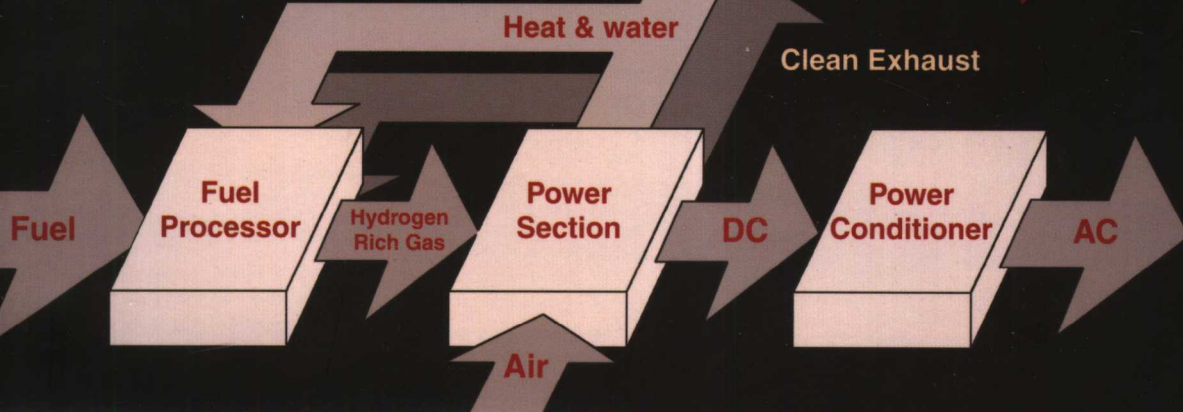
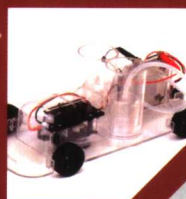




燃料电池

及其应用

黄镇江 编著
刘凤君 改编



电源系列

燃料电池及其应用

黄镇江 编著

刘凤君 改编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书内容以浅显易懂的文字及大量的图表介绍燃料电池原理并阐述其在各个领域的应用与发展,使不同领域背景的读者均能够轻易地融会贯通,进入燃料电池的殿堂,加上以生动活泼的图片介绍燃料电池在日常生活中的实际应用,使读者能借助实际图片了解燃料电池的广泛用途。

本书适合大专以上的理工科系的读者阅读,也可作为从事电力开发、能源利用、环境保护等领域的专业人士与技术人员的参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池及其应用/黄镇江著;刘凤君改编. —北京:电子工业出版社,2005.8
(电源系列)

ISBN 7-121-01521-8

I. 燃… II. ① 黄… ② 刘… III. 燃料电池 IV. TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 075531 号

责任编辑:张 榕

特约编辑:刘汉斌

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:17.75 字数:400 千字

印 次:2005 年 8 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:28.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

作为新能源技术之一的燃料电池，近年来在研发与应用等方面均有长足的进步，已经渐渐地从实验室走向我们的日常生活之中，从近期的德国经济周刊（WIRTSCHAFTSWOCHE）将燃料电池列为 2004 年改变人们生活的十大实用技术的第六位可略见一斑。

燃料电池是一种把燃料的化学能直接转换为电能的发电装置，是继水力、火力、核能后的第四代发电技术。它的主要优点有：综合效率高，发电效率可高达 40%~60%；对环境友善，基本上不排放 SO_x 和 NO_x ，而且噪声低、振动小；燃料使用具有多样性，可以使用天然气、甲烷、液化石油气和煤气等多种燃料；规模和用途可随意选择，可根据需要对输出功率和规模任意选择，可在任何地方使用，并可与热电合并使用。

事实上，人们对燃料电池的研究已经有一百多年的历史。20 世纪 60 年代，燃料电池开始在航天工业应用，但一直到 20 世纪最后 10 年，才被考虑用于汽车以取代内燃机发动机。现在，全世界主要汽车制造商都在开发燃料电池汽车，进展相当快速，此外，欧美日等地区和国家已有相当多的研究单位和企业在进行小型燃料电池的开发，为手机、笔记本计算机等 3C 产品提供稳定的电力供应，而且，其商业化日程就在这几年。

对于促进燃料电池的研究开发，世界各国都给予了高度重视，并有计划地引导大学与研究单位进行研究开发与应用，因而，相关书籍也如雨后春笋般地出版，例如，目前正在亚马逊网络书店（www.amazon.com）公开销售的相关燃料电池的英文书籍就达两百多款，相较于此，两岸有关燃料电池中文的出版物实在是少之又少。此次，黄镇江博士商请本人为《燃料电池》一书的简体中文版撰写序文，本人一口应允，事实上，《燃料电池》一书在中国台湾上市之后即得到热烈回响，此今能够以简体中文版上市，提供给两岸更多对燃料电池有兴趣的人士阅读参考，无异是美事一件，也期待借由本书简体中文版的发行能够为两岸在燃料电池技术交流合作中做出贡献。

詹世弘

元智大学校长与远东能源讲座教授

前 言

能源是人类文明发展的原动力,能源技术是衡量一个国家的经济发展与生活水准的重要指针。人类历史显示,每一次能源技术的突破或创新都促成社会的更繁荣,更进步。燃料电池是一种高效率且洁净的新能源,将肩负起 21 世纪能源创新与突破的重责大任。

近年来燃料电池技术的发展备受各国政府与企业重视,无论是学理上的基础研究或者是商品化的应用开发均有长足的进步。例如,燃料电池电动车已成为世界各大汽车公司开发竞争的焦点,微型燃料电池也为未来的 3C 电子产业注入了新活力。目前,国内也有愈来愈多的研究单位、大学院校等进行燃料电池的研发工作,希望了解燃料电池的人日益增多,然而国内至今仍没有一本燃料电池的专业书籍,这本书就是在此种情况下,配合当前燃料电池的研究热潮编写而成的。

本书针对燃料电池的基本原理、关键技术,以及商品化发展与应用过程进行了详细的分析与探讨,内容是作者根据多年在学术界的研究心得,以及在产业界所累积的实务经验亲自编写成稿的。在本书编写过程中除了查阅了燃料电池相关网络资源与应用资料之外,并且参考了燃料电池的相关书籍,例如,EG&G Technical Services, Inc.所出版的第六版《FUEL CELL HANDBOOK》、J. Larminie 和 A. Dicks 编著的《FUEL CELL SYSTEMS EXPLAINED》、G. Hoogers 所编著的《FUEL CELL TECHNOLOGY HANDBOOK》,以及大陆学者衣宝廉先生所编著的《燃料电池》等书。亚太燃料电池科技股份有限公司则提供了部分有关质子交换膜燃料电池的宝贵资料,使本书增色不少。此外,几款国际著名期刊的论文内容也是本书引用的重点,例如,“JOURNAL OF POWER SOURCES”、“JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY”、“JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY”等。

本书内容适合大专以上程度的理工科系的读者阅读,也可作为从事能源开发、环境保护等领域的工程技术人员的参考资料。由于燃料电池技术领域跨度大,内容涵盖了物理、化学、机械、电机、材料、化工、控制、环保等学科,因此,要编写一本燃料电池书籍难度不低,而本书的特色在于借助浅显易懂的文字与大量的图表说明燃料电池原理与应用,以便能够使不同领域背景的读者均能够融会贯通,以协助大专院校学生进入燃料电池的研究殿堂。

本书共 9 章,第 1 章为燃料电池简介,第 2 章提供了分析燃料电池效率的方法并探讨了影响燃料电池效率的因素,第 3 章至第 8 章则分别针对目前常见的六种燃料电池进行了原理详细介绍及发展过程的探讨,第 9 章则提供一些简单的燃料电池的计算实例,让读者能够从整理数据过程中更深入地了解燃料电池原理。读者如果想对燃料电池进行一般性的了解,阅读本书第 1 章及第 3 章至第 8 章的引言与最后相关发展与应用部分即可;要更深入了解燃料电池技术的读者,可进一步阅读本书其他部分。

最后，在此书出版之际，作者特别感谢内人玮如不辞辛劳地协助绘制和复制本书的所有插图，也要感谢明道管理学院应用科技研究中心同仁们，没有他们辛勤地审定是无法编写完成这本书的。

燃料电池技术日新月异、推陈出新，随时均有进一步发展空间，亦难免有疏漏之处，诚望各位读者提出宝贵意见。

黄镇江 谨识

作者简介

作者：黄镇江

学历：

◎ 中国台湾清华大学 动力机械博士

经历：

◎ 明道管理学院应用科技研究所 教授

◎ 明道管理学院燃料电池项目 主持人

◎ 明道管理学院应用科技中心 研究员

◎ 亚太燃料电池科技股份有限公司 资深工程师

◎ 亚太燃料电池科技股份有限公司 MTS 燃料电池测试机台计划 主持人

◎ 中国台湾中华大学 教授

◎ 美国凯斯西储大学 (Case Western Reserve University) Yeager Center for Electrochemical Science 访问学者

改编者序言

21 世纪是节能、能源变迁与环境保护的世纪。新型清洁能源的开发、现有能源的合理利用,与环境保护相互协调的发展已成为本世纪世界经济发展的基础。在这个世纪里,有世界三大能源之称的石油、天然气和煤等化石性能源将逐渐被耗尽,取而代之的将是氢与再生能源。同时由于石油、天然气和煤的低效燃烧使用,既浪费了能源,也对环境造成了严重的污染。因此,在这个世纪里,节省能源与开发新能源,提高燃料的利用率,减少燃料燃烧产生的污染,已成为本世纪必须要解决的重要问题。燃料电池是一种不经过燃烧过程的高效低污染发电装置,它可以利用化石性燃料,也可以利用氢或再生能源作燃料,因此必将会成为本世纪未来的主流发电技术。燃料电池被列在本世纪改变人类生活的十大实用技术的第六位。

近些年来,燃料电池技术的发展倍受各国政府、研究机构与企业界的重视,已有约 20 多个国家的上千家公司和机构制订了多种有关计划,投入巨资进行开发研究,到 20 世纪末,无论在基础研究还是在商业化应用方面,都已有了突破性的发展,已经成为一种成熟技术并且达到了实用化阶段。当前主要的问题是降低成本,增加寿命和提高可靠性的研究。

我国政府对燃料电池的开发应用相当重视,1994 年 3 月,国务院通过了“中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口环境与发展”的白皮书,其中提到了使用清洁能源与开发洁净化能源利用技术,燃料电池发电技术正是这样一种技术。1994 年 4 月,由中国电子技术学会、电子部天津电源研究所组织,在天津召开了发展我国燃料电池技术讨论会,会议决定将燃料电池作为一项系统工程集中力量攻坚。2004 年 5 月由科技部、中国科协和国际氢能协会在人民大会堂举办了第二届国际氢能论坛,也显示了我国政府对该领域技术的支持。

在当前石油、天然气、煤等燃料紧张,电力供应不足、城市污染严重的情况下,燃料电池已经成为全球能源领域开发的热点。我国燃料电池的研究开发是从 20 世纪 60 年代开始的,为了配合航天技术的发展,到 20 世纪 70 年代就已形成了高潮,其中具有代表性的是大连化物所,已有 50 年的历史,到 2003 年已有 30kW、75kW 的燃料电池应用在电动汽车上进行实验,目前已成立了新源动力公司,开始了产品商品化的进程。其他一些公司和高校也开始了燃料电池的研发工作。在这种情况下,希望了解燃料电池的人日益增多,然而国内出版的有关书籍很少,不能满足人们的需要。在这种情况下,电子工业出版社准备出版黄镇江先生编著的《燃料电池》一书,我受出版社的委托对此书进行了改编。

此书对燃料电池的基本工作原理、关键技术、结构型式、材料选择、商品化进程与在各个领域的应用过程,进行了详细的介绍。理论分析、制造工艺与技术,都反映了当代燃料电池的水平。本书特点是由浅入深,用浅显易懂的文字与大量图表进行介绍,能使读者比较容易地融会贯通。本书适合于大专以上程度,从事电力系统开发、能源利用、环境保护的专业人员,与

理工科的读者参阅。

在改编过程中作了以下工作：

1. 对不符合国内读者习惯的字、词与专业用语，作了适当修改；
2. 对书中的漏字、多余字、难认字、错字作了修改，对于个别因疏忽而引发的错误作了修改。
3. 对技术术语、名词及计量单位、按照国内要求进行了统一。

改 编 者

2005 年 6 月

目 录

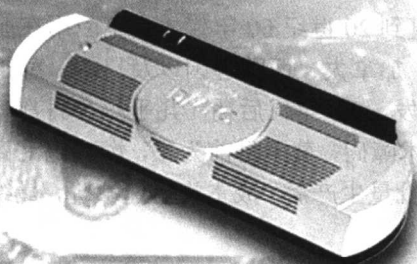
第 1 章 燃料电池简介	1
1.1 燃料电池的历史	2
1.1.1 燃料电池开发史	2
1.1.2 燃料电池现代史	5
1.2 燃料电池概述	6
1.2.1 燃料电池的发电原理	6
1.2.2 燃料电池的特点	7
1.2.3 燃料电池的种类	9
1.3 燃料电池的关键材料与组件	13
1.3.1 触媒与多孔气体扩散电极	14
1.3.2 电解质隔膜	16
1.3.3 双极板	17
1.4 燃料电池堆	18
1.5 燃料电池系统	20
1.6 燃料电池的发展与应用	21
1.6.1 静置型发电站	22
1.6.2 车辆动力	26
1.6.3 便携式电子产品小电源	29
1.6.4 其他应用	30
1.7 可持续发展与氢能经济	31
1.7.1 能源概念	31
1.7.2 能源变迁	32
1.7.3 氢能经济	35
1.8 燃料电池与再生能源	37
1.8.1 太阳能与燃料电池	39
1.8.2 温室气体与燃料电池	41
1.8.3 再生式燃料电池	42
1.8.4 生物能与燃料电池	44
问题与讨论	45

第2章 燃料电池的效率	47
2.1 电极热力学	48
2.1.1 自由能与理想电位	48
2.1.2 电池电势与温度的关系	50
2.1.3 电池电势与压力的关系	52
2.2 电极反应动力学	55
2.2.1 巴特勒-沃尔默方程式	56
2.2.2 极化	59
2.2.3 活化过电势	60
2.2.4 浓度过电势	64
2.2.5 欧姆过电势	67
2.2.6 极化曲线	67
2.3 效率	69
2.3.1 燃料电池理想效率	69
2.3.2 燃料电池实际效率	71
2.3.3 燃料电池系统效率	72
问题与讨论	73
第3章 磷酸燃料电池 (PAFC)	77
3.1 磷酸燃料电池的原理与简介	78
3.2 磷酸燃料电池的组件、结构与系统	79
3.2.1 电解质与载体	79
3.2.2 电极	79
3.2.3 双极板	81
3.2.4 电池堆与系统	81
3.3 磷酸燃料电池的性能分析	83
3.3.1 压力效应	83
3.3.2 温度效应	84
3.3.3 反应气体组成与利用率效应	85
3.3.4 杂质效应	87
3.4 磷酸燃料电池的应用与发展现况	90
问题与讨论	93
第4章 质子交换膜燃料电池 (PEMFC)	95
4.1 质子交换膜燃料电池的原理与特点	96
4.2 质子交换膜燃料电池的关键组件	96

4.2.1	质子交换膜	96
4.2.2	触媒与电催化反应	100
4.2.3	电极	103
4.2.4	膜电极组	106
4.2.5	双极板与流场	107
4.3	质子交换膜燃料电池的性能分析	110
4.3.1	质子交换膜燃料电池性能的实验测试	110
4.3.2	质子交换膜燃料电池性能的数学模型分析	113
4.4	电池堆技术	114
4.4.1	电池堆的密封技术	114
4.4.2	电池堆的水管理与增湿技术	115
4.4.3	电池堆的散热技术	118
4.5	质子交换膜燃料电池的发展	119
4.5.1	电动汽车(乘用车)	119
4.5.2	燃料电池电动摩托车	129
4.5.3	质子交换膜燃料电池发电机	132
4.6	质子交换膜燃料电池商品化所面临的挑战	132
4.6.1	成本问题	133
4.6.2	燃料供应与基础设施问题	134
	问题与讨论	141
第5章	熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)	143
5.1	熔融碳酸盐燃料电池的工作原理	144
5.2	熔融碳酸盐燃料电池的组件与结构	147
5.2.1	电解质载体隔膜	147
5.2.2	阳极	148
5.2.3	阴极	149
5.2.4	电解质管理	150
5.2.5	双极板与电池堆结构	153
5.3	熔融碳酸盐燃料电池的性能分析	154
5.3.1	压力效应	154
5.3.2	温度效应	157
5.3.3	反应气体的组成与利用率效应	158
5.3.4	杂质效应	161
5.3.5	燃料利用率与内重整反应	164

5.4 熔融碳酸盐燃料电池的发展现况	165
问题与讨论	172
第6章 固态氧化物燃料电池(SOFC)	173
6.1 固态氧化物燃料电池的原理与特点	174
6.2 固态氧化物燃料电池的组件与材料	177
6.2.1 电解质	177
6.2.2 触媒与电极	179
6.2.3 双极连接板与密封材料	179
6.3 电池堆结构	180
6.3.1 管式固态氧化物燃料电池	181
6.3.2 平板式固态氧化物燃料电池	184
6.4 固态氧化物燃料电池的性能分析	190
6.4.1 压力效应	190
6.4.2 温度效应	191
6.4.3 反应气体的组成与利用率效应	192
6.4.4 杂质效应	195
6.5 固态氧化物燃料电池的发展现况	196
问题与讨论	203
第7章 碱性燃料电池(AFC)	205
7.1 碱性燃料电池的原理	206
7.2 碱性燃料电池的关键组件	207
7.2.1 触媒与电极结构	207
7.2.2 电解质载体隔膜	209
7.2.3 双极板与流场	209
7.2.4 电池堆结构	209
7.2.5 电解质的管理	210
7.3 碱性燃料电池的开发应用	212
7.3.1 培根型碱性燃料电池的开发	213
7.3.2 阿波罗宇宙飞船用碱性燃料电池	214
7.3.3 航天飞机用碱性燃料电池	215
问题与讨论	218
第8章 直接甲醇燃料电池(DMFC)	219
8.1 直接甲醇燃料电池的工作原理	220
8.1.1 电极反应方程式	220

8.1.2 甲醇电催化氧化机制	221
8.2 直接甲醇燃料电池的性能分析	223
8.2.1 甲醇电催化触媒的设计	223
8.2.2 工作条件与进料方式	227
8.2.3 膜电极组的结构	228
8.2.4 电解质膜的特性	230
8.3 直接甲醇燃料电池的发展现况	231
问题与讨论	236
第9章 燃料电池的计算实例	237
9.1 电池可逆电势的计算	238
9.2 温度效应对氢氧燃料电池理想电势的影响	238
9.3 氢氧燃料电池工作电压与效率的关系	239
9.4 可逆电势与焓变、熵变, 以及比容的关系	239
9.5 氢氧燃料电池电流产生量与氢气流量的关系	240
9.6 燃料电池发电容量与燃料流量的关系	241
9.7 燃料电池反应生成物组成的计算	243
9.8 熔融碳酸盐燃料电池反应物与生成物成分的计算	245
9.9 水气转移平衡反应对燃料组成的影响	246
附录	249
附录 A: 燃料电池常用单位转换因子	250
附录 B: 燃料电池常用物理常数	252
附录 C: 燃料电池网络资源	253
参考文献	260



Chapter

1

Fuel Cell

第1章 燃料电池简介

《大英百科全书》说：“能源是一个包含着所有燃料、流水、阳光和风的术语，人类用适当的转换手段便可让它为自己提供所需的能量”。简单地说，“能”就是“做功”的动力来源，它具有许多不同的形式，例如动能、位能、光能、电能、化学能和热能等。我们在使用煤、石油、天然气等燃料时，会先将它们燃烧，也就是将它们的化学能变成热能，以推动蒸汽机、内燃机、涡轮机等热机（Heat engine）来做功。虽然它们为我们提供了动力，但這些热机的效率有一个上限——卡诺循环（Carnot cycle）效率，而且热力学的定律明确地告诉我们，热机的效率不可能超过卡诺循环效率。

为什么一定要先把燃料中的化学能通过燃烧转化成热能呢？为什么非用热能不可呢？而为什么不像人们吃的米食及牛羊吃的草，在体内直接将化学能利用呢？这种直接利用化学能的方式效率不是更高吗？这个问题的答案是肯定的，“燃料电池”就是一种把燃料中的化学能直接变成电能的机器，因为其不是热机，不受卡诺循环的限制，所以效率可以很高。

氢是燃料电池的理想燃料，它清洁、无污染、而且不会产生温室效应气体二氧化碳，尽管目前氢主要是由石化燃料如煤、石油、天然气等，经重整反应而来，而在重整改质过程中，也会排放污染物和二氧化碳，然而用燃料电池把化学能转换成电能的效率高，产生同样多的电能，所消耗的燃料比较少，排放的二氧化碳自然也就少了。此外，我们也可以利用太阳能、水力、风力等提供电力，经水电解产生氢气，再以燃料电池把氢的化学能转



换成电能。

燃料电池技术的原理早在 19 世纪就已发明，一直到 20 世纪 60 年代才真正应用在航空航天上，80 年代开始进入民用市场开发，目前，美国、加拿大、西欧各国以及日本、韩国的多达几百家公司与研究机构纷纷投入燃料电池技术的开发，90 年代后期，几乎每个月都有新的专利产生。基本上，燃料电池已经没有不可克服的技术障碍，截至目前为止，燃料电池商业应用的主要问题之一是成本过高，但在技术不断改进和批量生产后，成本将迅速下降，最终可与内燃机或传统化学电池相互抗衡。

1.1 燃料电池的历史

1.1.1 燃料电池开发史

图 1.1 所示为燃料电池的发展史。燃料电池的起源可以追溯到 19 世纪初，欧洲的两位科学家 C. F. Schönbein 教授与 William R. Grove 爵士，他们分别是燃料电池原理的发现者和燃料电池的发明者，两者照片如图 1.2 所示。瑞士籍 Schönbein 是 University of Basle 的理化教授，而 Grove 爵士则是英国的法官兼科学家。

一般认为燃料电池最早是诞生于 1839 年 Grove 的气体电池 (Gas voltaic battery) 实验，然而比较严谨的说法应该是 Schönbein 在 1838 年首度发现了燃料电池的电化学效应^①，而第二年 Grove 发明了燃料电池。在 Schönbein 写给英国学者 M. Faraday 信中曾经提到，他在家中洗衣间所建立的实验装置可以不需要像电池一样进行化学充电而直接产生电流。1839 年 1 月，在 Philosophical Magazine 的几篇报道中再次提到前述的实验结果，内容强调氢气与铂电极上的氯气或氧气所进行的化学反应过程中能够产生电流，Schönbein 将这种现象解释为极化效应 (Polarisation effect)，这便是后来被称做燃料电池的起源。值得一提的是，Schönbein 曾经从英国先进科学学会 (British association for the advancement of science) 获得 40 英镑经费进行燃料电池的研究，这是全世界第一个官方正式资助的燃料电池研究。

Grove 的气体电池基本构想是源自于水的电解实验。水电解过程是用电将水分解成为氢气与氧气，反过来，Grove 认为将氧气和氢气反应就有可能逆转电解过程而产生电。为了验证这一理论，他将两条铂分别放入两个密封的瓶中，一个瓶中充满氢气，另一个瓶中充满氧气，当这两个密封的瓶浸入稀硫酸溶液时，电流便开始在两个电极之间流动，装有氧气的瓶中产生了水，而为了提高整个装置所产生的电压，Grove 将四组这种装置串联起来，他将这种电池称做“气体电池”，如图 1.3 所示，这个装置就是后来被公认的全世界第一个燃料电池。“燃料电池”一词一直到了 1889 年才由 L. Mond 和 C. Langer 两位化学家所提出，当时他们采用浸有电解质

^① The Birth of the Fuel Cell 1835-1845, Ulf Bossel, ISBN 3-905592-06-1.



1800	
Schöenbein (1838)	发现燃料电池原理
Grove (1839)	发明燃料电池 (当时称做“气体电池”)
1850	
Mond and Langer (1889)	“气体电池”正名为“燃料电池”
1900	
Reid (1902)	提出碱性燃料电池概念 (专利)
Schmid (1923)	提出气体扩散电极概念
Heise (1932)	开发出以蜡为疏水剂的疏水电极
1950	
Bacon (1959)	开发出可工作的 6kW 碱性燃料电池
Allis-Chalmers (1959)	开发出碱性燃料电池农用拖拉机
GE, Grubb and Niedrach (1960)	开发出 Grubb-Niedrach 燃料电池
GE, Gemini Space Mission (1962)	应用高分子电解质燃料电池于双子星太空任务
GE and Union Carbide (1965)	应用 Teflon [®] 于疏水气体扩散电极
P&W, Apollo Space Mission (1965)	应用碱性燃料电池于阿波罗太空任务
Dupont (1972)	杜邦公司开发出 Nafion [®] 质子交换膜
P&W, TARGET (1967-1976)	普惠公司主导“目标”的磷酸燃料电池开发计划
Moonlight Project (1981-1992)	“月光计划”——日本首度进行的燃料电池开发计划
Jet Propulsion Laboratory (1992)	JPL 首度将 Nafion [®] 膜应用于直接甲醇燃料电池
Ballard Power System (1993)	巴拉德公司推出质子交换膜燃料电池电动车
CaFCP (1998)	“加州燃料电池伙伴联盟”成立
2000	
Toyota & Honda (2002)	以租用方式正式推出燃料电池乘用车
FreedomCAR (2002)	美国政府推出“自由车”燃料电池电动车发展计划
Freedom Fuel (2003)	美国政府推出“自由燃料”氢能发展计划

图 1.1 燃料电池发展史



燃料电池原理发现者

C.F. Schönbein (1799-1868)



燃料电池发明者

William R. Grove (1811-1896)

图 1.2 燃料电池原理发现者与燃料电池发明者