

引用格式: 张洪禹, 徐宏宁, 李丹, 等. 光伏 LCOE 的技术经济性突破对绿氢成本的影响 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(3): 1-10. ZHANG Hongyu, XU Hongning, LI Dan, et al. Impact of techno-economic breakthroughs in photovoltaic LCOE on green hydrogen costs [J]. Southern energy construction, 2025, 12(3): 1-10. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-287.

光伏 LCOE 的技术经济性突破对绿氢成本的影响

张洪禹¹, 徐宏宁¹, 李丹², 李军良³, 王杰⁴, 王德明⁴, 赵海超⁴, 甄崇礼⁴, 赵宏^{1,✉}

- (1. 北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029;
2. 中新建电力集团有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;
3. 中国石化北京燕山分公司, 北京 100029;
4. 青岛创启信德新能源科技有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要: [目的] 国际氢能委员会预测, 至 2050 年氢能将占全球终端能源总需求的 18%。在绿氢制备技术路径中, 光伏发电的电力成本是影响电解水制氢经济性的关键因素。[方法] 文章基于中国典型地区的光照资源数据, 构建平准化度电成本 (LCOE) 测算模型, 分析当前及极限组件成本下的光伏发电成本, 并量化光电转换效率提升对 LCOE 的边际影响。[结果] 研究结果表明: 在年有效发电时数 1 200 小时条件下, 晶硅电池系统的 LCOE 可降至 0.133 元/kWh; 而具有更高理论转换效率的钙钛矿电池、晶硅-钙钛矿叠层电池及双叠层电池系统, 分别在年发电时数 1 008 h、1 092 h 和 864 h 时即可实现 0.1 元/kWh 的 LCOE 阈值。当光伏 LCOE 突破 0.1 元/kWh 时, 电解水制氢成本可降至 6.16 元/kg。[结论] 随着组件成本下降和转换效率提升, 我国 90% 以上地区的光伏 LCOE 将具备突破 0.1 元/kWh 的潜力。在此成本区间内, 绿氢生产成本将较传统灰氢显现竞争优势, 有望成为主流氢源。文章为光伏制氢技术的产业化推进提供了量化依据, 对优化能源结构转型路径、实现环境效益与经济效益的协同发展具有重要参考价值。

关键词: LCOE; 光伏; 电解水制氢; 绿氢经济性; 敏感度分析

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-287

文章编号: 2095-8676(2025)03-0001-10

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-287

中图分类号: TK51; TK91



论文二维码

Impact of Techno-Economic Breakthroughs in Photovoltaic LCOE on Green Hydrogen Costs

ZHANG Hongyu¹, XU Hongning¹, LI Dan², LI Junliang³, WANG Jie⁴, WANG Deming⁴,
ZHAO Haichao⁴, ZHEN Chongli⁴, ZHAO Hong^{1,✉}

- (1. School of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
2. China Xinjian Group Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China;
3. SINOPEC Beijing Yanshan Company, Beijing 100029, China;
4. Qingdao Chuangqi Xinde New Energy Technology Co., Ltd., Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: [Introduction] International Hydrogen Council predicts that hydrogen energy will account for 18% of the total global end-use energy demand by 2050. In the technical path of green hydrogen preparation, the electricity cost of photovoltaic (PV) power generation is a key factor affecting the cost-effectiveness of hydrogen production by water electrolysis. [Method] Based on the solar resource data of typical regions in China, a levelized cost of energy (LCOE) calculation model was constructed to analyze the PV power generation costs at current and limit module costs, and quantify the marginal impact of photoelectric conversion efficiency improvement on LCOE.

收稿日期: 2024-08-29 修回日期: 2024-10-09

基金项目: 八师石河子市科技计划项目“构网型电网储能与电网消纳系统优化技术与示范系统”; 联合技术开发项目“新型碱性水电解制氢系统研发”

[Result] The results indicate that: with an annual effective power generation hours of 1 200, LCOE for crystalline silicon photovoltaic cell system can be reduced to CNY 0.133 per kWh; However, the LCOE threshold of CNY 0.1 per kWh can be achieved for perovskite solar cell, crystalline silicon-perovskite tandem cell and dual tandem cell system with higher theoretical conversion efficiency when the annual power generation hours are 1 008, 1 092 and 864 respectively. When the LCOE for PV power generation is less than CNY 0.1 per kWh, the cost of hydrogen production by water electrolysis can be reduced to CNY 6.16 per kg. [Conclusion] With the reduction of module cost and the improvement of conversion efficiency, the LCOE for PV power generation in more than 90% of areas in China will have the potential to break through RMB 0.1/kWh. Within this cost range, green hydrogen will show a competitive advantage in production cost compared with traditional grey hydrogen and is expected to become the mainstream hydrogen source. This paper provides a quantitative basis for the industrialization of photovoltaic hydrogen production technology, and has an important reference value for optimizing the transformation path of energy structure and realizing the coordinated development of environmental benefits and economic benefits.

Key words: LCOE; Photovoltaic; Water electrolysis hydrogen production; Green hydrogen cost competitiveness; Sensitivity analysis

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着全球对气候变化与环境保护的关注持续升温,我国将碳达峰与碳中和目标纳入国家战略,明确要求推动清洁能源发展以减少碳排放^[1]。光伏发电作为清洁能源体系的关键构成,凭借其环境友好性与可再生特征发挥重要作用。发展光伏技术不仅有助于降低对传统化石能源的依赖度,更能显著减少二氧化碳等温室气体排放,从而加速我国能源结构向清洁低碳转型^[2]。通过光伏发电耦合绿氢生产,可有效缓解光伏出力波动性引致的电网消纳挑战。这种“光-氢”协同模式已被确立为我国新能源开发利用的重要路径^[3]。作为未来能源系统的战略性能源载体,绿氢兼具双重功能:既可作为清洁能源存储与输运介质,也能为化工领域提供绿色基础原料^[4-5]。国际能源署(IEA)《全球氢能评论 2022》指出,2030年全球氢能需求预计达 1.15 亿吨,其中低排放氢需贡献 3400 万吨产能^[6]。

目前主流的商用光伏技术包括单晶硅、多晶硅及薄膜太阳能电池等^[7]。其中,单晶硅电池因其晶体结构均一性,具备较高的光电转换效率和长期稳定性,现已成为市场主流;伴随其生产成本持续下降,多晶硅电池的市场占有率逐年递减^[8]。薄膜太阳能电池则通过超薄材料沉积工艺,实现轻量化与柔性化应用。近年来兴起的钙钛矿太阳能电池,基于有机-无机杂化钙钛矿光吸收层,在效率提升与溶液加工成本控制层面展现出显著潜力,被视作未来重要

发展方向之一^[9]。各类技术通过差异化材料体系与工艺优化,共同驱动光伏产业技术迭代。

随着光伏技术的不断发展,光伏太阳能转化效率不断提高,同时光伏组件的价格也不断降低。目前,光伏的平准化度电成本(Levelized Cost of Electric, LCOE)测算大多仅考虑土地成本、发电时长、建设和运维费用等因素,缺乏光伏光电转换效率与 LCOE 关系的模型构建研究^[10-13]。在现有的研究基础上,本文研究了光电转换效率的提升以及光伏组件成本的降低对 LCOE 的影响,并对未来的光伏 LCOE 进行了预测。文章还分析了光伏 LCOE 对氢能的成本与发展的影响。

1 建立光伏 LCOE 测算模型

测算光伏 LCOE 需统筹考量多个核心要素。首先涉及初始投资成本,包括光伏组件、逆变器设备购置以及建安、工程等一次性支出;其次涵盖运营维护成本,主要包含日常运行、设备养护、监测系统与通信保障等持续性开支;同时需要纳入发电效率、系统生命周期、设备残值率等关键技术参数。值得强调的是,提升光伏组件的光电转换效率对降低 LCOE 具有显著作用。文章通过整合上述多维因素,构建了系统的光伏 LCOE 测算模型。

根据国家能源局《光伏发电系统效能规范》^[14]。基础 LCOE 测算模型已考虑运行年限、折现率、初始投资、残值回收、增值税抵扣及运维成本等动态参数,通过导入实时运行数据可直接获取当期 LCOE 测算值。

$$\text{LCOE} = \left[I_0 - \sum_{n=1}^N \frac{I_t}{(1+i)^n} - \frac{V_R}{(1+i)^N} + \sum_{n=1}^N \frac{M_n}{(1+i)^n} \right] \bigg/ \sum_{n=1}^N \frac{Y_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

式中：

i ——折现率(%)；

n ——系统运行年限($n = 1, 2, \cdots, N$)；

N ——光伏发电系统评价周期(a)；

I_0 ——光伏系统初始全投资成本(元)；

I_t ——项目增值税抵扣(元)；

V_R ——光伏系统残值(元)；

M_n ——第 n 年运维成本(元)；

Y_n ——年上网电量(kWh)。

根据中国光伏行业协会数据显示,当前组件及逆变器等核心器件受技术突破与产能扩张驱动仍存显著降本潜力,而其他成本短期内难以压缩。此外,结合离网制氢场景运营时,光伏系统可豁免电网接入成本——该参数在原投资构成中占重要比重。建模关键参数设定为:折现率 5%、单晶硅组件寿命周期 25 年、钙钛矿电池寿命 7 年、系统残值率 5%、运维成本 0.04 元/(W·a)。发电量以首年衰减率 2.5%、后续年衰减 0.8% 计算,增值税抵扣方案具体区分为设备(13%)、建安(9%)、咨询(6%)三类税率类别。

参照片林匹克竞日数据,2022 年全国光伏平均利用小时数为 1 202 h,而绿氢项目集中的西部区域普遍可达 1 500 h 及以上。文章特选取 1 200 h 与 1 500 h 两组典型值开展 LCOE 情景模拟。

如表 1 所示:计入电网接入成本时,LCOE 在 1 200 h/1 500 h 工况下分别为 0.133 元与 0.107 元;采用离网制氢模式可降低 0.23 元/W 的电网成本,这使得 1200 h 工况的 LCOE 有效降至 0.15 元以下。重点对比技术路线发现,相较于晶硅电池,钙钛矿太阳能在理论效率、柔性化潜力与制造成本方面优势突出,但其在稳定性和服役寿命方面仍存在明显短板。图 1 具体揭示:晶硅电池的生产流程远比薄膜电池复杂,并且薄膜电池的设备投资仅为晶硅电池的一半左右。此外,Science 及 Nature 等顶刊近期报道实验室级钙钛矿太阳能电池寿命已突破 30 a^[16-17],但商业化产品寿命仍局限在 10 a 以下,产业化进程亟待稳定性突破。

以协鑫光电 100 MW 级钙钛矿量产线为例,当前组件成本稳定于 1 元/W 水平^[18]。产业预测显示,当生产规模扩展至 5~10 GW 量级时,钙钛矿组件成本可压缩至 0.5~0.6 元/W 区间,远低于晶硅电池的极限成本(1 元/W)。表 2 系统呈现了基于现有钙

表 1 晶硅电池 LCOE 测算

Tab. 1 LCOE calculation of crystalline silicon cell

初始全投资/(元·W ⁻¹)	增值税抵扣/(元·W ⁻¹)	系统残值/(元·W ⁻¹)	运维成本/(元·W ⁻¹)	年发电小时数/h	25 a 发电量/(kWh·W ⁻¹)	LCOE/(元·kWh ⁻¹)
3.40	0.36	0.050	0.55	1 200	26.61	0.133
3.40	0.36	0.050	0.55	1 500	33.26	0.107
3.17	0.33	0.047	0.55	1 200	26.61	0.126
3.17	0.33	0.047	0.55	1 500	33.26	0.101

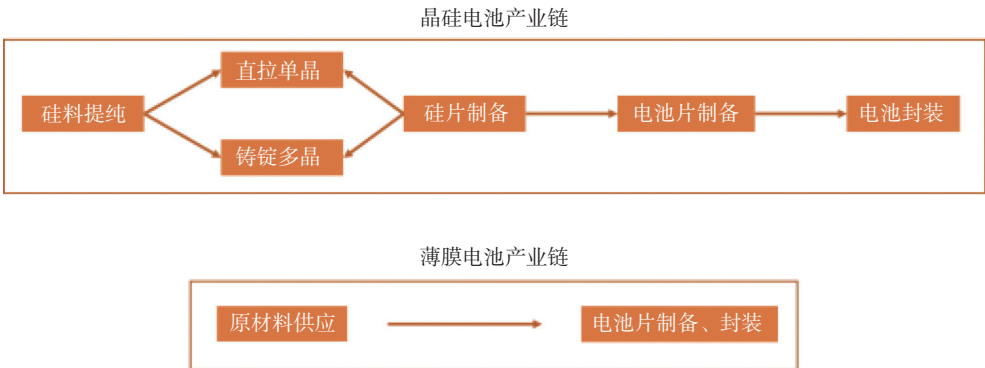


图 1 晶硅和薄膜电池的产业链对比

Fig. 1 Industrial chain comparison of crystalline silicon and thin film battery

钛矿成本与寿命参数的 LCOE 测算结果:在该技术路线 7 年生命周期约束下,无论是否包含电网接入成本,其 LCOE 均显著高于晶硅电池,反映出当前阶

段产业化可行性仍具局限。只有在解决钙钛矿电池稳定性差的问题后,其理论成本优势才能转化为实际经济价值。

表 2 钙钛矿电池 LCOE 测算

Tab. 2 LCOE calculation of perovskite solar cell

初始全投资/(元·W ⁻¹)	增值税抵扣/(元·W ⁻¹)	系统残值/(元·W ⁻¹)	运维成本/(元·W ⁻¹)	年发电小时数/h	7 a发电量/(kWh·W ⁻¹)	LCOE/(元·kWh ⁻¹)
3.08	0.32	0.045	0.23	1 500	8.0	0.410
3.08	0.32	0.045	0.23	1 800	10.0	0.328
2.85	0.29	0.044	0.23	1 500	8.0	0.386
2.85	0.29	0.044	0.23	1 800	10.0	0.308

2 光伏组件极限成本的光伏 LCOE 预测

相较于晶硅电池的渐进式降本路径,钙钛矿组件展现更显著的边际降本潜能。文章据此采用两种技术路线的理论极限成本对 LCOE 进行测算。钙钛矿薄膜在达到使用寿命后可以进行返厂重涂,以此节省光伏组件与重新安装的成本。随着技术的进步,钙钛矿电池的寿命也将增长,因此文章设定 10 a、15 a、25 a 三级梯度寿命参数进行前瞻性测算。钙钛矿太阳能电池的 LCOE 成本计算式可见式子(2)。

$$\text{LCOE} = \left[I_0 - \sum_{n=1}^N \frac{I_t}{(1+i)^n} - \frac{V_R}{(1+i)^N} + Y \times R_c + \frac{\sum_{n=1}^N \frac{M_n}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{Y_n}{(1+i)^n}} \right] \quad (2)$$

式中:

Y ——返厂重涂次数(次);

R_c ——返厂重涂及重新安装成本(元/W)。

钙钛矿材料的厚度约为 1 μm,比晶硅电池更加轻薄,物流成本也更低。由于光伏组件价格的持续

下降,而物流成本基本维持不变,2021 年时物流成本在光伏组件销售成本中占比约为 5%。随着我国光伏专列运输体系的规模化建设,物流成本有了显著的降低。据报道,盐城-格尔木光伏专列使物流成本降低 30%,菜鸟网络开通的光伏专列降低了 23% 的物流成本,因此文章按照单向单次运输成本占光伏组件成本的 3.7% 进行测算。光伏的拆卸与安装施工成本约为 0.2 元/W,预计钙钛矿薄膜占组件成本的 3% 进行测算。当钙钛矿电池寿命为 10 a 时,需要进行 4 次单项运输、2 次拆卸和 2 次钙钛矿重涂。当钙钛矿电池寿命为 15 a 时,则需要进行 2 次单项运输、1 次拆卸和 1 次钙钛矿重涂。光伏组件投资成本约占光伏系统初始全投资成本的 38.8%,即 1.32 元/W^[14]。根据晶硅和钙钛矿电池组件的理论极限成本,年发电小时数为 1 200 h 进行 LCOE 测算,得到了表 3 中的数据。在行业竞争白热化态势下,部分企业组件报价正加速逼近理论成本线,印证模型设计的现实参鉴价值。

晶硅电池组件在极限成本下的 LCOE 能够达到

表 3 光伏组件理论极限成本的 LCOE 测算

Tab. 3 LCOE calculation of the theoretical limit cost of photovoltaic modules

电池种类	初始全投资/(元·W ⁻¹)	电池片寿命/a	系统残值/(元·W ⁻¹)	钙钛矿涂层重涂及额外物流成本/(元·W ⁻¹)	LCOE/(元·kWh ⁻¹)
晶硅(并网)	3.08	25	0.045	0	0.123
晶硅(离网)	2.85	25	0.042	0	0.116
钙钛矿(并网)	2.58	10	0.038	0.937	0.142
钙钛矿(并网)	2.58	15	0.038	0.468	0.124
钙钛矿(并网)	2.58	25	0.038	0	0.107
钙钛矿(离网)	2.35	10	0.035	0.889	0.133
钙钛矿(离网)	2.35	15	0.035	0.444	0.116
钙钛矿(离网)	2.35	25	0.035	0	0.100

0.123 元/kWh, 钙钛矿电池组件在解决稳定性差的问题后, 最低的 LCOE 能够达到 0.107 元/kWh。尤其是在太阳能辐照条件优越的西部地区, 发电成本还存在下降空间。由于钙钛矿电池组件的理论成本仅为晶硅电池的 50%, 在持续的技术迭代与产业规模化推动下, 有望逐步实现对传统硅基太阳能技术的替代, 成为未来太阳能市场的主导技术之一。伴随光伏系统发电效率的持续提升, 电解水制氢成本将得到有效控制, 从而大幅增强氢能产业链的市场竞争力。

3 光伏光电转换效率对 LCOE 的影响

光伏光电转换效率的提升与 LCOE 之间尚未形成标准换算公式, 是由于 LCOE 的构成涉及多维度参数, 包括光伏组件的成本、建安成本、运营维护成本、系统发电效率、发电量及其在系统预期生命周期内的折旧残值等重要变量。文章重点分析能效提升对于 LCOE 的实际影响。

当前市场主流的光伏电池板为 p 型 PERC 电池片, 占据 73% 的市场份额, n 型 TOPCon 电池片则以 23% 占比处于次席^[15]。表 4 显示, p 型光伏的光电转换效率已经逼近理论极限, 而 n 型技术理论上具备更高的理论效率且仍有优化空间。随着 n 型电池片产能规模的逐渐扩张, p 型电池片的市场占比将被进一步的压缩。钙钛矿电池的理论光电转换效率为 33%, 远高于晶硅电池。此外, 半透明态钙钛矿层可允许光子穿透, 为叠层结构设计创造了物理条件。基于此特性开发的隆基绿能的晶硅-钙钛矿叠层电池的光电转换效率达到了 33.9%, 超过了晶硅和钙钛矿电池的理论光电转换效率, 印证了多维能带协同增益的技术发展路径。

光电转换效率是衡量太阳能电池将入射光辐射转化为电能的关键性能指标。转换效率的提升意味

着在日照条件不变时, 单位面积组件可输出更高密度的电能。效率更高意味着: 实现既定发电目标的系统, 其所需的电池阵列面积将相应缩减, 连带导致组件材料耗量、系统安装投入、场站用地成本及施工人力开支的同步优化。目前的光伏边框、玻璃、背板和胶膜等辅材的价格已经接近成本线, 且其他成本由于材料、人工和管理费用的下降空间较低, 短时间内成本不变。因此降本效果基本体现在后续材料用量以及建设投资金额的降低。

假设各类光伏技术在未来都能达到理论光电转换效率, 并且钙钛矿电池的寿命能够达到 25 a 以上, 基于该假设对未来的光伏 LCOE 极限成本进行预测。光电转换效率与 LCOE 之间的关系与系统投资成本、与光伏系统的总功率相关的成本贡献(即不随光电转换效率提高而降低的相关成本)和提升光电转换效率所需增加的投入相关, 且随着系统投资成本的降低, LCOE 降低幅度会逐渐减少, 从而导致系统投资成本的增加^[21]。但根据我国的光伏发展经验, 随着光电转换效率的提升, 光伏电池板的成本反而下降。按照理论光电转换效率计算时, 依然将光伏组件的成本设定为极限成本。其中不随光电转换效率提高而降低的相关成本包括电池片、逆变器、电缆、电线、箱变、主变、开关柜、升压站和部分建安成本等。此条件下光伏的 LCOE 成本计算见式子(3)。

$$LCOE = \left\{ I_e + \left[I_0 - I_e - \sum_{n=1}^N \frac{I_t}{(1+i)^n} - \frac{V_R}{(1+i)^N} + \sum_{n=1}^N \frac{M_n}{(1+i)^n} \right] \times E_p / E_l \right\} / \sum_{n=1}^N \frac{Y_n}{(1+i)^n} \quad (3)$$

式中:
 I_e ——不随光电转换效率提高而降低的相关成本(元);
 E_p ——市场量产平均光电转换效率(%);
 E_l ——理论光电转换效率(%)。

表 4 不同光伏技术的光电转换效率^[15, 19-20]
Tab. 4 Photoelectric conversion efficiency of different photovoltaic technologies^[15, 19-20]

电池种类	理论光电转换效率/%	当前最高光电转换效率/%	当前已量产组件的光电转换效率/%
p型单晶	24.5	23.56	23.40
n型单晶	28.7	27.30	26.81
钙钛矿	33.0	26.41	18.20
双叠层钙钛矿	44.3	32.50	26.17
晶硅-钙钛矿叠层	43.0	34.60	30.10

综合几种光伏技术的市场占比和对应的量产光电转换效率,取 E_p 的值为 23.86%。以年发电小时数 1 200 h 计算得到表 5 中的数据,晶硅电池在极限组件成本的条件下,达到理论光电转换效率后,LCOE 低至 0.11 元/kWh。由于钙钛矿电池的技术还未成熟应用,在叠层电池领域,晶硅-钙钛矿电池将先一步进入市场,并且在达到理论光电转换效率后,

LCOE 能够低于 0.1 元/kWh。全钙钛矿叠层电池依赖钙钛矿薄膜廉价的成本和较高的光电转换效率,在技术成熟并进入量产后,具有最低的 LCOE,年发电 1 200 h 的条件下能够达到 0.072 元/kWh。随着钙钛矿叠层技术进一步发展,三叠层甚至更多层数的叠层钙钛矿电池技术也将逐步推进,进一步降低光伏的发电成本。

表 5 光电转换效率提升影响下的光伏组件理论极限成本的 LCOE 测算^[15]
Tab. 5 LCOE calculation of the theoretical limit cost of photovoltaic modules under the influence of photoelectric conversion efficiency improvement^[15]

电池种类	初始全投资/(元·W ⁻¹)	电池片价格/(元·W ⁻¹)	不随光电转换效率提高而降低的相关成本/(元·W ⁻¹)	光伏生命周期平均度电成本/(元·kWh ⁻¹)
n型晶硅(并网)	3.08	0.52	1.20	0.110
n型晶硅(离网)	2.85	0.52	1.20	0.103
钙钛矿(并网)	2.58	0.03	0.71	0.084
钙钛矿(离网)	2.35	0.03	0.71	0.079
双叠层钙钛矿(并网)	2.63	0.06	0.74	0.072
双叠层钙钛矿(离网)	2.40	0.06	0.74	0.067
晶硅-钙钛矿叠层(并网)	3.20	0.55	1.23	0.091
晶硅-钙钛矿叠层(离网)	2.97	0.55	1.23	0.087

4 光伏 LCOE 下降对氢能发展的影响

光伏发电成本的降低将为氢能源产业带来多重积极影响。首先,通过降低电解水制氢的成本,使得绿氢的生产更具成本竞争力,从而提高了氢能源的整体成本效益。其次,低成本的光伏电力将促进氢能在交通运输、可再生能源存储以及工业用气等领域的广泛应用,推动氢能技术的规模化。光伏发电成本的降低也将推动氢能市场的规模化和产业链的成熟,促进相关技术的创新和效率提升,并有望在国际能源市场中发挥重要作用,影响全球能源格局。

我国氢能供给体系呈现多元化特征,各技术路径占比差异显著。根据最新行业统计数据,煤基制氢作为传统工艺仍占据主导地位,贡献了 62% 的氢能产量;天然气重整制氢次之,占比 19%;而电解水制氢技术受制于技术成熟度与成本因素,当前市场渗透率仅为 1%。从电解水技术发展格局来看,碱性电解槽(ALK)构成市场主流产品,质子交换膜电解槽(PEM)作为补充技术同步发展,而固体氧化物电解槽(SOEC)与阴离子交换膜电解槽(AEM)仍处于

实验室研发与小试阶段。

电解水制氢系统的全生命周期成本主要涵盖电力消耗、水资源使用、设备折旧、人力成本及运维费用等核心要素,其中电力成本占据了最大的比重。因此光伏 LCOE 的降低对电解水制氢的成本至关重要。以某碱性电解槽年产 1 万 t 绿氢的项目为例,得到了表 6 中的数据。表 6 和表 7 数据显示,当电力采购价格降至 0.1 元/kWh 临界值时,电解水制氢综合成本可降至 8.03 元/kg,这一数值已低于煤制氢工艺的基准成本线。由于可再生能源的波动性,当前年发电小时数从 1 800 ~ 1 000 h 对应的光伏电价为 0.089 ~ 0.16 元/kWh。氢燃料电池汽车的能效优势显著,每公斤氢气可支持车辆行驶超过 100 公里,其单位燃料能量密度约为传统汽油的 7 倍。在现行光伏发电成本(<0.2 元/kWh)条件下,绿氢的燃料成本已显现出相对于汽油的竞争优势。

2024 年以来,我国碳交易市场价格持续攀升,目前已突破 90 元/吨大关,5 500 大卡动力煤年度均价稳定在 700 元/吨以上高位运行。受此双重因素驱动,煤制氢工艺的成本压力或将进一步加剧。随着催化

表 6 不同电价对应的电解水制氢成本
Tab. 6 Hydrogen production costs from electrolysis at different electricity prices

成本名称	数额		
年产氢量/t	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁴
单台设备制氢量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	1 000	1 000	1 000
设备数量/台	34	34	34
固定资产投资单台/万元	900	900	900
总固定资产投资/亿元	3.06	3.06	3.06
折旧/a	15	15	15
固定资产投资摊销/(万元·a ⁻¹)	2 040	2 040	2 040
运维成本/(万元·a ⁻¹)	442	442	442
员工工资/(万元·a ⁻¹)	200	200	200
年运行时长/(h·a ⁻¹)	3 300	3 300	3 300
固定成本/(元·kg ⁻¹)	2.67	2.67	2.67
电价/(元·kWh ⁻¹)	0.5	0.3	0.1
综合能耗/(kWh·kg ⁻¹)	52.8	52.8	52.8
耗电成本/(元·kg ⁻¹)	26.41	16.02	5.28
耗水成本/(元·kg ⁻¹)	0.08	0.08	0.08
制氢成本/(元·kg ⁻¹)	29.16	18.77	8.03

剂效率的提高和新型电解槽技术的开发,能够显著提高电解效率并不断降低能耗。生产规模的扩大和制造工艺的优化,电解水制氢设备的成本预计将大幅降低。23 年我国新增的可再生能源制氢项目达到

了 74 个,总计投资规模高达 4703.6 亿元。大型产业项目的建设将推动设备生产的标准化,使得整体投资回收期缩短,从而吸引更多企业进入这一领域,形成良性循环。而电解水制氢的成本随着技术与设备的不断革新将进一步下降。因此未来即使在光伏年利用小时数较小(1000 h 左右)的地区,电解水制氢与传统灰氢的经济竞争力也会持续增强。

由图 2、图 3 和表 8 可知,当前在内蒙古、甘肃等优质资源区,光伏平准化度电成本(LCOE)已具备突破 0.1 元/kWh 的技术可行性。当光伏组件的成本下降至极限成本后,年发电小时数分别达到 1 320 h 和 1 236 h,并网和离网的晶硅电池光伏发电成本就能够降至 0.1 元/kWh,届时中国的光伏重点地区均可达标。由于晶硅电池较高的成本和较低的理论光电转换效率,晶硅-钙钛矿叠层太阳能电池仅需 1 092 h 以上的年发电小时数 LCOE 即可降至 0.1 元/kWh。当钙钛矿电池及钙钛矿叠层电池技术完成产业化验证后,在年发电小时数分别达到 1 008 h 和 864 h 即可达到 0.1 元/kWh 的 LCOE,中国的绝大部分地区都将满足对应的年发电小时数。在此背景下,绿氢生产成本优势将加速推动合成氨、炼油化工等传统灰氢应用领域的低碳转型进程,届时绿色氢气的发展速度将进一步提升。

表 7 不同制氢方法的成本^[22]
Tab. 7 Costs of different hydrogen production methods^[22]

制氢方法	原料及价格	制氢成本/(元·kg ⁻¹)	初产物纯度/%	提纯后纯度/%	能量效率/%
煤制氢(Q5500煤)	煤450~900元/t	9.73~13.65	48~54	99.90	83
天然气制氢	天然气1.5~3.5元/Nm ³	9.0~16.6	75~80	99.99	63
工业副产氢	烧碱、焦炭等副产物提纯成本300~600元/t	9.3~22.4	44~99.8	99.99	—
煤制氢蓝氢(Q5500煤)	煤450~900元/t	13.03~18.05	44~99.8	99.99	90

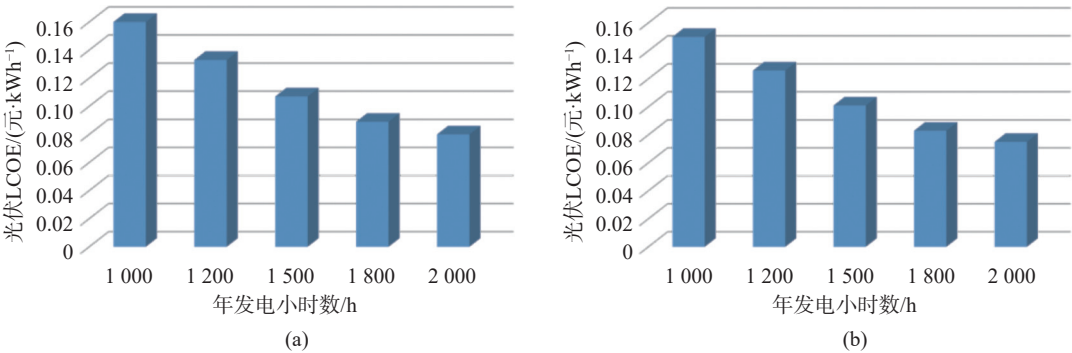


图 2 当前晶硅电池不同年发电小时数对应的光伏 LCOE
Fig. 2 LCOE for photovoltaics corresponding to different annual generation hours for current crystalline silicon cells

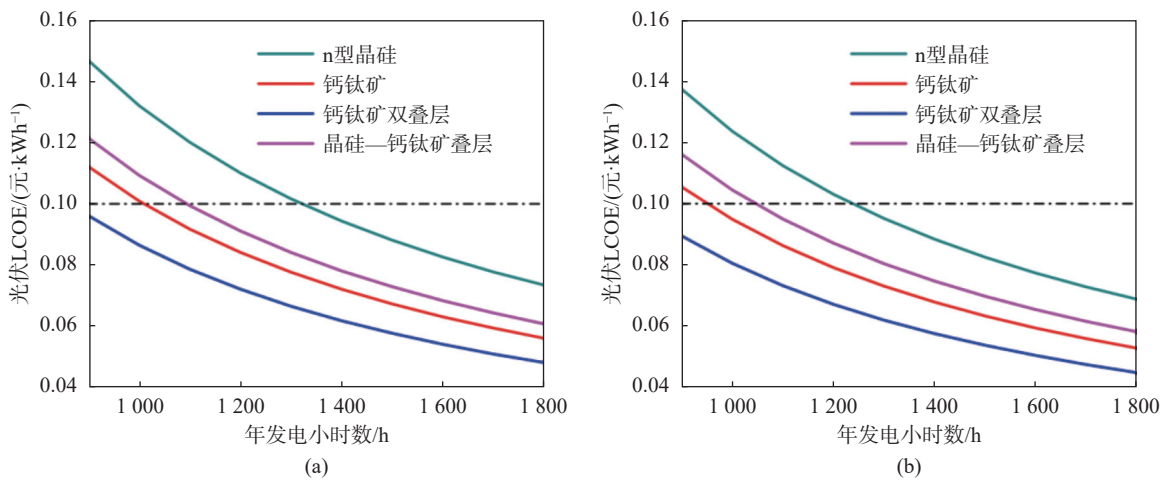


图 3 理论光电转换效率下不同年发电小时数对应的光伏 LCOE

Fig. 3 LCOE for photovoltaics corresponding to different annual generation hours under theoretical photoelectric conversion efficiency

表 8 2022 年全国光伏重点地区年利用小时数情况^[23]

Tab. 8 Annual utilization hours of national PV key areas in 2022^[23]

h

省(区)	资源区	地区	2021年 实际利用小时数	2022年 实际利用小时数	实际利用小时 数增加值
内蒙古	I类	除赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市以外其他地区	1 568	1 616	48
	II类	赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市	1 562	1 608	46
新疆	I类	哈密、塔城、阿勒泰	1 597	1 526	-71
	II类	克拉玛依	1 455	1 364	-91
甘肃	I类	除I类外其他地区	1 455	1 364	-91
	II类	嘉峪关、武威、张掖、酒泉、敦煌、金昌	1 562	1 514	-48
青海	I类	除I类外其他地区	1 389	1 393	4
	II类	海西	1 474	1 430	-44
宁夏	I类	除I类外其他地区	1 248	1 538	290
	II类	宁夏	1 471	1 539	68
陕西	II类	榆林、延安	1 455	1 421	-34
黑龙江	II类	黑龙江	1 503	1 644	141
吉林	II类	吉林	1 537	1 588	51
辽宁	II类	辽宁	1 327	1 459	132
河北	II类	承德、张家口、唐山	1 343	1 501	158
		秦皇岛			
山西	II类	忻州、朔州、大同	1 424	1 520	96

5 结论与展望

文章通过研究光电转换效率对 LCOE 的影响,对光伏电池板达到理论光电转换效率的情况进行了 LCOE 测算,结果表明光伏的 LCOE 成本在新疆、西藏等少部分地区已经能够低于 0.1 元/kWh。随着光伏技术的发展,全国绝大部分地区的光伏 LCOE 都

能够达到 0.1 元/kWh。这说明通过光伏发电制绿氢在经济性上能够超越灰氢,从而全面替代灰氢。随着电解槽的生产规模扩大和年利用小时数的提升,电解水制绿氢的成本还将进一步的下降。绿氢的成本下降还会减少合成绿氨与绿甲醇过程中所需的能源成本,这将提高绿氨和绿甲醇的经济性和市场竞争力。这种趋势可能会促使更多的工业和能源企业

采用绿氢作为原料,从而推动可持续能源材料的应用和推广。

参考文献:

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径 [J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15. DOI: 10.12120/bjutsxb202103001.
HU A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches [J]. *Journal of Beijing University of Technology (social sciences edition)*, 2021, 21(3): 1-15. DOI: 10.12120/bjutsxb202103001.
- [2] 张雅娟, 王铮, 李双成. 能源电力系统转型对中国环境影响评估 [J]. 资源科学, 2023, 45(9): 1830-1843. DOI: 10.18402/resci.2023.09.10.
ZHANG Y J, WANG Z, LI S C. Environmental impact assessment of energy and power system transformation in China [J]. *Resources science*, 2023, 45(9): 1830-1843. DOI: 10.18402/resci.2023.09.10.
- [3] 柯毅明, 汤宏誉, 柳伟. 基于氢电耦合的数据中心能源系统规划研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(3): 23-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.003.
KE Y M, TANG H Y, LIU W. Research on energy system planning of data center based on hydrogen-electric coupling [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(3): 23-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.003.
- [4] 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. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.04.001.
ZOU C N, LI J M, ZHANG Q, et al. Industrial status, technological progress, challenges and prospects of hydrogen energy [J]. *Natural gas industry*, 2022, 42(4): 1-20. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.04.001.
- [5] 王宏铎. 绿色氢能技术发展现状及应用展望 [J]. 山东化工, 2024, 53(6): 96-98. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2024.06.019.
WANG H D. The current status and prospects of green hydrogen energy technology development [J]. *Shandong chemical industry*, 2024, 53(6): 96-98. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2024.06.019.
- [6] International Energy Agency. Global hydrogen review 2022 [EB/OL]. (2022-09-22) [2024-08-29]. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>.
- [7] 程方. 钙钛矿高转换效率光伏材料合成技术进展综述 [J]. 山东电力技术, 2023, 50(10): 18-27. DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2023.10.003.
CHENG F. Progress in synthesis and application of perovskite photovoltaic materials [J]. *Shandong electric power*, 2023, 50(10): 18-27. DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2023.10.003.
- [8] 吕鑫, 刘天予, 董馨阳, 等. 2019 年光伏及风电产业前景预测与展望 [J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(2): 25-29. DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.7283.
LÜ X, LIU T Y, DONG X Y, et al. Outlook and prospect of the photovoltaic and wind power industry in 2019 [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (social sciences edition)*, 2019, 21(2): 25-29. DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.7283.
- [9] 李宏, 廖鑫, 侯静, 等. 钙钛矿太阳能电池界面缺陷及其抑制方法 [J]. 人工晶体学报, 2024, 53(1): 38-50. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.20231128.002.
LI H, LIAO X, HOU J, et al. Interface defects of perovskite solar cells and their suppression methods [J]. *Journal of synthetic crystals*, 2024, 53(1): 38-50. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x.20231128.002.
- [10] 王恒田, 杨晓龙. 平价上网光伏发电项目经济性评价、影响因素及对策 [J]. 企业经济, 2021, 40(3): 96-104. DOI: 10.13529/j.cnki.enterprise.economy.2021.03.011.
WANG H T, YANG X L. Economic evaluation, influencing factors and countermeasures of grid-parity photovoltaic power generation projects [J]. *Enterprise economy*, 2021, 40(3): 96-104. DOI: 10.13529/j.cnki.enterprise.economy.2021.03.011.
- [11] 陈柯延. 基于 LCOE 模型的光伏发电项目优化研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(9): 128-130, 133. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2023.09.039.
CHEN K Y. Optimisation study of photovoltaic power generation project based on LCOE model [J]. *Modern industrial economy and informationization*, 2023, 13(9): 128-130, 133. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2023.09.039.
- [12] 徐伟, 刘振领, 王华智, 等. 基于 LCOE 模型的农村光伏系统社会经济效益评价——以北京郊区屋顶分布式光伏项目为例 [J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 208-217. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.09.19.
XU W, LIU Z L, WANG H Z, et al. Evaluation of socio-economic benefits of rural PV systems based on LCOE model: an example of rooftop distributed PV projects in Beijing suburbs [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(9): 208-217. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.09.19.
- [13] 刘江, 胡萍. 光伏发电项目 LCOE 模型的应用分析 [J]. 水电与新能源, 2022, 36(8): 19-22. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2022.08.005.
LIU J, HU P. Application of the LCOE model in photovoltaic power generation projects [J]. *Hydropower and new energy*, 2022, 36(8): 19-22. DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2022.08.005.
- [14] 国家能源局. 光伏发电系统效能规范: NB/T 10394—2020 [S]. 北京: 中国水利水电出版, 2020.
National Energy Administration. Specification for photovoltaic power generation system performance: NB/T 10394—2020 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
- [15] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图 (2023—2024 年) [EB/OL]. (2024-02-28) [2024-08-29]. http://www.chinapv.org.cn/Industry/resource_1380.html.
China Photovoltaic Industry Association. China photovoltaic industry development roadmap(2023-2024) [EB/OL]. (2024-02-28) [2024-08-29]. http://www.chinapv.org.cn/Industry/resource_1380.html.
- [16] ZHAO X M, LIU T R, BURLINGAME Q C, et al. Accelerated aging of all-inorganic, interface-stabilized perovskite solar cells [J]. *Science*, 2022, 377(6603): 307-310. DOI: 10.1126/science.abn5679.
- [17] ZHU H W, TEALE S, LINTANGPRADIPTO M N, et al. Long-term operating stability in perovskite photovoltaics [J]. *Nature reviews materials*, 2023, 8(9): 569-586. DOI: 10.1038/s41578-

023-00582-w.

- [18] 王玉晴, 全泽源. 协鑫光电董事长范斌: 钙钛矿替代晶硅是水到渠成的事 [N]. 上海证券报, 2022-08-19(05). DOI: [10.28719/n.cnki.nshzj.2022.003726](https://doi.org/10.28719/n.cnki.nshzj.2022.003726).
WANG Y Q, QUAN Z Y. Fan Bin, chairman of Xiexin optoelectronics: the substitution of perovskite for crystalline silicon is a natural thing [N]. Shanghai securities news, 2022-08-19(05). DOI: [10.28719/n.cnki.nshzj.2022.003726](https://doi.org/10.28719/n.cnki.nshzj.2022.003726).
- [19] 姚美灵, 廖纪星, 逯好峰, 等. 影响钙钛矿/异质结叠层太阳能电池效率及稳定性的关键问题与解决方法 [J]. 物理学报, 2024, 73(8): 088801 DOI: [10.7498/aps.73.20231977](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231977).
YAO M L, LIAO J X, LU H F, et al. Key issues and solutions affecting efficiency and stability of perovskite/heterojunction tandem solar cells [J]. *Acta physica sinica*, 2024, 73(8): 088801. DOI: [10.7498/aps.73.20231977](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231977).
- [20] 殷高峰. 技术持续突破 钙钛矿叠层电池商业化进程加速 [N]. 证券日报, 2024-08-06(B02). DOI: [10.28096/n.cnki.ncjrb.2024.004102](https://doi.org/10.28096/n.cnki.ncjrb.2024.004102).
YIN G F. Continuous technological breakthroughs accelerate the commercialization process of perovskite tandem batteries [N]. Securities daily, 2024-08-06(B02). DOI: [10.28096/n.cnki.ncjrb.2024.004102](https://doi.org/10.28096/n.cnki.ncjrb.2024.004102).
- [21] PETERS I M, GALLEGOS C D R, SOFIA S E, et al. The value of efficiency in photovoltaics [J]. *Joule*, 2019, 3(11): 2732-2747. DOI: [10.1016/j.joule.2019.07.028](https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.028).
- [22] 刘坚, 钟财富. 我国氢能发展现状与前景展望 [J]. 中国能源, 2019, 41(2): 32-36. DOI: [10.3969/j.issn.1003-2355.2019.02.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2355.2019.02.007).
LIU J, ZHONG C F. Current status and prospects of hydrogen energy development in China [J]. *Energy of China*, 2019, 41(2): 32-36. DOI: [10.3969/j.issn.1003-2355.2019.02.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2355.2019.02.007).
- [23] 国家能源局. 2022 年度全国可再生能源电力发展监测评价报告 [EB/OL]. (2023-09-07) [2024-08-29]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c_1310741874.htm.
National Energy Agency. 2022 National renewable energy power development monitoring and evaluation report [EB/OL]. (2023-09-07) [2024-08-29]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-09/07/c_1310741874.htm.

作者简介:



张洪禹

张洪禹(第一作者)

1997-, 男, 博士, 北京化工大学化工学院教授, 主要研究方向为新能源催化材料(e-mail) a1476136226@163.com。



赵宏

赵宏(通信作者)

1977-, 男, 北京化工大学化工学院研究员, 博士生导师, 主要研究方向为新能源先进材料和关键器件制备技术(e-mail) 13693022763@163.com。

项目简介:

项目名称 构网型电网储能与电网消纳系统优化技术研究示范系统

承担单位 新疆天富集团有限责任公司

项目概述 结合新能源产业发展过程中“源网荷储”一体化电力系统面临系统稳定性优化、电力电量平稳调度和新能源快速消纳三个卡脖子技术难题, 围绕化学储能电池优化设计技术、构网型储能控制技术、电网消纳系统优化技术三个方面, 从基础研究、产品设计, 到规模化工业应用的全流程进行协同创新, 促进能源产业向高端化、特色化、区域化、智慧化发展。

主要创新点 (1) 基于高效电解液研制、电池内组件等配件材料优化匹配; 储能系统结构优化设计, 构筑电池能量管理优化模型。开发规模化化学储能系统; (2) 构建化学储能电站+变流器+电源侧控制策略的构网型储能系统, 并对控制系统的架构、控制调节、指令传输的设计、验证和优化, 实现新型电力系统长周期稳定运行; (3) 搭建清洁能源消纳系统智慧管控平台, 进行全时空在线检测分析及预决策; 并在此基础上优化构网型电力系统服务能力, 实现“网源荷储”多元协调智慧化调度。

项目名称 新型碱性水电解制氢系统研发

承担单位 北京燕山石化高科技技术有限责任公司 青岛创启信德新能源科技有限公司

项目概述 开发额定产氢量 $\geq 1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 的碱性水电解制氢系统。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, 具体内容包括: 一体化新型复合电解池技术开发, 新型碱性电解槽结构优化设计与集成技术; 功率波动工况下的电解池过程动力学特性研究。

主要创新点 (1) 矩阵式电解池系统仿真与可视化研究, 制氢系统的电-热-质均衡优化; (2) 高效电极结构设计及表面处理, 电解池组件“零间隙”设计与装配工艺开发; (3) 波动电源与电解槽高效低成本耦合技术。

(编辑 徐嘉铖)