

APGC 燃机与燃料电池复合发电系统性能分析

王 巍*, 薛利超, 黄钟岳, 王晓放

(大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于新型环境压力下吸热燃气轮机循环 APGC(ambient pressure gas turbine cycle), 提出了 APGC 燃气轮机和常压固体氧化物燃料电池(SOFC)组成的复合发电系统. 利用商业软件 Aspen plus, 建立了 APGC 燃气动力装置以及常压 SOFC 的数值分析模型. 以西门子公司生产的 120 kW 燃料电池结构及设计参数作为分析基础, 探索了 APGC 燃气轮机和 SOFC 组成的常压 SOFC/APGC 复合发电系统的性能. 研究结果表明: 复合装置的发电效率可以达到 66.5%, 显示出复合发电性能的优势.

关键词: 燃气轮机循环; 性能; 复合发电系统

中图分类号: TK479.1 **文献标志码:** A

0 引言

环境压力下吸热燃气轮机循环 APGC^[1] 的组成与常规的布雷顿循环(BC)一样, 但常规布雷顿循环是先压缩后膨胀, 高压下吸热, 而 APGC 则是先膨胀后压缩, 直接在环境压力下吸热. 因此, 流经 APGC 燃气轮机元件的工质容积流量比常规的布雷顿循环要大许多^[2], 这在一定程度上提高了元件的效率, 特别在小型和微型燃气轮机上有着明显的优势. 此外, APGC 装置还具有低污染排放、提高热电联供中的发电效率和节能系数等优点^[3,4]. 然而, 对 APGC 循环的研究, 无论在理论上还是实用上, 国内当前开展得不够, 公开发表的成果甚少, 这和我我国燃气轮机发展水平特别是民用微型燃气轮机水平不高有关.

加压固体氧化物燃料电池(SOFC)是以阴极中氧气在电解质内离解为氧离子, 并通过电解质进入阳极, 在高温下通过电化学反应将化学能直接转化为电能的发电装置. 由于工作温度 900~1 000 °C, 正好与微型燃气轮机复合, 所组成的复合循环系统发电效率可达 60%~70%. 此外, 在电化学反应中, 氮气未参加反应, 因而排放中氮的氧化物含量很少.

尽管目前的研究表明提高燃料电池的工作压力有利于提高系统性能^[5], 但加压将增加 SOFC

的制造难度和成本, 尤其是对于平板式 SOFC, 加压密封一直是制造工艺中的难题. 在加压下易出现工质泄漏, 不易保证燃料电池的稳定工作. 因此, 在固体氧化物燃料电池与燃气轮机构成的联合循环发电已成为现阶段发达国家重点研究的新能源技术方向时, 寻求常压下的燃料电池与 APGC 循环的复合, 也将具有更加现实的意义.

为此, 本文提出 APGC 燃机与常压 SOFC 复合发电系统, 建立相应的系统分析模型, 以天然气为原料, 对 SOFC/APGC 复合发电系统性能做有益的探索.

1 微型燃机(MGT)与 SOFC 复合发电系统

燃料电池-燃气轮机复合循环的结构各种各样^[5], 典型的复合循环结构包括顶部燃料电池循环和底部燃机循环. 图 1 给出了加压 SOFC/MGT 复合发电装置.

压气机出来的高压空气与燃料压缩机加压后的燃料被涡轮排出的废气加热后进入燃料电池堆中, 在此发生电化学反应后产生一定的热量并发出电能; 化学反应产生的热量将加热流出燃料电池的气体而使其成为 900°C 左右的高温气体; 高温气体进入涡轮膨胀做功, 排气仍具有一定的温

度,被用来加热进入燃料电池的空气和燃料.

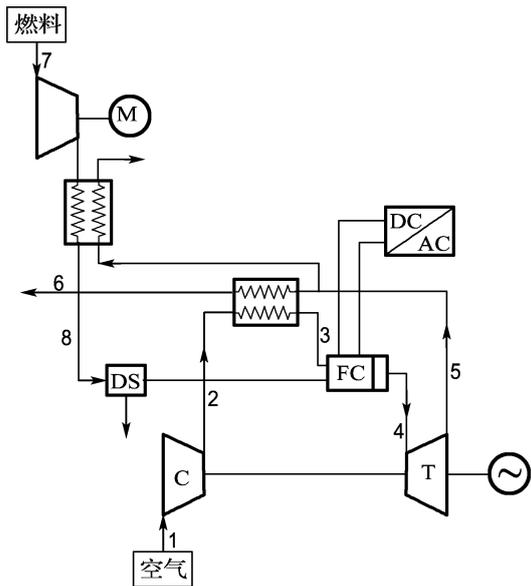


图 1 MGT/SOFC 复合装置简图

Fig. 1 Simplified layout of the MGT/SOFC hybrid plant

从有、无燃料电池的 50 kW 燃机发电装置^[6,7]的性能分析可以看出:50 kW 微型燃机与燃料电池复合发电装置的效率为 61.1%,明显高于微型燃机发电装置的效率(29.2%);而且在变工况(如 70%负荷)时,复合发电装置的效率仅下

降了 4.7%,仍大于 50%,而燃气轮机发电效率降低了 6.2%,说明复合装置的变工况性能好.这类小型复合发电装置可以满足超级市场、工厂、商业街、军事基地、医院和集镇等的用电需求,对于分布式发电具有重要意义.

早期开发的加压固体氧化物燃料电池因其能量转化效率高,电池工作压力高,工作温度高等而被科研人员所重视.但是在开发加压 SOFC/MGT 的过程中,发现电池工作压力提高对电池的密封性、结构、材料等提出了较高的要求,加大了其制造成本.尤其对目前国内技术水平,平板式 SOFC 加压密封不过关的情况下,SOFC 更易于采用在环境压力下工作,此时可利用与 APGC 循环的复合装置来进一步提高装置的性能.

2 APGC 燃机与 SOFC 复合发电系统性能分析

常压燃料电池由于其工作压力接近环境压力,采用常规的动力装置很难进行余热的动力回收.为了充分利用这部分余热,提高装置的性能,本文提出了图 2 所示的 SOFC /APGC 复合发电装置.在分析中采用天然气作为燃料,利用大型化工流程软件 Aspen plus 对常压 SOFC/APGC 复合发电装置进行模拟分析.

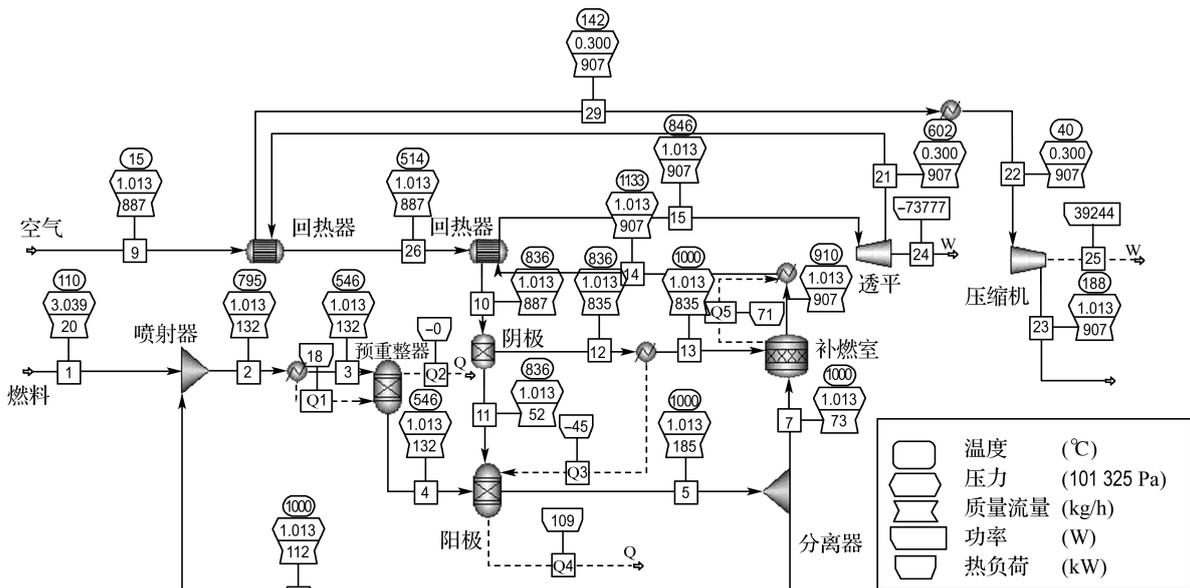


图 2 常压 SOFC/APGC 复合装置

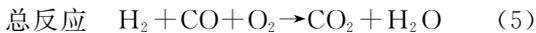
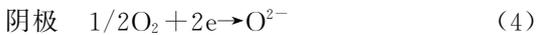
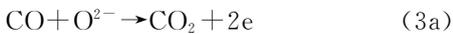
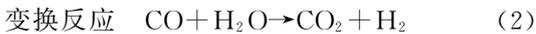
Fig. 2 The ambient SOFC / APGC hybrid plant

图 2 为基于商业软件 Aspen plus 所建立的常压下固体氧化物燃料电池与 APGC 组成的复合装置流程图.燃料电池和燃气轮机联合循环中

各元件以及不同的反应过程都与 Aspen plus 中的模块相对应^[8].重整器采用 Aspen plus 中的相平衡反应器(Rgibbs)模块,它可以用来模拟燃料

的预重整,发生的反应见方程式(1)和(2). SOFC 的阳极模块也是由相平衡反应器(Rgibbs)来模拟,不过此时反应不仅有(1)、(2),也包含电化学反应(5),同时阳极中假定 CO 都参与反应(如反应式(3a)). 由于 Aspen plus 软件中输入组分内没有 O^{2-} ,通过多出口组分分离器(Sep)模块来模拟阴极中 O_2 变成 O^{2-} 的过程. 通过采用 Aspen plus 软件中的灵敏度分析、设计规定以及子程序的二次开发等手段,使燃料电池模型满足设计要求,从而建立起 SOFC 模型^[8]. 从 SOFC 排出的燃气再经过补充燃烧后,经过回热器(Heatx)加热进入阴极的空气. 最后进入透平模块(Compr)膨胀做功,压力进一步降低到低于环境大气压力,在冷却器模块(Heater)中,燃气温度进一步降低到 40℃ 后进入压缩机模块(Compr)压缩到环境压力,从而 SOFC/APGC 混合系统模型建成. SOFC 在 1 000 ℃ 下工作,天然气在喷射器内与阳极出口再循环回路中水汽富化的气体混合,进入重整反应器,与催化剂一起被 SOFC 的反应热加热后,发生反应变为氢气富化的气体,提供给 SOFC 的阳极,生成的 CO 和 H_2 再与氧离子发生电化学反应产生电能. CO 在电池内部可以继续与水蒸气发生变换反应,生成 CO_2 和 H_2 . 生成的 H_2 可以继续作为电池的反应气体. 同时,电池反应产生的高温气体可提供给燃气轮机进行动力回收,进一步产生电能.

燃料电池内的反应过程如下:



常压空气在回热器内由透平排气加热后,进入 SOFC 的阴极,提供氧气. 阳极和阴极之间由电解质隔开,在发生电化学反应时,阴极中氧气得到电子变为 O^{2-} , O^{2-} 从电解质中导入阳极,同时在外电路形成电流,如图 3 所示.

由于电池性能受各种因素,如燃料成分、电池反应面积、燃料工作温度及压力、电池的工作温度、燃料的转化率、水碳比等的影响^[5],必须选择适合的参数作为电池的模拟条件. 在对图 2 的循环进行分析时,首先选择电池模拟状态为稳态、绝热;其次,SOFC 电池以西门子-西屋公司 120 kW (直流)燃料电池结构及设计参数作为模拟条件,

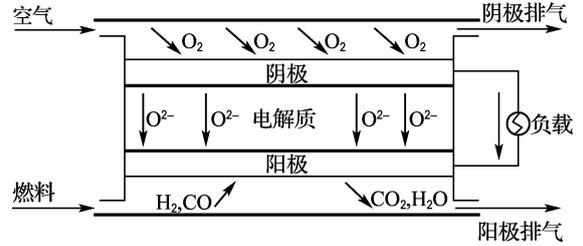


图 3 SOFC 电池反应

Fig. 3 SOFC battery reaction

APGC 燃机则采取在文献[1]中所获得的最佳性能参数作为模拟条件. 因此,整个复合循环系统的工作条件如表 1 所示.

表 1 常压 SOFC/APGC 混合系统参数

Tab. 1 The parameters of ambient SOFC/APGC system

参数	设计值
燃料成分/%	CH ₄ 81.3, C ₂ H ₆ 2.9, C ₃ H ₈ 0.4, C ₄ H ₁₀ 0.2, N ₂ 14.3, CO 0.9
电池反应面积/m ²	96.1(1 152 根管)
空气进口温度/℃	15
空气进口压力/MPa	0.101 3
燃料进口温度/℃	15
燃料进口压力/MPa	0.101 3
SOFC 热损失/%	2
SOFC 压损和工质损失/%	忽略不计
燃料的转化率/%	85
氧气的转化率/%	25
SOFC 发电功率(直流)/kW	120
水碳比	2.5
电池的工作温度/℃	1 000
电池工作电流密度/(mA · cm ⁻²)	181.25
电池工作电压/V	0.69
冷却器出口温度/℃	40
透平出口膨胀压力/MPa	0.03
透平进口温度/℃	846
透平等熵效率/%	85
压缩机等熵效率/%	85
回热器效率/%	85
MGT 发电机效率/%	92
直流交流转换效率/%	92
电池排气温度/℃	910

电池堆和燃气轮机装置的功率、发电效率,不能由反应器的出口热流或功流中直接得到,本文利用在 Aspen plus 界面上编写的 Fortran 程序进行二次开发,计算得出电池堆、燃气轮机装置以及联合循环的功率和发电效率,并在灵敏度分析中给出结果.

通过基于 Aspen plus 软件建立的复合系统,模拟得出复合系统性能. 表 2 给出了常压 SOFC/APGC 系统主要性能参数及计算结果. 可以看出该系统的净发电效率可达 66.5%,若考虑到余热

的利用则系统整体热效率可达80%以上。而目前实现商业化的燃气-蒸汽联合循环发电效率在50%左右,超临界参数电站发电效率为40.0%~44.5%,传统的亚临界参数电站供电效率只有38.0%~41.9%。因此,固体氧化物燃料电池和燃气轮机混合发电系统在性能上优势明显。

表2 SOFC/APGC系统主要性能参数计算结果

Tab. 2 The main performance results of SOFC/APGC system

装置	发电功率 (交流)/kW	燃料电池 效率/%	系统效率/%
常压 SOFC	110	52.0	52.0
加压 SOFC ^[5]	110	54.8	54.8
常压 SOFC/APGC	143	52.0	66.5

由表2常压SOFC/APGC系统主要性能参数计算结果可以看出:复合装置的发电效率比单独常压SOFC的电池效率提高了14.5%,功率提高了30%;相对于加压的燃料电池,复合系统效率也提高了近12%,充分显示了复合发电系统性能的优越性。

3 结 论

本文提出了常压燃料电池与环境压力下吸热燃气轮机复合发电系统,建立了相应的流程分析模型,以西门子120 kW固体氧化物燃料电池为例,对该复合系统性能给予了具体分析。结果表明:常压SOFC/APGC复合发电系统的发电效率达到了66.5%,相对于常压SOFC效率提高了14.5%,功率提高了30%。相对于加压SOFC,复合发电系统效率也提高了近12%。以上的实例分析显示出常压SOFC/APGC复合发电系统将为

未来能源动力系统的发展提供有效的途径。

参 考 文 献:

- [1] 王 巍. 环境压力下吸热燃气轮机循环的基础研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006
- [2] VERMES G, BARTA L E, BEER J M. Low NO_x emission from an ambient pressure diffusion flame fired gas turbine cycle (APGC) [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, **125**(1):46-50
- [3] FUJII S, KANEKO K, OTANI K, *et al.* Mirror gas turbine: a newly proposed method of exhaust heat recovery [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, **123**(3):481-486
- [4] BIANCHI M, DI MONTENEGRO G N, PERETTO A. Inverted Brayton cycle employment for low temperature cogeneration applications [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, **124**(3):561-565
- [5] 薛利超. 基于120 kW固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机复合系统性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007
- [6] COSTAMAGNA P, MAGISTRI L, MASSARDO A F. Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro turbine [J]. *Journal of Power Sources*, 2001, **96**(2):352-368
- [7] 王 巍, 黄钟岳, 王晓放. 微型燃气轮机与燃料电池复合装置的应用[J]. *燃气轮机技术*, 2006, **19**(1):26-28
- [8] ZHANG W, CROISSET E. Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlusTM unit operation models [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, **46**(2):181-196

Performance analysis of APGC gas turbine and SOFC hybrid power system

WANG Wei*, XUE Li-chao, HUANG Zhong-yue, WANG Xiao-fang

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the study of the new ambient pressure gas turbine cycle (APGC), the APGC gas turbine and ambient pressure solid oxide fuel cell (SOFC) hybrid power system is presented. The detailed analytic models are established by the commercial software Aspen plus for the performance analysis of the SOFC/APGC hybrid power system. The performance analysis is conducted according to the structure and parameters of 120 kW SOFC designed by Siemens and shows that the generating efficiency in the hybrid power system can reach 66.5%. This SOFC/APGC hybrid power system is advantageous to generating electric power.

Key words: gas turbine cycle; performance; hybrid power system