

基于燃料电池微型热电联产系统的集成与能量平衡

骆锦辉¹, 解东来^{1,2*}, 单杰¹, 高华伟²

(1. 华南理工大学传热强化与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640;
2. 深圳中燃哈工大燃气技术研究院, 广东 深圳 518033)

摘要:设计加工了一款集天然气制氢、CO脱除、燃料电池发电、热水生产为一体的微型热电联产系统样机,测试了典型工况下样机的性能,利用能量平衡方法对各组成单元能量损耗进行详细分析。测得样机的电效率为23.6%,热效率为24.7%,系统的能量损失主要由于弛放气和烟气排放等造成。

关键词:燃料电池;微型热电联产;能量平衡

中图分类号:TQ116.2+5

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)02-0137-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.02.035

Integration and energy balance of a fuel cell based micro-CHP system

LUO Jin-hui¹, XIE Dong-lai^{1,2*}, SHAN Jie¹, GAO Hua-wei²

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Shenzhen CG-HIT Gas Technology Institute, Shenzhen 518033, China)

Abstract: A fuel cell based micro-CHP prototype is designed and built. The demonstration system consists of hydrogen production from natural gas, syngas CO removal, fuel cell and hot water production unit. The system performance is tested under typical operation conditions. The measured electrical efficiency is 23.6% and thermal efficiency is 24.7%. The major energy losses are generated by reactor gas and flue gas.

Key words: fuel cell; micro-CHP; energy balance

家用微型热电联产系统按发电方式的不同可以分为基于斯特林发动机以及燃料电池的系统,其中燃料电池又可分为固体氧化物燃料电池(SOFC)和质子交换膜燃料电池(PEMFC)^[1]。PEMFC微型热电联产系统是一种建立在能量梯级利用的基础上,将千瓦级天然气制氢、燃料电池发电及余热利用有机结合在一起的能源转化系统^[2]。它能很好地满足家庭及小型商业用户对电力和热能的需求,实现天然气这种清洁能源的“温度对口、梯级利用”^[3],在减少二氧化碳排放、减少化石能源消耗和维护国家能源安全等方面有很广阔的应用前景^[4]。

国内外专家、学者都针对燃料电池热电联产系统做了大量研究。Arsalis等^[5]以天然气为原料的千瓦级PEMFC热电联产系统为研究对象,利用软件对系统进行了研究和模拟,得出PEMFC热电联产系统的最高总效率为83.08%,其中发电效率为27.62%,热效率为55.46%。Barelli等^[6]对应用于

住宅的PEMFC燃料电池与SOFC燃料电池进行了能量与焓分析,并利用aspen进行模拟,研究结果表明,尽管SOFC发电效率(可达40%)略高于低温PEMFC发电效率(可达32%),然而在低温常压下,PEMFC热电联产系统比SOFC热电联产系统的效率更高,更加适合家用热电联产,但低温下的PEMFC对CO非常敏感,微量CO即可使催化剂中毒。Hwang等^[7]开发集成了家用热电联产系统,并用该热电联产系统满足典型家庭的热、电负荷,结果表明,该系统供应热电相对比较稳定,且该系统总效率最高可以达到81%。

华南理工大学新能源技术团队在基于燃料电池微型热电联产系统方面进行了大量研究,利用Aspen对千瓦级PEMFC热电联产系统进行了模拟^[8],研发、测试了微型天然气自热重整反应器^[9]、蒸汽重整反应器^[10]以及高低温变换反应器^[11],并对CO优先氧化催化剂及反应器进行了研发与测

收稿日期:2015-08-21

基金项目:广东省科技计划项目(2013B010405001)

作者简介:骆锦辉(1991-),男,硕士生,luo.jinhui@mail.scut.edu.cn;解东来(1970-),男,博士,教授,主要研究方向为天然气分布式能源,通讯联系人,0755-82944743,dlxie@scut.edu.cn。

试^[12],通过测试表明,CO 体积分数能够降低到 10^{-5} 以下。尽管已经对每个模块都做了全面的研究与分析,然而基于燃料电池微型热电联产系统是一个整体,每个上游模块的性能对下游模块都有影响,因此有必要对模块进行加工集成,并对系统性能进行测试,分析系统的能量平衡。

1 样机的设计与集成

1.1 样机的工作原理

图 1 显示了基于燃料电池热电联产系统样机的工艺流程。

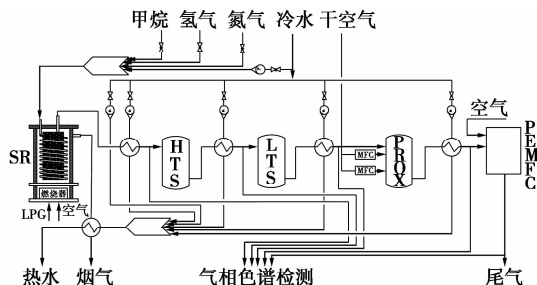


图 1 基于燃料电池热电联产系统样机的工艺流程

天然气和水进入蒸汽重整反应器 (SR),在 $400 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 下发生重整反应,生成 CO 体积分数较高的富氢合成气;合成气进入高温变换反应器 (HTS),在 $350 \sim 450^{\circ}\text{C}$ 下发生水气变换反应,CO 体积分数降低到 $1.0\% \sim 2.0\%$;之后合成气进入低温变换反应器 (LTS),在 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 下再次发生水气变换反应,CO 体积分数降低到 $0.3\% \sim 0.6\%$;接着合成气进入优先氧化反应器 (PROX),在 $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 下发生优先氧化反应,CO 体积分数降低到 10^{-5} 以下;最后富氢合成气进入质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 通过电化学反应发电。并利用各过程的余热来生产热水。

氮气作为系统保护气用于实验前的吹扫,氢气用于实验前催化剂的还原,LPG 作为大气式燃烧器的燃料,对蒸汽重整反应器进行加热。

1.2 样机的集成

图 2 为基于燃料电池热电联产系统样机的实物图。样机主要包括制氢单元、CO 脱除单元、产电单元及产热单元。

制氢单元集蒸汽重整反应器、大气式燃烧器、天然气和水的预热、汽化于一体。蒸汽重整反应器的设计参考了发明专利《一种天然气自热重整制氢的装置》^[13],为了充分利用烟气余热,在重整反应器烟

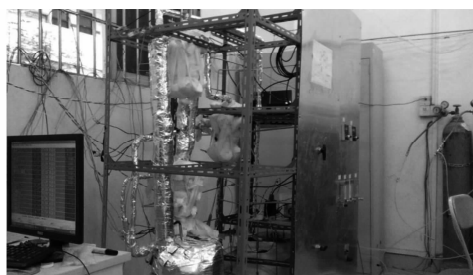


图 2 基于燃料电池热电联产系统样机的实物图

气排出口焊接了直径为 100 mm 的不锈钢薄管,并在不锈钢薄管内安装了换热盘管。

CO 脱除单元包括高温变换反应器、低温变换反应器和优化氧化反应器^[14]。优化氧化反应器采用自主研发的 $\text{K-Pt}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂^[15]。

产电单元采用新源动力股份有限公司生产的风冷质子交换膜燃料电池。

产热单元为自行设计的蛇管换热器,回收系统难以利用的热能加热自来水,为家庭提供热能。

2 样机测试

2.1 样机测试系统

样机测试系统如图 3 所示。

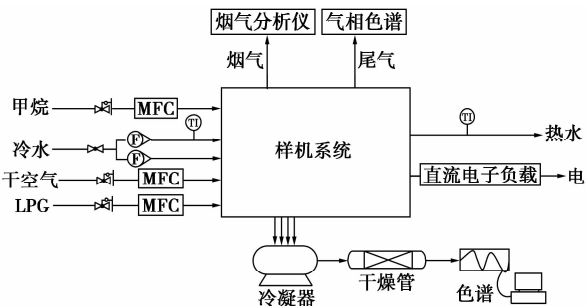


图 3 样机测试系统

甲烷、干空气和 LPG 的消耗量用质量流量控制仪 (MFC) 进行测量。冷水分为 2 路,一路作为反应原料经转子流量计测流量后进入 SR 反应器;另一路作为冷却水,经流量和温度测量后通过各产热单元,转化为热水。热水的出口温度用温度计测量。样机产生的电用台湾亚锐电子有限公司生产的直流电子负载进行功率测试。排放的烟气用 Testo 公司生产的燃气烟气分析仪进行组分含量检测。燃料电池尾气组成用气相色谱仪检测。

来自样机 SR、HTS、LTS 和 PROX 反应器的富氢合成气主要成分为 H_2 、 CH_4 、 CO_2 、CO 和水蒸汽,采用冷凝器和干燥管去除未反应的水蒸汽,然后用气相色谱仪进行检测。

2.2 样机测试方案

样机典型操作条件:水碳比为 2.5, 甲烷流量为 2.6 L/min, 水的流量为 5.5 g/min, 空速为 90 h⁻¹, 重整反应器的温度为 500℃。系统的外部能量由大气式燃烧器提供, LPG 的流量为 1.5 L/min, 根据 LPG 的流量组成以及各组分的热值可以得出, LPG 的能量输入为 2 787.5 W。

3 测试结果与讨论

3.1 样机的物质与能量输入

经单位转化, 典型操作条件下, 系统的进料情况: 甲烷的流量 6.39 mol/h, 水的流量 18.31 mol/h, 调节 LPG 的流量 2.26 mol/h。系统的能量输入主要为液化石油气与甲烷提供的内能, 能量输出则包括电能、热水、未能利用的烟气、燃料电池的尾气以及系统的散热。能量平衡关系如图 4 所示。

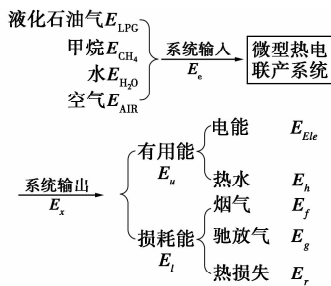


图 4 微型热电联产系统的能量平衡关系图

系统的输入能量 E_e 计算公式为:

$$E_e = E_{LPG} + E_{CH_4} + E_{H_2O} + E_{AIR} \quad (1)$$

为方便计算, 选取 25℃, 1 个大气压 (0.1 MPa) 为基准态, 确定系统中各组分的标准焓。则样机物质与能量输入如表 1 所示。

表 1 微型热电联产系统物质与能量输入

物流	温度/ ℃	压力/ MPa	流量/ (kmol·h ⁻¹)	焓值/ (kJ·h ⁻¹)
LPG (Burner)	25	0.1	0.002255	6021.31
空气 (Burner)	25	0.1	0.100190	0
甲烷 (SR)	25	0.1	0.006386	5685.62
水 (SR)	25	0.1	0.018318	0
空气 (PROX)	25	0.1	0.000326	0
空气 (PEMFC)	25	0.1	0.025689	0

3.2 样机的物质与能量输出

利用气相色谱仪可以对各反应单元的输出物质进行检测。表 2 所示为 SR、HTS、LTS、PROX 出口气各组分体积分数。

表 2 SR、HTS、LTS、PROX 反应器出口气各组分
体积分数

	SR	HTS	LTS	PROX
平均温度/℃	500	420	300	120
体积分数/%				
CH ₄	21.57	21.41	21.19	20.95
CO	2.17	1.41	0.40	9 × 10 ⁻⁴
CO ₂	13.95	14.59	15.44	15.66
H ₂	62.31	62.59	62.97	61.36
N ₂	—	—	—	2.03
甲烷转化率/%	42.78	42.78	42.78	42.78

系统的输出能量 E_x 计算公式为:

$$E_x = E_u + E_l = E_{ele} + E_h + E_f + E_g + E_r \quad (2)$$

其中, 热水回收的热量 E_h 如表 3 所示。

表 3 热水回收余热量

项目	烟气余热回收	HTS	LTS	PROX
水的流量/(kg·h ⁻¹)	23.04	0.41	0.40	0.77
初温/℃	25	25	25	25
末温/℃	53	53	53	53
回收的热量/W	752.6	13.4	13.2	25.2
回收的总热量/W		804.4		

利用标准焓, 计算得系统的能量输出如表 4 所示。

表 4 微型热电联产系统的能量输出

物流	温度/℃	压力/MPa	流量/(kmol·h ⁻¹)	焓值/(kJ·h ⁻¹)
电	—	—	—	2764.58
热水	53	0.1	1.366909	2895.93
烟气	79	0.1	0.087447	1529.64
弛放气	25	0.1	0.051797	4236.84
散热	—	—	—	279.94

3.3 样机的能量平衡分析

典型操作条件下整个系统的能量平衡关系如图 5 所示。系统总输入能量为 11 706.93 kJ/h, 产生 2 764.58 kJ/h 的电能以及 2 895.93 kJ/h 的热能。整个系统的电效率为 23.6%, 热效率为 24.7%。其余能量以烟气、弛放气和散热的形式损失掉。

表 5 为系统各单元能量损失百分比, 其中 CO 脱除单元 (HTS、LTS、PROX) 的能量损失较小, 生产的热水也较少, 这是由于合成气中 CO 含量较低,

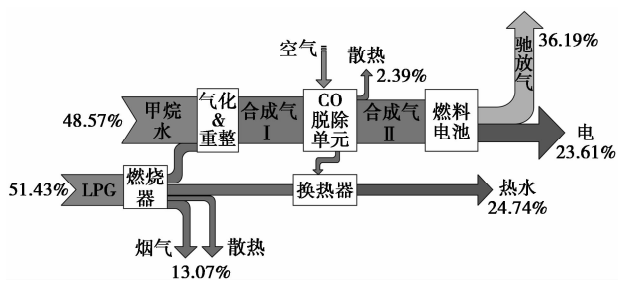


图 5 样机的能量平衡关系

CO 反应产生的反应热较少,同时系统的保温效果较好;燃烧器的能量损失较为严重,且大部分热水来自燃烧器烟气回收的热量,这是由于本样机采用的燃烧器为大气式燃烧器,由于结构设计原因,燃烧器的底部散热以及过高的过剩空气系数带走的能量无法人为控制,造成了较高的能量散失;燃料电池的能量损失也较高,主要是因为驰放气含有大量的未反应甲烷,直接排空带走了系统的能量。

表 5 系统各单元能量损失

系统单元	有用能/ (kJ·h ⁻¹)	热水/ (kJ·h ⁻¹)	热损失/ (kJ·h ⁻¹)	能量损失/ %
燃烧器	1782.36	2709.31	1529.64	25.40
HTS	7347.38	48.24	72.36	0.97
LTS	7228.58	47.52	71.28	0.97
PROX	7001.42	90.86	136.30	1.89
燃料电池	4181.56	—	2764.58	39.80

整个样机的电效率为 23.6%,热效率为 24.7%,总效率为 48.3%。其中驰放气中含有较多的甲烷,直接排空造成较大的能量损失,如果对其进行回收利用,则可以达到更好的节能效果。

4 结论

将天然气制氢与燃料电池发电有机结合在一起,并回收余热,将微型热电联产系统成为一种可能。测试了样机的整体性能,在典型操作条件下,合成气中氢气体积分数为 61.36%,CO 体积分数为 9×10^{-6} ,满足了质子交换膜燃料电池对燃料的要求。

系统的能量平衡分析得出,样机的热损失高达 51.7%,热损失比较严重,其中燃料电池驰放气与燃烧器的能量损失较为严重,分别达到各自单元总能量的 25.4% 与 39.8%。样机的尾气中含有较高浓度的甲烷,如果对其加以回收利用,可以显著地提高

热电联产系统能量利用率。

参考文献

- [1] 金炼,张亚君,杨尚恒,等. 家庭用微型热电联产技术[J]. 现代化工,2012,32(5):6-9.
- [2] 王长友,韩艳丽,王子良,等. 基于质子交换膜燃料电池的微型天然气热电联产研发进展[J]. 应用化工,2012,41(6):1072-1075.
- [3] 解东来,叶根银,费广平. 小型天然气制氢与 PEMFC 热电联产技术进展[J]. 煤气与热力,2008,28(8):8-11.
- [4] 解东来. 城市燃气在氢能及燃料电池行业的应用[J]. 煤气与热力,2007,27(4):38-40.
- [5] Arsalis A, Nielsen M P, Kær S K. Modeling and parametric study of a 1 kWe HT-PEMFC-based residential micro-CHP system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(8):5010-5020.
- [6] Barelli L, Bidini G, Gallorini F, et al. An energetic-exergetic comparison between PEMFC and SOFC-based micro-CHP systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(4):3206-3214.
- [7] Hwang J J, Zou M L. Development of a proton exchange membrane fuel cell cogeneration system[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(9):2579-2585.
- [8] Xie D, Wang Z, Jin L, et al. Energy and exergy analysis of a fuel cell based micro combined heat and power cogeneration system [J]. Energy & Buildings, 2012, 50(7):266-272.
- [9] 杨海全,解东来,单杰,等. 一种微型天然气氧化重整制氢反应器的研发及性能测试[J]. 徐州工程学院学报:自然科学版, 2013,28(3):79-84.
- [10] Xie D, Peng A, Wang Z, et al. Hydrogen production for fuel cells by a methane reformer integrated with steam generation[J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2012, 10(1):1205-1224.
- [11] Xie D, Zhao J, Wang Z, et al. Syngas production from oxidative methane reforming and CO cleaning with water gas shift reaction [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38:10826-10832.
- [12] Xie D, Zhang E, Li R, et al. Syngas CO cleaning for fuel cell applications by preferential oxidation: Catalyst development and reactor design [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2014, 9(1):63-70.
- [13] 解东来,彭昂. 一种天然气自热重整制氢的装置: CN, 101973522A[P]. 2011-02-16.
- [14] 解东来,王子良. 一种富氢气体中 CO 深度脱除方法及装置: CN, 102424361A[P]. 2012-04-25.
- [15] Zhang Y, Wu S, Jin L, et al. Development and performance of a K-Pt/ γ -Al₂O₃ catalyst for the preferential oxidation of CO in hydrogen-rich synthesis gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39:18668-18674. ■