

引文: 宋虎潮, 冯景灏, 王舒曼, 等. 电气化 LNG 蒸汽重整制氢系统集成与优化[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1362-1368.

SONG Huchao, FENG Jinghao, WANG Shuman, et al. Integration and optimization of electrified LNG steam reforming hydrogen production system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1362-1368.

电气化 LNG 蒸汽重整制氢系统集成与优化

宋虎潮 冯景灏 王舒曼 席宇航 马茜睿 刘银河

西安交通大学能源与动力工程学院·动力工程多相流国家重点实验室

摘要: 全球对清洁氢能需求与日俱增, 甲烷蒸汽重整工艺因排放高而无法未来社会对清洁氢能的需求, 可再生能源电解水技术高成本、低效率限制了其发展。针对上述问题, 将可再生电能加热引入甲烷蒸汽重整工艺, 同时高效集成碳捕集工艺与 LNG 冷能回收系统, 提出电气化 LNG 蒸汽重整制氢系统。建立电气化 LNG 蒸汽重整制氢系统模型并进行热力学性能分析, 分析重整反应温度、反应水碳比等关键参数对系统焓效率、电效率的影响。研究表明: 新型制氢系统的焓效率、电效率分别高达 83.2%、89.5%, 电效率相比主流电解水制氢效率提升至少 12.31%。新型制氢系统可实现高效、清洁的氢能供应, 为实现可再生电能制氢提供新思路与新方法。(图 7, 表 3, 参 29)

关键词: 电气化 LNG 蒸汽重整制氢; 高效碳捕集; LNG 冷能利用; 热力学性能分析

中图分类号: TE09

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)12-1362-07

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.005

Integration and optimization of electrified LNG steam reforming hydrogen production system

SONG Huchao, FENG Jinghao, WANG Shuman, XI Yuhang, MA Xirui, LIU Yinhe

School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University//State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering

Abstract: The global demand for clean hydrogen energy is constantly increasing. However, the methane steam reforming process cannot satisfy the future social demand for clean hydrogen energy due to its high emission, while the development of water electrolysis technology via renewable energy is limited due to the high cost and the low efficiency. In response to the above issues, an electrified LNG steam reforming hydrogen production system was proposed by introducing the renewable electric heating into the methane steam reforming process, which efficiently integrates the carbon capture technology and the LNG cold energy recovery system. Meanwhile, a model of the electrified LNG steam reforming hydrogen production system was established, and its thermodynamic performance was analyzed. On this basis, investigation was conducted on the influence of the reforming temperature, water-to-carbon ratio and other key parameters on the exergy efficiency and electrical efficiency of the system. The research shows that the exergy efficiency and electrical efficiency of the novel hydrogen production system are as high as 83.2% and 89.5% respectively, and the electrical efficiency is 12.3% higher than the mainstream water electrolysis hydrogen production system. Generally, the novel hydrogen production system could achieve an efficient and clean hydrogen energy supply, providing a new idea and solution to achieve hydrogen production by renewable electricity. (7 Figures, 3 Tables, 29 References)

Key words: electrified LNG steam reforming hydrogen production, efficient carbon capture, LNG cold energy utilization, thermodynamic performance analysis

氢气是清洁能源的理想载体, 利用可再生电能制氢是未来获得氢能的主要途径, 可同时完成可再生能源富余电力的转化和利用^[1-2]。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》中指出, 氢是未来国际能源

体系的组成部分。国际能源署(International Energy Agency, IEA)预测2030年全球氢气需求将达到 1.8×10^8 t, 约为2021年全球氢气产量的2倍^[3]; 中国氢能联盟预测中国在2060年碳达峰之际氢需求量达

1.3×10^8 t, 接近 2021 年中国氢产量的 4 倍^[4]。根据现有技术水平, 将可再生能源的富余电力用于制氢储能仍没有高效的系统解决方案, 其发展主要受电解槽制氢效率低、成本高、规模小等缺陷的制约。

全球主流制氢方式为化石能源制氢, 其中采用甲烷蒸汽重整 (Steam Methane Reforming, SMR) 工艺的制氢量占 2020 年全球制氢总量的 48%^[5]。SMR 是一种高温下的强吸热反应 ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$, $\Delta H_{298} = 265 \text{ kJ/mol}$), 此外还包括放热的水气变换反应 ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$, $\Delta H_{298} = -41 \text{ kJ/mol}$)^[6-7]。

由于 SMR 反应为强吸热反应, 需要燃烧约甲烷消耗总量的 30% 为反应提供热量^[8], 带来烟气热损失的同时也带来大量 CO_2 排放。Simpson 等^[9]对 SMR 工艺进行焓分析发现, 42.8% 的焓损失由重整炉内的燃烧造成, 19.0% 的焓损失由排气烟气造成。Choe 等^[10]发现优化后 SMR 系统焓效率为 85.55%。Peng^[11]通过夹点分析对 SMR 工艺的换热工艺进行优化, 新工艺的热效率为 88.82%。Lee 等^[12]利用神经网络优化了不同工况下 SMR 系统的热效率, 发现最佳热效率为 91.26%, 比原系统的热效率高 8.40%。由于重整炉的燃烧效率低, 且烟气排放带走一部分能量, SMR 工艺的效率提升已达到瓶颈^[10]。此外, SMR 工艺中甲烷蒸汽重整及变换反应本身会产生 CO_2 , 燃烧供热也会排放 CO_2 , 导致 SMR 技术制取 1 kg H_2 的 CO_2 排放量高达 9.4~11.4 kg。SMR 工艺产生的 CO_2 排放约占全球碳排放总量的 3%^[13], 难以满足未来氢能生产碳中和的要求。Song 等^[14]提出电气化甲烷蒸汽重整制氢 (E-SMR), 通过用电加热代替甲烷燃烧, 可消除燃烧带来的烟气热损失与碳排放, 但并不能消除重整反应带来的碳排放, 重整反应制取 1 kg H_2 的 CO_2 排放量为 5.5 kg。根据中国氢能联盟提出的《低碳氢、清洁氢与可再生能源氢气标准及认定》标准, E-SMR 只满足低碳氢的阈值 (每制取 1 kg H_2 的 CO_2 排放量小于 14.51 kg), 不能满足清洁氢与可再生能源的阈值 (每制取 1 kg H_2 的 CO_2 排放量小于 4.9 kg)。为实现 E-SMR 清洁氢能生产, 通常在合成气出口设置如胺基吸收 (Monoethanolamine, MEA)^[15] 这种碳捕集与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 工艺对 CO_2 进行吸收, 但 MEA 工艺在脱附时需要大量的热能输入, 严重影响系统能效, 需要集成高效加热方案来降低该能耗^[16]。此外, CO_2 封存时压缩电耗高, 需要设置多级间冷以降低压缩 CO_2 能耗。

为此, 面向沿海地区资源禀赋, 利用沿海地区便捷获取的 LNG^[17] 与丰富的可再生电能^[18], 学者对 E-SMR、CCS 以及 LNG 冷能利用系统进行集成优化设计, 提出电气化 LNG 蒸汽重整制氢系统 (E-SLR)。首先, LNG 冷能可以为 CO_2 多级压缩提供间冷冷源, 有望在降低 CO_2 压缩电耗的同时回收 LNG 冷能。Sultan 等^[16]在 CCS 与 LNG 冷能利用之间耦合有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle, ORC), 将 CCS 系统造成的能源损失从 6.1% 降至 4.8%。Song 等^[19]分析了 CO_2 压缩热能与 LNG 冷能间耦合换热器、跨临界 CO_2 朗肯循环、 N_2 布雷顿循环共 3 种系统的性能, 发现耦合 N_2 布雷顿循环的系统可回收更多 LNG 冷能。其次, 在 E-SLR 中使用高效电热设备为 MEA 设备供热可实现 CO_2 的高效捕集。在此, 通过对 E-SLR 系统建模, 研究重整反应温度、水碳比 (水蒸气与甲烷摩尔比) 等参数对 E-SLR 系统焓效率与电效率的影响, 并以焓效率、电效率以及 CCS 能耗作为评估指标, 分析新系统在效率提升与碳捕集能耗方面的优势。

1 系统描述

1.1 E-SMR 系统

电气化甲烷蒸汽重整系统 E-SMR (图 1) 基于 SMR 工艺, 在重整反应器中引入电能提供热量。系统通过引入高温热泵实现产物余热的提质利用并与水蒸气制备过程匹配, 采用变换反应器利用反应释放的热量预热天然气。反应产生的合成气通过 MEA、变压吸附工艺 (Pressure Swing Adsorption, PSA) 分别完成 CO_2 、 H_2 的分离, 剩余的 CH_4 与 CO 返回系统再次反应。受限于高温热泵性能, 水的蒸发温度为 150°C , 饱

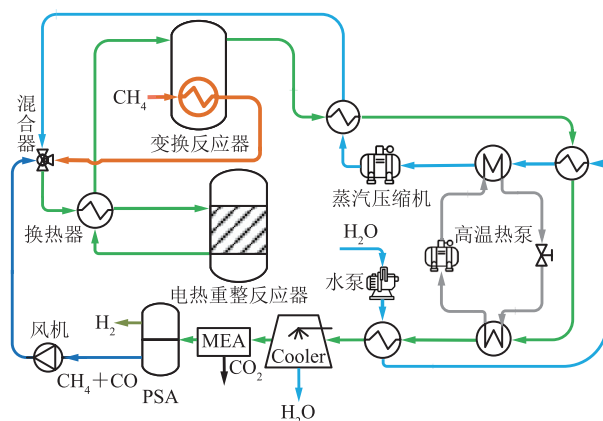


图 1 E-SMR 系统示意图
Fig. 1 E-SMR system

2.2 性能评估指标

以焓效率、电效率作为热力性能评价指标,系统焓效率表示系统输出焓与输入焓燃料的比值:

$$\eta_{EX} = \frac{E_{H_2}}{E_{LNGphy} + E_{LNGche} + E_{EL}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η_{EX} 为焓效率; E_{H_2} 为产生氢气的化学焓, $\text{kW}\cdot\text{h}$; E_{LNGphy} 为输入 LNG 的物理焓, $\text{kW}\cdot\text{h}$; E_{LNGche} 为输入 LNG 的化学焓, $\text{kW}\cdot\text{h}$; E_{EL} 为输入的电能, $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

电效率 η_{EL} 用于衡量可再生电能转化为氢能的效率,其计算式为:

$$\eta_{EL} = \frac{q_{H_2} V_{H_2} - q_{LNG} V_{LNG}}{E_{LNGphy} + E_{LNGche} + E_{EL}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: q_{H_2} 、 q_{LNG} 分别为 H_2 、LNG 的质量流量, kg/s ; V_{H_2} 、 V_{LNG} 分别为 H_2 、LNG 的高位发热量, kJ/kg 。

以捕集与封存 1 t CO_2 所消耗的电能 E_{CO_2} 作为

CCS 技术的能耗指标,其计算式如下:

$$E_{CO_2} = \frac{E_{CO_2,comp} + E_{LTHP}}{Q_{CO_2}} \quad (3)$$

式中: $E_{CO_2,comp}$ 为 CO_2 压缩机的净电耗,即 CO_2 压缩机输入功减去 N_2 布雷顿循环与天然气膨胀机输出功后的电耗, $\text{kW}\cdot\text{h}$; E_{LTHP} 为低温热泵的电耗, $\text{kW}\cdot\text{h}$; Q_{CO_2} 为捕集的 CO_2 流量, t/h 。

2.3 模型验证

将平衡反应器模型在水碳比为 3 的情况下得到的 CH_4 转化率和 H_2 产率的计算结果与文献[26]中实验结果进行对比(表 2),结果表明重整反应器模型的相对误差低于 1.5%。将 R1233zd 为工作流体的热泵模拟结果与实验参考值[27]对比,发现性能系数(Coefficient of Performance, COP)的相对误差不超过 0.5%(表 3),认为模拟计算的结果准确。

表 2 平衡反应器模型计算结果误差分析表
Table 2 Error analysis on the calculation results of equilibrium reactor model

| 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | CH_4 转化率 | | | H_2 产率 | | |
|------------------------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|-------|
| | 参考值 ^[25] | 模拟值 | 相对误差 | 参考值 ^[25] | 模拟值 | 相对误差 |
| 860 | 99.99% | 99.87% | -0.12% | 82.56% | 82.75% | 0.23% |
| 830 | 99.93% | 99.87% | -0.06% | 82.92% | 83.28% | 0.44% |
| 800 | 99.74% | 99.82% | 0.08% | 83.16% | 83.62% | 0.55% |
| 770 | 99.73% | 99.77% | 0.04% | 83.15% | 83.97% | 0.99% |
| 740 | 99.21% | 99.21% | 0.00% | 83.01% | 84.06% | 1.26% |
| 710 | 97.98% | 97.97% | -0.01% | 82.78% | 83.81% | 1.24% |

表 3 以 R1233zd 为工作流体的热泵模型结果和文献实验值对比表

Table 3 Comparison of the model results of heat pump with R1233zd as the working fluid and the experimental values in literature

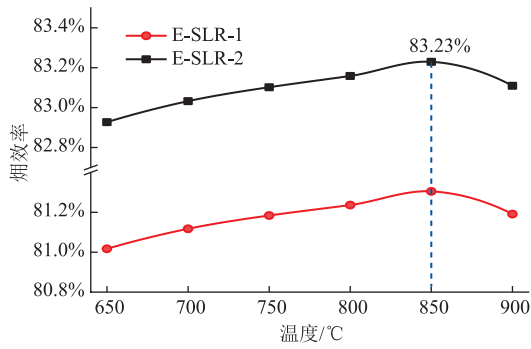
| 蒸发温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 冷凝温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 蒸发压力/ MPa | 冷凝压力/ MPa | COP | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|-----------|
| | | | | 模拟值 | 参考值 | 相对误差 |
| 30 | 110 | 0.154 | 1.290 | 2.909 2 | 2.916 4 | -0.246 9% |
| 40 | 120 | 0.215 | 1.575 | 2.885 7 | 2.881 8 | -0.135 3% |
| 50 | 130 | 0.293 | 1.980 | 2.835 1 | 2.836 9 | -0.063 4% |
| 60 | 140 | 0.390 | 2.300 | 2.745 5 | 2.738 8 | 0.244 6% |
| 70 | 150 | 0.510 | 2.570 | 2.647 4 | 2.636 7 | 0.405 8% |

3 热力性能分析

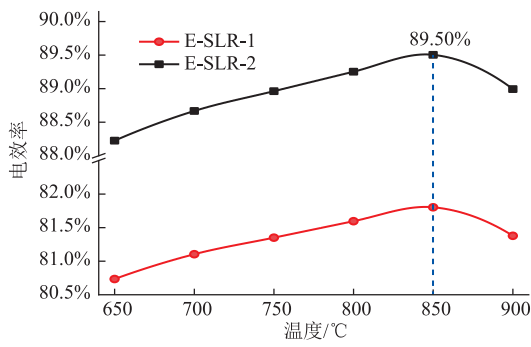
3.1 重整温度对系统性能的影响

固定水碳比为 3 计算分析 E-SLR-1、E-SLR-2 两系统在不同重整温度下的焓效率变化(图 4a)。由于 E-SLR-2 中低温热泵为 MEA 供热以及 LNG 冷能的充分利用,其焓效率较 E-SLR-1 系统高约 2%。随着重整温度升高,两系统焓效率均先升高后降低,初始增加的原因:温度升高使重整反应更充分,系统内部循环的 CH_4

与 CO 下降,降低了重整反应器热负荷。后续效率下降的原因:重整反应已足够充分,过高温使得电耗量过大。重整温度为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时两系统均达到最大焓效率, E-SLR-2 系统的焓效率可达 83.23%。分析两系统在不同重整温度下的电效率变化(图 4b)可知, E-SLR-2 系统的电效率较 E-SLR-1 系统高约 8%。两系统的电效率均随重整温度的升高先升高后下降,变化原因与焓效率变化原因基本一致。在重整温度为 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时两系统均达到最大电效率, E-SLR-2 系统的电效率可达 89.50%。

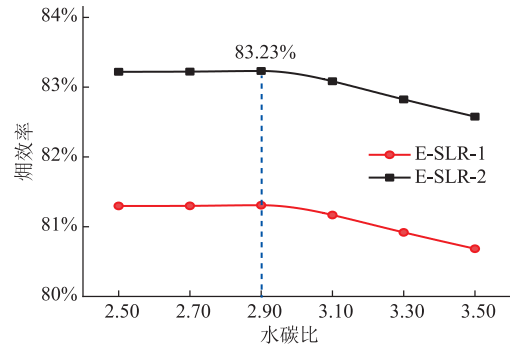


(a) 焓效率

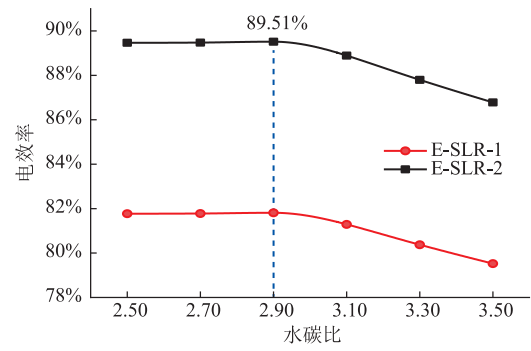


(b) 电效率

图4 重整反应温度对 E-SLR 系统焓效率、电效率的影响曲线
Fig. 4 Effect of reforming temperature on the exergy efficiency and electrical efficiency of E-SLR system



(a) 焓效率



(b) 电效率

图5 水碳比对 E-SLR 系统焓效率、电效率的影响曲线
Fig. 5 Effect of water-to-carbon ratio on the exergy efficiency and electrical efficiency of E-SLR system

3.2 水碳比对系统性能的影响

固定重整温度为 840 °C，探究 E-SLR-1、E-SLR-2 两系统在不同水碳比下焓效率的变化(图 5a)可知，初始两系统焓效率基本不随水碳比的变化而变化。究其原因：一方面，水碳比上升使得重整反应愈加充分，系统内循环的反应物减少使得重整反应器的能耗下降；另一方面，水碳比的上升导致蒸汽压缩机与高温热泵能耗上升，而在水碳比 2.50~2.90 时用于水蒸气制备的电能能耗上升幅度与重整反应器能耗下降幅度基本持平，表现出焓效率保持不变。在水碳比为 2.90~3.50 时，两系统焓效率均随水碳比的升高而减小，原因为：水碳比大于 2.90 之后甲烷重整反应比较充分，重整反应器能耗基本不变，而蒸汽压缩机与高温热泵能耗仍持续上升，导致焓效率下降。E-SLR-2 系统的焓效率始终较 E-SLR-1 系统高约 2%，其焓效率在水碳比 2.90 时达到最大，为 83.23%。分析两系统在不同水碳比下的电效率(图 5b)可知：在水碳比 2.50~2.90 时，两系统电效率均基本不变；在水碳比 2.90~3.50 时，两系统电效率均随水碳比升高而减小。其原因与焓效率变化原因相同。E-SLR-2 系统的电效率在水碳比 2.90 时达到最大，为 89.51%。

3.3 热力学性能分析

设定系统重整温度为 840 °C、水碳比为 2.90，分析 E-SLR-2 中各部分输入焓的占比(图 6)，其中 LNG 化学焓占比最高，为 73%，是制取氢气能量的主要来源。LNG 物理焓占比 2%，对该部分焓的有效利用是 E-SLR-2 系统焓效率相比 E-SLR-1 系统提升因素之一。电能输入焓占比 25%，其中电热重整反应器的输入焓占比最大。因此，系统制取氢气中的 25% 是可再生电能制取的“绿氢”，相比甲烷重整集成碳捕集工艺制取的氢气更加清洁。将相关数据代入式(3)E-SLR-2 的碳捕集与封存能耗由低温热泵与 CO₂ 压缩机能耗组成，为每吨 CO₂ 101 kW·h，相比 E-SLR-1 的碳捕集能耗(每吨 CO₂ 271 kW·h)下降了 62%。

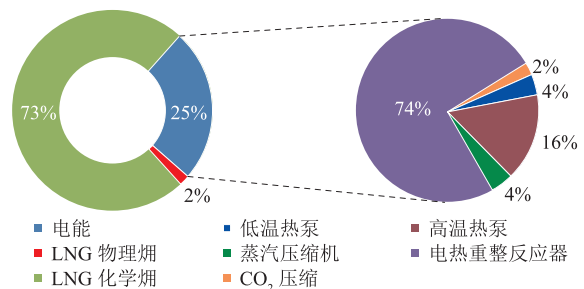


图6 E-SLR-2 系统输入焓分析示意图
Fig. 6 Input exergy analysis of E-SLR-2 system

3.4 系统对比分析

该 E-SLR 系统具有较高的电效率,为了验证该系统将可再生电能转化为氢能具有效率优势,对比分析该系统与主流电解水制氢工艺(康明斯公司的碱性电解槽工艺、质子交换膜电解槽工艺)的电效率(图 7)。可见, E-SLR-2 系统的电效率最高,其电效率相比碱性电解槽工艺、质子交换膜电解槽工艺分别提升了 17.31%、12.31%^[28-29]。

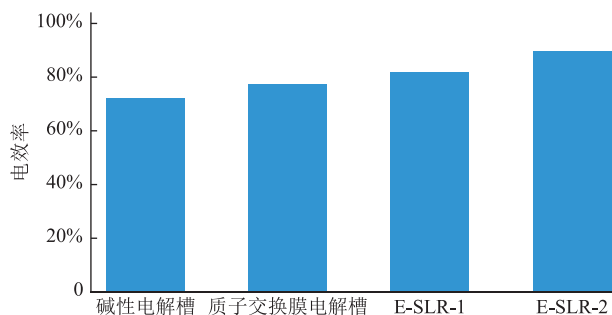


图 7 E-SLR 系统与电解水工艺电效率对比图

Fig. 7 Electrical efficiency comparison of E-SLR system and the electrolysis technology

4 结论

提出并构建集电气化甲烷蒸汽重整制氢系统、CCS 系统、LNG 冷能利用系统为一体的低碳高效制氢系统,即电气化 LNG 蒸汽重整制氢系统,并建立模型分析其热力学性能,主要结论如下:

(1) 低温热泵与 MEA 集成,可实现反应产物余热提质利用与低能耗的 CO₂ 分离,反应产物余热经过低温热泵提质利用后可以满足 MEA 分离 CO₂ 用热需求,未被捕集的 CO₂ 与合成气再次进入系统循环,理论上系统所产生的 CO₂ 都会被捕集,制氢过程几乎不存在碳排放,完全满足清洁氢认定标准。

(2) 通过重整温度与水碳比关键参数的优化分析,提出的 E-SLR-2 系统捕集每吨 CO₂ 的能耗低至 101 kW·h, E-SLR-2 系统电效率达 89.51%, 焓效率达 83.23%, 相比 E-SLR-1 系统分别提升 7.7%、1.9%。

(3) 该 E-SLR 系统制氢工艺相比电解水制氢工艺的电效率提升 12.31%, 大幅提升了可再生电能制氢的效率。该系统中电能以电加热的方式为甲烷蒸汽重整反应供能,可实现可再生电能的大规模制氢。电热重整反应器的设计优化与系统集成度仍有进一步提升空间,可为未来电气化 LNG 重整制氢系统研究提供参考。

参考文献:

- [1] 刘翠伟,崔兆雪,张家轩,裴业斌,段鹏飞,李璐伶,等. 掺氢天然气管道的分层现象[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 153-161. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2022.05.017.
- LIU C W, CUI Z X, ZHANG J X, PEI Y B, DUAN P F, LI L L, et al. Stratification in pipelines with hydrogen into natural gases[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(5): 153-161.
- [2] LI X Y, MULDER M. Value of power-to-gas as a flexibility option in integrated electricity and hydrogen markets[J]. Applied Energy, 2021, 304: 117863. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117863.
- [3] 国际能源署(IEA). Global hydrogen review 2022[R]. 巴黎: IEA, 2022: 4-5.
- IEA. Global hydrogen review 2022[R]. Paris: IEA, 2022: 4-5.
- [4] 财联社, 新能源日报, 智慧芽创新研究中心. 2022 年中国氢能行业技术发展洞察报告[R]. 上海: 财联社, 2022: 5-6.
- Cailian Society, New Energy Daily, Zhihuiya Innovation Research Center. Insight report on the technological development of China's hydrogen energy industry in 2022[R]. Shanghai: Cailian Society, 2022: 5-6.
- [5] MEHRPOOYA M, HABIBI R. A review on hydrogen production thermochemical water-splitting cycles[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 123836. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123836.
- [6] ROSTRUP-NIELSEN J R, SEHESTED J, NOERSKOV J K. Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO₂ reforming[J]. ChemInform, 2003, 34(17): 65-139. DOI: 10.1002/chin.200317288.
- [7] XU J G, FROMENT G F. Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics[J]. AIChE Journal, 1989, 35(1): 88-96. DOI: 10.1002/aic.690350109.
- [8] SHI X H, WANG F Q, CHENG Z M, LIANG H X, DONG Y, CHEN X. Numerical analysis of the biomimetic leaf-type hierarchical porous structure to improve the energy storage efficiency of solar driven steam methane reforming[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(34): 17653-65. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.02.171.
- [9] SIMPSON A P, LUTZ A E. Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(18): 4811-4820. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.08.025.
- [10] CHO E C, HAIDER J, LIM H. Carbon capture and liquefaction

- from methane steam reforming unit: 4E's analysis (energy, exergy, economic, and environmental)[J]. *Applied Energy*, 2023, 332: 120545. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120545.
- [11] PENG X D. Analysis of the thermal efficiency limit of the steam methane reforming process[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(50): 16385-16392. DOI: 10.1021/ie3002843.
- [12] LEE J, HONG S, CHO H, LYU B, KIM M, KIM J, et al. Machine learning-based energy optimization for on-site SMR hydrogen production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114438. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114438.
- [13] WISMANN S T, ENGBÆK J S, VENDELBO S B, BENDIXEN F B, ERIKSEN W L, AASBERG-PETERSEN K, et al. Electrified methane reforming: a compact approach to greener industrial hydrogen production[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 756-759. DOI: 10.1126/science.aaw8775.
- [14] SONG H C, LIU Y H, BIAN H, SHEN M F, LIN X L. Energy, environment, and economic analyses on a novel hydrogen production method by electrified steam methane reforming with renewable energy accommodation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 258: 115513. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115513.
- [15] 赵东亚, 王家凤, 田群宏, 陆诗建. MEA 法碳捕集工艺再生塔能耗优化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(2): 181-186. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.022.
- ZHAO D Y, WANG J F, TIAN Q H, LU S J. Energy consumption optimization of regeneration tower for MEA CO₂ capture process[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 45(2): 181-186.
- [16] SULTAN H, MUHAMMAD H A, BHATTI U H, MIN G H, BAEK I H, BAIK Y J, et al. Reducing the efficiency penalty of carbon dioxide capture and compression process in a natural gas combined cycle power plant by process modification and liquefied natural gas cold energy integration[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114495. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114495.
- [17] PFOSE S, SCHAUER O, COSTA Y. Acceptance of LNG as an alternative fuel: determinants and policy implications[J]. *Energy Policy*, 2018, 120: 259-267. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.05.046.
- [18] 高阳, 郭凯凯, 李琪, 张康鑫, 童晓凡, 马秦慧, 等. 浙江沿海地区可再生能源制氢的成本研究[J]. *能源工程*, 2022, 42(3): 45-49. DOI: 10.16189/j.cnki.nygc.2022.03.005.
- GAO Y, GUO K K, LI Q, ZHANG K X, TONG X F, MA Q H, et al. Research on the cost of hydrogen production from renewable energy in coastal areas of Zhejiang[J]. *Energy Engineering*, 2022, 42(3): 45-49.
- [19] SONG H C, LIN X L, SHEN M F, BIAN H, LIU Y H. System design and integration for electrified steam methane reforming with LNG cold utilization[C]. Xi'an: The 1st World Conference on Multiphase Transportation, 2022: 220184.
- [20] LEE J W, AHN H, KIM S, KANG Y T. Low-concentration CO₂ capture system with liquid-like adsorbent based on monoethanolamine for low energy consumption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 390: 136141. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136141.
- [21] ANTZARA A, HERACLEOUS E, BUKUR D.B., LEMONIDOU A.A. Thermodynamic analysis of hydrogen production via chemical looping steam methane reforming coupled with in situ CO₂ capture. *Energy Procedia*. 2015, 32: 115-128. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.694.
- [22] FAHEEM H H, TANVEER H U, ABBAS S Z, MAQBOOL F. Comparative study of conventional steam-methane-reforming (SMR) and auto-thermal-reforming (ATR) with their hybrid sorption enhanced (SE-SMR & SE-ATR) and environmentally benign process models for the hydrogen production[J]. *Fuel*, 2021, 297: 120769. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120769.
- [23] ZHU L, LI L L, FAN J M. A modified process for overcoming the drawbacks of conventional steam methane reforming for hydrogen production: Thermodynamic investigation[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 104: 792-806. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.10.022.
- [24] ANTZARA A, HERACLEOUS E, BUKUR D B, LEMONIDOU A A. Thermodynamic analysis of hydrogen production via chemical looping steam methane reforming coupled with in situ CO₂ capture[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 6576-6589. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.694.
- [25] SHI W R, YANG H W, SHEN Y H, FU Q, ZHANG D H, FU B. Two-stage PSA/VSA to produce H₂ with CO₂ capture via steam methane reforming (SMR)[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(41): 19057-19074. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.077.
- [26] FRATE G F, FERRARI L, DESIDERI U. Analysis of suitability ranges of high temperature heat pump working fluids[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 150: 628-640.

(下转第 1375 页)

- LI Y X, WANG X K, DONG X Y, GUAN S Y. Ultrasonic phased array detection technology of forming defects of wheel hub bearing raceway[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(11): 61-66.
- [18] 曹燕亮, 云维锐. 超声相控阵多聚焦技术在奥氏体不锈钢检测中的应用[J]. 无损探伤, 2022, 46(6): 43-45. DOI: 10.13689/j.cnki.cn21-1230/th.2022.06.008.
- CAO Y L, YUN W R. Application of ultrasonic phased array multi focus technique in austenitic stainless steel testing[J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 46(6): 43-45.
- [19] 梁国安, 姚叶子, 郑凯, 许倩, 王海龙, 王海涛. 基于超声相控阵的角焊缝缺陷信号重构方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 222-228. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.03.037.
- LIANG G A, YAO Y Z, ZHENG K, XU Q, WANG H L, WANG H T. Research on reconstruction method of fillet weld defect signal based on ultrasonic phased array[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(3): 222-228.
- [20] 王鑫龙, 孙文磊, 张建杰, 黄勇, 黄海博. 基于点云数据的逆向工程技术研究综述[J]. 制造技术与机床, 2018(2): 49-53. DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2018.02.010.
- WANG X L, SUN W L, ZHANG J J, HUANG Y, HUANG H B. Review on reverse engineering research based on point cloud data[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(2): 49-53.
- [21] 杨正世. 三维点云数据处理关键技术的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- YANG Z S. Research on key technology of 3D point cloud data processing[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [22] 彭娉, 陈时健, 任利杰, 于新海, 陈尚书, 李锦. 三偏心蝶阀密封面在位测量的点云数据处理方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 30-38. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108479.
- PENG P, CHEN S J, REN L J, YU X H, CHEN S S. A point cloud data processing method for in-position measurement of sealing surface of triple eccentric butterfly valves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 30-38.
- (收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2023-02-01; 编辑: 李在蓉)
-
- 基金项目:** 山东省自然科学基金资助项目“声液耦合微细磨料水射流流体力学特性及其加工性能研究”, ZR2020ME154.
- 作者简介:** 张玉龙, 男, 1997年生, 在读硕士生, 2020年毕业于青岛农业大学海都学院机械设计制造及其自动化专业, 现主要从事水下内壁腐蚀管道检测、防护及图像处理的研究工作。地址: 山东省淄博市张店区新村西路266号, 255000。电话: 19819708184。Email: 1263137541@qq.com
- 通信作者:** 侯荣国, 男, 1979年生, 教授, 2015年博士毕业于山东大学机械工程专业, 现主要从事管道腐蚀与防护、超声无损检测的研究工作。地址: 山东省淄博市张店区新村西路266号, 255000。电话: 13053387019。Email: hourongguo212@163.com

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



(上接第 1368 页)

- DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.01.034.
- [27] MIKIELEWICZ D, WAJS J. Performance of the very high-temperature heat pump with low GWP working fluids[J]. Energy, 2019, 182: 460-470. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.203.
- [28] 俞红梅, 衣宝廉. 电解制氢与氢储能[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 58-65. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2018.03.009.
- YU H M, YI B L. Hydrogen for energy storage and hydrogen production from electrolysis[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 58-65.
- [29] Anon. Cummins, discover cummins electrolyzer technologies[EB/OL]. (2023-01-01)[2023-05-09]. https://www.cummins.com/new-power/applications/about-hydrogen.
- (收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-05-24; 编辑: 刘朝阳)
- 基金项目:** 陕西省重点研发计划项目“煤梯级利用兰炭生产新技术与装置”, 2021GXLH-Z-088.
- 作者简介:** 宋虎潮, 男, 1998年生, 在读博士生, 2020年毕业于中南大学新能源科学与工程专业, 现主要从事动力工程及工程热物理专业方向的研究工作。地址: 陕西省西安市(长安区)西安交通大学创新港校区, 710041。电话: 13572802083。Email: 986278776@qq.com
- 通信作者:** 刘银河, 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 2005年博士毕业于西安交通大学热能工程专业, 现主要从事热能工程相关研究。地址: 陕西省西安市咸宁西路28号, 710049。电话: 029-82664971。Email: yinheliu@mail.xjtu.edu.cn

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

