

电流密度和运行温度对 PEM 水电解制氢能耗的影响*

朱宁伟[†], 赵京辉, 谢海洋, 宋学平, 吉力强, 郭辉进

(安泰环境工程技术有限公司, 北京 100081)

摘要: 质子交换膜 (PEM) 水电解制氢技术是采用绿电制取绿氢的重要方法, 对我国实现双碳目标具有重要意义。优化运行参数是降低 PEM 水电解制氢系统能耗的一种重要途径。建立一套工业级 PEM 水电解制氢实验装置, 通过现场实验, 考察电流密度和运行温度对 PEM 水电解制氢系统能耗的影响, 探讨优化运行参数降低运行能耗的方法。结果表明, 当电流密度为 $0.2 \sim 1.4 \text{ A/cm}^2$ 、运行温度为 $20 \sim 60^\circ\text{C}$, PEM 水电解制氢系统单位能耗分别与电流密度、运行温度负相关。提高运行温度会引起电解电压下降, 系统单位直流能耗显著降低。提高电流密度会造成系统单位直流能耗升高, 而单位交流能耗降低。

关键词: 质子交换膜; 水电解; 电流密度; 运行温度; 能耗

中图分类号: TK91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2024.01.004

Influence of Current Density and Operating Temperature on Energy Consumption of PEM Water Electrolysis Hydrogen Generation

ZHU Ningwei[†], ZHAO Jinghui, XIE Haiyang, SONG Xueping, JI Liqiang, Guo Huijin

(AT&M Environmental Engineering Technology Co. Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Proton exchange membrane (PEM) water electrolysis for hydrogen production is a vital technology that acquires hydrogen with green electricity and achieves China's carbon peaking and carbon neutrality goals. It is a good way to reduce energy consumption for PEM water electrolysis system by optimizing operating parameters. In this study, an industrial-scale PEM electrolysis system is set up. The current density and operating temperature influence energy consumption are investigated based on local experiments. Methods are discussed to cut down the energy consumption by optimizing operating parameters. The system shows a decrease in the specific energy consumption when current density and operating temperature are increased from 0.2 to 1.4 A/cm^2 and from 20 to 60°C , respectively. A decline in average cell voltage and the specific direct current energy consumption is observed as the operating temperature is elevated. The specific direct current energy consumption is increased, and the specific alternate current energy consumption is decreased when the current density of the stack is improved in the system.

Keywords: proton exchange membrane; water electrolysis; current density; operating temperature; energy consumption

0 引言

氢气作为清洁无污染的二次能源, 具有质量能量密度高、可储存、用途广泛的技术优势。采用可再生能源水电解制氢是目前众多氢气来源方案中碳排放最低的工艺^[1], 被认为是我国实现“碳达峰”和“碳中和”目标的主要途径和未来低碳经济的主

流方向^[2]。在水电解制氢技术中, 质子交换膜 (proton exchange membrane, PEM) 水电解制氢具有可适用于风能、太阳能等可再生能源的间歇性和波动性, 占地小、启动快速的优点, 成为目前绿氢制取重点关注的技术^[3]。但目前 PEM 水电解技术还不成熟, 尚未在我国广泛商业化应用。

制氢能耗是反映制氢经济性的重要参数。

* 收稿日期: 2023-07-03 修订日期: 2023-08-17
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB3803804)

[†] 通信作者: 朱宁伟, E-mail: zhuningwei@atmcn.com

引用本文: 朱宁伟, 赵京辉, 谢海洋, 等. 电流密度和运行温度对 PEM 水电解制氢能耗的影响[J]. 新能源进展, 2024, 12(1): 35-39.

Citation: ZHU Ningwei, ZHAO Jinghui, XIE Haiyang, et al. Influence of current density and operating temperature on energy consumption of PEM water electrolysis hydrogen generation[J]. Advances in new and renewable energy, 2024, 12(1): 35-39.

0.5 级。为研究电流密度对能耗的影响, 实验中固定其他运行参数, 选择电流密度分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 A/cm² 进行 PEM 水电解制氢能耗测量实验。电流密度的变化通过控制电源整流器输出电流实现。

2.3 运行温度

电解槽运行温度采用数显的热敏电阻温度计测量。电解槽运行温度的调节通过冷水机调温实现。考察运行温度对能耗的影响时, 固定其他运行参数, 在一定电流密度下, 选择不同的温度进行能耗测量。根据实验条件, 选择 20、30、40、50、60 ℃ 等温度值进行实验。

2.4 产氢速率的测定

PEM 水电解制氢系统氢气产量检测方法采用直流电测试值法^[14]。在标准状态下, 制取 1 m³ 氢气所需理论电量为 2 390 A·h, 电流测试值计算产氢速率如下:

$$q_h = \frac{In\eta_0}{2390} \quad (1)$$

式中: q_h 为产氢速率, m³/h; I 为电解槽直流电流, A; n 为电解槽片数, 个; η_0 为电流效率, 取 100%。

2.5 制氢效率的测定

制氢效率 η_h 按公式 (2) 计算^[14]:

$$\eta_h = \frac{1.48 \times 2390}{1000W} \quad (2)$$

式中: 1.48 为热中性电压, V; W 为 PEM 水电解制氢系统单位能耗, kW·h/m³。

3 结果与讨论

3.1 电流密度对 PEM 水电解制氢系统能耗的影响

图 2 为 PEM 水电解制氢系统不同电流密度下的产氢速率变化, 产氢速率随电流密度的增加而提高。保持电解槽运行温度 25 ℃ 不变, 在不同电流密度下测定系统单位能耗, 结果如图 3 所示。电流密度对系统单位能耗的影响非常显著, 随着电流密度的增加, 系统单位能耗逐渐降低, 当电流密度为 1.4 A/cm² 时, 系统单位能耗降低至 6.76 kW·h/m³。与电流密度为 0.2 A/cm² 时相比, 系统单位能耗降低了 2.59 kW·h/m³, 降低 27.7%。

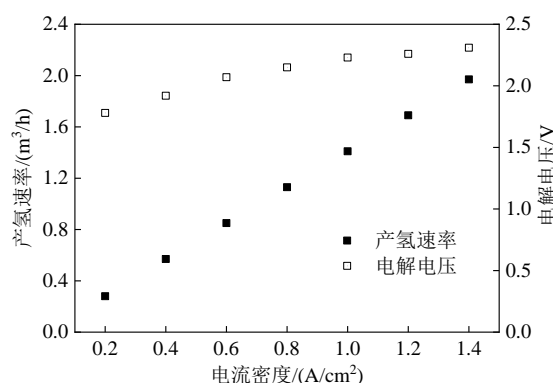


图 2 电流密度与产氢速率的关系

Fig. 2 Relationship between current density and hydrogen generation rate

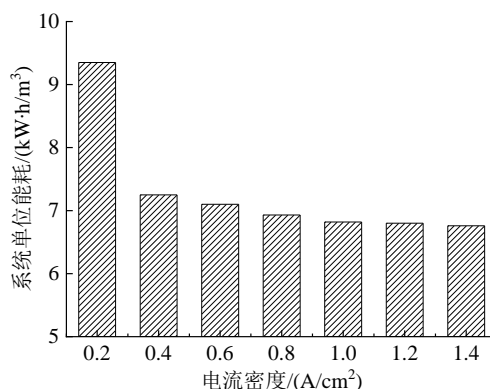


图 3 电流密度与单位能耗的关系

Fig. 3 Relationship between current density and specific energy consumption

图 4 为系统单位直流能耗和单位交流能耗分布情况。结果表明, 随着电流密度的增加, 单位直流能耗不断增加, 从 4.25 kW·h/m³ 增加到 5.36 kW·h/m³。分析认为, 随着电流密度的提高, 电解槽小室平均电解电压不断升高 (图 2), 所需要的直流能耗不断增加。单位交流能耗随着电流密度的增加而不断减小, 尤其是 0.2 A/cm² 增加到 0.4 A/cm²。原因是单位交流能耗反映 PEM 水电解制氢系统辅助设备平均单位用电能耗。低电流密度运行时, 系统产氢量少, 辅助设备如纯水机、冷水机、整流器等均处于低负荷运行状态, 电能利用效率低, 因此测定的单位交流能耗较高。但随着电流密度增加, 产氢速率提高, 辅助设备也逐渐恢复到额定负荷运行状态, 电能利用效率逐渐提高, 从而单位交流能耗不断降低并趋于稳定。总体上看, PEM 水电解制氢系统在电流密度高时比电流密度低时有明显的技术经济性, 与 GRESPI 等^[15]运行 60 kW 的 PEM 系统得出结论一致。

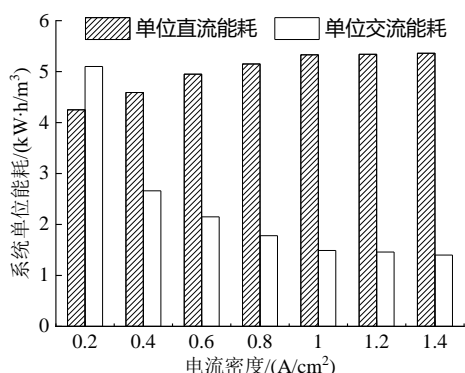


图 4 单位直流能耗和单位交流能耗

Fig. 4 Specific DC energy consumption and AC energy consumption

3.2 运行温度对 PEM 水电解制氢系统能耗的影响

通过现场实验,考察一定电流密度下不同运行温度对 PEM 水电解制氢系统单位制氢能耗的影响。分别在 1.0 A/cm^2 和 1.4 A/cm^2 电流密度下进行实验。

当电流密度为 1.0 A/cm^2 时,不同温度下的系统单位能耗如图 5 (a) 所示。系统单位能耗随着电解槽运行温度的升高而逐渐降低,电解槽 60°C 运行时的系统单位能耗比电解槽 20°C 运行时的系统单位能耗降低了 8.2%。图 5 (b) 表明随着电解槽运行温度升高,单位直流能耗逐渐降低,而单位交流能耗无明显变化。电解槽 60°C 运行时的系统单位直流能耗比电解槽 20°C 运行时的系统单位直流能耗降低了 14.1%。OZDEMIR 等^[7]采用实验室 PEM 电解槽进行不同温度的电解实验,结果与本实验相符。郭常青等^[16]认为,水电解为吸热反应,提高电解槽工作温度有助于提高电解槽性能,从而节省水电解电能消耗。如图 5 (c) 所示,运行温度升高,电解槽平均小室电压显著下降,同时系统制氢效率也随之提高。因此,温度升高降低了活性过电位,加快了电化学反应速率,提高了电解槽电解性能,从而降低了系统单位产氢能耗。

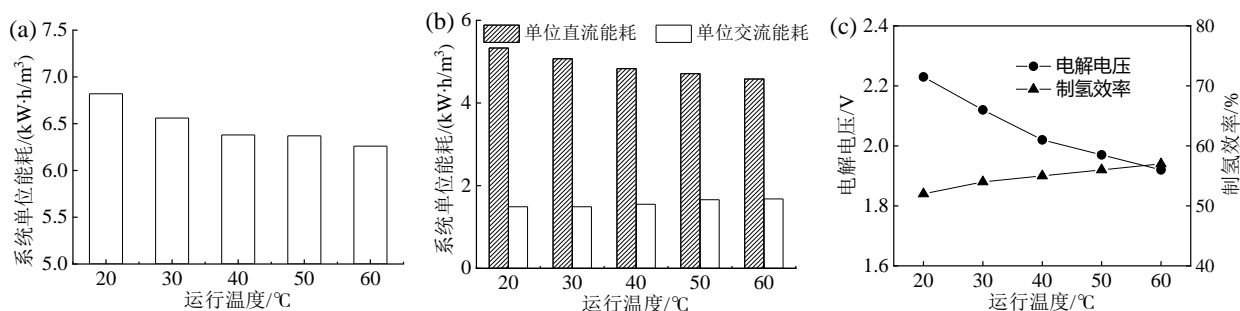
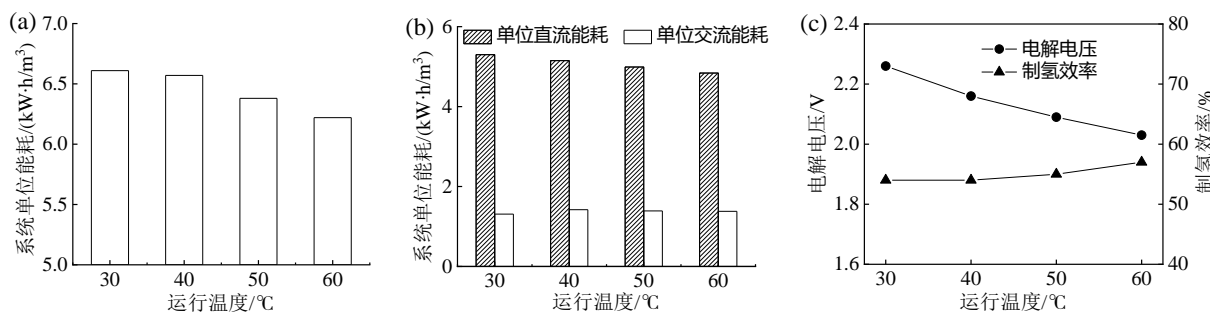
图 5 电流密度 1.0 A/cm^2 时,温度对能耗的影响:(a) 系统单位能耗;(b) 单位直流能耗和单位交流电耗;(c) 电解电压及系统制氢效率Fig. 5 Influence of operating temperature on energy consumption with current density 1.0 A/cm^2 : (a) specific energy consumption; (b) specific DC energy consumption and specific AC energy consumption; (c) cell voltage and hydrogen production efficiency图 6 电流密度 1.4 A/cm^2 时,温度对能耗的影响:(a) 系统单位能耗;(b) 单位直流能耗和单位交流电耗;(c) 电解电压和系统制氢效率Fig. 6 Influence of operating temperature on energy consumption with current density 1.4 A/cm^2 : (a) specific energy consumption; (b) specific DC energy consumption and specific AC energy consumption; (c) cell voltage and hydrogen production efficiency

图 6 (a、b) 为电流密度为 1.4 A/cm^2 时, PEM 水电解制氢系统单位能耗变化情况。PEM 水电解制

氢系统单位能耗同样随着电解槽运行温度的升高而逐渐降低,电解槽 60°C 运行时系统单位能耗比电解

槽 30 ℃运行时系统单位能耗降低了 5.9%。升高运行温度会显著降低单位直流能耗,而对单位交流能耗影响不明显。运行温度的变化也同样影响系统制氢效率和电解电压,图 6(c)表明,电解槽 60 ℃运行比 30 ℃运行时平均小室电解电压降低 0.3 V,系统制氢效率提高 3%。总体上,1.4 A/cm²、60 ℃时系统单位能耗最低,电解效率最高。

4 结论和建议

建立一套 PEM 水电解制氢装置,通过现场实验考察电流密度和运行温度对 PEM 水电解制氢系统能耗的影响。得到以下结论:

(1) 当电流密度在 0.2 ~ 1.4 A/cm² 变化时, PEM 水电解制氢系统单位能耗随电流密度升高而降低。提高电流密度会造成系统单位直流能耗升高而单位交流能耗降低。

(2) 当运行温度在 20 ~ 60 ℃变化时, PEM 水电解制氢系统单位能耗随运行温度的升高而降低。提高运行温度对降低系统单位直流能耗效果明显。

(3) 电流密度和运行温度是优化系统单位能耗的有效控制参数。单位制氢能耗最低时的运行参数为电流密度 1.4 A/cm²、运行温度 60 ℃。

参考文献:

- [1] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 146-152. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.02.020.
- [2] 尹玉国, 逢锦鑫, 黄登高, 等. 大型水电解制氢技术现状及发展[J]. 广东化工, 2022, 49(11): 97-98, 57. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2022.11.030.
- [3] 万年坊. 质子交换膜水电解制氢膜电极研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(12): 6385-6394. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0383.
- [4] HEMAUER J, REHFELDT S, KLEIN H, et al. Performance and cost modelling taking into account the uncertainties and sensitivities of current and next-generation PEM water electrolysis technology[J]. International journal of hydrogen energy, 2023, 48(66): 25619-25634. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.050.
- [5] 王彦哲, 周胜, 周湘文, 等. 中国不同制氢方式的成本分析[J]. 中国能源, 2021, 43(5): 29-37. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.05.005.
- [6] 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420. DOI: 10.11698/PED.2021.02.18.
- [7] OZDEMIR S N, TAYMAZ I, OKUMUS E, et al. Experimental investigation on performance evaluation of PEM electrolysis cell by using a Taguchi method[J]. Fuel, 2023, 344: 128021. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128021.
- [8] IMMERZ C, SCHWEINS M, TRINKE P, et al. Experimental characterization of inhomogeneity in current density and temperature distribution along a single-channel PEM water electrolysis cell[J]. Electrochimica acta, 2018, 260: 582-588. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.12.087.
- [9] VILLAGRA A, MILLET P. An analysis of PEM water electrolysis cells operating at elevated current densities[J]. International journal of hydrogen energy, 2019, 44(20): 9708-9717. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.179.
- [10] TRINKE P, BENSMANN B, HANKE-RAUSCHENBACH R. Experimental evidence of increasing oxygen crossover with increasing current density during PEM water electrolysis[J]. Electrochemistry communications, 2017, 82: 98-102. DOI: 10.1016/j.elecom.2017.07.018.
- [11] FRENSCH S H, FOUUDA-ONANA F, SERRE G, et al. Influence of the operation mode on PEM water electrolysis degradation[J]. International journal of hydrogen energy, 2019, 44(57): 29889-29898. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.169.
- [12] 米万良, 荣峻峰. 质子交换膜(PEM)水电解制氢技术进展及应用前景[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(10): 78-87. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2399.2021.10.013.
- [13] 马晓峰, 张舒涵, 何勇, 等. PEM 电解水制氢技术的研究现状与应用展望[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 420-427. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0360.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水电解制氢系统能效限定值及能效等级: GB 32311-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] CRESPI E, GUANDALINI G, MASTROPASQUA L, et al. Experimental and theoretical evaluation of a 60 kW PEM electrolysis system for flexible dynamic operation[J]. Energy conversion and management, 2023, 277: 116622. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116622.
- [16] 郭常青, 伊立其, 闫常峰, 等. 太阳能光伏-PEM 水电解制氢直接耦合系统优化[J]. 新能源进展, 2019, 7(3): 287-294. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2019.03.012.

作者简介:

朱宁伟 (1981-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水电解制氢技术、水处理技术研究。