



中国科学院长春应用化学研究所

CHANG CHUN INSTITUTE OF APPLIED CHEMISTRY CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

CNNE2023 第八届东北能源经济峰会

风光发电制氢及储氢研发应用进展

王立民

中国科学院长春应用化学研究所

2023年09月20日

- 一、背景简介
- 二、风光发电制氢
- 三、储氢技术研发应用
- 四、展望

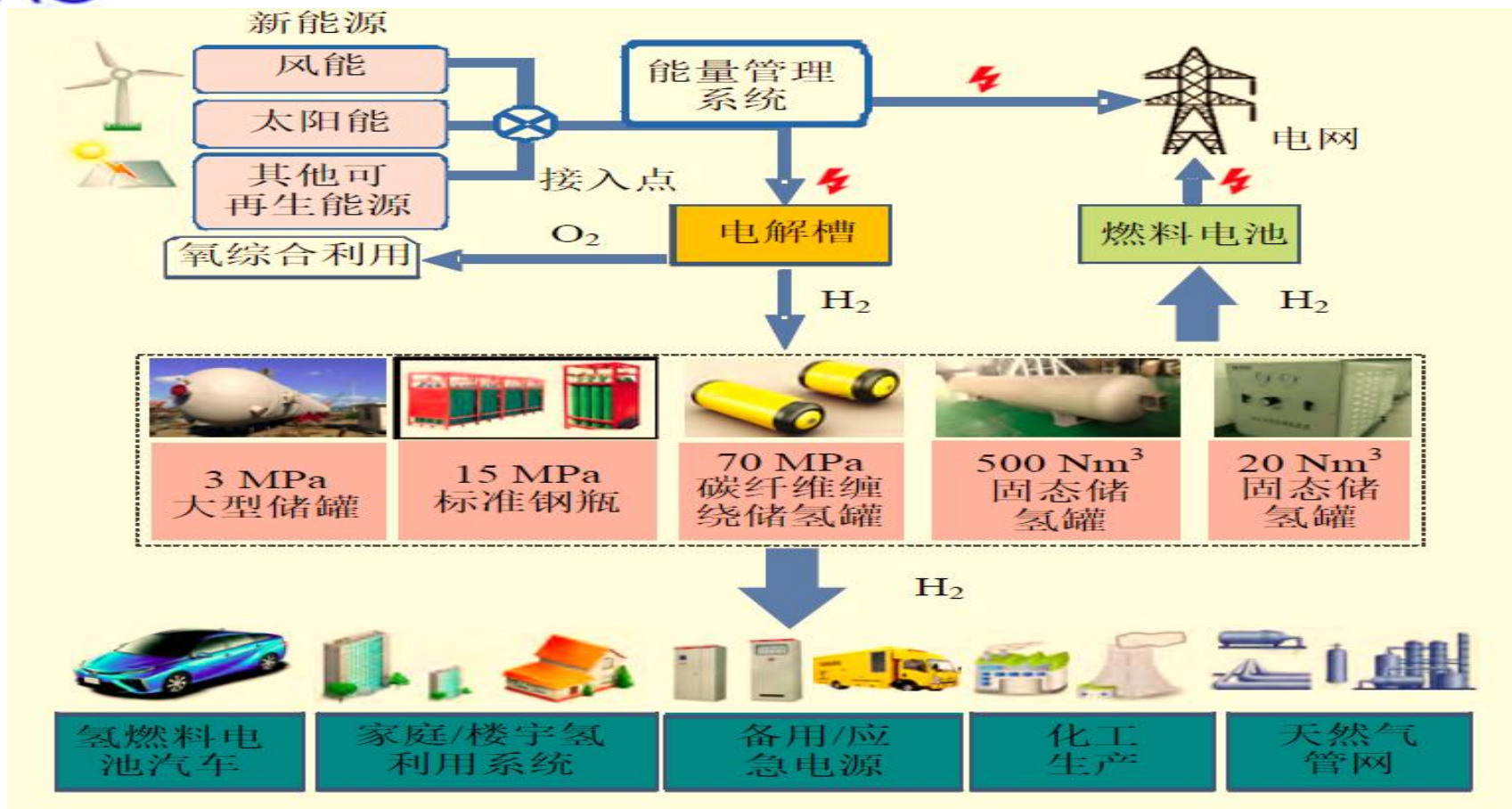


背景简介——关于氢能

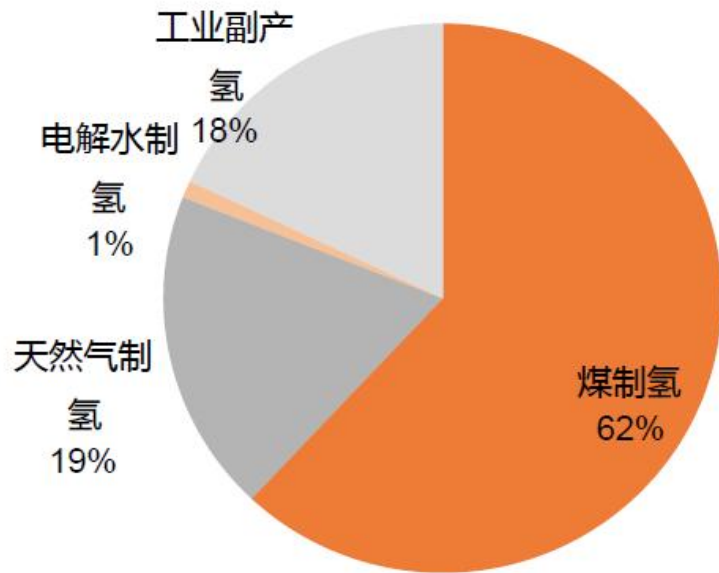
- 近年，我国每年1000亿度的余风光电，还有800万吨的副产氢，如何存储？如何利用氢能？
- 2020年10月国务院办公厅印发《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》中提出“**提高氢燃料制储运经济性**。因地制宜开展工业副产氢及可再生能源制氢技术应用，**加快推进先进适用储氢材料产业化。**”
- 当前我国氢能需求2500万吨，绿氢却只占1%。到2050年氢能在中国终端能源体系中占比超过10%，风光制氢，大有前途。



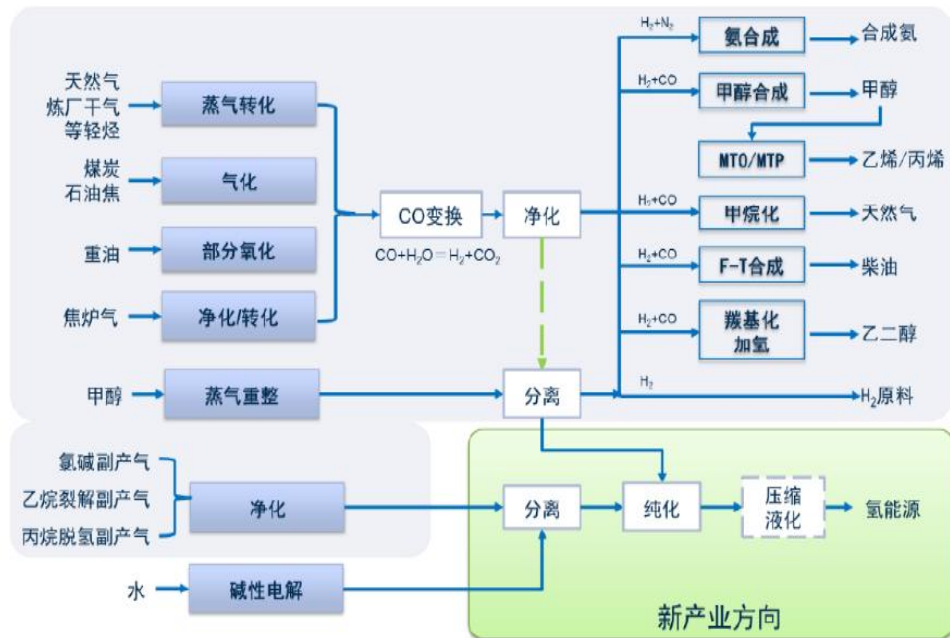
背景简介——关于氢能



背景简介——关于氢能



图：我国氢气主要来源占比



图：当前中国氢气生产和消费主要工艺

背景简介——关于氢能

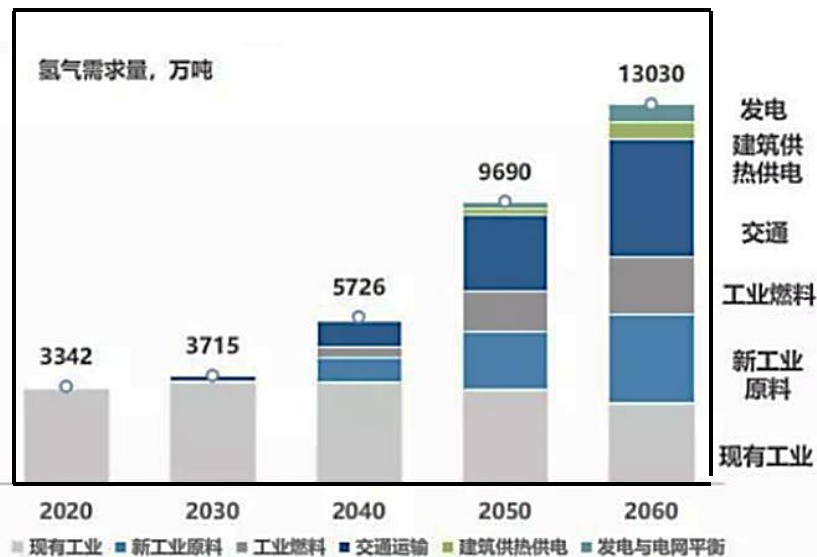


图: 我国氢能需求行业预测



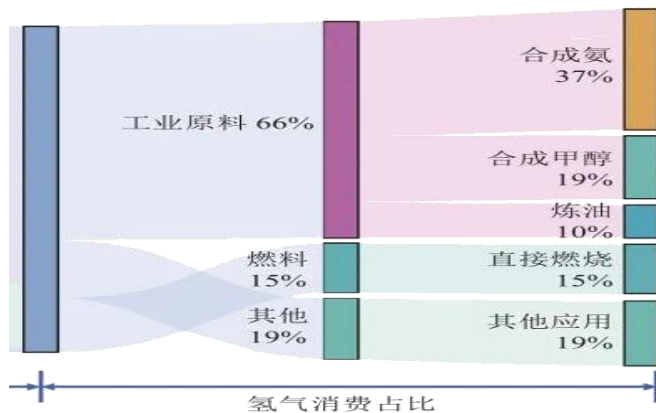
图: 中国中长期氢气需求预测

表1: 典型制氢方法对比

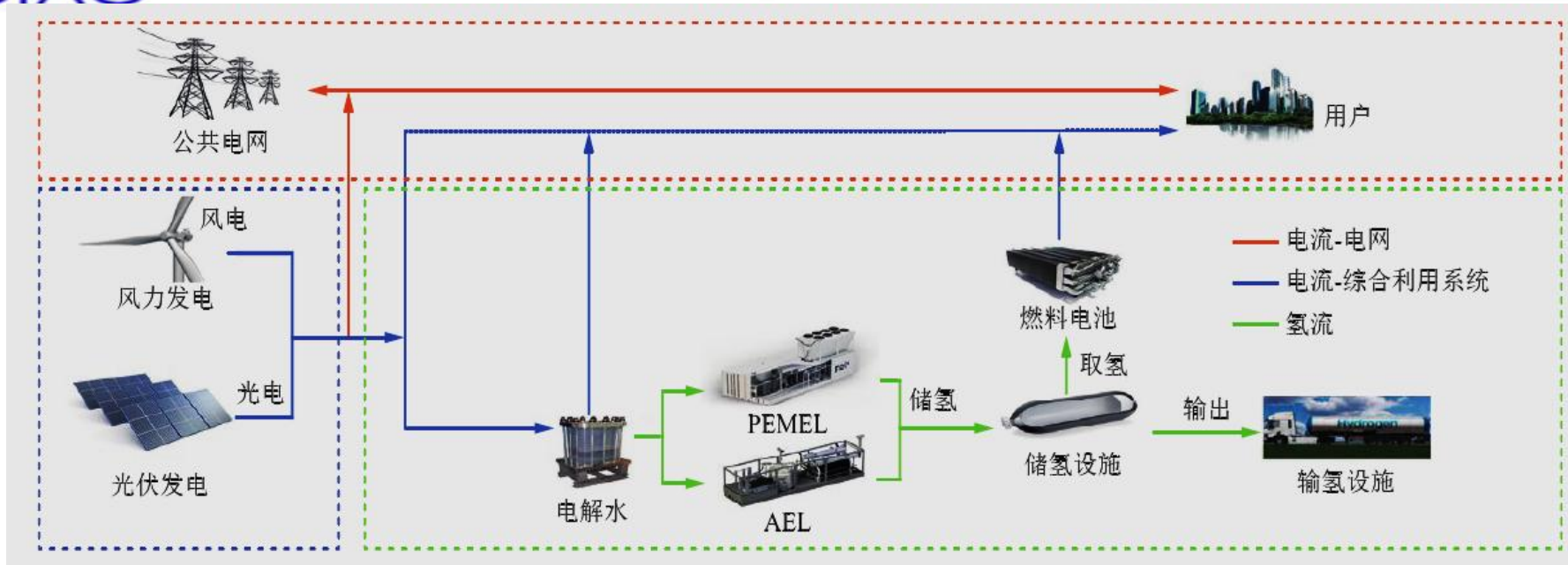
制氢方法	优点	缺点
化石燃料重整、气 化制氢	技术成熟, 可满足近期所需	原料属不可再生能源, 储量有限, 有 CO ₂ 、污 染物排放
生物质制氢	属可再生能源, 资源分布广、储量大	产氢速率慢, 产氢生物种类单一
电解水制氢	技术比较成熟, 工艺简单, 无污染, 可制备高纯度氢	电耗巨大, 能量利用效率只有 20-30%
光解水制氢	无污染, 有工业应用潜力	光能转化率和产氢速率低, 离实用距离尚远
热化学循环水分解	反应温和, 可匹配核能、太阳能作为热源等, 热效	步骤较多, 流程复杂, 需研制耐腐蚀高温材料

表2: 制氢成本比较

制氢方式	成本 (元/kg)
煤制氢	8-12
天然气制氢	10-15
焦炉煤气制氢	8-12
氯碱、丙烷脱氢等副产氢	6-10
甲醇、氨制氢	12-20
电解水制氢	10-50



背景简介——风光发电制氢



风、光能：

- 分布广，储量大；
- 波动性，随机性；
- 时间与空间上互补。

- ◆ 调节、储存转化能量
- ◆ 缓解多余风光发电问题



氢能：

- 密度高；
- 储存周期长；
- 高效储能。

风光发电制氢、储氢

核心技术

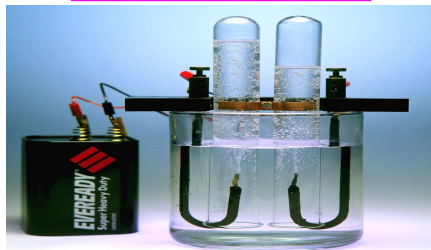
风光发电

并网技术
双馈型风电机组
风光储一体
分布式发电
智能电网



电解水

PEM 电解水技术
直接电解海水制氢
高温电解水技术
(SOEC)



储氢

压缩氢气储存
液体氢存储
固态氢气储存
(储氢材料)



风电制氢技术

- 2014年，国家863项目——风电直接制氢及燃料电池发电系统技术与示范，制氢功率可达为100kW，燃料电池发电为30kW；
- 2014年，氢储能关键技术及其在新能源接入中的应用研究；
- 源风电制氢项目，具有年制氢1752万m³的生产能力。



图 吉林省西部千万千瓦风电基地起步区与核心区——通榆风力发电厂外景

- 2017年，提出需结合系统建设地点气候环境，考虑风机、光伏面板参数特性合理分配容量才可以最大化风光资源利用率；
- 2018年，提出一种风光互补联合制氢系统的环境效益评价方法，认为风光互补联合制氢系统在不同地区的利用对光照和风力资源曲线的重视度不同；
- 2019年，提出可再生能源制氢储能技术可最大程度避免能源浪费，风光互补制氢系统技术领域的相关研究对我国能源清洁化转型及脱碳减排进程具有极大促进作用。



图“风光火储”耦合发电的基地型规模化综合能源项目

- 2021年, 凯豪达氢自主设计生产的一期制氢项目光伏制氢与燃料电池热电联供系统装置, 对天然气掺氢的应用场景具有示范作用。

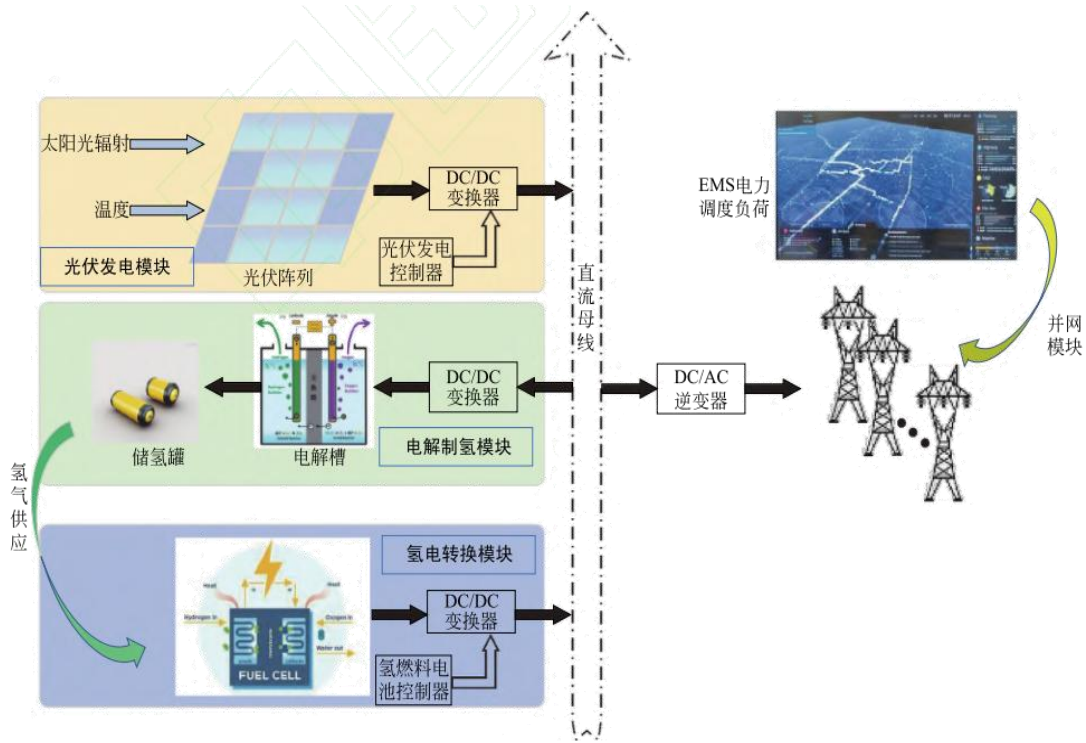
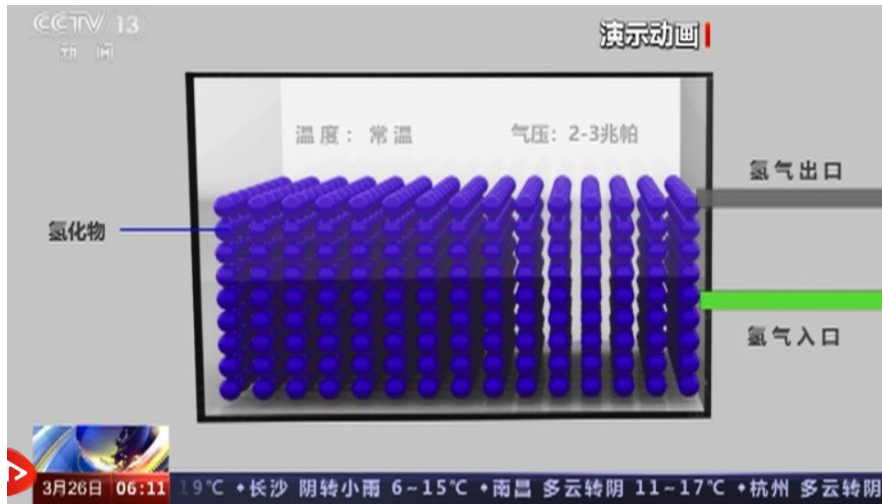


图 2 光伏发电制氢系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of photovoltaic hydrogen generation system

风光发电制氢

2023年3月，国家重点研发项目固态氢能发电并网率先在广州和昆明同时实现，这也是我国首次将光伏发电制成固态氢能应用于电力系统。



- ◆ 解决了‘绿电’与‘绿氢’灵活转换的难题，解决了在常温条件固态形式存储氢气技术“瓶颈”；
- ◆ 七个不同储量的固态储氢装置，储存90公斤氢气，持续稳定出力23小时可发电2300度。

风光发电制氢

2023年5月，由新能集团公司所属鸿通电业发展公司承建的中石化新星石油公司库车绿氢示范项目220千伏变电工程顺利投产送电——绿氢示范项目运行。



- 装机容量**300 MW**、年均发电量**6.18亿kWh**的光伏电站；
- 年产能2万吨的电解水制氢厂，储氢规模约**21万 Nm³**的储氢球罐；
- 输氢能力**2.8万 Nm³/h**的输氢管线，绿氢供应中国石化塔河炼化。

风光发电制氢

- 2023年6月，河北鸿蒙张家口风电光伏发电综合利用（制氢）示范项目
- 投资174亿元打造，总容量达125万kW。
- 预计年产绿电超62亿kWh，若全部用来制氢，可年产绿氢超9万吨。





风光发电制氢

- 2023年7月，吉林白城大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目；
- 大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目总投资63.32亿元，采用风光发电，电解水制氢，空分制氮生产合成氨；
- 风光发电工程装机量800 MW(其中风电700 MW、光伏100 MW)，配套建设40/80 MWh储能装置，制氢32万吨/年，合成氨建设规模18万吨/年。



风光发电制氢

- 2023年6月，内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗纳日松光伏制氢产业示范项目年均发电量约为7.4亿 kWh，其中20%将直接输送至当地电网，剩余80%用于氢气生产。



2023年6月，由**东方电气集团**与深圳大学/四川大学谢和平院士团队联合开展的全球首次海上风电无淡化海水原位直接电解制氢技术海上中试在福建兴化湾海上风电场获得成功。意义体现在：

- **首次**实现了中国学者提出的全新原理技术在真实环境下的可行性和稳定性；
- **首次**实现了海上风电可再生能源和海水直接制氢的一体化技术体系；
- **首次**验证了海上风电无淡化直接制氢抗海洋环境干扰的可行性；
- **首次**实现了成果到工程试验的中国速度。





2023年国内风光氢储氨醇一体化

1	亿利节能与国家电投联合开发绿电-绿氢-绿氨——32亿	8	中能建风光氢储及氢能综合利用一体化示范——76亿元
2	三一重能乌拉特中旗风光氢储氨一体化示范——43亿	9	中能建松原氢能产业园（绿色氢氨醇一体化），——296亿元
3	中煤50万吨/年离网型风光制氢合成绿氨技术示范——245亿元	10	腾格里60万千瓦风光制氢一体化示范——41亿元
	远景能源赤峰市能源物联网零碳氢氨一体化示范——44亿元	11	中电建赤峰风光制氢一体化示范——35亿元
5	中石油乌兰察布兴和县风光发电制氢合成氨一体化，——41亿元	12	中核科右前旗风储制氢制氨一体化示范——45亿
6	中能建乌拉特中旗风光制氢制氨综合示范——23亿元	13	国能阿拉善高新区百万千瓦风光氢氨+基础设施一体化低碳园区示范——51亿元

挑战

- 能源存储和分布：
更合理的布局方式
- 天气条件的影响：
智能调度和优化
运行系统
- 系统效率问题：提
高风能和太阳能的
转化率、优化逆变
器工作效率
- 保护环境和生态：
合理选择建设地
点、采用环保材
料和技术等

前景

- 未来我国风力发电总装机容量，到2030年达到约**4000万kW**左右；
- 成本也将逐渐降低，成为电力系统的重要组成部分，为电力系统的稳定运行和可持续发展提供保障。



风、光、电氢技术展望

加强电解制氢技术的开发

开发可快速响应功率波动的固体聚合物电解水制氢技术(SPE)及固态氧化物电解水制氢技术(SOEC)。

开展氢储能系统的研发

设计高压及固态储氢系统，使之与电网调峰和运行模式相匹配，是该技术能够走向市场的关键技术之一。

注重大规模风电制氢运行模式以及经济性

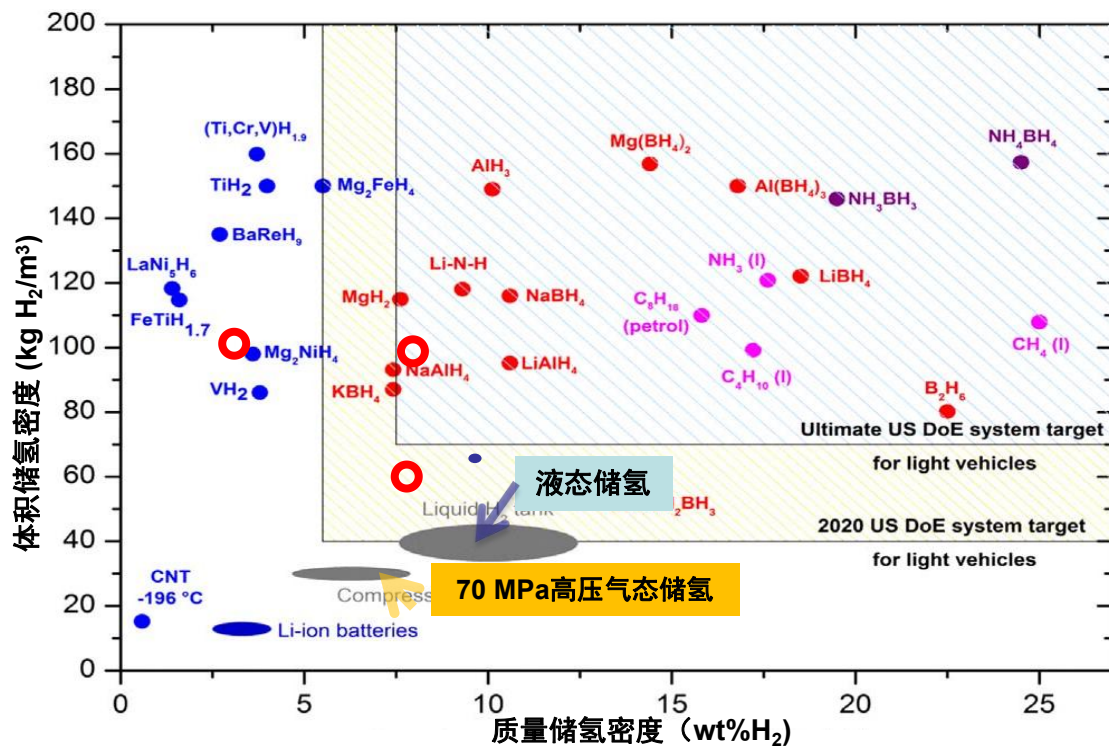
应对综合效益进行研究和评价，包括社会效益、环境效益及经济效益等。需要在经济性分析的基础上，建立一套多能源转换利用的综合效益评价指标体系和方法。

解决风电与电网输配电的政策问题

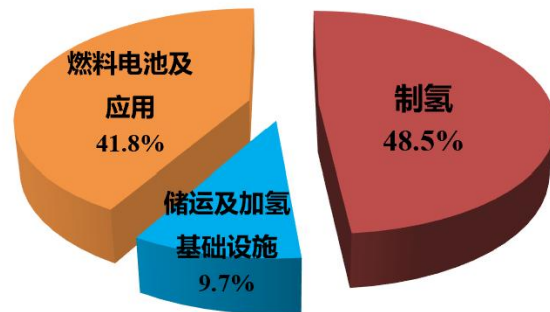
水电解制氢站用电负荷的增加有利于电能的消纳，风电场可直接向制氢站供电，统筹调度风电与太阳能等新能源发电资源，确保水电解制氢供电的稳定性。

◆特点和应用

国家“十四·五”目标
 体积储氢密度 $60 \text{ kgH}_2/\text{m}^3$
 质量储氢密度 6 wt.%
 2000次循环 保持率90%



- ❑ 2020年6月《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》：我国氢能制储、加氢基础设施、燃料电池及应用三个环节企业占比分别为48.5%、9.7%、41.8%；
- ❑ 相比制氢和燃料电池产业之下，氢能储运和加注产业化整体滞后；
- ❑ 截止2021年，我国建成685座加氢站，平均建设成本1500万元/座；中国加氢站建设2025超2000座，2030年数量将超过5000座；储运氢规模超千亿；
- ❑ 2022年，“氢动吉林”，加快培育氢能产业发展。10年内“力争氢能产业总产值数百亿元规模”。



氢能企业发展：两头重、中间轻



氢气储运技术

储运方式	输运工具	压力 (MP)	载氢量 (kg/车)	体积储氢密度 (kg/m ³)	质量储氢密度 (wt%)	成本 (元/kg)	经济距离 (km)	特点	我国发展程度	图片示例
气态储运	长管拖车	20	300-400	14.5	1.1	2.02	≤200	单车载量约350kg, 时间各需4~8h	发展成熟。	
	管道	1-4	-	3.2	-	0.3	≥500	投资大, 存在氢脆等难点	建设进度缓慢	
液态储运	液氢槽罐车	0.6	3000	64	14	12.25	≥200	单车载量约3000kg, 装卸时间1~2h	仅应用于航天及军工领域	
固体储运	货车	4	300-400	50	1.2	-	≤150	镁基等轻质储氢材料	大多处于研发试验阶段	
有机液体储运	槽罐车	常压	2000	40-50	4	15	≥200	存在温度高、效率低等问题	研发投产相关产能装置	

储氢方式

高压储氢



- 技术成熟 ($\leq 70\text{MPa}$)
- 应用方便
- 质量储氢密度高
- 加氢站成本高
- 市区推广难

液态储氢



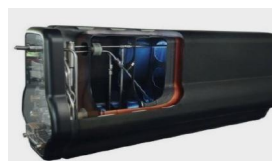
- 体积储氢密度高
- 运输快捷
- 自挥发, 难长期存储
- 绝热系统复杂
- 成本高

固态储氢



- 体积储氢密度高
- 能效高
- 安全性好
- 加氢站成本低
- 质量储氢密度低

有机液体储氢



- 质量储氢密度高
- 能效高
- 安全性好
- 含杂质气体

➤ 现存储氢技术都有显著的优/缺点, 适合在特定场景应用

合金类型	金属氢化物	放氢容量 (wt.%)	放氢压力 (bar)	放氢温度 (K)
AB ₅	LaNi ₅ H ₆	1.4	2	298
AB ₃	CaNi ₃ H _{4.4}	1.8	0.5	298
AB	TiFeH _{1.8}	1.9	5	303
AB ₂	TiMnFe	2.0	4	323
A ₂ B	Mg ₂ NiH ₄	3.6	1	555
固溶体	TiVFeH ₆	4.0	0.1	298
轻金属	MgH ₂	7.6	0.1	573

问题： 或容量偏低、或条件苛刻、或成本较高、或技术成熟度低



固态储氢材料

现工业化国内外固态储氢材料应用例

材料制造单位	名称类型	储氢量 (m ³)	储氢材料	备注
布鲁克海文国家研究室 (美国)	内部冷热型	70	TiFe 400 kg 1.56% TiFe _{0.9} Mn _{0.1} 1700 kg 1.36%	直径300 mm, 氢压3.5 MPa。 直径660 mm氢压3.4 MPa。
曼内斯曼公司.戴姆勒奔驰公司 (德国)	内部隔离外部冷热型	2000	Ti _{0.98} Zr _{0.02} V _{0.43} Fe _{0.09} Cr _{0.05} Mn _{1.5} 10 t 1.78%	氢压5.0 MPa, 温度100°C 7×Ø114.3 mm
新日本川崎制铁 (日本)	内部冷热型	19000	Ti _{0.95} FeMm _{0.08} , 1.5%H	1955×Ø381 mm, 温度85°C, 氢压3 MPa
深圳市佳华利道新技术开发有限公司 (有色院)	内部冷热型多管用	180	TiMn _{1.5} 1300 kg 1.7%H; 系统 (1.2%) H	并联钢管构成 (带冷热水) 大巴车应用16 kgH ₂ ,370 km
上海氢枫能源技术有限公司	内部冷热型多管用	>10000	Mg合金 6 %	钢管结构, 试验中
长春应化所	多管复合	20	AB _x -RE, 2%	铝、钢管结构; 开发试验中

北京有研科技集团

2020-2022年

- ▶ 在怀柔基地建立起30 kW风电电解水制氢/500 Nm³固态储氢/3 kW燃料电池发电集成系统；
- ▶ 初步解决了风电直接电解水制氢控制以及制氢-储氢-燃料电池发电耦合技术；
- ▶ 氢/热耦合技术提高了系统的能量效率。



江苏集萃安泰创明先进能源材料研究院有限公司



- ◆ 2017年10月在常州国家高新区正式注册成立；
- ◆ 2018年3月与省、市共建成为江苏省产业技术研究院。

新型A2B7型储氢合金



以固态储氢为氢燃料发电系统



“电-电混动”氢燃料电池电动车



氢燃料电池助力两轮车



固态储氢装置及应用

- 2023年4月13日，氢枫能源联合上海交通大学氢科学中心重磅发布世界领先的第一代吨级镁基固态储运氢车（MH-100T）。
- 40尺大小可以储存1吨氢气，是常规（气态储氢）3-4倍的存储量，经济效益十分明显。车辆在常温常压下储运，工作压力 ≤ 1.2 MPa，放氢纯度99.999%，循环次数 > 3000 次。



我国三峡氢舟1号

- “三峡氢舟1号”七一二所作为牵头单位已于2022年5月开建，并已完成燃料电池系统、高压储氢瓶组等所有核心部件的中国船级社(CCS)产品认证，计划2022年11月下水，2023年上半年交付使用。
- “三峡氢舟1号”配套的氢燃料加注方案采用固定式岸基制氢加氢站为主，撬装式加氢站为辅的方式。
- 制氢规模200 Nm³/h(PEM电解水制氢)，加氢规模500 kg/d。





固态储氢装置及应用

公司	固态储氢发展动态
佳华利道	2021年4月，佳华利道新技术开发有限公司推出一台4.5t固态储氢燃料电池冷藏车。该车辆采用的低压合金储氢系统和加氢系统。
新氢动力	2022年4月，新氢动力发布两款无人驾驶氢能车型，其中一款为搭载周态金属储氢燃料电池叉车。
科新机电、 安泰创明	2022年4月，科新机电与安泰创明合作开发常温常压加氢站储氢装置(系统)、高温高压大型氢储、运装置，加氢站储氢系统、中长距离氢储运车等。
氢枫能源	2022年4月，氢储(上海)能源科技在河南新乡高新区镁合金高密度储氢技术产业化项目的全球首条生产线建成投产测试。
鸿达兴业、 有研工研院	2022年1月，鸿达兴业公告与有研工程技术研究院积极推动氢能产业多元化应用，共同拓展氢能领域市场。
圣元环保、 有研工研院	2022年4月，圣元环保与有研工研院就氢能研究院合作开展储氢材料研究与制备，船舶、港口车辆等应用场景固态储氢装置以及风光制氢-储氢-用氢应用示范。

运氢



管道运输——大量、长距离的氢气



钢瓶——适用于几公斤近距离运输



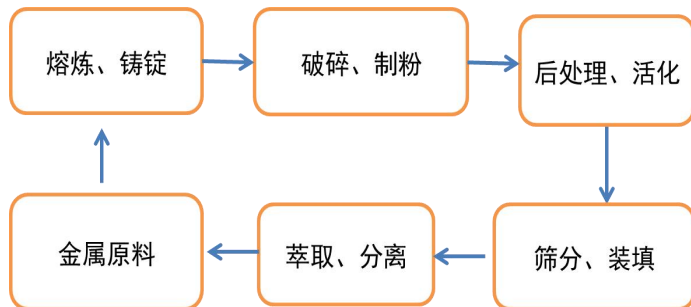
不锈钢管拖车——适用于几百公斤重量级运输



- 气氢拖车是国内应用最广泛的道路运输方式，但是国内气氢储氢罐压力大多在20 MPa，单车运输能力并不高，运输半径受限；
- 需要升压加注，加氢机连续作业困难；
- 固态储运氢极大拓展了氢的运输半径、无需氢压缩机等设备；如作为加氢站的氢库介质，可在压力小于4 MPa；温度低于60°C范围内工作。

氢气的固态运储应用展望

- ❑ 换罐式低压储供氢系统、中压——低压加氢应用系统、低压——低压储供氢应用体系；
- ❑ 氢与天然气性质接近，模块化集中充氢，自卸式运输，300公里范围内形成可再生能源制——储——运——换一体化示范应用；
- ❑ 关注点集中在重载车辆、物流车、商用车、叉车等；优势：等待时间短，续航里程长、甚至无需充电、超长续航；燃料电池VS柴油机；
- ❑ 商业模式：基于高速公路网络，发展氢增程式低压换罐新能源体系；
- ❑ 竞争点：高压罐体应用加注系统与低压固态储氢罐体全周期使用成本之争（材料回收、原材料资源）；2B端重载物流车应用；
- ❑ 有机统一推进新能源汽车发展（氢+锂电）及能源转型升级。



氢气的固态运储应用展望

□ 固态储氢 —— 实现工业副产氢净化储运一体化



- 直接充装
- 纯化氢气
- 储存运输
- 更低成本

研发了多种固态储氢材料

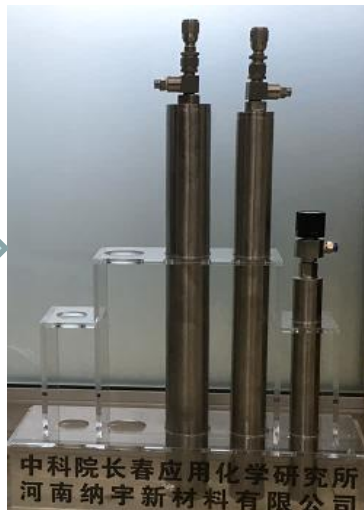
- TiFeMn基储氢材料，室温最大吸氢量 ≥ 1.9 wt.% ；
- TiV基储氢材料，最大吸氢量 ≥ 3.5 wt.% ；
- Mg基储氢材料，最大吸氢量 ≥ 6.5 wt.% ；
- Al基储氢材料，最大吸氢量 ≥ 9.5 wt.% ；
- 部分材料已完成小试/中试阶段，可工业化生产；
- 取得中国发明专利多项。



储氢系统研发



储氢材料



单体金属氢化物储氢罐



列管式金属氢化物储氢装置

储氢系统应用

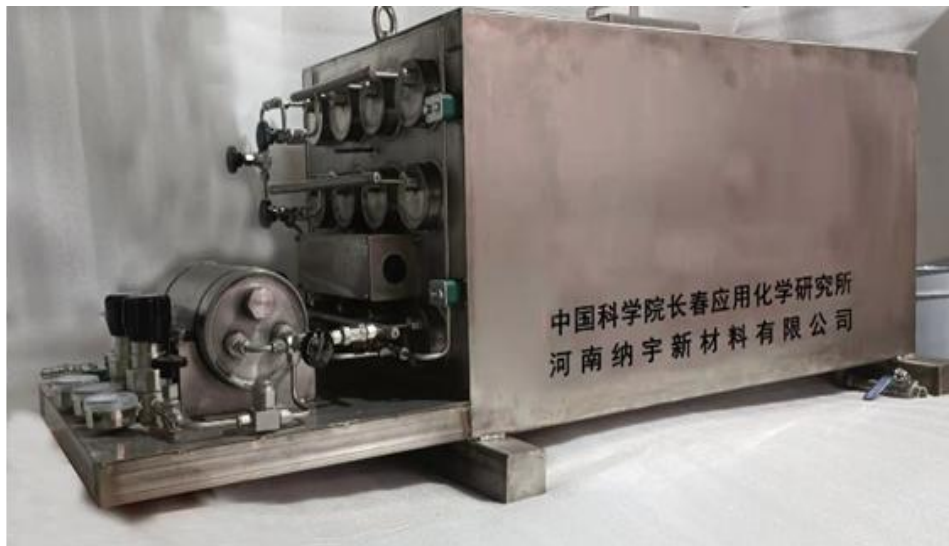


图 存储3~5 kg H₂样机



图 100 W燃料电池供氢系统

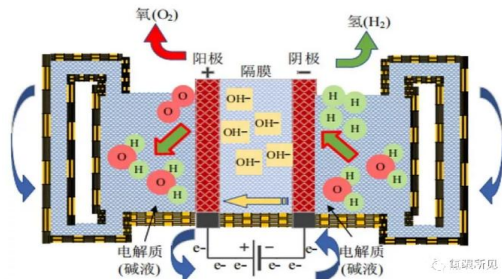
储氢罐——燃料电池应用系统

- 建成储氢容量为50 NL的储氢罐及配套的燃料电池系统。
- 支持50 W燃料电池工作近1小时。



储氢罐容量	实际尺寸	总重量	填料重量	储氢压力	放氢速度	罐体材料
50 NL	$\phi 40 \times L 130$ mm	约1.2 kg	343 g	≤ 3 MPa	≥ 1 L/min	不锈钢

风光发电储氢系统一体化研发应用



- **氢-电示范装置：**储氢合金罐经压力调节器供氢燃料电池堆发电，宽温镍氢电池组储电；
- 储氢效率高、安全性高、使用寿命长，无能耗和泄漏风险，成本低等优点。

使命定位

使命：**“强氢技术、育氢产业”**

定位：**氢能技术开发和创新链延伸**

以“强氢技术、育氢产业”为使命，
聚焦国际氢能产业发展趋势和国家“碳达峰·碳中和”目标，定位于氢能技术开发和创新链延伸。

四个功能

技术创新：

氢能产业重大创新技术策源地

成果转化：

氢能科技成果转化与高新技术企业孵化平台

产业服务：

氢能产业公共服务平台

人才基地：

氢能人才培养引进平台



储氢&电池材料组

HYDROGEN STORAGE & BATTERY MATERIALS GROUP

课题组：隶属于中科院长春应用化学研究所，稀土资源利用国家重点实验室。

研究方向：储氢材料、二次电池材料等方面的基础和应用研究。发表研究论文400余篇，发明专利70余项，参加撰写专著5部，获得多项军、地方奖励。

电话：0431-85262836

邮箱：dmyin@ciac.ac.cn

网址：<http://reru.ciac.cas.cn/yjdw/yjdy/wlm/dygz/>



程勇 研究员
(课题组长)



王立民研究员
(课题组简介)



谢谢!

