

# 高温燃料电池与燃气轮机相结合的混合发电系统

陈启梅, 翁 一武, 翁 史烈, 朱新坚

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200030)

**摘 要:** 高温燃料电池与燃气轮机相结合的混合发电系统具有高效、环保和可靠的特性, 这种新颖的混合发电系统在未来分布式发电领域具有广阔的应用前景。有不少专家和学者对其系统构成及匹配、系统性能等问题做了大量研究。目前已有高温燃料电池与燃气轮机混合发电系统成功运行, 但仍有很多问题需要进行进一步的研究和探索, 以使该混合发电系统早日实现商业化运行。本文综述了高温燃料电池与燃气轮机混合发电系统的研究现状, 展望了该混合发电系统在未来的研究及发展前景。

**关键词:** 高温燃料电池; 燃气轮机; 混合发电系统

中图分类号: TM611.3

文献标识码: A

## 1 前 言

随着人们对经济性的重视、环境保护意识的增强, 要求发展能量利用率高, 环保性能良好的能源技术。具有高效、无污染的突出优点而被誉为“绿色能源”的燃料电池, 既适合于作分布式电源, 又可在将来组成大容量中心发电站, 是 21 世纪最有吸引力的发电方法之一。

高温燃料电池的排气温度

高, 有很大的余热利用价值, 混合发电系统的使用可大大提高燃料利用率和电厂综合效率, 降低污染物  $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}$  的排放。如今, 虽然高温燃料电池还没有完全实现商业化, 但这并不影响人们对其混合发电系统技术的研究。

目前, 国内外研究的高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统主要有两种: 一种是由熔融碳酸盐燃料电池与燃气轮机组成; 另一种是由固体氧化物燃料电池与燃气轮机组成。近几年来, 许多高温燃料电池相继发电成功, 以及燃气轮机的实验积累, 都为建立高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统创造了条件, 使得这种混合发电系统的研究也得到了迅速发展<sup>[1~2]</sup>。

## 2 高温燃料电池概述

燃料电池是一种将储存在燃料和氧化剂中的化学能, 直接转化为电能的装置。因此燃料电池不受卡诺循环限制, 具有能量转换效率高、可靠性高、清洁无污染和噪声低, 模块结构, 既可以集中供电, 也适合分散供电等特点。

高温燃料电池是指工作温度

在  $600 \sim 1000\text{ }^\circ\text{C}$  的燃料电池, 它包括熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC, 工作温度为  $650\text{ }^\circ\text{C}$ ) 和固体氧化物燃料电池 (SOFC, 工作温度为  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ )。它们的排气温度都超过了  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , 所以高温燃料电池又被称为面向高质量排气而进行联合开发的燃料电池<sup>[3]</sup>。高温燃料电池除具有一般燃料电池的优点外, 还有如下特点<sup>[4]</sup>:

(1) 不需要用贵金属作催化剂, 制造成本低;

(2) 可以用  $\text{CO}$  作燃料;

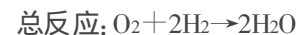
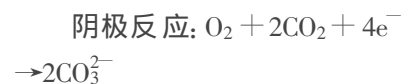
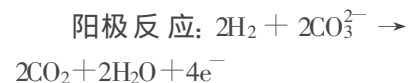
(3) 改质反应可在内部进行;

(3) 排气品味高, 可与燃气轮机、汽轮机等组成高效的联合循环发电系统。

### 2.1 高温燃料电池的基本原理

以 MCFC 为例说明高温燃料电池的工作原理 (如图 1 所示)。

MCFC 的电极反应为:



燃料流 (如天然气) 经重整反应后产生富集  $\text{H}_2$  的气体,  $\text{H}_2$  在

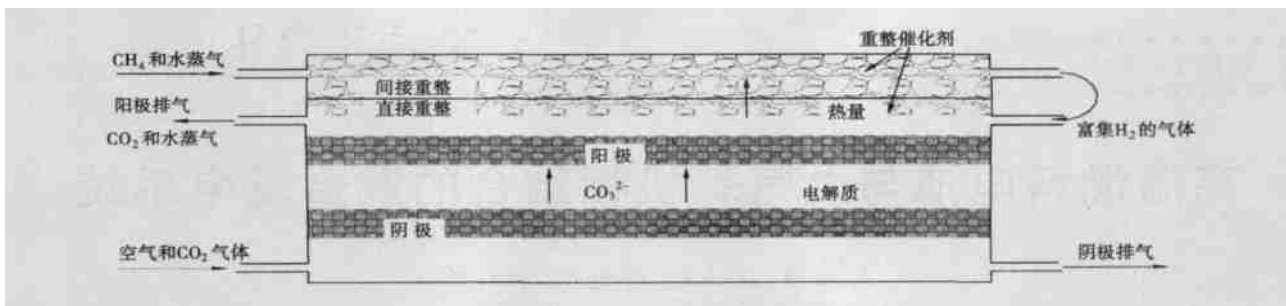


图 1 MCFC 工作原理图

阳极发生氧化反应, 和电解质中的  $\text{CO}_3^{2-}$  作用生成  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ , 同时释放出电子。氧化剂流中的  $\text{O}_2$  在阴极和  $\text{CO}_2$  作用并捕获电子, 生成  $\text{CO}_3^{2-}$  进入电解质, 然后  $\text{CO}_3^{2-}$  游离扩散到燃料电池的阳极, 补充消耗的  $\text{CO}_3^{2-}$ 。阳极产生的电子通过外电路传到阴极, 从而构成了一个包括电子传输和离子移动在内的完整回路。为确保电池稳定连续地工作, 在 MCFC 主体内需要有一个  $\text{CO}_2$  的内部循环, 将在阳极产生的  $\text{CO}_2$  返回到阴极。

### 2.2 高温燃料电池的研究现状

MCFC 在 20 世纪 50 年代初作为大规模民用发电装置引起了世界范围内的重视, 之后发展很快, 到了 80 年代, MCFC 被作为第二代地面用的燃料电池, 实现兆瓦级燃料电池电厂是其研究目标。现在, MCFC 的研究在国外已经进入早期商业化阶段, 主要集中在美国、日本和西欧等国家。迄今为止, 最大的 MCFC 发电装置是从 1994 年在美国 Santa Clara 城开始建造的 2 MW 项目, 该装置的建造为开发大规模 MCFC 电站提供了有益的经验<sup>[5]</sup>。日本在 1995 年建造了第一个外部重整式加压 MCFC 发电装置, 它是一个由 4 个 250 kW 的电池堆组成的 1 000 kW 级的

MCFC 发电装置。这个装置的建造是为将来实现大型商业化 MCFC 发电系统做准备<sup>[6]</sup>。在德国, MTU Friedrichshafen 公司已经建成了一种内部重整式的 MCFC 堆发电装置, 该电池堆是由 300 个交叉流型的单电池组成, 其发电功率为 250 kW, 总发电效率超过了 50%<sup>[7]</sup>。德国还研制出一种使用污水废气为燃料的 1 kW 的 MCFC 发电系统, 这种技术使污水废气成为 100% 的可回收利用资源<sup>[8]</sup>。目前, MCFC 在国内尚处于研究阶段, 只有上海交通大学、中国科学院长春应用化学研究所和大连物化所等为数不多的研究单位研究电池堆的性能, 尚未建立试验电厂。西屋公司与美国能源部 (DOE) 携手合作, 大力发展管式 SOFC 发电装置, 一直是最先进管式 SOFC 技术的领导者。Shell Hydrogen 和 Siemens Westinghouse 联合开发了使用天然气作为燃料的 SOFC 技术, SOFC 发电容量为 250 kW ~ 10 MW<sup>[9]</sup>。1989 年, 在日本东京和大阪煤气公司安装的 3 kW 级列管式 SOFC 发电机组连续运行 5 000 h 试验的成功, 标志着 SOFC 研究将从实验室规模向商业化发展<sup>[10]</sup>。现在美国已有 5 kW 的 SOFC 产品出售。据报道, 俄罗斯对 SOFC 系统的开发也有了新的

突破, 建立了第一个基于 SOFC 的试验性发电系统。该试验系统的燃料为天然气, 电力输出为 1 kW<sup>[11]</sup>。此外, 欧洲各国的科技工作者也都在纷纷开展 SOFC 的研究与开发。我国从 1995 年开始进行 SOFC 的研究, 现在尚处于研究的初期阶段, 和国际 SOFC 技术相比差距较大。

### 3 高温燃料电池与燃气轮机混合发电系统

一种被普遍认同的提高效率的方法是组成联合循环系统, 高温燃料电池和燃气轮机的混合发电装置就是在这种思想的指导下产生的。高温燃料电池的高品位废热使得它可以和其它动力装置组成各种联合循环系统, 从而更好地利用能源, 大幅度地提高装置整体效率。

Grillo Olivia 等人分析和比较了多种高温燃料电池混合发电系统<sup>[12]</sup>, 结果表明, 高温燃料电池与燃气轮机混合发电系统是最佳的选择, 该系统不仅提高了系统效率, 还降低了发电费用。而且, 将燃料电池和传统发电循环系统联合起来发电, 能加快燃料电池技术的发展。

#### 3.1 混合发电系统的组成

高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统是由高温燃料电池和

燃气轮机两个子系统组成的。混合发电系统解决了两个重要问题: 一个是小型燃料电池发电设备费用高的问题; 另一个是微小燃气轮机的低效率和相对高的排放量的问题<sup>[13]</sup>。根据两个子系统布置方式的不同, 人们把混合发电系统分为两类: 一类是使用直接燃烧式燃气轮机的混合发电系统(或称顶层循环方式, 如图 2 所示), 这种混合发电系统通常利用一个加压燃料电池向燃气轮机输入燃气, 燃料电池相当于燃气轮机的燃烧室; 另一类是使用间接燃烧式燃气轮机的混合发电系统(或称底层循环方式, 如图 3 所示), 在该混合发电系统中, 燃料电池的阳极排气通过一个换热器加热燃气轮机所需的高温高压气体。

料电池阴极进口空气的压力, 供给燃料电池使用。燃料和氧化剂流在燃料电池内部发生电化学反应后, 阳极和阴极排气一起进入一个氧化燃烧室中混合燃烧, 使未反应的  $H_2$ 、 $CO$  等充分反应, 同时提高气体温度, 经过催化燃烧后的气体直接进入透平中膨胀做功。同时, 透平排气又用来预热进入燃料电池阳极的燃料, 提

压气流进入燃气轮机透平做功发电, 透平的排气又进入氧化燃烧室进行循环利用。在间接燃烧式系统中, 燃料电池在环境压力下运行, 其压力和燃气轮机循环压比无关, 因而系统可以在很大的燃气轮机循环压比范围内有效运行。这种特性使其在发电规模上有很大的灵活性。这种结构可用于多种结构类型的燃气轮机。

表 1 混合发电系统性能比较

	直接燃烧式 混合发电系统	间接燃烧式 混合发电系统
FC 与 GT 功率比	4:1 左右	10:1 左右
燃料利用率与压比	较难匹配	较易匹配
效率的提高	显著	较显著
关键热力系统组件	高温回热器	高温换热器
燃料电池压力	加压	常压或加压

高热量利用率。透平带动压气机后剩余的功率带动发电机发电, 与燃料电池共同输出电力<sup>[14]</sup>。

两种混合发电系统性能比较如表 1 所示。

在间接燃烧式系统中, 燃料电池可以在常压下工作, 也可以在一定压力下工作。试验证明, 提高燃料电池反应气体的压力将提高燃料的利用率, 从而提高燃料电池的效率, 但是这样做会缩短燃料电池的寿命, 所以大部分间接燃烧式混合发电系统中的燃料电池都在常压下工作。如图 3 所示, 燃料与燃料电池阴极出口气体进行换热后进入燃料电池的阳极, 在燃料电池阳极的出口, 燃料并没有完全反应, 剩余燃料进入氧化燃烧室中与空气进行催化燃烧, 使其中的  $H_2$ 、 $CO$  等充分反应, 同时提高气体温度。经过催化燃烧后的气体从氧化燃烧室进入换热器, 加热进入燃气轮机的气体。换热之后的气体进入燃料电池的阴极。在燃气轮机部分, 空气经过压气机压缩, 进入换热器, 和进入燃料电池阴极的气体进行热交换, 经过加热的高温高

根据联合循环方式的不同, 系统的发电效率也会有所不同。通常, 直接燃烧式混合发电系统会产生更高的效率, 其阳极氧气浓度高, 与间接燃烧式混合发电系统相比, 燃料电池堆功率密度较高, 但间接燃烧式混合发电系统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, 而且使用寿命长。所以, 通过初步对各种构成的燃料电池混合发电系统比较研究发现, 间接燃烧式混合发电系统是比较有前景的一种联合循环方式, 它具有结构简单、投资低等优点。

### 3.2 混合发电系统的研究现状

从文献来看, 人们对 MCFC 或 SOFC 与燃气轮机 (GT) 组成的混合发电系统进行了大量研究。

日本在 2002 年启动了一个 MCFC-MGT 项目, 该项目使用的 MCFC 为 330 kW, MGT 为 40 kW, 燃料电池运行压力为 0.24 MPa, 燃料利用率为 80%, 系统发电效

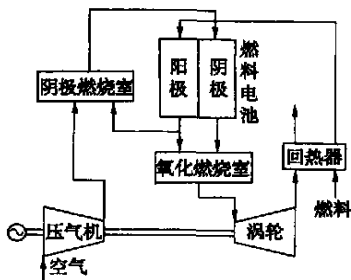


图 2 顶层循环混合发电系统示意图

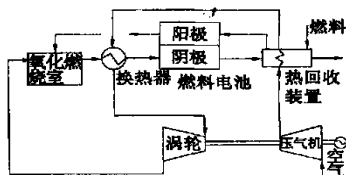


图 3 底层循环混合发电系统示意图

在直接燃烧式混合发电系统中, 要求燃料电池在一定的压力下工作, 一般采用压气机提高燃

率为 55% (低热值, LHV), 综合效率为 75% (IHV)<sup>[13]</sup>。为了实现中型的 MCFC-GT 高效混合发电系统, 日本正致力于加压机 MCFC 系统的研发<sup>[16]</sup>。Lobachov 和 Richter 预言将现有的 2.5 MW 的中型 MCFC 加一个间接燃烧式燃气轮机循环组成的混合发电系统的总热效率可达到 70%<sup>[17]</sup>。文献[18]中报道了一个 200 kW 的间接燃烧式混合发电系统, 系统中 70% 的功率由燃料电池提供, 剩下的 30% 由燃气轮机提供, 该混合发电系统的效率为 72.6% (LHV)。Maru 等人研究了一个常压型内部重整式 MCFC 和 GT 组成的 20 MW 的间接燃烧式混合发电系统<sup>[19]</sup>, 预测其期望效率可达 75%。Liese 等对 1 MW 的 MCFC-MGT 混合发电系统进行研究时也得到了相似的结果<sup>[20]</sup>。在意大利, 有很多高校都在从事联合循环装置的研究, 如 Politecnico 大学动力系的 Macchi 和 Campanari 对 2500 kW 的 MCFC-GT 混合装置进行了仿真试验<sup>[21]</sup>。上海交通大学也正在进行 MCFC 与 MGT 组成的混合发电系统的研究, 所使用的高温燃料电池是自行研制的 10 kW 的 MCFC。

美国能源部和西屋电器公司成功建立了一个 250 kW 的 SOFC 与 GT 联合循环示范电站, 其中燃料电池发电 200 kW, GT 发电 50 kW<sup>[22]</sup>。瑞典 Lund 大学对 SOFC-GT 混合发电系统进行了研究, 所参考的混合发电系统中 SOFC 和 GT 的输出功率分别为 311 kW 和 173 kW, SOFC 的电力输出为总系统的 64%。当压气机压比为 2 时, 系统的发电效率最高为 65%<sup>[23]</sup>。George 曾预测:

一个由加压机 SOFC 和 MGT 组成的 220 kW 的混合发电系统的发电效率为 57%<sup>[24]</sup>。Costamagna 等人在文中讨论了 SOFC-MGT 混合发电系统全工况的工作性能, 混合发电系统由 250 kW 的 SOFC 电池堆和 50 kW 的 MGT 组成。研究结果显示, 在设定工况下混合发电系统的效率在 60% 以上, 部分工况下也能达到 50% 以上的效率<sup>[25]</sup>。

#### 4 展望

随着经济性和环境保护越来越受到人们的重视, 发电系统应满足更清洁和更高效的要求。高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统自一提出就受到了人们的普遍重视。美国、日本和欧洲等国家纷纷进行混合发电系统的商业化研发, 我国也正在进行混合发电系统的基础研究<sup>[26]</sup>。

在国外, 一定程度上代表世界高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统发展水平和方向的发展目标为: 到 2005 年, 混合发电系统的功率达到 1 MW, 并且使用天然气的燃料转换效率达到 60% 以上, 使用煤的转换效率达到 45% 以上; 到了 2015 年, 混合发电系统使用天然气的转换效率达到 80% 以上, 使用煤的转换效率达到 60% 以上<sup>[27]</sup>。我国燃料电池发展也已纳入中长期规划, 燃气轮机发展 863 计划正在研制。100 kW 级的混合动力系统有望在 2006 年投入试运行。

虽然, 现阶段已有高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统成功运行, 可是混合发电系统的发展还面临着很多困难。比如, 燃料电池寿命、混合系统的控制手段等很多技术问题需要进行进一

步的研究和探索, 以使该混合发电系统早日实现商业化运行。此外, 混合系统成本昂贵等经济上的困难也将阻碍其迅速发展。

在发展混合发电系统本身技术的同时, 还应注重相应环保技术的发展。将生物气体、垃圾和污水废气等作为燃料来使用, 不仅对废物进行了再次利用, 节约了能源, 而且还减轻了环境污染等问题。

总之, 作为目前世界上最先进的高效、洁净发电方式之一的高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统已经呈现出诱人的发展前景, 将会成为未来分布式电源系统的一种重要形式。对高温燃料电池与燃气轮机混合发电系统的研究具有重要的现实意义。

#### 参考文献:

- [1] SY A ALL, ROBERT R MORITZ, A turbogenerator for fuel cell/gas turbine hybrid power plant [J]. *ASME Turbo Expo* 2001-GT-0524.
- [2] UBERTINI S, LUNGI P. Assessment of an ambient pressure MCFC: external heated GT hybrid plant with steam injection and post-combustion [J]. *Fuel Cells*, 2001, 1: 174-180.
- [3] 衣宝廉. 燃料电池现状与未来 [J]. *电源技术*, 1998, 22(5): 216-221.
- [4] JOON K. Critical issue and future prospects for molten carbonate fuel cell [J]. *J Power Sources*, 1996, 61: 129-133.
- [5] Fuel Cell Engineering Corporation. 2 MW Fuel Cell Demonstration Power Plant Test Report [R]. prepared for EPRI, TR-108 252, July 1997.
- [6] ISHIKAWA T, YASUE H. Start-up, testing and operation of 1 000 kW class MCFC power plant [J]. *J Power Sources*, 2000, 86: 145-150.
- [7] PETER H, KAI S. Molten carbonate fuel cell (MCFC) with internal reforming: model-based analysis of cell dynamics [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58: 1029-1036.

- [ 8 ] R A I F H I L L E R D. German project to operate arsaldco MCFC on sewage off-gas[ J ]. **Fuel Cells Bulletin**, 2004, 1: 6—7.
- [ 9 ] W E I D N E R J W, D O Y L E M. Report on the electrolytic industries for the year 1999 [ J ]. **J Electrochem Soc**, 2000, 147 (10): 3953—3974.
- [ 10 ] V R E E K E M S, M A H D T, D O Y L E C M. Report of the electrolytic industries for the year 1997[ J ]. **J Electrochem Soc**, 1998, 145(10): 3668—3693.
- [ 11 ] V I K T O R E Y. Russian breakthrough with SOFC system[ J ]. **Fuel Cells Bulletin**, 2004, 7(3): 2—3.
- [ 12 ] G R I L L O O, M A G I S T R I L, M A S S A R D O A F. Hybrid systems for distributed power generation based on pressurization and heat recovering of an existing 100 kW molten carbonate fuel cell[ J ]. **J Power Sources**, 2003, 115(10): 252—267.
- [ 13 ] J U R A D F, V A L V E R D E M. Combined molten carbonate fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation using biomass[ J ]. **Electric Power Systems Research**, 2003, 65: 223—232.
- [ 14 ] C A M P A N A R I S, M A C C H I E. The combination of SOFC and microturbine for civil and industrial cogeneration [ J ]. **ASME Paper** 99—GT—084.
- [ 15 ] 近藤, 元博. 熔融碳酸盐燃料电池—微型燃气轮机混合发电装置的开发[ J ]. **燃料电池**, 2003, 3(1): 23—26.
- [ 16 ] M A S A A K I T, N O B U Y U K I Z, *et al.* Development of molten carbonate fuel cell [ J ]. **IHI Engineering Review**, 2003, 36 (1): 5—13.
- [ 17 ] L O B A C H Y O V K V, R I C H T E R H J. Addition of highly efficient bottoming cycles for the nth generation molten carbonate fuel cell power plant[ J ]. **ASME J Energy Res Technol**, 1997, 119: 103—108.
- [ 18 ] S T E I N F E L D G, M A R U H C, S A N D E R S O N R A. High efficiency carbonate fuel cell turbine hybrid power cycle [ R ]. IECEC Conference, 1996.
- [ 19 ] M A R U H. Direct fuel cell/turbine hybrid system for ultra high efficiency power generation[ R ]. London: Abstracts of the VII Grove Fuel Cell Symposium, 2001.
- [ 20 ] L I E S E R S. Dynamic modelling results of a 1 MW MCFC/GT power system[ J ]. **ASME Turbo Expo**, 2002, 6: 3—6.
- [ 21 ] M I C H A E L D. L U K A S A K W A N G Y L E E A. Hossein ghezal-ayagh, modeling and cycling control of carbonate fuel cell power plants[ J ]. **Control Engineering Practice** 2002 10: 197—206.
- [ 22 ] 杨策, 刘宏伟. 微型燃气轮机技术 [ J ]. **热能动力工程**, 2003, 18(1): 1—4.
- [ 23 ] P A I S S O N J, S E L I M O V I C A, S J U N N E S S O N L. Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation[ J ]. **J Power Sources**, 2000, 86: 442—448.
- [ 24 ] G E O R G E R A. Status of tubular SOFC field unit demonstrations[ J ]. **J Power Sources**, 2000, 86: 134.
- [ 25 ] C O S T A M A G N A P, M A G I S T R I L, M A S S A R D O 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 ]. **J Power Sources**, 2001, 96: 352—368.
- [ 26 ] 翁一武, 翁士烈, 苏明. 以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统 [ J ]. **中国电力**, 2003, 36(3): 1—4.
- [ 27 ] V E Y O S. Westinghouse fuel cell combined cycle systems [ R ]. Westinghouse Science & Technology Center, 1996.

(渠源 编辑)

## 新机组

## 中间冷却的 LMS 100 燃气轮机

据《Gas Turbine World》2003 年 12 月~2004 年 1 月号报道, 美国 GE 公司正在研制高效大功率中间冷却的 LMS100 燃气轮机。用于 50 Hz 和 60 Hz 电力生产, 在基本负荷 ISO 条件下 LMS100 的额定输出功率为 100 MW, 热效率为 46%。作为发电机组箱装体, 该机组将于 2005 年下半年可供市场应用。

项目工程师在新闻发布会上指出, 由于采用中间冷却和更有效的设计, 该燃机的效率要比迄今为止 GE 最有效的简单循环燃机高 10%。

LMS100 燃机具有三转子设计, 在其低压压气机和高压压气机之间装备有一个安装在发动机外的中间冷却器。

冷却低压压气机输出的被增压的炽热气流减少了高压压气机的压缩功, 并使循环压比增加到 42:1。

减少高压压气机的进口温度增加了质量流量, 并降低了压气机排气温度, 从而为涡轮冷却提供了更冷的空气。

更有效的冷却允许以更高的燃气初温(高达)1 380 °C 运行, 未必增加金属的温度(其金属温度与燃气初温为 1 243 °C 的 LM6000 相当)。

LMS100 的低压转子由 6 级低压压气机和 2 级低压涡轮组成, 高压转子由 14 级高压压气机和 2 级高压涡轮组成, 输出功率的转子由 5 级动力涡轮组成。

(吉桂明 供稿)

高温燃料电池与燃气轮机相结合的混合发电系统 = **A Power Generation System Based on the Combination of High-temperature Fuel Cells and Gas Turbines - a Hybrid Power Generation System** [刊, 汉] / CHEN Qi-mei, WENG Yi-wu, WENG Shi-lie, et al (Power Machinery and Engineering Education Ministry Key Laboratory under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 111 ~ 115

A hybrid power generation system based on the combination of high-temperature fuel cells and gas turbines features high-efficiency, protection of environment and reliable performance. Such an innovative power generation system enjoys bright prospects of wide applications in the realm of future distributed power generation. Numerous experts and scholars have carried out a huge amount of research concerning its system configuration, matching and performance. Currently, several of such hybrid power generation systems are already operating successfully. However, there still remain many problems, which require further study and exploration in order to realize their early commercial operation. The authors have presented an overview of the present status of hybrid power generation development along with a forecast of its future research trends and development prospects. **Key words:** high-temperature fuel cell, gas turbine, hybrid power generation system

冲角对不同掠型压气机叶栅扩压因子的影响 = **The Impact of the Variation in Incidences on the Diffusion Factor of Compressor Cascades of Different Swept Types** [刊, 汉] / CHEN Fu, ZHAO Gui-jie, SONG Yi-ping, et al (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 116 ~ 119

An experimental investigation was conducted of the compressor cascades composed of straight, swept-forward, swept-curved and swept-back blades. In connection with the energy loss distribution at the cascade outlet, the static pressure distribution at the blade surface and blade loading discussed are the influence of variation in incidences on the diffusion factor of compressor cascades of different swept types as well as the interrelationship between the cascade diffusion factor and cascade energy loss on the one side and the blade loading on the other. Study results have shown that the swept-forward and swept-curved cascades markedly contribute to the improvement of flows at the root portion of the cascades, thus effectively eliminating the possibility of flow separation caused by a flow speed reduction. The combined action of a greater reverse-pressure gradient of the above two types of cascade and a lower blade loading at midspan has resulted in a smaller diffusion factor at the two ends of the blade than that at the straight cascade. **Key words:** compressor, test, diffusion factor, swept-curved blade, incidence

船用燃气轮机动力涡轮可调导叶级的流场结构 = **The Flow Field Structure of the Power-turbine Variable-area Nozzle Stage of a Marine Gas Turbine** [刊, 汉] / LIU Shun-long, FENG Yong-ming (College of Power & Nuclear Energy Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), LIU Ming (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 120 ~ 124

Based on the coupled solution of a compressible Favre-averaged Navier-Stokes equation and Menter baseline (BSL) dual-equation turbulence-flow model the authors have conducted a full flow-field three-dimensional viscous numerical simulation of a variable-geometry power turbine, taking into account a variable-area nozzle design. Computational results indicate that with the use of the variable-area nozzle techniques there occurred a significant change in the thermodynamic reaction of the various stages of the turbine. The change in the flow characteristics of the variable-area nozzle stage can more markedly influence the aerodynamic performance of the variable-geometry power turbine. The selection of a variable-area