

国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

燃料电池

——高效、环境友好的发电方式

衣宝廉
著

化学工业出版社



国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

燃 料 电 池

——高效、环境友好的发电方式

衣宝廉 著

化 学 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池——高效、环境友好的发电方式/衣宝廉著.
北京:化学工业出版社,2000.11
(高新技术科普丛书)
ISBN 7-5025-3003-7

I. 燃… II. 衣… III. 燃料电池 IV. TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 70433 号

高新技术科普丛书

燃 料 电 池

——高效、环境友好的发电方式

衣宝廉 著

责任编辑:周伟斌

责任校对:李 丽 李 林

封面设计:田彦文

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010)64918013

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印制厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 4 $\frac{3}{4}$ 字数 121 千字
2000 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月北京第 1 次印刷

印 数:1—6500

ISBN 7-5025-3003-7/TQ·1312

定 价:10.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

《高新技术科普丛书》编委会

主任

路甬祥 中国科学院院长，中国科学院院士，
中国工程院院士

委员

汪家鼎	清华大学教授，中国科学院院士
闵恩泽	中国石油化工集团公司石油化工科学研究院教授，中国科学院院士，中国工程院院士
袁 权	中国科学院大连化学物理研究所研究员，中国科学院院士
朱清时	中国科学技术大学教授，中国科学院院士
孙优贤	浙江大学教授，中国工程院院士
张立德	中国科学院固体物理研究所研究员
徐静安	上海化工研究院（教授级）高级工程师
冯孝庭	西南化工研究设计院（教授级）高级工程师

序

数万年来，人类一直在了解、开发、利用我们周围的自然界，同时不断地认识着自身，科学技术也从一开始就随着人类的生存需求而产生和发展着。人类发展史充分验证了邓小平“科学技术是第一生产力”的论断。科学技术的发展，促进了人类文明和社会的发展。

21 世纪是信息时代，21 世纪是生命科技的世纪，21 世纪是新材料和先进制造技术迅速发展和广泛应用的世纪，21 世纪是高效、洁净和安全利用新能源的时代，21 世纪是人类向空间、海洋、地球内部不断拓展的世纪，21 世纪是自然科学发生重大变革、取得突破性进展的时代。科学技术的发展、新技术的不断涌现，必将引起新的产业革命，对我国这样的发展中国家来说，既是挑战，也是机遇，而能否抓住发展机遇，关键在于提高全民族的科学文化水平，造就一支具有科学精神、懂得科学方法、具有知识创新和技术创新能力的高素质劳动者队伍。所以，发展教育和普及科学知识、弘扬科学精神、提倡科学方法是应对世纪挑战的首要策略。为此，1999 年 8 月，江总书记在视察中国科学院大连化学物理研究所时进一步强调了科普工作的重要性：“在加强科技进步和创新的同时，我们应该大力加强全社会的科学普及工作，努力提高全民族的科学文化素质。这项工作做好了，就可以为科技进步和创新提供广泛的群众基础。”

为了普及和推广高新技术，化学工业出版社组织几位两院院士和专家编写了《高新技术科普丛书》。本套丛书的特点是：介绍当今科学产业中的一些高新技术原理、特点、重要地位、应用及产业化的现状与发展前景；突出“新”，介绍的新技术、新理论和新方法不仅经实践证明是成熟、可靠的，而且是有应用前景的实用技术；力求深入浅出，图文并茂，知识性、科学性与通俗性、可读性及趣味性的统一，并充分体现科学思想和科学精神对开拓创新的重要作用。

《高新技术科普丛书》涉及与我国经济和社会可持续发展密切相关的高新技术，第一批9个分册包括绿色化学与化工、基因工程技术、纳米技术、高效环境友好的发电方式——燃料电池、最新分离技术（如超临界流体萃取、吸附分离技术、膜技术）、化学激光、生物农药等。本套丛书以后还将陆续组织出版多种高新技术分册。相信该套科普丛书对宣传普及科技知识、科学方法和科学精神，正确地理解、掌握科学，提高全民族的素质将会起到积极的作用。

洛角祥

2000年9月

前 言

燃料电池作为一种高效且环境友好的发电方式已倍受各国政府重视。燃料电池电动车已成为世界各大汽车公司开发竞争的热点。国内也有越来越多的研究单位、高等院校等进行燃料电池的研究和开发,希望了解燃料电池的人日益增多。

本书就是在这种形势下,由袁权院士推荐,应化学工业出版社之约而编写的。本书适宜于具有高中以上文化水平的人阅读。读者如果想对燃料电池进行一般性了解,可阅读本书第1章和其后每章的第一节及其相关的应用部分。要想深入了解燃料电池具体技术的科技人员可进一步阅读其他部分。如果还想进一步深入地研究燃料电池技术,建议读者阅读1989年纽约VAN NOSTRAND REINHOLD出版,由A.J.Appleby和F.R.Foulkes所编写的“FUEL CELL HANDBOOK”(燃料电池手册)和1994年由纽约Plenum Publishing Corporation出版,由Leo J.M.J.Blomen和Michael N.Mugerwa编著的“FUEL CELL SYSTEMS”(燃料电池系统)这两本书。

本书由作者依据多年的研究积累与经验写成初稿,由毕可万同志整理并打印成文,由张恩浚和姜玉玉同志绘制、复制了全部插图,张恩浚同志又对全文进行了修饰与润色。在本书编写过程中毕可万同志查阅了大量燃料电池的应用资料,韩明同志提供了部分质子交换膜燃料电池的应用资料。在编写有关固体氧化物燃料电池一章时曾参阅了江义博士撰写的“固体氧化物燃料电池”一文。王贤仁教授和阎景旺同志提供了固体氧化物燃料电池试验电站方面的资料。在本书编写时大量引用了作者所在的题目组多年来从事燃料电池方面研究与开发的结果。因此可以说,这本书是一个集体多年劳动的结晶。我非常感谢与我多年一起工作的同志们与学生们,没有

他们的辛勤劳动，是无法编写出这本书的。在此书出版之际，我向他们和提供资料的同志们深表谢意。

由于水平所限，本书不当之处欢迎广大读者指正。

衣宝廉

2000年3月

内 容 提 要

燃料电池作为一种清洁、高效、环境友好的发电装置，其研究、开发和应用正日益受到重视。本书首先简单介绍了燃料电池的基本原理、特点、结构和应用，然后按不同燃料电池，分别阐述了其原理和特点，并着重介绍了在各个领域的应用，最后，对燃料电池的发展进行了回顾及展望。

本书是一部科普读物，主要供管理人员、科技人员和在校大学生、研究生及教师阅读。

目 录

导言	1
第1章 燃料电池的基本原理	5
1.1 原理与概念	5
1.2 特点与应用	7
1.2.1 燃料电池的特点	7
1.2.2 燃料电池的应用	7
1.3 关键材料与部件	8
1.4 电催化与电催化剂	9
1.5 多孔气体扩散电极	10
1.6 电解质隔膜	11
1.7 双极板材料与流场	13
1.7.1 双极板的功能及要求	13
1.7.2 双极板材料	13
1.7.3 流场	14
1.8 电池组与相关技术	14
1.9 电池系统	16
1.10 燃料电池的分类与技术发展状态	18
第2章 碱性燃料电池	20
2.1 碱性燃料电池的原理、材料、特点与应用	20
2.1.1 原理	20
2.1.2 电催化剂	21
2.1.3 电极结构	21
2.1.4 石棉隔膜	22
2.1.5 双极板材料与流场	23
2.1.6 电池结构	23
2.1.7 特点	24
2.1.8 应用	25
2.2 阿波罗登月飞船用碱性燃料电池	26
2.3 美国航天飞机用碱性氢氧燃料电池	30
2.4 我国研制的航天飞行用碱性燃料电池	34

第3章 磷酸型燃料电池	40
3.1 原理、材料、结构与性能	40
3.1.1 原理	40
3.1.2 材料	40
3.1.3 电池组	43
3.1.4 燃料气源	44
3.1.5 电池性能	45
3.1.6 磷酸燃料电池系统	47
3.2 磷酸燃料电池实验电站	48
3.2.1 Target (目标) 计划	48
3.2.2 GRI-DOE 计划	49
3.2.3 FCG-1 计划	51
3.2.4 磷酸燃料电池电站的技术状态	52
第4章 质子交换膜型燃料电池	56
4.1 概述	56
4.1.1 工作原理	56
4.1.2 发展简史	57
4.1.3 特点与用途	57
4.2 电催化剂	58
4.3 电极	59
4.4 质子交换膜	61
4.5 膜电极三合一组件	63
4.6 双极板材料与流场	64
4.7 单电池结构与性能	66
4.7.1 单电池结构	66
4.7.2 单电池性能	67
4.8 电池组技术	70
4.8.1 电池组的密封技术	70
4.8.2 电池组的增湿技术	71
4.8.3 电池组的排热技术	72
4.9 电池组与性能	74
4.10 质子交换膜燃料电池作为电动车动力源	78
4.10.1 概述	78

4.10.2 燃料电池电动车的样车简介	80
4.11 质子交换膜燃料电池用作可移动电源、家庭电源与分散电站	89
4.12 质子交换膜燃料电池作为水下机器人、潜艇不依赖空气推进的 电源	92
4.13 质子交换膜燃料电池商品化必须解决的问题	94
4.13.1 降低成本	94
4.13.2 氢源问题	96
4.14 直接甲醇燃料电池	97
第5章 熔融碳酸盐燃料电池	100
5.1 工作原理	100
5.2 电池隔膜	101
5.2.1 偏铝酸锂粉料的制备	102
5.2.2 偏铝酸锂隔膜的制备	103
5.3 电极	105
5.3.1 电催化剂	105
5.3.2 电极制备	106
5.3.3 隔膜与电极的孔匹配	106
5.4 双极板	107
5.5 电池结构与性能	108
5.5.1 电池结构	108
5.5.2 电池性能	109
5.6 熔融碳酸盐燃料电池试验电站	112
5.7 熔融碳酸盐燃料电池商业化尚需解决的关键技术问题	118
5.7.1 阴极的溶解	118
5.7.2 阳极的蠕变	119
5.7.3 熔盐电解质对电池双极板材料的腐蚀	120
5.7.4 电解质的流失	120
第6章 固体氧化物燃料电池	122
6.1 固体氧化物燃料电池的原理和特点	122
6.2 固体氧化物电解质	123
6.3 电催化剂与电极	124
6.3.1 阴极	124
6.3.2 阳极	125

6.4 双极连接与密封材料	125
6.5 电池结构与组装	126
6.5.1 管式固体氧化物燃料电池	126
6.5.2 平板式固体氧化物燃料电池	127
6.5.3 瓦楞式固体氧化物燃料电池	128
6.5.4 热交换一体化的 HEXIS 结构	129
6.6 十至数百千瓦级管式固体氧化物燃料电池的电站试验	129
6.7 十千瓦级平板式固体氧化物燃料电池试验电站	130
6.8 中温固体氧化物燃料电池	133
回顾与展望	135
参考文献	139

导 言

能源是国民经济发展的动力，也是衡量综合国力，国家文明发达程度和人民生活水平的重要指标。人类社会进步的历史表明，每一次能源技术的创新突破都给生产力的发展和社会进步带来了重大而深远的变革。这既证明了能源科技其内涵的活力，也证明了它对形成新兴产业的重要作用。

对于当今时代来说，环境保护已成为人类社会可持续发展战略的核心，是影响当前世界各国的能源决策和科技导向的关键因素。同时，它也是促进能源科技发展的巨大推动力。20 世纪所建立起来的庞大能源系统已无法适应未来社会对高效、清洁、经济、安全的能源体系的要求，能源发展正面临着巨大的挑战。

能源的生产与消费和全球性的气候变化，同地球上的温室效应有密切的关系。导致温室效应的原因，一半以上是来自全球目前的能源体系，即含碳化石燃料燃烧后所释放的二氧化碳。这类燃料所提供的能量约占世界能源的五分之四，而且目前每年还以 3% 的幅度在持续增长。因此，二氧化碳的排放量也以同样的速度递增。预计，到 2020 年会增加近 2 倍，2025 年将增加 3 倍。因此，提高能源的利用率和发展替代能源将成为 21 世纪的主要议题。

人类社会发展至今，绝大部分的能量转化是通过热机过程来实现的。热机过程受卡诺循环的限制，不但转化效率低，造成严重的能源浪费，而且产生大量的粉尘、二氧化碳、氮的氧化物和硫的氧化物等有害物质以及噪声。由此所造成的大气、水质、土壤等污染，严重地威胁着人类的生存环境。

燃料电池是一种电化学的发电装置，不同于常规意义上的电池。

燃料电池等温地按电化学方式直接将化学能转化为电能。它不

经过热机过程，因此不受卡诺循环的限制，能量转化效率高（40%~60%），环境友好，几乎不排放氮的氧化物和硫的氧化物。而且，二氧化碳的排放量也比常规发电厂减少 40% 以上。正是由于这些突出的优越性，燃料电池技术的研究和开发倍受各国政府与大公司的重视，被认为是 21 世纪首选的洁净、高效的发电技术。

燃料电池的最佳燃料为氢。当地球上化石燃料逐渐减少时，人类赖以生存的能量将一是核能，二是太阳能。那时，可用核能、太阳能发电，以电解水的方法来制取氢。利用氢作为载能体，采用燃料电池技术将氢与大气中的氧转化为各种用途的电，如汽车动力、家庭用电等。那时的世界即进入氢能时代。

1839 年，格罗夫（W. R. Grove）发表了全世界第一篇有关燃料电池研究的报告。他研制的单电池用镀制的铂作电极，以氢为燃料，氧为氧化剂。他指出，强化在气体、电解液与电极三者之间的相互作用是提高电池性能的关键。到 1889 年，蒙德（L. Mond）和朗格尔（C. Langer）采用浸有电解质的多孔非传导材料为电池隔膜，以铂黑为电催化剂，以钻孔的铂或金片为电流收集器组装出燃料电池。该电池以氢与氧为燃料和氧化剂。当工作电流密度为 $3.5\text{mA}/\text{cm}^2$ 时，电池的输出电压为 0.73V。现在看来，当年他们的电池从结构上已有些接近现代的燃料电池了。

此后，奥斯瓦尔德（W. Ostwald）等人想采用煤等矿物作燃料，利用燃料电池原理发电。由于矿物燃料的电化学反应速度过低，实验没有取得成功。与此同时，随着热机过程的研究取得成功并迅速应用，使燃料电池在数十年内没有取得大的进展。

1923 年，斯克密特（A. Schmid）提出了多孔气体扩散电极的概念。在此基础上培根（F. T. Bacon）提出了双孔结构电极的概念。他采用非贵金属催化剂和自由电解质，开发成功了中温（200℃）培根型碱性燃料电池。正是在此基础上，20 世纪 60 年代普拉特-惠特尼（Pratt & Whitney）公司研制成功阿波罗（Apollo）登月飞船上作为主电源的燃料电池系统，为人类首次登上月球做出了贡献。

1932 年黑斯 (G.W.Heise) 等以蜡为防水剂制备出憎水电极。进入 20 世纪 50 年代, 由于聚四氟乙烯的出现, 美国的通用电气 (General Electric) 公司和联合碳化物 (Union Carbide) 公司分别用它作为多孔气体扩散电极内的防水剂, 制备出憎水电极。

20 世纪 60 年代初, 美国通用电气公司研制出以离子交换膜为电解质隔膜, 采用高铂黑担量电催化剂的质子交换膜燃料电池。并于 1960 年 10 月首次将该种燃料电池用于双子星座 (Gemini) 飞船飞行, 作为船上的主电源。

进入 20 世纪 70 年代, 由于燃料电池在航天飞行中的成功应用和世界性能源危机的出现, 提高燃料有效利用率的呼声日高。经过 60 年代的研究, 人们已经认识到, 化石燃料只有经过重整或气化转化为富氢燃料, 才适宜用于燃料电池发电。在这一时期各国研究和发展的重点是以净化重整气为燃料的磷酸燃料电池和以净化煤气、天然气为燃料的熔融碳酸盐燃料电池。至今已有近百台 PC25 磷酸燃料电池电站 (200kW) 在世界各地运行。实践证明, 它们的运行高度可靠, 能作为各种应急电源与不间断电源广泛使用。在此期间熔融碳酸盐燃料电池也有了很大的发展, 目前已有 2000kW 实验电站在运行。该类型的燃料电池现正处于商品化的前夜。固体氧化物燃料电池采用固体氧化物膜电解质, 在 800~1000℃ 工作, 直接采用天然气、煤气和碳氢化合物作燃料, 余热与燃气、蒸汽轮机构成联合循环发电, 已在进行数十和一百千瓦的固体氧化物燃料电池电站试验。

20 世纪 60 年代初, 杜邦 (Du Pont) 公司开发成功含氟的磺酸型质子交换膜。通用电气公司采用这种膜组装的质子交换膜燃料电池运行寿命超过了 57000h。但由于成本方面的原因, 在美国航天飞机的电源竞标中失败, 使关于这种电池的研究渐趋低潮。1983 年, 加拿大国防部看到这种可于室温快速启动的电池具有广泛的军用背景, 斥资支持巴拉德动力 (Ballard Power) 公司研究这类电池。在各国科学家的努力下, 相继解决了电极结构立体化、大幅度降低催化剂的铂用量、电极-膜-电极三合一组件 (EMA) 的热压

合以及电池内水传递与平衡等一系列技术问题。目前，这种质子交换膜燃料电池的质量比功率和体积比功率已分别达到 700W/kg 、 1000W/L ，成为电动车和潜艇不依赖空气推进的最佳动力源。各种以质子交换膜燃料电池为动力的试验样车已在运行，不但其性能可以和内燃机汽车相媲美，而且无污染。以质子交换膜燃料电池为动力的潜艇已在建造。迄今，质子交换膜燃料电池的研究已经成为诸类燃料电池研究大潮中的主流，有希望最快实现商业化，为提高燃料的利用率，降低全球的污染作出独具特色的贡献。