿战略研究”

A strategic study of ammonia-hydrogen new energy interdisciplinary science frontiers

Li Zhang^{1†*}, Bofei Xue^{2,3†*}, Yuxin Liu^{2,3}, Yu Wang^{1,2,3}, Yun Wu⁵, Hua Zhang⁶, Xinchun Yang⁷, Shuai He^{2,3}, San Ping Jiang^{2,3}, Jun Li^{2,3,4} & Qingjie Zhang^{1,2,3*}¹ State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;² Foshan Xianhu Laboratory, Foshan 528216, China;³ National Energy Administration Key Laboratory for Hydrogen and Ammonia-Hydrogen New Energy Technology, Foshan 528216, China;⁴ School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China;⁵ National Key Laboratory of Aerospace Power System and Plasma Technology, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;⁶ School of Mechanics, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China;⁷ Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China

† Equally contributed to this work

* Corresponding authors, E-mail: zhanglihye@whut.edu.cn; xuebofei@xhlab.cn; zhangqj@whut.edu.cn

In the last two decades, the world including China has made a significant progress in hydrogen energy, including the construction of hydrogen infrastructure, key materials and components, the development of fuel cell vehicle industries, etc. However, up to now, the development of the hydrogen energy industry worldwide still faces significant bottlenecks and difficulties related to large-scale storage, long distance transportation, and safety in distribution network. Therefore, a large-scale hydrogen energy application poses a significant challenge for the development of hydrogen energy industries.

This strategic study puts forward the interdisciplinary science frontiers 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 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 liquified easily at -33°C 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, Republic of Korea, the Netherlands, Norway, Australia, etc. China also puts forward a plan to include hydrogen and ammonia as energy storage vectors.

Developing high-temperature industrial kiln ammonia-hydrogen zero-carbon combustion technology, ammonia-hydrogen zero-carbon transportation equipment technology, ammonia 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.

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.

In this paper, four 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 and marine applications; ammonia-hydrogen zero-carbon combustion technologies for aircraft engines and gas turbines. Critical science and technology challenges in these areas are also discussed.

This paper also puts forward deliberated 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.

ammonia-hydrogen combination, new energy, interdisciplinary science frontiers, strategic studydoi: [10.1360/TB-2023-0531](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0531)