

引文: 周莹, 饶家豪, 唐春, 等. 光伏电催化硫化氢分解制氢脱硫经济性分析[J]. 天然气工业, 2024, 44(11): 178-191.

ZHOU Ying, RAO Jiahao, TANG Chun, et al. An economic analysis on photovoltaic electrocatalytic hydrogen sulfide decomposition for hydrogen production and desulfurization[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(11): 178-191.

光伏电催化硫化氢分解制氢脱硫经济性分析

周莹^{1,2} 饶家豪¹ 唐春^{1,2,3} 段超¹ 马柱¹ 郭恒^{1,3} 李金金⁴

1. 西南石油大学新能源与材料学院 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室·西南石油大学

3. 天府永兴实验室 4. 中国石油西南油气田公司天然气研究院

摘要:近年来,以太阳能驱动电催化硫化氢(H_2S)制氢脱硫,不仅能够生产绿氢与硫磺,还能高效利用环境资源,推动能源结构转型,是绿色可持续利用 H_2S 资源的变革性新技术。光伏电催化 H_2S 制氢技术具有以可再生能源供能、常温常压、产物易分离等优点,展现出了极大的应用前景,研究其经济性对于促进技术创新与规模应用具有重要意义。为此,以柴达木盆地某光伏发电项目为例,根据光伏电解 H_2S 制氢脱硫系统各模块运行特性,运用线性规划模型,计算了制氢脱硫系统内部收益率(IRR)和平准化制氢成本($LCOH$)等经济指标,最后从经济性和敏感性两个方面,剖析了年辐射量、光伏规模、设备成本和制氢能耗等多个因素对关键指标的影响程度。研究结果表明:①储能成本的增加会降低系统经济效益,离网不储能模式下的 $LCOH$ 优于电解水制氢技术;②年辐射量大于 $1\,396\,\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 的油气田布局光伏电催化 H_2S 制氢项目将具有一定经济性;③技术进步率对 $LCOH$ 的降低效果优于光伏装机规模的增加,未来5年,加速的技术进步率可降低 $LCOH$ 至 $15.10\,\text{元}/\text{kg}$,接近于工业副产提纯制氢技术;④ $LCOH$ 对电解槽制氢能耗的敏感性程度最高,当电解槽制氢能耗降低20%后, $LCOH$ 低至 $22.37\,\text{元}/\text{kg}$,基本具备市场竞争条件。结论认为,随着设备制备水平的提升和制氢能耗的进一步降低,光伏电催化 H_2S 制氢脱硫技术将具有较大的经济优势与发展潜力,应加大对该技术的研究和公关力度,以推动油气田的绿色低碳转型。

关键词:氢能;光伏电催化;硫化氢;平准化制氢成本;技术进步率;影响因素;经济性评价;敏感性分析

中图分类号: TQ125.1², TK91

文献标识码: A

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.11.017

An economic analysis on photovoltaic electrocatalytic hydrogen sulfide decomposition for hydrogen production and desulfurization

ZHOU Ying^{1,2}, RAO Jiahao¹, TANG Chun^{1,2,3}, DUAN Chao¹, MA Zhu¹, GUO Heng^{1,3}, LI Jinjin⁴

(1. School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation/Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu, Sichuan 610213, China; 4. Natural Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610213, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.11, p.178-191, 11/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In recent years, as an innovative technology which makes green and sustainable use of hydrogen sulfide (H_2S) resources, the solar energy powered electrocatalytic H_2S for hydrogen production and desulfurization can not only produce green hydrogen and sulfur, but also utilize environmental resources efficiently to promote the transition of energy structure. The photovoltaic (PV) electrocatalytic H_2S for hydrogen production has the advantages of renewable energy supply, normal pressure and normal temperature, and easy product separation, and presents great application prospect. The study on its economy is of great significance to promote its technical innovation and extensive application. Taking a PV power generation project in the Qaidam Basin as an example, this paper employs a linear programming model to calculate the key economic indicators of hydrogen production and desulfurization system, including internal rate of return (IRR) and levelized cost of hydrogen ($LCOH$), according to the operation characteristics of each module in the PV electrocatalytic H_2S for hydrogen production and desulfurization system. In addition, the influence degree of annual solar radiation, PV capacity, equipment cost and hydrogen production energy consumption on the key indicators are analyzed from the aspects of economy and sensitivity. And the following research results are obtained. First, the increase of energy storage costs diminishes system profitability, and the off-grid, non-storage mode yields a lower $LCOH$ than the water electrolysis for hydrogen production. Second, the PV electrocatalytic H_2S for hydrogen production in oil and gas fields with an annual radiation greater than $1\,396\,\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ has certain economic viability. Third, compared with increasing PV capacity, technological progress rate has a greater impact on reducing $LCOH$. Accelerated technological progress rate can reduce $LCOH$ to $15.10\,\text{CNY}/\text{kg}$ in the next five years, approaching the cost of hydrogen production from industrial by-products. Fourth, $LCOH$ is most sensitive to the energy consumption of hydrogen production by electrolyzer. When the energy consumption of hydrogen production by electrolyzer drops by 20%, $LCOH$ will be as low as $22.37\,\text{CNY}/\text{kg}$, making the system competitive in the market. In conclusion, with the improvement of equipment manufacturing level and the further reduction of energy consumption for hydrogen production, PV electrocatalytic H_2S hydrogen production and desulfurization technology will have greater economic advantages and developmental potential. Therefore, the research on this technology shall be strengthened to promote the green and low-carbon transition of oil and gas fields.

Keywords: Hydrogen energy; Photovoltaic electrocatalysis; Hydrogen sulfide (H_2S); Levelized cost of hydrogen ($LCOH$); Technological progress rate; Influencing factor; Economic evaluation; Sensitivity analysis

基金项目: 国家自然科学基金项目“酸性气藏清洁开发利用”(编号: 52325401)、四川省自然科学基金项目“缺陷工程耦合氧化产物调控协同增强电催化硫化氢清洁高值利用”(编号: 2023NSFSC0112)、天府永兴实验室科技攻关重大项目“水风光多能互补智慧调控技术与碳足迹转换机制研究”(编号: 2023KJGG15)。

作者简介: 周莹, 1981年生, 教授, 博士研究生导师, 现任西南石油大学副校长; 主要从事油气资源与绿色能源协同利用等研究工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道8号。ORCID: 0000-0003-2253-9448。E-mail: yzhou@swpu.edu.cn

通信作者: 唐春, 女, 1990年生, 副研究员, 博士; 主要从事绿电制氢研究工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道8号。ORCID: 0000-0001-7489-9512。E-mail: tangchun@swpu.edu.cn

0 引言

天然气作为一种相对清洁的化石能源，主要由甲烷组成，但通常还含有硫化氢（ H_2S ）和 CO_2 等杂质^[1]。其中， H_2S 因其剧毒、易燃及强腐蚀性，成为天然气净化过程中必须解决的关键问题。以普光气田为例，其天然气中 H_2S 含量高达 14.1%^[2-3]，为确保天然气的安全输送，必须对其进行脱硫处理。目前，克劳斯工艺是最常用的脱硫技术，硫磺回收率达到 96% ~ 99%^[4-10]。然而，该工艺的能源利用形式较为单一（主要依赖热值燃烧），能耗较高且会产生 SO_2 尾气排放^[11-14]。在“双碳”目标背景下，为满足油气田绿色能源转型需求，充分利用油气田所在地区自然资源，开发新型高效的 H_2S 脱除技术势在必行。

近年来，随着可再生能源发电量的成倍激增，国内建立了可再生能源消纳责任权重和竞争性配置风电、光伏指标的机制，旨在通过风光资源的利用，进一步推动油气田的绿色转型^[15-16]。以吉林油田为例，截至 2024 年 7 月，其 $15 \times 10^4 \text{ kW}$ 的风光发电项目累计发电量达 $2 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，创造效益 0.8 亿元，绿电占比提高至 29.5%，展现了可再生能源就近开发和消纳在油气上游的重要性。一些天然气资源丰富的地区，其太阳能资源也非常丰富^[17-23]，如青海油田、塔里木油田和长庆油田，这些地区年日照辐射量为 $6\,680 \sim 8\,400 \text{ MJ/m}^2$ ，平均日照时间超过 3 200 h。光伏技术的发展推动了油气田太阳能与 H_2S 清洁利用技术的结合。电催化 H_2S 分解制氢具有低能耗、常温常压操作的优势，理论分解电压仅为 0.17 V，远低于电解水制氢的 1.23 V^[24]。以太阳能驱动电催化 H_2S 制氢脱硫，不仅能够生产绿氢与硫磺，还能高效利用环境资源，推动能源结构转型，是绿色可持续利用 H_2S 资源的变革性新技术。

目前，电催化 H_2S 分解制氢脱硫技术的主要瓶颈在于硫磺易在阳极表面沉积，导致电极材料钝化。常规电极材料如石墨、碳毡和碳纤维因亲硫性较强，容易在电解过程中被硫覆盖，最终终止反应^[25-27]。贵金属电极如铂也易生成硫化铂（ PtS ），导致电极不可逆损坏^[28-29]。为了克服这些问题，研究者们开发了金属硫化物和硒化物催化剂。Kumar 等^[30-33] 研究了低成本金属硫化物（ CoFeS_2 、 NiCu-MoS_2 ）及硒化物（ NiSe/NF ），发现他们在电解 H_2S 过程中表现出较低的电压（比电解水低 2 ~ 3 倍），且在富硫环境中具有较好的稳定性，催化活性可维持 100 ~ 500 h。周莹教授团队开发的 NiSe/NF 催化剂有效抑制了电极

的钝化，能够持续催化短链到长链多硫化物^[33]，在电解槽组件中，该催化剂的制氢能耗为 $2.63 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ ，低于电解水（ $4 \sim 5 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$ ），显示出高效的析氢与同步脱硫能力，具备良好的应用前景。若该技术走向实际应用，必须对其经济性进行分析。

在可再生能源制氢领域，陈昱杉等^[34-39] 分析了清洁可再生能源（风能、太阳能、水能）制氢的优缺点以及发展现状，其研究表明，与传统化石能源制氢相比，可再生能源制氢成本较高，竞争力较差。目前衡量制氢技术经济性的基本指标包括：项目生命周期价值的净现值（Net Present Value，缩写为 *NPV*）、项目生命周期成本的净现值（Net Present Cost，缩写为 *NPC*）、内部收益率（Internal Rate of Return，缩写为 *IRR*）、静态回收期（Payback Period，缩写为 *PBP*）和投资回报率（Return on Investment，缩写为 *ROI*）等。袁铁江等^[40] 以甘肃某区域风电场为例，通过 *IRR* 和 *PBP* 分析了风光耦合制氢及电解槽寿命衰减等全过程成本效益的变化，提出了基于质子交换膜电解槽的全寿命周期经济评估模型，并基于此评估了风光耦合电解槽制氢的经济可行性。孙建梅等^[41] 利用 *NPV* 和 *PBP* 经济指标，以某近海气象观测点的实际数据为例进行分析，从氢气价格和电解槽容量两个方面计算并验证该风光发电制氢系统收益情况较好。宋天琦等^[42] 利用 *PBP* 经济指标，以华东地区某分布式光伏电站年运行数据为例，分析了光伏耦合电解水并网制氢系统的经济可行性，研究表明在光伏年有效利用小时数达到 1 400 h 及以上的地区，当峰谷电价差进一步拉大及资产初始投资减少，光伏耦合电解水制氢将更具有经济性。

上述文章使用了 *NPV*、*IRR* 和 *PBP* 等指标评估了可再生能源制氢技术的经济可行性，但这些指标无法用于不同项目、规模和容量之间制氢经济性的比较，目前国际上常用的平准化制氢成本（Levelized Cost of Hydrogen，缩写为 *LCOH*）则可以解决以上问题。在 *LCOH* 中通常包括光伏成本、电解槽成本和设备固定资产残值的计算，而多数研究忽略了技术进步率对设备初始固定投资成本的影响，设备固定资产残值通常取为定值，没有考虑两者在时间序列上的变化^[43-44]。为此，笔者通过线性规划算法，以最大化年均利润为目标，优化光伏电催化 H_2S 制氢脱硫系统中的各设备装机容量；利用设备折旧模型来模拟时间对设备固定资产残值的影响，学习曲线模型模拟技术进步率对设备初始固定投资成本的影响，对该系统未来的 *LCOH* 进行预估计算，并结合几种

经济指标对优化结果进行经济可行性研究；最后，以光伏成本与电解槽成本、光伏装机容量、电解槽能耗、年辐射量和负载运行时间这几个因素对 $LCOH$ 进行敏感性分析，评估不同因素对 $LCOH$ 的影响。

1 光伏电催化 H_2S 制氢脱硫系统经济性

1.1 制氢脱硫系统

离网型光伏电催化 H_2S 制氢脱硫系统以光伏系统（光伏阵列）、电解槽系统、逆变器、压缩机、蓄电池、储氢罐、硫磺回收装置和 H_2S 吸收塔组成（图 1），该系统利用光伏发电供电的形式驱动电解槽系统进行反应。原料气首先经过 H_2S 吸收塔处理，将其中的 H_2S 与其他气体分离，单组分的 H_2S 气体经吸收液储存后通入电解槽系统分解，产物氢气通过压缩机进入储氢罐收集，产物硫磺通过多硫化物的酸化处理得到。由于该系统为离网型，当负载时间超过平均日照时间后，负载正常运行所需的全部电能通过蓄电池进行供给。

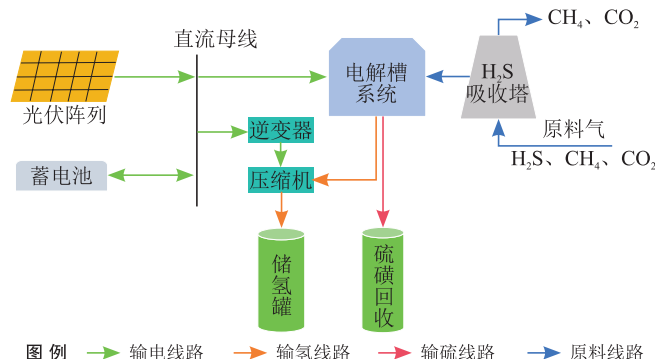


图 1 光伏电催化 H_2S 制氢脱硫工艺示意图

系统中的光伏阵列将太阳能转化为电能并串联起来提供足够电压的电力。光伏组件对太阳辐射的能量输出计算如下^[45]：

$$E_{PV} = E_{rad} \times S_{PV} \times \eta_{PV} \quad (1)$$

式中 E_{PV} 表示光伏阵列的输出电量， $kW \cdot h$ ； E_{rad} 表示太阳辐射量， $kW \cdot h/m^2$ ； S_{PV} 表示光伏组件总面积， m^2 ； η_{PV} 表示光伏系统综合发电效率。

系统中的逆变器（DC/AC）将输入的直流电转换为交流电，供压缩氢气设备使用。逆变器的功率输出计算如下^[44]：

$$P_{Inv} = P_{DC-Inv} \times \eta_{Inv} \quad (2)$$

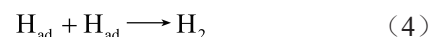
式中 P_{Inv} 表示逆变器的交流输出功率， kW ； P_{DC-Inv} 表示光伏阵列到逆变器的直流输出功率， kW ； η_{Inv} 表示逆变器的能量转换效率。

系统中的蓄电池用于储存多余的能量，在光伏供电不足的情况下对整个系统进行供电。电池中存储的能量计算如下^[46]：

$$E_{bat} = E_{bat-storage} \times (1 - \alpha) + P_{i,bat} \times \eta_{bc} - P_{o,bat} \times \eta_{bd} \quad (3)$$

式中 E_{bat} 表示存储在蓄电池中的总能量， $kW \cdot h$ ； $E_{bat-storage}$ 表示蓄电池中的初始能量， $kW \cdot h$ ； α 表示电池自放电率； $P_{i,bat}$ 、 $P_{o,bat}$ 分别表示电池输入、输出功率， kW ； η_{bc} 、 η_{bd} 分别表示电池充电、放电效率。

选用商用碱性电解槽系统，当原料为 H_2S 时，电解槽系统中发生如下反应^[33]：

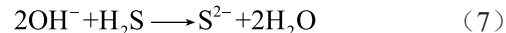


电解槽的功率输出计算如下^[44]：

$$m_{HEL} = \frac{P_{DC-EI} \times \eta_{EI-wk} \times t_{wk}}{\eta_{EI}} \quad (6)$$

式中 m_{HEL} 表示电解槽氢气日产量， m^3 ； P_{DC-EI} 表示电解槽的直流输入功率， kW ； η_{EI-wk} 表示电解槽电解效率； t_{wk} 表示负载日均运行时间， h ； η_{EI} 表示电解槽单位制氢能耗， $kW \cdot h/m^3$ 。

系统中的 H_2S 吸收塔以 $NaOH$ 溶液为碱液吸收剂，对 H_2S 进行吸收储存，吸收塔储罐发生如下反应：



1.2 经济性分析

1.2.1 经济学指标

以年金现值系数（Present Value of Annuity Factor，缩写为 PAF ）对制氢脱硫系统中各设备的固定资本支出、总运营费用、设备更换成本进行项目寿命周期内的年度总成本计算， PAF 考虑折现率的影响，将设备总投资均分为整个项目寿命周期的成本。以 NPV 、 NPC 、 ROI 、 IRR 、 PBP 这 5 个经济指标衡量系统的经济可行性。同时为了比较不同规模、不同技术与不同投资额下制氢项目的可行性，采用结合平准化度电成本（Levelized Cost of Electricity，缩写为 $LCOE$ ）计算的 $LCOH$ 对该系统制氢进行经济性评估。

$LCOE$ 通常作为光伏系统衡量发电技术竞争力的指标，并用于 $LCOH$ 的计算。计算如式（8）所示^[46-48]：

$$LCOE = \frac{B_{PV} - \frac{W_R}{(1+r)^n} + \sum_{n=1}^t \frac{L_{PV-n} + B_{PV-n} + C_{PV-n}}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^t \frac{E_n}{(1+r)^n}} \quad (8)$$

式中 B_{PV} 表示光伏系统的初始固定投资成本，元； W_R 表示光伏系统的固定资产残值，元； L_{PV-n} 表示光伏系统第 n 年的运营成本，元； B_{PV-n} 表示光伏系统

第 n 年的能源消耗成本, 元; 以太阳能进行发电, 故不考虑能源消耗成本; C_{pv-n} 表示光伏系统更换成本, 元; 本文中光伏系统寿命为 20 年, 大于系统的项目寿命 15 年, 故不考虑光伏系统的更换成本; E_n 表示第 n 年光伏系统的发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; t 表示项目寿命周期, 本文假设为 15 年; r 表示折现率, 本文取电力行业基准收益率 (8%) [43]。

$LCOH$ 是国际上通用的评估不同区域、不同规模、不同投资额、不同制氢技术下制氢成本的方法, 在光伏电催化 H_2S 制氢脱硫系统中 $LCOH$ 等于总投资成本与 H_2 总产量的比值。计算如下 [46-48] :

$$LCOH = \eta_{EL} \times LCOE + \frac{C_{\text{ele-p}} - \frac{V_R}{(1+r)^n} + \sum_{n=1}^t \frac{L_{\text{ele-n}} + B_{\text{ele-n}} + C_{\text{ele-n}}}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^t \frac{Y_n}{(1+r)^n}} \quad (9)$$

式中 $C_{\text{ele-p}}$ 表示电解槽系统的初始固定投资成本, 元; V_R 表示电解槽系统的固定资产残值, 元; $L_{\text{ele-n}}$ 表示电解槽系统第 n 年的运营成本, 元; $B_{\text{ele-n}}$ 表示电解槽系统第 n 年的能源消耗成本, 元; H_2S 来源于高含硫酸性气藏, 就地取材, 故不考虑能源消耗成本。 $C_{\text{ele-n}}$ 表示电解槽更换成本, 元; 本文中电解槽系统寿命为 100 000 h, 大于系统的项目寿命 (15 年), 故不考虑电解槽系统的更换成本。 Y_n 表示第 n 年的 H_2 生产量, kg 。

NPV 是企业投资分析中常用的一种金融工具, 用于确定投资计划是否应该批准。

$$NPV = \sum_{n=1}^t \frac{D_n - L_n}{(1+r)^n} - C_p \quad (10)$$

式中 D_n 表示第 n 年收入, 万元; C_p 表示设备的总投资, 万元; L_n 表示第 n 年的设备运维成本, 万元; NPV 为投资计划中每期现金流量的现值总和除以一定的折现率后所得到的现值, 如果投资计划的 $NPV > 0$, 则表明该计划有利可图。

NPC 为项目生命周期内所有成本 (运维成本) 的现值:

$$NPC = \sum_{n=1}^t \frac{L_n}{(1+r)^n} + C_p \quad (11)$$

ROI 为衡量项目在项目生命周期内的回报金额, 其将 NPV 和 NPC 分别作为利润和成本来考虑货币的时间价值, ROI 越大说明项目经济效益可行, 计算式如下:

$$ROI = \frac{NPV}{NPC} \quad (12)$$

IRR 指 $NPV = 0$ 时的值, 也就是项目本身期望可达到的投资收益率。内部收益率越高, 投资机会越有吸引力, 当 IRR 大于折现率时说明项目经济效益可行:

$$\sum_{n=1}^t \frac{D_n - L_n}{(1+IRR)^n} - C_p = 0 \quad (13)$$

PBP 是指项目从投入到收回投资的时间, 通常以年为单位, PBP 值越小说明该项目的回本速度更快, 计算如下:

$$PBP = \frac{C_p}{D_n - L_n} \quad (14)$$

PAF 指现值转换为年值的系数 [46]:

$$PAF = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (15)$$

1.2.2 脱硫系统成本构成

光伏电催化 H_2S 制氢脱硫系统中设备成本包括固定投资、运营费用、以及设备更换成本, 各设备性能参数与成本参数构成如表 1 所示。

1) 光伏系统采用单晶硅组件, 其年度总成本 (TAC_{PV}) 为:

$$TAC_{PV} = C_{Cl,PV} + C_{OM,PV} \quad (16)$$

其中

$$C_{Cl,PV} = PAF \times A_{PV} \times C_{PV}$$

式中 $C_{Cl,PV}$ 表示光伏系统年度固定投资成本, 万元; $C_{OM,PV}$ 表示年运维成本, 万元; A_{PV} 表示光伏装机量, kW ; C_{PV} 表示单位装机成本, 元/ kW ; 光伏发电系统寿命 20 年, 超过项目周期寿命, 故不考虑设备更换成本。

2) 逆变器 (DC/AC) 的年度总成本 (TAC_{Inv}):

$$TAC_{Inv} = C_{Cl,Inv} + C_{OM,Inv} \quad (17)$$

其中

$$C_{Cl,Inv} = PAF \times A_{Inv} \times C_{Inv}$$

式中 $C_{Cl,Inv}$ 表示逆变器年度固定投资成本, 万元; $C_{OM,Inv}$ 表示年运维成本, 万元; A_{Inv} 表示装机容量, kW ; C_{Inv} 表示单位装机成本, 元/ kW 。

3) 蓄电池的年度总成本 (TAC_{bat}):

$$TAC_{bat} = C_{Cl,bat} + C_{OM,bat} + C_{RE,bat} \quad (18)$$

其中

$$C_{Cl,bat} = PAF \times N_{bat} \times C_{bat}$$

$$C_{RE,bat} = C_{Cl,bat} \times \sum_{i=5,10,15} \frac{1}{(1+r)^i}$$

式中 $C_{Cl,bat}$ 表示蓄电池年度固定投资成本, 万元; $C_{OM,bat}$ 表示年运维成本, 万元; $C_{RE,bat}$ 表示更换成本, 万元; C_{bat} 表示单位装机成本, 元/块; N_{bat} 表示蓄电池数量, 电池寿命为 5 年, 因此需进行 3 次更换。

4) 电解槽的年度总成本 (TAC_{Ely}):

$$TAC_{Ely} = C_{Cl,Ely} + C_{ElyOPEX} \quad (19)$$

表 1 各设备性能与成本参数表

设备	性能参数		成本参数	
	参数	数值	参数	数值
光伏系统	光伏板峰值功率 /W	555 ^[49]	单位装机成本/(元·kW ⁻¹)	4 633 ^[50]
	转换效率	21.5% ^[49]	年运维成本占比	0.38% ^[50]
	降额系数	85.1% ^[49]	寿命 /a	20 ^[50]
	综合发电效率	49.49%	—	—
	首年功率衰减	2% ^[49]	—	—
	逐年功率衰减	0.55% ^[49]	—	—
逆变器	转换效率	95% ^[46]	单位装机成本/(元·kW ⁻¹)	4 707 ^[50]
	—	—	年运维成本占比	2% ^[50]
	—	—	寿命 /a	15 ^[50]
磷酸铁锂 ^[51] 蓄电池	能源转换效率	98% ^[44]	单位装机成本/(元·块 ⁻¹)	5 752 ^[46]
	充电效率	99% ^[46]	年运维成本占比	1% ^[44]
	放电效率	96% ^[46]	寿命 /a	5 ^[46]
	自放电率	0.02% ^[44]	—	—
	放电深度	60%	—	—
电解槽	电解效率	75% ^[52]	单位装机成本/(元·kW ⁻¹)	2 000 ^[46]
	负载	20%~120%	年运维成本占比	2%
	—	—	寿命 /h	100 000
压缩机	压力 /MPa	70 ^[44]	单位装机成本/(元·kg ⁻¹)	6 611.8 ^[50]
	压缩效率	80% ^[44]	年运维成本占比	2% ^[50]
	—	—	寿命 /a	20 ^[46]
吸收塔	单位储罐成本/(元·m ⁻³)	1 200	单位物料成本/(元·m ⁻³)	2.7

其中 $C_{\text{Cl,Ely}} = A_{\text{Ely}} \times C_{\text{Ely}} \times PAF$
式中 $C_{\text{Cl,Ely}}$ 表示电解槽年度固定投资成本, 万元;
 C_{ElyOPEX} 表示年运维成本, 万元; A_{Ely} 表示装机容量,
kW; C_{Ely} 表示单位装机成本, 元/kW; 不考虑设备
更换成本。

5) 储氢系统的年度总成本 (TAC_{Comp}):

$$TAC_{\text{Comp}} = C_{\text{Cl,Comp}} + C_{\text{OM,Comp}} \quad (20)$$

其中 $C_{\text{Cl,Comp}} = A_{\text{Comp}} \times C_{\text{Comp}} \times PAF$
式中 $C_{\text{Cl,Comp}}$ 表示压缩机年度固定投资成本, 万元;
 $C_{\text{OM,Comp}}$ 表示年运维成本, 万元; A_{Comp} 表示装机容量,
kW; C_{Comp} 表示单位装机成本, 元/kW。

6) 不同规模电解槽制氢量的年度总成本 (TAC_{de}):

$$TAC_{\text{de}} = C_{\text{des}} \times PAF \quad (21)$$

其中 $C_{\text{des}} = \frac{m_{\text{HEL-h}}}{M_{\text{HEL-h}}} \times C_{\text{M-de}}$
式中 C_{des} 表示不同制氢量下电解槽的固定投资成本,
万元; $m_{\text{HEL-h}}$ 表示电解槽单位时间制氢量, m³/h; $M_{\text{HEL-h}}$

表示 1 个标准电解槽单位时间制氢量, 1 000 m³/h;
 $C_{\text{M-de}}$ 表示 1 000 m³/h 电解槽设计成本, 市场调研后
取值 470 万元。

7) H₂S 吸收塔的年度总成本 (TAC_{H}):

$$TAC_{\text{H}} = A_{\text{H}} \times C_{\text{HL}} \times PAF + C_{\text{H-OPEX}} \quad (22)$$

其中 $C_{\text{H-OPEX}} = V_{\text{H}} \times (t_{\text{cl}} + t_{\text{c2}}) \times 365 \times C_{\text{HS}}$
式中 A_{H} 表示吸收塔容量, m³; C_{HL} 表示单位装机成
本, 元/m³; $C_{\text{H-OPEX}}$ 表示吸收塔的年物料成本, 万元;
 C_{HS} 表示吸收塔处理 H₂S 的单位物料成本, 元/m³;
 V_{H} 表示吸收塔中 H₂S 的流量, m³/h; t_{cl} 和 t_{c2} 分别表
示吸收塔在电解槽工作前后对 H₂S 的吸收时间, h。

2 模型建立方法及案例分析

2.1 模型建立方法

以光伏电催化 H₂S 制氢脱硫系统的经济效益最

大化为目标, 采用线性规划模型对光伏电催化制氢脱硫系统的各设备装机量、单位时间制氢量和 H_2S 流量进行优化分配, 在各约束条件下, 分析经济效益最大化时的各设备装机容量。同时采用设备折旧模型对设备固定资产折旧进行计算, 以满足在任意单位时刻的设备折旧额与当时固定资产的价值成正比的关系。引入学习曲线模型评估设备技术进步率对光伏系统与电解槽系统初始固定投资成本的变化, 以研究技术进步率对该系统 $LCOH$ 的影响。

2.1.1 线性规划模型

线性规划模型框架如图 2 所示, 包括目标函数、约束条件、决策变量。在光伏电催化 H_2S 制氢脱硫系统中目标函数为年均利润的最大值, 即各设备年度总成本减去产物年利润的最小值。约束条件包括等式约束与不等式约束, 用于优化模型求解边界以满足约束要求。决策变量即为各设备的装机量与单位时间制氢量, 对决策变量的优化即为该模型的核心。通过 MATLAB 软件进行求解, 确定各设备装机量的最佳配置, 以实现系统经济效益的最大化。

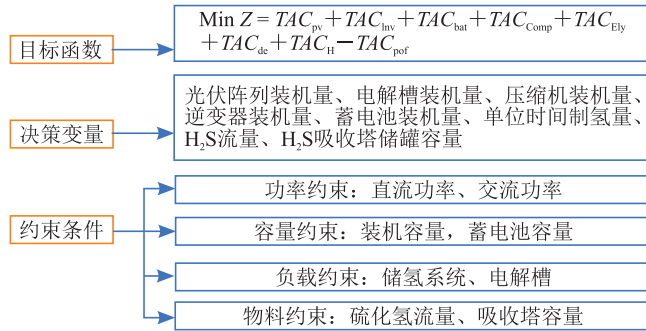


图 2 线性规划模型示意图

目标函数 (Z): 以 15 年为模型的项目周期寿命, 目标函数设为各设备年度总成本与该系统年利润 (TAC_{pof}) 差值的最小值:

$$\text{Min } Z = TAC_{pv} + TAC_{inv} + TAC_{bat} + TAC_{comp} + TAC_{ely} + TAC_{dc} + TAC_h - TAC_{pof} \quad (23)$$

光伏电催化 H_2S 制氢脱硫的约束条件主要包括以下几个方面。

2.1.1.1 功率约束

$$P_{DC-Ely} + P_{DC-Inv} = P_{DischgSt} + P_{PV-DC} \quad (24)$$

$$P_{PV} = P_{PV-DC} + P_{chgSt} \quad (25)$$

$$P_{AC-Comp} = P_{Invout} \quad (26)$$

式中 P_{DC-Ely} 表示输入电解槽的直流功率, kW; P_{PV} 表示光伏系统的输入功率, kW; P_{DC-Inv} 表示输入逆变器的直流功率, kW; $P_{DischgSt}$ 表示蓄电池的输出功率,

kW; P_{PV-DC} 表示光伏输出到负载的功率, kW; P_{chgSt} 表示蓄电池的输入功率, kW; $P_{AC-Comp}$ 表示压缩机的交流输入功率, kW; P_{Invout} 表示逆变器的交流输出功率, kW。

2.1.1.2 容量约束

该模型的各器件如光伏阵列、电解槽、逆变器、压缩机、蓄电池各输出功率 (P_{out}) 均小于其装机量 (P_{ins}):

$$P_{out} \leq P_{ins} \quad (27)$$

2.1.1.3 负载约束

$$m_{HEL} \leq D_{Ely,max} \quad (28)$$

式中 $D_{Ely,max}$ 表示储氢系统的储氢容量, m^3 ;

蓄电池的电池容量约束需满足每天电解槽与压缩机工作时间超过平均日照时间的电量需求, 其中 E_{DOD} 为蓄电池的放电深度, v 为蓄电池输入电压:

$$\frac{(P_{DC-Ely} + P_{DC-Inv}) \times (t_{wk} - T_{pv}) \times E_{DOD}}{v} \leq E_{bat} \quad (29)$$

式中 T_{pv} 表示平均日照时间, h, 为衡量光伏发电量与光伏装机量的参数。

2.1.1.4 物料约束

$$0.2m_{HEL-W} \leq V_H \times t_{cl} \leq A_H \quad (30)$$

其中

$$m_{HEL-W} = V_H \times (t_{cl} + t_{c2})$$

式中 m_{HEL-W} 表示电解槽日消耗 H_2S 量, m^3 。

吸收塔在电解槽未工作前对 H_2S 的吸收储量应满足电解槽日消耗 H_2S 量的 20%, 且不能超过储罐的最大容量, 同时电解槽日消耗 H_2S 总量要等于吸收塔对 H_2S 的日储量。

2.1.2 设备折旧模型

设备折旧模型是关于设备的固定资产折旧的关系, 通常固定资产在使用初期效率高、效果好, 按照收入与费用配合的原则, 折旧也应该多, 随着使用时间的增加, 固定资产由新变旧, 效率减低, 修理费用增加, 提取的折旧也就应该逐渐减少。设备折旧的计算如下:

$$O(t) = C_a \times e^{-kt} \quad (31)$$

式中 $O(t)$ 表示在时间 t 的设备固定资产残值, 万元; k 表示常数 (与折旧率相关); t 表示项目寿命, a; C_a 表示设备的初始固定资产, 万元; 本文假设光伏系统折旧率为 15%, 电解槽与其他设备的折旧率为 10%。在不同折旧率下固定资产残值率与时间 t 的变化曲线如图 3 所示。

2.1.3 学习曲线模型

学习曲线模型是一种应用广泛的模型, 其实质是平均单位成本与累积产能之间的函数。本文为了考

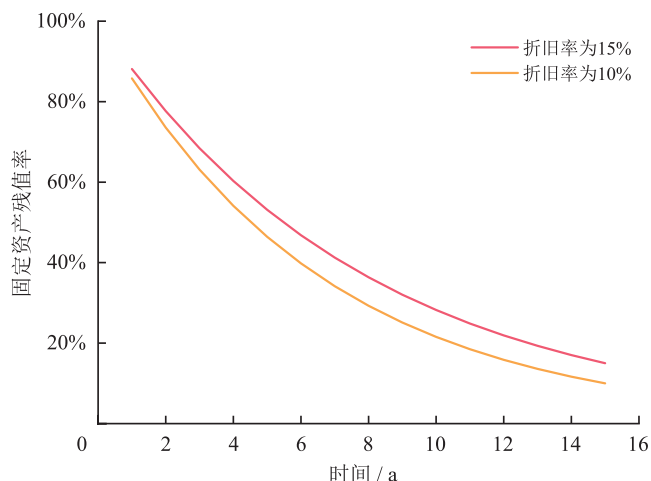


图3 固定资产残值率变化曲线图

考虑光伏和电解槽技术进步率对该系统未来 $LCOH$ 动态变化的影响，通过该模型对未来 15 年内光伏系统和电解系统的初始固定投资成本进行计算。计算如下^[48]：

$$M(t) = C_{\beta} \times e^{-bt} \quad (32)$$

式中 $M(t)$ 表示在时间 t 的设备初始固定投资成本，万元； C_{β} 表示设备初始固定投资成本，万元； b 表示各设备的技术进步率，为设备固定投资成本的年降低率，即随着各设备技术的进步，对应的设备成本相应地降低。

假设光伏系统的技术进步率为 5%，电解槽系统的技术进步率为 10%，在该技术进步率的影响下设备初始固定投资成本减少率与时间的变化曲线如图 4 所示。

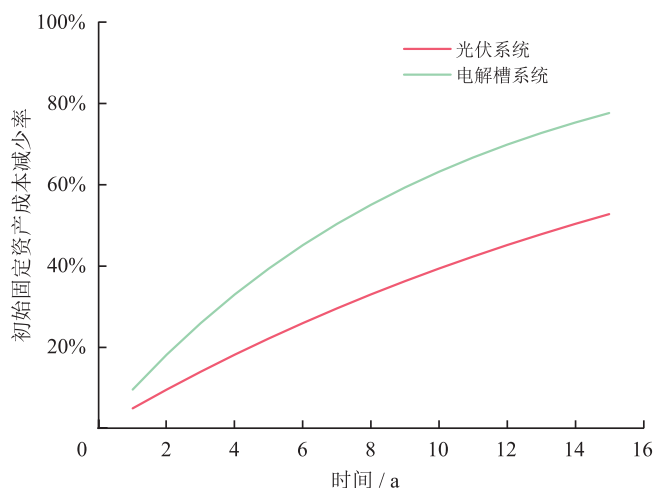


图4 初始固定投资成本减少率曲线图

2.2 模型案例分析

柴达木盆地油气资源丰富，该地区年均日照时数在 3 200 ~ 3 600 h，太阳能总辐射量在 6 600 ~

7 200 MJ/m²^[53]。在该地区西北部存在光电建设区，该光电建设项目通过建设光伏发电替代天然气发电，实现了 100% 绿电替代，成为油田第一个零碳示范区。该区域光伏总装机规模 139.52 kW，同时该地区存在炼油厂，拥有 5 000 t/a 的硫磺回收装置，采用一段高温转化和两级低温转化的方式回收该炼厂干气与液化气中的 H₂S。因此本文以该地区充足的年日照辐射发电量（1 917 kW · h/m²）和光伏装机规模 139.52 kW 为基础，研究光伏供电驱动电催化 H₂S 制氢脱硫系统的经济可行性。

2.2.1 优化结果

在该系统中电解槽寿命为 100 000 h，在项目周期寿命为 15 年的情况下负载日均运行时间（ T_{wk} ）最高为 18.2 h，在有限的发电量前提下， T_{wk} 长短会对系统经济收益产生明显影响， T_{wk} 越短，若要提高经济效益，则需要提高电解槽单位时间制氢量，但电解槽设计成本也会更高。 T_{wk} 越长，由于受到电量供给上限的约束，不能自由地去提高电解槽单位时间制氢量。同时当负载日均时间超过平均日照时间后，则需要蓄电池进行供电，蓄电池的成本也会对系统经济效益产生影响。因此以 18.2 h 为 T_{wk} 上限，采取 10% ~ 100% 取 10 个负载时间节点开展模型优化，通过 MATLAB 软件分析计算在不同 T_{wk} 下各设备的装机容量、运行参数、年均产物利润（氢气年利润 + 硫磺年利润）、年净利润额（年均产物利润 - 设备年总运维 - 设备年总折旧额）和年总折旧额，如图 5 所示。

从图 5-a 可以看出， T_{wk} 变化对电解槽与光伏装机量影响较小，但对蓄电池容量影响明显。当 T_{wk} 处于 3.6 ~ 7.3 h 时，蓄电池容量为 0，光伏发电全部用于负载。随着 T_{wk} 的增加，蓄电池容量逐渐增大并为系统供电。图 5-b 为系统各运行参数随 T_{wk} 增大的变化曲线，当 T_{wk} 处于 3.6 ~ 7.3 h 时，H₂S 年处理量随 T_{wk} 增长，表明系统未完全消纳太阳能，年均产物利润与 T_{wk} 成正比。当 $T_{wk} > 7.3$ h 后，H₂S 年处理量变化不大，系统完全消纳太阳能，年均产物利润达到上限。图 5-c 和图 5-d 分别为不同 T_{wk} 下年净利润额和年总折旧额的逐年变化曲线。从图 5-c 可以看出，各 T_{wk} 的年净利润额均逐年增加，但项目前期，各年净利润额曲线差异明显。结合图 5-d，当 T_{wk} 处于 3.6 ~ 7.3 h 时，各 T_{wk} 的年总折旧额曲线相近，因此 T_{wk} 在 3.6 ~ 7.3 h 内净利润额曲线差异主要来自于年均产物利润的影响，延长 T_{wk} 能提高年均产物利润，进而提升年净利润额。当 T_{wk} 处于 9.1 ~ 18.2 h 时，各 T_{wk} 的年总折旧额曲线在项目前期差异较大，根据

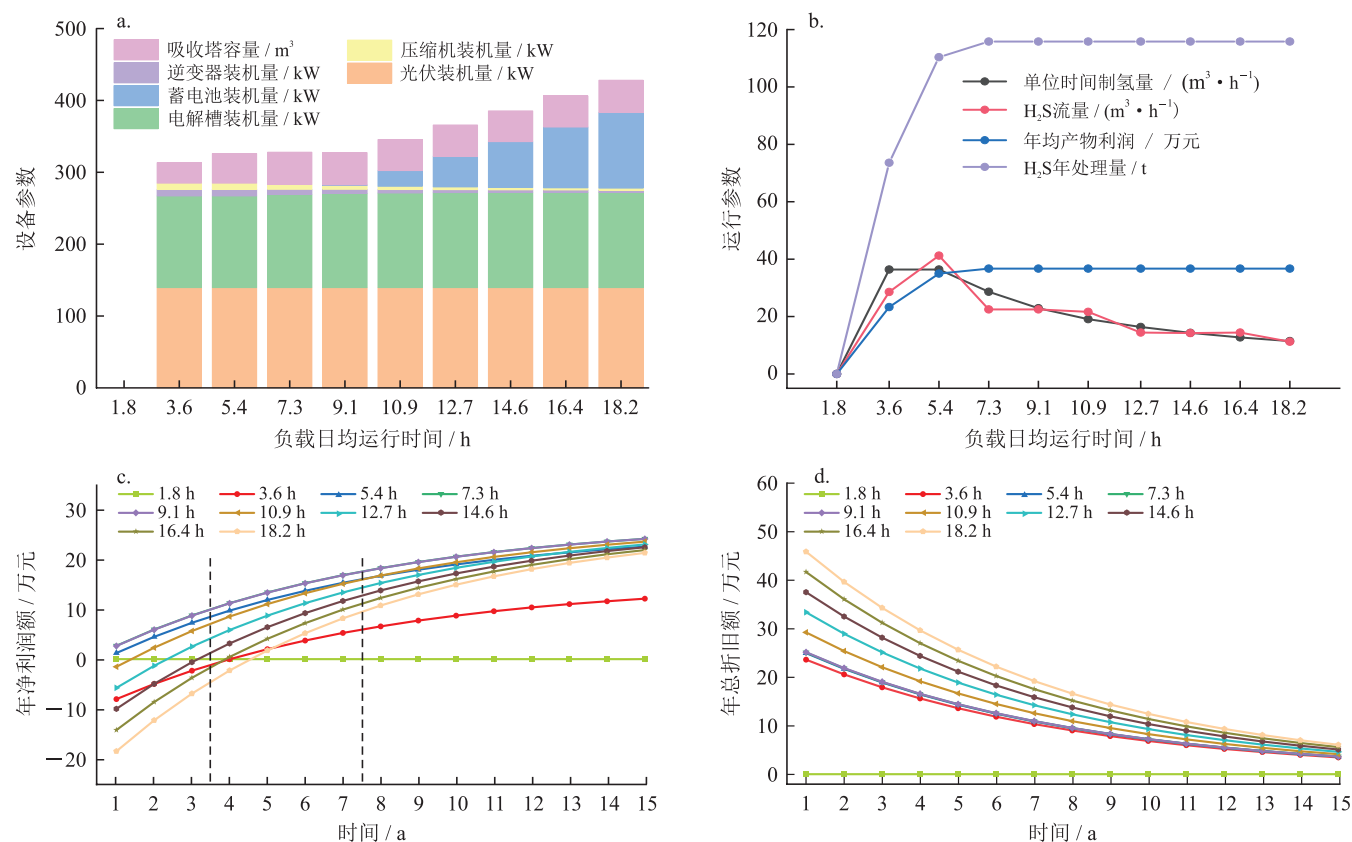


图 5 MATLAB 软件分析结果图

图 5-a, 是蓄电池容量增大, 系统总成本上升所导致。由图 5-b 结论可知该时间段内年均产物利润达到上限, 因此 T_{wk} 在 9.1 ~ 18.2 h 内, 净利润额曲线差异主要来自于年总折旧额的影响, 缩短 T_{wk} 能降低系统的固定投资成本, 从而减少年总折旧额, 提升系统的年净利润额。综上, 当系统 T_{wk} 为 7.3 ~ 9.1 h 时, 能在较低的总投资成本下消纳太阳能, 实现电解 H_2S 制氢经济效益的最大化。

2.2.2 经济可行性分析

根据系统各设备最优容量配置方案及运行策略, 以年辐射量 $1917 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 、电解槽制氢能耗 $2.63 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 、取负载最优时间段中 8.2 h 为基础, 进行光伏电催化 H_2S 制氢脱硫的经济效益计算与经济指标对比。

如表 2 所示, 光伏系统与电解槽系统的设备投资分别占总投资的 52.4% 和 21.1%。在太阳能总辐射量为 $1917 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 时, 光伏年均发电量为 $21.53 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 用于电解槽制氢脱硫的电量占比 92.8%。绿氢的价格按 3 万元/t^[43], 硫磺价格按 0.15 万元/t 计算, 年均产物利润为 36.7 万元。蓄电池组容量为 0, 表明系统为离网不储能模式, 电催化 H_2S 制氢脱硫系统的制氢能耗为 $2.63 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,

比目前碱性电解水制氢能耗 ($4 \sim 5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) 低 34.3% ~ 47.4%, 且该系统的 $LCOH$ 为 25.87 元/kg, 比相同模式下光伏电解水 $LCOH$ (29.74 元/kg)^[50,52] 低 13%, 表明与目前成熟的电解水制氢技术相比, 电催化 H_2S 制氢能以更低的制氢能耗实现制氢成本的下降。该系统在 15 年的项目周期寿命内 IRR 为 9.67%, 高于 8% 的折现率, 且 ROI 为 7.7%, 投资风险较低。 PBP 为 7.8 年, 能在 15 年的项目周期内快速回本并进行盈利, 具有较好的经济可行性。

3 敏感性分析

从式 (8)、(9) 中可以看出, 光伏发电量在光伏电催化 H_2S 制氢脱硫的经济效益和 $LCOH$ 影响很大, 其中日照辐射量, 光伏装机容量两个因素均会影响光伏系统发电量, 对系统制氢脱硫产生较大的影响。本文将对这两个因素展开分析。同时为了研究光伏电催化 H_2S 制氢的关键因素, 选取电解槽成本、光伏系统成本、负载运行时间、电解槽能耗这 4 个设备参数该系统的 $LCOH$ 进行敏感性分析。

3.1 日照辐射量的影响

不同地区受到的太阳辐射量、平均日照时间均有较

表 2 系统成本与经济指标表

项目	经济指标	数值
支出	光伏系统设备投资 / 万元	113.3
	电解槽系统设备投资 / 万元	45.7
	蓄电池组设备投资 / 万元	0
	储氢系统设备投资 / 万元	21.6
	逆变器系统设备投资 / 万元	5.3
	吸收塔设备投资 / 万元	9.4
	设计费用 / 万元	20.9
	设备总投资 / 万元	216.2
	设备年运维 / 万元	8.8
	首年发电量 /(kW · h)	223 799
收入	年均发电量 /(kW · h)	215 385
	年均 H ₂ S 处理量 /t	115.8
	年均氢气产量 /t	6.8
	年均硫磺产量 /t	108.7
	年均氢气收入 / 万元	20.4
	年均硫磺收入 / 万元	16.3
	产物总收入 / 万元	36.7
	NPV/ 万元	22.5
经济性参数	NPC/ 万元	291.6
	IRR	9.67%
	PBP/ 年	7.8
	ROI	7.7%
	LCOH/(元 · kg ⁻¹)	25.87

大差距。本文以太阳年辐射量 2 333 ~ 1 084 kW · h/m² 为该地区年辐射情况的上下限,分析太阳年辐射量变化对该系统的各经济指标影响。

图 6 为年辐射量对各经济指标的影响结果。图 6-a 中年辐射量的提升对设备总投资成本的影响尚不明显,而系统 15 年的产物总营业额保持着较大的提升,结合图 6-d 表明年辐射量的提升影响电解槽系统对 H₂S 的处理量。当年辐射量从 1 084 kW · h/m² 提升至 2 333 kW · h/m² 后,电解槽单位时间制氢量从 14.4 m³/h 提升至 30.9 m³/h,年辐射量越大,系统在单位时间内可处理更多 H₂S,经济效益越好。当地区日照年辐射量处于 1 084 ~ 1 396 kW · h/m² 时,该系统的各经济指标较差,系统在该年辐射量下的经济不可行。地区日照年辐射量处于 1 396 ~ 1 709 kW · h/m² 时,系统的 IRR 处于 2.75% ~ 7.61%,ROI 处于 -22.75% ~ -1.78%,PBP 处于 12.2 ~ 7.6 年,

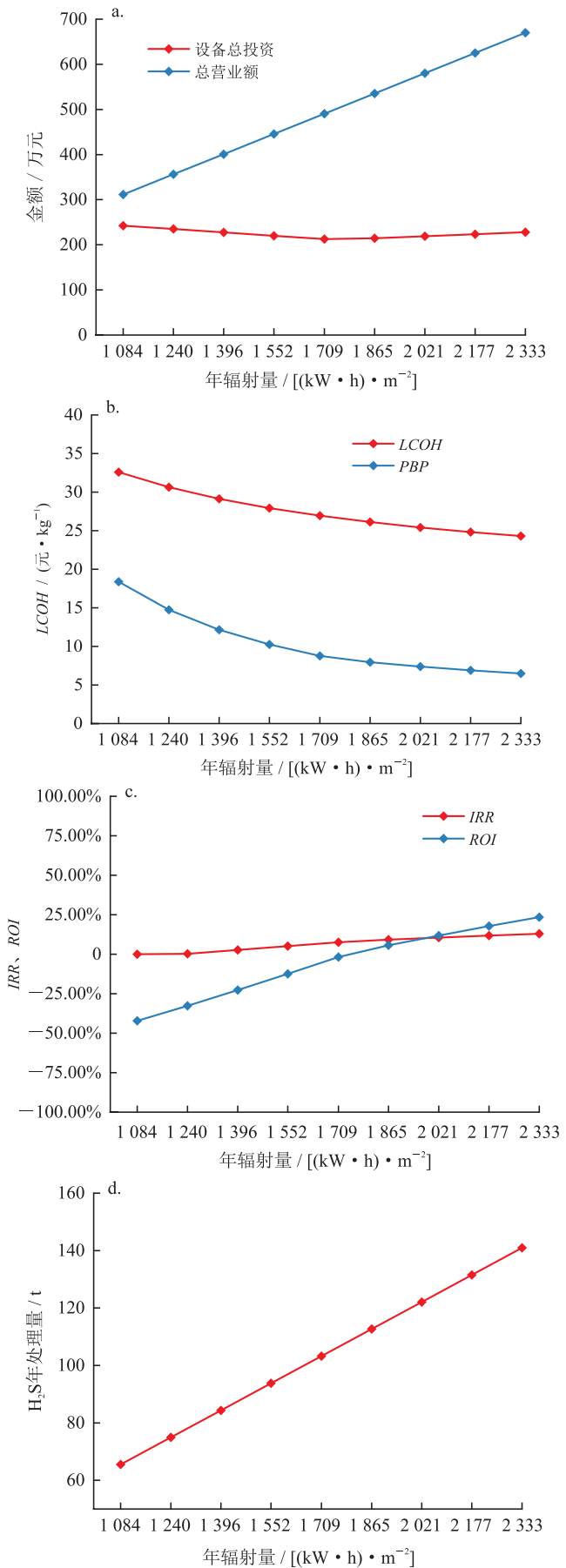


图 6 年辐射量对各经济指标的影响结果图

系统开始产生经济效益。年辐射量从 $1\,709$ 提升至 $2\,333\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ 后, 系统的 $LCOH$ 降幅为 9.8% , PBP 降幅为 26% , 表明年辐射量的提升对降低 PBP 较为明显。

3.2 光伏装机容量效应的影响

近年来, 我国光伏新增装机容量保持着稳定增长的趋势。为了分析光伏装机容量的提升对该系统 $LCOH$ 的影响, 本文对光伏装机容量 $1\sim 20\text{ MW}$ 的情况下, 结合技术进步率对未来 15 年内系统的 $LCOH$ 进行预估计算。

如图 7 所示, 不同年份的 $LCOH$ 在光伏装机容量从 1 MW 提升到 20 MW 后均有不同程度的下降 ($1.48\sim 3.73\text{ 元}/\text{kg}$), 光伏装机容量的提升可以一定程度上降低 $LCOH$ 。然而, 在相同的装机容量增量下, 由于不同年份下 $LCOH$ 基础值不同, 光伏装机容量的提升对 $LCOH$ 的总降低率始终维持在

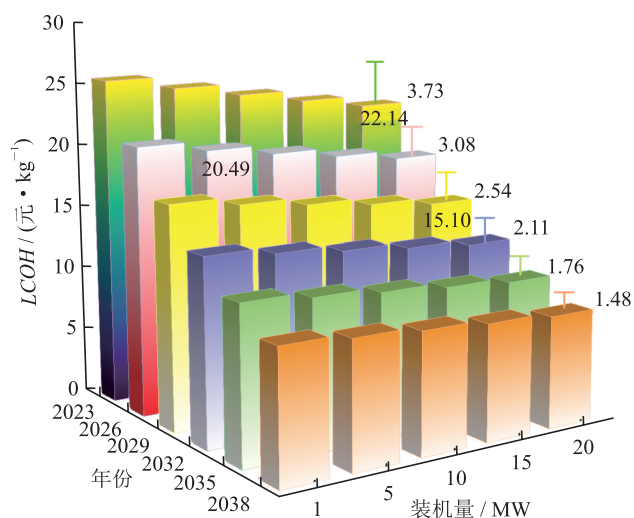
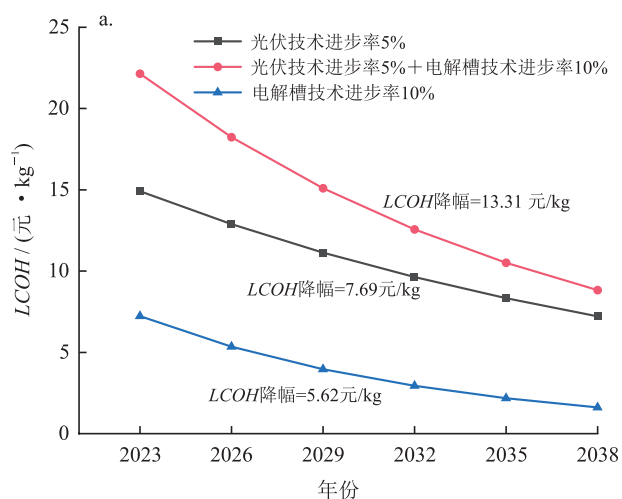


图 7 不同装机量、不同年份下 $LCOH$ 变化图



$14.3\%\sim 14.4\%$, 仅靠光伏装机容量的提升难以实现 $LCOH$ 的大幅下降。

当装机容量不变时, 图 7 中不同年份的条状出现不同程度的纵向差距即为学习曲线模型中技术进步率的体现。当光伏装机容量为 5 MW 时, 2026 年 $LCOH$ 为 $20.49\text{ 元}/\text{kg}$, 明显低于光伏装机容量为 20 MW 时 2023 年的 $LCOH$, 表明在降低 $LCOH$ 上, 技术进步率比容量效应具有更为明显的影响。同时以光伏装机容量 20 MW 为例 (图 8-b), 在光伏和电解槽技术进步率分别为 5% 和 10% 的影响下, 未来各自的初始固定投资成本逐年降低。图 8-a 中 $LCOH$ 总降幅达 $13.31\text{ 元}/\text{kg}$, 结合式 (8)、(9), 计算得出由光伏和电解槽成本引起的 $LCOH$ 降幅占比分别为 57.8% 与 42.2% , 其中光伏能以更低的技术进步率在初始固定投资成本下降较少的情况下, 实现 $LCOH$ 的降低。

在技术进步率的影响下, 2029 年 $LCOH$ 为 $15.10\text{ 元}/\text{kg}$, 在不考虑碳税的情况下, 接近于目前制氢成本为 $10\sim 16\text{ 元}/\text{kg}$ 的工业副产提纯制氢技术, 但仍高于目前甲烷水蒸气重整制氢技术。因此, 现阶段的光伏电催化 H_2S 制氢脱硫技术与成熟的工业制氢技术相比还不具有经济优势。但随着未来设备技术进步率的提升, 光伏电催化 H_2S 制氢脱硫经济效益将有望提高。

3.3 设备参数的影响

为了找出影响 $LCOH$ 的设备关键因素, 笔者从式 (8) 和 (9) 选取电解槽工作时间、电解槽成本、光伏成本、电解槽能耗 4 个参数, 以基础值变动 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 时, 分析对 $LCOH$ 的敏感性程度。同时结合设备折旧模型和学习曲线模型对设备成本进行预估计算, 分析折旧率与技术进步率对 $LCOH$ 的影响。

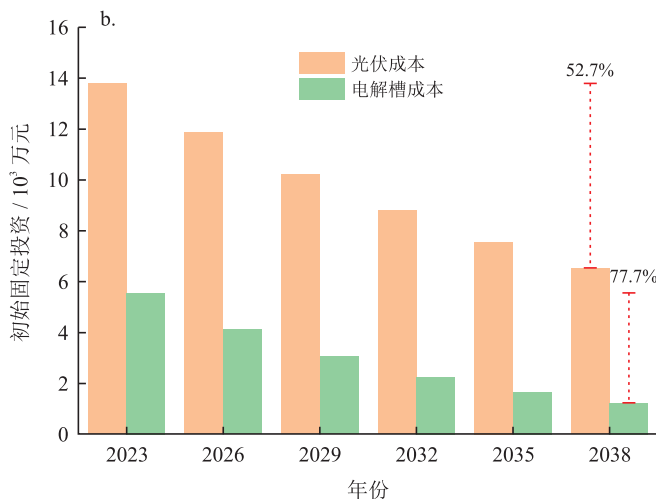


图 8 20 MW 装机量时 $LCOH$ 及设备成本变化图

如图 9 所示, 电解槽工作时间影响 $LCOH$ 负方向变动。电解槽成本、光伏成本、电解槽能耗影响 $LCOH$ 正方向变动, 这 4 个因素基础值变动后对 $LCOH$ 的总降幅分别为 13.3%、12.9%、26.5%、28.2%。电解槽能耗对 $LCOH$ 影响最大, 当电解槽制氢能耗 ($2.63 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) 从 +20% 降低至 -20% 后, $LCOH$ 从 29.67 元/kg 降低至 22.37 元/kg, 因此电解

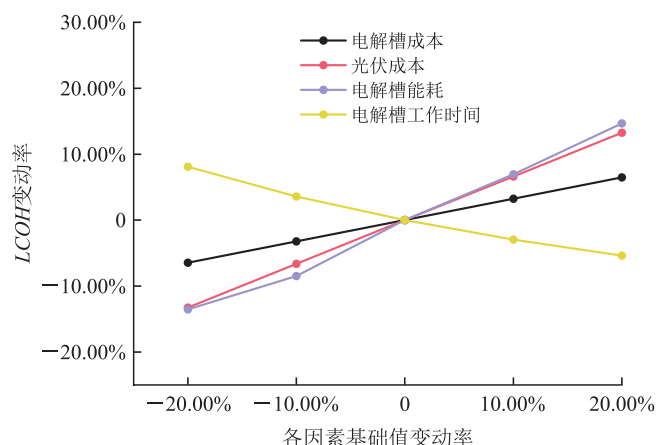


图 9 各因素对 $LCOH$ 的影响图

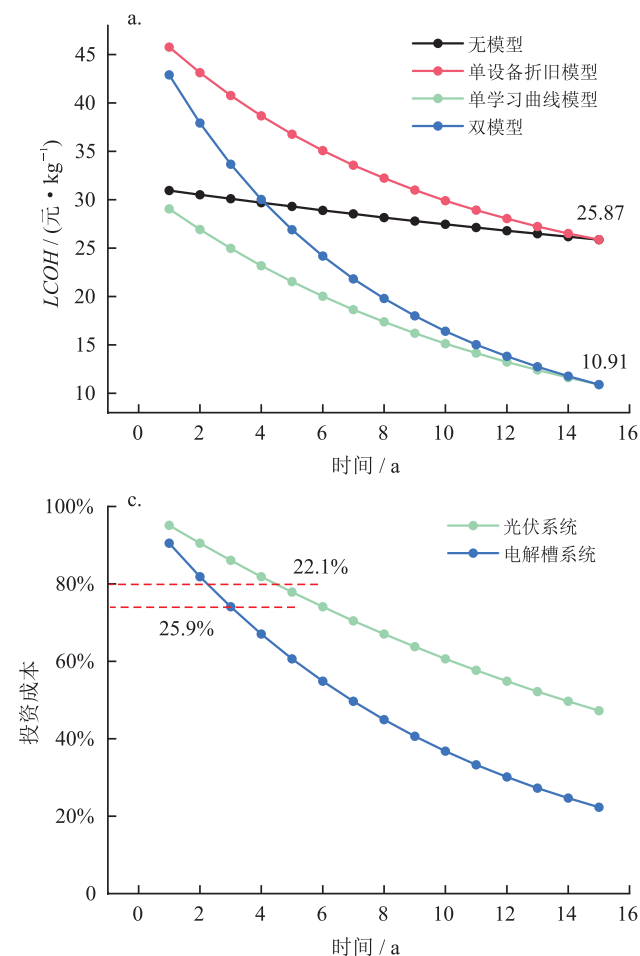


图 10 $LCOH$ 及各参数随时间的变化图

槽制氢能耗是降低 $LCOH$ 的关键所在。

图 10-a 中当无模型（不考虑折旧率、技术进步率）时 $LCOH$ 随时间呈线性递减关系, 结合图 10-b 可以看出: 时间对光伏系统与电解槽的固定资产残值变化影响不大, 其都以相近的变化率线性下降, 此时的时间序列对 $LCOH$ 的影响较弱。在单学习曲线模型（只考虑技术进步率）的影响下（图 10-c）, 15 年后光伏初始固定投资成本降低 52.7%, 电解槽初始固定投资成本降低 77.7%, 结合图 10-a 可知, $LCOH$ 最终值达到 10.91 元/kg, 远低于 25.87 元/kg, 表明技术进步率可降低设备的初始固定投资成本, 在设备成本影响 $LCOH$ 的过程中起决定作用。在单设备折旧模型（只考虑折旧率）的影响下（图 10-d）, 项目初期固定资产残值下降较多, 折旧额较大, 符合固定资产在使用初期效率高、效果好的特点。随着使用时间的增加, 固定资产由新变旧, 折旧额少, 因此 $LCOH$ 随时间的降低趋势为先快后慢。同时根据图 10-a, 单折旧模型与无模型的 $LCOH$ 最终值均为 25.87 元/kg, 在结合两模型后 $LCOH$ 最终值均为 10.91 元/kg, 表明

折旧模型只会影响 $LCOH$ 的变化过程, $LCOH$ 不会有本质的降低。从图 10-c 中得出未来 5 年光伏成本可降低 22.1%, 未来 3 年电解槽成本可降低 25.9%, 因此在未来随着技术进步率的提高, 设备成本的降低对系统整体经济效益与 $LCOH$ 的影响将会更加明显。

4 结论

1) 系统在离网不储能模式下可实现经济效益最大化。在经济性方面 IRR 高于折现率, PBP 短于项目周期, 可在更短的时间内回收投资成本并进行盈利, 在制氢技术方面 $LCOH$ 比相同模式下电解水制氢更低, 具有很好的经济可行性与技术竞争力。

2) 技术进步率的提升和光伏装机规模的增加均会在一定程度降低系统的 $LCOH$, 但在变化幅度上后者不如前者, 未来 5 年, 加速的技术进率可降低 $LCOH$ 至 15.10 元/kg, 接近于工业副产提纯制氢技术, 因此应提高设备的制造水平, 让 $LCOH$ 以更快的速度下降。

3) $LCOH$ 对不同因素的敏感程度不同, 其中对电解槽能耗的敏感程度最高, 当电解槽制氢能耗降低至 $2.10 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 时, $LCOH$ 为 22.37 元/kg。因此对电催化 H_2S 技术加大研究, 降低电催化 H_2S 分解制氢能耗, 使光伏电催化 H_2S 制氢脱硫技术更具有竞争力。

参 考 文 献

- [1] 熊钢, 胡勇, 傅敬强, 等. 高含硫天然气净化技术新进展与发展方向[J]. 天然气工业, 2023, 43(9): 34-48.
XIONG Gang, HU Yong, FU Jingqiang, et al. New progress and development direction of high-sulfur natural gas purification technology[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(9): 34-48.
- [2] 曾大乾, 张庆生, 李童, 等. 四川盆地普光高含硫气田长周期高产稳产关键技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(1): 65-75.
ZENG Daqian, ZHANG Qingsheng, LI Tong, et al. Key technologies for long-period high and stable production of the Puguang high-sulfur gas field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 65-75.
- [3] 于珊, 张洪华, 付梦瑶, 等. 天然气藏中酸气 H_2S 与 CO_2 协同转化研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(12): 6507-6517.
YU Shan, ZHANG Honghua, FU Mengyao, et al. Research progress on synergistic conversion of acid gas H_2S and CO_2 in natural gas[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(12): 6507-6517.
- [4] 崔吉宏, 吴鹏斌, 李林龄, 等. 高含硫净化厂克劳斯/斯科特装置尾气 SO_2 减排工艺优化[J]. 低碳化学与化工, 2022, 47(5): 160-165.
CUI Jihong, WU Pengbin, LI Linling, et al. Optimization of SO_2 emission reduction process of Claus/SCOT unit tail gas in high-sulfur gas purification plant[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(5): 160-165.
- [5] 崔吉宏, 张建东, 曹文全, 等. 天然气脱硫装置吸收塔模拟及增产措施[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(5): 1-9.
CUI Jihong, ZHANG Jiandong, CAO Wenquan, et al. Simulation of absorber in natural gas desulfurization unit and stimulation measures[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2023, 52(5): 1-9.
- [6] 陈昌介, 刘宗社, 张晓雪. 二氧化钛对克劳斯反应气体吸附性能研究[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(1): 12-16.
CHEN Changjie, LIU Zongshe, ZHANG Xiaoxue. Study on the adsorption performance of titanium dioxide for Claus reaction gas[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2023, 52(1): 12-16.
- [7] 宋丽静. 硫回收装置尾气处理技术在煤化工装置中的改进与应用[J]. 山西化工, 2023, 43(8): 107-108.
SONG Lijing. Improvement and application of tail gas treatment technology in sulfur recovery unit in coal chemical plant[J]. Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(8): 107-108.
- [8] 周明宇, 胡家全, 赵柳鉴, 等. 含硫天然气净化厂尾气排放全时段达标工艺路线[J]. 天然气与石油, 2024, 42(1): 17-24.
ZHOU Mingyu, HU Jiaquan, ZHAO Liujian, et al. Process route for full-time achieving tail gas emission standard for sulfur-containing gas purification plants[J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(1): 17-24.
- [9] 周礼庆. 克劳斯硫回收装置尾气创新技术改造[J]. 山西化工, 2024, 44(6): 143-145.
ZHOU Liqing. Innovation technology transformation of tail gas in claus sulfur recovery unit[J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(6): 143-145.
- [10] 陈昌介, 李一平, 李金金, 等. 天然气净化厂硫磺回收直流法与分流法克劳斯工艺探讨[J]. 硫酸工业, 2020, 61(8): 23-26.
CHEN Changjie, LI Yiping, LI Jinjin, et al. Discussion on claus process of sulphur recovery by direct flow method and divided flow method in natural gas purification plant[J]. Sulphuric Acid Industry, 2020, 61(8): 23-26.
- [11] AL-LAGTAH N M A, AL-HABSI S, ONAIZI S A. Optimization and performance improvement of Lekhwair natural gas sweetening plant using Aspen HYSYS[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 367-381.
- [12] ZAHID M A, AHSAN M, AHMAD I, et al. Process modeling, optimization and cost analysis of a sulfur recovery unit by applying pinch analysis on the Claus process in a gas processing plant[J]. Mathematics, 2022, 10(1): 88.
- [13] 黄薪宇, 纪文, 周微, 等. 天然气净化厂低碳运行评价指标体系研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(7): 9-11.
HUANG Xinyu, JI Wen, ZHOU Wei, et al. Research on low carbon operation evaluation index system of natural gas purification plant[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2023, 43(7): 9-11.
- [14] 孟翔宇, 陈铭韵, 顾阿伦, 等. “双碳”目标下中国氢能发展战略[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 156-179.

- MENG Xiangyu, CHEN Mingyun, GU Alun, et al. China's hydrogen development strategy in the context of double carbon targets[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(4): 156-179.
- [15] 孔令峰, 储培麟, 朱兴珊, 等. 油气田与风光电力融合发展研究[J]. *国际石油经济*, 2020, 28(4): 46-53.
- KONG Lingfeng, CHU Peilin, ZHU Xingshan, et al. Research on the integration development of wind & solar power generation in oil & gas ifeld[J]. *International Petroleum Economics*, 2020, 28(4): 46-53.
- [16] 渠沛然. 油气田新能源开发消纳优势明显 [N]. *中国能源报*. 2023-10-09(06).
- QU Peiran. The advantages of new energy development and consumption in oil and gas fields are obvious[N]. *China Energy News*, 2023-10-09(06).
- [17] 丁上于, 张超星, 李宏, 等. 世界主要经济体能源领域面向未来的战略布局及启示 [J]. *世界科技研究与发展*, 2024, 46(1): 8-20.
- DING Shangyu, ZHANG Chaoxing, LI Hong, et al. Future-oriented strategic layout and inspiration in the energy sector of the world's major economies[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2024, 46(1): 8-20.
- [18] 吴少祥, 王维庆, 樊小朝, 等. 考虑经济性和可靠性的综合能源系统优化配置 [J]. *现代电子技术*, 2023, 46(20): 130-134.
- WU Shaoxiang, WANG Weiqing, FAN Xiaochao, et al. Integrated energy system optimal configuration considering economy and reliability[J]. *Modern Electronics Technique*, 2023, 46(20): 130-134.
- [19] 朱力洋, 张杰, 王志军, 等. 双碳背景下构建天然气净化厂“气电与可再生能源融合”系统初步探讨 [J]. *新型工业化*, 2022, 12(2): 166-169.
- ZHU Liyang, ZHANG Jie, WANG Zhijun, et al. Preliminary discussion on constructing a "gas-electricity and renewable energy integration" system in natural gas purification plants under the dual-carbon background[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2022, 12(2): 166-169.
- [20] 丁显, 冯涛, 何广利, 等. 风电光伏波动性电源对电解水制氢电解槽影响的研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(10): 3275-3284.
- DING Xian, FENG Tao, HE Guangli, et al. Research progress of the influence of wind power and photovoltaic of power fluctuation on water electrolyzer for hydrogen production[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(10): 3275-3284.
- [21] KIM K, LEE C. Recent progress in electrochemical hydrogen sulfide splitting: Strategies for enabling sulfur-tolerant anodic reactions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469: 143861.
- [22] PIKAAR I, LIKOSOVA E M, FREGUIA S, et al. Electrochemical abatement of hydrogen sulfide from waste streams[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45(14): 1555-1578.
- [23] ZHENG Xiaohai, LEI Ganchang, WANG Shiping, et al. Advances in resources recovery of H₂S: A review of desulfurization processes and catalysts[J]. *ACS Catalysis*, 2023, 13(17): 11723-11752.
- [24] 段超, 唐春, 吴梦南, 等. 电催化分解硫化氢制氢脱硫研究进展 [J]. *天然气化工 (C1 化学与化工)*, 2021, 46(S1): 24-30.
- DUAN Chao, TANG Chun, WU Mengnan, et al. Progress in electrocatalytic decomposition of hydrogen sulfide to hydrogen and sulfur[J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2021, 46(S1): 24-30.
- [25] ANANI A A, MAO Z, WHITE R E, et al. Electrochemical production of hydrogen and sulfur by low-temperature decomposition of hydrogen sulfide in an aqueous alkaline solution[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1990, 137(9): 2703.
- [26] ATEYA B G, AL-KHARAFI F M, ABDALLAH R M, et al. Electrochemical removal of hydrogen sulfide from polluted brines using porous flow through electrodes[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2005, 35(3): 297-303.
- [27] DUTTA P K, ROZENDAL R A, YUAN Zhiguo, et al. Electrochemical regeneration of sulfur loaded electrodes[J]. *Electrochemistry Communications*, 2009, 11(7): 1437-1440.
- [28] KIM K, KIM H T, HAN J I. Compatibility of platinum with alkaline sulfide fuel: Effectiveness and stability of platinum as an anode catalyst in direct alkaline sulfide fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(11): 4141-4145.
- [29] KAPUSTA S, VIEHBECK A, WILHELM S M, et al. The anodic oxidation of sulfide on platinum electrodes[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1983, 153(1/2): 157-174.
- [30] KUMAR M, NAGAI AH T C. Efficient production of hydrogen from H₂S via electrolysis using a CoFeS₂ catalyst[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(13): 7048-7057.
- [31] KUMAR M, NAGAI AH T C. Pure hydrogen and sulfur production from H₂S by an electrochemical approach using a NiCu-MoS₂ catalyst[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2022, 10(24): 13031-13041.
- [32] GARG K, KUMAR M, KAUR S, et al. Electrochemical production of hydrogen from hydrogen sulfide using cobalt cadmium sulfide[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(23): 27845-27852.
- [33] DUAN Chao, TANG Chun, YU Shan, et al. Efficient electrocatalytic desulfuration and synchronous hydrogen evolution from H₂S via anti-sulfuretted NiSe nanowire array catalyst[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2023, 324: 122255.
- [34] 陈昱杉, 李琦, 郑博, 等. 基于风光氢储一体化系统的容量配置优化及经济评价 [J]. *油气储运*, 2023, 42(7): 763-773.
- CHEN Yusha, LI Qi, ZHENG Bo, et al. Capacity allocation optimization and economic evaluation based on wind-solar-hydrogen-storage integrated system[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(7): 763-773.
- [35] 白章, 韩运滨, 王智, 等. 基于功率分配策略的风光互补复合制氢系统与容量优化 [J]. *油气储运*, 2023, 42(8): 910-921.
- BAI Zhang, HAN Yunbin, WANG Zhi, et al. Wind-solar hybrid hydrogen production system and capacity optimization based on power allocation strategy[J]. *Oil & Gas Storage and*

- Transportation, 2023, 42(8): 910-921.
- [36] 李争, 张蕊, 孙鹤旭, 等. 可再生能源多能互补制—储—运氢关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 445-462.
LI Zheng, ZHANG Rui, SUN Hexu, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 445-462.
- [37] 郝世超, 梁鹏飞, 吴伟. 可再生能源制氢技术及应用综述[J]. 上海节能, 2019, 37(5): 325-328.
HAO Shichao, LIANG Pengfei, WU Wei. Renewable energy making hydrogen production technology and its application summarization[J]. Shanghai Energy Conservation, 2019, 37(5): 325-328.
- [38] 王涵, 李世安, 杨发财, 等. 氢气制取技术应用现状及发展趋势分析[J]. 现代化工, 2021, 41(2): 23-27.
WANG Han, LI Shi'an, YANG Facai, et al. Application status and development trend analysis of hydrogen production technologies[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(2): 23-27.
- [39] 叶骥, 陈创庭, 黄慧, 等. 基于双因子学习曲线模型的化学链燃煤电站技术经济性[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(8): 82-89.
YE Ji, CHEN Chuangting, HUANG Hui, et al. Cost analysis of chemical looping coal-fired power plant based on a double factors learning curve model[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(8): 82-89.
- [40] 袁铁江, 张红, 杨洋, 等. 新能源-PEM 电解制氢全寿命经济性评估[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 30-35.
YUAN Tiejia, ZHANG Hong, YANG Yang, et al. Whole life cycle economic assessment of renewable energy-PEM electrolyzer hydrogen production[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 30-35.
- [41] 孙建梅, 郭恒博. 近海海上风电制氢经济性分析[J/OL]. 现代电力: 1-8[2024-09-13]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0183>.
SUN Jianmei, GUO Xuanbo. Economic analysis of hydrogen production from near-shore wind power[J]. Modern Electric Power: 1-8[2024-09-13]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0183>.
- [42] 宋天琦, 马韵婷, 张智慧. 光伏耦合电解水制氢系统作为虚拟电厂资源的运行模式与经济性分析[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 465-472.
SONG Tianqi, MA Yunting, ZHANG Zhihui. Operation mode and economy of photovoltaic coupled water electrolysis hydrogen production system as a kind of virtual power plant resource[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 465-472.
- [43] 张理, 叶斌, 尹晨旭, 等. 风电制氢经济性与发展前景分析[J]. 东北电力技术, 2020, 41(7): 5-9.
ZHANG Li, YE Bin, YIN Chenxu, et al. Economy and development prospects analysis of wind power hydrogen production[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(7): 5-9.
- [44] 朱振涛, 吴丘驰, 张焱, 等. 考虑容量优化的光伏制氢盐穴储氢系统经济性分析[J]. 电力建设, 2024, 45(4): 26-36.
ZHU Zhentao, WU Qiuchi, ZHANG Yan, et al. Economic analysis of photovoltaic hydrogen-generation system using salt cavern for hydrogen storage considering capacity optimization[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 26-36.
- [45] 吴娅玲. 建筑光伏储能系统蓄电池运行策略与容量优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
WU Yaling. Research on battery operation strategy and capacity optimization of building photovoltaic energy storage system[D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [46] ZHANG Yisong, HUA Q S, SUN Li, et al. Life cycle optimization of renewable energy systems configuration with hybrid battery/hydrogen storage: A comparative study[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30: 101470.
- [47] MINUTILLO M, PERNA A, FORCINA A, et al. Analyzing the levelized cost of hydrogen in refueling stations with on-site hydrogen production via water electrolysis in the Italian scenario[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(26): 13667-13677.
- [48] 许传博, 张文座, 李忻颖, 等. 离网型光伏制氢项目经济性分析及压力测试[J]. 现代电力, 2023, 40(1): 1-7.
XU Chuanbo, ZHANG Wenzuo, LI Xinying, et al. Economic analysis and stress test of off-grid photovoltaic hydrogen production projects[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(1): 1-7.
- [49] 孙和通. 分布式光伏电站经济性指标优化分析[J]. 邮电设计技术, 2023, 29(6): 73-79.
SUN Hetong. Analysis of economic indicators optimization for distributed photovoltaic power plants[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2023, 29(6): 73-79.
- [50] LI Runzhao, JIN Xiaoming, YANG Ping, et al. Techno-economic analysis of a wind-photovoltaic-electrolysis-battery hybrid energy system for power and hydrogen generation[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 281: 116854.
- [51] HESSE H C, MARTINS R, MUSILEK P, et al. Economic optimization of component sizing for residential battery storage systems[J]. Energies, 2017, 10(7): 835.
- [52] 宋东新, 王世乐, 苗剑, 等. 可再生能源制氢技术经济性探讨及成本分析[J]. 中外能源, 2023, 28(11): 24-29.
SONG Dongxin, WANG Shile, MIAO Jian, et al. Economics and cost analysis of technologies for hydrogen production from renewable energy[J]. Sino-Global Energy, 2023, 28(11): 24-29.
- [53] 范旭强, 陈建荣, 吴谋远, 等. 油气田企业新能源产业发展现状及合作融资模式探析[J]. 国际石油经济, 2021, 29(10): 7-18.
FAN Xuqiang, CHEN Jianrong, WU Mouyuan, et al. Study on the development status and cooperative financing mode of new energy of oil and gas field companies[J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(10): 7-18.

(修改回稿日期 2024-09-20 编辑 罗冬梅)



本文互动