

•绿色建筑与智能建造•

DOI:10.12454/j.jsuese.202300796



本刊网刊

低碳建筑氢能利用研究进展

朱新荣^{1,2},王勇超²,杨柳²

(1. 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要:在建筑领域应用可再生能源可以大大降低建筑碳排放,但由于可再生能源的供应呈间歇性,无法满足建筑全时段的用能需求。建筑氢能利用系统通过可再生能源发电、电解水制氢、储氢以及燃料电池发电等环节可以实现可再生能源的储存和再利用,是低碳建筑应对可再生能源间歇性问题的有效途径。近年来,国内外对氢能应用于建筑中的形式开展了大量研究,本文对国内外氢能应用于建筑的背景、利用形式和面临的问题等方面进行综述。首先,梳理了氢能从制取到建筑应用的各个环节,总结了目前主流的制氢、储运氢和建筑用氢的方式及其未来发展趋势。结果显示:可再生能源电解水制氢由于尚处于发展初期,因此占氢能制取方式的比例很小,但随着风光发电生产成本和远距离储运氢成本的进一步降低,可再生能源电解制氢可能是未来制氢主要方式之一;质子交换膜电解槽在消纳波动性和随机性较大的风电、光伏方面有良好的应用;液氢车船输送、纯氢管道及天然气掺氢管道输送可能为未来氢能运输的主要方式;目前建筑用氢方式包括天然气掺氢、纯氢、转换为甲烷使用以及供氢燃料电池热电联供。其次,综述了目前建筑氢能利用系统的具体形式,包括光储氢系统与光热系统、地源热泵系统、氢燃料汽车、蓄电池和化石燃料系统结合使用模式,对系统的组成、运行策略等进行了梳理。搜集整理了目前国内外氢能应用于建筑的实际情况,包含住宅建筑、办公建筑、建筑群以及社区等,并对部分典型案例展开描述,总结了各案例中氢能利用的模式以及关键参数。对比了光伏发电制氢、储运氢、氢燃料电池的成本。结果显示:光伏制氢成本虽然距离焦炉煤气制氢尚有差距,但与天然气重整制氢、甲醇制氢、氨分解制氢方式相比已有一定的竞争力;如果从碳排放的角度进行考虑,光伏制氢相较于焦炉煤气制氢在未来有明显优势;目前中国氢能相关设备系统多为依赖进口,高成本氢燃料电池是阻碍氢能推广的关键因素之一。最后,对中国氢能应用于建筑的问题进行了探讨,并总结了建筑氢能利用的发展方向,包括:对于不同储能系统如何匹配不同场景下的建筑负荷特征;对氢能系统应用于建筑的综合评价;可再生能源发电制氢、氢燃料电池、热电联供等关键技术的进一步突破以降低氢能利用成本等。研究结果可为氢能在中国建筑领域的推广应用提供参考。

关键词:碳中和;低碳建筑;可再生能源;氢储能;绿氢

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)03-0061-11

2020年,中国提出二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和的目标^[1]。为实现“双碳”目标,各领域要将以化石能源为主体的能源消费体系转变为以可再生能源为主体并适应碳中和的现代化、低碳化和智能化的新型能源体系^[2]。氢能作为一种清洁能源,近年来受到了世界各国及能源企业的广泛关注。国际氢能委员会于2017年发布了全球首份氢能未来发展趋势调查报告,报告指出,到2050年,氢能产业将为全球每年减少 6×10^9 t二氧化碳排

放,创造 2.5×10^{12} 美元的市场价值^[3]。多数发达国家已制定了多种氢能发展战略,其中,美国、日本、欧盟等国家制定氢能发展政策^[4-7]较早,研发氢能关键技术时间较长,目前已取得较大进展。中国于2019年将氢能首次写入政府工作报告中,并在2020年公布的《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》中将氢能列入能源一类。中国氢能联盟于2021年发布的《中国氢能源及燃料电池产业白皮书(2020)》预测中国2030年氢能占终端能源体系达5%,2050年将达10%^[8],氢能将与

收稿日期:2023-10-09 修回日期:2023-11-23 网络出版日期:2024-06-05

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2024JC-YBMS-313);高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室开放课题(20220112);陕西省教育厅重点实验室科学研究计划项目(23JS029);西安建筑科技大学前沿交叉领域培育专项(X20220078)

作者简介:朱新荣(1983—),女,教授,博士。研究方向:建筑热工与节能。E-mail:zhuxinrong@xauat.edu.cn

电力共同成为中国终端能源消费的主体。

目前,氢能在中国主要应用于工业和交通领域,而部分发达国家对氢能在建筑上的应用已展开了许多积极探索和实践。建筑领域碳排放占中国全社会总碳排放近 50%^[9],充分利用可再生能源是降低建筑领域碳排放的必要途径。在城市和社区层面,氢气可以直接供给建筑使用,也可以作为发电厂的调峰电站、为氢燃料汽车提供动力、作为工业生产的原料和燃料、与天然气混合为城市提供燃气,还可以为雨水回收和绿化灌溉提供电能^[10-11]。在建筑单体层面,氢能可以与光伏发电、太阳能热水和热泵等系统有效配合,为建筑提供热、电、冷多种形式的能源,与建筑本体蓄热、蓄电池和蓄热水箱一起,为建筑提供不同周期不同规模的蓄能方案,全面覆盖建筑的用能需求^[12-14]。

与此同时,建筑领域利用的太阳能、风能等可再生能源有强烈的间歇性,如何对可再生能源采用合理有效的储能技术,尤其是长周期储存,是目前亟待解决的问题。利用太阳能等可再生能源电解水制取氢气并通过特定的方式储存,使用时再将氢气转化为电能热能的储氢蓄能是一种全新的太阳能蓄存方式,也是一种零碳排放、可长周期储存的储能方式。在能源缺乏时利用氢燃料电池供电、燃烧氢能供能或将氢能转化为其他形式再利用^[15],这样将氢能作为储能介质的一种“可再生能源—氢能—其他能源”的模式可有效解决可再生能源无法全时段满足建筑能源需求的问题,为中国零碳建筑的实现提供技术路径。

相比较其他储能方式,储氢蓄能具有以下明显优势:1)太阳能制氢过程几乎不产生二氧化碳排放;氢气利用过程,不管是通过“掺氢”技术燃烧还是通过燃料电池技术发电,利用产物都是水,真正从源头上实现了能源脱碳。2)氢气可以长时间(小时到季度)大规模(百吉瓦级别)储存,可以满足建筑不同规模不同周期的蓄能需求。3)抽水储能、熔盐蓄热、超级电容和压缩空气等大规模储能技术一般需要特定的地理条件和场地条件,而储氢蓄能够灵活应用于建筑的不同场合,且不会对生态环境产生破坏。4)太阳能发电、制氢和用氢环节降本空间大,规模化储氢蓄能成本有望比储电低一个数量级。5)氢气运输方式灵活,充气过程十分便捷,相较蓄电池充电需要数小时,充气一般只需要几分钟^[16-17]。

目前,中国的可再生能源制氢与煤制氢等其他传统制氢技术相比在成本上还未占据优势,但从减碳角度来说,可再生能源制氢相较于煤制氢在未来有明显优势。氢燃料电池的成本较高是中国建筑氢能利用的一个关键阻碍。随着光电生产成本和远距离储运

氢成本的进一步降低以及绿电绿氢相关技术的发展,氢能的综合优势将会凸显。中国现有的各级政策中,氢能应用场景更多偏向于交通领域,而建筑作为未来氢能的重要应用场景,还缺少对其具体发展方式的规划。国际上对于氢能应用于建筑的形式已有部分探索,如与光伏光热系统、地源热泵系统、氢燃料汽车、蓄电池、化石燃料系统等结合使用满足建筑冷热电需求,但目前国内对用氢作为建筑长周期储能介质的具体利用模式等问题还少有探索。

本文梳理了国内外将氢能应用于建筑的模式以及各国建筑氢能应用的典型案例,梳理了氢能从制备到建筑利用的各环节,并整理对比了不同方式制氢、储运氢以及氢燃料电池的成本,以期对中国发展氢能建筑提供参考。

1 低碳建筑利用氢能的环节

氢能作为一种零碳排放、可长周期储存的能源,已广泛应用于工业、交通、建筑等领域,各领域氢能利用主要环节如图 1 所示。建筑领域对氢能的利用主要包括氢能制取、储存、输运及利用等环节。对于建筑自身利用可再生能源制取氢气的情况,可不考虑输运过程。

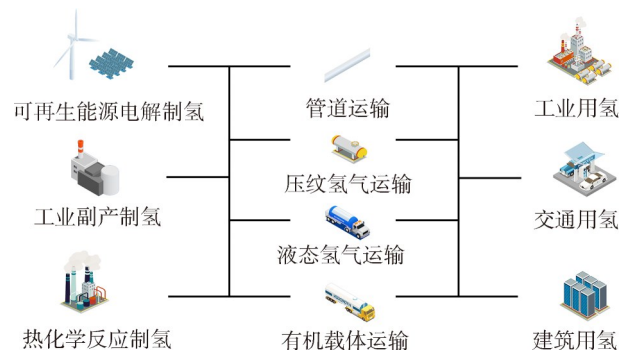


图 1 各领域氢能利用主要环节

Fig. 1 Main links of hydrogen energy utilization in different fields

1.1 制氢

氢气制备技术可分为热化学方法制氢(煤制氢、天然气重整制氢、甲醇重整制氢等)、工业副产提纯制氢(氯碱工业副产氢、焦炉煤气副产氢等)、电解水制氢等^[18]。虽然中国目前的制氢技术取得了一定进展,但天然气重整制氢和可再生能源制氢技术与日本等国家仍有技术差距^[19]。2020年,中国煤制氢产量占比最大,约达 60%;工业副产氢占比为 20%;天然气制氢占比为 10%;而电解水制氢占比尚且不足 2%^[8],可以看出,目前国内氢气生产依旧依赖传统的煤制氢技术,可再生能源电解制氢尚处于发展初期。从长远来看,随着风光发电生产成本和远距离储运氢成本的进

一步降低,可再生能源电解制氢可能是未来氢能来源的最主要途径之一。

目前,电解水制氢技术的主要形式为碱性电解、质子交换膜电解,而固体聚合物阴离子交换膜水电解以及固体氧化物水电解还处于研究起步或初步示范阶段。由于碱性电解技术在中国较为成熟,目前被广泛地应用于电解水制氢项目,但由于其难以快速启动、快速调节制氢速度,因此在消纳可再生能源方面的适配性差;质子交换膜电解槽由于灵活性高、能适应波动电源,因此在消纳波动性和随机性较大的风电、光伏方面有良好的应用,目前其已在部分发达国家实现商业化应用^[20-21]。

1.2 储运氢

氢气的储存方式可分为物理储存和利用储氢材料储存^[22-23]。前者通常可分为气态氢、液态氢,包括低压或高压气态储氢、低温液氢储存以及冷冻压缩储存;后者的储氢通常可分为金属或复合氢化物、液态有机物储氢以及材料表面储氢^[24-26]。氢气的运输方式主要包括长管拖车输送、管道输送、液氢车船输送以及固体氢输送。其中,管道输送可分为纯氢管道输送和天然气掺氢管道(掺氢比例不高于20%)输送,液氢车船输送包括低温液氢输送和液体氢输送^[27]。目前,中国储运氢技术主要以高压气态储存和长管拖车输送为主,而随着技术进步和材料发展,液氢车船输送、纯氢管道及天然气掺氢管道输送可能成为未来发展方向^[27]。

1.3 建筑用氢

在建筑应用方面,国际能源署认为,氢能用于建筑的技术路线有以下几种:可再生能源制氢后供氢燃料电池热电联供或转换成甲烷使用、天然气掺氢(大部分情况下掺氢比例为5%~20%)及纯氢燃烧使用^[28]。欧盟投资的ene.field项目在2012—2021年间安装了1 047套燃料电池 μ -CHP系统,PACE项目安装2 800套^[29];日本的ENE-FARM项目至2019年1月已为家用或小型商业用户安装了约27.4万套燃料电池^[5];英国的H21 North of England项目是以纯氢使用为目标^[27]。

氢气通过储氢罐或管道等形式输入到建筑家用型氢燃料电池后,氢燃料电池开始热电联供,产生的电力可供室内电器使用;同时氢燃料电池发电过程中产生的热量,可通过换热器来加热水箱,并储存其热量,以用于生活热水、洗浴、室内供暖等。

1.3.1 发电利用

燃料电池可将氢能转化为电能,同时理论上在反应过程中不产生任何空气污染,其综合电热效率较

高。典型的建筑氢能发电基础利用模式为:当太阳能光伏板发电富余时,多余的电力通过电解水制氢转化为稳定的氢气储存;而当光伏发电供应不足时,再将氢气供应到氢燃料电池中为建筑提供热电;而当建筑负荷较大时,将储存的氢气经过一定设备转换为建筑冷、热、电的需求,可以大大减少弃光、弃电。

1.3.2 燃烧利用

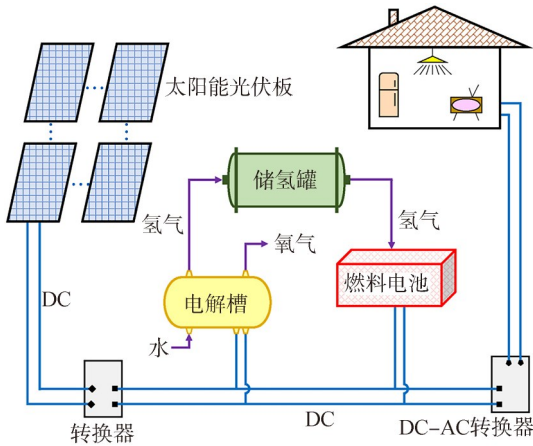
氢可与天然气混合(掺氢比例不高于20%)或以100%纯氢的形式经过氢锅炉后用于建筑供热。欧洲现有的天然气管网可容纳掺氢量最高为20%的混合气体,在储氢方面可以利用现有的天然气基础设施实现大规模的高效存储^[30]。欧洲的典型示范项目包括混入氢气体积分数为20%的法国敦克尔刻GRHYD项目和英国HyDeploy项目等^[7]。对于纯氢的研究应用,英国的示范研究表明:将现有的天然气管网升级为纯氢供气管道,其单位投资成本约100~120英镑^[31-32];BDR Thermea于2019年研制的世界第一台纯氢家用锅炉的初始供暖量满足了总热量需求的8%^[33]。

2 低碳建筑氢能利用系统

氢能不仅可以作为目前化石燃料的替代燃料,同时可作为一种储能介质,用于消纳富余的电力,有效弥补太阳能的间歇性、随机性和不稳定性等不足。

2.1 氢能利用系统

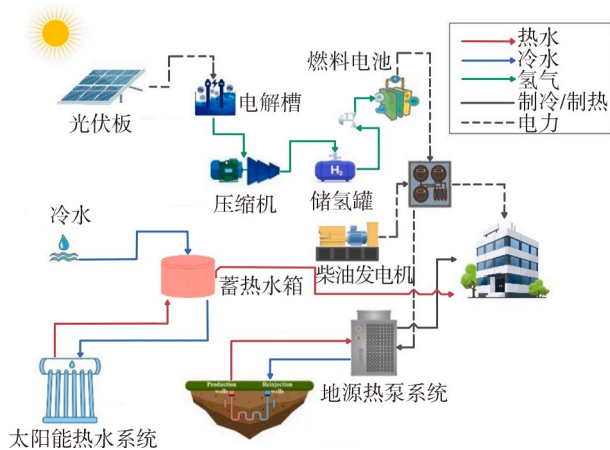
Acar等^[34]构建了一套由光伏板、质子交换膜电解槽、储氢罐和质子交换膜燃料电池堆组成的系统,如图2所示。通过输入不同的光伏板数量、电解槽功率、储氢罐容积以及燃料电池堆数量,对比各种情况下的制氢量和发电量的变化,得到系统各部分的较优解,发现在该系统中选择合适设备容量的电解槽较为重要。Farrokhi等^[35]从3E(economy, efficiency and effectiveness)的角度对一套由太阳能电池板、制氢、储氢和燃气轮机组成的系统进行了全面分析,最后通过对关键设计变量进行参数化研究以及优化,得到了最优解。Knosala等^[36]基于能耗需求模拟和供应系统的线性优化,得出德国在电价为0.31欧元/(kW·h)、氢供应价格为0.17欧元/(kW·h)时,在建筑能源系统中适合使用氢技术(包括氢锅炉或燃料电池等),并指出氢供应价格在电力供应价格的61%及以下时使用氢系统具有经济可行性。Valverde-Isorna等^[37]对英国的一座办公零碳建筑的风氢系统进行了模拟验证,展示了储氢在减小风间歇性的作用。该运行系统包括风力涡轮机、电解槽、储氢设备、燃料电池以及相关控制系统,最后提出了一种用于风氢系统建模、仿真和性能评估的综合方法。

图2 氢能利用系统^[34]Fig. 2 Hydrogen energy basic utilization system^[34]

2.2 结合地源热泵与太阳能集热器的系统

Hai 等^[38]以科威特为研究城市,设计了一套离网运行的氢能系统,如图3所示。

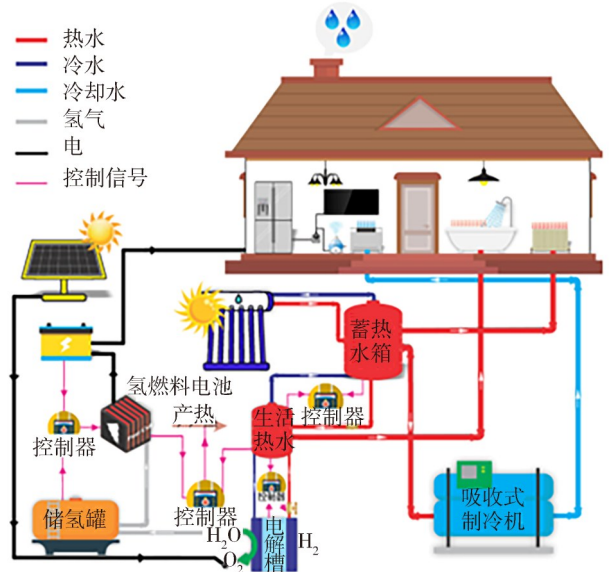
由图3可知,该系统设计思路为:在晴朗白天由太阳能光伏直接供电,额外的电力用于电解制氢并储存,同时配置太阳能集热器,满足建筑生活热水需要的热量;在夜间或阴天,利用富氢条件驱动氢燃料电池发电,优先满足建筑用电需求,剩余电力可供给热泵系统,燃料电池的发电余热与热泵产热可梯级耦合,协同供应生活热水及采暖。

图3 氢系统与地源热泵系统结合^[38]Fig. 3 Hydrogen system combined with ground source heat pump system^[38]

Guo 等^[39]以伊朗一个单体小型住宅为研究对象,设计了一套离网运行的氢能系统,如图4所示。

由图4可知,该系统设计思路为:光伏系统在白天为建筑直接供电,富余电力以氢气形式储存;生活热水、供暖等所需热量由太阳能集热器、燃料电池和电解槽废热提供,同时将部分热量运送至制冷机组中生产冷冻液并运送至室内的加湿器,当氢燃料电池发电

量充裕时,用富余的电量对蓄电池充电;同时考虑到燃料电池启动时不会立即产生电力,建筑将在短时间内缺电,因此使用蓄电池进行短时供电。Ulleberg 等^[40]模拟的光伏光热储氢系统包括光伏板、电解槽、氢气存储、燃料电池、催化燃烧器、蓄电池、太阳能集热器以及蓄热水箱,该研究对北纬地区的传统低能耗住宅进行了模拟,并给出了不同系统配置和运行方案下的系统供能情况。

图4 氢系统与太阳能热水器系统结合^[39]Fig. 4 Hydrogen system combined with a solar water heater system^[39]

2.3 结合其他蓄能系统及氢燃料汽车系统

Liu 等^[41]将建筑屋顶的太阳能光伏、海上风电系统与大功率的抽水蓄能(静态储能)系统结合,可有效解决可再生能源供应和再利用氢燃料汽车能源供应的间歇性问题。再利用氢燃料汽车(动态储能)可以实现城市的流动性脱碳的特点,得出合理的混合储能方式的使用策略,以提高可再生能源和存储系统的系统性和经济性,如图5所示。同时,Liu 等^[42]还设计了一套固定式大型蓄电池和移动氢燃料汽车结合的混合可再生能源系统,提出一种评价电网在峰、非峰时段输电网的分时惩罚成本模型。

高力强等^[43]将近零能耗建筑、氢能汽车(hydrogen vehicles, HVs)与储能技术结合,提出一种新型低碳光伏建筑综合能源系统,如图6所示,并分析了系统在3个典型日的电-热-冷调度结果;研究结果表明,HVs与建筑系统集成有助于降低系统的交换功率,光伏装机量的提升与储能设备的应用则有助于降低系统碳排放量。

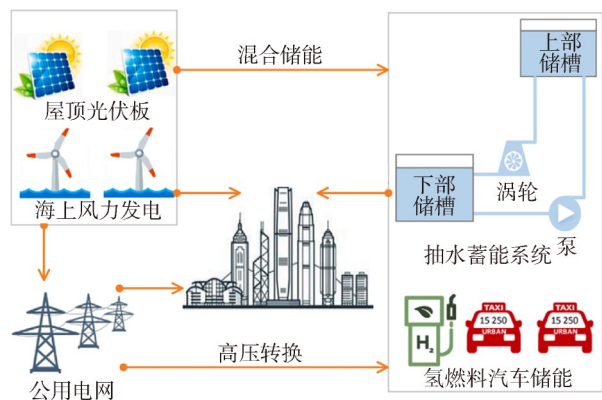


图5 氢燃料汽车、抽水储能储存城市多余能量^[41]

Fig. 5 Hydrogen car and pumped energy storage to store the city's excess energy^[41]

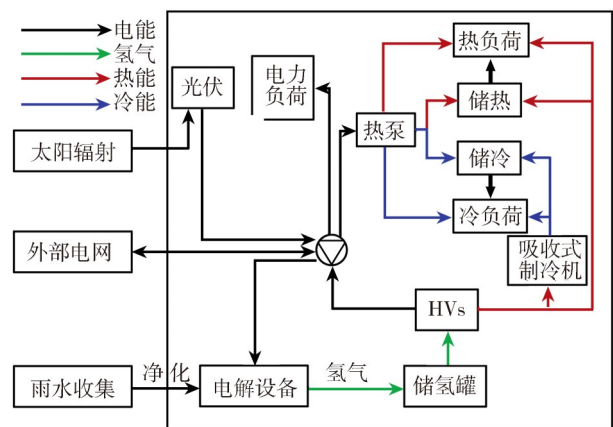


图6 建筑、氢能汽车与储能技术结合^[43]

Fig. 6 Building, hydrogen vehicles and energy storage technology combined^[43]

2.4 结合常规能源系统

由于各地区存在太阳辐射量、风力因素等差异性,风光发电氢能系统不能完全满足建筑的年需求。对于此类问题,除了增大系统规模外,也有学者将以上系统与备用能源结合,并通过柴油发电机等形式为建筑提供电力。

Hai等^[38]提出的离网氢能系统,由于存在系统供能不足的情况,结合了柴油发电机使用。Izadi等^[44]以伊朗的一栋3层中型办公楼原型,设计了一种混合可再生能源系统,得出风光发电结合氢能系统储电的模式相较于只使用风光发电,将能源供应能力从48.9%提高到了87.5%;并考虑到当建筑电量需求大于光伏发电以及氢燃料电池电力供应时,可使用柴油、天然气、液化石油气和丙烷等各种燃料提供备用能源。

2.5 建筑氢能利用研究问题与方向

对于氢能在建筑上的利用,本文搜集到的国内外文献中研究方向主要包括以下几个方面:氢能系统对可再生能源利用储能环节的影响;氢能系统适宜设备

系统容量设计;氢能系统的效率和经济性综合评估;不同配置和运行工况下的系统特性;氢能系统的仿真分析以及性能综合评价方法等。

将太阳能等可再生能源结合的氢能系统应用于建筑领域具有能够显著降低建筑碳排放的优势,与蓄电池一类的储能系统相比,氢能系统又具有可长周期储存的特性,但目前中国氢能系统的成本较高是其广泛应用的关键阻碍。国际上针对氢能应用于建筑的形式开展了较多探索,而国内对于用氢作为建筑长周期储能介质的具体利用模式、系统形式以及运行方案等相关研究还较少。氢能系统如何匹配不同场景下的建筑负荷特征、氢能系统应用于建筑具有经济可行性时的氢能成本以及该场景下电力成本与氢能成本的关系,以及如何对建筑利用氢能系统的综合性能进行评价等关键问题还未探明。探寻合理的建筑氢能利用形式,发展各种应用场景下的绿电绿氢模式,把氢能作为一种补充的长周期储能方式以实现建筑领域降碳可能是氢能建筑利用的未来发展方向。

3 建筑氢能利用案例与关键参数

3.1 国际案例

日本棱镜大厦在建筑改造中引进了氢能源系统^[45],如图7所示。系统借助太阳能发电制造的绿氢,经过燃料电池利用后,在用电高峰及特殊时期为建筑提供电力;在建筑2层室外平台配备了电解装置、储氢合金罐、蓄电池以及100 kW的纯氢燃料电池,此系统的氢气存储量达450 Nm³,相当于可一次蓄电674 kW·h。

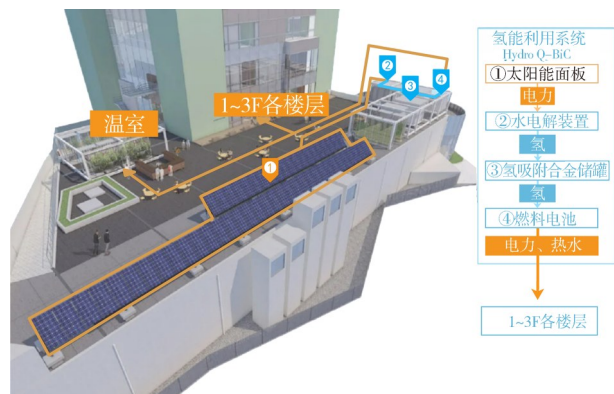


图7 日本棱镜大厦氢能源系统

Fig. 7 Hydrogen energy system for Prism Tower, Japan

日本东京奥运会选手村中的5 632户住宅配备了ENE-FARM项目的家用燃料电池,该社区利用管道运输天然气至每户后,再将天然气重整制氢,该方法可有效降低氢气的储运成本,能源综合利用效率可达90%以上。

2018年,瑞典市政住房公司预期建造一个完全离网、能源充足的住宅区,住宅区内共包括6栋建筑(共172套公寓),所有的电力和供暖需求都通过现场的太阳能光伏发电和氢能储能系统来满足,如图8所示。其中,已完工的1座公寓屋顶上配备了109 kW容量的光伏系统以及5 kW的燃料电池,可满足建筑全部的电力和供暖需求;预计6栋公寓的总光伏发电量将达到659 kW。所用氢能储能系统由5 kW的氢燃料电池、每小时产生60 Nm³氢气的碱性电解槽以及总容量为50 000 Nm³的储氢容器组成,将瑞典夏季丰富的太阳能资源储存至冬季使用,实现长时期的跨季节储能。



(a) 0.5 kW燃料电池

(b) 60 Nm³碱性电解槽(c) 总容量达50 000 Nm³的储氢罐

图8 Vårgårda的氢能社区

Fig. 8 Hydrogen community in Vårgårda

德国新韦斯特城预期在占地面积12公顷的场地建造配备大型供能系统的住宅、办公和商业建筑群,如图9所示。该建筑群中的屋顶光伏系统的富余电力(峰值达1 700 kW)将输送至电解槽电解制氢,氢气面向建筑、运输以及工业等供应,如图10所示;氢气可在建造的热电联产工厂中产电或并入天然气网燃烧使用,由于建筑规模较大,配备了1 MW的电解槽,其运行产生的废热可向周围建筑群提供热量。为实现季节性长期储存和天然气行业的去碳化,生产的氢气还可输入城市天然气电网。



图9 德国埃斯林根市新韦斯特城建造城市展示区
Fig. 9 New West City Construction Urban Exhibition Area in Esslingen, Germany



图10 氢能系统在地下能源中心的集中布置
Fig. 10 Centralized arrangement of hydrogen energy systems in underground energy centers

3.2 国内案例

中国首座氢能进万家智慧能源示范社区项目在佛山投运,如图11所示,项目一期占地面积约10⁵ m²,系统以燃料电池热电联产终端为基础,每一套住宅配备了单独的家用燃料电池热电联供系统,其能源利用率达92%,能源费用降低45%,碳排放降低50%^[46]。杭州绿色建筑科技馆示范项目采用了风光互补发电、太阳热能系统以及电解制氢储能系统,光伏系统以及风能发电机装机容量分别达43 kW和600 W,该系统全年可满足建筑热电需求。



(a) 氢能系统应用示范建筑

(b) 氢能设备

图11 佛山氢能项目

Fig. 11 Foshan hydrogen energy project

除以上建筑氢能应用案例外,表1还列举了目前国内外其他典型的氢能结合风光发电等系统应用于建筑的案例及关键参数。

表1 国内外其他氢能利用案例梳理

Tab. 1 Other hydrogen energy utilization cases at home and abroad

国家	项目来源或名称	氢能利用系统	关键参数
日本	北九州氢能社区 ^[47]	区域热电联产+家庭微型热电联产+加氢站+智能化能源管理系统	1 kW 机组发电效率大于40%,余热利用90%以上
	日本能源农场 ^[47]	氢燃料电池热电联产+电网+能源信息管理系统	一次能源的利用效率达70%~90%,节约能源消费23%,减少碳排放38%
	福岛氢能(FH2R) ^[33]	光伏制氢系统	10 MW级光伏制氢装置,电解槽的产氢能力为1 200 m ³ /h
	日本企业大林组和川崎重工项目 ^[7]	氢气直接燃烧发电技术	以100%氢气作为1 MW级燃气轮机燃料,提供1.1 MW的电能和2.8 MW的热能
中国	上海国际汽车城离网氢能应用展示馆 ^[45]	氢燃料电池热电联供系统	热电联供效率可达80%~90%
	湖南株洲动力谷氢能绿色建筑 ^[48]	氢燃料电池冷热电联供系统	提供冷、热、电、生活热水供应,整体上能量利用效率可达到85%以上
	榆林科创新城零碳分布式智慧能源中心示范项目 ^[49]	光伏发电+氢能制取储存利用系统+蓄热蓄冷系统+浅层地热利用系统	100%可再生能源供能,能源综合利用效率90%,供能成本0.36元/(kW·h),年减少碳排放8 640 t
新加坡	SP集团总部 ^[50]	氢供电供热系统、金属合金储氢技术	100%可再生能源供电
英国	H21 Leeds City Gate ^[7]	拟于2028年建成一座使用100%氢燃料的城市	已完成将现有天然气管网升级为100%氢气管网的技术与经济可行性研究
	Innotest AG项目 ^[51]	分步式中小型光伏系统+氢能系统	全年使用中小型光伏系统以及氢能系统为能源系统供能
瑞典	ZERO SUN项目 ^[52]	太阳能采暖系统+氢能储能系统	建成160个储氢罐,实现100%太阳能供能、离网运行
	哥德堡 Hans-Olof房屋 ^[52]	太阳能光伏系统+氢能储能系统	每年太阳能光伏制氢产生3 000 Nm ³ 氢气,自给自足
荷兰	罗森堡氢能供暖项目 ^[53]	BDR Thermo集团研发中心开发的氢动力家用锅炉+传统天然气锅炉	传输使用纯氢管道,公寓终端采用纯氢锅炉,从而实现100%氢气供暖测试,初始阶段供暖量将满足总热量需求的8%
德国	h2-herthen ^[54]	风电制氢多能互补系统	每年提供250 MW·h的电力和约6 500 kg的氢气
法国	MYRTE ^[54]	太阳能光伏系统+氢能储能系统	项目装设560 kW光伏设备、50 kW电解槽装置以及100 kW的PEMFC燃料电池

4 建筑氢能利用各环节成本

4.1 光伏发电成本

由于中国的大规模发电区域与用电区域脱离,而当远距离输送电力超出电网承受能力时,大量的风光电会成为弃电。国家能源局发布的数据显示,2024年全国弃风率为4%,弃光率为4.3%。据中国氢能联盟统计报告,局部区域弃风、弃光、弃水及弃核制氢可提供的制氢量约 2.63×10^6 t/a^[8]。近年来,由于中国电价补贴等相关政策的支持,光伏发电规模持续增大。截至2025年第1季度,全国光伏发电装机容量达到 9.45×10^8 kW,其中分布式光伏 4.11×10^8 kW^[55]。与此同时,光伏行业协会数据显示,随着光伏发电技术的发展,中国光伏发电成本逐步下降,目前全国大部分地区光伏发电的成本已低于0.2元/(kW·h)^[56]。

4.2 制氢成本

不同制氢方式的制氢成本对比见表2。电解水制氢中的电费成本占比为70%~80%^[57],以光伏发电成本0.3元/(kW·h)、电解水制取1 kg氢气需要消耗50 kW·h电计算,制取1 kg氢的成本为19~22元/kg。中国氢能联盟数据显示,若采用市电,制氢成本为30~40元/kg^[8]。

表2 制氢成本对比

Tab. 2 Comparison of hydrogen production costs

制氢方法	成本
天然气重整制氢	天然气重整制氢成本约为20.5元/kg(天然气价格为2.63元/m ³) ^[58]
热化学方法制氢	焦炉煤气制氢成本为9~11元/kg(煤炭价格为550元/t),使用碳捕集技术后成本约至15.85元/kg
甲醇重整制氢	甲醇重整制氢成本为20.4元/kg(甲醇价格为2 200元/t) ^[58]
氨分解制氢	氨分解制氢成本为27.1元/kg(液氨价格为3 200元/t) ^[57]
光伏电解水制氢	按照2022年光伏平均发电成本约0.3元/(kW·h),电解水制取1 kg氢消耗50 kW·h电,电费占比成本为70%~80%计算,制氢成本为19~22元/kg

由表2可知,目前光伏制氢成本下降至0.3元/(kW·h),虽然与焦炉煤气制氢在成本上尚有差距,但与天然气重整制氢、甲醇制氢、氨分解制氢方式相比在成本上有了足够的竞争力,从中国目前急迫减碳角度出发,光伏制氢相较于焦炉煤气制氢有特殊优势。在“双碳”目标下,由于太阳能光伏发电度电成本下降、发电季节性过剩,太阳能光伏发电制氢的优势逐渐

凸显。

4.3 储运氢成本

当运输量较小,运输距离在 200 km 以下时,运输成本较低的高压气氢运输具有成本优势;低温液氢运输适合运输量较大、距离较远的运输;氢气管网由于初始投入成本高,需运输体量达到一定规模,其经济性才具有优势^[26];氢气可混合天然气管网,但混合比例不能高于 20%^[28]。氢储运成本对于氢能发展的影响较大,随着氢燃料电池相关技术的研发以及成本的下降,将极大提高氢能系统的优势。

4.4 氢燃料电池成本

美国能源部数据显示,使用纯氢运行的 80 kW 集成运输用燃料电池电堆成本(不包括储氢、燃料电池辅助系统以及电力驱动等其他部分)在 2020 年约为 20 美元/kW,远期目标为 15 美元/kW。日本 ENE-FARM 项目的主要制造商是松下和爱信,分别采用的是固体高分子燃料电池和固体氧化燃料电池,额定发电效率在 35%~56% 之间,总热电效率为 87%~95%^[54],基础价格分别为 80 万日元(约合人民币 39 000 元)和 123 万日元(约合人民币 60 000 元)^[59],其成本较高以及投资回收周期较长是目前氢能推广的主要阻碍。中国目前使用的氢能相关设备系统还多依赖进口,因此整体价格较高,随着氢燃料电池相关技术的研发等成本的下降,将极大提高氢能系统的优势。

5 结论

氢能作为一种污染的清洁能源在建筑上有广泛的应用前景。在“双碳”目标背景下,可再生能源结合储能技术的利用形式可极大降低建筑碳排放,氢能作为长周期储能介质可以解决建筑可再生能源储能的紧迫需求。目前,部分发达国家对于将氢能应用于建筑的形式已有部分探索,而国内关于氢能建筑利用的具体利用模式、系统形式、运行方案等相关研究还较少。对于不同储能系统如何匹配不同场景下的建筑负荷特征等关键问题还需进一步解决与优化,同时国内对于可再生能源发电制氢、氢燃料电池、热电联供等关键技术需要进一步突破。

中国现有的各级政策中,氢能发展规划更多侧重工业和交通领域,在建筑领域应用的相关政策规划还尚未明确,同时相关系统研发不足。目前市场上的氢能系统大部分还依赖于国外进口,相关建筑项目配置氢能系统的设备成本还较高,亟待研发出各种应用场景下的绿电+绿氢模式,为建筑领域提供新型的供能储能方式、降低建筑领域碳排放提供技术路径。

参考文献:

- [1] Jiang Yi, Hu Shan. Paths to carbon neutrality in China's building sector[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(5): 1-13. [江亿, 胡珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1-13.]
- [2] Song Pengfei, Hou Jianguo, Wang Xiulin. Analysis of hydrogen energy storage for renewables and hydrogen conversion technology and development model[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(3): 26-32. [宋鹏飞, 侯建国, 王秀林. 可再生能源氢储能与氢转化利用技术及发展模式分析[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2022, 47(3): 26-32.]
- [3] Hydrogen Council. Hydrogen, scaling up[R]. Bonn: Hydrogen Council, 2017.
- [4] Chen Qiuyang, Chen Yunwei. Comparative analysis of international hydrogen energy development strategies[J]. Science Focus, 2022, 17(2): 1-12. [陈秋阳, 陈云伟. 国际氢能发展战略比较分析[J]. 科学观察, 2022, 17(2): 1-12.]
- [5] Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan. Strategic Energy Plan[R/OL]. [2023-09-16]. https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/.
- [6] The United States Department of Energy. Department of energy hydrogen program plan 2020[EB/OL]. (2022-11-12)[2023-09-16]. <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020>.
- [7] Lei Chao, Li Tao. Key technologies and development status of hydrogen energy utilization under the background of carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2021(2): 207-217. [雷超, 李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状[J]. 发电技术, 2021(2): 207-217.]
- [8] 中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书 2020[R]. 北京: 中国氢能联盟, 2020.
- [9] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2022(公共建筑专题)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [10] van der Roest E, Snip L, Fens T, et al. Introducing power-to-H3: Combining renewable electricity with heat, water and hydrogen production and storage in a neighbourhood[J]. Applied Energy, 2020, 257: 114024.
- [11] Zhou Lu, Zhou Yuekuan. Study on thermo-electric-hydrogen conversion mechanisms and synergistic operation on hydrogen fuel cell and electrochemical battery in energy flexible buildings[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 277: 116610.
- [12] Endo N, Shimoda E, Goshome K, et al. Construction and operation of hydrogen energy utilization system for a zero emission building[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(29): 14596-14604.
- [13] Guo Qun, Chen Yuxuan, Xu Yunbao, et al. RETRACTED: In-

- tegration of hydrogen storage system and solar panels in smart buildings[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2022,47(44):19237–19251.
- [14] Farrokhi M, Javani N, Motallebzadeh R, et al. Dynamic simulation and optimization of a novel energy system with Hydrogen energy storage for hotel buildings[J]. *Energy*,2022, 257:124586.
- [15] Gao Jie, Song Jie, Wang Jianxiao, et al. Form and key technologies of electric-hydrogen coupling system supporting energy security in China[J/OL]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023: 1–17. (2023–06–13)[2023–09–16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230612.1449.006.html>. [郝捷,宋洁,王剑晓,等.支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术[J/OL]. *电力系统自动化*,2023:1–17.(2023–06–13)[2023–09–16].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230612.1449.006.html>.
- [16] Chen Aijun. Characteristics and application prospect of hydrogen energy storage technology[J]. *China High and New Technology*,2021(19):120–121. [陈蔼峻.氢储能技术特点和应用展望[J]. *中国高科技*,2021(19):120–121.]
- [17] Zhang Yanfei, Wang Hong, Liu Yan, et al. Aromatic bromination with hydrogen production on organic-inorganic hybrid perovskite-based photocatalysts under visible light irradiation[J]. *Chinese Journal of Catalysis*,2022,43(7):1805–1811. [张艳飞,王洪,刘奕,等.有机-无机杂化钙钛矿基光催化剂用于可见光催化芳香族溴化反应并联产氢气[J]. *Chinese Journal of Catalysis*,2022,43(7):1805–1811.]
- [18] 毛宗强,毛志明,余皓,等.制氢工艺与技术[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [19] Zhang Weibin, Yu Xuewei, Ba Xintong. Reflections on some problems in the promotion of hydrogen energy buildings[J]. *Architectural Design Management*, 2021, 38(9): 8–15. [张玮斌,余雪薇,把昕桐.氢能建筑推进中若干问题的思考[J]. *建筑设计管理*,2021,38(9):8–15.]
- [20] Yu Hongmei, Shao Zhigang, Hou Ming, et al. Hydrogen production by water electrolysis: Progress and suggestions[J]. *Strategic Study of CAE*,2021,23(2):146–152. [俞红梅,邵志刚,侯明,等.电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. *中国工程科学*,2021,23(2):146–152.]
- [21] Chen Pengzuo, Hu Xile. High-efficiency anion exchange membrane water electrolysis employing non-noble metal catalysts[J]. *Advanced Energy Materials*,2020,10(39):2002285.
- [22] Hirscher M, Yartys V A, Baricco M, et al. Materials for hydrogen-based energy storage—Past, recent progress and future outlook[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 827:153548.
- [23] Amirthan T, Perera M S A. The role of storage systems in hydrogen economy: A review[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*,2022,108:104843.
- [24] Xu Shuo, Yu Biying. Current development and prospect of hydrogen energy technology in China[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*,2021, 23(6):1–12. [徐硕,余碧莹.中国氢能技术发展现状与未来展望[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*,2021,23(6):1–12.]
- [25] Feng Zhanbo, Meng Fanyu. Comparative analysis and future development discussion on hydrogen energy storage and transportation technology[J]. *Energy Technology and Management*,2023,48(4):30–33. [冯展博,孟凡玉.氢能储运技术优缺点比较分析及未来发展探讨[J]. *能源技术与管理*,2023,48(4):30–33.]
- [26] Sazelee N A, Ismail M. Recent advances in catalyst-enhanced LiAlH₄ for solid-state hydrogen storage: A review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(13): 9123–9141.
- [27] Zhang Zhenyang, Xie Hui. Status quo and analysis of liquid hydrogen production, storage and transportation technology[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(3): 298–305. [张振扬,解辉.液氢的制、储、运技术现状及分析[J]. *可再生能源*,2023,41(3):298–305.]
- [28] International Energy Agency. The future of hydrogen: Seizing today's opportunities[EB/OL]. (2019–06–18)[2023–09–16]. https://read.oecd-ilibrary.org/energy/the-future-of-hydrogen_1e0514c4-en.
- [29] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. Programme review report 2018[EB/OL]. (2019–11–15)[2023–09–16]. <https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper1115>.
- [30] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. Hydrogen roadmap Europe[R]. Belgium: Publications Office of the European Union, 2019.
- [31] Jones D R, Al-Masry W A, Dunnill C. Hydrogen-enriched natural gas as a domestic fuel: An analysis based on flashback and blow-off limits for domestic natural gas appliances within the UK[J]. *Sustainable Energy & Fuels*,2018, 2(4):710–723.
- [32] KPMG Public. 2050 energy scenarios: The UK gas networks role in a 2050 whole energy system [R]. London: Energy Networks Association, 2016.
- [33] Jiang Dongfang, Jia Yuelong, Lu Qiang, et al. Application prospect of hydrogen energy in integrated energy systems[J]. *Electric Power*,2020,53(5):135–142. [蒋东方,贾跃龙,鲁强,等.氢能在综合能源系统中的应用前景[J]. *中国电力*,2020,53(5):135–142.]
- [34] Acar C, Erturk E, Firtina-Ertis I. Performance analysis of a stand-alone integrated solar hydrogen energy system for zero energy buildings[J]. *International Journal of Hydro-*

- gen Energy,2023,48(5):1664–1684.
- [35] Farrokhi M, Javani N, Motallebzadeh R, et al. Dynamic simulation and optimization of a novel energy system with Hydrogen energy storage for hotel buildings[J]. Energy,2022,257:124586.
- [36] Knosala K, Langenberg L, Pflugradt N, et al. The role of hydrogen in German residential buildings[J]. Energy and Buildings,2022,276:112480.
- [37] Valverde-Isorna L, Ali D, Hogg D, et al. Modeling the performance of wind-hydrogen energy systems: Case study the Hydrogen Office in Scotland/UK[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,53:1313–1332.
- [38] Hai Tao, Ali M A, Dhahad H A, et al. RETRACTED: Optimal design and transient simulation next to environmental consideration of net-zero energy buildings with green hydrogen production and energy storage system[J]. Fuel, 2023,336:127126.
- [39] Guo Peixi, Musharavati F, Dastjerdi S M. Design and transient-based analysis of a power to hydrogen(P2H₂) system for an off-grid zero energy building with hydrogen energy storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2022, 47(62):26515–26536.
- [40] Ulleberg Ø, Mørner S O. TRNSYS simulation models for solar-hydrogen systems[J]. Solar Energy, 1997, 59(4/5/6): 271–279.
- [41] Liu Jia, Zhou Yuekuan, Yang Hongxing, et al. Net-zero energy management and optimization of commercial building sectors with hybrid renewable energy systems integrated with energy storage of pumped hydro and hydrogen taxis[J]. Applied Energy,2022,321:119312.
- [42] Liu Jia, Chen Xi, Yang Hongxing, et al. Hybrid renewable energy applications in zero-energy buildings and communities integrating battery and hydrogen vehicle storage[J]. Applied Energy,2021,290:116733.
- [43] Gao Liqiang, Fei Ruowen, Liu Min, et al. Modelling of a novel photovoltaics building energy system considering hydrogen vehicles and energy storage[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition),2022,54(3):414–422.[高力强,费若雯,刘敏,等.含有氢能汽车和储能的新型光伏建筑能源系统建模[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(3):414–422.]
- [44] Izadi A, Shahafve M, Ahmadi P, et al. Transient simulation and techno-economic assessment of a near-zero energy building using a hydrogen storage system and different backup fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(74):31927–31940.
- [45] Wu Demin. Preliminary study on ways and prospects of hydrogen energy to help building carbon emission reduction[J]. Construction Science and Technology,2022(19):27–31.[吴德敏.氢能助力建筑碳减排途径与前景初探[J].建设科技,2022(19):27–31.]
- [46] 张金梦.佛山南海打造全国首座氢进万家智慧能源示范社区[N].中国能源报,2021–12–06(第26版).
- [47] Li Yanxue, Gao Weijun, Li Shanshan. Application of hydrogen in cities and buildings[J]. Architecture Technique,2020, 26(8):24–26.[李岩学,高伟俊,李珊珊.氢能在城市和建筑中的应用[J].建筑技艺,2020,26(8):24–26.]
- [48] 谭昕吾,齐玥墨.湖南株洲高新区:揭秘氢能绿色建筑[EB/OL].(2020–10–28)[2023–09–16].<https://newenergy.in-en.com/html/newenergy-2394539.shtml>.
- [49] Su Xiaoning, Zhou Min, Li Wentao, et al. Discussion on the energy planning and design of the park based on the comprehensive application of hydrogen energy in building energy: A case study of a park in Yulin[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2023,53(Supp2):446–452.[苏晓宁,周敏,李文涛,等.基于氢能在建筑能源中综合应用的园区能源规划设计探讨——以榆林某园区为例[J].暖通空调,2023,53(增刊2):446–452.]
- [50] 中国氢能源网.SP在东南亚建立第一座氢气驱动建筑[EB/OL](2019–10–31)[2023–09–16].<http://www.china-hydrogen.org/details.aspx?newsId=44761&firtCategoryId=9&pageIndex=1>.
- [51] Segawa Y, Endo N, Shimoda E, et al. Pilot-scale hydrogen energy utilization system demonstration: A case study of a commercial building with supply and utilization of off-site green hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2024,50:26–36.
- [52] 何继江.瑞典零能耗建筑推动零能耗建筑领域的发展[EB/OL].(2020–12–19)[2023–09–16].<https://solar.ofweek.com/2020-12/ART-260018-8130-30475777.html>.
- [53] 中国新能源网.荷兰:世界上第一台氢燃料家用锅炉正式运行[EB/OL].(2020–01–17)[2023–09–16].<https://new-energy.in-en.com/html/newenergy-2368722.shtml>.
- [54] Li Qing, Wang Qingyu. Application of hydrogen energy and fuel cell technology in combination with urban gas[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(2): 193–196.[李清,王庆余.氢能和燃料电池技术结合城市燃气的应用[J].中国资源综合利用,2019,37(2):193–196.]
- [55] 国家能源局.我国风光装机历史性超过火电 风电光伏装机超过火电将成为常态[EB/OL](2025–04–25)[2025–05–05]<https://www.nea.gov.cn/20250425/148efd0ca61148148d285edd438912df/c.html>.
- [56] 中国能源网.中国光伏砥砺前行,推动全球行业发展[EB/OL](2024–02–28)[2025–05–05]<https://www.china5e.com/news/news-1165502-1.html>.
- [57] Wang Heng. Application of hydrogen energy development

model[J].Rural Electrification,2021(5):65–69.[王恒.氢能发展模式应用[J].农村电气化,2021(5):65–69.]

[58] Feng Yun, Cao Tiantian, Song Haitao, et al. Progress and cost analysis of distributed hydrogen production technology[J].Petroleum Processing and Petrochemicals,2022,53(11):11–16.[冯云,曹田田,宋海涛,等.分布式制氢技术进

展及成本分析[J].石油炼制与化工,2022,53(11):11–16.]

[59] Ruan Hongquan, Lu Dingjie, Li Yongtian. Prospect analysis of fuel cell cogeneration for public buildings[J].Sino-Global Energy,2020,25(12):16–20.[阮红权,陆丁劫,李永田.公共建筑燃料电池热电联供前景分析[J].中外能源,2020,25(12):16–20.]

Research Progress on Hydrogen Energy Utilization in Low-carbon Building

ZHU Xinrong^{1,2}, WANG Yongchao², YANG liu²

(1.Key Laboratory of Ecology and Energy Saving Study of Dense Habitat, Ministry of Education, Shanghai 200092, China;

2.College of Architecture, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The application of renewable energy in the building sector can greatly reduce carbon emissions. However, due to the intermittent nature of renewable energy supply, it cannot meet the energy demands of buildings at all times. In recent years, extensive research has been conducted on the application of hydrogen energy in buildings, both domestically and internationally. Firstly, the various stages of hydrogen energy—from production to application in buildings—were reviewed. Current mainstream methods of hydrogen production, storage, transportation, and utilization in buildings, as well as future development trends, were summarized. The results show that hydrogen production via electrolysis of water using renewable energy is still in its early stages and accounts for only a small share of total hydrogen production. However, with further reductions in the cost of wind and solar power generation, and improvements in long-distance hydrogen storage and transportation, this method may become a primary means of hydrogen production in the future. Proton exchange membrane electrolyzers show good potential for absorbing fluctuating wind and photovoltaic power. Liquid hydrogen transport by vehicles and ships, pure hydrogen pipelines, and natural gas pipelines blended with hydrogen are likely to be the main forms of hydrogen transport moving forward. Currently, hydrogen is used in buildings in several ways: blending with natural gas, using pure hydrogen, converting hydrogen to methane, and applying hydrogen fuel cell cogeneration systems. Secondly, the specific forms of building hydrogen utilization systems were categorized, including combinations of photovoltaic hydrogen storage with solar thermal systems, ground source heat pumps, hydrogen fuel vehicles, batteries, and fossil fuel systems. The structure and operational strategies of these systems were outlined. Practical cases of hydrogen application in buildings—spanning residential buildings, office buildings, building clusters, and communities—were collected and described, along with typical examples highlighting the modes and key parameters of hydrogen utilization. The cost conditions related to photovoltaic hydrogen production, hydrogen storage and transport, and hydrogen fuel cells were also detailed. The results indicate that although photovoltaic hydrogen production is still more expensive than hydrogen production from coke oven gas, it shows competitiveness compared to other methods such as natural gas reforming, methanol-based production, and ammonia decomposition. From a carbon emission perspective, photovoltaic hydrogen production holds significant advantages over coke oven gas methods in the long term. At present, most hydrogen-related equipment in China relies on imports. High costs, particularly for hydrogen fuel cells, remain a key obstacle to the broader promotion of hydrogen energy. Finally, the application of hydrogen energy in buildings in China was discussed, and future development directions were summarized, including how to match building load characteristics in various scenarios with different energy storage systems; evaluating the comprehensive performance of hydrogen energy systems in buildings; and achieving breakthroughs in key technologies such as renewable hydrogen production, fuel cells, and combined heat and power generation to reduce the cost of hydrogen utilization. These research findings can serve as a reference for promoting and applying hydrogen energy in Chinese buildings.

Key words: carbon neutrality; low-carbon building; renewable energy resources; hydrogen storage; green hydrogen

(编辑 陈雪)

引用格式: Zhu Xinrong, Wang Yongchao, Yang Liu. Research progress on hydrogen energy utilization in low-carbon building [J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(3): 61–71. [朱新荣, 王勇超, 杨柳. 低碳建筑氢能利用研究进展[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(3): 61–71.]