

特色专题

2024年绿氢制储运技术研究热点回眸

王旭升^{1,2}, 邹建新^{1,2,3*}, 林羲^{1,2}, 胡志刚^{1,2}, 丁文江^{1,2,3*}

摘要 2024年,氢能技术产业迅猛发展,取得了多项突破性进展。在制氢方面,大规模绿氢示范项目不断增加,碱性电解槽成本逐渐下降,固体氧化物电解和质子交换膜电解等高效电解技术性能进一步提升,通过电极材料的优化,电解持续效率逐渐增加,膜电极运行寿命不断延长。在储运氢方面,除传统高压气态和液氢外,金属氢化物储氢、有机液态储氢、氨/甲醇等新型氢储运方式的技术成熟度逐渐提高。一方面,镁基合金、钛基合金等金属储氢技术的循环寿命及储氢效率进一步提升,同时通过规模化发展进一步降低了氢储运成本;另一方面,绿氨和绿色甲醇项目发展迅速,成为推动能源转型和工业脱碳的重要举措。未来,随着技术的持续创新,氢能将在交通、工业和大规模长周期储能等多个领域发挥更重要的作用,为碳中和目标的实现提供有力支持。

关键词 绿氢;电解制氢;储运氢;技术成熟度;碳中和

当前,全球氢能产业迅速发展,世界各主要工业强国根据自身特点积极制定新的氢能发展战略目标,都将氢能放在各自国家能源战略布局的首位^[1]。为实现“碳中和经济体”的目标,欧盟在《欧洲绿色协议》中首次提出推动可再生能源与氢能的协同发展;美国作为较早将氢能与燃料电池纳入能源战略的国家之一,在《全面能源战略》中将氢能列为关键技术,计划到2050年实现工业和交通领域的超低碳及零碳制氢目标;日本在《2050能源环境技术创新战略》和《氢能基本战略》中,将“氢能社会”的建设定位为核

心发展方向。中国近年来通过出台《“十四五”国家科技创新规划》《氢能产业标准体系建设指南(2023版)》《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》《中华人民共和国能源法》等政策及法规文件,明确氢能领域的发展目标、重点任务与保障措施,积极推进氢能行业的标准化和规范化。

图1为未来典型氢经济产业链示意,在推动氢能大规模应用的进程中,关键材料的研发与氢能转化效率的提升至关重要。而开发稳定高效的氢-电/电-氢转换催化剂,发展安全、可靠、高效的氢储运新型材料与技术是实现氢能技术高质量发展的核心^[2-3]。在催化剂方面,研发更高效、稳定且低成本的材料能够提高氢能生产与利用效率并保持其经济性。在氢储运装置材料上,需寻找具备良好安全性、耐用性和轻量化的材料,以确保氢气的安全、高效存储与运输。对于储氢材料,则需开发具有更优氢气

1. 上海市氢科学重点实验室&上海交通大学氢科学中心, 上海 200240
2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240
3. 上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心&金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240

收稿日期:2024-12-25;修回日期:2024-12-31

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB3803700);国家自然科学基金项目(52171186,52401386)

作者简介:王旭升,助理研究员,研究方向为氢储运系统控制及优化,电子信箱:wangxs199@sjtu.edu.cn;邹建新(通信作者),教授,研究方向为镁基能源材料开发与应用,电子信箱:zoujx@sjtu.edu.cn;丁文江(共同通信作者),教授,中国工程院院士,研究方向为先进镁合金材料开发与应用,电子信箱:wjding@sjtu.edu.cn

引用格式:王旭升,邹建新,林羲,等.2024年绿氢制储运技术研究热点回眸[J].科技导报,2025,43(1):47-61;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.12.01842

吸附/释放性能和更长使用寿命的创新型材料,以满足多种应用场景的灵活需求^[4-5]。在氢能应用端,2024年,氢燃料电池汽车需求迅速增长,特别是在物流车、公交车和重型卡车领域。随着技术进步,氢能

车企的生产能力和市场渗透率将持续提升。同时,绿氢在钢铁、电力和化工等高排放行业的应用不断增加,部分钢铁企业已开始用绿氢替代化石燃料,推动工业脱碳。

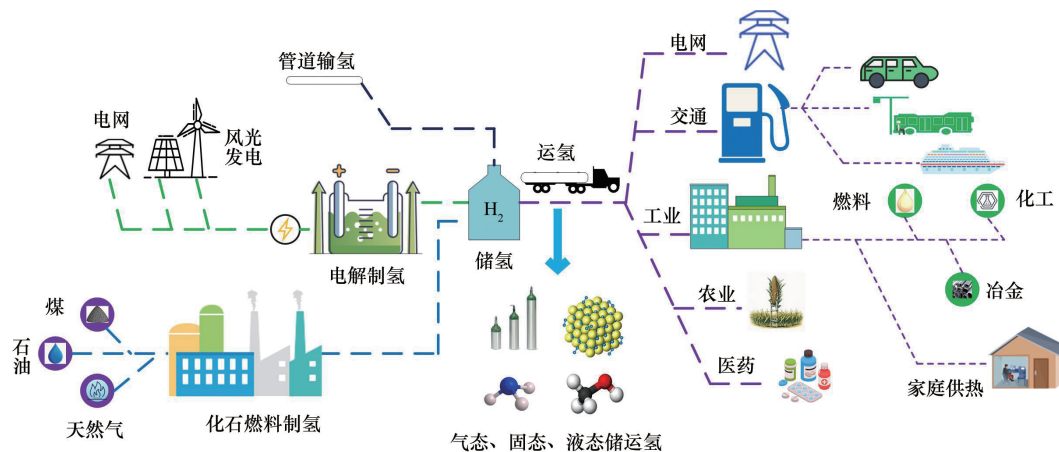


图1 典型氢经济产业链示意

1 电解制氢技术

在全球低碳能源转型及“双碳”目标的推动下,2024年电解制氢技术取得了显著的发展。主要集中在提升电解效率、降低电堆成本和开发先进材料上。碱性电解水(AWE)因其技术成熟度高、成本较低等特性,在可再生能源制氢系统中进一步推广。此外,其性能也随着电极材料的改进而提高。质子交换膜电解(PEM)则因其高效率 and 快速响应的特点备受关注,研究重点在于减少贵金属催化剂使用以降低成本,并提升膜材料的耐用性。固体氧化物电解(SOEC)技术因具有较高的电解效率(90%),且能与高温、工业余热等多种应用场景灵活集成,具有良好的发展潜力,但其目前成本较高且长期运行材料稳定性较差。2024年,绿氢(由可再生能源,如风能、太阳能电力驱动的电解水制氢)成为电解制氢领域的热点。中国西北地区(内蒙古自治区、新疆维吾尔自治区、甘肃省等)凭借丰富的风能和光伏资源,成为绿氢项目的主要聚集地,形成了多个大型示范项目。目前,主流的电解制氢技术有碱性电解水技术(ALK)、质子交换膜电解技术(PEMWE)、阴离子交换膜电解技术(AEMWE)及固体氧化物电解技术(SOEC),上述4种电解技术的工作原理、运行特性以及优劣势总结如表1^[6-8]所示。

1.1 碱性电解水制氢

碱性水电解(AWE)技术在绿氢生产中具有良好的发展潜力。然而,要实现AWE的广泛应用,仍有许多挑战需要克服,例如如何进一步提升其电解效率、降低电堆成本并发展大规模利用技术。目前,大规模部署AWE的核心瓶颈是电解系统成本居高不下,电解槽的成本占到AWE系统成本的1/2以上,这主要是因为电极和隔膜材料使用了大量镍和铱等贵金属材料。因此,如何在保障性能的前提下减少对贵金属材料的依赖,是未来推动AWE技术发展的重要方向^[9]。2024年,中国电解水制氢项目发展迅猛,多项碱性电解槽项目不断上马。例如中能建松原绿色氢氨醇一体化项目于2024年5月启动,标志着电解槽设备需求的显著增长。该项目预计采购64套 $1000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 碱性电解槽,总计320 MW,投资额高达296亿元,成为上半年最大规模的电解槽集中采购项目^[10]。2023年底,全球电解槽安装容量达到1.4 GW,预计到2024年底这一容量可能上升到5 GW,其中,中国电解槽产能将占全球总产能的近70%^[11]。

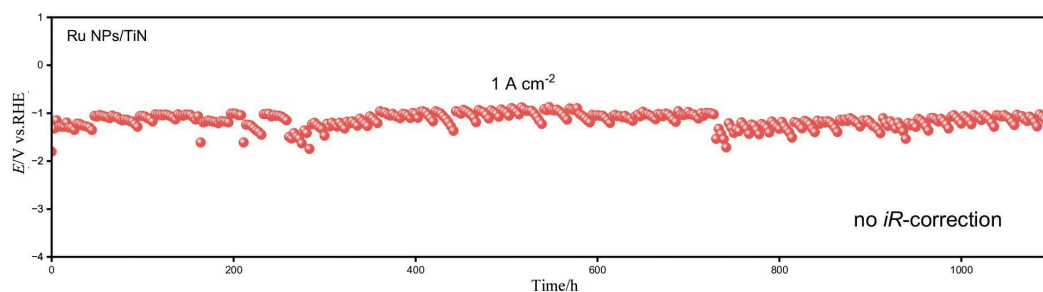
总体来看,2024年碱性电解技术朝大规模、高效率迈进。2024年10月18日,双良集团发布了其自主研发的 $5000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 碱性水电解槽。该电解槽具有最高电流密度可达 $10600 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$,电能消耗为 $4.7 \text{ kWh} \cdot \text{Nm}^{-3} \text{ H}_2$;在电流密度为 $3000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,其能耗

表1 不同电解技术对比

电解技术	运行温度/°C	运行压力/MPa	法拉第效率/%	阴极反应	阳极反应	技术成熟度 (TRL)	技术优势	技术劣势
ALK	65~100	0.2~1.0	62~82	$4\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^- + 2\text{H}_2+4\text{OH}^-$	$4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^-$	9级	<ul style="list-style-type: none"> · 低投资成本 · 高稳定性 · 技术成熟度高 · 运行寿命长 · 无需贵金属催化剂 	<ul style="list-style-type: none"> · 较低的电流密度 · 电解液具有腐蚀性 · 动态响应速度慢 · 对水中杂质较为敏感等
PEMWE	20~80	1.5~3.0	67~84	$4\text{H}^++4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2+4\text{e}^-+4\text{H}^+$	9级	<ul style="list-style-type: none"> · 电解效率较高 · 可实现高压下运行 · 可实现高电流密度下运行 · 快速响应等 	<ul style="list-style-type: none"> · 膜成本高 · 耐久性较低等
AEMWE	40~80	0.1~3.5	69~75	$4\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^- + 2\text{H}_2+4\text{OH}^-$	$4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^-$	6级	<ul style="list-style-type: none"> · 欧姆电阻低 · 良好的气体分离性 · 无需贵金属催化剂 · 电解效率较高等 	<ul style="list-style-type: none"> · 现有技术成熟度低 · 长期运行稳定性差 · 高碱性降解等
SOEC	650~1000	0.1~1.0	90~99	$2\text{H}_2\text{O}+4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2+2\text{O}^{2-}$	$2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2+4\text{e}^-$	7~8级	<ul style="list-style-type: none"> · 超高的电解效率 · 低成本催化剂 · 运行温度高 · 低运营成本等 	<ul style="list-style-type: none"> · 耐久性差 · 高投资成本等

降至 $3.875 \text{ kWh} \cdot \text{Nm}^{-3} \text{ H}_2$ 。此外,双良电解槽的最低运行负荷可降低至10%,且在此状态下氢气中的氧含量始终保持在1.50%以下^[12]。2024年5月17日,派瑞氢能推出了单体产氢能力为 $3000 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的碱性水电解制氢设备。与上一代技术相比,新款电解槽的运行电流密度提升了17%,槽体质量减轻了13%。此外,该制氢系统具备30%~110%的动态调节范围,且其能效符合国家一级标准^[13]。此外,2024年碱性电解技术成本不断降低,产能逐渐扩大,据报道,2024年ALK标段入围企业投标均价为1203元/kW,

较2023年的1366元/kW下降12%;价格区间为1042~1374元/kW(2023年为1255~1452元/kW),最高和最低报价分别较2023年下降5%和17%^[14]。在碱性电解制氢的技术方面,南开大学罗景山教授团队于2024年7月在《Nature Communications》上报道了在TiN载体上修饰Ru纳米粒子(Ru NPs/TiN)作为碱性制氢电催化剂的技术^[15],使用Ru NPs/TiN催化剂构建的阳离子交换膜电解槽,在 $10000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 电流密度下运行1000 h未出现性能衰退(图2^[15]),其性能优于商业电解槽设备。

图2 在 $10000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 下对 Ru NPs/TiN 进行计时电位法测量

1.2 质子交换膜电解制氢

质子交换膜电解(the proton exchange membrane water electrolysis, PEMWE)是有效利用可再生能源电解制氢的关键技术,可以实现在高电流密度下的可靠制氢。然而,要实现高效可靠的制氢技术并推动PEMWE电解池的大规模商业化部署,需要在电解池组件、材料和催化剂的设计和开发方面不断创新^[16]。为此,研究人员在堆栈和系统层面设定了多个降本增效的目标。为了达成这些目标,近期的研究主要聚焦于开发成本低、效率高且耐用的电解池材料及系统组件^[17]。

在PEM电解产业化发展方面,清能股份和阳光氢能分别发布了各自的大型PEM电解槽。清能股份推出的1 MW PEM电解槽因其能效表现突出,电能消耗在3.6~4.3 kWh·Nm⁻³ H₂,且体积仅为0.223 m³,具有较高的紧凑性,受到业内广泛关注。阳光氢能的300 Nm³·h⁻¹ PEM电解槽则具备3.5 MPa的高工作压力,并采用了创新的一体化结构和多功能流场设计,使设备的额定直流电耗低于4.15 kWh·Nm⁻³ H₂。该设备具有5%~110%的负荷调节范围,且负荷调节速率可达10%/s,特别适合需要快速动态性能调整的应用场景^[18]。此外,PEM电解制氢2024年价格降幅明显。据报道,2024年PEM电解槽标段的入围企业投标均价为6050元/kW,比2023年的7558元/kW下降了20%。价格区间为5350~6980元/kW,而2023年为5800~8980元/kW,最高和最低报价分别下降了22%和8%^[14]。在技术研发方面,中国科学技术大学俞书宏院士团队于2024年9月在《Nature Communications》上报道了一种兼具高活性、高稳定性的PEM非铈基阳极催化剂,提出了掺杂位点介导羟基溢流反应机制,提出的含氧空位的铬掺杂二氧化钌催化剂(Cr_{0.2}Ru_{0.8}O_{2-x}),其在酸性介质中表现出优异的氧析出反应(OER)性能:达到10 A·m⁻²的电流密度仅需170 mV过电位,并稳定运行2000 h以上。进一步将其装配至实际PEM电解池的阳极,达到10000 A·m⁻²的电流密度仅需1.77 V槽压,并稳定运行200 h以上,如图3^[19]所示。

1.3 阴离子交换膜电解制氢

阴离子交换膜电解(anion exchange membrane water electrolysis, AEMWE)具有优异的碱性耐受性

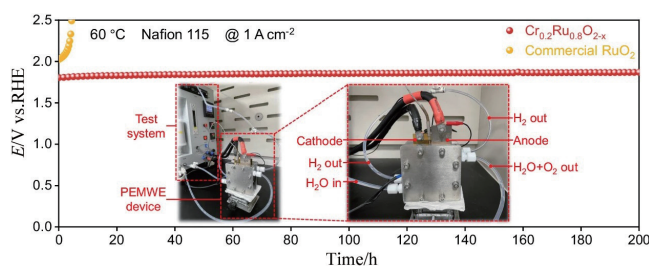


图3 采用Cr_{0.2}Ru_{0.8}O_{2-x}和商用RuO₂作为阳极催化剂的PEMWE装置的时间-电压曲线

和高导电性,同时使用非贵金属催化剂(如Ni、Fe、Co等),而不依赖于昂贵的贵金属(如Pt和Ir),这大大降低了电解槽的成本。然而,阴离子交换膜水电解制氢面临多个挑战。首先,阴离子交换膜(AEM)的碱性稳定性仍需提升,以保证其在长期运行中的导电性和机械强度。虽然近年来在AEM的化学结构和功能化方面取得了进展,但材料的耐久性仍然是一个关键问题^[20]。此外,AEMWE在纯水供给下仍然难以达到与碱性溶液相同的高电导率,限制了其整体效率。另一方面,尽管近年来非贵金属催化剂展示了优异的析氢和析氧性能,但在实际电解槽中的活性和稳定性仍不及贵金属催化剂。为应对这些挑战,研究者通过开发镍、铁、钴等基金属及其金属-载体相互作用来提高催化剂稳定性^[21]。同时,AEM与相应离聚物的结构优化和制备工艺也在不断改进,以进一步增强系统的整体性能和长效稳定性。尽管面临挑战,AEMWE在降低氢气生产成本方面的潜力使其成为未来可持续氢能技术发展的重要方向^[22]。

阴离子交换膜制氢在中国具有广阔的市场前景,例如2024年10月中国能建参与建设的南方电网基于阴离子交换膜电解水制氢的兆瓦级制加氢一体化示范站建设项目开工建设,该项目包含制氢规模为1.25 MW(250标准立方米每小时),其中包含1套1 MW和1套250 kW的AEM制氢系统^[23]。2024年11月,山西省吕梁市3 MW绿电离网制绿氢加氢一体化示范项目备案,规划建设总规模为3 MW分布式屋顶光伏配套400 Nm³·h⁻¹ AEM水电解制加一体化系统1套。据势银(TrendBank)统计,2024年1—11月,已发布AEM制氢电解槽新品数量达13个,已超2023年全年,并且单槽制氢量达100 Nm³·h⁻¹,系统制氢量达1000 Nm³·h⁻¹。目前国内拥有MW级AEM制氢系统

生产能力的企业有稳石氢能、卧龙英耐德、清能股份等^[24]。在技术方面,西湖大学孙立成院士团队于2024年8月在《Nature Catalysis》上报道了一种一步异相成核(HN)策略来生产镍铁基OER电催化剂CAPist-L1,如图4^[25]所示。在异质成核体系中引入不溶性纳米颗粒,形成了一层致密的中间层,有效地将催化剂牢固锚定于镍基底上,显著提升了催化剂的结构完整性、机械强度及化学稳定性。该设计实现了高达15200 h的水氧化活性和稳定性,并在1M KOH中达到了工业标准所需的10000 A·m⁻²电流密度。

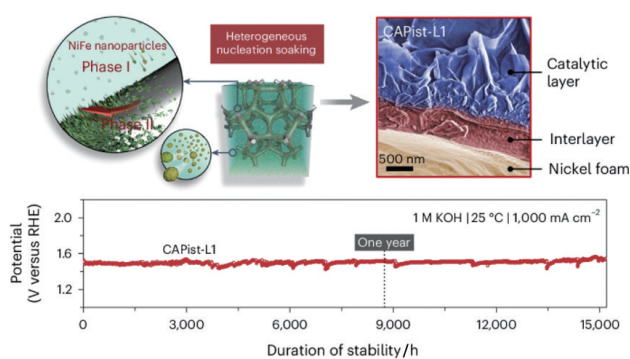


图4 制备 CAPist-L1 催化剂的示意及 CAPist-L1 催化剂长期耐久性测试

1.4 固体氧化物电解制氢

尽管 SOEC 具有高达 90% 的电解效率,但其大规模商业化发展仍需显著降低投资成本,并增强长时间运行稳定性。SOEC 的核心组成部分包括电解质、氧电极和燃料电极。现阶段,SOEC 广泛使用的材料为氧化钇稳定氧化锆(YSZ)电解质、钙钛矿氧电极如镧锶钴铁氧化物(La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-δ}, LSCF),以及由 Ni-YSZ 和 Ni-GDC 组成的金属陶瓷燃料电极,性能衰减是 SOEC 长时间运行面临的关键挑战^[26]。据报道,界面处的阳离子偏析现象,例如由于离子尺寸差异导致的锶在 LSCF 电极中的偏析,被认为是性能下降的主要原因。此外,界面处微孔生成、电解质分层,以及硅氧化物(SiO₂)和铬中毒等杂质污染问题也对电解槽的长期稳定运行带来挑战^[27]。目前,SOEC 技术在实验室条件或小规模应用中已相当成熟,但在工程化和大规模商业化方面仍存在较大差距。为实现大规模应用,需要改进现有的 SOEC 材料,开发高活性材料,并延长其使用寿命^[28]。

国外 SOEC 电解槽的发展一直处于领先状态。目前,国外领先 SOEC 企业的电堆可以利用电和热来制氢,将 88.5% 的低热值转化为直流电。生产 1 kg 氢气耗电 37.7 kWh,在与外部热源集成时,比低温 PEM 和 ALK 电堆的用电量少 30%。此外,国外该领域的代表企业目前已实现 SOEC 电堆的单电池衰减速率≤1%/1000 h。与国外相比,国内产业化进程较落后于国外,相比碱性和 PEM 技术,SOEC 仍处于研发示范阶段^[29]。在技术研发方面,中国科学院大连化学物理研究所包信和院士团队于 2024 年 7 月在《Joule》上报告了固体氧化物电解器(SOEC)阳极甲烷重整催化剂设计方面取得的新进展,采用原位溶出技术构建金属/氧化物活性界面,开发出高效且稳定的电化学重整催化剂,并结合多种原位物理化学表征手段,揭示了 SOEC 阳极上甲烷重整的反应机理^[30]。通过调控 La_{0.6}Sr_{0.4}Ti_{0.3}Fe_{0.7-x}Co_xO_{3-δ}(LSTFC2) 阳极钙钛矿中 B 位 Co/Fe 比例,优化过渡金属溶出能,实现在表面原位生成平均粒径 7 nm、密度 1087 个·μm⁻²的 CoFe 合金纳米颗粒,提供了丰富的活性位点以促进阳极 CH₄转化。同时,电驱动产生的溢流氧进一步促进甲烷的吸附与活化,并有效抑制积碳,从而提升催化剂的活性和稳定性。在 800°C 下, LSTFC2 阳极的 CH₄转化率达 86.9%,CO 选择性达 90.1%,可连续稳定运行 1250 h 无显著衰减。电化学测试显示,引入甲烷部分氧化重整后,CO 生产能耗从传统 SOEC 的 3.46 kWh·m⁻³降至 0.31 kWh·m⁻³,所开发的 SOEC 电化学性能如图 5^[30]所示。

2 新型储运氢技术

储运氢技术是制约中国氢能和燃料电池产业发展的关键技术瓶颈。由于氢气特殊的物理化学特性,使其难以储存且存在较大安全性挑战,同时储运氢成本较高,约占氢能产业链总成本的 30%~40%。而新型氢储运技术的推广将为能源转型和二氧化碳减排作出巨大贡献,并为能源行业带来重大变革机遇。随着新型氢储运技术的不断突破,储氢效率和储氢可靠性将显著提升。同时,新型储氢材料的研发也提高了储氢容量和充放氢速率,从而提升了储氢灵活性及储氢效率,刺激了氢能产业的加速成长。

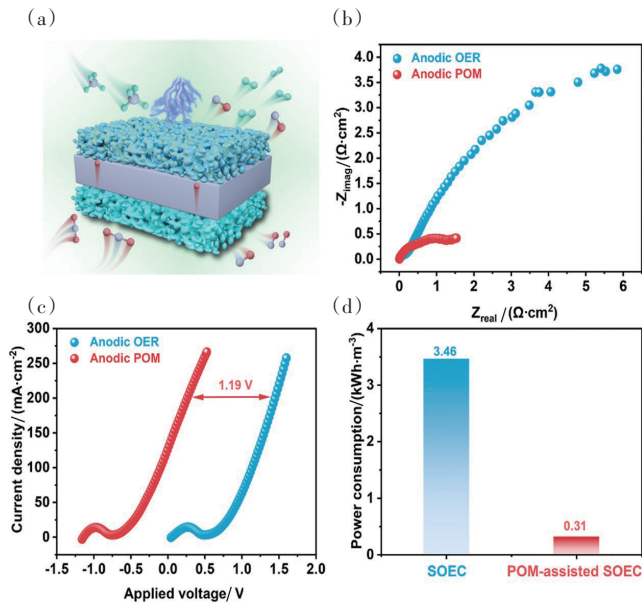


图5 SOEC电化学性能:(a) 部分氧化重整(The partial oxidation of methane, POM)辅助SOEC的示意;(b) 在开路电压(OCV)下阳极OER和阳极POM的电化学阻抗谱(EIS);(c) 阳极OER和阳极POM的电流-电压(J-V)曲线;(d) 传统SOEC与POM辅助SOEC在800°C下的耗电量

表2^[31]对比了多种新型氢储运技术和传统储氢技术的技术特点及其优劣。

2.1 金属氢化物储氢

金属氢化物储氢是通过金属/合金与氢气反应形成金属氢化物,氢气与金属的结合方式可以分为2种类型:一种是间隙氢化物,其中氢通过金属键占据间隙的四面体和/或八面体位置,如AB₅型(LaNi₅H₆)、AB型(TiFeH₂)、A₂B型(Mg₂NiH₄)、AB₂型(TiCr₂H₄)和AB₃型(LaNi₃H₅);另一类为非间隙氢化物,其中氢以离子键或共价键形式结合,例如镁基合金(MgH₂)和复杂氢化物(NaAlH₄)等^[32]。不同金属氢化物在氢吸附/解吸过程中表现出显著差异的氢储存密度和能耗,因此适用于多种氢能应用场景。例如,低温氢储存材料如钛基和钒基化合物适用于燃料电池发电或交通领域;高温氢储存材料如镁基化合物则更适合固体氧化物燃料电池储氢、氢冶金以及为燃气轮机提供氢源。特别是镁氢化物,凭借其高储氢密度和成本优势,未来有望广泛应用于大规模氢储存与运输。现阶段,金属氢化物储氢主要面临成本较高与能耗较大2个关键挑战。虽然储氢材料价格并不昂贵,但储氢系统整体包括压力容器、换热结构、阀门和管道等,使储氢系统复杂,成本高昂。此外,金属氢化物储氢是放热过程,需要及时排散掉反应放热从而加速放氢过程,所以需要开发适合不同储氢材

表2 多种储运氢技术对比

储运氢技术	运输温度/°C	运输压力/MPa	系统体积储氢密度/(g·L ⁻¹)	放氢温度/°C	技术优势	技术劣势
高压气态储运氢	室温	~20	~18	室温	<ul style="list-style-type: none"> 技术成熟 结构简单 充放氢速率高 能耗较低 	<ul style="list-style-type: none"> 储氢密度低 储运成本高 安全性低
液氢储运	-253	<1	40~60	室温	<ul style="list-style-type: none"> 储氢密度高 远距离运输成本低 	<ul style="list-style-type: none"> 氢液化能耗高 储氢容器要求高 易挥发
富氢液态化合物储运	室温	常压	40~60	180~400	<ul style="list-style-type: none"> 体积储氢密度高 安全性相对较好 可长期储存 对容器要求低 	<ul style="list-style-type: none"> 能耗高 放氢存在副反应 操作条件苛刻
固态储运	室温	常压	45~75	250~380	<ul style="list-style-type: none"> 体积储氢密度高 安全性好 能耗相对低 可长期储存 	<ul style="list-style-type: none"> 系统质量储氢密度相对较低 技术成熟度低

料的换热管路、鳍片结构以及床层优化技术^[33]。

近年来,中国固态储氢市场蓬勃发展,例如上海交通大学氢科学中心与上海氢枫能源联合发布了全球首台吨级镁基固态储运氢原理样车,氢运量为传统 20 MPa 高压长管拖车的 3 倍,安全性高,适用于加氢站、氢冶金等多种应用场景^[34]。近年来,固态储氢在产线建成、项目落地和订单达成等多个层面都有较大的进展。在室温钛基储氢材料方面,目前在吸放氢性能优化和材料结构改性方面已取得突破,通过元素掺杂(如 Mn、V、Zr、Cr)和化学改性, TiFe 系材料的活化温度和吸放氢温度显著降低,可实现室温吸放氢。南方电网广东广州供电局在南沙建成小虎岛电氢智慧能源站,这是国家重点研发计划的示范工程,也是国内首个采用固态储供氢技术的电网侧储能型加氢站。该项目以钛基固态储氢装置取代传统的氢压缩机、高压储罐和纯化系统,大幅降低单站建设成本。此外,2024 年初始,包头中科轩达新能源科技有限公司顺利完成了由朗玛峰创投领投的数千万元 A 轮融资,主要用于中科轩达在安徽省安庆布局建设年产 3000 t 固态储氢材料专业生产基地,项目建设已经全面展开,标志着钛基储氢材料逐步开始进入大规模应用^[35]。除低温钛基储氢外,高温镁基固态储氢材料也迎来迅猛发展,2024 年 9 月,江苏华镁时代科技有限公司成功运行了百吨级镁基固态储氢材料生产线^[36]。2024 年 11 月,全球首例大型镁基固态储氢设备从外高桥四期码头装船出运,标志着中国在解决氢气长距离、大规模运输等问题上取得重大突破,对氢气在各垂直领域的大规模应用和促进氢能产业整体的发展具有重要意义^[37]。

在固态储氢材料方面,目前的研究聚焦于材料改性以延长循环寿命、提升储氢能量效率及吸/放氢速率。复旦大学余学斌教授团队于 2024 年 4 月在《Nature Communications》报道了 MgH_2 与 CuNi 合金技术,实现稳定的太阳能驱动可逆储氢^[38]。研究结果表明, $Mg_2Ni(Cu)$ 的可逆生成有效结合了光热效应和催化效应,使局部热量直接作用于催化位点而无热损失。在 $35000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 辐照强度下, MgH_2 在 15 min 内完全脱氢。此外, $Mg_2Ni(Cu)$ 在循环脱氢和吸氢过程中保持了良好的稳定性,可逆储氢容量达 6.1 wt%, 容量保持率为 95%。图 6(a) 为高效的光热-催化太阳

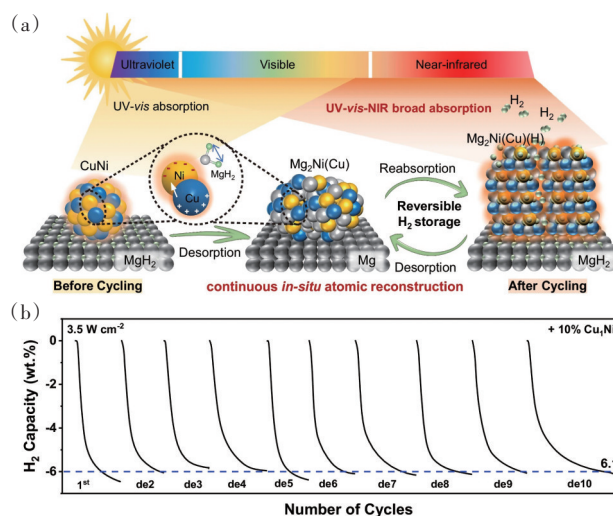


图 6 高效的光热-催化太阳能驱动的原位可逆储氢示意(a);光强为 $35000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时 Cu_1Ni_1 催化下 MgH_2 循环 H_2 脱附曲线(b)

能驱动的原位可逆储氢示意,图 6(b) 为光强为 $35000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时 Cu_1Ni_1 催化下 MgH_2 循环 H_2 脱附曲线^[38]。材料通过吸收光能产生热效应,进而加速氢气的吸附与脱附过程,光热效应与催化效应的协同作用显著提升了材料的储氢效率和循环稳定性。

在固态储氢系统方面,上海交通大学邹建新教授团队提出了一种新型镁基固态储氢装置,使用高温氢气作为传热介质,并通过模拟研究提出了操作参数和控制策略。其中氢气既是传热介质,又是反应物质,结果表明,储氢时,建议氢气入口温度为 473 K,氢气入口流量可设置为 $800\text{ NL}\cdot\text{min}^{-1}$;供氢时,氢气入口温度应设为 773 K,氢气出口压力应设置为 0 MPa。氢气直接加热型镁基储氢罐在工程应用中具有巨大的潜力,特别是与固体氧化物电解池(SOEC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)的结合应用。图 7^[39]展示了储氢罐与循环系统耦合的应用场景。在氢气储存中,SOEC 作为氢气的供应源,而镁基储氢罐则提供额外热源支持^[39]。镁基固态储运氢技术是氢储存的新兴方法,特别适用于长距离、大规模和长时间的氢气存储与运输。目前中国已率先突破了镁基固态储氢材料的批量生产难题,解决了使用过程中的诸多痛点和难点,并在氢冶金、氢储能、氢化工以及热电联供等领域进行了小规模探索,取得了良好的应用效果。镁基储氢材料在大规模产业化应用中面临放氢温度较高的问题,这导致氢化镁脱氢

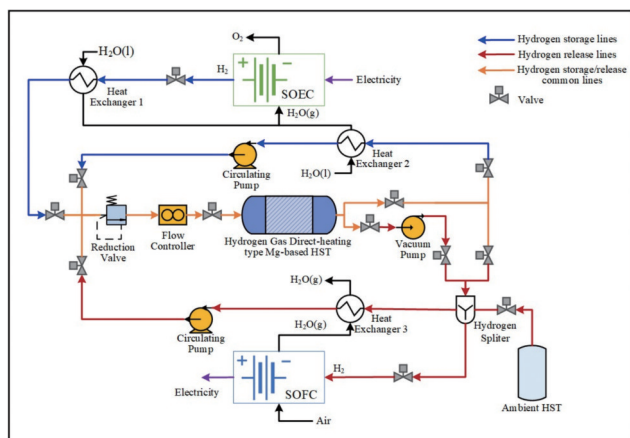


图7 氢气直接加热型镁基固态储氢系统与SOFC、SOEC耦合示意

过程能耗较大,从而降低了氢能利用的整体能效。此外,现有高性能镁基储氢材料的制备和加工成本偏高,且大容量储运氢系统的试验成本较大。成本效益是镁基储氢技术实现产业化的关键,需要进一步降低材料、工艺和系统运行成本,以确保市场竞争力。

2.2 有机液态储氢

有机液态储氢载体(liquid organic hydrogen carrier, LOHC)通过液态有机化合物的可逆加氢和脱氢反应实现氢气的存储与释放。常见的储氢载体有苯、甲苯、萘、N-乙基咪唑和二苄基甲苯等。理想的LOHC应具备较高的储氢能力,适宜的熔点、沸点、闪点、燃点和较低的吸放氢活化能,便于脱氢和氢气纯化,且成本低、可逆性能好,此外,还应具备低毒性和环境友好性^[40]。LOHC技术仍处于商业化初期,面临成本高、能耗大和氢气纯化工艺复杂等挑战。特别是在如何实现低温脱氢、高密度储氢和快速吸/放氢等工艺方面仍需克服。然而,LOHC能够在常温常压下利用现有的汽油/石油基础设施进行运输,有广泛应用前景,在未来大规模储能和长距离氢气运输方面具有较大竞争优势^[41]。

尽管有机液态储氢技术仍处于发展阶段,但在大规模、长距离储运氢方面的独特优势使其得到更多青睐。2024年Hydrogenious公司获7250万欧元用于支持有机液态储运氢技术的发展。Hydrogenious的LOHC技术通过“氢化”反应将氢气安全地储存在不易燃的热油(如苯甲)中。这种“氢油”可以通过传统的基础设施(如卡车、火车、驳船和油轮)进行运输,且不会发生氢气损失。与其他运输技术相比,这

种方法为大规模氢气运输到内陆地区提供了更加安全、简便的选择。到达目的地后,氢气通过化学脱氢过程从油中释放出来,供工业、发电或交通等领域使用。载体油在这一过程中不会消耗,可重复用于新的氢气存储和运输^[42]。

在催化剂载体方面,北京航空航天大学李想副教授团队于2024年9月在《Nature Communications》报道了一种用于有机液态储运氢的新型低成本钴基催化剂(Co-SAs/NPs@NC),通过简单的ZIF热解法合成钴单原子与纳米颗粒复合的催化剂,在碳酸丙烯酯(PC)中,Co-SAs/NPs@NC-950展现出最佳催化活性,产气速率达到 $1403.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,远超大多数已报道的非贵金属非均相催化剂,分别是商业化5% Pd/C和5% Pt/C催化剂产气速率的15倍和10倍,图8^[43]为85~110°C下多种非均相催化剂在有机溶剂中的产气速率比较,可见该研究所开发的新型催化剂能显著提升反应速率。

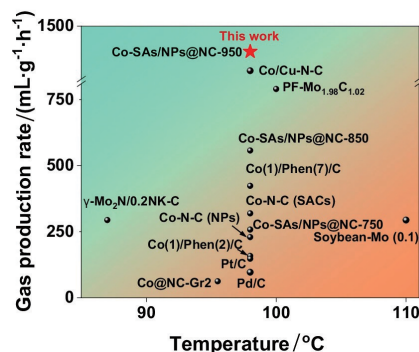


图8 85~110°C下多种非均相催化剂在有机溶剂中的产气速率比较

2.3 氨储运氢

氨气(NH_3)是氢气(H_2)存储和运输的理想载体,在温和条件下,它能够以液态存储,且具有比液氢更高的体积储氢密度。由于氨气在较低压力和较高温度下呈液态,其液化过程的能耗相对较低,且拥有更小、更轻的储存与运输器具。全球预计每年生产约150万t氨,并通过现有的海运、陆路、铁路和管道网络等进行运输与跨国交易^[44]。图9^[45]为基于绿氢利用的氨经济循环路径^[45],尽管氨具有较高的储氢密度和成熟的基础设施,展现出了大规模储运氢的潜力,但现阶段仍需克服一系列关键技术问题。例如,现有的氨合成和分解技术成本高、能源效率低。因此,开发高效、稳定的催化剂材料,发展新型氨合成技术,

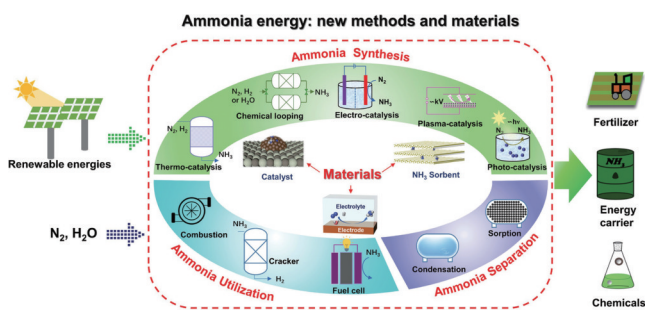


图9 基于绿氢利用的氨经济循环路径

对于降低投资成本以及提升能源效率至关重要^[46]。

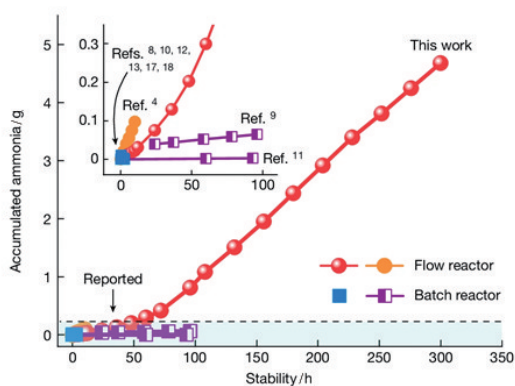
2024年,有关氨合成的研究众多,最具代表性的工作为丹麦科技大学 Nørskov 和 Chorkendorff 教授团队于2024年3月在《Nature》上在线报道了连续流电解池的设计方法,在常温常压下实现了氮气还原耦合氢气氧化的连续流电化学氨合成^[47]。该研究在对氨在电解液、气相和沉积层中的分布进行分析后发现,使用DG基电解液实现连续运行300 h,总产氨量达4.6 g,其中气相分布占比高达4.5 g。这是首次在该领域实现克级氨产量,且超过95%的氨分布于气相,而非残留在复杂的有机电解液中。此外,DG基

电解液在实现300 h稳定运行的同时,达到17%的能量效率(EE),均为当前文献报道的最佳性能,图10为实现长循环锂介导合成氨的研究思路^[47]。

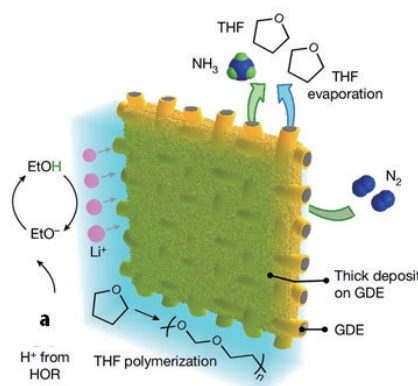
在氨裂解方面,中国科学院福建物质结构研究所王要兵研究员团队于2024年3月在《JACS》上提出了一种基于时间解耦氨分解的新型可充电 Zn-NH₃ 电池,实现高效的氨氢转化。在该系统中,氨在阴极充电时被氧化为氮气,从而实现外部电能的转化和存储;在放电过程中,水则在阴极被还原为氢气,伴随电能的释放。该循环过程无需复杂的分离与纯化,即可高效连续地产生氢气。通过采用具备氨氧化反应(AOR)和析氢反应(HER)双功能催化特性的 Mo₂C/NiCu@C 催化剂,开发了可充放电的 Zn-NH₃ 电池。该电池表现出91.6%的 NH₃ 到 H₂ 的法拉第效率(FE),在 200 A·m⁻² 的电流密度下能够稳定运行900个循环(约300 h),实现了氨向氢的高效转化。图11为传统的直接氨电解氨分解和 Zn-NH₃ 电池的结构图对比^[48]。

2.4 甲醇储运氢

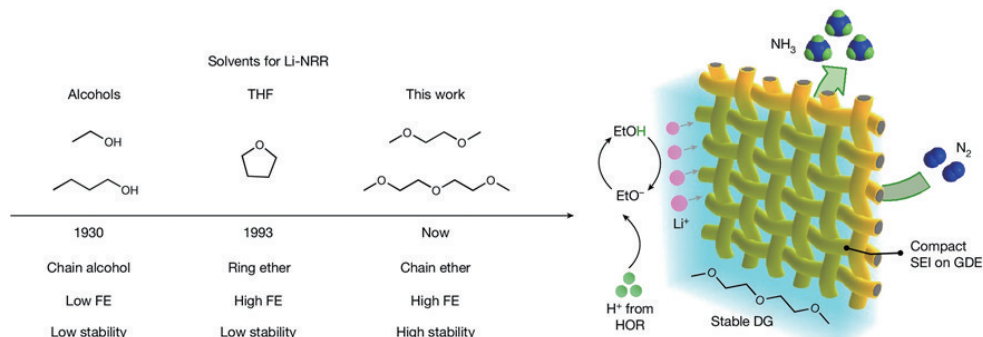
液态甲醇是一种优异的储氢载体,具有能量密度高(储氢密度12.5wt%)、来源广泛、可再生等优势。



(a) 间歇反应器与连续流反应器合成氨稳定性对比

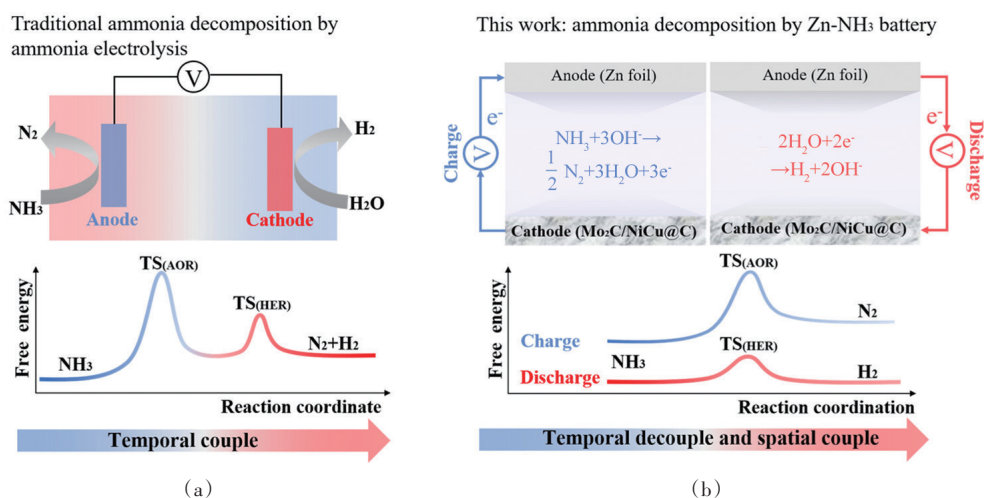


(b) 锂介导合成氨容积概述



(c) 不同溶剂长期连续氨合成的比较

图10 实现长循环锂介导合成氨的研究思路

图 11 传统的直接氨电解分解示意(a)和Zn-NH₃电池示意(b)

它可由生物质、天然气或二氧化碳转化制备,环境友好性强。同时,甲醇的氢碳比高,能够提供丰富的氢资源。此外,液态甲醇在常温常压下稳定储存、运输非常便捷、安全性高,并可以利用现有的燃料输运设施满足各终端对清洁能源的需求。因此,甲醇在储氢和能源转化领域具有重要的应用潜力,是实现清洁能源发展的理想选择^[49]。若能充分发挥甲醇资源的区位优势,将显著促进甲醇在制氢、储氢及运氢产业链中的深入应用,推动相关体系的持续完善。同时,这一过程可从源头实现零碳目标,并有效解决氢气储存与运输的关键难题^[50]。

2024年,中国绿色甲醇项目蓬勃发展。据统计,截至2024年8月底,中国绿色低碳甲醇项目已累计超过90项(含建成、在建、筹备及签约项目)。其中有66个项目披露了甲醇产能,合计产能超过2400万t,合计产能约是2023年底的2.3倍^[51]。在甲醇制氢技术方面,中国科学院大连化学物理研究所王峰研究员团队于2024年8月在《JACS》上在线报道了一种新型协同催化机制,其中,同种金属的单原子与簇团协同作用,分别充当空穴与电子的集聚中心,参与氧化与还原半反应^[52]。该催化体系成功实现甲醇脱氢,同时联产氢气与甲醛,量子产率高达87%,催化剂制备示意如图12^[52]所示。

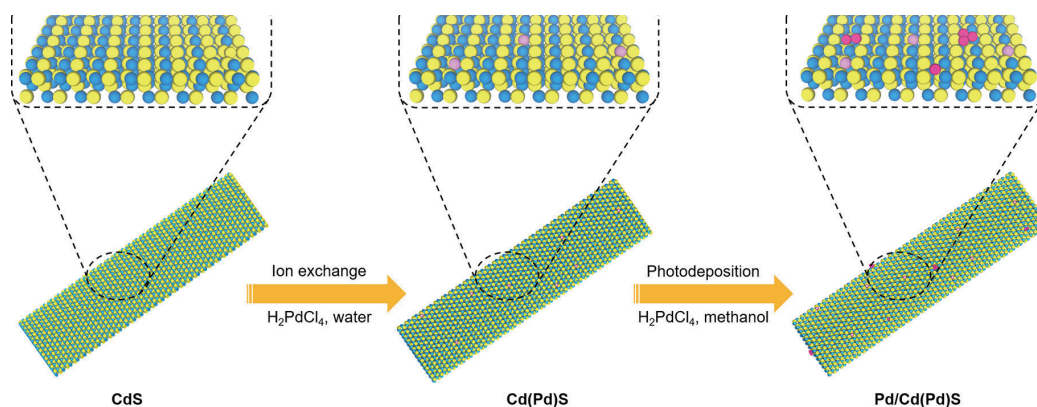


图 12 在 CdS 光催化剂上负载原子分散 Pd(Pd1)和团簇 Pd 的制备过程示意

3 氢能应用技术

2024年,绿氢技术进入了大规模应用的关键阶段。在交通领域,氢燃料电池可为陆地、水上、航空和铁路等多种交通工具提供动力。这种由燃料电池

驱动的交通运输工具可提高其续航里程,并较传统内燃机更为环保;在化工行业,氢气助力钢铁生产的脱碳转型,并可作为合成氨、甲醇及氢化植物油等化学品的重要原料;在氢储能领域,结合先进储氢及电网调控技术,能有效实现大规模绿电储存。此外,氢

气还可应用在农业、医疗、保健和美容等领域。

在燃料电池的应用中,根据中商产业研究院发布的《2024—2029年中国氢燃料电池市场调研分析及投资风险研究预测报告》显示,2023年,中国氢燃料电池系统的销售输出功率达1016.5 MW,2019—2023年复合年增长率达59.85%。据预测,2024年中国氢燃料电池系统的销售输出功率将达1707.1 MW。2024年7月,黑龙江省大庆市40 MW氢燃料电池发电项目备案通过。项目建成后,装机容量将是国内第1、全球第2的氢能调峰电站。项目整体规划40 MW发电能力,具备年产发电3.2亿kWh调峰能力电站,项目建成后预计15年内年均上网小时数约为8000 h,年上网电量为3.2亿kWh^[53]。在交通行业的应用中,根据中国汽车工业协会数据显示,2024年1—9月,全国氢燃料电池汽车产销量分别为4188辆和4133辆,同比增长约40.6%和44%^[54]。此外,2024年绿氢作为还原剂逐步进入钢铁行业。据报道,林德公司计划开发全球首座大型绿色钢铁厂,预计投资约1.5亿美元。该项目将在瑞典北部博登建设并运营一个现场空分装置(ASU),采用先进氢气生产回收技术,相比传统炼钢方法,碳排放可减少高达95%^[55]。绿氢是实现“双碳”目标的重要手段,在中国有着广阔的应用前景,根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》,预计到2050年氢能在中国能源体系中的占比约为10%,氢气需求量接近6000万t,燃料电池车500万辆,燃料电池系统550万套,固定式电源/电站2万座,年经济产值达到12万亿元^[56]。

4 “制-储-运”氢一体化集成技术

发展“制-储-运”氢一体化集成技术是实现氢能大规模应用的重要方向。通过将制氢、储氢和运输环节高效集成,不仅能显著提升氢能利用效率,还可降低氢产业链的能量损失和成本。其中,制氢技术包括电解水、甲醇重整等多种高效方式;储氢环节则涵盖气态、液态和固态储氢技术;运输方面则注重高效、安全的长距离运输能力。通过高效集成设计,有助于构建完整的氢能产业链,为清洁能源体系提供强有力的支撑^[57]。

上海交通大学邹建新教授团队于2024年10月在《Energy & Environmental Science》上报道了一种基于光伏发电-SOEC电解制氢-镁基固态储运氢的“制-储-运-用”氢技术,如图13^[58]所示。在制氢环节,光伏发电(PV)与SOEC结合的技术是一种高效且灵活的绿色制氢解决方案。在储运环节,镁基固态储氢技术凭借其优异性能在工厂应用中备受关注,其具备储氢密度高、常温低压氢储运、安全性强以及规模化成本低等优势,是解决氢能产业大规模储存与安全运输瓶颈的关键途径。该研究基于SOEC和镁基固态储氢系统的工程运行数据,全面评估了其技术可行性、热力学性能、经济可行性和环境影响,结果表明,目前中国光伏-SOEC制氢平准化成本(LCOH)预计每千克H₂为3.30~5.80美元,随着技术的进一步发展,到2050年将降至每千克H₂为1.20~1.73美元^[58]。

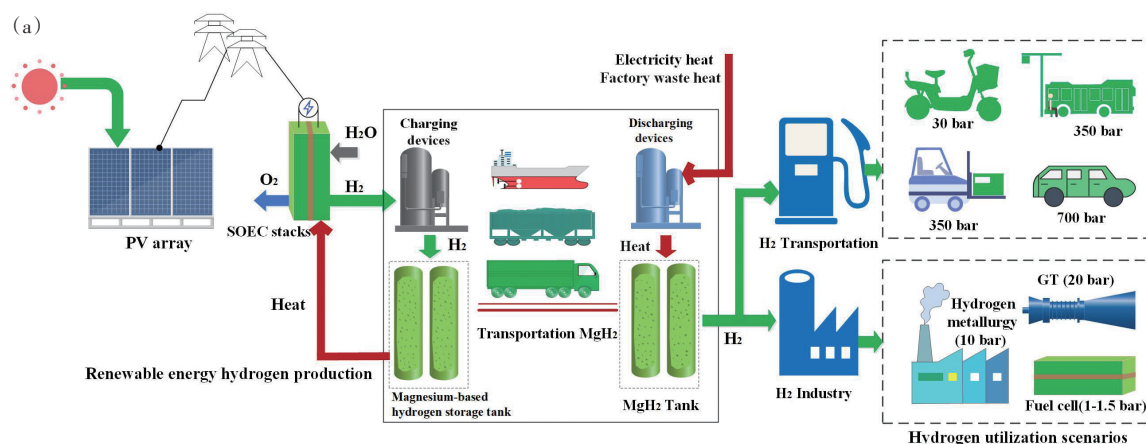


图13 基于光伏发电-固体氧化物电解-镁氢化物基氢气储运氢(PV-SOEC-MgH₂)的典型绿色氢气生产、储存、运输和利用路线(a)及PV-SOEC-MgH₂中的热集成结构(b)

- gen Energy, 2024, 82: 583–599.
- [8] Chu C Y, Wu K, Luo B B, et al. Hydrogen storage by liquid organic hydrogen carriers: Catalyst, renewable carrier, and technology: A review[J]. Carbon Resources Conversion, 2023, 6(4): 334–351.
- [9] Dash S, Arjun Singh K, Jose S, et al. Advances in green hydrogen production through alkaline water electrolysis: A comprehensive review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 83: 614–629.
- [10] 2024 年上半年氢能产业跟踪报告[R/OL]. (2024-09-26) [2024-12-31]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H301_AP202409-271640069432_1.pdf.
- [11] Niu Y. China set to lead global electrolyser installations in 2024[EB/OL]. (2024-10-10)[2024-12-31]. <https://dialogue.earth/en/digest/china-set-to-lead-global-electrolyser-installations-in-2024/>.
- [12] 双良集团自主研发 5000 Nm³/h 碱性电解槽发布[EB/OL]. (2024-11-11)[2024-12-31]. <https://www.nationalee.com/newsinfo/7738817.html>.
- [13] 单体产氢量 3000 Nm³/h 水电解制氢装备在邯郸下线[EB/OL]. (2024-05-17)[2024-12-31]. <https://www.stdaily.com/index/kejixinwen/202405/4698ee592d38498dacfcca7b5a0c-18b7.shtml>.
- [14] 中能建制氢电解槽集采候选人公布, 关注入围企业[R/OL]. (2024-11-01)[2024-12-31]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202411011640658731_1.pdf?1730452770000.pdf.
- [15] Zhao J, Urrego-Ortiz R, Liao N, et al. Rationally designed Ru catalysts supported on TiN for highly efficient and stable hydrogen evolution in alkaline conditions[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 6391.
- [16] Urbano E, Pahon E, Yousfi-Steiner N, et al. Accelerated stress testing in proton exchange membrane water electrolysis—critical review[J]. Journal of Power Sources, 2024, 623: 235451.
- [17] Sezer N, Bayhan S, Fesli U, et al. A comprehensive review of the state-of-the-art of proton exchange membrane water electrolysis[J]. Materials Science for Energy Technologies, 2025, 8: 44–65.
- [18] 2024 上半年 PEM 制氢市场发展迅猛, 动氢氢能产品优势明显 [EB/OL]. (2024-07-29) [2024-12-31]. <https://www.htech360.com/a/36203>.
- [19] Shen Y, Zhang X L, Qu M R, et al. Cr dopant mediates hydroxyl spillover on RuO₂ for high-efficiency proton exchange membrane electrolysis[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 7861.
- [20] Liu C, Geng Z, Wang X K, et al. Development of advanced anion exchange membrane from the view of the performance of water electrolysis cell[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 90: 348–369.
- [21] Mulk W U, Aziz A R A, Ismael M A, et al. Electrochemical hydrogen production through anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE): Recent progress and associated challenges in hydrogen production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 94: 1174–1211.
- [22] Miller H A. Green hydrogen from anion exchange membrane water electrolysis[J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2022, 36: 101122.
- [23] 南方电网首个兆瓦级阴离子交换膜制氢示范项目开工 [EB/OL]. (2024-11-06)[2024-12-31]. <https://m.bjx.com.cn/mnews/20241106/1409148.shtml>.
- [24] AEM 产业化起步: 前景广阔仍待实践大考 [EB/OL]. (2024-12-13) [2024-12-31]. <https://mp.weixin.qq.com/s/my-9oG4oIVyAjiB5NnlSqQ>.
- [25] Li Z H, Lin G X, Wang L Q, et al. Seed-assisted formation of NiFe anode catalysts for anion exchange membrane water electrolysis at industrial-scale current density[J]. Nature Catalysis, 2024, 7: 944–952.
- [26] Hauch A, Küngas R, Blennow P, et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis[J]. Science, 2020, 370(6513): eaba6118.
- [27] Wolf S E, Winterhalder F E, Vibhu V, et al. Solid oxide electrolysis cells—current material development and industrial application[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(34): 17977–18028.
- [28] Gohar O, Khan M Z, Saleem M, et al. Navigating the future of solid oxide fuel cell: Comprehensive insights into fuel electrode related degradation mechanisms and mitigation strategies[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2024, 331: 103241.
- [29] 2024 会是 SOEC 产业化的破局之年吗? [EB/OL]. (2024-02-29) [2024-12-31]. <https://mp.weixin.qq.com/s/pIB-pNYOcqVdB0rw9nbKLYg>.
- [30] Guo Y G, Wang S, Li R T, et al. In situ exsolved CoFe alloy nanoparticles for stable anodic methane reforming in solid oxide electrolysis cells[J]. Joule, 2024, 8(7): 2016–2032.
- [31] 邹建新. 氢气储存和运输[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.

- [32] Rusman N A A, Dahari M. A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(28): 12108–12126.
- [33] Ren L, Li Y H, Zhang N, et al. Nanostructuring of Mg-based hydrogen storage materials: Recent advances for promoting key applications[J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1): 93.
- [34] Ren L, Li Y H, Lin X, et al. Promoting hydrogen industry with high-capacity Mg-based solid-state hydrogen storage materials and systems[J]. *Frontiers in Energy*, 2023, 17(3): 320–323.
- [35] 中科轩达布局建设国内最大固态储氢材料专业生产基地[EB/OL]. (2024-06-19) [2024-12-31]. <http://www.zkxd-newenergy.com/display/396454.html>.
- [36] 全球首条百吨级镁基固态储氢材料产线在我国试车成功[EB/OL]. (2024-11-09) [2024-12-31]. <https://www.htech360.com/a/37489>.
- [37] 全球首例大型固态储氢设备出海[EB/OL]. (2024-11-21). <https://m.bjx.com.cn/mnews/20241121/1412249.shtml>.
- [38] Zhang X Y, Ju S L, Li C Q, et al. Atomic reconstruction for realizing stable solar-driven reversible hydrogen storage of magnesium hydride[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2815.
- [39] Shao L F, Lin X, Bian L S, et al. Engineering control strategy of hydrogen gas direct-heating type Mg-based solid state hydrogen storage tanks: A simulation investigation[J]. *Applied Energy*, 2024, 375: 124134.
- [40] Lin A, Bagnato G. Revolutionising energy storage: The latest breakthrough in liquid organic hydrogen carriers[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 63: 315–329.
- [41] Ali A, Shaikh M N. Recent developments in catalyst design for liquid organic hydrogen carriers: Bridging the gap to affordable hydrogen storage[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 78: 1–21.
- [42] IPCEL. Hydrogenious LOHC receives multi-million grant for Green Hydrogen @ Blue Danube[EB/OL]. (2024-07-15) [2024-12-31]. <https://hydrogenious.net/ipcei-hydrogenious-lohc-receives-multi-million-grant-for-green-hydrogen-blue-danube/>.
- [43] Shi Y Z, Luo B C, Sang R, et al. Combination of nanoparticles with single-metal sites synergistically boosts co-catalyzed formic acid dehydrogenation[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 8189.
- [44] Lamb K E, Dolan M D, Kennedy D F. Ammonia for hydrogen storage: A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(7): 3580–3593.
- [45] Chang F, Gao W B, Guo J P, et al. Emerging materials and methods toward ammonia-based energy storage and conversion[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(50): e2005721.
- [46] Shi Y B, Li H, Liu X P, et al. Green energy-driven ammonia production for sustainable development goals[J]. *Chem*, 2024, 10(9): 2636–2650.
- [47] Li S F, Zhou Y Y, Fu X B, et al. Long-term continuous ammonia electrosynthesis[J]. *Nature*, 2024, 629(8010): 92–97.
- [48] Feng Y Y, Huang L T, Xiao Z W, et al. Temporally decoupled ammonia splitting by a Zn-NH₃ battery with an ammonia oxidation/hydrogen evolution bifunctional electrocatalyst as a cathode[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(11): 7771–7778.
- [49] Mei D Q, Qiu X Y, Liu H Y, et al. Progress on methanol reforming technologies for highly efficient hydrogen production and applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(84): 35757–35777.
- [50] Nemmour A, Inayat A, Janajreh I, et al. Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A literature review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(75): 29011–29033.
- [51] 中国绿色低碳甲醇项目总投资超过4千亿[EB/OL]. (2024-10-21) [2024-12-31]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1813513238575342929&wfr=spider&for=pc>.
- [52] Gao Z Y, Montini T, Mu J J, et al. Photocatalytic methanol dehydrogenation promoted synergistically by atomically dispersed Pd and clustered Pd[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2024, 146(35): 24440–24449.
- [53] 国内最大氢能调峰电站项目备案通过[EB/OL]. (2024-07-29) [2024-12-31]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2024-07-29/doc-incfuzvf7856311.shtml>.
- [54] 2024年中国氢燃料电池行业市场前景预测报告[EB/OL]. (2024-09-23) [2024-12-31]. https://mp.weixin.qq.com/s/qzdOOXg6Op_ZWMHUnAPrHA.
- [55] 林德为全球首座大型绿色钢铁厂提供工业气体与氢气回收技术[EB/OL]. (2024-05-06) [2024-12-31]. <https://cn-heipa.com/newsinfo/7131940.html>.

- [56] 中国氢能源及燃料电池产业白皮书[R/OL]. [2024-12-31]. <https://www.chinah2data.com/file/group1/M00/00/00/w-KgADmB2ZUKATCpjAQ8Cyy8FieM430.pdf>.
- [57] Kourougianni F, Arsalis A, Olympios A V, et al. A comprehensive review of green hydrogen energy systems[J]. *Renewable Energy*, 2024, 231: 120911.
- [58] Wang X S, Shao L F, Hu S Y, et al. A techno-economic study of photovoltaic-solid oxide electrolysis cell coupled magnesium hydride-based hydrogen storage and transportation toward large-scale applications of green hydrogen[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(22): 8429-8456.

Review of research hotspots of green hydrogen production, storage and transportation in 2024

WANG Xusheng^{1,2}, ZOU Jianxin^{1,2,3*}, LIN Xi^{1,2}, HU Zhigang^{1,2}, DING Wenjiang^{1,2,3*}

1. Shanghai Key Laboratory of Hydrogen Science & Center of Hydrogen Science, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
3. National Engineering Research Center of Light Alloys Net Forming & State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract In 2024 the hydrogen energy industry experienced rapid development and made groundbreaking advancements. In hydrogen production, large-scale green hydrogen demonstration projects continued to proliferate, with the cost of alkaline water electrolysis steadily decreasing. High-efficiency electrolysis technologies such as solid oxide electrolysis cells and proton exchange membrane electrolysis cells were significantly improved due to optimization of electrode materials, which continuously improved electrolysis efficiency and extended service life. In hydrogen storage and transportation, alongside traditional high-pressure gaseous hydrogen and liquid hydrogen methods, emerging technologies such as metal hydride storage, organic liquid hydrogen carriers, and ammonia/methanol-based systems reached higher levels of technological maturity. On the one hand, metal hydride storage and transportation technologies such as magnesium-based and titanium-based alloys achieved improved cycle life and hydrogen storage efficiency. Meanwhile large-scale development also helped further reduce the cost of hydrogen storage and transportation. On the other hand, green ammonia and green methanol projects were advancing rapidly, becoming an important measure to promote energy transformation and industrial decarbonization. Looking ahead, with continuous technological innovation, hydrogen energy will play an increasingly important role in transportation, industry, large-scale and long-term energy storage and other fields, providing strong support for achieving the carbon neutrality goal.

Keywords green hydrogen; hydrogen production by electrolysis; hydrogen storage and transportation; technological maturity; carbon neutrality ●



(责任编辑 赵庆圆)