

• 专题二:双清论坛“‘双碳’目标下能源转化与利用科学问题” •

DOI: 10.3724/BNSFC-2024.12.06.0002

低成本大规模绿色氢电生产与低成本大容量长时储能*

郭烈锦^{1**} 金 辉¹ 关永刚²

1. 西安交通大学 绿色氢电全国重点实验室, 西安 710049

2. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部, 北京 100085

[摘 要] 能源是国民经济的命脉。发展高效低成本大规模绿色氢/电生产技术和低成本长时氢/电储存输运技术, 可为巨量CO₂减排和足量廉价绿色氢/电供给提供可靠的核心支撑, 并为构建新型绿色能源供给体系、保障国家能源安全和实现“双碳”目标提供战略性科技保障。基于该背景, 本文分析了当前我国能源供给结构的根本性缺陷和重大需求, 阐明了化石能源和可再生能源转化的本质, 并指出了能源转化过程中的三个关键科学问题: 可再生能源制氢等载能体的高效转化及存储机制、波动性电源直接制氢等载能体的系统集成及优化、含碳能源制氢等载能体与转化利用过程的多目标有机统一。针对关键科学问题, 本文综述了能源科学领域近年来通过自然科学和基础科学等多学科交叉所取得的主要进展和成就, 探讨了前沿研究方向和科学基金资助战略。

[关键词] 低成本大规模绿色氢电生产; 低成本大容量长时储能; CO₂减排; “双碳”目标

研讨能源结构转型中的关键技术, 凝练科学问题, 将进一步推动国家快速低成本实现能源结构绿色转型。在此背景下, 2023年11月27—28日, 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部召开了主题为“‘双碳’目标下能源转化与利用科学问题”的第358期双清论坛, 来自国内多所高校的专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家对绿色能源低碳转型多学科交叉发展现状与趋势、未来主要研究方向和科学问题进行了梳理, 并提出了主题相关领域的国家自然科学基金资助战略。

目前我国能源消费依然以煤炭、石油和天然气等化石能源为主导, 呈现高能耗、高污染的倾向。截至2024年9月, 我国火电装机容量仍然有14.18亿千瓦^[1], 占比约44.9%; 发电量为4.74万亿千瓦时^[2], 占总发电量的67.23%。尽管我国的新能源发展速度较快, 占比正在逐渐提升, 但是相较于以化石能源为主的能源结构, 新能源发展显得步履维艰, 可再生能源消费占比极低。截至2024年9月, 我国电力总装机容量为31.6亿千瓦, 其中可再生能源总装机容量已达17.3亿千瓦^[3], 占全国总装机

容量的54.7%, 风光水电装机量为16.8亿千瓦, 占全国总装机容量的53.1%。然而, 实际可再生能源总发电量为2.51万亿千瓦时, 仅占全国总发电量的35.5%, 其中风光水总发电量为1.98万亿千瓦时, 占总发电量的28.1%(图1)。此外, 国家统计局目前仅报道了2023年的能源消费情况, 2023年全年我国能源消费总量为57.2亿吨标准煤, 其中天然气、水电、核电、风电、太阳能发电等清洁能源消费量占能源消费总量比重仅仅为26.4%^[4]。因而纵使国内积极倡导发展可再生能源, 但由于我国资源禀赋、产业基础等一系列因素, 在今后的一段时间里, 以煤为主的火力发电仍然是能源供给侧的主要组成部分, 这导致该能源结构下的碳排放与环境污染问题日益严重。2020年全球平均温度较第一次工业革命前提高1.1℃^[5], 随之产生的海平面上升、陆地与海洋温差变小、空气流动减慢以及城市雾霾天气增多等一系列问题日趋严峻。针对这一问题, 十九大报告与二十大报告指出, 要推动实现能源消费、能源供给、能源技术、能源体制全面改革, 实现“双碳”战略目标, 需要构建清洁低碳、安全高效

收稿日期: 2024-12-06; 修回日期: 2025-03-03

* 本文根据国家自然科学基金委员会第358期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: lj-guo@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 郭烈锦, 金辉, 关永刚. 低成本大规模绿色氢电生产与低成本大容量长时储能. 中国科学基金, 2025, 39(3): 498–508.

Guo LJ, Jin H, Guan YG. Low-cost large-scale green hydrogen electricity production and low-cost large-capacity long-term energy storage. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3): 498–508. (in Chinese)

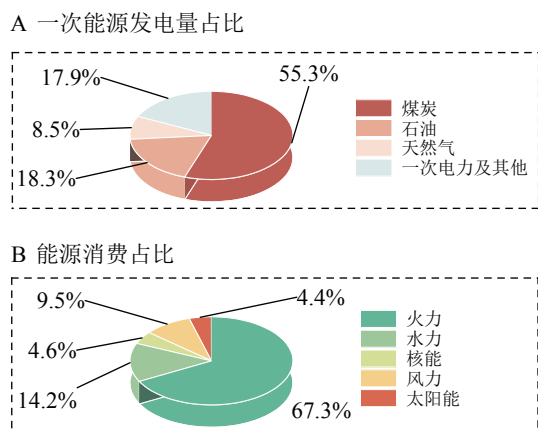


图1 A. 截至2024年9月一次能源发电量占比^[2]; B. 2023年能源消费占比^[4]

Fig.1 A. Proportion of Primary Energy Generation as of September 2024^[2]; B. Proportion of Energy Consumption in 2023^[4]

的现代能源体系。

要短期内大幅减排二氧化碳,加快摒弃化石能源燃烧发电势在必行。2023年12月13日在COP28^[6]上各国代表已在《联合国气候变化框架公约》^[7]中就逐步脱碳路线图达成共识,全球各国必须用可再生能源逐步将化石能源完全替代。为了推动可再生能源在我国能源供给体系中成为主体,需要将其在一次能源中的比例提高到60%以上,甚至80%以上。因此,必须加强将可再生能源等过程性能源低成本、大规模地绿色转化为可存储的载能体能源的力度,实现能量转换与存储的一体化,并达到能源物质转化的零碳化、无害化和高值化目标。

低成本大规模长时储能设备是发展可再生能源的必经之路。近年来国内密集发布新型储能扶持政策,全国已有二十多个省份陆续发布了新能源强制配备储能的要求,同时也要求配备的储能设备需具备调峰能力,并与市场化项目同步建成并网,因而强制配储已成为趋势。而氢能作为能量密度最高的常用燃料,可以与不易存储的过程性能源电能结合,实现能源时空转移和区域平衡,建立分布式的氢—电互补变革性能源供给体系^[8]。其在能源系统低碳化、跨区域跨部门能源整合再分配以及提高能源系统弹性等诸多领域发挥着重要的作用,得到国际广泛共识。因此,如何加强“发电/制氢”重大前沿技术研究,优化能源利用过程并完成“双碳”目标,对新形势下我国建设能源强国并实现和平崛起具有非常重要的意义。

传统燃煤发电是强氧化的放热过程,包含物质与能量的转换,二者密切关联。在仅依赖热动力循环的传统能源中,燃料化学能势与工质热能势匹配不当,导致

热力系统效率低下与有害产物生成,同时将煤炭中有序的化学能转化为无序的热能,导致了传统燃煤发电高能耗、高污染、高碳排放、低效率的缺点。该方式与西方发达国家的链式发展模式相同,即实现能源安全高效利用后再清洁和低碳,但解决高碳排放和高污染的问题需要牺牲煤电转化效率:脱硫脱硝除尘过程会让效率降低2%~4%;脱碳过程会让效率再降低10%~13%。这必然带来能源效率大幅下降和成本升高,增大能源需求和供给压力。

能源是具有能量和物质双重属性的客体,按照其自然禀赋特性可分为过程性能源和载能体能源两大类。然而我们最常用的二次能源——电能属于过程性能源,其本质上是能量的传输和使用形式,而不是存储形式。而氢则属于载能体能源,其可以存储大量的化学能并以气态、液态或固态的形式储存和运输。由于它能够携带和释放能量,氢气可以被用作一种能源载体,而非直接的能源来源。与电能不同,氢作为载能体能源具有可存储性和灵活的运输优势,是可再生能源转化和储能的重要组成部分。然而当前全球能源供应体系的核心技术依赖将以化石能源为主体的一次能源转化为电能,即将易于输运和调控的化石能源(煤、石油、天然气)转化为不易储存和输运的过程性能源,而过程性能源使得能源在时间、空间及地域上的需求和供应之间难以匹配,并且此能源转化过程依赖燃烧和热力循环,会释放大量污染物和二氧化碳等温室气体,严重破坏环境和生态系统。

随着能源结构转型的推进,太阳能、风能等可再生能源逐步成为主要一次能源来源,但现有的大部分可再生能源利用形式仍是将过程性能源转化为过程性能源——电,其属性并没有改变,过程性的禀赋特征使低成本足量长时储存在现实中难以实现。这是传统能源转换和利用技术及其供给体系的根本缺陷。目前风光等新能源电被弃用量每年都高达100亿千瓦时以上。大规模弃电的根本原因在于现有能源供给体系只有单一的发电装机,发出的电能依然是过程性能源,即时不用就难以储存。要推进能源绿色转型,就必须在源头上将可再生能源从过程性能源直接转化成易于储存和输运的载能体能源(图2),只有生产易储存、易运输、高附加价值的全球化绿色能源产品(例如氢),才能真正解决可再生能源间歇性、波动性和消纳问题。

实现能源绿色转型的最核心、最关键,也是最实质、最艰巨的任务有两个:一是将过程性禀赋的一次能源主体可再生能源直接转化生产为足量具有载能体禀赋的二次能源,即“氢能+氢电多联产耦合”,而不是一刀切地“发电+电解水制氢”,这样既能解决用可再生能源大规模

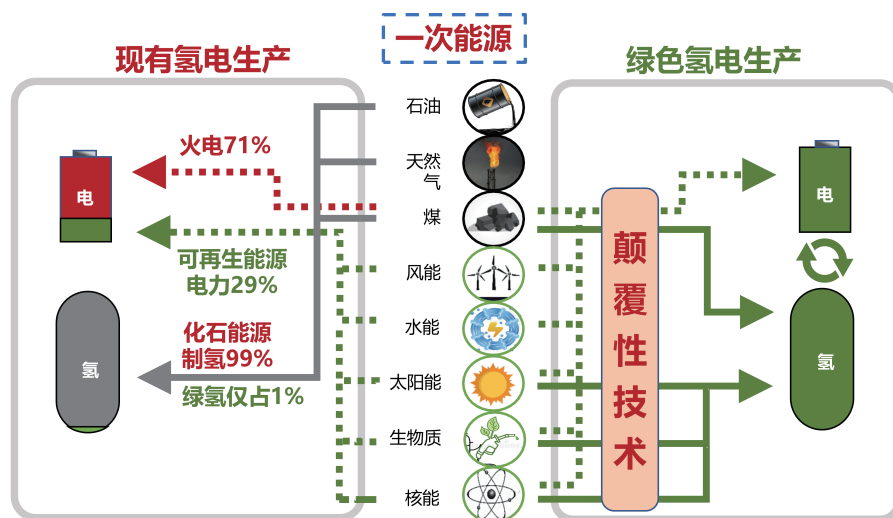


图2 现有氢电生产体系与绿色氢电生产体系

Fig.2 Existing Hydrogen Electricity Production System and Green Hydrogen Electricity Production System

模替代化石能源的问题,又能同时解决可再生能源的大规模、低成本、长时储存问题。即低成本大规模的风光可再生能源利用技术必须是能与可再生能源间歇性、波动性、过程性禀赋特性相适应、相匹配并有机融合的灵活、可存、可输、可用的先进技术。二是用完全绿色、低成本、高效率的化石能源生产氢和电的技术及产业去更新换代“传统的化石能源燃烧发电+传统天然气石油煤炭化工”技术及产业,这就必须从煤炭燃烧的源头进行原理性革命,既解决巨量有害物和海量CO₂等温室气体排放问题,加快甚至提前实现碳中和目标,又同时为能源物质资源化、高值化新型产业构建提供强有力支撑。

1 能源制氢发电的主要研究进展与成果

1.1 可再生能源制氢等载能体的高效转化及存储机制

聚焦可再生能源制氢等载能体的高效转化及存储机制,从多种能源转化技术的研究入手,结合储氢系统的理论设计与工程实践,提出了覆盖制氢、储氢及其应用的一系列研究方向。

1.1.1 太阳能光热电一体化氢热电联供

目前被广泛采用的太阳能制氢方案是光伏发电+电解水分体式制氢技术,一般的商业太阳能电池能量转换效率为20%左右,其他能量以热耗散形式被无谓浪费,且对光伏自身效率及寿命产生严重影响。分体式光伏电解制氢系统各种传输及转换损失超过10%,导致实际太阳能制氢效率低至个位数,且在日照最佳的六七月份,温度升高时,光伏性能下降,同时产生热量损失。针对这一问题,光热电一体化基于能源有序转化理论,将发电与制氢过程一体化集成优化,通过深入研究非稳态太阳能制氢系统内多工况下能流运移及光/热/化学场

交互作用,建立光热耦合复杂多相制氢系统“场流协同”高效调控理论和方法,实现太阳能全光谱、分波段高效光热综合转化利用。该研究对多功能悬浮流体集热反应管进行了设计,太阳能反应管能够同时起到液态透镜、分频滤光和光热反应器件三种作用,能够显著提高辐照均匀性,改善光伏组件的电输出性能,在典型白天的太阳辐照度和环境温度下,系统平均电效率、热效率和总能量效率分别提升11.39%、64.72%和76.11%。点聚焦+液体球面透镜作为聚光二次光学元件,过滤红外光,强化太阳能板散热,同时提高了电解槽的运行温度,实现31.7%的太阳能发电效率和22.1%的制氢效率。此外,研究提出了场流高效协同调控理论,发现产氢速率随聚光光强非线性加速现象,揭示了聚光光强与制氢反应效率的非线性关联机制,揭示了光激发和热激发对光热耦合反应的影响机制,通过光催化反应的热加速和热催化反应的光调控,有效降低能垒、加速反应进程^[9-11]。

1.1.2 AI增强生物质源有机分子电解制氢

利用可再生能源制取绿氢,实现可再生电力跨季节、长周期、大规模储能目标,对新型“源网荷”各个环节有很高的应用价值。当前绿氢生产成本较高,约40元/千克,具有商业价值的绿氢成本期望阈值为18元/千克,储能的经济性尚未显现。我国学者综合运用碳基催化剂制备、电解槽设计等技术,实现了从富含生物质基有机分子的水体中高效低能耗的绿氢制取技术。此外,材料基因组工程与人工智能技术为生物质电解制氢带来了新的机遇。我国学者通过对小分子生物质以及制氢催化剂材料进行大规模计算和数据分析,建立生物质制氢的小分子及其电催化剂的材料基因组,结合人工智能技术,将有效地实现交叉学科整合、实验的自动化和高效

性,以及低成本的精准预测,最终助力攻克制氢过程中小分子精选、催化剂设计、微生物选择和反应可控与体系集成等工程问题^[12-14]。

1.1.3 生物质制氢脱碳与反应微环境高效协同转化机制

生物质化学链制氢是一种具有应用前景的负碳制绿氢技术。化学链制氢反应实现了同步制氢与脱碳,省去了传统工艺中水气变换、脱碳、氢气提纯等过程,大幅降低脱碳能耗和制氢成本。化学链耦合电解水制氢采用 $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NiOOH}$ 化学链循环解耦电解析氢和析氧反应,省去昂贵的膜材料,安全性大幅提升,制氢能耗降低至 3.4 kWh/Nm^3 ,较传统碱性电解制氢下降30%。我国学者采用含铁工业固废降成本,通过机器学习高通量筛选与改性,快速获得载氧体优化配方;通过晶格氧与游离氧协同,提高生物质热解气化、脱碳、制氢反应效率,对生物质串行循环反应器微环境与反应协同转化机制和生物质负碳制氢反应系统耦合集成与放大规律进行了深入研究,为生物质高效、低成本、规模化负碳制绿氢新途径提供理论指导^[15-17]。不同可再生能源制氢技术的研究为下游储氢系统的设计提供了丰富的数据和理论基础。

1.1.4 低成本、大空间、高安全地质储氢理论

为了保障制氢过程的成果能够稳定存储与高效利用,研究低成本、高安全储氢技术显得尤为重要。地质储氢确实是常见的物理储氢方法(表1)之一,尤其是在大规模、长期储氢应用中具有重要意义。我国盐穴资源丰富,但绝大多数盐穴处于闲置,经造腔后密封性良好,可利用空间巨大。目前,我国基于地质条件的大规模储氢技术相关研究起步较晚,与国际先进水平存在较大差距,在盐穴储氢库的建设与运营方面仍然处于空白阶段,目前主要面临着氢气泄漏和储氢洞室安全服役两大挑战。对此,目前我国基于地质调查、模型试验与数值模拟等手段,对不同地质条件组合的储氢库稳定性和密封性做出评价后,提出影响储氢库建设的主要地质指标;而后采用精细化勘察、多尺度地质建模仿真等技术

手段,构建不同地质条件地下空间储氢适用性评价指标体系与评价方法,科学评估储库安全性与经济性,实现储氢库场址优选。基于非金属材料力学稳定性和氢渗透性分析、地质力学模型试验、动态仿真、智能学习等手段、系统工程理论,辨识高频储释下关键运行参数等方法,实现储氢库长周期安全运维^[18,19]。

1.1.5 低温液态储氢系统设计理论

低温液态储氢工艺下储氢密度大,纯度高,在远距离输运和大规模氢能利用中具有明显优势,且适用于大型车辆储能以及大规模氢能运输。但目前氢液化的耗能高,约为 $10\sim 14 \text{ kWh/kg}$,约占自身能量的40%,且长期存储时蒸发损失较大。因此我国必须进一步攻克液化流程热力设计、低温氢膨胀机、氢气换热器、正仲氢转化等技术,助力实现液氢的低成本、大规模、长时储存。正仲氢催化转化主要有等温、绝热及连续三种形式,其中连续转化能耗最低,但该换热器对材料强度、焊接密封性要求更高,需要发展连续转化换热器设计制造技术。我国液氢储存容器多采用高真空多层绝热、变密度多层绝热及气冷屏等主被动结合的绝热方式,并通过制冷机平衡外界漏热实现零蒸发长时存储,然而效率还需突破,需要进一步发展液氢超轻储罐设计方法及制造工艺^[20-22]。

1.1.6 低温高压氢气制备方法

与常温高压储氢技术相比,低温高压储氢综合氢液化具有储氢密度高、本征能耗低和无正仲氢转化等优势,极具发展潜力,其核心技术是低温高压氢气制取方法与低温高压储氢容器。研究表明,以外部冷源将高压氢气冷却至储存温度制取低温高压氢气,能耗远低于传统液氢化法,其储氢环节主要包括压缩、冷却和储存,其中4~5级压缩是平衡能耗与系统复杂度的较优构型。冷却过程则是耗能的主要过程,也是最具节能潜力的环节。此外,通过在储氢容器中填充多孔吸附材料可提高储氢密度并降低储氢压力,提高储氢安全性和经济性。然而目前低温高压储氢容器基于现有常温高压储氢容

表1 常见的储氢方法
Table 1 Common Hydrogen Storage Methods

储氢类型	储氢方法	特点	优点	缺点
物理储氢	地质储氢	利用盐穴等地下空间储氢	储量大,适合长期和季节性储能	前期投资高,选址受限,有泄漏风险
	低温液态储氢	将氢气液化后储存	储氢密度高,适合大规模储氢	液化能耗高,绝热要求高,存在蒸发损失
	低温高压储氢	氢气在低温和高压条件下储存	比单独高压或低温储氢更高,适合大规模储存	成本高、能耗大且安全性要求高
	固态储氢容器	利用金属或复合材料制成的高压储氢罐储存	便于运输,安全性较高	制造成本较高,材料强度限制压力上限
化学储氢	有机液体储氢	利用液态有机化合物储存氢气	可常温储运,兼容现有石油基础设施	催化剂要求高,储放氢过程能耗较高
材料储氢	纳米材料储氢	利用碳纳米管、石墨烯、MOFs等吸附或储存氢气	储氢密度高,吸放速率快	材料成本高,规模化尚在研究阶段

器改造,采用碳纤维缠绕+铝内胆等结构,尚无同时耐受低温和高压的成熟储氢容器,我国仍需发展与应用情景相匹配的绝热技术^[23]。

1.1.7 双层真空复合材料储氢容器的绝热与强度性能调控机制

目前长时大规模绿电制氢—深冷高压储氢—氢能发电过程存在系统能效低及储氢装备设计方法缺失等问题,亟需突破供—储—用关键基础研究。低温高压储氢容器由外壳、真空/绝热层、外部增强层和金属内层构成:外壳防止真空破外,真空/绝热层用于介质长时储存,外部增强层和金属内层分别用于承压和抗疲劳。工作压力范围为35~70 MPa,泄放压力为4.8~87.5 MPa,单台储氢可达1~5吨,且储存时间可控。针对大规模深冷高压供氢温压控制难题,国内学者^[24]构建了基于气—气液共存—超临界的热力学分析模型,建立供氢过程温度、压力、物态及其质量比的多参数优化控制技术,可面向储氢装备长时服役需求。

1.1.8 有机液体储放氢体系分子C-H键催化重构反应机制

国内液态储氢技术起步稍晚,目前多处于示范项目阶段,其中,圣元环保股份有限公司、中国东方电气集团有限公司、中化学科学技术研究有限公司、中国船舶集团有限公司等712家单位纷纷表示其正在开发有机液体储氢或已有相关研究项目落地。但目前研究的有机液态储氢仍然存在有机介质—催化剂体系活性差、稳定性不足、寿命短的问题。现有研究对富氢有机液体分子催化脱氢反应机制不清晰,缺乏对有机液体储放氢循环反应失活抑制机理的理解。对此,国内学者^[25]通过优化有机储氢介质分子结构设计,创制了新型原子对催化剂,突破了贵金属易结焦的瓶颈,实现了C-H键的活化和有机液体选择性脱氢,建成了百公斤级绿氢储运撬装装置,为低成本、大规模、长时储氢提供了关键技术。

1.1.9 氢能装备基础中的工程热物理问题

工程热物理是氢能装备的基础,也是连接能源运营和材料工业的基础。当前我国“十四五”国家重点研发计划“氢能技术”重点专项已经包含了电化学过程及其材料与器件构筑、从宏观到微纳尺度传递及其动态控制、氢的单质态与化合态蓄能、释放和扩散等各前沿研究。我国研究^[26-28]将进一步深入关键材料、核心部件和系统集成3个产业环节,以加快氢安全、氢燃料、氢储能等应用的高质量发展,实现传统优势能源与光伏、风电、氢能等新能源的多能互补、深度融合。截至2023年5月,国内加氢站建设已经取得较快发展,共建成350座加氢站。我国已建成移动式氢动力平台,正在建设分布式氢

动力平台。其中分布式氢动力平台燃料电池及新能源电池材料实验室8 200 m²基础装修工程、公用配套设施设备、2 000 KVA电力增容工程已经完成,形成了核心器件—单池—电堆—系统—BOP的测试服务能力。

1.1.10 储氢功能体系的一体化设计理论

尽管当前的储氢技术能够满足长时间、大容量储能的要求,但是整体电—氢—电的能量效率和成本有待优化。制氢效率的提升为储氢过程的规模化应用提供了坚实保障,而高效储氢技术的突破又进一步推动了制氢工艺的优化与成本降低。通过对不同储能技术路线的指标对比,可以发现储能效率越高的技术,其储能时长越短,对此储氢功能体系一体化设计理论则能够使能源转化利用效率大幅提高,投资减少,成本降低,在保证储能效率的同时能够实现长时储能。实现制—储—输氢一体化技术^[29-31],将氢气的生产、储存和输送相互衔接,将进一步提高整个氢能源系统的能效,降低系统的能耗和成本,提高环保水平,并逐步形成完整的氢产业链,持续带动产业链的升级和转型。中国将在可再生能源、新能源汽车、石化、化工等领域形成完整的产业链,提高产业的核心竞争力,为全球推广绿色能源的应用和普及提供有力的支持(图3)。

1.2 波动性电源直接制氢等载能体的系统集成及优化

通过先进的系统集成与优化技术,提升波动性电源直接制氢效率,实现电能向载能体(如氢气)的高效转化,并构建可靠的储能体系,已成为推动能源转型与绿色发展的关键科学问题。基于此,本部分将围绕电解水制氢与储能(表2)的核心机制,探讨相关技术的研究进展及应用潜力,构建面向未来能源系统的综合解决方案。

1.2.1 高温化水电解制氢系统吸—放热转换与高效绿氢制取

常规的电解槽电解水制氢技术仅需要常温即可实现,然而我国的学者结合高温运行下灵活吸/放热转化特征,水电解系统可与光热/核能发电等余热供给过程或社区/工厂等氢—热需求场景实现能量/物料灵活耦合,构建充分适应供给端时空波动性、消费端需求多元性的新型电化学高效制氢—长时储能体系^[32]。

1.2.2 适应瞬时宽功率波动的光风储能电解制氢

风光等可再生能源的瞬时宽功率波动特性严重影响电解水制氢系统的动态适应性和运行可靠性。针对此问题,国内学者^[33-35]通过在碳纸表面构筑3D-on-2D多维度自支撑结构,提高了催化剂的耐受宽功率波动能力,同时使用氮掺杂碳外壳避免酸性溶液的腐蚀,使用过渡金属催化剂降低了绿氢生产成本。他们提出了离网型风电制氢系统的分时功率调控电解槽轮值策略。

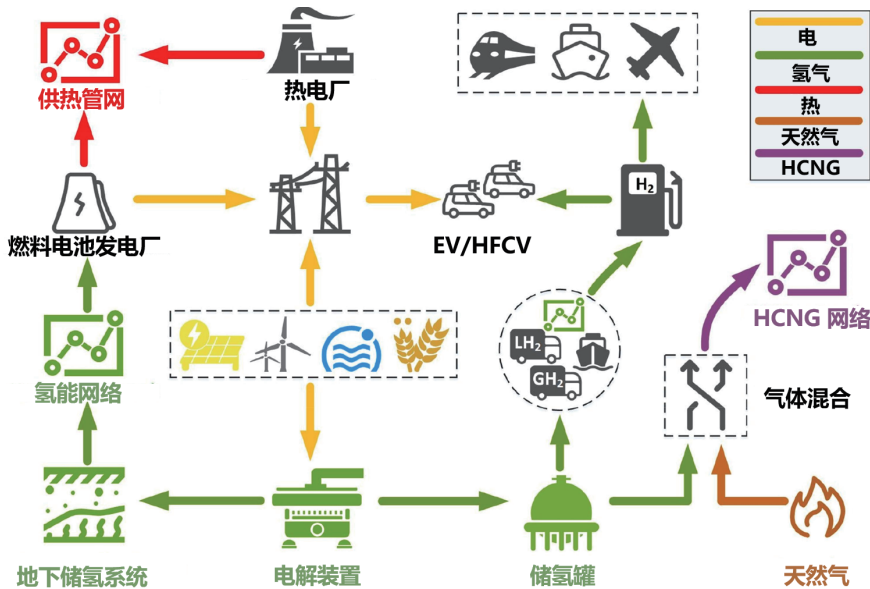


图3 氢能系统^[30]
Fig.3 Hydrogen Energy Systems^[30]

表2 新兴储能技术
Table 2 Emerging Energy Storage Technologies

储能技术	技术原理	特点	应用领域
抽水蓄能	利用电能驱动水从低位水库泵至高位水库，释放时通过水流发电	大规模储能，响应速度较慢，长期运行可靠性高	大规模电网调节，长时间储能
流体电池储能	利用可逆的化学反应存储电能，电池通过电解和还原反应转换化学能	高效、高功率密度，适合大规模储能	大规模储能，电网稳定性区域调节
液态金属储能	利用液态金属在高温下储存和释放热能，转化为电能	高温稳定性强，能量密度高，适合长时储能	大规模储能，长时能量供应
电解水制氢储能	通过电解水制氢并存储，需通过氢燃料电池或氢气燃烧释放电能	长期储能能力强，灵活性高，能量密度低	交通、建筑能源供应，电网调节，能源存储
高温热储能	通过熔盐、石英砂等材料储存热能，利用热交换装置释放能量	适合长时间储存，转换效率高，但材料和设备成本较高	太阳能热发电、电网负荷调节

1.2.3 基于有机液体的高效氢电转化及强化传输机制

绿氢制取、高效利用、转化存储等能源转化过程在能量维度、时间维度和空间维度上具有突出优势，将推动未来能源系统及能源结构的变革。在可持续能源电解水制氢中，光生驱动力不足及波动性问题将导致膜电极稳定性差，膜电极多尺度结构内多相多组分输运与电化学反应关联机制不清楚，电解近中性天然海水时电极和催化剂稳定性、耐久性较差。针对质子交换膜，国内和国际学者^[36-38]对其采取特定的表面处理，可以实现类似“仙人掌”功能，膜表面涂层在高湿度下可打开气孔实现失水功能，在低湿度下可关闭表面气孔实现保水机制，有效提高燃料电池性能。同时，其团队通过外部磁场诱导磁颗粒的方法，制备了有序化离子膜质子传输通道，大幅提高质子交换膜的电导率。

1.2.4 抽水蓄能发电电系列关键问题

我国抽水蓄能单机典型功率约10万~30万千瓦，是

规模最大、应用最广泛的电力储能技术，装机居世界首位。传统抽水蓄能技术正在向提高规模、水头和效率，降低成本方向发展，如河北丰宁抽水蓄能电站是世界上规模最大的抽水蓄能电站，总装机360万千瓦。抽水蓄能的关键科学问题^[39-41]在于抽水蓄能储/释过程工况特性与能量传递机理、水力瞬变下内流压力脉动引发的根源和高水头水泵水轮机S特性与三维叶轮设计。其重点研究方向包括抽水蓄能与可再生能源联合控制技术、变速抽水蓄能机组关键技术和高水头水泵水轮机设计技术。

1.2.5 长时储能的热问题：材料、设备与系统

新型长时储能技术——高温热储能技术有望在新型电力系统中承担能源调控中心的作用而被广泛研究，其中熔融盐高温热储能技术已经在光热电站中实现了商业化^[42-44]，为电网规模热储能提供了宝贵的经验。此外，我国在压缩空气储能、高温热储能领域的基础研究与工程实践已处于世界领先水平，多个示范工程，如江

苏国信靖江发电有限公司“与煤电耦合的熔盐储热调频调峰及安全供汽技术”示范工程(为全球首套煤电机组耦合熔盐储热示范工程,同时目前还有“国能河北龙山发电有限责任公司600 MW机组熔盐储热调峰灵活性改造项目”等多个高温热储能耦合火电调峰运行示范工程在建)等,将为创新研发高温热储能技术创造有利条件。

1.2.6 流体电池基础理论及理性设计方法

截至2022年底,我国电力储能装机59.4 GW,位列世界第一,电化学储能装机8.7 GW,在长时、短时、超短时储能及控制等方面均有突破,整体处于工程示范及应用初期。目前在能量密度方面,锂电储能更具优势,国内市场以安全性更好的磷酸铁锂为主。在放电时长方面,电化学储能面向的是短时和中长时储能需求,目前锂电储能项目多为1~2小时,液流储能项目多为4~6小时。鉴于传统电池储能的一些弊端,我国发展了相应的流体电池储能技术^[45-47]。流体电池以可流动物质作为能量载体,具有能量与功率解耦、时长灵活、扩展性好、不受地理限制等优点,是推动长时间能量存储、支撑新型能源体系稳定可控运行、保障能源安全的关键技术。

1.2.7 液态金属储能电池材料体系及服役特性

流体电池中的液态金属电池采用液态金属电极和熔融无机盐电解质,具有循环寿命长、储能成本低、安全可靠等优势,在中长时储能领域具有重要应用前景。尽管如此,流体电池仍面临性能、寿命与成本的挑战,其核心问题是如何突破流体电池基础理论与理性设计方法^[48-50],创造高性能的可流动能量载体,匹配能量载体与输入能量品位,协同调控热、质、电、离子传输热物理过程与电化学反应。

1.2.8 沙戈荒新能源基地火储联合调频关键技术

电网频率是电能质量和电网稳定运行的关键指标,大型风光新能源场站的惯量响应和频率调节能力相比传统火电机组显著减弱,对可再生能源高占比电力系统的电能质量和安全稳定运行产生极大威胁,加之沙戈荒地区干旱缺水的地理环境不支持大量建设火电,火电—储能联合调频成为理想的解决方案。国内学者^[51-53]已在近期发展了系统优化控制技术、过热和再热汽温的快速变工况优化控制技术等;开发高性能金属离子电容储能电极、电解液等和模组制备工艺,研究储能温度效应及拓宽工作温度窗口的途径,开展火电快速负荷响应及金属离子电容理论与技术研究。

1.3 含碳能源制氢等载能体与转化利用过程的多目标有机统一

围绕煤炭超临界水气化制氢产业链的发展,探讨了能源载体的多目标有机统一及其转化利用过程中的关

键技术和优化策略。

1.3.1 煤炭超临界水气化制备绿氢/发绿电系统集成与优化

传统化石能源(如煤、油、天然气)制氢由于短时间内可以大规模生产氢气,是目前氢能的主要来源之一。但传统化石能源制氢存在许多缺点和弊端。首先,化石燃料的开采和使用会产生大量二氧化碳及有害物质,造成严重的环境污染和碳排放,加剧气候变化问题。我国科学家^[54]在近期独立自主研发的“超临界水蒸煤制氢发电多联产技术”能够实现煤炭低成本、大规模的无害化利用,同时利用了化石能源的能量禀赋和物质禀赋。该技术使用高温高压和水作为反应介质,将煤炭转化为氢气,同时将一部分有害物质转化为无害气体,生成气溶解在超临界水中,以均相超临界混合流体形式从气化反应器顶部引出,可用来实现完全洁净、无污染、零排放的高效转化利用,这从源头上消除了传统燃煤污染物 SO_x 、 NO_x 和其他气体污染物、粉尘颗粒污染物的产生。该技术在实现绿色发电供热、供蒸汽的同时,实现煤中物质的高值化转化与完全利用,可联产 H_2 和高纯 CO ,在不大幅新增能耗的前提下实现高质价多联产,继而可进行化工工艺链匹配创新,如直接合成氨、联产高性能含碳化学品等(图4),特别是与下游氢气直接罐装/液化等工艺匹配较好,大大提高了储能效率。

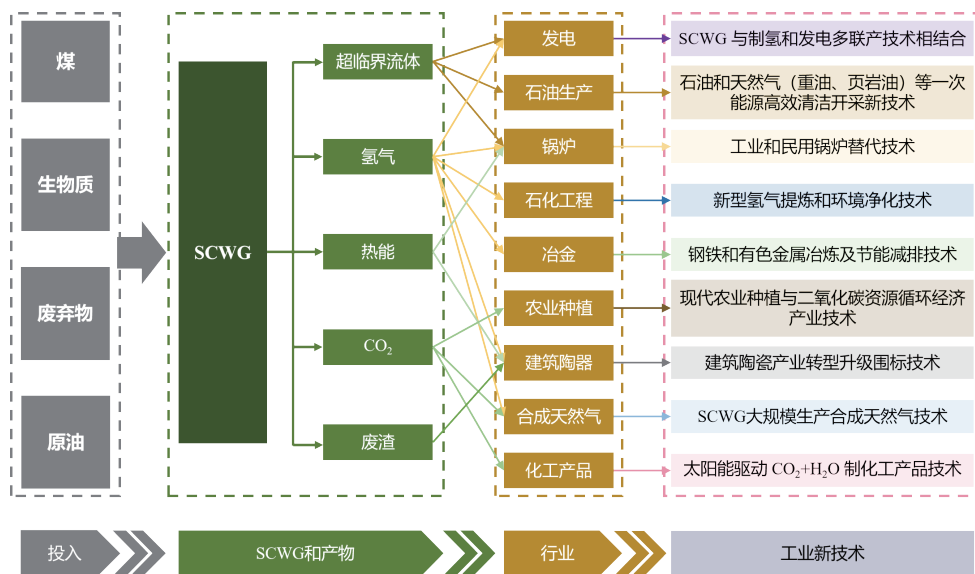
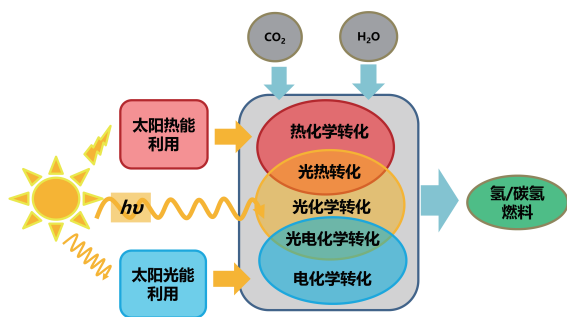
1.3.2 太阳能驱动 CO_2 还原制碳氢燃料系统一体化设计理论

利用太阳能发电+电解水制氢也是一种利用可再生能源制氢的手段,然而该技术目前依旧存在缺点和弊端。太阳能发电+电解水制氢的效率受到光照、气候等自然因素的影响,所产生的氢气量不稳定,难以满足工业化规模的生产需求。其次,制氢需要使用大量优质电解水,造成资源的浪费。此外,太阳能发电+电解水制氢的设备成本较高,需要大规模的投资,生产成本较高。对此,为解决我国可再生能源的时空分布不均问题,国内一些学者^[55-57]提出通过构筑并集成高效绿色光电催化能源转化与物质合成新体系,构建与水与 CO_2 还原匹配的高效、高附加值化合物合成的新型光电催化阳极(氧化)替代反应(图5),重建光电催化分解水制氢和 CO_2 还原体系。通过研究表明,基于该新型阳极(氧化)反应耦合的光电催化制氢和 CO_2 还原技术的能量转化效率可大幅提高。

2 重大科学问题及重点资助方向探讨

2.1 关键科学问题

要实现关键任务,就要因地制宜、因时制宜地选择

图4 煤炭超临界水气化制氢技术产业流程^[54]Fig.4 Industrial Process of Coal Supercritical Water Gasification Hydrogen Production Technology^[54]图5 太阳能驱动CO₂还原制备碳氢燃料Fig.5 Solar Driven CO₂ Reduction for the Preparation of Hydrocarbon Fuels

转化利用的方式、技术,并构建相应的区域优势产业链,就地将可再生能源与当地及周围国家、省市的矿产生态环境资源禀赋及需求结合,生产全球化的、易运输的、高附加价值的绿色产品。其关键科学问题有以下三点:

(1)可再生能源制氢等载能体的高效转化及存储机制。我国拥有丰富的新能源资源,如太阳能、风能、水能、生物质能等,只有实现革命性的低成本大规模绿色制氢发电和低成本大规模长时储能才能将丰富的资源有效利用,有效应对气候变化和环境污染问题,带动新能源、新材料等产业可持续发展,实现“双碳”目标。

(2)波动性电源直接制氢等载能体的系统集成及优化。目前可用的可再生能源是从过程性能源转化为过程性能源——电,基本属性不变,依然不能存储,且现有常规技术的转化利用效率低、成本高、方式单一,制氢效率低下,初始投资高,波动巨大,难以实现大规模并网,使得我国不得不大范围弃风弃光弃水。

(3)含碳能源制氢等载能体与转化利用过程的多目

标有机统一。传统燃煤发电技术并未实现生产过程有害物质彻底分离脱除,更谈不上完全利用。若要彻底解决气、液、固三相废弃物的有害性和污染问题,兼顾资源化无害化利用,实现多联产高质价,则必然要增加更多的废弃物处理装备投资和成本,消耗更多的能量,效率进一步降低,这将带来效率和经济性的极大下降,对于现阶段我国是难以承受的。

2.2 建议重点资助方向

在当前阶段,化石能源作为一次能源的主体,我们主要依赖其自身具有的易存储和易运输特性,通过对一次能源在源头端进行人为调配,来弥补社会生产和生活中终端用能与供能体系在时间、空间和地域上的不匹配。然而,化石能源的发电过程以燃料燃烧和热动力循环为主,排放了大量有害物质和温室气体,导致环境污染和生态破坏。当人类能源转型进入以太阳能、风能等过程性能源为一次能源主体的阶段后,传统一次能源的源头调配方式将难以为继。而电能作为过程性能源,其低成本、长时、大规模的储存在现实中仍面临巨大挑战,这正是传统能源转化利用技术、产业及其供给体系的根本性缺陷所在。

因此,对于化石能源而言,要想彻底解决燃烧污染和CO₂等温室气体排放问题,就必须从煤炭燃烧的源头进行原理性革命,发展化石能源高效低成本大规模绿色制备氢和电的技术;而对于可再生能源而言,需要在源头上将可再生能源从过程性能源直接转化成易于储存和运输的载能体能源,生产易储存、易运输、高附加价值的全球化绿色能源产品(例如氢),才能真正解决可再生能源间歇性、波动性和消纳问题。因而对以上两个关键

科学问题,建议未来能源学科应着重围绕以下2个发展方向开展多学科交叉原创性研究。

(1)大力推进以超临界水蒸煤为代表的含碳能源清洁高效低碳绿色转化技术。对已经建成并投运的燃煤发电机组,尽可能实行全参数满负荷运行模式,尽可能减少、限制甚至严禁实施以电网调峰、局域减排CO₂等为目的的,实质上则属于低效、高污染、高排放的低负荷运行。

对于新建的化石燃料制氢发电机组,优先采用以超临界水蒸煤制氢发电多联产为代表的绿色清洁高效低碳技术,增大其转化成载能体氢的比例,最大程度地实现化石能源的资源化、高价值转化,并因地制宜将产业链延长,制备高值化学品。发电部分可发挥超临界水蒸煤技术模块化可串、并联和灵活增减的优势,实现能源供给体系内供需间的灵活高效调峰,确保供电网调峰过程的高效、清洁、低碳。

若能如此,则我国有可能以低成本、节约方式跳出传统减排CO₂的陷阱,快速完成能源绿色转型,提前完成碳中和目标任务,实现可持续发展的理想和目标。

(2)加快发展可全时运行的新型可再生能源低成本绿色生产氢电的技术,大幅增加可因地制宜、因时制宜地生产绿氢绿电的新装机容量。大力推进建设新型可再生能源机组。它完全不同于以往单一、低效的太阳能光伏上网+大型网电电解槽技术,新建机组应采用以“直接太阳能光热电一体化氢热电联供技术”等为代表的技术,因地制宜、因时制宜、独立地、以机组自持式连续运行,并实现发电和产氢两种模式的自动转换,能够通过自动调控机组运行模式直接与能源消费端匹配,避免电网波动。

根据能源总消费需求和国家供能体系转型要求,要实现2030年非化石能源发电占全社会用电量比重达到50%左右,总发电量要达到4.3万亿千瓦时,新型可再生能源总装机容量达20.09亿千瓦,需要新增装机容量7.39亿千瓦;2060年碳中和时可再生能源比例达到80%左右^[58],则需要可再生能源总发电量达到6.8万亿千瓦时,需要新装机容量19.45亿千瓦,总减排超57亿吨CO₂,逐步形成以可再生能源为主体的、兼顾发电与储能的能源供给体系。

针对已经建好的4.71亿千瓦光伏发电机组和3.9亿千瓦风电机组进行改造,改变只发电的单一模式,逐步形成氢电热联产、可储可输可用的多联供综合能源系统。实行全天候运行,因地制宜、因时制宜地发电或制氢,并拓展延伸制备多种高价化学品产业链,生产长时、低成本、大规模储能的载能体能源。

3 结论

推动能源结构绿色转型是我国乃至全球的战略目

标,是实现可持续发展和“双碳”发展战略的必经之路。即使目前我国已经实现了可再生能源大规模利用,但仍然无法解决其间歇性、消纳等问题,无法并网导致大规模的资源浪费等问题。因而要实现能源结构绿色转型,就必须发展低成本大规模绿色氢电生产与低成本大容量长时储能技术。近年来,基于各学科交叉融合发展得到的制氢储能技术研究已经取得了突破性的进展,今后需要进一步以构建氢/电能源供给体系为目标,推动发展高效低成本大规模绿色氢电技术,为巨量CO₂减排和足量廉价绿色氢电供给提供核心支撑,为构建新型能源体系、保障能源安全和实现“双碳”目标的国家战略提供科技力量。亟待解决以下三个关键科学问题:可再生能源制氢等载能体的高效转化及存储机制、波动性电源直接制氢等载能体的系统集成及优化、含碳能源制氢等载能体与转化利用过程的多目标有机统一。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布2024年1-9月份全国电力工业统计数据. (2024-10-21)/[(2024-12-06)]. http://www.nea.gov.cn/2023-07/31/c_1310734825.html.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据-2024月度数据. (2024-10-01)/[2024-12-06]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=A01>.
- [3] 国家能源局. 国家能源局2024年第四季度新闻发布会文字实录. (2024-10-31)/[2024-12-06]. http://www.nea.gov.cn/2023-07/31/c_1310734825.html.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据-2023年度数据. (2023-10-01)/[2024-12-06]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [5] 黄震, 谢晓敏. 碳中和愿景下的能源变革. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1010—1018.
Huang Z, Xie XM. Energy revolution under vision of carbon neutrality. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1010—1018. (in Chinese)
- [6] Jiang T, He XJ, Su BD, et al. COP 28: Challenge of coping with climate crisis. The Innovation, 2024, 5(1): 100559.
- [7] Sands P. The United Nations framework convention on climate change. Review of European Community & International Environmental Law, 1992, 1: 270—277.
- [8] Zhu JP, Meng DX, Dong XF, et al. An integrated electricity-hydrogen market design for renewable-rich energy system considering mobile hydrogen storage. Renewable Energy, 2023, 202: 961—972.
- [9] Zhu YZ, Ma BC, He BC, et al. Liquid spherical lens as an effective auxiliary optical unit for CPV/T system with remarkable hydrogen production efficiency. Applied Energy, 2023, 334: 120733.
- [10] Liu ZN, Zhou JD, Li Y, et al. Evaporation and drying characteristics of the sessile ferrofluid droplet under a horizontal magnetic field. Fundamental Research, 2022, 2(2): 222—229.
- [11] Wang X, Liu MC, Jing DW, et al. Net unidirectional fluid transport in locally heated nanochannel by thermo-osmosis. Nano Letters, 2020, 20(12): 8965—8971.
- [12] Chen ZJ, Dong JY, Wu JJ, et al. Acidic enol electrooxidation-coupled hydrogen production with ampere-level current density. Nature

- Communications, 2023, 14(1): 4210.
- [13] Jiang LX, Pan J, Li QY, et al. A holistic green system coupling hydrogen production with wastewater valorisation. *EcoMat*, 2022, 4(6): e12254.
 - [14] Li SL, Shang J, Li ML, et al. Design and synthesis of a π -conjugated N-heteroaromatic material for aqueous zinc-organic batteries with ultrahigh rate and extremely long life. *Advanced Materials*, 2023, 35(50): 2207115.
 - [15] Guo SH, Li XH, Li J, et al. Boosting photocatalytic hydrogen production from water by photothermally induced biphasic systems. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1343.
 - [16] Terlouw T, Bauer C, McKenna R, et al. Large-scale hydrogen production *via* water electrolysis: A techno-economic and environmental assessment. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(9): 3583—3602.
 - [17] Fan K, Xie WF, Li JZ, et al. Active hydrogen boosts electrochemical nitrate reduction to ammonia. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 7958.
 - [18] 梅生伟, 李建林, 朱建全, 等. 储能技术. 北京: 机械工业出版社, 2022. Mei SW, Li JL, Zhu JQ, et al. *Energy Storage*. Beijing: China Machine Press, 2022. (in Chinese)
 - [19] Mei SW, Wang JJ, Tian F, et al. Design and engineering implementation of non-supplementary fired compressed air energy storage system: TICC-500. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(4): 600—611.
 - [20] Wang HC, Zhao YX, Dong XQ, et al. Thermodynamic analysis of low-temperature and high-pressure (cryo-compressed) hydrogen storage processes cooled by mixed-refrigerants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(67): 28932—28944.
 - [21] Yang JY, Wang HC, Dong XQ, et al. Performances comparison of adsorption hydrogen storage tanks at a wide temperature and pressure zone. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(69): 26881—26893.
 - [22] Zhao YX, Gong MQ, Zhou Y, et al. Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(31): 16833—16840.
 - [23] Xing BH, Gao RZ, Wu M, et al. Differentiation on crystallographic orientation dependence of hydrogen diffusion in α -Fe and γ -Fe: DFT calculation combined with SKPFM analysis. *Applied Surface Science*, 2023, 615: 156395.
 - [24] Shang J, Hua ZL, Xing BH, et al. Enhanced hydrogen embrittlement of steel by the premature hydrogen dissociation with the increasing inert gas pressure in hydrogen-containing mixtures. *Acta Materialia*, 2023, 259: 119279.
 - [25] Al-Salihi S, Abrokwhah R, Dade W, et al. Renewable hydrogen from glycerol steam reforming using Co-Ni-MgO based SBA-15 nanocatalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(28): 14183—14198.
 - [26] Wang QQ, Tang FM, Li X, et al. Revealing the dynamic temperature of the cathode catalyst layer inside proton exchange membrane fuel cell by experimental measurements and numerical analysis. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 463: 142286.
 - [27] Shi QT, Feng C, Li B, et al. Fractal model for the effective thermal conductivity of microporous layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 205: 123884.
 - [28] Wang QQ, Tang FM, Li B, et al. Investigation of the thermal responses under gas channel and land inside proton exchange membrane fuel cell with assembly pressure. *Applied Energy*, 2022, 308: 118377.
 - [29] Pu YC, Li Q, Zou XL, et al. Optimal sizing for an integrated energy system considering degradation and seasonal hydrogen storage. *Applied Energy*, 2021, 302: 117542.
 - [30] Qiu Y, Zhou SY, Wang JH, et al. Feasibility analysis of utilising underground hydrogen storage facilities in integrated energy system: Case studies in China. *Applied Energy*, 2020, 269: 115140.
 - [31] Xiang Y, Cai HH, Liu JY, et al. Techno-economic design of energy systems for airport electrification: A hydrogen-solar-storage integrated microgrid solution. *Applied Energy*, 2021, 283: 116374.
 - [32] Zhang WZ, Liu MH, Gu X, et al. Water electrolysis toward elevated temperature: Advances, challenges and frontiers. *Chemical Reviews*, 2023, 123(11): 7119—7192.
 - [33] Xia RX, Cheng J, Chen Z, et al. Tailoring interfacial microbiome and charge dynamics via a rationally designed atomic-nanoparticle bridge for bio-electrochemical CO₂-fixation. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16(3): 1176—1186.
 - [34] Yang X, Tat T, Libanori A, et al. Single-atom catalysts with bimetallic centers for high-performance electrochemical CO₂ reduction. *Materials Today*, 2021, 45: 54—61.
 - [35] Chen WZ, Zheng QT, Lv YA, et al. Piezoelectric energy harvesting and dissipating behaviors of polymer-based piezoelectric composites for nanogenerators and dampers. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142755.
 - [36] Jiao K, Xuan J, Du Q, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells. *Nature*, 2021, 595(7867): 361—369.
 - [37] Zhang JF, Zhu WK, Huang T, et al. Recent insights on catalyst layers for anion exchange membrane fuel cells. *Advanced Science*, 2021, 8(15): 2100284.
 - [38] Takemoto S, Yoshikawa N. Strength evaluation of CFRP structure of high pressure hydrogen tank based on mesoscale analysis. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 103966.
 - [39] Wang ZN, Fang GH, Wen X, et al. Coordinated operation of conventional hydropower plants as hybrid pumped storage hydropower with wind and photovoltaic plants. *Energy Conversion and Management*, 2023, 277: 116654.
 - [40] Nasir J, Javed A, Ali M, et al. Capacity optimization of pumped storage hydropower and its impact on an integrated conventional hydropower plant operation. *Applied Energy*, 2022, 323: 119561.
 - [41] Lan XY, Gu NB, Egusquiza M, et al. Parameter optimization decision framework for transient process of a pumped storage hydropower system. *Energy Conversion and Management*, 2023, 286: 117064.
 - [42] Liu XK, Li XB, Yang RG. High-temperature thermal storage-based cement manufacturing for decarbonization. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 29.
 - [43] Yong QQ, Jin KY, Li XB, et al. Thermo-economic analysis for a novel grid-scale pumped thermal electricity storage system coupled with a coal-fired power plant. *Energy*, 2023, 280: 128109.
 - [44] Liu XK, Jin KY, Li XB, et al. Low-carbon cement manufacturing enabled by electrified calcium looping and thermal energy storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, 129: 103986.
 - [45] Wan SB, Jiang HR, Guo ZX, et al. Machine learning-assisted design of flow fields for redox flow batteries. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(7): 2874—2888.

- [46] Zhao C, Xu GL, Yu Z, et al. A high-energy and long-cycling lithium-sulfur pouch cell via a macroporous catalytic cathode with double-end binding sites. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(2): 166—173.
- [47] Pan LM, Sun J, Qi HH, et al. Dead-zone-compensated design as general method of flow field optimization for redox flow batteries. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(37): e2305572120.
- [48] Wang KL, Jiang K, Chung B, et al. Lithium-antimony-lead liquid metal battery for grid-level energy storage. *Nature*, 2014, 514(7522): 348—350.
- [49] Li HM, Yin HY, Wang KL, et al. Liquid metal electrodes for energy storage batteries. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(14): 1600483.
- [50] Zhou XB, Yan S, He X, et al. Low-temperature, high cycling stability, and high Coulombic efficiency liquid metal batteries enabled by lithium halide-potassium halide molten salt electrolytes. *Energy Storage Materials*, 2023, 61: 102889.
- [51] Bo Z, Zheng ZW, Huang YZ, et al. Covalently bonded MXene@Antimonene heterostructure anode for fast lithium-ion storage. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 485: 149837.
- [52] Bo Z, Cao MY, Zhang HH, et al. Enhancing plasma-catalytic toluene oxidation: Unraveling the role of lewis-acid sites on δ -MnO₂. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481: 148399.
- [53] Bo Z, Cheng XN, Zhou MQ, et al. Ultrasonically compactified thick MoS₂ films with reduced nanosheet size for high performance compact energy storage. *Journal of Power Sources*, 2023, 571: 233060.
- [54] Guo LJ, Ou ZS, Liu Y, et al. Technological innovations on direct carbon mitigation by ordered energy conversion and full resource utilization. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 4.
- [55] He LY, Hong X, Wang YQ, et al. Achieving 12.0% solar-to-hydrogen efficiency with a trimetallic-layer-protected and catalyzed silicon photoanode coupled with an inexpensive silicon solar cell. *Engineering*, 2023, 25: 128—137.
- [56] Shi YJ, Wang YJ, Yu JY, et al. Superscalar phase boundaries derived multiple active sites in SnO₂/Cu₆Sn₅/CuO for tandem electroreduction of CO₂ to formic acid. *Advanced Energy Materials*, 2023, 13(13): 2370047.
- [57] Zhao DM, Wang YQ, Dong CL, et al. Boron-doped nitrogen-deficient carbon nitride-based Z-scheme heterostructures for photocatalytic overall water splitting. *Nature Energy*, 2021, 6: 388—397.
- [58] 中华人民共和国国务院办公厅. 新时代的中国能源发展. 人民日报, 2020-12-22(010). doi:10.28655/n.cnki.nrmrb.2020.012587.

Low-cost Large-scale Green Hydrogen Electricity Production and Low-cost Large-capacity Long-term Energy Storage

Liejin Guo^{1*} Hui Jin¹ Yonggang Guan²

1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

Abstract Energy is essential for the national economy. The development of efficient, low-cost, large-scale green hydrogen/electricity production technologies, alongside effective long-term energy storage and transportation technologies, can provide crucial support for reducing CO₂ emissions, ensuring an ample and affordable green hydrogen/electricity supply, and building a new green energy system. This will also help secure national energy stability and achieve the “dual carbon” goals. This article examines the fundamental shortcomings and key challenges in China’s current energy supply structure. It explores the core aspects of converting fossil fuels and renewable energy, highlighting three critical scientific issues: efficient conversion and storage of renewable energy carriers like hydrogen, system integration and optimization of direct hydrogen production from fluctuating power sources, and the multi-objective unification of carbon-based hydrogen production and its conversion and utilization processes. This article summarizes recent progress and achievements in energy science, achieved through interdisciplinary approaches, including natural and basic sciences, and explores cutting-edge research directions and funding strategies.

Keywords low-cost and large-scale green hydrogen production; low-cost; large-capacity and long-term energy storage; CO₂ emission reduction; “Double Carbon” target

郭烈锦 中国科学院院士,世界科学院院士,工程热物理与能源利用学家,我国能源动力多相流及氢能学科的主要学术带头人之一,主要从事能源动力多相流及氢能科学技术的研究。现任西安交通大学国际清洁与可再生能源研究中心创始主任、新能源科学与工程专业创始人及学科带头人、绿色氢能全国重点(动力工程多相流国家重点)实验室主任。

(责任编辑 贾祖冰 张强)

* Corresponding Author, Email: lj-guo@mail.xjtu.edu.cn