

## “氢能技术”重点专项 2021 年度 项目申报指南

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署安排，国家重点研发计划启动实施“氢能技术”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现发布 2021 年度项目申报指南。

本重点专项总体目标是：以能源革命、交通强国等重大需求为牵引，系统布局氢能绿色制取、安全致密储输和高效利用技术，贯通基础前瞻、共性关键、工程应用和评估规范环节，到 2025 年实现我国氢能技术研发水平进入国际先进行列。

2021 年度指南部署坚持问题导向、分步实施、重点突出的原则，围绕氢能绿色制取与规模转存体系、氢能安全存储与快速输配体系、氢能便捷改质与高效动力系统及“氢进万家”综合示范等 4 个技术方向，按照基础前沿技术、共性关键技术、示范应用，拟启动 18 个项目，拟安排国拨经费 7.95 亿元。其中，围绕氢能安全存储与快速输配体系技术方向，拟部署 1 个青年科学家课题，课题拟安排国拨经费不超过 500 万元。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的研究方向申报。每个项目拟支持数为 1~2 项，实施周期不超过 4 年。申报项目的研究内容必须涵盖二级标题下指南所列的全部研究内容和考核指标。基

基础研究类项目下设课题数不超过 4 个，项目参与单位总数不超过 6 家，共性关键技术类和示范应用类项目下设课题数不超过 5 个，项目参与单位总数不超过 10 家。项目设 1 名负责人，每个课题设 1 名负责人。

项目下设青年科学家课题的（项目名称后有标注），青年科学家课题负责人及课题参与人员年龄要求，男性应为 1983 年 1 月 1 日以后出生，女性应为 1981 年 1 月 1 日以后出生。

指南中“拟支持数为 1~2 项”是指：在同一研究方向下，当出现申报项目评审结果前两位评价相近、技术路线明显不同的情况时，可同时支持这 2 个项目。2 个项目将采取分两个阶段支持的方式。第一阶段完成后将对 2 个项目执行情况进行评估，根据评估结果确定后续支持方式。

## **1. 氢能绿色制取与规模转存体系**

### **1.1 光伏/风电等波动性电源电解制氢材料和过程基础（基础前沿技术）**

研究内容：针对光伏/风电等制氢系统应用所面临的动态适应性和运行可靠性等问题，开展波动电源电解制氢材料和过程基础研究，具体内容包括：研究复杂工况下电解制氢系统动/静态响应特性与建模方法；研究复杂运行工况对电解堆性能和寿命的影响机理与提升技术，包括适应波动性输入的电解堆材料/结构的设计和优化；研究新能源富集地区源/网特征刻画方法及模拟技术，研制电解堆及系统的适应性验证平台；研究高比例新能源电网系统

中电解堆及系统的适应性评价和表征方法；研究适应复杂工况的电解制氢系统配置优化与过程控制技术，研制适应波动性输入的长寿命电解制氢试验装置。

考核指标：电解制氢系统模型动静态误差 $\leq 10\%$ ；研制适应波动性输入的水电解制氢试验系统，其中电解堆：额定电流密度 $1.5\text{A}/\text{cm}^2$ 、电解电压 $\leq 2.0\text{V}@1.5\text{A}/\text{cm}^2@80^\circ\text{C}$ 、额定功率 $\geq 100\text{kW}$ 、操作压力 $\geq 3.5\text{MPa}$ 、产氢纯度 $\geq 99.99\%$ ，5~150%额定功率范围内连续调节，稳态工作3000h、平均单节电压衰减率 $\leq 15\mu\text{V}/\text{h}$ ，模拟华北、西北、东北等典型新能源富集地区电网能量平衡规律下工作2000h、平均单节电压衰减率 $\leq 40\mu\text{V}/\text{h}$ ；构建复杂工况下电解堆适应性验证平台，纹波频率：100~2000Hz，占比1~10%可调，电流阶跃响应时间 $\leq 20\text{ms}$ ，复现误差 $\leq 1\%$ ；建立水电解制氢系统波动电源适应性评价体系；相关标准规范（送审稿） $\geq 3$ 项。

## 1.2 低成本质子交换膜（PEM）水电解制氢电堆关键材料制备技术（共性关键技术）

研究内容：针对关键材料制备规模小、单位成本高等制约PEM水电解制氢应用和发展的的问题，开展低成本电解水制氢用关键材料设计与批量化制备技术研究，具体内容包括：研究新型低铱（Ir）基/非Ir基催化剂的设计、合成与高一致性批量化制备工艺；研究高电导率、高强度、高稳定性的离子交换树脂及其增强薄膜的设计与制备技术；研究低成本大面积膜电极涂布及成型工艺；研制适于连续工业化生产的质子膜及膜电极制备装备。

考核指标：低 Ir 催化剂：Ir 载量  $\leq 0.3\text{mg}/\text{cm}^2$ ，基于膜电极测试电解电压  $\leq 1.9\text{V}@2\text{A}/\text{cm}^2@80^\circ\text{C}$ ，过电势  $\leq 200\text{mV}@10\text{mA}/\text{cm}^2$ ，不同批次催化剂，制成膜电极测试的过电势偏差  $\leq \pm 10\text{mV}@10\text{mA}/\text{cm}^2$ ，工作 3000h 后，电势衰减  $\leq 2\%$ 。非 Ir 析氧催化剂：载量  $\leq 1.5\text{mg}/\text{cm}^2$  条件下，膜电极电解电压  $\leq 1.80\text{V}@500\text{mA}/\text{cm}^2$ ，过电势  $\leq 350\text{mV}@10\text{mA}/\text{cm}^2$ ，酸性条件下 10000 次循环后过电势衰减  $\leq 20\text{mV}$ ；质子膜：树脂交换容量(IEC)  $\geq 0.9\text{mmol}/\text{g}$ ，厚度  $\leq 80\mu\text{m}$ 、偏差  $\leq \pm 5\%$ （采样面积  $\geq 300\text{cm}^2$ ），质子电导率  $\geq 0.2\text{S}/\text{cm}@80^\circ\text{C}$ ，拉伸强度  $\geq 50\text{MPa}$ 、弹性模量  $\geq 300\text{MPa}$ （50%RH，25°C），面向尺寸变化率  $\leq 5\%$ （50%RH 至 100%RH），成本  $\leq 2300$  元/ $\text{m}^2$ ；质子膜制备装备：幅宽  $\geq 600\text{mm}$ ，产能  $\geq 10$  万  $\text{m}^2/\text{年}$ ；膜电极制备装备：单片活性面积  $\geq 3000\text{cm}^2$ ，产能  $\geq 10$  万  $\text{m}^2/\text{年}$ ；质子膜制备及膜电极制备装备设计寿命  $\geq 10$  年；采用本任务研制的材料、工艺等技术制成低 Ir 催化剂单电池，活性面积  $\geq 3000\text{cm}^2$ ，电解电压  $\leq 1.9\text{V}@2\text{A}/\text{cm}^2$ ，过电势  $\leq 200\text{mV}@10\text{mA}/\text{cm}^2$ 。

### 1.3 高效大功率碱水电解槽关键技术开发与装备研制（共性关键技术）

研究内容：针对碱性电解水制氢大功率、高电流密度、低能耗的需求，研发大功率碱性水电解制氢关键技术与系统集成技术，具体内容包括：低成本、高活性、长寿命一体化大面积新型复合电极设计与批量制备技术，功率波动工况下的电极过

程动力学特性；大面积、低传质阻抗、高亲水性、高耐热性新型非石棉隔膜批量制备技术；大直径碱性电解槽结构优化设计与集成技术；具有宽功率波动适应性的电解水制氢成套装备的优化设计与集成技术，宽功率波动工况下制氢系统的电—热—质均衡优化技术。

考核指标：电解槽额定产氢量  $\geq 3000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，电极小室电压  $\leq 1.80\text{V}@5000\text{A}/\text{m}^2$ ；制氢负荷  $\geq 80\%$  额定条件下，电解槽直流电耗  $\leq 4.3\text{kWh}/\text{Nm}^3\text{H}_2$ ，系统单位能耗  $\leq 4.8\text{kWh}/\text{Nm}^3\text{H}_2$ ，2000h 后电解槽直流电解效率衰减  $\leq 0.1\%$ ；电解制氢装备额定功率  $\geq 15\text{MW}$ ，设备运行压力可调范围  $\geq 0.8\sim 1.6\text{MPa}$ ，功率可调范围  $\geq 20\sim 110\%$  的额定功率。

#### 1.4 电解制氢加 $\text{CO}_2$ 制甲醇工程技术及中试装备开发（共性关键技术）

研究内容：针对大规模氢气加  $\text{CO}_2$  实现碳减排的产业化发展需要，研发电解制氢加  $\text{CO}_2$  制甲醇工程技术与中试装备，具体内容包括：构筑用于  $\text{CO}_2$  高效活化的催化剂体系；研究  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}_2$  在催化剂表面的吸附与活化、失效规律以及中间物种的形成和变迁规律；研究粘结剂和催化剂成型方式、催化剂强度及孔结构优化技术；开发工业化规模的换热优化新型反应器及工艺；开发工程化甲醇/水分离关键技术以及能源协同高效利用方案；开发氢气加  $\text{CO}_2$  制甲醇成套工艺包，实现十万吨级工业示范。

考核指标：催化剂运行 5000h 甲醇收率衰减  $\leq 5\%$ ；反应器：

单塔规模 $\geq 10$ 万吨，氢气转化率 $\geq 90\%$ ， $\text{CO}_2$ 单程转化率 $\geq 15\%$ ，甲醇选择性 $\geq 90\%$ ；有机相中甲醇含量 $\geq 99.5\%$ ；编制氢气加 $\text{CO}_2$ 制甲醇十万吨级优化工艺包，提交能耗、全工艺流程核算报告；建立十万吨级工业示范装置， $\text{CO}_2$ 总转化率 $\geq 90\%$ ，甲醇总选择性 $\geq 95\%$ ，稳定运行时间 $\geq 5000\text{h}$ 。

### 1.5 电解制氢—低温低压合成氨关键技术及应用（共性关键技术）

研究内容：针对发展可再生能源与低温低压合成氨互补融合新路径，开展电解制氢—温和条件合成氨关键技术及应用，具体内容包括：探索近常压氢气和氮气合成氨新机制，研发低温低压高效合成氨的催化新材料和副反应的抑制新方法，阐明 $\text{N}\equiv\text{N}$ 键活化和 $\text{N-H}$ 键形成的催化机理；研究高性能热化学合成氨催化剂及批量制备技术；构建可再生能源电解水制氢—低温低压热化学合成氨的模拟仿真平台，开发互补融合系统的成套新技术；设计并建成万吨级可再生能源制氢—低温低压热化学合成氨技术的验证装置。

考核指标：氢气转化率 $\geq 26\%$ ；近常压合成氨催化剂：反应温度 $\leq 200^\circ\text{C}$ 、反应压力 $\leq 0.2\text{MPa}$ ，产氨速率 $\geq 100\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ；低温低压条件合成氨催化剂：反应温度 $\leq 400^\circ\text{C}$ ，反应压力 $\leq 7.0\text{MPa}$ 、空速 $\geq 10000\text{h}^{-1}$ ，氨产率 $\geq 15\%$ ；可再生能源制氢—低温低压热化学合成氨技术的验证装置：可再生能源制氢电解系统 $\geq 3\text{MW}$ ，合成氨运行压力 $\leq 7.0\text{MPa}$ 、反应温度 $\leq 400^\circ\text{C}$ ，氨净值

≥15%，3000h 以上连续稳定运行。

## 1.6 十万吨级可再生能源电解水制氢合成氨示范工程（示范应用）

研究内容：针对我国西南地区水/光发电消纳困难以及传统合成氨工艺的碳减排等问题，开展十万吨级可再生能源电解水制氢合成氨示范应用，具体内容包括：研究适应可再生能源动态特性的电解水制氢合成氨系统建模与优化配置方法；研究适应柔性生产的合成氨工艺流程优化与调控；研究适应水光互补特性的大规模电解水制氢系统集成与集群控制技术；研究源—网—氢—氨互动的全系统协同控制技术；研究计及电、氢、氨等要素的全方位安全防护与市场运营机制，形成绿氢合成氨相关标准体系。

考核指标：掌握可再生能源电解水制氢合成氨全工艺环节建模技术，动静态模型误差 ≤5%，开发适应柔性生产的合成氨工艺流程仿真分析软件；建成十万吨级电解水制氢合成氨示范工程：绿氢占比 100%，合成氨产能 ≥10 万吨/年，产量调节范围 50~100%，为可再生能源制氢—低温低压（运行压力 ≤7.0MPa、反应温度 ≤400℃）热化学合成氨装置提供工程验证条件；电解制氢系统：规模 ≥100MW，系统单位能耗 ≤4.8kWh/Nm<sup>3</sup>，集群系统调节范围 10~100%，冷启动时间 ≤30min，热启动时间 ≤30s，动态调节速率 ≥20%/min；可再生能源消纳能力 ≥5 亿 kWh/年；电网调峰指令响应时间 ≤1s；形

成技术标准（送审稿） $\geq 5$ 项。

## **2. 氢能安全存储与快速输配体系**

### **2.1 高密度储氢材料及其可逆吸/放氢技术（基础前沿技术，含青年科学家课题）**

研究内容：针对高密度储氢材料的应用需求，研发具有高质量储氢量的可逆储氢材料、批量制备工艺以及示范储氢系统。具体内容包括：高密度储氢材料的设计和制备；高密度储氢材料吸/放氢热力学和动力学研究；高密度储氢材料的吸/放氢速率控制；高密度储氢材料循环性能的衰减机制和稳定化方法；以高密度储氢材料为工质进一步研制示范储氢系统，以及释放氢气中杂质的种类、含量及抑制方法等。

考核指标：低于  $200^{\circ}\text{C}$  下材料的质量储氢密度  $\geq 9.0\text{wt}\%$ ，可逆放氢量  $\geq 95\%$ ，吸/放氢循环寿命（50次） $\geq 90\%$ ，储氢压力  $\leq 7\text{MPa}$ ；示范储氢系统的吸/放氢速率  $\geq 3.0/0.3\text{gH}_2/\text{min}$ ，氢气纯度  $\geq 99.99\text{wt}\%$ ，杂质气体含量满足燃料电池用氢气品质 GB/T 37244—2018 要求。

有关说明：本项目中关于高密度储氢材料的设计和制备拟设立一个青年科学家课题。

### **2.2 氢气液化装置氢膨胀机研制（共性关键技术）**

研究内容：针对液氢规模化、致密化储运所需的低温液化系统核心装备，开展氢膨胀机、低温氢气换热器和正仲氢转化技术研究。具体内容包括：氢液化流程及氢膨胀机组参数优化与动态

仿真技术；高效低温氢膨胀机设计方法；低温氢膨胀机变工况与两相膨胀适应性；低温氢膨胀机的密封、绝热技术与制造工艺和可靠性；高效紧凑型低温氢气换热器设计方法与制造工艺；高效正仲氢转化催化剂材料及转化器设计；液氢储罐液位在线精密测量技术；基于氢气膨胀机的氢液化验证装置。

考核指标：氢气膨胀液化装置液化能力 $\geq 5$ 吨/天，液氢产品仲氢含量（体积分数） $\geq 97\%$ ；氢膨胀机等熵膨胀效率 $\geq 80\%$ ，启停寿命 $\geq 1000$ 次，连续10000h免维护运行；液氢储罐液位测量偏差 $\leq 0.5\%$ ；开发氢液化流程设计与仿真软件，液化量预测偏差 $\leq 15\%$ ；开发低温氢气换热器设计软件，换热量等关键热物理量预测和实验值偏差 $\leq 10\%$ ；建立氢膨胀机及氢液化装备国家/行业产品标准（送审稿）1~2项。

### **2.3 车载复合材料储氢气瓶服役检测监测与诊断评估技术（共性关键技术）**

研究内容：针对在用车载复合材料高压储氢气瓶服役安全的在线检测与评定需求，开展车载气瓶在线检测、监测与安全评估技术研究。具体内容包括：车载气瓶无损检测技术，满足道路行驶要求的气瓶支撑紧固结构设计与安装准则，复合材料层与内衬在正常充装、供氢等工况下性能退化行为规律与结构健康在线检测监测技术；车载工况下气瓶典型缺陷和损伤的演化规律，车辆事故对支撑、瓶体结构的损伤及隐患评估技术；车载气瓶缺陷和损伤在线检测技术、车规级实时监测器件与诊断技术；复合材料

储氢瓶的寿命预测模型和在线检测评定方法；车载复合材料高压储氢系统设计与安装、服役和在线检测监测与评估技术规范。

考核指标：研制的车载复合材料高压储氢气瓶在线系统达到开口裂纹检测灵敏度 $\leq 0.5\text{mm}$ ，纤维层分层/脱粘灵敏度优于 $\phi 6\text{mm}$ ，分层/纤维断裂监测相应时间小于 $1\text{s}$ ；氢泄漏感知响应速度 $\leq 0.5\text{s}$ ；在 $\geq 50$ 辆燃料电池汽车上部署结构健康在线监测系统，与充装、使用过程中典型损伤演化规律预测模型比对误差 $\leq 15\%$ ，与寿命预测模型比对误差 $\leq 15\%$ ，与车规级器件实时诊断比对偏差 $\leq 15\%$ ；提出车载复合材料高压储氢系统设计与安装、服役与监测、检验与检测技术规范1套（适用范围包括GB/T 35544—2017、T/CATSI 02 007—2020），提交包含复合材料高压储氢气瓶在线检测、监测与评价方法的国家/行业标准不少于2项。

#### **2.4 气氢与液氢容器及管件泄漏、燃烧与爆炸行为分析和材质要求（共性关键技术）**

研究内容：针对氢能及燃料电池产业对储氢装置在生产、储运、加注和使用全链条过程中“耐高压、高密封及爆燃安全”等性能的全面需求，开展氢容器及管件安全健康诊断方法、失效—泄漏—燃烧—爆炸全过程灾害风险演化模型、氢能爆炸时空演化规律、安全防护装备与应急救援研究。具体内容包括：研究氢气泄漏行为的全链条表征与评价，研究高速碰撞下储氢装置的失效破坏模式，提出气氢及液氢泄漏—扩散—爆炸风险全链条预测评估模型；研究适用于加氢站、灌装厂等场景下氢气及液氢爆燃发

展规律与毁伤机制，揭示氢容器在典型失效条件下的爆炸判据和失效特征；提出氢容器燃烧与爆炸防护基准策略，研制系列爆炸冲击防护材料和隔爆、抑爆材料；研究储氢及临氢装置的本质安全设计方法，形成储氢装置的全面安全健康诊断方法和具有高燃爆防护效应的储氢安全装置、设施的设计准则；研究氢能爆炸事故现场应急处置部署决策技术方案及实现方法，综合提升氢能爆炸应急自救及消防救援能力。

考核指标：构建氢气泄漏检测及氢气火焰识别方法，通风或惰性气体稀释装置的快速联动响应时间 $\leq 1s$ ；建立典型公共场所车载高压氢气和液氢泄漏扩散以及低温可燃云团爆燃预测模型，预测误差 $\leq 15\%$ ；建立高压氢泄漏自燃以及含有杂质的液氢爆炸的引发机理及判据，并进行试验验证，其中高压氢气泄漏压力 $\leq 35MPa$ ，单次液氢爆炸试验容量不低于200L，试验次数不少于5次；揭示大尺度开敞空间氢气云爆炸传播特征，超压预测模型在宽温度、宽压力、宽浓度范围下的精度 $\geq 90\%$ ；提出储氢安全装置及设施爆燃安全防护方法，设计适用于加氢站和灌装厂的新型抗爆燃储氢安全装置及设施，抑爆材料可对区域内的爆炸火焰完全抑制，爆炸压力下降95%以上；隔爆材料可对系统内不低于0.3MPa的爆炸压力实现完全控制；防护材料使爆炸压力下降70%以上；泄漏爆炸不引起临近装置及设施殉爆，爆炸破片速度在不低于725m/s（动能不低于2100J）下储氢安全装置及设施不被穿透，100gTNT当量外部接触爆炸不破裂；爆炸冲击波、破片及其

联合作用的致灾效应计算精度大于 90%；提出储氢装置安全指标体系，建立储氢装置运行全过程健康诊断评估方法；构建加氢站及灌装厂等典型氢能场景下燃爆风险实时应急预警系统，系统反应时间 $\leq 5\text{min}$ ；建立临氢装置安全管理信息平台，实现不少于 1000 台（套）氢能储运装备的信息化管理。

## 2.5 搭载瓶装氢气燃料电池汽车转运与集中存放技术与规范 (共性关键技术)

研究内容：基于燃料电池车辆应用中车辆停放、跨地域运输需要，研究车辆带氢运输、与燃油车混合运输过程中，在公路隧道、轮船、停车场等封闭、半封闭、开放典型场景下，集中运输和停放技术。具体内容包括：研究轮船滚装过程、服务区和停车场氢燃料电池汽车停放过程的风险识别与评价技术；研究搭载瓶装氢气燃料电池车辆转运与集中存放安全技术要求；研究停放/运输氢燃料汽车，在典型密闭、半密闭、开放场景下，氢气安全区间快速识别监测、预警、评价技术；研究氢燃料电池汽车高风险场景安全防范技术；研究典型场景氢泄漏扩散仿真与应急救援技术。

考核指标：建立针对车辆带氢运输、存放的安全风险分析与评测方法，并完成示范应用 $\geq 5$ 项；形成不同场景下的燃料电池汽车运输、存放、风险评价国家/行业标准报批稿 $\geq 2$ 项；建立叠加 20 至 1000 辆混合停车场存放或运输的在线监测系统 1 套，氢燃料电池汽车储氢瓶在线监测系统 1 套，覆盖泄漏、过载、超温

等主要风险点，形成燃料电池汽车储氢瓶在线监测国家/行业标准报批稿 $\geq 1$ 项。

### **3. 氢能便捷改质与高效动力系统**

#### **3.1 跨温区新型全氟质子膜研究（基础前沿技术）**

研究内容：针对燃料电池快速冷启动和系统简化需求，设计具有跨温区工作能力的全氟质子聚合物结构，突破其单体合成、聚合物制备、成膜及工程化制造技术，包括：兼具低温质子传导能力和高温稳定性的离子聚合物结构设计及多元协同质子传导机理；全氟离子功能单体的合成及其聚合技术；宽服役温度、长寿命全氟离子聚合物与增强体的高效复合结构，新型质子交换膜成膜工艺及其工程化制造技术；多元复合全氟质子膜在燃料电池中的应用研究。

考核指标：全氟质子聚合物单体纯度 $\geq 99\%$ ；聚合物分子量 $\geq 25$ 万、交换容量(IEC) $\geq 1.25\text{mmol/g}$ ；玻璃化转变温度 $\geq 130^\circ\text{C}$ ，聚合物分子量热分解温度 $\geq 350^\circ\text{C}$ ；质子交换膜EW $\leq 900\text{g/mol}$ ，工作温度范围 $-30\sim 120^\circ\text{C}$ （膜电极实际工作条件），电导率 $\geq 45\text{S/cm}^2$ （ $60\sim 120^\circ\text{C}$ 、 $50\%\text{RH}$ ）、 $\geq 5\text{S/cm}^2$ （ $-30\sim 0^\circ\text{C}$ ，膜电极实际工作条件），机械强度 $\geq 50\text{MPa}$ ，干湿循环耐久性 $\geq 20000$ 次；批量制造厚度偏差 $\leq \pm 1\mu\text{m}$ 、成品率 $\geq 99\%$ 。

#### **3.2 低成本长寿命碱性膜燃料电池电堆研制（基础前沿技术）**

研究内容：针对低成本基站用不间断电源需求，突破千瓦级非铂碱性膜燃料电池电堆、材料及其组件关键技术，具体内容包  
括：研究高活性阳极非铂催化剂和阴极非贵金属催化剂的制备技

术；开发非贵金属催化电极的高效传质结构与制备技术；研究 $\geq 80^{\circ}\text{C}$ 工况下碱性燃料电池的水管理技术，实现碱性燃料电池电堆的高性能输出；研究碱性条件下电解质及电极结构对 $\text{CO}_2$ 的敏感性、自由基对碱性聚电解质的攻击等关键问题，实现氢气/空气条件下碱性燃料电池电堆的长寿命运行。

考核指标：氢电极使用非铂催化剂、氧电极使用非贵金属催化剂，膜电极中贵金属催化剂用量 $\leq 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 、氧还原催化剂活性 $\geq 0.044\text{A}/\text{cm}^2@0.9\text{V}_{\text{IR-free}}$ ；碱性膜电导率 $\geq 45\text{S}/\text{cm}^2$ （ $25\sim 80^{\circ}\text{C}$ ）、氧传输阻力 $\leq 10\text{s}/\text{cm}$ ；碱性膜燃料电池电堆功率 $\geq 2\text{kW}$ 、功率密度 $\geq 1\text{W}/\text{cm}^2$ ，氢气/空气操作寿命 $\geq 3000\text{h}$ （实测，性能下降 $\leq 10\%$ ）。

### 3.3 电站用高效长寿命膜电极技术（共性关键技术）

研究内容：针对固定式电站对燃料电池长寿命和高效率的应用需求，开展电站用燃料电池膜电极设计、制备及寿命关键技术研究，具体内容包括：膜电极关键材料催化剂、质子交换膜、扩散层在发电工况下的衰减规律与结构强化技术，提升膜电极寿命和抗 $\text{CO}$ 能力；突破电站用膜电极催化层低极化和扩散层高传质技术，降低催化剂用量、提升电池能量转化效率和功率密度；突破膜电极高可靠性一次成型封装结构及其工程化制备技术，提升膜电极产能、批量制备的一致性和可靠性。

考核指标：基于发电稳态工况，膜电极在额定工作点电压衰减率 $\leq 10\%@40000\text{h}$ （实际测试 $10000\text{h}$ ，性能衰减 $\leq 2\%$ ）；膜电极

Pt 载量  $\leq 0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ , 性能  $\geq 0.80\text{V}@0.4\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $\geq 0.70\text{V}@1.2\text{A}/\text{cm}^2$  (空气压力  $\leq 150\text{kPa}_{\text{abs}}$ 、氢气中 CO 含量  $\geq 5\text{ppm}$ ); 基于高可靠性一次成型封装结构, 开发的膜电极在设计寿命范围内满足氢气渗透要求、年产能  $\geq 60$  万片, 性能偏差  $\leq 10\text{mV}$  ( $1.2\text{A}/\text{cm}^2$  工况条件, 抽检样本  $\geq 300$  片); 建立涵盖催化剂、离聚物、质子交换膜等关键材料的性能衰减预测模型, 性能衰减预测误差  $\leq 10\%$ 。

### 3.4 管式固体氧化物燃料电池发电单元及电堆关键技术 (共性关键技术)

研究内容: 针对固定式电站发电供能领域对高效、长寿命固体氧化物燃料电池的需求, 开展管式固体氧化物燃料电池用电解质膜、单电池、电堆的制备工艺与工程化研究。具体包括: 开发针对管式结构特征的致密电解质膜的制备工艺和生产装备; 研究兼具高输出功率和高运行可靠性的管式单电池的结构及其制造方法; 研究管式单电池及电堆模块的热、电、应力分布规律, 确立管式电堆的组堆方式及热管理策略; 研究运行条件对电堆效率及运行寿命的影响规律, 确立管式固体氧化物燃料电池电堆模块组装技术, 同时确立管式电池、电堆的工程化技术。

考核指标: 单个管式电池的空载电压大于  $20\text{V}$ , 输出功率密度  $\geq 0.4\text{W}/\text{cm}^2$ , 最大输出功率  $\geq 100\text{W}$ ; 管式电池支撑体平直度  $\leq 2\text{L}\%$ , 孔隙率  $\geq 25\%$ , 抗弯强度  $\geq 50\text{MPa}$ ; 可级联放大的电堆模块功率  $\geq 5.0\text{kW}$ , 初始电效率  $\geq 55\%$ , 冷热循环启动次数  $\geq 100$  次, 电效率衰减  $\leq 0.2\%/次@100$  次, 连续运行时间  $\geq 1500\text{h}$  (实测),

稳定运行情况下每 1000h 衰减率  $\leq 1\%$ ，电堆预期寿命  $\geq 20000\text{h}$ 。

### 3.5 千瓦级固体氧化物燃料电池发电系统及高可靠性电堆关键技术（共性关键技术）

研究内容：针对住宅、楼宇、社区分布式供能领域对高效、长寿命、可多次启停固体氧化物燃料电池的需求，开展高可靠性固体氧化物燃料电池与电堆工程化技术与系统集成研究，具体内容包括：研究支撑电极结构对电池的抗氧化还原、冷热循环、燃料重整性能的影响，提出电池结构与性能优化策略；研究电堆环境下电池与连接体的热、电、应力分布规律，开展电堆界面电子收集与封装材料特性研究，优化电堆集成方案，开展千瓦级电堆的工程化制造与评价技术研究；研究燃料特性对电堆效率及运行寿命的影响规律，开展燃料处理与热量回收处理方式技术研究，开展千瓦级热电联供系统集成应用研究。

考核指标：单体电池面积比电阻(ASR)  $\leq 0.25\Omega/\text{cm}^2@750^\circ\text{C}$ ，冷热循环电效率衰减  $\leq 0.2\%/次@100次$ ；电堆功率  $\geq 1\text{kW}@0.85\text{V}$ ，效率  $\geq 65\%$ ；系统功率  $\geq 2.0\text{kW}$ （掺氢天然气燃料），系统发电效率  $\geq 55\%$ ，热电联供效率  $\geq 90\%$ ；系统连续运行时间  $\geq 4500\text{h}$ （实测），冷热循环启动次数  $\geq 100$  次，预期寿命  $\geq 80000\text{h}$ 。

## 4. “氢进万家”综合示范

### 4.1 中低压纯氢与掺氢燃气管道输送及其应用关键技术（共性关键技术）

研究内容：针对城镇地区用氢需求，开展中低压纯氢与掺氢

(5~20%)燃气管道输送及其应用关键技术研究。具体内容包括:管材和焊缝中渗氢扩散机理,管材和焊缝对纯氢/掺氢输送的相容性研究,纯氢/掺氢输送架空和埋地管道连接工艺;管道中掺氢传质输运机理,多级减压和调压技术,纯氢/掺氢燃气管输工艺,掺氢设备研发;纯氢/掺氢燃气管道和关键设备的安全事故特征和演化规律研究、失效后果及防护研究、完整性管理及应急抢修技术;氢气分离工艺与设备研发及末端增压设备研发(用于燃料电池气源);纯氢管道输送试验平台、掺氢综合实验平台;纯氢/掺氢家用燃烧器、换热器内传热传质机理及结构优化研究、形成家用燃气灶、家用热水器及末端增加装置等科技试验平台。

考核指标:形成中低压纯氢/掺氢燃气管输工艺、管材、试验方法行业/国家标准送审稿2~3项,开发管输工艺软件1套,研发流量随动精准掺氢设备1套;开发纯氢/掺氢燃气管道完整性评估软件1套,形成纯氢/掺氢燃气管道应急抢修的行业/团体规范或标准送审稿1~2项;建成纯氢管道输送科技试验平台:最高压力 $\leq 4\text{MPa}$ ,长度 $\geq 4\text{km}$ ,管径 $\geq 300\text{mm}$ ,输氢总量 $\geq 5000$ 吨/年,安全运行60天,气密性试验1.1P下泄漏率 $< 0.3\%/h$ (试验时间24h),材料满足输氢工作条件下抗氢脆要求;建成掺氢综合实验平台:掺氢比5~20%,压力平稳调控,稳压精度 $\pm 2\%$ ,可实现不同输送设备的气密性检测,氢气分离纯度 $\geq 99.999\%$ ;进户压力 $> 2.0\text{kPa}$ ,家用燃氢热水器热效率 $\geq 80\%$ ,家用燃氢灶具热负荷 $\geq 3.0\text{kW}$ ,燃烧烟气中的氮氧化物含量 $\leq 0.015\%$ ;末端增压

装置增压至 0.2MPa；形成纯氢/掺氢燃气燃烧器具国家/行业标准送审稿 1~2 项。

#### 4.2 住宅用质子交换膜燃料电池综合供能系统集成关键技术（共性关键技术）

研究内容：综合考虑质子交换膜燃料电池（PEMFC）的产电、产热特性以及住宅场景的电、热能需求，开展住宅用 PEMFC 热电联供系统及其关键技术研究，具体内容包括：研究典型住宅场景热电用能模式与影响因素，以及燃料电池热电动态耦合运行机制、能量协同管控技术；研究固定式住宅用燃料电池热电联供系统集成优化及运行状态实时监测诊断技术；开发固定式住宅用燃料电池热电联供系统的关键器件及测试评价技术；开发耦合燃料电池的高效余热回收、蓄热及电辅热技术；研究家用燃料电池热电联供系统接入电网技术，研发低成本的自适应并网控制器。

考核指标：基于管道氢燃料的 PEMFC 热电联供系统中 PEMFC 电堆功率密度  $\geq 0.8\text{kW/L}$ ；系统额定功率  $\geq 1\text{kW}$ ，峰值发电效率  $\geq 50\%$ ，热电联供效率  $\geq 85\%$ ；住宅热电需求与燃料电池热电输出功率匹配度  $\geq 95\%$ ，功率控制响应时间  $\leq 100\text{ms}$ ，实测寿命  $\geq 7500\text{h}$ ，目标寿命  $\geq 40000\text{h}$ ，具备  $\geq 5\text{min}$  抗 200ppm CO 冲击能力，电流过载能力  $\geq 2$  倍@100ms，单一家用电器冲击下电压恢复时间  $\leq 10\text{ms}$ ，电网控制指令响应时间  $\leq 2\text{s}$ ，满足家用电气安全、电能质量等相关标准；万套级系统成本  $\leq 5000$  元/kW。