

# 燃料电池发电系统

许世森 程 健 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)



# 燃料电池发电系统

许世森 程 健 编著

---

电力科技专著出版资金资助项目

---



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是电力科技专著出版资金资助项目。

燃料电池发电是一种洁净高效的发电技术，是国际能源领域研究开发的热点和前沿技术，有着广阔的发展前景。

全书共分八章，介绍了各种燃料电池的发展历史和国内外发展现状，以及各种燃料电池发电技术的运行业绩；阐述了燃料电池发电的理论基础、特点和应用，燃料电池发电技术的应用前景；重点描述了用于发电的各种燃料电池（如磷酸型燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池）发电技术的原理、构成、系统特性及示范工程。

本书可供从事燃料电池发电技术的工程科技人员和高等院校的教师和学生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

燃料电池发电系统/许世森, 程健编著. —北京: 中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-3588-0

I. 燃... II. ①许... ②程... III. 燃料电池  
IV. TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 099886 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 10.375 印张 273 千字

印数 0001—3000 册 定价 20.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

# 前 言

电力是国民经济的命脉，是国家持续发展的必要条件。自工业革命以来，化石燃料为人类提供了源源不断的电力，但传统的化石燃料发电方式也给人类的生存环境造成了严重的危害。光化学烟雾、空气污染、酸雨、全球变暖及水污染都与化石燃料发电有关，然而化石燃料是人类近中期所依赖的主要能源，人类社会要可持续发展，必须寻找更高效、更洁净的发电方式。

燃料电池能够将燃料（天然气、煤制气等）中的氢气借助于电解质与空气中的氧气直接转化为电能，具有高效洁净的显著特点，被称为是继火力发电、水力发电、原子能发电之后的第四大发电方式，是能够较好地解决化石燃料发电效率与污染这一矛盾的新型发电方式。

作为新型高效环保的发电技术，燃料电池发电技术在世界范围内引起了普遍关注。美国、日本、加拿大和西欧等国家均将燃料电池发电技术提高到事关“国家能源安全”的战略高度，投入大量资金进行研究开发。经过各国科学家的不懈努力，各种类型的燃料电池发电技术均得到不同程度的示范，并取得了长足的进步。已经示范的大型燃料电池电站有日本东京的 11MW 和关西电力公司的 5MW 磷酸燃料电池电站、美国 Santa Clara 的 2MW 和日本川越的 1MW 熔融碳酸盐燃料电池电站、西门子—西屋公司的常压 100kW 和加压型 220kW 固体氧化物燃料电池电站。这些燃料电池电站的示范成功，有力地说明了燃料电池用于发电的可行性，并昭示出巨大的生命力。

我国电力工业以火力发电为主的格局在很长一段时间内不会改变，如何提高燃煤电站发电效率、减少污染物和温室气体排放是电力工业可持续发展面临的首要问题，应该看到，高温燃料电

池工作在 600 ~ 1000℃, 高温废气可与燃气轮机组成联合循环发电, 发电效率可达 60% ~ 80%; 高温工作条件可使天然气和合成气直接在电池内部转化为氢气, 不仅降低了投资, 而且燃料的适应范围更广; 清洁的煤气化联合循环发电技术与高效的燃料电池发电技术相结合, 将能实现更高的发电效率和环境效益。因此, 高温燃料电池发电技术对提高化石燃料发电效率、减少污染物排放具有重大的现实意义。

本书作者多年来一直从事清洁煤发电技术的研究, 对燃料电池这一新型环保高效的发电方式也有着深刻的认识。在原国家电力公司的资助下, 分别参与主持了原国家电力公司项目“燃料电池应用于电力系统的可行性研究”与“在我国电力系统发展燃料电池发电技术的技术路线和实施方案研究”; 负责国家“863”项目“5kW 级平板形中温固体氧化物燃料电池技术”子课题“高温燃料电池发电系统的设计和优化研究”; 参加中美能源领域合作框架关于燃料电池发电技术的学术交流。通过以上这些工作, 作者积累了丰富的有关燃料电池发电技术的资料。本书正是在对这些收集资料进行整理提炼的基础上编撰而成的。希望本书能够有助于读者全面了解各种燃料电池发电的机理及其系统组成, 了解燃料电池的最新进展和应用, 有助于我国燃料电池发电技术的应用和开发。

本书由西安热工研究院许世森博士和程健编著。

本书在资料收集和编写过程中, 得到中科院大连物理化学研究所衣宝廉院士、上海硅酸盐研究所温廷珺教授、王绍荣研究员的指导和帮助, 也得到了西安热工研究院朱宝田研究员的大力支持, 在此一并表示感谢。

燃料电池技术涉及众多科学领域, 作者着重从燃料电池用于发电方面予以阐述。由于水平所限, 书中的疏漏或谬误之处在所难免, 敬请读者批评指正。

编 者

2005 年 8 月

# 目 录

## 前言

|  |    |
|--|----|
| <b>第一章 燃料电池发电技术的发展</b> .....           | 1  |
| 第一节 燃料电池的历史沿革.....                     | 1  |
| 第二节 国外燃料电池的研究发展状况和最新进展.....            | 3  |
| 第三节 国内燃料电池发电技术的研究基础 .....              | 11 |
| 第四节 燃料电池的运行业绩 .....                    | 19 |
| <b>第二章 燃料电池的基本原理和特性</b> .....          | 24 |
| 第一节 燃料电池的工作原理 .....                    | 24 |
| 第二节 燃料电池的电化学和热力学基础 .....               | 27 |
| 第三节 燃料电池发电技术的特点 .....                  | 32 |
| 第四节 燃料电池的应用 .....                      | 34 |
| <b>第三章 磷酸型燃料电池 (PAFC) 发电系统</b> .....   | 41 |
| 第一节 PAFC 本体性能.....                     | 42 |
| 第二节 PAFC 发电系统的性能.....                  | 53 |
| 第三节 PAFC 发电系统的示范和运行.....               | 58 |
| <b>第四章 熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC) 发电系统</b> ..... | 65 |
| 第一节 MCFC 本体性能 .....                    | 65 |
| 第二节 MCFC 发电系统的性能 .....                 | 79 |
| 第三节 MCFC 发电系统的动态特性和控制特点 .....          | 89 |
| 第四节 MCFC 发电系统的改进和优化 .....              | 97 |

|            |                                |            |
|------------|--------------------------------|------------|
| 第五节        | 整体煤气化熔融碳酸盐 (IG-MCFC) 发电系统的分析计算 | 106        |
| 第六节        | MCFC 发电系统的示范和运行                | 121        |
| 第七节        | MCFC 发电系统在提高效率和降低造价方面的潜力       | 141        |
| 第八节        | 熔融碳酸盐燃料电池商业化和工业应用              | 148        |
| <b>第五章</b> | <b>固体氧化物燃料电池 (SOFC) 发电系统</b>   | <b>151</b> |
| 第一节        | SOFC 本体性能                      | 151        |
| 第二节        | SOFC 发电系统性能                    | 164        |
| 第三节        | SOFC 发电系统的示范和运行                | 204        |
| <b>第六章</b> | <b>质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 发电系统</b>  | <b>221</b> |
| 第一节        | PEMFC 本体性能                     | 221        |
| 第二节        | 电池堆的管理                         | 232        |
| 第三节        | PEMFC 发电系统的性能                  | 233        |
| 第四节        | PEMFC 的应用                      | 235        |
| <b>第七章</b> | <b>燃料电池发电系统的燃料</b>             | <b>252</b> |
| 第一节        | 化石燃料                           | 252        |
| 第二节        | 燃料处理                           | 256        |
| 第三节        | 固定电站的燃料处理                      | 265        |
| 第四节        | 移动设备的燃料处理                      | 270        |
| 第五节        | 氢的存储                           | 273        |
| 第六节        | 加氢站                            | 284        |
| <b>第八章</b> | <b>燃料电池发电技术的应用前景</b>           | <b>290</b> |
| 第一节        | 美国燃料电池发电技术的研究开发计划及前景预测         | 290        |
| 第二节        | 日本燃料电池发电技术的商业化进程及应             |            |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 用前景·····                  | 296 |
| 第三节 其他国家和地区燃料电池的研究开发····· | 300 |
| 第四节 燃料电池发电技术的前景展望·····    | 302 |
| 第五节 中国燃料电池发电技术的应用前景·····  | 304 |
| 附录 国外燃料电池研究机构网址·····      | 312 |
| 参考文献·····                 | 317 |



## 第一章

# 燃料电池发电技术的发展

### 第一节 燃料电池的历史沿革

燃料电池研究开发的历史可回溯到 1839 年，一位名叫威廉·葛罗夫（William Grove）的英国法官在—项业余实验中神奇地发现，如果将铂丝（Platinum，俗名白金）镀—层白金黑（Platinum black）后浸在硫酸溶液中作为电极，同时在电极两边分别通入氢气和氧气，就可以得到 0.5~0.6V 的输出电压，效果与伏特电池类似，威廉遂将它命名为“气体伏特电池”，实际上这就是我们今天所说的燃料电池的前身，是世界上第一个原理型燃料电池。然而在 20 世纪 40 年代之前，由于电极过程动力学理论和材料技术的落后，以及在 19 世纪后期，内燃机这种能量转化装置的问世和迅速发展，使燃料电池的发展—直处于停滞状态。

1939 年，苏格兰人 F.T.Bacon 用 27% 的 KOH 水溶液制造出工作温度为 110℃，电池电压为 0.89V，电流密度为 13mA/cm<sup>2</sup> 的燃料电池，这是现代碱性燃料电池的雏形，随后又建造了一个 6kW 的高压氢氧燃料电池。1959 年，—位名为弗朗西斯·培根（Francis T. Bacon）的英国人根据—原理制出输出功率达到 5000W 的燃料电池组，并成功用于电焊机、电锯等需移动使用的电气类工具，燃料电池才真正开始走出实验室并进入商业化应用。

到 20 世纪中叶，在宇航工业发展的推动下，常温燃料电池

技术有了长足的发展。燃料电池具有高的体积比功率和质量比功率，尽管当时这类燃料电池系统造价昂贵，但在航天、军事等特殊场合得到了应用。1965年，美国“双子座”号载人飞船上使用了GE公司生产的出力为1kW的固体高分子型燃料电池（PEMFC），以后的阿波罗登月飞船采用的是碱性燃料电池（AFC）。进入20世纪七八十年代，由于矿物资源日趋贫乏和保护生态环境日益受到重视，人们迫切希望开发高效、低污染、CO<sub>2</sub>排放少的环境友好型发电技术。燃料电池发电技术正好满足上述要求，人们开始研究开发地面用的、大容量化的燃料电池发电技术及汽车和潜艇用的燃料电池电源。

美国是最早实现燃料电池实用化的国家，但其应用既不是用在汽车领域也不是用于取代传统电池，而是作为家庭供电系统。在美国西部一些居住人口稀少的边远地区，因专门架设电网的成本太高，导致无法实现正常供电；而在某些人口密集的地区又常常不能提供足够的电力供应。为解决这些问题，美国政府积极鼓励家庭用户购买燃料电池作为主要或辅助电能供应方式。目前，美国H Power、西北电力系统、Plug Power等公司均有小型家用的燃料电池发电产品出售。

日本从1981年开始投入燃料电池的开发工作，至今已有20多年之久，目前已逐渐步入实用化阶段。2000年，日本国内燃料电池发电装置交付使用累计台数达190台，获得发电规模约38MW的开发业绩。近年来，日本在燃料电池汽车、便携式电源方面的成绩更加显著。日本计划到2010年发展燃料电池汽车5万辆，到2020年发展500万辆，并将2030年定为燃料电池汽车普及年。随着燃料电池汽车的普及，日本计划大力建设燃料电池汽车的配套设施，不断在全国各地增加“加氢站”，争取到2020年在全国建造3500个“氢能添加站”，到2030年增至8500个。

欧洲各国在20世纪50年代曾进行过小规模燃料电池的研发，在20世纪60年代的美国太空计划中，一家瑞典公司ASEA也参与“阿波罗”（Apollo）及“双子座”号（Gemini）宇宙飞船所使用的

燃料电池系统的研究。ASEA 公司早在 20 世纪 60 年代就有 200kW 的燃料电池原型机组的示范运行，为当时全球最先进的技术，但可惜的是，在 1967 年 7 月 4 日，该燃料电池系统不幸烧毁，ASEA 公司的燃料电池计划骤然中止。此后，欧洲在燃料电池的发展上仅限于学术研究，而在实际应用的研发上被美国和日本超前。1985 年，欧盟重新组织欧洲各国从事燃料电池技术的开发，其中以德国最为积极，除大力引进磷酸型燃料电池（PAFC）试验机组外，还发展熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）、固体氧化物燃料电池（SOFC）、质子交换膜燃料电池（PEMFC）等，尤其是奔驰公司还将燃料电池应用在汽车上，使得燃料电池的商业化进展更加迅速。其他如 Ansaldo 和 International Fuel Cells (IFC) 公司结盟推广磷酸型燃料电池（PAFC），以及意大利 De Nora 公司研制车用质子交换膜燃料电池（PEMFC）都已有了相当的成绩。

燃料电池的发展经历了第一代的碱性燃料电池（AFC，alkaline fuel cell）、第二代的磷酸型燃料电池（PAFC，phosphorous acid fuel cell）、第三代的熔融碳酸盐燃料电池（MCFC，molten carbonate fuel cell）、第四代的固体氧化物燃料电池（SOFC，solid oxide fuel cell），目前已发展到第五代的质子交换膜燃料电池（PEMFC，proton exchange membrane fuel cell）。这五种燃料电池是目前国际上公认的主要燃料电池种类。由于所用的电解质不同，其材料、操作条件、结构、发电性能、作用、存在问题及商业化进程等有较大的差异。

## 第二节 国外燃料电池的研究发展 状况和最新进展

### 1. 碱性燃料电池（AFC）

10kW 级高性能碱燃料电池（AFC）是美国航天飞机的主要电源，迄今已应用了近 20 年，被证明是安全可靠的电源。1962~1978 年，美国宇航局（NASA）投资 1.7 亿美元发展航天

用碱性燃料电池，电池组可连续运行 2500h。欧洲 Hermer 空间渡船计划也决定采用 AFC 为电源，由德国西门子公司 AG 负责研制，在 20 世纪 90 年代后期用于空间飞船首航。

AFC 容易得到高的出力密度，但必须使用纯  $H_2$  和纯  $O_2$ ，即使微量的  $CO_2$  所产生的  $CO_3^{2-}$  都会使电解质变质，导致电池性能恶化，不适用于含  $CO_2$  的空气作氧化剂。AFC 必须使用铂、金、银等贵金属作电催化剂，造价较高，故不适用于地面或民用发电。早期将 AFC 用于汽车及潜艇动力的尝试已不再继续，但用于空间站高效储能电池的再生式碱性燃料电池（RFC）仍在研制中，以期替代现在的 Ni-Cd、Ni- $H_2$  电池。

为了克服碱溶液易受  $CO_2$  的影响，出现了用酸代替碱作电解质的磷酸型燃料电池（PAFC），被称为第二代燃料电池。

## 2. 磷酸型燃料电池（PAFC）

PAFC 能以天然气、石油或甲醇重整气为燃料，以空气作氧化剂。PAFC 的开发始于美国，代表性的公司有美国的联合技术公司（UTC）。1977 年，由美国九个电力公司与 UTC 联合开发兆瓦级燃料电池，1983 年，由 UTC 派生的国际燃料电池公司（IFC）开始了 200kW 级 PAFC 成套设备的开发，在美国已建造了 1MW、4MW 和 7MW 的 PAFC 电站。20 世纪 80 年代，由于日本的需要，再加上日本财力雄厚，PAFC 的现场和商业化工作主要在日本进行。1990 年，IFC 与日本东芝公司以商业化为目的成立了 ONSI 公司，专门生产 PC-25 型（200kW）PAFC 燃料电池成套设备。PC-25 型已由 A 型发展到 B 型和 C 型。目前，PC-25A、B 型 PAFC 电厂在全世界已超过 81 台，主要分布在美国、日本、欧洲、加拿大、韩国等地。ONSI 在 1995 年推出 PC-25C 型，其质量和体积比 B 型减小了 30%，而且系统达到最优化，价格降为 3000~3500 美元/kW。目前，已有近 30 台在运行，主要用在军事基地、煤气公司和电力公司等。运行实践表明，PAFC 可用率很高，效率达到 95% 以上，发电效率可达到 40%~45%（LHV）。

美国政府为推动燃料电池的商业化，对新安装用户提供 1000 美元/kW 的资助。因此，在美国购买 PC-25 型燃料电池的价格为 2000 ~ 2500 美元/kW。1991 年，世界上最大的 PAFC 燃料电池电厂在日本东京电力公司五井电厂投运，功率为 11MW，至今已累计运行 20000h 以上，最长连续运行时间为 2901h。该电厂燃用天然气，在 207℃、7.4kg/cm<sup>2</sup> 的条件下运行，净发电效率可达 41.6% (HHV)，热回收率为 31.6%。该电厂为大型燃料电池发电系统提供了宝贵的示范经验。电厂出现的主要问题是：系统设计尚未达到优化，空气和燃料连接管腐蚀造成废气混入反应气体，导致电池受损、电压下降。

美国政府认为 PAFC 的技术已发展成熟，因此不再继续支持厂商从事这种技术的研究，但在移动电源和沼气应用方面仍有一些研究计划，投资的重点已转向 MCFC 和 SOFC。

PAFC 存在的主要问题是：需要贵金属铂作催化剂，价格高，而且极易导致 CO 中毒，运行中又可能发生烧结和腐蚀，造成电池性能下降和寿命缩短；以燃烧为基础的燃料重整器，使发电效率降低、造价增加；余热利用率低，总发电效率较低；大功率 PAFC 运行和检修费用较高。为了克服上述问题，国外研究开发了第三代燃料电池，即熔融碳酸盐型燃料电池 (MCFC)。

### 3. 熔融碳酸盐型燃料电池 (MCFC)

MCFC 工作温度为 650 ~ 700℃，余热利用价值高，催化剂无需使用贵金属就可以实现内重整，能用脱硫煤气作燃料。MCFC 本体的发电效率可以达到 50% (LHV) 以上，组成联合循环的发电效率可以达到 60% ~ 70% (LHV)；若组成热电联产，总热效率可达 85% 以上。

与 PAFC 相比，MCFC 具有更高的效率，可实现内重整，系统简化，造价低。与 SOFC 相比，MCFC 的部件材料、制造工艺、结构、密封方式等方面相对简单，工程放大较容易。MCFC 已成为 20 世纪 80 年代以来美、日、欧重点发展的民用燃料电池发电技术，是最有希望大规模应用于电力工业的燃料电池发电技术之一。

美国发展 MCFC 的目的主要是形成数百兆瓦以天然气或煤气为燃料的大容量燃料电池联合循环发电系统，以改变美国目前的电力结构，达到提高效率、降低污染物和温室气体排放的目的。

美国从 1976 年开始开发 MCFC，主要的开发商有 ERC 公司和 MC Power 公司：ERC 与 40 个公司组成了燃料电池商业化集团 (fuel cell commercialization group, FCCG)，MC Power 则与 60 个公司组成了碳酸盐技术商业化联盟 (alliance to commercialized carbonate technology, ACCT)。此外，这两个公司均有 DOE 的经费支持。ERC 70 年代开始研究 MCFC 的内重整技术，从 1991 年到 1994 年，先后完成了 25、70 和 125kW 电池组的试验，于 1996 年 5 月建成了 Santa Clara 2MW MCFC 的示范项目。该电站采用内重整技术，直接燃用脱硫后的天然气；额定功率为 1.8MW，试验开始后，在第三天就达到了 1.93MW，完成了 1000h 试验验收；设计发电效率为 50% (LHV)，试验中为了使温度较快升高，投入了辅助燃料气燃烧炉，使发电效率降至 43.6% (LHV)。据专家估计，只要停止使用辅助燃烧炉，就可以达到设计目标。由于该电厂是常压运行，没有设置余热做功的联合循环，而且热回收系统也远未达到优化。因此，兆瓦级 MCFC 发电系统的发电效率还有进一步提高的巨大潜力。该电站曾出现绝缘失效、阳极短路及电解质干燥等问题，在新设计中将予以解决。

2000 年，ERC 设计的单电池堆出力达到 250kW，并进入商业化。2005 年后，兆瓦级的 MCFC 将进入商业化。美国能源部资助 ERC 近 1.5 亿美元，以推动 ERC 的 MCFC 技术商业化。

MC Power 公司以加压运行和外重整为研究开发方向，1996 年，在美国的圣地亚哥建成了一座单电池堆出力为 250kW 的 MCFC 电厂，发电效率设计为 45% (LHV)，采用外部重整，燃用天然气，没有设置余热发电系统。MC Power 公司的另一个 250kW MCFC Unocal 工程于 1995 年在加州的 Brea 投运。有了这两个工程的经验，MC Power 公司在 2000 年建设了一座由 4 个 250kW 电池堆组成的 1MW MCFC 电站。

MCFC 与煤气化联合循环结合，将组成高效的洁净煤发电技术。ERC 曾在丹麦进行过 100kW MCFC 燃用煤气的试验，煤气净化的目标是：煤气中硫含量小于  $10^{-6}$  L/L，Cl 含量小于几个 ppm。美国 Destec 能源公司也正在研究开发 30kW 以煤气化合成煤气作燃料的燃料电池发电技术。美国能源部 CCT-5 计划中的 Camden 清洁能源示范工程，有 MCFC 示范内容，即利用一部分煤气向 1.25MW 的 MCFC 提供燃料，并进行 MCFC 系统示范。

日本从 1981 年开始研究开发 MCFC，于 1987 年研制成功 10kW MCFC 发电设备；于 1993 年开发成功 100kW 加压型外重整 MCFC 燃料电池组及辅助系统，并试验成功；于 1995 年开始研究开发一座由 4 个 250kW 电池堆组成的 1MW 先导型发电厂，该电厂于 1997 年在日本的川越火电厂投运，并进行了试验验证。

目前，世界上连续运行时间最长的 MCFC 是日本大阪工业技术研究所的 10kW 级小型 MCFC 发电装置，累计运行时间已超过 40000h。日立公司已开发出单电池有效面积达  $1.2\text{m}^2$  的 MCFC，通过了 25kW 的加压运行试验。

燃料电池发电技术起源于欧洲，但后来欧洲一度放弃研究，目前欧洲的燃料电池技术远远落后于美国和日本。20 世纪 80 年代中期，由于环境保护的压力，欧洲又开始研究燃料电池发电技术。荷兰已决定发展 MCFC，研究的重点是材料及其相关的制造技术，依靠国际合作，荷兰已于 1989 年建成 1kW MCFC 电池组，1990 年组装了 2.5kW，1991 年组装了 10kW 电站，正准备建造一座 100kW 的 MCFC 电站。意大利 Ansaldo 与美国 IFC 签订了有关 MCFC 的技术协议，引进安装了一套单电池面积达到  $1\text{m}^2$  的自动化生产线，年生产能力为 2~3MW；于 1996 年的建造 100kW 级 MCFC 试验电站。此外，德国、西班牙也有建造 MCFC 电站的计划。

#### 4. 固体氧化物燃料电池 (SOFC)

SOFC 是继 MCFC 之后新一代的高温燃料电池。由于使用氧化锆系固体电解质，避免了 MCFC 中电解质的蒸发和析出，也没

有由电解液引起的材料腐蚀和电极析出问题，因此电池的寿命较长。电池在 800~1000℃ 运行，能提供高位热能，更容易组成燃料电池联合循环发电系统。本体发电效率可达到 50%~60%，组成联合循环的发电效率可达到 60%~70%，甚至大于 70%。若组成热电联产，总热效率可达到 85% 以上。

与其他燃料电池相比，SOFC 的燃料适应性最强，可使用合成煤气做燃料，燃气中的硫含量可允许达到  $10^{-4}$  L/L。

SOFC 的结构以管式和平板式为主，而美国西屋 (Westinghouse) 公司的管式 SOFC 技术处于世界领先地位。20 世纪 60 年代初，西屋公司就开始进行 SOFC 的研究开发，1980 年开发出无密封管式 SOFC；1993~1994 年在美国南加州进行了 20kW 演示试验。该公司已完成了四座 25kW SOFC 系统，小型装置的运行时间已达到 70000h，是各种燃料电池运行时间的最高纪录。1997 年，西屋公司在荷兰 Arnhem 开始示范 100kW SOFC 成套设备，该电站 SOFC 采用空气极支撑管状电池，管直径为 22mm，有效长度达到 1500mm。目前，该公司正在开发加压 SOFC 与微型燃气轮机组成的联合循环发电系统，近期目标是每年建造一座加压 SOFC 并配备微型燃气轮机的 250kW 发电系统 (PSOFC/GT)，使总发电效率达到 60% (LHV/ac)。2000~2005 年建造 3MW PSOFC/GT 系统，使总发电效率达到 70% (LHV/ac)。可以说西屋公司的 SOFC 技术已从基础研究进入整体化发电系统的研究开发阶段。美国预计，2005 年左右，250kW SOFC 可实现商业化；2010 年，20MW SOFC 将实现商业化，并开始以天然气为燃料的 100MW SOFC 中心电站的示范；2020 年，实现煤气化 SOFC 联合循环发电。

德国西门子公司是平板式 SOFC 技术的领先者。1995 年，该公司开发了 10kW 的电池组，采用分离条块状结构，较好地解决了材料热应力问题，成功开发出 20kW 的平板式 SOFC。1998 年，西门子公司兼并了西屋公司动力部，西屋公司燃料电池技术也被西门子公司买断，现在西门子—西屋公司 (Siemens Westinghouse



Electric Corporation) 掌握最先进的管式和平板式 SOFC 技术。1997 年底, 建成了 25kW 的平板式 SOFC 堆, 连续运转 13000h。1997 年末到 2000 年 11 月末, 在荷兰进行了 100kW 级的常压型 SOFC 电池模块试验, 连续运转 16000h 以上。世界上第一座 220kW 加压型 SOFC/燃气轮机混合系统在加利福尼亚大学尔湾分校的美国国家燃料电池研究中心投入运行。目前, 西门子—西屋公司正在开发 600kW 的 SOFC 电池堆。

NEDO (new energy and industry technology development organization) 于 1998 年开始进行 SOFC 的研究开发, 在对其中期的工作进行评价后, 阿尔斯通公司和 NEDO 对 SOFC 的研发计划进行了修订, 将继续研究开发千瓦级的管式 SOFC 电池堆。其性能为: ①以 1atm 的天然气为燃料, 燃料利用率 ( $u_f$ ) 为 70%, 电池堆出力为 3.12kW; ②电能密度为  $0.18\text{W}/\text{cm}^2$ , 电流密度为  $0.3\text{A}/\text{cm}^2$  ( $u_f = 70\%$ ), 3kW 电池堆的性能衰减率为  $0.4\%/1000\text{h}$  (包括热循环)。

2001 年, METI 和 NEDO 发起了一个新的 SOFC 研发计划, 即开发自供热的电池堆及其组件; 2004 年底, 开发出低成本、高效可靠的 SOFC 电池堆。

MOLB 型 (Mono-block Layer Built) SOFC 有许多优点, 如高电能密度、需要的空间小、利于大型生产等。三菱重工和 CEP-CO (chubu electric power company) 于 1990 年开始研究开发 MOLB 型 SOFC; 1992 年, 研究开发出尺寸为  $150\text{cm} \times 150\text{cm}$ 、最大出力为 1.32kW 的电池堆 (40 个电池 3 个堆); 1996 年, 开发出尺寸为  $200\text{cm} \times 200\text{cm}$ 、最大出力为 5.1kW 的电池堆 (40 个电池 2 个堆); 2000~2001 年, 生产和测试了以城市天然气为燃料的 10kW 级以上的电池堆, 最大出力为 15kW, 运行 7500h。

ERC (energy research center) 对 SOFC 的研究主要集中在电解质和阳极支撑的平板式 SOFC 及其生产工艺: 阳极性能比传统的 Ni/YSZ 提高了 10%~20%。成本相对于 2000 年下降了 30%。标准的阳极支撑 (ASC)、阴极长期稳定 (LTS), 电池的成本相对