

燃料电池发电与电解镁结合的探索研究

侯秦龙, 葛鹏, 卢广轩, 张欢

(西部金属材料股份有限公司, 陕西西安 710201)

摘要: 文提出了一种新型的用于电解镁生产的燃料电池发电系统, 研究了燃料流量和燃料利用率对系统性能的影响, 同时在设计工况下对系统的能量平衡和烟平衡进行了分析。研究表明: 在设计工况下, 系统的热效率为 69.24%, 质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)电堆的发电效率和系统发电效率分别为 39.34% 和 33.42%; 当燃料流量从 1.0 mol/s 提高到 1.3 mol/s 时, 电堆的发电功率从 95.14 kW 增加到 119.95 kW, 电堆的发电效率从 39.34% 提高到 43.05%。当燃料利用率从 0.65 提高到 0.95 时, 电堆发电功率从 67.93 kW 增加到 95.14 kW; 电堆发电效率从 28.09% 提高到 39.34%。

关键词: 电力生产; 电解镁; 燃料电池; 太阳能; 联产系统

中图分类号:M911.4 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.06.020

[引用本文格式] 侯秦龙, 葛鹏, 卢广轩, 等. 燃料电池发电与电解镁结合的探索研究 [J]. 热能动力工程, 2023, 38(6): 174-181.
HOU Qin-long, GE Peng, LU Guang-xuan, et al. Study on the combination of fuel cell power generation and electrolytic magnesium [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6): 174-181.

Study on the Combination of Fuel Cell Power Generation and Electrolytic Magnesium

HOU Qin-long, GE Peng, LU Guang-xuan, ZHANG Huan

(Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710201)

Abstract: A new type of fuel cell power generation system for the production of electrolytic magnesium was proposed, the effects of fuel flow rate and fuel utilization rate on the performance of the system were studied, and the energy balance and exergy balance of the system were analyzed under design conditions. The results show that the thermal efficiency of the system is 69.24%, the power generation efficiencies of the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack and the system are 39.34% and 33.42%, respectively; when the fuel flow rate increases from 1.0 mol/s to 1.3 mol/s, the generation power of the stack increases from 95.14 kW to 119.95 kW, and the power generation efficiency of the stack increases from 39.34% to 43.05%; when the fuel availability increases from 0.65 to 0.95, the stack power increases from 67.93 kW to 95.14 kW, and the stack power efficiency increases from 28.09% to 39.34%.

Key words: power generation, electrolytic magnesium, fuel cell, solar energy, the combined system

引言

电解镁技术和燃料电池发电都是热力过程优化与系统节能研究领域中的前沿课题^[1-5]。氢气作为质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)的燃料^[6-7],其产生的富裕电力可以用于金属镁的电解制备^[8-9]。

针对燃料电池发电不易储存与上网的特点,将电解镁电解生产与燃料电池发电结合,提出了一种用于电解镁生产的燃料电池发电系统,分析了系统燃料流量、燃料利用率等因素对电堆发电功率的影响。通过热力学分析支撑了作者所提出的系统及方法的可行性与有效性。

本文提出的用于电解镁电解生产的燃料电池发电系统,是以电解镁电解生产为核心的、结合燃料电池发电技术的新型高效热力循环系统:(1)该联合系统实现了氢气的合理、高效、清洁利用,通过燃料电池进行发电。(2)该联合系统,针对燃料电池发电不易储存与上网的特点,可以将富裕电力用于金属镁的电解制备,实现能源的储备与金属镁的制备。(3)燃料电池发电为电解镁供电,缓解了电网的供电压力和调峰压力,间接节约了化石能源。

在燃料电池储能模块中,燃料电池可以是本领域常规的燃料电池设备,或者根据需要进行组合。

电解法炼镁是目前世界发达国家生产镁的主要方法,其具有高效、节能、环保等特点。电解镁技术可以被应用到海绵钛生产工艺中。通过电解镁技术,使得海绵钛在生产中逐步实现了镁、氯循环,降低了海绵钛的生产成本。刘明等人^[10]以针状焦和沥青为主要原料,通过对石墨阳极板传统生产工艺进行改进,研制出高密度、高强度并且具有良好导电性的石墨阳极。沈军等人^[11]针对在电解镁工艺中氯气回收的问题提出建议,以实现提高电解镁生产中的氯气回收浓度。徐云旺等人^[12]对多极镁电解槽生产氯气处理系统工艺进行了研究。

在以往的电解镁研究与生产中,其研究与技术改进多集中在电解镁工艺本身,一般使用电网供电作为电源。本文中使用燃料电池发电作为电解镁的电源,燃料电池的逆反应电解水制氢又可以将电能储存在氢燃料中,可以充分调节各种能源(包括可再生能源等清洁能源和常规能源)的储存与利用。

同时,相比于燃料电池发电不易并网,可以将燃料电池的发电量用于电解镁生产,在电能利用的同时实现了镁锭与氯气的生产。

1 用于电解镁电解生产的燃料电池发电系统

1.1 系统原理

用于电解镁电解生产的燃料电池发电系统如图1所示。包括燃料电池发电储能模块和电解镁模块两部分^[13-17]。燃料电池发电储能模块又包含燃料处理单元和PEMFC发电单元两部分。

系统流程为:氢气(1)经过预热器预热,预热后的氢气(2)进入燃料电池(PEMFC)阳极,空气(4)进入燃料电池阴极,空气(4)与预热后的氢气(2)在燃料电池中发生电化学反应,其产生的电能用于电解镁生产。未反应的空气(5)进入燃烧器,与阳极出口未反应的氢气(3)在燃烧室中燃烧放热(6),供热后(7)用于预热氢气(1),最终的乏汽(8)排到大气环境中。电解镁生产需要的电能来自燃料电池发电产生的电能。氯化镁(9)进入电解装置中,发生电解反应,在电解装置的阳极生成氯气(10),在电解装置的阴极生成金属镁(11)。

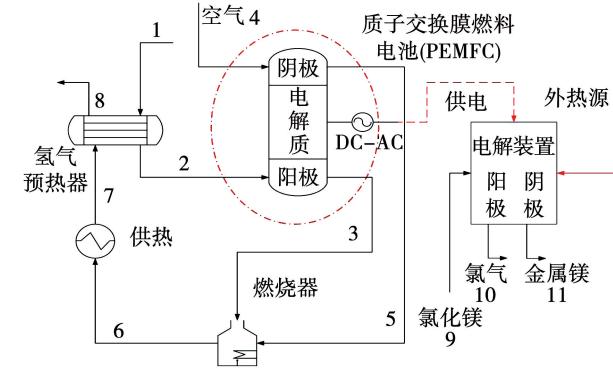


图1 用于电解镁电解生产的燃料电池发电系统

Fig. 1 Fuel cell power generation system for electrolytic magnesium production

1.2 系统设计参数

采用FORTRAN软件编程和ASPEN PLUS软件流程模拟相结合的方法得到系统输出电压和整体效率。相关设计参数如表1所示。建立数学模型时做如下假设:(1)引入PEMFC发电系统后,其他各节点的状态参数保持不变;(2)燃料电池在100℃以下环境工作,产生的水是液态的;(3)PEMFC内部阴极与

阳极温度一致,燃料电池气体流道内压力恒定;(4)忽视消耗相对较小的泵功,不考虑管道压降和热损失;(5)忽略节流损失以及与外部环境的热交换。

表 1 设计工况参数

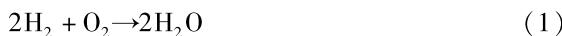
Tab. 1 Parameters of design conditions

参数	数值
环境温度/℃	25
环境压力/MPa	0.1
PEMFC 操作压力/MPa	0.1
PEMFC 操作温度/℃	70
氢气流量/mol·s ⁻¹	1
空气流量/kg·min ⁻¹	4.5
PEMFC 燃料利用率	0.95
电解镁温度/℃	670
氯化镁流量/kg·min ⁻¹	74.48
电解镁效率/%	87

2 数学模型

2.1 PEMFC 模型

在 PEMFC 发电系统中,H₂ 预热后进入阳极,作为燃料参与电化学反应。PEMFC 中阴极上发生的电化学反应为:



根据耗氧量和电子的转移量计算电流:

$$I = 2n_{\text{H}_2}FU_{\text{f}} \quad (2)$$

式中:I—为电池电流,A;n—摩尔流量,mol/s;F—法拉第常数,96 485.33 C/mol;U_f—燃料利用率,取值0.90。

电流密度 i_c 计算式为:

$$i_c = \frac{I}{m_{\text{cell}}A_{\text{cell}}} \quad (3)$$

式中:i_c—为电流密度,A/cm²,是电池电流与电池中总反应面积的比值;A_{cell}—单电池反应面积,cm²;m_{cell}—电池系统中包含的单电池个数。

PEMFC 实际电压的计算原理为:

$$V_{\text{PEMFC}} = E_{\text{Nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{con}} \quad (4)$$

等号右侧的物理意义分别是能斯特电动势、活化极化、欧姆极化以及浓差极化电压。

采用与文献[18]相同的 PEMFC 电池单体进行模拟,因为其公式符合本文的研究对象与研究领域。各分电压的计算方式为:

$$E_{\text{Nernst}} = 1.482 - 0.85 \times 10^{-3}T + 4.308 \times 10^{-5}T \ln(p_{\text{H}_2}/(p_{\text{O}_2})^{-0.5}) \quad (5)$$

式中:T—电池实际运行温度,K;p_{H₂},p_{O₂}—氢和氧的分压,kPa。

在低电流密度下,活化极化损失 V_{act} 对电损耗起主导作用:

$$V_{\text{act}} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(c_{\text{O}_2}) + \xi_4 T \ln(c_{\text{H}_2}) + \xi_5 \ln(I) \quad (6)$$

式中: $\xi_1 = -0.93244$, $\xi_2 = 2.8 \times 10^{-3}$, $\xi_3 = 7.0918 \times 10^{-5}$, $\xi_4 = 4.3086 \times 10^{-5}$, $\xi_5 = -1.89054 \times 10^{-4}$ 。

其中,

$$c_{\text{O}_2} = \frac{p_{\text{O}_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-498/T)} \quad (7)$$

$$c_{\text{H}_2} = \frac{p_{\text{H}_2}}{1.09 \times 10^6 \exp(77/T)} \quad (8)$$

式中:c_{O₂},c_{H₂}—电极中氧气和氢气的浓度。

欧姆电压损失可以表示为:

$$V_{\text{ohm}} = iR_{\text{ohm}} = i \frac{\delta_m}{\sigma_m} \quad (9)$$

式中:R_{ohm}—是燃料电池电阻,Ω/m²;δ_m—膜的厚度,6×10⁻⁵ m;σ_m—质子交换膜电导率:

$$\sigma_m = (0.5139\lambda_m - 0.236) \exp[1268(1/303 - 1/T)] \quad (10)$$

式中:λ_m—膜的含水量,取值范围为14~23,本文设计工况取14。

根据文献中的计算模型,可以忽略燃料电池的浓差极化电压 V_{con},即:

$$V_{\text{con}} = 0 \quad (11)$$

由于整个 PEMFC 堆中的化学反应都是绝热的,所以能量平衡可以通过热力学第一定律来计算。PEMFC 的唯一输出是电力,其发电功率为:

$$W_{\text{PEMFC}} = \eta_{\text{DA}} \times V_{\text{PEMFC}} \times I \quad (12)$$

式中:η_{DA}—直流-交流转换效率,取0.92;W_{PEMFC}—电池输出功率,W;V_{PEMFC},I—电池电压(V),电流(A)。

2.2 电解镁的数学模型

电解镁化学反应式为:



$$m_1 = \frac{0.87 \times W_{\text{PEMFC}}}{H_1} M_1 \quad (14)$$

$$m_2 = \frac{0.87 \times W_{\text{PEMFC}}}{H_1} M_2 \quad (15)$$

式中,m₁—金属镁的质量流量,kg/min;m₂—氯气的质量流量,kg/min;M₁—金属镁的摩尔质量,24 g/mol;M₂—氯气的摩尔质量,71 g/mol;H₁—

$MgCl_2$ 分解热, 13.24 kJ/mol。

2.3 性能评价指标

采用系统发电效率、余热利用热化学效率、余热利用净发电效率对系统性能进行评价。系统发电效率 η_{ele} 表示 PEMFC 系统的发电性能:

$$\eta_{ele} = \frac{W_{PEMFC}}{\dot{m}_{H_2} Q_{H_2}} \quad (16)$$

式中: \dot{m}_{H_2} —氢气的质量流量, kg; Q_{H_2} —氢气低位热值, kJ/kg。

系统热效率 η_t 是用来判断系统对外做功能力的参数。热效率是实际循环中输出能量总值与系统输入热量的比值:

$$\eta_t = \frac{W_{PEMFC} + Q_h}{\dot{m}_{H_2} Q_{H_2}} \quad (17)$$

式中: Q_h —系统的供热量, kW。

系统烟效率 η_{exe} 从能量的质和量两个方面来评价热力系统的热力学完善程度。系统的烟平衡方程为:

$$\eta_{exe} = \frac{E_{x,PEMFC} + E_{x,H}}{E_{x,H_2}} \quad (18)$$

式中: 各物理量分别为公式(14)中各物理量的烟, kW。

不可逆过程中存在烟损失, 不同过程中的烟分析方法不同。

换热过程有:

$$E_{x,1} = E_{x,in,h} + E_{x,in,c} - E_{x,out,h} - E_{x,out,c} \quad (19)$$

$$\eta_{ex,1} = \frac{E_{x,out,c} - E_{x,in,c}}{E_{x,in,h} - E_{x,out,h}} \quad (20)$$

式中: $E_{x,1}$, $\eta_{ex,1}$ —换热过程的烟损失和烟效率, kW, %; $E_{x,in,h}$, $E_{x,out,h}$ —热流体的输入烟和输出烟, kW; $E_{x,in,c}$, $E_{x,out,c}$ —冷流体的输入烟和输出烟, kW。

混合过程有:

$$E_{x,2} = \sum E_{x,in} - E_{x,out} \quad (21)$$

$$\eta_{ex,2} = \frac{E_{x,out}}{\sum E_{x,in}} \quad (22)$$

式中: $E_{x,2}$, $\eta_{ex,2}$ —混合过程的烟损失和烟效率, kW, %; $\sum E_{x,in}$, $E_{x,out}$ —混合过程的输入烟和输出烟, kW。

PEMFC 发电过程:

$$E_{x,air} + E_{x,f} = E_{x,an,out} + E_{x,ca,out} + W_{PEMFC} + E_{x,loss} \quad (23)$$

$$\eta_{ex,3} = \frac{W_{PEMFC}}{E_{x,f} + E_{x,air} - E_{x,an,out} - E_{x,ca,out}} \quad (24)$$

式中: W_{PEMFC} , $\eta_{ex,3}$ —电池的发电功率和烟效率, kW, %; $E_{x,f}$, $E_{x,air}$ —燃料和空气的输入烟, kW; $E_{x,an,out}$, $E_{x,ca,out}$ —阳极和阴极的输出烟, kW; $E_{x,loss}$ —电池的烟损失, kW。

2.4 模型验证

采用 Ballard 公司的 Mark IV 型燃料电池^[19], 用 Aspen plus 软件进行模拟, 与文献[20]中 PEMFC 的实验数据进行比较。操作条件和输入参数如表 2 所示, 对比分析结果如图 2 所示。

表 2 模型的模拟参数和操作条件

Tab. 2 Simulation parameters and operating conditions for the PEMFC model

参数	数值
环境温度/℃	25
环境压力/MPa	0.1
PEMFC 操作压力/MPa	0.1
PEMFC 燃料利用率	0.90
PEMFC 操作温度/℃	70
电流密度/A·cm ⁻²	0~0.7
膜的含水量/λ	14
膜厚度/m	6×10^{-5}

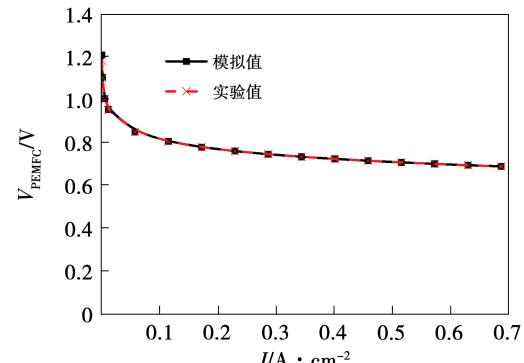


图 2 模拟结果与实验数据进行的比较

Fig. 2 Comparison of simulated results and experimental data

由图 2 的仿真结果可知, 当未加入浓差极化损失时, 仿真图形与文献[20]实验测量数据一致, 验证了模型的准确性。其中, 浓差极化电压的影响可以忽略不计^[21]。

2.5 系统性能的主要影响因素

影响系统性能的关键参数有电解温度、电流密度、燃料流量、燃料利用率以及空气流量等, 如图 3

所示。但是,电池组的有效面积影响着燃料流量、燃料效率和电流密度等参数之间的耦合效应,而电池电压受工作温度和压力等多种因素的影响,综合效应相当复杂。本文选取了燃料流量和燃料利用率,分析其对系统效率、功率和供热量的影响。在参数分析过程中,当 1 个参数变化时,其他参数保持不变。表 3 给出了系统的模拟条件,表 4 给出了系统各节点的热力学参数,燃料成分为 H₂。

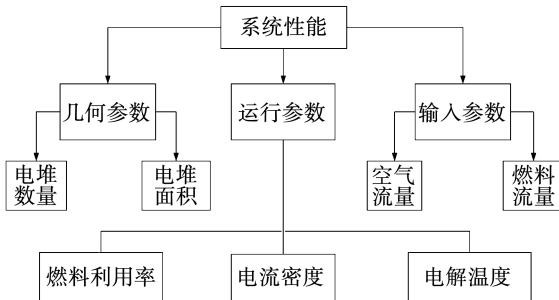


图 3 影响系统性能的关键参数

Fig. 3 Impact factors of the PEMFC-CHP system

表 4 系统流程主参数模拟结果

Tab. 4 Simulation results of main parameters of system flow

序号	质量流量/kg · min ⁻¹	压力/kPa	温度/K	比焓/kJ · kg ⁻¹	比熵/kJ · (kg · K) ⁻¹	比烟/kJ · kg ⁻¹
1	0.121	100	298.1	0.273	0.053	-15.60
2	0.121	100	343.1	645.6	2.069	28.76
3	0.006	100	343.1	645.6	2.069	28.76
4	4.500	100	298.1	0	0.152	-45.29
5	4.615	100	343.1	-2 931.8	-0.133	-2 892.2
6	4.621	100	469.9	-2 927.1	0.226	-2 994.5
7	4.621	100	363.1	-3 060.4	-0.096	-3 031.9
8	4.621	100	349.5	-3 077.3	-0.143	-3 034.7
9	74.480	100	943.1	-464.8	0.038	-476.2
10	55.480	100	943.1	330.6	0.587	155.6
11	19.000	100	943.1	-3 048.4	-2.040	-2 440.1

3 系统性能分析

3.1 燃料流量对系统性能的影响

当电池堆的反应面积一定时燃料流量的改变直接影响电池电流密度的变化,系统性能参数随燃料流量的变化如图 4 和图 5 所示,燃料流量范围为 1.0~1.3 mol/s。

图 4 为 PEMFC 发电功率和发电效率随燃料流量的变化。PEMFC 发电功率随燃料流量的增大不

表 3 系统额定工况仿真条件

Tab. 3 Simulation conditions of the system

参数	数值
操作温度/°C	70
操作压力/kPa	100
燃料流量/mol · s ⁻¹	1.0
燃料利用率	0.95
直流输出功率/kW	103.41
交流输出功率/kW	95.14
燃料入口温度/°C	25
空气进口温度/°C	25
后燃室效率/%	100
PEMFC 压力损失	0
PEMFC 发电效率/%	45.0
直流-交流转换效率/%	92

断增加。因为燃料流量的增大,提高了用于 PEMFC 发电的氢气流量,从而提高了 PEMFC 的电流,进一步提高了 PEMFC 的发电功率。而在固定电池反应面积下,电流的增大提高了电流密度,从而降低 PEMFC 电压,使 PEMFC 的发电效率降低。当燃料流量从 1.0 mol/s 提高到 1.3 mol/s 时,PEMFC 的发电功率从 95.14 kW 增加到 119.95 kW;同时,PEMFC 的发电效率从 39.34% 降低到 38.16%。

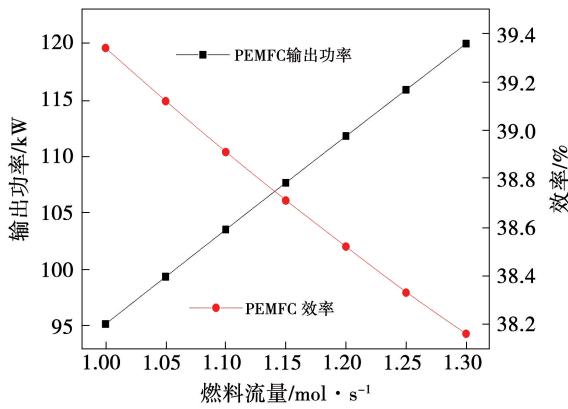


图4 燃料流量对PEMFC性能的影响

Fig. 4 Effect of fuel flow rate on the performance of PEMFC

燃料流量对系统效率的影响如图5所示。由图5可知,随着燃料流量的提高,系统发电效率不断减小。设计工况下,氢气流量为1.0 mol/s,PEMFC发电单元的燃料利用率为95%。由于未燃燃料在后燃室燃烧后,通过燃烧室和换热设备进行余热利用,当燃料流量增加时,发电效率从33.42%降低到32.41%,系统总热效率从69.24%降低到64.66%。系统总热效率的变化受到供热量、发电量以及输入系统的能量利用状况的综合影响。

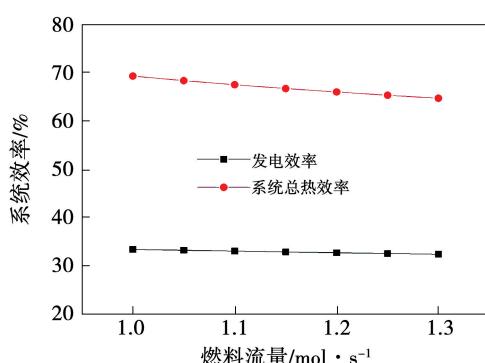


图5 燃料流量对系统效率的影响

Fig. 5 Effect of fuel flow rate on system efficiency

3.2 燃料利用率对系统性能的影响

燃料利用率(U_f)对电池的发电量以及后燃室放热量有很大的影响。燃料利用率是指PEMFC直接转化成电能部分的燃料与PEMFC发电单元总输入燃料的比值,是评价燃料电池系统的一个重要参数。图6和图7给出了燃料利用率对系统性能的影响,燃料利用率变化区间为0.65~0.95。

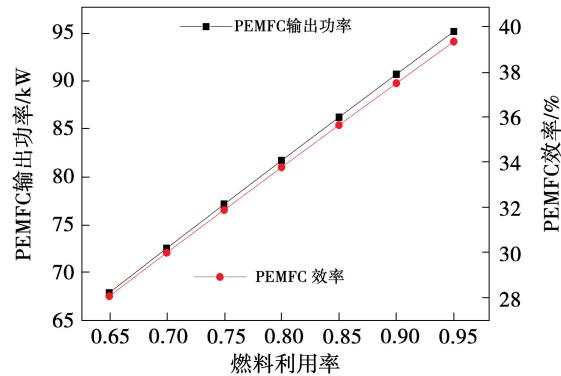


图6 燃料利用率对PEMFC性能的影响

Fig. 6 Effect of fuel availability on the performance of PEMFC

图6为PEMFC发电功率和PEMFC发电效率随燃料利用率的变化。PEMFC的发电功率随着燃料利用率的增大而不断增加,因此提高了合成气中用于PEMFC发电的氢气含量,从而提高了PEMFC的电流,进一步提高了PEMFC发电功率。而在固定电池反应面积下,电流的提高增加了电流密度,降低了PEMFC电压,从而使PEMFC的发电效率降低。当燃料利用率从0.65提高到0.95时,PEMFC的发电功率从67.93 kW增加到95.14 kW;发电效率从28.09%提高到39.34%。

燃料利用率对系统效率的影响如图7所示。随着燃料利用率的提高,系统发电效率不断增加。当燃料利用率从0.65增加到0.95时,系统发电效率从33.86%增加到33.42%,系统总热效率由67.90%增加到69.24%。

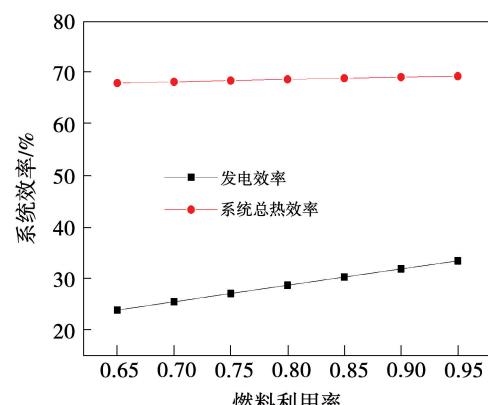


图7 燃料利用率对系统效率的影响

Fig. 7 Effect of fuel availability on the efficiency of system

3.3 电解镁产量与燃料电池发电量的关系

经计算,燃料电池发电量对电解镁产量的影响如图 8 所示。随着燃料电池发电量从 80 kW 提高到 115 kW,金属镁的产量和氯气的产量分别从 15.98 kg/min 和 46.67 kg/min 增加到 22.97 kg/min 和 67.09 kg/min。

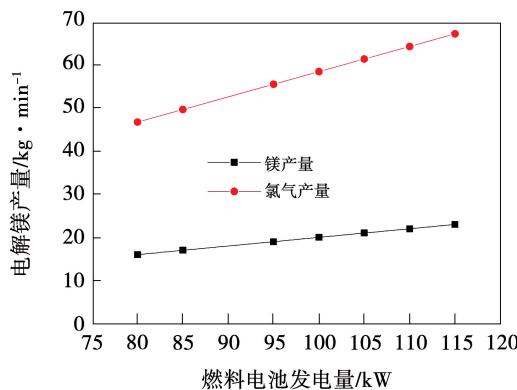


图 8 燃料电池发电量对电解镁产量的影响

Fig. 8 Effect of fuel cell power generation on production of electrolytic magnesium

4 设计工况下的系统性能

4.1 能量平衡

在设计工况下进行了能量平衡分析,结果如表 5 所示。在燃料流量为 1.0 mol/s 条件下,系统总能量输入为 284.70 kW。在系统中利用电池发电进行电解镁,可以生产镁锭 19.0 kg/min,氯气 55.5 kg/min。设计工况下,系统的热效率为 69.24%,PEMFC 发电效率和系统发电效率分别为 39.34% 和 33.42%。

4.2 烟平衡

对系统烟平衡进行分析,系统的烟平衡与烟效率分析结果如表 6 所示。对于稳定的开放系统,系统烟平衡分析是很有必要的。设计工况下系统的烟效率为 49.20%。

系统烟损失最大的部分在 PEMFC 发电过程,为 103.58 kW,占输入总烟的 44.10%。PEMFC 发电的电化学反应过程存在较大的电热损失和散热损失。其次是燃烧室单元,燃烧室中的换热过程和燃烧过程具有较大的烟损失,为 8.17 kW,占系统输入烟的 3.48%。

表 5 系统物质能量平衡表

Tab. 5 Energy and mass performance of the system

输入氢气 能量/kW	输出能量/kW		能量损失/kW			效率/%		电解镁生产量/kg · min⁻¹	
	发电量	供热量	换热	排烟热量	系统总热效率	PEMFC 发电效率	系统发电效率	金属镁	氯气
284.70	95.14	101.99	82.68	4.89	69.24	39.34	33.42	19.0	55.5

表 6 系统烟平衡表

Tab. 6 Exergy performance of the system

输入氢气 烟/kW	输出烟/kW		烟损失/kW			系统烟 效率/%	
	电烟	热烟	PEMFC	燃烧室	排烟		
234.86	95.14	20.40	103.58	8.17	0.38	7.19	49.20

5 结 论

提出一种电解镁与质子交换膜燃料电池发电的联合系统,将燃料电池发电用于电解镁,实现了电解镁及燃料的高效发电利用,研究结论为:

(1) 对系统进行能量平衡和烟平衡分析表明:在设计工况下,系统的热效率为 69.24%,PEMFC 效率和系统发电效率分别为 39.34% 和 33.42%。在系统中利用电池发电进行电解镁,可以生产镁锭 19.0 kg/min,氯气 55.5 kg/min。

(2) 对燃料流量和燃料利用率对系统性能影响的分析表明:当燃料流量提高时,电堆的发电功率从 95.14 kW 增加到 119.95 kW,发电效率从 39.34% 提高到 43.05%。当燃料利用率提高时,电堆发电功率从 67.93 kW 增加到 95.14 kW,发电效率从 28.09% 提高到 39.34%。

参 考 文 献:

- [1] 赵云龙,孔 庚,李卓然,等.全球能源转型及我国能源革命战略系统分析[J].中国工程科学,2021,23(1):1-9.
ZHAO Yun-long, KONG Geng, LI Zhuo-ran, et al. Strategic analysis of global energy transition and China's energy revolution [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 1-9.
- [2] 刘满平.我国实现“碳中和”目标的意义、基础、挑战与政策着力点[J].价格理论与实践,2021,2:421-426.
LIU Man-ping. Significance, foundation, challenge and policy focus of realizing the goal of "carbon neutralization" in China [J].

- Price: Theory & Practice, 2021, 2: 421–426.
- [3] 张建安,周云英,石玉英,等.多极镁电解槽电流效率的影响因素探讨[J].四川冶金,2013,35(5):26–29.
ZHANG Jian-an, ZHOU Yun-ying, SHI Yu-ying, et al. Study on influential factors for current efficiency in magnesium electrolytic multipole cells [J]. Sichuan Metallurgy, 2013, 35(5): 26–29.
- [4] 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.
GUO Chang-qing, YI Li-qi, YAN Chang-feng, et al. Optimization of photovoltaic-PEM electrolyzer direct coupling systems [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(3): 287–294.
- [5] 段梦平,杨斌,徐宝强,等.高纯铝制备技术研究进展[J].矿冶,2021,30(1):38–45,62.
DUAN Meng-ping, YANG Bin, XU Bao-qiang, et al. Research progress in preparation technology of high purity aluminum [J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(1): 38–45,62.
- [6] WU Wei, ZHAI Chong, SUI Yun-ren, et al. A novel distributed energy system using high-temperature proton exchange membrane fuel cell integrated with hybrid-energy heat pump[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 235: 113990.
- [7] HUA Zhi-guang, ZHENG Zhi-xue, PAHON E, et al. Remaining useful life prediction of PEMFC systems under dynamic operating conditions [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 231: 113825.
- [8] 张伊甸,赵雅文,李文甲,等.中低温太阳能–甲醇重整互补供能系统动力学提升与系统优化[J].工程热物理学报,2021,42(2):269–279.
ZHANG Yi-dian, ZHAO Ya-wen, LI Wen-jia, et al. Dynamic improvement and systematic optimization of low and mid-temperature solar-steam reforming of methanol complementary energy supply systems [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42 (2): 269–279.
- [9] 郑志美,刘泰秀,刘启斌,等.太阳能热化学与燃料电池联合的发电系统[J].工程热物理学报,2020,41(11):2627–2634.
ZHENG Zhi-mei, LIU Tai-xiu, LIU Qi-bin, et al. A power generation system with solar thermochemical and fuel cell [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(11): 2627–2634.
- [10] 刘明,朱毅,刘国建,等.大型电解镁用石墨阳极生产工艺试验研究[J].炭素技术,2019,38(2):62–64.
LIU Ming, ZHU Yi, LIU Guo-jian, et al. Experimental study on the production process of graphite anode for large-scale magnesium electrolysis [J]. Carbon Techniques, 2019, 38(2): 62–64.
- [11] 沈军,杨保宏,殷万成.浅谈电解镁生产中的氯气处理[J].世界有色金属,2020(18):132–133.
SHEN Jun, YANG Bao-hong, YIN Wan-cheng. Chlorine treatment in electrolytic magnesium production [J]. World Nonferrous Metals, 2020(18): 132–133.
- [12] 徐云旺,阮朝进,包兴柱,等.浅谈镁电解生产中氯气处理系统工艺研究[J].世界有色金属,2017(6):270,272.
XU Yun-wang, RUAN Chao-jin, BAO Xing-zhu, et al. Study on the process of chlorine treatment system in magnesium electrolysis production [J]. World Nonferrous Metals, 2017(6): 270,272.
- [13] YANG Yu, ZHANG Hao, YAN Ping, et al. Multi-objective optimization for efficient modeling and improvement of the high temperature PEM fuel cell based micro-CHP system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45: 6970–6981.
- [14] BAROUTAJIA A, ARJUNAN A, RAMADAN M, et al. Advancements and prospects of thermal management and waste heat recovery of PEMFC [J]. International Journal of Thermofluids, 2021, 9: 100064.
- [15] 赵洪滨,江婷,杨倩,等.采用焦炉煤气为燃料的SOFC-CCHP流程方案研究[J].工程热物理学报,2015,36(8):1626–1632.
ZHAO Hong-bin, JIANG Ting, YANG Qian, et al. Research on the SOFC-CCHP system process schemes fueled by coke oven gas [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36 (8): 1626–1632.
- [16] WANG Yong-li, GAO Ming-chen, WANG Jing-yan, et al. Measurement and key influencing factors of the economic benefits for China's photovoltaic power generation: a LCOE-based hybrid model [J]. Renewable Energy, 2021, 169: 935–952.
- [17] 赵雅文,洪慧,金红光.光煤互补发电的效率相对收益率评价[J].工程热物理学报,2014(10):1895–1900.
ZHAO Ya-wen, HONG Hui, JIN Hong-guang, et al. Evaluation of relative efficiency rate of return for light coal complementary generation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014 (10): 1895–1900.
- [18] SHEN J, TU Z, SIEW H. Enhancement of mass transfer in a proton exchange membrane fuel cell with blockage in the flow channel [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 1408–1418.
- [19] CRESPI E, GUANDALINI G, CAMPANARI S, et al. Modelling and optimization of a flexible hydrogen fueled pressurized PEMFC power plant for grid balancing purposes [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(24): 13190–13205.
- [20] 郭健忠,王家欣,孙凯华,等.基于S-Function的PEM燃料电池建模仿真分析[J].中国科技论文,2020,15(2):1364–1370.
GUO Jian-zhong, WANG Jia-xin, SUN Kai-hua, et al. Modeling and simulation analysis of PEM fuel cell based S-function [J]. China Science Paper, 2020, 15(2): 1364–1370.
- [21] 李晓嫣.家用燃料电池热电联供系统的建模与仿真[D].重庆:西南交通大学,2011.
LI Xiao-yan. Modeling and simulation of fuel cell-based CHP system for residential application [D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2011.