

热点追踪

氢能创新性研究及其国际产业发展战略

刘凡, 朱宏康

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘要: 氢能作为一种储量丰富、零碳排放、能量密度大且转化效率高的绿色能源, 其开发利用受到了广泛的重视。阐述了氢的制备新方法、储氢新技术以及氢能在燃料电池应用方面的创新性研究, 对今后氢能领域的发展方向进行了展望。采用可再生能源制氢或光催化水分解制氢, 再通过燃料电池将其转变成电能, 有望解决环境污染、资源短缺问题。并对2020年以来欧盟、美国、澳大利亚、英国、德国、中国出台的氢能产业发展战略进行了综述, 预测未来氢能系统的建立对全球能源结构向低碳化发展具有十分重要的意义。

关键词: 氢能; 制氢; 储氢新技术; 燃料电池; 氢能产业

中图分类号: F426.2; TM911.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2021)08-0639-06

Innovative Research on Hydrogen Energy and Its International Industrial Development Strategies

LIU Fan, ZHU Hongkang

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: As a kind of green energy with abundant reserves, zero CO₂ emission, high energy density and high conversion efficiency, hydrogen energy has received extensive attention for its development and utilization. By reviewing the new methods of hydrogen production and preparation, new technologies of hydrogen storage and innovative research on the application of hydrogen energy in fuel cells, this paper discusses the development direction of hydrogen energy in the future. It is expected to solve the problems of environmental pollution and resource shortage by producing hydrogen using renewable energy or method of photocatalytic water splitting, and then converting it into electric energy through fuel cells. The development strategies of hydrogen energy industry issued by the European Union, the United States, Australia, the United Kingdom, Germany and China since 2020 are reviewed. It is predicted that the establishment of hydrogen energy system in the future is of great significance to the low-carbon development of energy structure in our world.

Key words: hydrogen energy; hydrogen production; new technology for hydrogen storage; fuel cell; hydrogen industry

1 前言

随着世界能源和环境问题的日益严峻, 新能源的开发、利用成为人们关注的热点, 氢能作为一种绿色能源而备受关注。氢能是清洁、高效、安全、可持续的二次能源, 可通过多种途径获取^[1,2]。合理利用氢能, 一方面能提高能源利用效率, 减少能源浪费; 另一方面可以控制环境污染, 降低大气污染和温室气体排放。

氢能的产业链包括制氢、储氢、运氢、应用等环节, 但目前存在制氢技术难度高、成本高, 储运困难大等问题, 因此制氢及储氢技术的突破, 才是氢能产业发展的决定因素^[3]。常规的制氢技术路线以传统化石能源制氢为主, 为了实现能源转型, 制氢路线未来将快速由化石能源制氢逐步过渡至可再生能源制氢。氢气的安全储存性能和运输效率也是氢能网络建设的瓶颈问题。因此, 要满足产业发展的现实需求, 使其健康、快速发展, 就要进行制氢、储氢、运氢安全技术的系统性研究。燃料电池是氢能应用的主要方式, 处于产业链的核心地位。氢燃料电池以氢为燃料, 通过氧化还原反应完成氢能与电能的转换, 具有转换效率高、无碳排放等优点, 是目前最佳的氢能利用技术^[4-6]。用可再生能源制氢, 用储氢材料储氢, 用氢燃料电池发电, 将构成“净零排放”、

收稿日期: 2021-07-26 修回日期: 2021-08-17

基金项目: 陕西省科学技术情报学会项目资助(2020KT-05)

第一作者: 刘凡, 女, 1992年生, 助理工程师,

Email: 812843316@qq.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202107080

可持续利用的氢能系统,成为可再生能源之外实现“深度脱碳”的重要路径。

随着世界逐步向低碳化、无碳化与清洁化方向转型,氢能的应用研究和相关基础设施建设也将持续加速发展^[7,8]。欧盟、美国、澳大利亚、英国、德国等国家和地区大力支持氢能产业,相继制定氢能发展战略。为实现 2030 年前碳达峰及 2060 年前碳中和目标,我国将氢能作为中国能源转型和动力转型的重大战略方向,引导高碳排放制氢工艺向绿色制氢工艺转变,发展氢能燃料电池技术,推动氢能社会的构建。

2 氢能创新研究热点及应用

2.1 氢的制备生产新方法

氢气的制备、生产是目前需要攻克的一大难题,如何低成本地工业化、绿色制氢备受科研人员关注。氢能利用不可避免地要首先考虑氢的来源问题,氢能源按原材料划分,可以分为“灰氢”“蓝氢”和“绿氢”3类。“灰氢”是利用化石燃料石油、天然气和煤制取氢气,制氢成本较低但碳排放量大;“蓝氢”是利用化石燃料制取氢气,并采用碳捕获、利用和封存(CCUS)技术处理制氢过程中产生的 CO₂ 副产品,但是该方法不可持续也不环保;“绿氢”是利用可再生能源(太阳能、水电、风能等)与电解槽结合电解水制氢,该过程完全没有碳排放,高效低碳可持续,并且技术业已成熟。利用再生资源产生的电力进行水分解以及基于光催化反应直接利用阳光分解水制氢,是可持续制氢的两种有前景的方法。开发和设计高效的产氢电催化剂和光催化剂是当今科学家面临的最具挑战性的科研问题之一^[9-11]。

爱达荷州国家实验室的 Ding 等为电化学电池开发了一种新的电极材料,能够有效地将多余的电和水转化为氢,当电力需求增加时,电化学电池是可逆的,可以将氢气转化为电网的电力。新的氧电极材料——一种钙钛矿化合物的氧化物,是能够同时促进水分解和氧还原反应的电子、氧离子和质子的“三重导体”。三维网状结构的电极,具有更多的表面积将水分解成氢和氧,他们将两种技术结合,制备的新式氧电极材料在更低的温度(400~600℃)下能够实现自我持续以及可逆反应的操作^[12]。

阿卜杜拉国王科技大学的 Cadiou 等开发出一种基于金属-有机框架材料(metal organic framework, MOF)的水分解光催化剂,使研究人员在利用阳光生产清洁氢燃料方面迈进了一步。该 MOF 结构将钛金属离子和 H4TBAPy(一种已知能从广谱阳光中吸收能量的有机分子链)结合,提高了钛基 MOF 材料的光催化性能,该工

作开拓了新的研究方向^[13]。

神户大学分子光科学研究中心的 Takashi 小组使用赤铁矿光催化剂催化水分解产生氢气,通过“介晶技术”使赤铁矿光催化剂中的纳米粒子精确排列以控制电子及其空穴的流动。通过将赤铁矿介晶(由约 5 nm 的微小纳米颗粒组成的超结构)涂覆到透明电极基板上后退火制备了具有极高电导率的光电阳极,从而成倍地加速了水分解反应,大大提高了氢气产量^[14]。

2.2 储氢新技术

储氢技术作为氢气从生产到利用过程中的桥梁,将氢气以稳定的形式储存起来,以方便使用。目前,氢气储存技术主要有高压储氢、氢气液化、有机液体储氢、固态储氢等。高压气态储氢已得到广泛应用,低温液态储氢在航天等领域得到应用,有机液体储氢和固态储氢尚处于应用示范阶段。储氢成本居高不下,核心技术突破少,成为制约氢能发展的关键。为了实现氢能的广泛应用,研发高效、低成本、低能耗的储氢技术是关键。

北京航空航天大学水江澜团队通过氢氟酸不完全蚀刻 Mxene 开发了一种高容量的室温储氢材料——块状 Ti₂CT_x(T 为官能团)。该材料在室温和相对安全的 6 MPa 压力下储存 8.8% 的氢气(质量比),几乎是已报道的相同压力下的最高储氢能力的两倍。即使在大气环境下,块状 Ti₂CT_x 仍然能够保留约 4% 的氢气。值得一提的是, Ti₂CT_x 材料中的储氢是稳定且高度可逆的,氢气的释放可以在低于 95℃ 的温度下通过压力调控^[15]。

西安交通大学张锦英团队开发了石墨烯界面纳米阀固态储氢材料,以高活性轻金属氢化物为原材料,在不同组分界面建立石墨烯界面纳米阀结构,通过界面纳米阀非催化动力学调控机制实现储氢材料安全、可控、稳定释氢。同时,该界面纳米阀结构能有效隔绝水氧,杜绝氢气自发泄露,提高材料的储运安全性,避免了使用笨重的高压金属罐或者添加额外的保护装置来进行运输,极大地提高了材料便携性和系统储氢密度^[16]。

以色列威兹曼科学研究院 Milstein 课题组成功开发了一种新型高效的液态-有机氢载体体系,该体系通过钌螯合物催化乙二醇和乙醇的脱氢酯化反应以及可逆条件下的氢化,实现了氢气的储存和释放,具有储氢密度高、循环性好、条件温和等优点。反应物乙二醇和乙醇都是丰富、廉价、可持续和相对无毒的工业原料,该体系可在无溶剂和无碱条件下进行反应,成本低,展现了较好的经济性和良好的发展前景,对促进液态有机储氢体系的实际应用具有重要的价值^[17]。

2.3 氢能的应用——燃料电池

2.3.1 燃料电池的创新研究

氢能可作为电池驱动的电动汽车的替代能源,只需

燃料电池和车载压缩氢气罐即可为汽车提供动力。从氢能实际应用来看,氢燃料电池汽车是氢能高效利用的最有效途径,当前氢能产业链已初具雏形,且燃料电池系统性能已满足商业化需求,但氢燃料电池汽车的大规模商业化应用依然受经济性及实用性制约。

尽管氢燃料电池技术前景广阔,但是氢燃料电池的膜电极技术比锂电池难得多,核心技术有待突破。此外,在催化剂方面,采用贵金属铂等成本高昂,因此探索新型电极材料及催化剂就显得尤为重要^[18]。

丹麦哥本哈根大学的 Sievers 等研究出一种廉价铂催化剂,使用纳米线网络代替纳米颗粒,该网络具有丰富的表面积和高的耐用性,可以用于更便宜、更加可持续的氢动力汽车。在实验室中,它只需要目前氢燃料电池中所需铂量的一小部分。与此同时,这种新型催化剂比目前氢动力汽车上使用的催化剂要稳定得多,这种新催化剂的特点是不含碳。有了这一突破,氢动力汽车的概念变得越来越深入人心,变得更加现实化,这也让氢动力汽车更便宜、更可持续、更耐用^[19]。

南京工业大学邵宗平提出了基于热膨胀补偿策略制备复合电极,实现了燃料电池阴极与其他电池组件之间的完全热机械兼容。他们将具有较高电化学活性和较高热膨胀系数的钴基钙钛矿与负热膨胀材料结合在一起,在两者之间引发了有益的界面反应,从而制备了具有与电解质热膨胀性能良好匹配的复合电极。优化的钙钛矿化学组成和良好的热机械稳定性,使这种复合阴极具有出色电化学性能,并为未来的固体氧化物燃料电池的电极设计开辟了一条崭新路径^[20]。

2.3.2 中国燃料电池汽车发展现状

燃料电池一直受到各国政府和企业的关注,对其研发、应用示范和商业化应用的资金投入不断增加,以期在未来的能源竞争中占据领先地位。目前氢能和燃料电池已经在一些细分领域实现了商业化,其中最大的市场是汽车领域。中国倡导新能源汽车的发展,为汽车产业带来了新的发展契机^[21]。

从目前来看,日本、韩国和中国对燃料电池汽车的整体投入最高,以日本丰田、韩国现代为代表的公司燃料电池乘用车和氢能大巴、物流车的产量均处于全球领先;欧洲的燃料电池研发起步很早,近年来奔驰等传统车企以及博世等一级供应商均已进入燃料电池汽车领域。

在技术领域,中国在燃料电池发动机技术方面达到国际先进水平,但燃料电池发动机系统供应链基础较为薄弱,尚未形成较为成熟的零部件供应体系。关键零部件仍主要依赖进口,燃料电池的关键材料包括催化剂、质子交换膜和碳纸等材料大都依赖进口;膜电极、双极

板、空压机、氢循环泵等与国外先进技术相比存在较大差距。近年来,许多政策和规划被密集地提出,各公司、研究机构和大学正在开发质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)和固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)相关技术,初步形成了燃料电池相关技术的本地供应链,然而,寿命仍然是燃料电池技术的关键问题。因此,当前国内企业仍需要攻克关键材料、关键部件的核心技术难关。另外,燃料电池汽车领域的相关基础设施(氢燃料加气站)、成本、耐久性等因素都应该被考虑^[22, 23]。

3 国际氢能项目计划

技术的进步是实现氢能产业化的必备条件,有力的政策支撑将保证氢能产业能够顺利发展。氢能作为推动全球能源转型的一种可行技术路线,发展潜力越来越被国际认可,世界多国积极布局氢能产业。

3.1 欧盟签署“氢协议”

2019年28个欧洲国家签署了一项“氢协议”,提出“氢谷”概念,呼吁加强可持续氢研究和创新。“氢谷”是一个地理区域——一个城市、一个地区、一个岛屿或一个工业集群,其中几个主要的氢应用结合成为综合氢生态系统,该系统通过消耗大量的氢,来改善项目背后的经济效益。理想情况下,它涵盖整个氢气价值链:生产、储存、分销和最终使用,欧盟将先期进行燃料电池和氢联合建设项目^[24]。

3.2 美国能源部氢能项目计划

2020年11月美国能源部(DOE)发布了他们制定的氢能项目计划(Hydrogen Program Plan),为其氢气研究、开发和示范活动提供一个战略框架。该计划作为总体文件,确定了氢能计划的战略方向,并补充了DOE各办公室从事氢能研发活动的技术和未来的方案性计划,旨在促进氢气的生产、储存、运输和应用。该计划包括先进的氢储存和基础设施研发,如运输和储存氢的新型材料或氢载体,以及相关基础设施部件的材料。此外,还涉及到氢的集成生产、储存和燃料系统,包括制氢、储存、分配和使用在内的完整系统的创新方法等。该计划的实施将有助于实现美国氢能产业的发展愿景:将清洁环保、成本低廉、安全可靠的氢能广泛应用于各个领域,并成为美国能源体系中的重要组成部分,推动美国的能源体系变革^[25]。

3.3 澳大利亚联邦政府《国家氢能战略》

2019年11月澳大利亚联邦政府发布的《国家氢能战略》,确定了15大发展目标,在未来10年,该战略将确定具体指标,这些指标将显示市场和技术在哪些方面进

展迅速,在哪些方面进展缓慢或落后。并确定了 57 项联合行动,均围绕“国家协调、发展产能、满足当地需求”的主题,这些具体行动同时考虑到了相关的出口、运输、工业使用、天然气网络、电力系统,以及诸如安全、技术和环境影响等跨领域问题。该战略旨在将澳大利亚打造为亚洲三大氢能出口基地之一,同时在氢安全、氢经济以及氢认证方面走在全球前列。该战略将侧重于消除市场壁垒,建立有效的供需关系,并提高澳大利亚氢能供应的全球成本竞争力。根据《国家氢能战略》,到 2030 年,澳大利亚期望进入亚洲氢能市场的前 3 名,成为有国际影响力的氢能出口国^[26]。

3.4 英国的“氢能网络计划”

2021 年 1 月英国制定“英国氢能网络计划”,提出在全球建成首个 100% 的氢气供应管道网络,以更广泛的行动实现向氢能转型;同时,到 2030 年建成首座氢能城镇,计划在 2023 年前将高达 20% 的氢混合到当地天然气网络中,到 2025 年和 2030 年分别实现 1 GW、5 GW 的制氢目标。“英国氢能网络计划”还指出,英国政府的氢能战略需要在多个领域做好支持工作,包括:在制氢方面,必须保证足够的氢气产能,以便从 2030 年开始,进行广泛的管道网络输氢;在储氢方面,从 2025 年起,需要将储氢能力扩大到每年几百 GW 的水平,一些现有的气体储存设施将转化为储氢设施;为了更快地供应更多氢气,到 2030 年,确保碳捕获、封存技术在多个产业集群中大规模发展。该计划旨在推进建设英国第一座氢能城镇,不仅仅是为了取代目前大多数家庭所依赖的天然气,更是为了以安全可靠的方式减少碳排放。氢能城镇将为家庭、企业和社区提供有意义的选择,对英国全国范围内氢能的经济效益和规模化发展十分重要^[27]。

3.5 德国政府《国家氢能战略》

德国高度重视“绿色氢能源”,将氢视为德国能源转型成功的关键原材料。2020 年 6 月,德国政府发布了总投资将达 90 亿欧元的《国家氢能战略》,推出 38 项具体措施,涵盖氢的生产制造和应用等多个方面。在生产领域,致力于对传统电解氢生产方式的革新,政府鼓励使用可再生能源产生的过量电力生产氢气;在存储领域,研究氢的各种存储技术的可能性,比如地下储氢、利用现有天然气存储设施储氢、固态储氢等;在运输领域,除了关注利用德国发达的天然气管网传输气态氢外,还鼓励根据氢可与不饱和有机化合物反应形成能量丰富液体的特点,开发有机液体氢化物储氢技术,使氢能像石油一样存储或运输;在应用领域,德国专注于改善氢燃料电池的效率、寿命和性能。此外,在太阳能、环保以及气候保护方面,德国政府也做出了相应的努力,将《国

家氢能战略》作为减少该国温室气体排放计划的一部分,多主体行动致力环境保护。德国希望 2050 年实现气候中和的目标以及交通运输部门的减排目标,计划建设众多加氢站,形成欧洲最大的加氢站网络。预计到 2030 年,德国所建氢气生产设施的产能将达到 5 GW^[28]。

3.6 中国氢能计划

据统计,我国氢气产能约每年 4100 万吨,产量约 3342 万吨,是世界第一产氢国^[29]。我国氢气主要来源是“灰氢”,即化石能源制氢,主要是工业副产氢,“蓝氢”和可再生能源制取的“绿氢”的占比需进一步提升。现如今我国已将氢能产业作为战略性新兴产业,从鼓励创新与投资、奖励与优惠等多方面颁布了多项支持政策,各级地方政府与企业积极开展产业布局和项目建设^[30],相关重要政策列于表 1。

表 1 2016~2020 年国家层面氢能产业典型政策^[30]

Table 1 Typical policies for hydrogen energy industry at national level from 2016 to 2020^[30]

时间	典型政策
2016 年	国家发改委、国家能源局颁发《能源技术创新行动计划(2016-2030 年)》,将氢能列为 15 项能源技术革命重点任务之一
2018 年	四部委发布《关于进一步完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》,提出燃料电池乘用车按燃料电池系统的额定功率进行补贴
2019 年	国务院发布《2019 年国务院政府工作报告》,要求推进充电、加氢等设施建设
2020 年 5 月	中共中央颁布的《2020 政府工作报告》提出,引导加大氢燃料电池基础科研投入;四部委联合印发的《关于扩大战略性新兴产业投资 培育壮大新增长点增长极的指导意见》指出,加快制氢加氢设施建设
2020 年 11 月	国务院办公厅印发《新能源汽车产业发展规划(2021-2035 年)》,提出要攻克氢能储运、加氢站和车载储氢等氢燃料电池汽车应用支撑技术

2020 年底国务院发布《新时代的中国能源发展》白皮书^[31],提出要加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系,提出了加速发展“绿氢”制取、储运和应用等氢能产业链技术装备,促进氢能燃料电池技术链、氢燃料电池汽车产业链发展。“十四五”规划明确我国将积极布局氢能产业,并部署了一批氢能重点专项任务^[32]。2021 年全国两会召开期间,“2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和”的目标也被首次写入政府工作报告。两会提出,绿色转型可以从优化产业结构和调整能源结构入手,加快发展地热、氢能等新能源,有序开展绿色清洁能源替代。2021 年上半年,国内各省纷纷出台了“十四五”规划纲要,全国大部分省、自治区、直辖市均把发展氢能

相关的目标列入“十四五”规划纲要中^[33], 如表 2 所列。

表 2 中国主要地区氢能产业发展规划^[33]

Table 2 Hydrogen energy industry development plan of major regions in China^[33]

省区市	政策名称
京津冀	《北京市氢燃料电池汽车产业发展规划》《天津市氢能产业发展行动方案(2020-2022年)》《河北省氢能产业中长期发展规划》
长三角	《上海市燃料电池汽车发展规划》《江苏省氢燃料电池汽车产业发展行动规划》《浙江省加快培育氢能产业发展的指导意见》《六安市氢能产业发展规划(2020-2025年)》《铜陵氢能产业规划》
珠三角	《广州市氢能产业发展规划(2019-2030年)》《佛山市氢能产业规划(2018-2030年)》《茂名市氢能产业发展规划》
其他	《山东省氢能产业中长期发展规划(2019-2035年)》《山西省氢能产业中长期发展规划》《内蒙古自治区氢能产业中长期发展规划》《重庆市氢燃料电池汽车产业发展指导意见》《武汉氢能产业发展规划方案》《成都市氢能产业发展规划(2019-2023年)》

我国对于氢燃料电池汽车的发展也给予了多项具体政策支持, 在 2020 年出台的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)》等文件中, 明确提出要大力发展氢燃料电池汽车, 提出要攻克氢能储运、加氢站和车载储氢等燃料电池汽车应用支撑技术^[34]; 并提出到 2030 年, 我国要实现氢燃料电池汽车保有量 200 万辆的目标。另外, 国务院《2020 政府工作报告》也明确要引导加大氢燃料电池基础科研投入。在国家政策大力支持下, 我国氢燃料电池汽车的产业发展将不断加速, 市场将不断扩大。

目前国内氢能及氢燃料电池产业链仍处于起步阶段, 在诸多环节和产品的技术经济性和可靠性上还有很大差距。关键核心技术的自主可控是最重要的, 所以要在关键装备制造和关键材料的开发制备上下大力气。随着我国氢能产业的顶层设计的推出以及各地氢燃料电池产业规划的推进, 相关技术有望得到突破, 规模化应用也将带来成本下降, 这将加快氢能的商业化应用进程。

4 结 语

氢能作为一种高能量密度、清洁高效能源, 在解决能源危机、全球变暖及环境污染等方面发挥着重要作用。基于可再生能源电分解水制氢以及光催化水分解制氢有望成为大规模制氢发展趋势。储氢技术是氢能应用的关键, 今后研究重点应集中在新型高效安全的储氢材料的研发。氢燃料电池技术是新能源汽车产业的核心技术, 现阶段通过改良催化剂以及研发新型电极材料降低成本、提高安全性, 推进燃料电池新能源汽车大范围推广。

梳理多国对氢能产业和技术的重点建设, 可以看到未来 30 年全球能源市场需求结构将发生根本变化, 化石燃料的比例持续降低, 清洁能源份额将不断增长, 氢能产业会有很大的空间。可以预测, 未来几乎所有的经济领域都将考虑使用绿色氢能, 这将有利于增加氢能的未来需求, 还有利于通过潜在的协同作用来降低绿色氢能价值链中的成本。

总的来看, 氢能的研究并不局限于技术层面, 更将涉及到能源安全、能源技术、氢能产业、社会消费等更加广阔的层面, 这将对未来社会具有巨大的潜在经济价值和重要的战略意义。氢能系统的构建和发展, 必将成为涉及到运输、建筑、工业、制造、电力以及全社会普遍能源利用的一次巨大的产业革命。

参考文献 References

- [1] 曹蕃, 陈坤洋, 郭婷婷, 等. 分布式能源[J], 2020, 5(1): 1-8. CAO F, CHEN K Y, GUO T T, *et al.* Distributed Energy[J], 2020, 5(1): 1-8.
- [2] 于蓬, 王健, 郑金凤, 等. 汽车实用技术[J], 2019(24): 22-25. YU P, WANG J, ZHENG J F, *et al.* Automobile Applied Technology [J], 2019(24): 22-25.
- [3] 李璐伶, 樊栓狮, 陈秋雄, 等. 储能科学与技术[J], 2018, 7(4): 586-594. LI L L, FAN S S, CHEN Q X, *et al.* Energy Storage Science and Technology[J], 2018, 7(4): 586-594.
- [4] 程婉静, 李俊杰, 刘欢, 等. 煤炭经济研究[J], 2020, 40(3): 4-11. CHENG W J, LI J J, LIU H, *et al.* Coal Economic Research [J], 2020, 40(3): 4-11.
- [5] 霍现旭, 王靖, 蒋菱, 等. 储能科学与技术[J], 2016, 5(2): 197-203. HUO X X, WANG J, JIANG L, *et al.* Energy Storage Science and Technology[J], 2016, 5(2): 197-203.
- [6] 邵志刚, 衣宝廉. 中国科学院院刊[J], 2019, 34(4): 469-477. SHAO Z G, YI B L. Bulletin of Chinese Academy of Sciences [J], 2019, 34(4): 469-477.
- [7] DU Z X, MU X H. Petroleum Processing and Petrochemicals [J], 2021, 52(2): 102-110.
- [8] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. Journal of Energy Storage [J], 2020, 27: 1010471.
- [9] ZHANG B, ZHANG S X, YAO R, *et al.* Journal of Electronic Science and Technology [J], 2021, 19(2): 100080.
- [10] LIU X, WANG P, LIANG X, *et al.* Materials Today Energy [J], 2020, 18: 100524.
- [11] YOU B, SUN Y. Accounts of Chemical Research [J], 2018, 51(7): 1571-1580.
- [12] DING H P, WU W, JIANG CH, *et al.* Nature Communications [J], 2020, 11(1): 1-11.

- [13] AMANDINE C, NIKITA K, SIVARANJANI S, *et al.* *Angewandte Chemie International Edition*[J], 2020, 59(5): 13468–13472.
- [14] ZHANG Z J, NAGASHIMA H, TACHIKAWA T. *Angewandte Chemie International Edition*[J], 2020, 59(23): 9047–9054.
- [15] LIU S, LIU J, LIU X, *et al.* *Nature Nanotechnology*[J], 2021, 16: 331–336.
- [16] 西安交通大学. 电气学院绝缘教研室张锦英教授团队在高密度固态储氢材料稳定可控释氢及其应用方面取得重要进展[EB/OL]. (2021-05-11) [2021-07-15]. <http://cne.xjtu.edu.cn/info/1002/1771.htm>
Xian Jiaotong University. Important Progress on Stable and Controlled-Release Hydrogen of Solid State Hydrogen Storage Materials and Its Application from Professor Zhang Jinying Group. [EB/OL]. (2021-05-11) [2021-07-15]. <http://cne.xjtu.edu.cn/info/1002/1771.htm>
- [17] ZHOU Q Q, ZOU Y Q, BEN-DAVID Y, *et al.* *Chemistry: A European Journal*[J], 2020, 26(67): 15487–15490.
- [18] JIAO K, XUAN J, DU Q, *et al.* *Nature*[J], 2021, 595: 361–369.
- [19] SIEVERS G W, JENSEN A W, QUINSON J, *et al.* *Nature Materials*[J], 2020, 20: 208–213.
- [20] ZHANG Y, CHEN B, GUAN D, *et al.* *Nature*[J], 2021, 591: 246–251.
- [21] SU H. E3S Web of Conferences[J], 2021, 242: 02007.
- [22] ZHAO F, MU Z, HAO H, *et al.* *Energy Technology*[J], 2020, 8(11): 1–16.
- [23] HU M. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*[J], 2020, 17(3): 034001.
- [24] REYES K G, MARUYAMA B. *MRS Bulletin*[J], 2019, 44(7): 529.
- [25] Energy Department Releases its Hydrogen Program Plan[EB/OL]. (2020-11-12) [2021-07-15]. <https://www.energy.gov/articles/energy-department-releases-its-hydrogen-program-plan>
- [26] Australia's National Hydrogen Strategy[EB/OL]. (2019-11-22) [2021-07-15]. <https://www.industry.gov.au/data-and-publications/australias-national-hydrogen-strategy>
- [27] 吴昊. 英国氢能网络计划发布[EB/OL]. (2021-01-27) [2021-07-15]. <https://www.nationalee.com/newsinfo/1121053.html>
WU H. British Government Issued Britain's Hydrogen Network Plan [EB/OL]. (2021-01-27) [2021-07-15]. <https://www.nationalee.com/newsinfo/1121053.html>
- [28] AMELANG S. Germany's National Hydrogen Strategy[EB/OL]. (2020-06-17) [2021-07-15]. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-national-hydrogen-strategy>
- [29] 中国氢能及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书(2020)[M]. 北京: 人民日报出版社, 2021.
China Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry Innovation Strategic Alliance. White Paper of Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry in China 2020[M]. Beijing: People's Daily Press, 2021.
- [30] 李建林, 李光辉, 郭丽军, 等. 电气应用[J], 2021, 40(6): 10–16.
LI J L, LI G H, GUO L J, *et al.* *Electrotechnical Application*[J], 2021, 40(6): 10–16.
- [31] 国务院新闻办公室. 《新时代的中国能源发展》白皮书[EB/OL]. (2020-12-21) [2021-07-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm
The State Council Information Office of the People's Republic of China. Book of China's Energy Development in the New Era [EB/OL]. (2020-12-21) [2021-07-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/21/content_5571916.htm
- [32] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[R/OL]. (2021-03-12) [2021-07-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm
Outline of the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Vision for 2035 [R/OL]. (2021-03-12) [2021-07-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm
- [33] 程一步, 王晓明, 李杨楠, 等. 当代石油石化[J], 2021, 29(4): 10–17.
CHENG Y B, WANG X M, LI Y N, *et al.* *Petroleum & Petrochemical Today*[J], 2021, 29(4): 10–17.
- [34] 国务院办公厅. 国务院办公厅印发《新能源汽车产业发展规划(2021–2035 年)》[R/OL]. (2020-11-02) [2021-07-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-11/02/content_5556762.htm
General Office of the State Council of the People's Republic of China. General Office of the State Council of the People's Republic of China Issued "New Energy Vehicle Industry Development Plan (2021–2035)" [R/OL]. (2020-11-02) [2021-07-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-11/02/content_5556762.htm

(编辑 惠琼)