

高温燃料电池—燃气轮机混合发电系统性能分析

张会生, 刘永文, 苏明, 翁史烈

(上海交通大学 动力与能源工程学院, 上海 200030)

摘要: 针对高温燃料电池系统的高效率、环保性以及排气废热的巨大利用潜能, 将其与燃气轮机组成混合装置进行发电是未来分布式发电的一种极有前景的方案。文中对高温燃料电池及混合循环系统作了简介, 并对两种典型的高温燃料电池—燃气轮机混合循环发电系统进行了性能分析, 这将为我国高温燃料电池—燃气轮机混合循环系统的研制提供参考。

关键词: 熔融碳酸盐燃料电池; 固体氧化物燃料电池; 燃气轮机; 混合装置; 分布式发电

中图分类号: TM911.4 文献标识码: A

1 前言

高温燃料电池是指堆内工作温度和排气温度较高的燃料电池, 这类燃料电池包括熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell)和固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell); 其中熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)的工作温度是 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, 固体氧化物燃料电池(SOFC)的工作温度是 $800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当工作温度在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时, 天然气、煤气、石油气、沼气等都可以被重整而加以利用, 而且燃料本身转换效率高^[1]。高温燃料电池可以直接使用煤气, 这对于以煤炭为主要能源的我国解决提高能源使用效率、减少二氧化硫排放等问题上有重要意义^[2]。此

外, 在高温条件下, 燃料电池可以不采用贵金属, 如铂金等作催化剂, 这样可以降低燃料电池的成本, 从而为其商用化提供了条件。

本文所讨论的高温燃料电池最主要的一个优点还在于: 高品位的废热使得高温燃料电池可以和其它装置组成各种联合循环系统, 从而大幅度地提高燃料的利用效率。在这各种联合循环系统中, 和燃气轮机组成混合装置是其最佳选择^[3~5]; 一方面, 燃气轮机技术已趋完善, 混合装置效率可达到 $70\%\sim 80\%$ (燃料的低热值)。另一方面, 其排放指标很低(NO_x 和CO), 可以满足环保方面的要求。此外, 随着微型燃气轮机的出现以及模块化燃料电池技术的成熟, 这两种系统的参数相容, 组成混合循环具有一定的可行性, 并对分布式发电市场具有十分重要的意义^[6~7]。

2 混合循环系统结构

高温燃料电池—燃气轮机混合循环的结构各种各样, 典型的混合循环结构包括顶层循环和底层循环^[4~5]。顶层循环是指燃料电池取代燃烧室和发电机, 燃气轮机用于电厂的平衡; 通常顶层循环要求燃料电池内部的流动及工作处于一定的压力状态下。

收稿日期: 2001-08-23; 修订日期: 2001-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50176031); 国家973计划基金资助项目(G1999022303)

作者简介: 张会生(1971-), 男, 山西临猗人, 上海交通大学副教授。

[11] CUENOD COMPANY. Operating and Maintenance for Cuenod Burner C4~C34, C55~420[R]. 1987.

[12] CLERVER BROOKS COMPANY. Operating Instruction for Cleaver Brooks Model CN. Series 100~200~300~400~600~700[R], 1990.

[13] Nu-May Company. Handbook for Nu-Way Burner Series NOL Fully Automatic Oil Burner Model NOL 18 to 100~38[R]. 1990.

[14] 严和钦, 刘灿华. 燃油锅炉房设计中若干问题探讨[J]. 化工设计, 1999, 9(1): 33-35.

[15] 张文华. WNS型燃油(气)热水锅炉设计的几点构想[J]. 工业锅炉, 1997(4): 15-16.

[16] 董爱华. 燃油锅炉微机控制系统[J]. 煤矿自动化, 1999(3): 3-5.

[17] 施秉仁. 微机控制系统在工业锅炉上的应用及效果[J]. 节能, 2001(1): 17-21.

(辉 编辑)

底层循环是指燃料电池使用燃气轮机的排气作为其空气源, 燃料电池用于电厂的平衡; 底层循环中燃料电池内部的流动及工作处于常压状态下。

在发电领域中, 应用高温燃料电池和燃气轮机组成混合装置时, 比较适合的是熔融碳酸盐还是固体氧化物燃料电池呢? 这是一个有争议的问题, 不同公司有不同的观点。客观事实是许多国家都在两种类型上开展研究, 对两种类型都加强支持, 无论是美国还是日本都是如此, 但有一种观点比较能被多数人接受的, 那就是: 作为顶层循环, SOFC 在获得最高的效率上无疑是最佳方案。但对底层循环的设计而言, MCFC 是一个较好的结合。

图 1 给出的是一典型的 SOFC/GT 混合装置顶层循环结构图^[4]。从中可以看出, 燃料和从压气机出来的高压空气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; 化学反应生成的热量将加热流出气体而使其成为 900 °C 左右的高温气体; 为了满足涡轮进口温度的要求, 引入一定量的燃料与燃料电池排出的高温气体中剩余的氧化剂产生燃烧反应, 从而进一步提高进入涡轮的气体温度。涡轮膨胀做功后的气体仍具有一定的温度, 它可以用来加热进入燃料电池的空气和燃料。

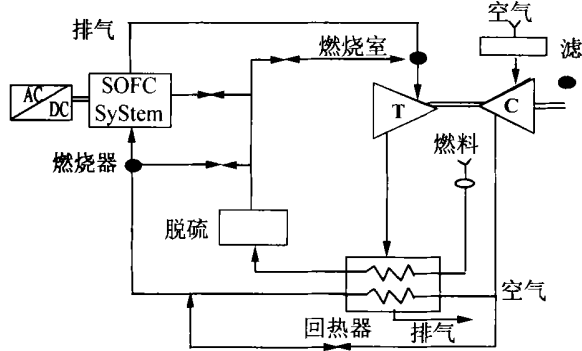


图 1 典型顶层循环结构

图 2 给出的是一典型的 MCFC/GT 混合装置底层循环结构图^[5,9]。在该混合装置设计中, 被压气机(Compressor)压缩后的空气在废热回收器(Heat Recovery Unit)中被加热, 在燃气透平(Turbine)中膨胀做功, 然后用作燃料电池的氧化剂。阴极的排气用来预热燃料和蒸发水; 而阳极的排气与空气在氧化器(Oxidizer)中再燃以预热进入阴极的空气, 并对压缩空气进行再热。将阳极排气中的 CO₂ 加入空气会形成碳酸根离子, 这一点正是 MCFC 堆中发生电

化学反应所需要的。因此, 在这种混合系统中, MCFC 比 SOFC 有以下优势: 可以免去将含高温 CO₂ 的废气排出的鼓风机; 可将其加入进口空气中, 节省了费用, 并提高了总体效率。

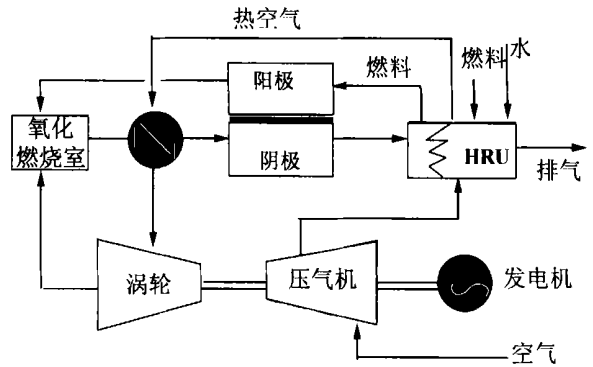


图 2 典型底层循环结构

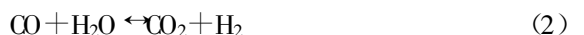
根据循环的不同, 燃料—电能的转换效率在 58%(小型混合装置)到 72%(大型混合装置), 甚至可以达到 80%(大型混合联合循环系统)^[9]。通常, 顶层循环会产生最高效的系统, 在阳极氧气浓度高, 与低压系统相比, 电池单元功率密度较高, 燃料电池堆中所需的电池单元减少。底层循环中燃料电池运行良好, 集成起来比较简单, 容易启动, 便于控制。为了获得高效率, 混合系统将尽可能地根据燃料电池堆的情况, 利用其高温排气来匹配所需的燃气轮机, 因此大部分的电能都由燃料电池产生(通常占 70%~80%以上)^[10]。

3 混合发电系统性能分析算例

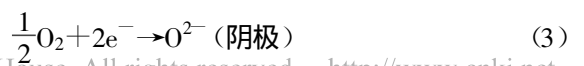
根据有关文献中给出的燃料电池系统的参数^[8-9], 以下给出了两种典型的燃料电池—燃气轮机混合装置发电系统, 分别对混合系统的性能进行分析, 以了解混合系统的特性, 为混合系统的参数匹配提供参考。

3.1 顶层循环分析

图 3 给出的是基于 SOFC 和微型燃气轮机的混合系统, 它属于顶层循环。燃料采用的是天然气, 其重整过程发生的化学反应如下:



在 SOFC 堆中发生的电化学反应如下



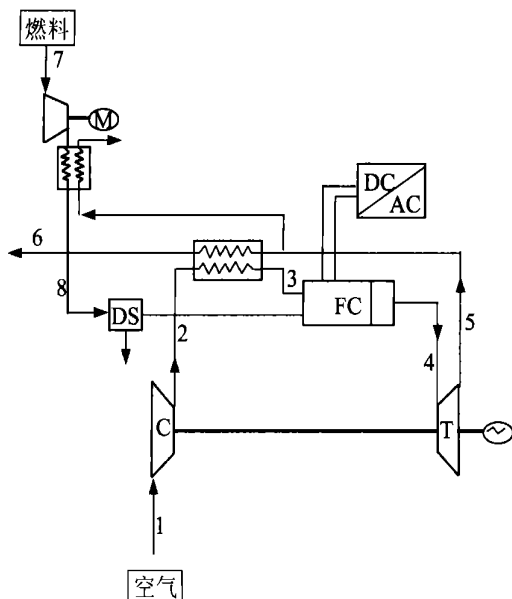
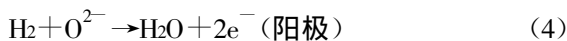


图 3 SOFC/GT 混合装置简图



从图 3 可以看出, 燃料(Fuel)和压缩空气(Air)被涡轮的排气预热后进入燃料电池堆中, 在此发生电化学反应后, 排出的气体温度将达到 900 °C 左右。高温高压的气体经过涡轮膨胀做功后仍具有相当高的温度, 将这部分排气的废热通过热交换器传递给进入燃料电池的空气和燃料, 从而提高了整个系统的效率。

微型燃气轮机压比为 3.9, 流量为 0.476 kg/s; 燃料电池堆的燃料与空气比为 1:50, 工作温度为 900 °C。假设热交换器中的压力损失为 3%, 电池堆中的压力损失为 10%。表 1 给出了计算得出的混合装置中各个位置处的流量、温度和压力参数。

表 1 混合装置各点的参数

	1	2	3	4	5	6	7	8
$m/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0.476	0.476	0.476	0.485 4	0.485 4	0.473	0.009 4	0.009 4
$T/\text{°C}$	15	185	605.5	900	658	270	15	400
$P/\times 10^5\text{Pa}$	1.013	3.943	3.844	3.432	1.088	1.013	1.033	1.09

燃气轮机中压气机和涡轮做功按绝热过程来处理, 燃料电池系统的性能参数给定, 因此, 可以通过计算得到整个混合装置的发电性能。

燃料低热值: $4.8 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$

燃料电池输出功率: $P_{\text{FC}} = Q_{\text{fuel}} \times \eta_{\text{FC}} \times m_{\text{fuel}} = 48\,000 \times 0.52 \times 0.009\,4 = 235.0 \text{ kW}$

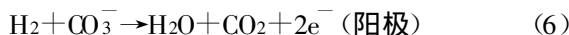
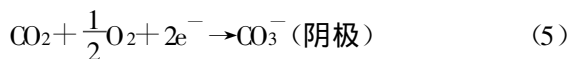
燃气轮机输出功率: $P_{\text{GT}} = P_{\text{T}} - P_{\text{C}} = 115 - 76.8 = 38.2 \text{ kW}$

混合系统输出功率: $P_{\text{total}} = P_{\text{FC}} + P_{\text{GT}} = 273 \text{ kW}$

从中可以看出, 燃气轮机功率占混合系统总发电量的 14.0%, 混合系统的燃料—电能转换效率达到 60.5%。根据表 1 中给出热交换器的进出口温度, 热交换器的效率必须要达到 89% 以上。这类小型混合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, 它对于分布式发电具有重要的意义。

3.2 底层循环分析

这里采用单级压缩和膨胀的燃气轮机和 MCFC 组成混合装置, 其结构如图 2 所示。这种底层循环的优点就是系统结构简单, 投资相对较少; 由于在常压下运行, 燃料电池堆设计寿命可达到 100 000 h^[7]; 燃料电池不需要复杂的重整设备, 燃料可以通过内重整而直接加以利用, 因此这类燃料电池也称为直接燃料电池(Direct Fuel Cell)^[9]。重整过程的化学反应和式(1)~(2)相同。阴极和阳极发生的电化学反应如下:



从图 2 可以看出, 燃料和水被送到废热回收器(HRU)进行加热, 水变为蒸汽与预热后的燃料混合作为燃料电池的阳极的输入。阳极排出的未消耗的燃料在阳极排气氧化器(Anode Exhaust Oxidizer)中燃烧。另一方面, 空气压缩至所需压力后在 HRU 中进一步被加热, 然后在涡轮中膨胀以产生电能, 从而提高了系统效率; 膨胀后的低压空气作为阳极排气氧化器中的氧化剂, 燃烧后的烟气首先用于加热进入涡轮的空气, 然后被送入燃料电池。燃料电池的排气则穿过 HRU 以对燃料进行预热并使水汽化。

燃气轮机的压比为 9, 流量为 16.3 kg/s; 燃料电池堆的燃料与空气质量比为 1:26, 工作温度为 650 °C。混合装置的发电性能如下:

燃料低热值: $4.7 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$

燃料电池输出功率: $P_{\text{FC}} = Q_{\text{fuel}} \times \eta_{\text{FC}} \times m_{\text{fuel}} = 47\,000 \times 0.58 \times 0.627 = 17\,092.0 \text{ kW}$

燃气轮机输出功率: $P_{\text{GT}} = P_{\text{T}} - P_{\text{C}} = 6\,600 - 4\,950 = 1\,650 \text{ kW}$

混合系统输出功率: $P_{\text{total}} = P_{\text{FC}} + P_{\text{GT}} = 18\,742 \text{ kW}$

从中可以看出, 燃气轮机功率占混合系统总发电量的 8.8%, 混合系统的燃料—电能转换效率达到 63.6%。由于该系统结构简单, 免去了高温换热

器, 常压下运行可以延长系统且利于燃料的直接重整, 因此这种系统被美国能源部(DOE)列入下一代重点开发的发电系统^[9]。

4 结论

燃料电池的环保性和高效率使其作为新一代发电系统而受到越来越多国家的重视; 高温燃料电池则由于其可使用燃料的多样性以及高品位的废热而使得其在发电系统中具有十分广阔的前景。高温燃料电池的排气温度较高, 这使得其与燃气轮机组成混合发电装置成为最佳选择。对于固体氧化物燃料电池而言, 由于其排气温度较高, 基本可以满足涡轮进口温度要求, 因此采用顶层循环比较有利; 对于熔融碳酸盐燃料电池而言, 在常压状态工作能够保证燃料的直接重整而无需复杂的外重整设备, 同时可以增加电池堆的寿命; 另一方面, 阴极的电化学反应可以利用阳极排气中的二氧化碳, 提高系统效率并减少温室气体的排放; 因此采用底层循环具有一定的优势。

参考文献:

[1] KLAUS HASSMANN, REINHARD RIPPEL. A new approach to fuel cell investment strategy[J]. *Journal of Power Sources*. 1998, 71: 75—79.

[2] 毕道治. 中国燃料电池的发展[J]. *电源技术*, 2000, 24(2): 103—107.

[3] HIROO YASUE, HISASHI KATO, KAZUHIKO TAKASU. Development of a 1000 kW-class MCFC plant in Japan[J]. *Journal of Power Sources*. 1998, 71: 89—94.

[4] ABBIE LAYNE, SCOTT SAMUELSEN, MARK WILLIAMS, et al. Hybrid heat engines; the power generation systems of the future[R]. ASME Turbo Expo 2000, 2000—GT—0549.

[5] ARISTIDE F MASSARDO, COLIN F MCDONALD, THEODOSIOS KORAKIANITIS. Microturbine/fuel cell coupling for high efficiency electrical power generation[R]. ASME Turbo Expo 2000 2000—GT—175.

[6] 依宝廉. 燃料电池现状与未来[J]. *电源技术*, 1998, 22(5): 216—221.

[7] SY A ALL, ROBERT R MORITZ. A turbogenerator for fuel cell/gas turbine hybrid power plant[R]. ASME Turbo Expo 2000, 2001—GT—0524.

[8] 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 gas turbine[J]. *Journal of Power Sources*. 2001, 96: 352—368.

[9] ANTHONY J LEO, HOSSEIN GHEZEL-A YAGH, ROBERT SANDERSON. Ultra high efficiency hybrid direct fuel cell/turbine power plant[R]. ASME Turbo Expo 2000, 2000—GT—0552.

[10] PIERO LUNGHI, STEFANO UBERTINI, UMBERTO DESIDERI. Highly efficient electricity generation through a hybrid molten carbonate fuel cell-closed loop gas turbine plant[J]. *Energy Conversion and Management*. 2001, 42: 1657—1672.

(辉 编辑)

新技术

用于火力发电站的径流—轴流式涡轮

据《Теплоэне Р етика》2001 年 11 月号报道, 径流—轴流式涡轮广泛应用于致冷和低温工程。通常, 径流—轴流式涡轮在小功率(几十和几百 kW)应用时, 它们的气动力效率高于轴流式涡轮。冶金学方面的进展已使得建造功率为 30 MW 和更大功率的径流—轴流式涡轮成为可能, 这就可以把它们用于驱动动力装置的给水泵和送风机。

对驱动给水泵和送风机的径流—轴流式涡轮的计算表明, 与类似的轴流式涡轮相比较, 它们具有下列优点:

1. 用于驱动给水泵和通风机时, 径流—轴流式涡轮通流部分效率要比轴流式涡轮高 2%, 效率的提高得益于喷嘴槽道收敛度的增加和动叶上面漏泄损失的减少;
2. 在径流—轴流式涡轮内, 不难把喷嘴叶栅做成可转动的, 以便调节蒸汽的流量并保持涡轮在部分负荷时高的经济性。由于在稳定工况时使壁面紧贴叶片端部, 径向可转叶片可以减少漏泄;
3. 径流—轴流式涡轮具有比较少的级数(例如, 4 级代替轴流中的 8 级), 以及级内较少的叶片数, 其动叶数为 18~20, 静叶数为 20~30; 而在类似的轴流式涡轮中静叶数为 50~60, 动叶数为 70~90。级数的减少, 致使涡轮制造和修理的费用降低;
4. 径流—轴流式涡轮运行十分可靠, 动叶振动破坏的概率较少;
5. 借助于蜗壳形式的无叶装置把工质引到动叶, 可以把径流—轴流式涡轮做成没有静叶。

(思 娟 供稿)

热经济学研究的使命与任务 = **Mission and Assignments of Thermoconomics Research** [刊, 汉] / WANG Jia-xuan, WANG Qing-zhao, SONG Nai-hui (Power Engineering Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 111 ~ 114

Two basic methods of thermodynamics analysis and its development are expounded along with a description of the fundamental character of exergy, explaining why the latter serves as the parameters of potential. The thermoconomics-related thermodynamics basic research issues are explored, enunciating the influence of exergy law on thermoconomics. The value-setting law of the thermoconomics is described and some observations on its unified-direction development problems are presented. In conclusion, a brief account is given of some advances in the model building of ecological system network thermodynamics in connection with the ecology-balanced thermoconomics. **Key words:** thermodynamics analysis, thermoconomics, ecology system, model building

WNS 型燃油、燃气锅炉技术现状与发展方向 = **Present Situation and Direction of Development of Model WNS Oil/Gas-fired Boiler Technology** [刊, 汉] / WANG Huai-bin, MENG Li-li (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 115 ~ 117

An analysis and comparison is conducted of the construction of existing model WNS oil-fired and gas-fired boiler proper. On this basis the authors point out that the elimination of its back-burning furnace represents an improvement in the right direction for three-pass wetback boilers. On the other hand, central return-burning type of oil and gas-fired boilers pertain to a type of small and medium-sized oil and gas boilers worthy of popularization in the process of their development. Also discussed is the control system of the model WNS oil and gas-fired boilers. In the light of their specific features it is noted that a fully intellectualized control and remote-operated technical service system is their trend of future development. **Key words:** oil-fired boiler, gas-fired boiler, central return burning, direction of development

高温燃料电池—燃气轮机混合发电系统性能分析 = **Performance Analysis of a High-temperature Fuel Cell and Gas Turbine Hybrid Power Generation System** [刊, 汉] / ZHANG Hui-sheng, LIU Yong-wen, SU Ming, WENG Shi-lie (Power and Energy Source Engineering Institute under the Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 118 ~ 121

High-temperature fuel cell system features high-efficiency, environmental friendliness and enormous potential of exhaust gas waste-heat utilization. The combination of this system with a gas turbine to form a hybrid power plant can well be regarded as a very promising scheme of future distributed power generation. A brief description is given of the high-temperature fuel cell and the hybrid cycle system consisting of the fuel cell and a gas turbine. This is followed by a performance analysis of two typical hybrid systems (topping cycle and bottoming one). The above work can provide some informative materials and data for the development of the high-temperature fuel cell and gas turbine hybrid cycle system in China. **Key words:** molten carbonate fuel cell, solid oxide fuel cell, gas turbine, hybrid plant, distributed power generation

环境温度对湿空气透平(HAT)循环性能的影响 = **The Effect of Ambient Temperature on the Performance of a Humid Air Turbine (HAT) Cycle Performance** [刊, 汉] / ZHAO Li-feng, XIAO Yun-han, ZHANG Shi-zheng (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 122 ~ 125

Based on the building of an off-design performance model for the various components in a humid air turbine (HAT) cycle the authors have analyzed the off-design performance of a HAT cycle, which was compared with that of a simple intercooling cycle. The results of the comparison show that the HAT cycle enjoys a good off-design performance. **Key words:** hu-