

## 2060碳中和

## 固态储氢技术在“氢进万家”示范工程中的应用前景分析

赵强, 李力军, 赵朝善, 郝佳, 刘军, 王昕雨, 潘凤文

(国家燃料电池技术创新中心, 山东潍坊 261002)

**摘要:**发展氢能是我国推动能源结构转型以及实现“碳达峰”的重要措施,主要在燃料电池汽车领域开展示范应用,应用场景较为单一,无法拉动氢能产业链建设完善的氢能供应体系。目前科技部联合山东省政府,在山东地区实施“氢进万家”科技示范工程,重点围绕“一条氢能高速、二个氢能港口、三个科普基地、四个氢能园区、五个氢能社区”的建设目标实施,通过建设纯氢管网、天然气掺氢等措施,开展将氢能应用进入工业园区、社区楼宇和交通移动用能、港口、高速等多场景的应用示范,构建氢能在工业供能、城镇供能、交通运输等3个规模化应用场景,打造“氢进万家”示范工程的齐鲁样板,为全国氢能产业发展贡献山东经验。固态金属储氢由于具备体积储氢效率高、能效高、安全性好等优点,在工业供能、城镇供能、交通运输等场景下均有着较为广阔的市场前景,可有效解决当前高压气态氢气在运输、储存、加注等环节已经暴露的问题,结合“氢进万家”打造的氢能应用场景以及固态金属储氢技术的特点,对固态金属储氢技术的未来应用做了分析和展望,涵盖氢气的存储、输配、供应和换热,对固态金属储氢技术的发展做了预测,将在加氢站内储氢、氢储能/发电领域、应急电源换氢、热电联供储供氢等方面发挥重要作用,镁基固态储氢在大容积固态储氢长途运输、站内储氢应用和热电联供储供氢匹配度较高,解决氢气存储和释放易于控制的问题,站内储氢构建高密度储氢静态压缩一体化系统,能耗和安全性指标提升,钢基和钛基储氢材料用于氢气的规模化存储,应用于氢储能/发电领域,完成常温低压储氢过程,铜镍基储氢材料用于应急电源储氢,实现快速吸放氢,对行业有一定参考意义。

**关键词:** 固态金属储氢; 氢进万家; 纯氢管网; 天然气掺氢; 储氢

中图分类号: TK91; TG139.7 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2025)02-0043-08

## Analysis of application prospects of solid state hydrogen storage technology in the demonstration project of “hydrogen entering myriad homes”

ZHAO Qiang, LI Lijun, ZHAO Chaoshan, HAO Jia, LIU Jun, WANG Xinyu, PAN Fengwen

(National Fuel Cell Technology Innovation Center, Weifang 261002, China)

**Abstract:** The development of hydrogen energy is an important measure for China to promote energy structure transformation and achieve “carbon peak”. Hydrogen energy mainly has been demonstrated and applied in fuel cell vehicles, with a relatively single application scenario which cannot drive the construction of a complete hydrogen energy supply system in the hydrogen energy industry chain. At present, the Ministry of Science and Technology, in collaboration with the Shandong Provincial Government, is implementing the “Hydrogen Entering Myriad Homes” technology demonstration project in the Shandong region. Focusing on the implementation of the construction goals of one hydrogen expressway, two hydrogen ports, three science popularization bases, four hydrogen parks, and five

收稿日期: 2023-06-08; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CN23060801

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB4001800)

作者简介: 赵强(1984—), 男, 山东枣庄人, 高级工程师, 硕士。E-mail: zhaoliqiang@nctifc.com

通讯作者: 潘凤文(1981—), 男, 山东高密人, 正高级工程师, 博士。E-mail: panfw@weichai.com

引用格式: 赵强, 李力军, 赵朝善, 等. 固态储氢技术在“氢进万家”示范工程中的应用前景分析[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(2): 43-50.

ZHAO Qiang, LI Lijun, ZHAO Chaoshan, et al. Analysis of application prospects of solid state hydrogen storage technology in the demonstration project of “hydrogen entering myriad homes” [J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(2): 43-50.



hydrogen energy societies, the application demonstration of industrial parks, community buildings, transportation and mobile energy use, ports, highways and other scenarios is carried out, through the construction of pure hydrogen pipe networks, hydrogen blending of natural gas and other measures. Constructing large-scale hydrogen energy application scenarios in three areas, including industrial energy supply, urban energy supply, and transportation, and creating a Qilu model for the "Hydrogen Entering Myriad Homes" demonstration project, which contributes Shandong's experience to the development of the national hydrogen energy industry. Solid metal hydrogen storage has broad market prospects in industrial energy supply, urban energy supply, transportation and other scenarios due to its advantages of high volume hydrogen storage efficiency, high energy efficiency, and high-level safety. It can effectively solve the problems that have been exposed in the transportation, storage, and refueling of high-pressure gaseous hydrogen. In this article, the future application of solid state metal hydrogen storage technology was analyzed and prospected, including hydrogen storage, distribution, supply and heat transfer, based on hydrogen energy application scenarios in "Hydrogen Entering Myriad Homes" and the characteristics of its technology. The development of solid metal hydrogen storage technology is predicted, which will play an important role in hydrogen storage of station, hydrogen energy storage/power generation, emergency power supply for hydrogen exchange, combined heat and power supply for hydrogen storage and supply, etc. Magnesium-based materials has a high matching degree in long-distance transportation of large volume solid hydrogen storage, application of hydrogen storage in hydrogen stations and combined heat and power storage and supply, which solves the problem of easy control of hydrogen storage and release. Building a high-density hydrogen storage static compression integration system will improve energy consumption and safety. Lanthanide and titanium-based materials is suitable for large-scale storage of hydrogen, applied in the field of hydrogen energy storage/power generation, to complete the process of normal temperature and low pressure hydrogen storage. Lanthanide nickel-based materials be applied to emergency power supply hydrogen storage, to achieve rapid hydrogen absorption and discharge, which has certain reference significance for the industry.

**Key words:** solid metal hydrogen storage; hydrogen entering myriad homes; pure hydrogen pipeline network; natural gas mixed with hydrogen; hydrogen storage

## 0 引言

氢能是面向未来的清洁能源, 储氢技术是氢能利用中的关键一环, 固态储氢是储氢技术中的重要分支。我国氢能产业具有长期发展潜力, 根据中国氢能联盟的预测, 在2030年碳达峰愿景下, 我国氢气的年需求量预期达到3 715万t, 在终端能源消费中占比为5%; 在2060年碳中和愿景下, 我国氢气的年需求量将增至1.3亿t, 在终端能源消费中占比为20%<sup>[1]</sup>。伴随着氢能的广泛应用, 如何安全、高效、经济地储氢及运氢越来越受到行业的关注。目前储氢主要有3条技术路线, 即气态、液态、固态储氢技术。在三者之中, 固态储氢由于其高体积储氢密度、高安全性、低远程运输成本等特点, 是最具商业化发展前景的储存及运输方式之一。

“氢进万家”示范工程建成后, 将在工业供能、城镇供能、交通运输等领域建成氢能的大规模的应用场景, 鉴于固态储氢的优点, 将会在上述3个氢能应用场景得到广泛的应用, 因此提前开展固态储氢技术与“氢进万家”用氢场景的适配性分析, 是非常有指导意义的。

## 1 氢进万家示范工程及实施效果

2021年4月, 科技部和山东省签署“氢进万家”科技示范工程联合实施协议, 以“一条氢能高速、二个氢能港口、三个科普基地、四个氢能园区、五个氢能社区”为示范目标, 开展副产氢纯

化、可再生能源制氢、管道输氢、氢能交通、热电联供、氢能产业链数据监控等氢能生产和利用技术的工程化示范, 在山东省打造全国首个氢能“制-储-输-用”规模化综合示范样板, 推动能源高效清洁转型, 降低传统化石能源消耗, 为保障能源安全和实现“碳达峰”、“碳中和”贡献力量<sup>[2]</sup>。

截止2023年3月底, 山东省各地市围绕示范目标出台了多项氢能产业扶持政策和相关法规, 建成了高速和港口加氢站、高速零碳服务区、工业副产氢纯化项目等多项氢能应用公共基础设施, 形成了氢燃料电池车、氢能热电联供、氢燃料电池客运船等多种氢能综合应用示范成果。已累计推广车辆1 007台, 建设加氢站34座, 日供应燃料用氢气能力达15t; 新增氢气产能10t/d, 可满足我省当前燃料电池车辆示范推广需求; 参与制修订国家标准3项、行业标准2项、团体标准4项; 省市层面新出台氢能产业政策4项。

示范工程实施涉及氢能制-储-输-加-用全链条, 其中输氢部分主要包括燃气管道掺氢及纯氢管网输氢。天然气管道掺氢输送是实现氢气长距离、大规模高效输送最为可行的方式。我国天然气管网分布广泛, 截至2021年底, 天然气管道里程达到11.6万km<sup>[3]</sup>, 如能充分利用现有天然气管网进行掺氢输送至用户端, 将在实现弃电消纳、资源整合的同时提高经济性, 真正做到零碳排放, 有利于加速工业、建筑等领域深度脱碳, 助力实现“双碳”目标, 推动我国能源转型。此前国家电投在河北张家

口启动天然气掺氢关键技术研发与运用项目<sup>[4]</sup>, 该项目将制氢厂制取氢气通过城市天然气管网送达加气站、商用用户以及民用燃具终端等, 使得天然气消耗量大大减少, 每年的碳排放量也相减少 3 000 余 t。

目前国创中心牵头联合国电投、华润燃气、港华燃气、中石油管道院等 15 家单位申报的氢进万家二期项目《管道氢气在城镇综合供能领域的关键技术研发与规模应用》已通过第一轮任务书评审。项目重点开展基于管网供氢的在役天然气管网掺氢等关键技术研究, 通过中小规模的应用验证, 实现关键技术成果转化, 形成引领性标准规范并推动出台相关管理办法、规章, 带动国家和地方示范区域规模化推广应用, 实现项目示范目标。

## 2 固态储氢技术发展现状

当前储氢技术主要包括高压气态储氢、低温液态储氢和低压固态储氢等<sup>[5]</sup>, 其中低压固态储氢技术是指利用固态储氢合金在一定温度和压力条件下, 可逆的吸收、储存和释放氢气的技术。固态储氢具有比液氢和气态氢更高的储氢密度, 且储存压

力低, 安全性好, 放氢纯度高, 是一种理想的储氢介质。

固态储氢的原理是氢气与储氢合金反应生成金属氢化物, 同时放出热量, 实现氢气的存储。在一定的温度、压力条件下, 金属氢化物又能分解成储氢合金与氢气, 将氢气释放出来<sup>[6]</sup>。

### 2.1 不同储氢方式的对比

为了更加直观地展现不用储氢方式的优缺点, 分别从技术成熟度、储氢密度、成本等方面对当前主流的 3 种储氢方式进行对比分析: 从技术成熟度方面分析, 高压气态储氢最为成熟、成本最低, 是现阶段最主流的车用储氢技术, 在续航里程、加注时间等方面基本可与传统燃油车相媲美; 从储氢密度方面分析, 低温液态储氢的质量储氢密度较高, 储氢技术均存在能耗较高、系统装置结构复杂等问题, 推广暂时受阻。低压固态储氢的体积储氢密度较高, 但存在合金制备工艺复杂、热管理要求高、吸氢后体积膨胀率较高的问题; 从成本方面分析, 低温液态储氢、金属氢化物固态储氢成本均较高, 目前不适合规模化推广。主流的 3 种不同储氢方式的技术对比见表 1<sup>[7-8]</sup>。

表 1 不同储氢方式技术对比

Table 1 Comparison of different hydrogen storage technologies

分类	高压气态储氢	低温液态储氢	低压固态储氢
原理	将氢气压缩于高压容器中, 储氢密度与储存压力、容器类型相关	将氢气压缩于高压容器中, 储氢密度与储存压力、容器类型相关	利用金属(过渡金属或合金)对氢的吸附储氢和脱附放氢
质量储氢密度	3.8% ~ 5.7%	≈5.1%	1.0% ~ 7.6%
优势	技术成熟、成本低; 充放氢速率可调	体积储氢密度高, 液态氢纯度高	储氢压力低, 安全性高
劣势	体积储氢密度低, 容器耐压要求高, 压缩需要耗能	容器绝热性能要求高、液化过程能耗高、长期存储有蒸发	质量储氢密度低
技术成熟度	技术成熟、应用广泛	国外应用广泛, 国内仅限于航空航天以及军事用途	距离大规模商业化应用推广尚远
应用领域	加氢站、长管拖车、车载储氢	航空航天、液氢运输	工程机械、大型氢储能、备用电源

### 2.2 固态储氢技术特点

目前比较常见的储氢合金有钛锰系、镧镍系、钛铁系、钒钛系、镁系等几种类型<sup>[9]</sup>。其中镁系合金储氢量最大, 最高可达 7.6%, 但放氢温度高, 大约需要 300 ℃ 左右才能实现稳定放氢。镧镍系、钛系合金的储氢量为 1.4% ~ 2.4%, 放氢温度要明显低于镁系合金, 基本上在室温状态下就能实现稳定放氢。其中以 LaNi<sub>5</sub> 为代表的镧镍合金对吸放氢条件要求比较低, 具有优良的热力学和吸放氢动力学, 能够在常温常压下完成吸放氢, 已发展成为目前应

用最多的金属氢化物。后续镁系合金凭借储氢密度高、低成本的优势, 在加氢站以及管束车领域将获会得较为广泛的应用<sup>[10]</sup>, 具体参数对比见表 2。

通过表 1、表 2 对比分析, 同时结合固态储氢的技术特点, 总结固态储氢具备以下优势:

1) 低压加氢, 降低加氢成本且能提高安全性。固态储氢系统中在室温下的充氢压力一般不高于 5 MPa, 充氢压力低, 无需建设高压加氢站, 能够实现现在园区内加氢, 加氢便利且加氢成本较低。

2) 低压储氢, 安全性高。固态储氢系统中氢气

表2 不同类型固态储氢参数对比

Table 2 Comparison of parameters of different types of solid hydrogen storage

储氢材料	储氢密度/%	放氢压力/MPa	放氢温度/℃	90%放氢所需时间/min	循环寿命	成本
LaNi <sub>5</sub>	1.4 ~ 1.6	0.2 ~ 0.8	20	≤3	好	较低
TiFe	1.8 ~ 1.9	0.2 ~ 0.3 0.8 ~ 1.0	20	≤5	较好	低
TiMn <sub>2</sub>	2.0 ~ 2.1	0.5 ~ 1.0	20	≤3	好	低
V-Ti-Cr(V基固溶体)	3.5 ~ 3.8	0.1 ~ 0.3	20	≤5	差	较高
MgH <sub>2</sub>	7.6	0.1	290	≤20	较好	较低

以金属氢化物的形式存在，工作压力一般在 5 MPa 以内，压力低，安全性好，可以实现长期储存且不会发生自放氢和容量衰减现象。且储氢合金析氢是一个缓慢过程，当遇到火烧或爆炸等特殊情况下，内部存储的氢气不会在短时间内全部释放出来，因此不会产生剧烈的燃烧或爆炸次生事故，使得安全性得到极大的提升<sup>[11]</sup>。

3) 供氢吸热，提高系统效率。燃料电池工作时需要进行散热，此时储氢合金析氢需要吸收热量，因此通过合理的一体化结构设计，可以使储氢合金吸收燃料电池工作热量的 20% ~ 30%，既有利于缓解燃料电池的散热负担，又能够提高系统的整体能量利用效率<sup>[12]</sup>。

4) 供氢纯度高，高效长寿。储氢合金可吸附氢气中杂质气体，对固态储氢系统充入普通纯氢，便可释放出纯度高达 6 N(99.999 9%) 的超高纯氢<sup>[13]</sup>，从而大大降低燃料电池膜催化剂的中毒风险，有效提高燃料电池的工作效率和使用寿命<sup>[14]</sup>。

### 2.3 固态储氢未来应用场景

结合固态储氢的特点和技术，未来将具有十分广阔的应用场景，具体分析如下：

第一，叉车等工程机械的储氢系统。叉车等工程机械对质量不敏感，与气态储氢相比，固态储氢凭借其体积储氢密度高的优势能够存储 2 倍以上的氢气，可有效提升续航时间，且可以在园区内低压加氢。2022 年 12 月，搭载固态储氢系统的 3.5 t 燃料电池叉车已经正式亮相，相信在不久的将来，固态储氢系统将会助力氢能在工程机械获得快速发展。

第二，与电解水制氢结合，应用于大型氢储能工程。固态储氢装置可以与上游的光伏发电或风电配套使用，采用电解水制取的氢气 (3 ~ 5 MPa) 可以直接存储在固态储氢装置中。下游可以与燃料电池配套使用，固态储氢可以作为燃料电池散热的一部分，在放氢时吸收燃料电池的一部分热量。对于推进可再生能源制氢、加快建成新型电力系统具有

重要意义，既能够解决风光发电波动大的问题，又能够改变过度依赖煤炭、石油制氢的现状。2023-03-25 投运的南沙小虎岛电氢智慧能源站，是我国第一个基于固态储氢技术的电网侧储能型加氢站，在国内首次实现了固态储氢并网发电，同时具备给燃料电池车辆加氢的能力。

第三，数据中心、通信基站等场景的备用电源。固态储氢装置凭借高体积储氢密度、快速响应的特点，与燃料电池相结合，可以作为数据中心、通信基站等场景的备用电源，能够提供 5 ~ 10 h 的电能。充分利用国家“东数西算”工程，探索固态储氢在 8 大枢纽、10 个国家数据中心集群中的储能应用，助力氢能在国家战略中发挥重要作用。

### 3 固态储氢在“氢进万家”场景中的应用分析

固态储氢的应用可分为固定式应用和移动式应用 2 种方式，固定式应用包括：分布式热电联供、制氢现场储能缓存、储热和金属氢化物压缩机等领域；移动式应用包括：车（船）载储氢、运氢、换氢（电）等领域。

结合“氢进万家”示范工程总体建设任务进行分析，固态储氢未来涉及到的应用场景主要包括以下方面：① 以氢气储能为核心的多能互补智慧能源系统建立；② 加氢站建设；③ 零碳氢能服务区建设；④ 低碳氢能工业园区建设；⑤ 光伏-电解制氢-氢热电联供耦合的微网集成；⑥ 城镇纯氢管网输配；⑦ 城镇天然气管网掺氢关键技术研发等。

综合分析固态储氢的应用范围和“氢进万家”的任务场景，固态储氢在“氢进万家”场景中的应用主要集中在与燃料电池及其相关的几个领域，包括：加氢站（内储氢）、氢储能/发电领域、固定发电（储供氢）、分布式发电（储供氢）、应急电源（换氢）、热电联供（储供氢、换热）等，涵盖氢气的存储、输配、供应和换热等方面。未来的具体应用分析如下文所述。

固态金属储氢在加氢站领域的应用场景主要包括 2 个<sup>[15]</sup>: ① 大容量固态储氢长途运输; ② 加氢站内的氢气存储和供应。

国内加氢站的气源多以外运的高压气氢为主, 少数加氢站利用光伏发电兼具站内制氢模式<sup>[16]</sup>, 氢气的运输规模和站内存储成为制约加氢站建设规模和运营稳定的重要环节。基于镁基材料的固态储氢具有较高的储氢能力, 质量储氢密度可达 7.6%<sup>[17]</sup>, 同时镁合金储氢的释放速度可控性较好, 放氢压力较低 (0.1 MPa), 可长时间储运, 运输过程安全性高, 未来可用于加氢站储运氢方式的规模化推广, 2020 年国内首座镁基固态储氢示范站在山东省济宁市落成, 加氢能力为 550 kg/d<sup>[18]</sup>, 2023 年 4 月国内第一代吨级镁基固态储运氢车由上海氢枫能源技术有限公司联合上海交通大学氢科学中心共同研发制造实现落地, 最大运氢量为 1.2 t, 是常规气氢长管拖车的 4 倍以上<sup>[19]</sup>, 与此同时国内首座镁基固态储氢示范站已在山东省济宁市落成, 加氢能力为 550 kg/d, 未来在储运氢领域固态储氢可替代或作为高压气氢的补充成为可能。

基于光伏发电开展的站内 PEM 电解水制氢压力低 (<3 MPa), 与镁基固态储氢材料匹配性较高, 储氢环节无需二次增压, 拓展作为制加氢一体化的加氢母站来看, 采用固态储氢方式可直接将所制氢气运至加氢子站, 未来可覆盖更大的输氢半径, (因其压力较低) 可实现在城区内安全通行, 进一步扩大氢气的使用范围, 为“氢进万家”项目加氢站的建设和氢能车辆的推广奠定基础。

目前推广的燃料电池车主要为高压气态储氢方式, 固态储氢压力尚不能满足车辆的高压加氢需求。加氢站采用低压固态储供氢技术, 通过构建高密度储氢静态压缩一体化系统如图 1 所示, 可作为加氢站内储氢的补充, 完成站内储氢—加氢双功能。该储供氢系统具备以下优势: ① 完全不依赖于机械式氢压缩机, 即可实现低压存储、高压加注过程; ② 与加氢站现有分级加注技术兼容, 可分别对 35 MPa 和 70 MPa 压力等级的车辆加注, 同时与可再生能源制氢压力匹配; ③ 采用水换热介质, 系统工作温度低于 100 °C, 可避免采用高温可燃的导热油等换热介质, 提升系统能效和安全性能。

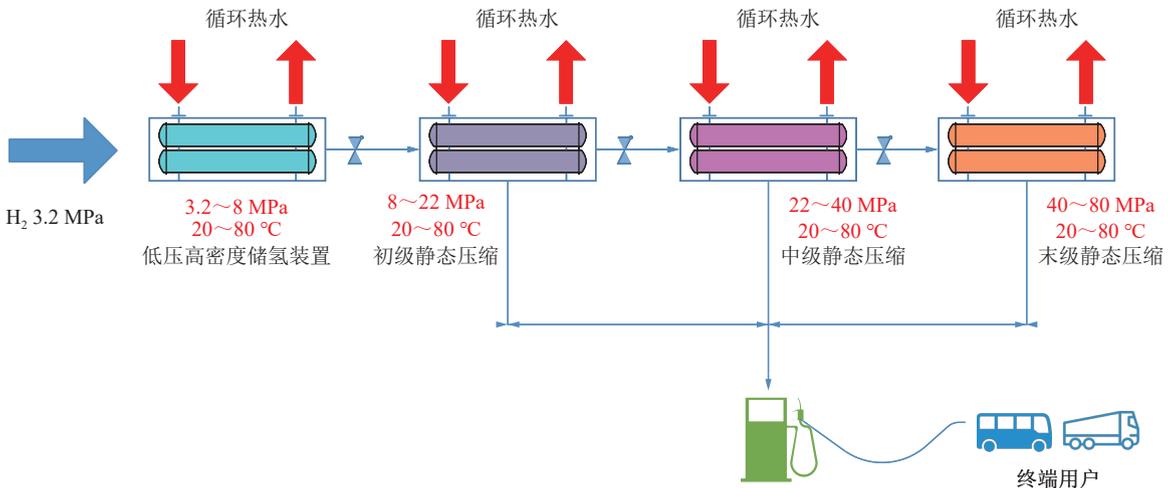


图 1 80 MPa 级高密度储氢静态压缩一体化系统

Fig. 1 80 MPa Grade high density hydrogen storage static compression integrated system

“氢进万家”项目中加氢站建设未来可采用镁基固态储运氢的方式, 作为气态储氢的补充, 满足对氢源的稳定可靠性要求, 同时因其储氢压力较低, 伴随着氢气的增压问题得以解决, 未来可进一步将加氢站的建设范围扩大至城区, 对燃料电池商用车和乘用车的推广具有积极作用。

### 3.1 氢储能/发电领域

氢储能/发电技术是利用电力和氢能的互变性而发展起来, 即利用电解制氢, 将间歇波动、富余电能转化为氢能储存起来, 在电力输出不足时, 利用

氢气通过燃料电池或其他发电装置发电回馈至电网系统, 非常适合分布式发电场景<sup>[20-22]</sup>。可再生能源发电 (如水电、风能、太阳能) 多为分布式发电, 具有间歇性特点, 不能长时间持续、稳定地输出电能, 导致大量弃风、弃光现象发生, 随着电解制氢技术的迅速发展, 氢储能技术应用于可再生能源消纳, 以保障可再生能源发电持续、稳定的电能输出, 提高电网接纳间歇式可再生能源的能力。

基于氢储能的可再生能源发电系统中的电能链和氢气链如图 2 所示<sup>[23]</sup>, 其中储供氢环节应具备以

下特点：①氢气可实现规模化储存；②体积储氢密度高；③常温低压状态即可实现储氢；④充放氢过程能耗要低。基于钌基和钛基的固态储氢技术具有储氢容量较高、稳定性较好、吸放氢速度快、放氢温度低等特点，同时固态储氢系统的外形可设计为方形或其他目标形状，非常适合氢气的规模化存储和供应，由于电网应用场景对质量并不敏感，固态储氢与电网大规模、长周期安全存储的需求有很高的契合点，随着氢气的应用规模不断扩大，固态储氢技术在安全性、运输效率、储存密度方面的优点将逐步在氢能供应链中得到应用。

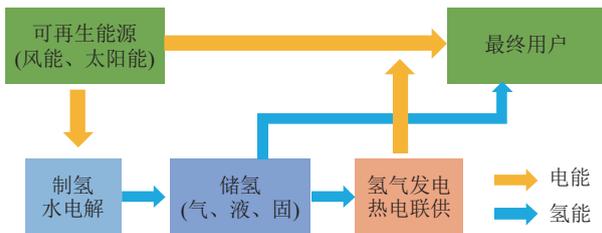


图2 基于可再生能源和氢储能的能量系统

Fig. 2 Energy systems based on renewable energy and hydrogen storage

氢储能/发电领域扩展至固定式氢能发电，可通过氢能燃气轮机和燃料电池2种技术手段实现，从产品鉴定和实际运行的情况来看，燃气轮机发电机组作为交流备用电源，未来是一种高品质、高可靠性的电源设备，应用前景广阔；燃料电池发电具有稳定性好、发电效率高、调峰响应速度快等优势，作为补充在固定发电领域起到削峰填谷作用。但燃气轮机发电设备和燃料电池一般不适合经常进行重启，否则会对发电设备本身产生较大损害，固态储氢占地面积小、可实现低温低压储供氢，未来可作为备用氢源用于管道氢源的补充，解决因管道检修造成的短时氢气供应短缺问题。

### 3.2 应急电源领域

固态金属储氢在小型PEMFC应急电源领域的应用场景主要包括2个：①家庭式PEMFC微型发电系统；②移动式燃料电池装备的换氢。家庭式PEMFC微型发电系统用于社区家庭，通常为一户独用或多户居民联用，需氢量较小，仅在突发电力故障时开启发电，使用频率较低，移动式燃料电池装备的应用则可扩大至燃料电池电动自行车、基于PEMFC的移动电源等场景，储氢单元要求模块化、便携、放氢速度快、压力等级低，氢气可以预先存储以应对发电系统紧急启动或移动设备的换氢使用。

针对应急电源领域的用氢需求，稀土储氢材料中钌镍基储氢材料具有容易活化、吸放氢速度快、

放氢温度低、滞后小、平衡压力适中、抗毒化能力强等优点<sup>[24-25]</sup>，可用于应急电源的储氢模组，但目前其稳定性不足，多次循环后容易退化，粉化现象严重，价格昂贵导致经济性较差，未来需重点突破这些难题。氢进万家项目拟开展城镇天然气管网掺氢输送应用示范，掺氢比例将达到20%，管网规模将覆盖10万户以上居民。储氢模组可充分利用社区天然气掺氢管网的优势，采用基于膜分离技术的小型氢气纯化装置，从掺氢天然气中分离出纯氢后进行存储，具体推广方案如下：①膜分离氢气纯化装置小型化入户，氢气纯化后采用钌基固态储氢模组存储，周期性进行充放循环，保证储氢系统的可用性和氢气的纯度，适用于家庭式PEMFC微型发电系统应用；②在社区内建立蜂巢式换氢母站，开发钌基固态储氢模组的标准化产品，类比换电电瓶模式，提供大中小型换氢模组，分别用于家庭式PEMFC微型发电系统（大型）、燃料电池电动自行车（中型）和PEMFC的移动电源（小型）等应用场景。固态储氢的低压存储和低温充放特点，使其具备高安全性，消除民众因高压气态储氢的误解和恐惧，同时对氢能进入社区的推广产生积极的宣传作用。

### 3.3 热电联供系统

燃料电池热电联供系统是利用氢气供应燃料电池发电，并产生热量用于供暖与热水供应，主要应用场景包括社区、工业园区或不适合接入电网的地区（如孤岛或其他偏远地区）。一般而言，社区和工业园区对氢源获取主要为纯氢管网输送或掺氢天然气分离纯化两种方式或组合，同时采用可再生能源发电（风电、光电）制氢相结合。

相较于其他金属固态储氢材料，镁基固态储氢材料在0.1 MPa下的放氢温度高达287℃，实际放氢过程需要对储氢系统进行换热升温<sup>[26-27]</sup>，与热电联供系统耦合，将其产生的高温位余热（约85℃）用于储氢系统放氢过程的加热，提高余热利用率。纯镁基储氢材料放氢温度较高，与燃料电池换热出口温位不是最佳匹配，通过纳米化、合金化、添加催化剂、复合轻金属配位氢化物等方法对镁基储氢体系储氢改性，将放氢温度降低至130~200℃，可大幅提升二者耦合后的一级换热效率，同时降低了二级换热的温位，系统整体能耗将至最低；参考加氢站领域的应用，基于可再生能源发电开展的PEM电解水制氢压力低（<3 MPa），同样与镁基固态储氢材料匹配性较高，储氢和放氢过程无需增压和减压，从能耗的角度来看为最优匹配，因此热电联供系统的储供氢环节采用PEM电解制氢—固态

储氢在技术上可行(成为可能)。

设想未来热电联供系统以管道输氢为主、现场固态储氢为辅的方式,形成多元化的供氢保障体系,可适应不同场景下热电联供的氢气需求。热电联供应用场景下涉及居民区和化工园区,高压储氢等占地面积较大、潜在危险性较高的储氢方式不甚友好。可采用固态储氢的方式构建现场储氢体系,解决换热温位问题,形成可复制的热电联供系统规模化推广方案。

## 4 结 语

固态金属储氢由于材料种类不同,氢气储存及释放特性也有较多选择,能够与当前的氢能多元化应用场景形成较好的匹配效果。在氢进万家示范工程中打造了交通运输、城镇供能、工业供能等几种场景,其中加氢站、叉车、应急电源、移动发电等场景均能较好地发挥固态金属储氢周期长,安全性高的优点,具有较好的发展前景。

在实际的市场应用过程中也暴露出固态金属储氢技术存在购置成本高,对氢气纯度要求高,循环特性较差等问题,极大地制约了市场推广,未来需朝着低成本、高抗毒性等方向不断完善。

## 参考文献 (References):

[1] 中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书 2020[M]. 北京: 人民日报出版社, 2021.

[2] 王延斌, 门军辉. “氢进万家”从蓝图走进现实 [N]. 科技日报, 2022-05-31(6).

[3] 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 自然资源部油气资源战略研究中心. 中国天然气发展报告-2021[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021.

[4] 中国电动汽车百人会. 中国氢能产业发展报告 [R/OL]. [2020-10-01]. <http://www.ev100plus.com/#/report/detail/58>.

[5] 杨小平, 田景文. 固体储氢材料的研究进展 [J]. 化工管理, 2015(16): 95-97.

YANG Xiaoping, TIAN Jingwen. Research progress of solid hydrogen storage materials[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2015(16): 95-97.

[6] 王其桂, 赵翠红, 周素芹. 新型高容量储氢材料的研究进展 [J]. *淮阴工学院学报*, 2015, 24(1): 12-17.

WANG Qigui, ZHAO Cuihong, ZHOU Suqin. Research progress on new high capacity hydrogen storage materials[J]. *Journal of Huaiyin Institute of Technology*, 2015, 24(1): 12-17.

[7] 马通祥, 高雷章, 胡蒙均, 等. 固体储氢材料研究进展 [J]. 功能材料, 2018, 49(4): 4001-4006.

MA Tongxiang, GAO Leizhang, HU Mengjun, et al. Research progress of solid hydrogen storage materials[J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(4): 4001-4006.

[8] 罗连伟, 朱艳. 储氢材料的研究分析 [J]. *当代化工*, 2018, 47(1):

124-127, 131.

LUO Lianwei, ZHU Yan. Research status of hydrogen storage materials[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2018, 47(1): 124-127, 131.

[9] 范士锋. 金属储氢材料研究进展 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2010, 8(2): 15-19.

FAN Shifeng. Research progress on metal materials for hydrogen storage[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2010, 8(2): 15-19.

[10] 刘海镇, 徐丽, 王新华, 等. 电网氢储能场景下的固态储氢系统及储氢材料的技术指标研究 [J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3376-3384.

LIU Haizhen, XU Li, WANG Xinhua, et al. Technical indicators for solid-state hydrogen storage systems and hydrogen storage materials for grid-scale hydrogen energy storage application[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3376-3384.

[11] LIN J, LU C, SUN L S, et al. Ti-V-Ni with graphene-mixing icosahedral quasicrystalline composites: Preparation, structure and its application in Ni-MH rechargeable batteries[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(2): 1098-1103.

[12] GOSALAWIT-UTKE R, MILANESE C, JAVADIAN P, et al. 2LiBH<sub>4</sub>-MgH<sub>2</sub>-0.13TiCl<sub>4</sub> confined in nanoporous structure of carbon aerogel scaffold for reversible hydrogen storage[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 599: 78-86.

[13] JIANG L J. Expediting the innovation and application of solid hydrogen storage technology[J]. *Engineering*, 2021, 7(6): 731-733.

[14] 任壮禾, 张欣, 高明霞, 等. Ti 基催化剂改性的 NaAlH<sub>4</sub> 储氢材料研究进展 [J]. *稀有金属*, 2021, 45(5): 569-582.

REN Zhuanghe, ZHANG Xin, GAO Mingxia, et al. Research progress in Ti-based catalysts-modified NaAlH<sub>4</sub> hydrogen storage materials[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45(5): 569-582.

[15] 卢胤龙, 柳星宇, 钟怡. 固态金属储氢技术在加氢站领域的应用及展望 [J]. *上海煤气*, 2022(4): 12-15.

LU Yinlong, LIU Xingyu, ZHONG Yi. Application and prospect of solid metal hydrogen storage technology in hydrogen refueling station[J]. *Shanghai Gas*, 2022(4): 12-15.

[16] 李凤迪, 程光旭, 贾彤华, 等. 加氢站发展现状与新模式探析 [J]. *现代化工*, 2023, 43(4): 1-8.

LI Fengdi, CHENG Guangxu, JIA Tonghua, et al. Development status and new mode seeking of hydrogen fueling station[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(4): 1-8.

[17] 刘木子, 史柯柯, 赵强, 等. 固体储氢材料的研究进展 [J]. *化工进展*, 2023, 42(9): 4746-4769.

LIU Muzi, SHI Keke, ZHAO Qiang, et al. Research progress of solid hydrogen storage materials[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(9): 4746-4769.

[18] 邹才能, 李建明, 张茜, 等. 氢能工业现状、技术进展、挑战及前景 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(4): 1-20.

ZOU Caineng, LI Jianming, ZHANG Xi, et al. Industrial status, technological progress, challenges and prospects of hydrogen energy[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(4): 1-20.

- [19] 氢枫能源. 吨级镁基固态储运氢车(MH-100T)发布会圆满成功[J]. 上海节能, 2023(4): 545, 403.  
QING Fengnengyuan. The conference of the tonnage magnesium-based solid-state hydrogen storage and transportation vehicle (MH-100T) was a complete success[J]. Shanghai Energy Saving, 2023(4): 545, 403.
- [20] 刘金朋, 侯焘. 氢储能技术及其电力行业应用研究综述及展望[J]. 电力与能源, 2020, 41(2): 230-233, 247.  
LIU Jinpeng, HOU Tao. Review and prospect of hydrogen energy storage technology and its application in power industry[J]. Power & Energy, 2020, 41(2): 230-233, 247.
- [21] 夏晨阳, 杨子健, 周娟, 等. 基于新型电力系统的储能技术研究[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(4): 3-12.  
XIA Chenyang, YANG Zijian, ZHOU Juan, et al. Research of energy storage technology based on new power system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(4): 3-12.
- [22] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 89-99.  
XU Chuanbo, LIU Jianguo. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: Application value, challenges, and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 89-99.
- [23] 霍现旭, 王靖, 蒋菱, 等. 氢储能系统关键技术及应用综述[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(2): 197-203.  
HUO Xianxu, WANG Jing, JIANG Ling, et al. Review on key technologies and applications of hydrogen energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(2): 197-203.
- [24] 张怀伟, 郑鑫遥, 刘洋, 等. 稀土元素在储氢材料中的应用进展[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(1): 1-10.  
ZHANG Huaiwei, ZHENG Xinyao, LIU Yang, et al. Application and development of rare earth-based hydrogen storage materials[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2016, 34(1): 1-10.
- [25] ZHAO B T, LIU L F, YE Y M, et al. Enhanced hydrogen capacity and absorption rate of  $\text{LaNi}_{4.25}\text{Al}_{0.75}$  alloy in impure hydrogen by a combined approach of fluorination and palladium deposition[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(5): 3465-3469.
- [26] 张秋雨, 任莉, 李映辉, 等. 镁基固态储氢材料研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(23): 6-23.  
ZHANG Qiuyu, REN Li, LI Yinghui, et al. Solid state Mg-based hydrogen storage materials: Research progress and future perspective[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(23): 6-23.
- [27] 张晓飞, 蒋利军, 叶建华, 等. 固态储氢技术的研究进展[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 345-354.  
ZHANG Xiaofei, JIANG Lijun, YE Jianhua, et al. Research progress of solid-state hydrogen storage technology[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(6): 345-354.