



国防特色教材·动力机械及工程热物理

燃料电池系统

RANLIAO DIANCHI XITONG

—○ 曹殿学 王贵领 吕艳卓 等编著 ○—

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·动力机械及工程热物理

燃料电池系统

曹殿学 王贵领 吕艳卓 等编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书论述了燃料电池的基本原理、结构、性能、关键材料、发展现状以及在军事、航天航空、民用等领域的应用。全书共 13 章,内容包括燃料电池概述、燃料电池热力学和动力学、质子交换膜燃料电池、直接甲醇燃料电池、碱性燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池、金属半燃料电池、直接碳燃料电池、直接硼氢化物燃料电池、生物燃料电池和氢燃料的制备及储存。

本书内容全面系统,概念清楚、文字简练、图文并茂,可作为高等院校相关专业的高年级本科生和研究生的教材或教学参考书,也可供从事燃料电池研发的科技工作者参阅。

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池系统/曹殿学等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-81124-896-8

I. 燃… II. 曹… III. 燃料电池 IV. TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151269 号

燃料电池系统

曹殿学 王贵领 吕艳卓 等 编著
责任编辑 杨 昕

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:25.75 字数:577 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-896-8 定价:44.00 元

前 言

近年来随着能源短缺和环境恶化日益严重,燃料电池作为一种高效洁净的发电装置,其技术的发展引起了各国政府、企业、科研机构及高等院校的高度重视。燃料电池被看做是继火力发电、水力发电与核电之后的第四种发电方式。燃料电池技术被认为是21世纪首选的洁净高效的发电技术,美国把燃料电池列为仅次于基因重组计划和超级材料之后的第三项尖端技术。燃料电池技术的研发近年来取得了长足的进步,小到几瓦大到兆瓦级的燃料电池系统相继研究成功,并应用于发电站、交通运输工具和便携式电子设备等。另外,航天航空器、水潜艇和水下机器人等高科技领域也可看到燃料电池应用的例子,以氢为燃料的零排放燃料电池汽车更是人类追求的理想交通工具。燃料电池还特别适于建设分电站,可以解决目前集中式电网输电出现故障或遭到破坏时造成大面积瘫痪的问题。这一点对国防安全和反恐是十分重要的。

燃料电池的进一步发展需要更多年轻科技工作者的参与。因此,高等院校有必要设置有关燃料电池的课程,开展系统的教育,培养相关的研究人才。本书将面向高年级大学生和研究生教育,可作为教材或教学参考书,也可供从事燃料电池研发的科技工作者参阅。目前,燃料电池技术仍处于发展阶段,相关知识在不断更新。近年来现出了一些新型燃料电池,有关这方面内容的书籍较少,让学生们了解这些最新的发展是本书的编写出发点之一。

本书分为四个部分,共13章。第一部分(第1~2章)介绍了燃料电池的基本原理及其热力学和动力学知识;第二部分(第3~8章)分别针对目前常见的6种类型的燃料电池进行了系统的阐述,重点在电池的结构、关键材料及其发展现状与应用情况;第三部分(第9~12章)介绍了4种特殊类型的、目前处于活跃研究阶段的燃料电池,包括金属半燃料电池、直接碳燃料电池、直接硼氢化物燃料电池和生物燃料电池;第四部分(第13章)讨论了作为燃料电池燃料的氢气的制备及储存。另外,每章后附有问题与讨论,可用于检查对本章知识的学习掌握情况。

本书的编写力求严谨、规范,叙述力求准确、精炼,内容力求系统、全面,使用的资料力求新颖。在阐述燃料电池的电化学原理和关键材料的基础上,也介绍了

燃料电池技术的一些最新成果。

本书由曹殿学编写了第1、第2、第9和第10章；王贵领编写了第7、第8(其中8.2.6和8.6由赵辉编写)和第11章；吕艳卓编写了第3~6章；温青编写了第12章；张森编写了第13章。全书由曹殿学统稿。

本书在编写过程中得到了中国科学院长春应用化学研究所陆天虹研究员和黑龙江大学赵辉教授的大力帮助，陆天虹研究员为直接甲醇燃料电池一章的编写提供了很多资料，赵辉教授对固体氧化物燃料电池一章做出了很多修改和补充。二人仔细审阅了全书并提出了宝贵意见。编者还参考了国内外有关燃料电池的著作和大量研究论文，在此一并表示衷心感谢。

由于编著者学识和能力有限，书中疏漏和错误之处，敬请读者批评指正，编著者表示由衷感谢。

作 者
2009 年 月 日

目 录

第 1 章 燃料电池概述	1
1.1 燃料电池的历史回顾	1
1.1.1 燃料电池的定义	1
1.1.2 燃料电池的诞生及发展历程简介	2
1.2 燃料电池基础	6
1.2.1 燃料电池的工作原理	6
1.2.2 燃料电池的特点	8
1.2.3 燃料电池的种类	9
1.3 燃料电池系统.....	16
1.3.1 燃料电池堆.....	16
1.3.2 热管理系统.....	18
1.3.3 电力调节和转换系统.....	18
1.3.4 控制系统.....	19
1.4 燃料电池的应用.....	20
1.4.1 固定发电站.....	21
1.4.2 运输工具动力.....	25
1.4.3 便携式电源.....	29
1.5 能源、环境与燃料电池	31
1.5.1 能源的概况.....	31
1.5.2 化石能源的短缺和环境污染问题.....	32
1.5.3 氢能与燃料电池.....	33
问题与讨论	34
第 2 章 燃料电池的热力学和动力学	35
2.1 燃料电池的热力学.....	35
2.1.1 理论效率的计算.....	35
2.1.2 电池电动势与温度的关系.....	38
2.1.3 电池电动势与压力的关系.....	39

2.2	电极过程动力学	41
2.2.1	极化与过电势	42
2.2.2	活化过电势	43
2.2.3	浓差过电势	46
2.2.4	欧姆过电势	48
2.2.5	燃料电池的极化曲线	48
2.3	燃料电池效率	50
2.3.1	燃料电池的实际效率	50
2.3.2	燃料电池系统的实际效率	51
	问题与讨论	52
第3章	质子交换膜燃料电池	54
3.1	发展简史	54
3.2	工作原理	59
3.3	特点	61
3.4	膜电机组件	61
3.5	电极催化剂	62
3.5.1	对催化剂的要求	62
3.5.2	催化剂的选择	63
3.5.3	催化剂的制备	65
3.5.4	催化剂的结构和表征	67
3.6	电极的结构	68
3.6.1	电极的种类、组成和制备方法	68
3.6.2	扩散层	68
3.6.3	催化层的制备	72
3.7	质子交换膜	77
3.7.1	质子交换膜的功能	77
3.7.2	Nafion 膜的性能	78
3.7.3	Nafion 膜的问题	80
3.7.4	Nafion 膜的改进	80
3.8	双极板和流场	84
3.8.1	双极板的功能和要求	85
3.8.2	双极板的材料	86
3.8.3	流场	98

3.9 电池组系统	100
3.9.1 氢 源	100
3.9.2 氧 源	101
3.9.3 电池组的水管理	101
3.9.4 电池组的热管理	102
3.10 PEMFC 商业化的问题	103
问题与讨论	104
第 4 章 直接醇类燃料电池	106
4.1 直接醇类燃料电池的基本概念	106
4.1.1 工作原理	106
4.1.2 基本结构	107
4.1.3 优 点	110
4.2 直接甲醇燃料电池的研发概况	111
4.2.1 受到重视的原因	111
4.2.2 发展概况	111
4.3 直接甲醇燃料电池性能的改进	114
4.3.1 阳极催化剂性能的改进	114
4.3.2 阴极催化剂性能的改进	127
4.3.3 质子交换膜	140
4.4 甲醇替代燃料的研究	141
4.4.1 研究甲醇替代燃料的原因	141
4.4.2 直接甲酸燃料电池	142
4.4.3 直接乙醇燃料电池	144
4.5 直接醇类燃料电池的商业化前景	147
问题与讨论	148
第 5 章 碱性燃料电池	149
5.1 工作原理	149
5.2 优缺点	151
5.2.1 优 点	151
5.2.2 缺 点	152
5.3 基本结构	152
5.3.1 燃料和氧化剂	152

5.3.2	电 极	153
5.3.3	催化剂中毒的原因及预防办法	163
5.3.4	电极结构及制备	165
5.4	电解质	168
5.4.1	电解质材料	168
5.4.2	电解质使用方法	168
5.5	工作条件	172
5.5.1	工作压力	172
5.5.2	工作温度	172
5.5.3	氧化剂的影响	173
5.5.4	排 水	173
5.5.5	排 热	174
5.5.6	电池寿命	174
5.6	研发和应用概况	174
5.6.1	空间应用领域	174
5.6.2	地面应用领域	175
	问题与讨论	177
第 6 章	磷酸燃料电池	178
6.1	工作原理	178
6.2	基本结构	180
6.2.1	电池系统	180
6.2.2	单体电池	181
6.3	工作条件对其性能的影响	191
6.3.1	工作温度的影响	191
6.3.2	反应气压力的影响	193
6.3.3	燃料气中杂质的影响	194
6.3.4	影响寿命的因素及改进方法	198
6.4	发展概况	199
6.4.1	发展原因	199
6.4.2	磷酸燃料电池电站的发展概况	199
6.4.3	电动车用磷酸燃料电池的发展概况	200
6.5	商业化的展望	200
6.5.1	降低成本	200

6.5.2	提高使用寿命	202
6.5.3	缩短启动时间	202
6.5.4	提高催化剂性能	202
	问题与讨论	203
第7章	熔融碳酸盐燃料电池	204
7.1	熔融碳酸盐燃料电池的工作原理	205
7.2	熔融碳酸盐燃料电池的隔膜材料	206
7.2.1	隔膜材料的性能	206
7.2.2	隔膜材料的制备	208
7.2.3	熔融碳酸盐燃料电池的电解质	208
7.3	熔融碳酸盐燃料电池的电极材料	209
7.3.1	阳极材料	209
7.3.2	阴极材料	210
7.4	熔融碳酸盐燃料电池的结构	212
7.5	操作条件对熔融碳酸盐燃料电池性能的影响	215
7.5.1	压力的影响	216
7.5.2	温度的影响	216
7.5.3	反应气体组成及利用率对电池性能的影响	218
7.5.4	燃料中杂质的影响	219
7.5.5	电流密度和运行时间的影响	220
7.6	熔融碳酸盐燃料电池的应用与发展现状	221
7.6.1	熔融碳酸盐燃料电池的应用	221
7.6.2	熔融碳酸盐燃料电池的发展现状	221
7.6.3	熔融碳酸盐燃料电池商业化的障碍	224
	问题与讨论	224
第8章	固体氧化物燃料电池	225
8.1	固体氧化物燃料电池的工作原理	226
8.2	固体氧化物燃料电池的电解质材料	229
8.2.1	氧化锆基(ZrO_2)电解质	230
8.2.2	氧化铈基(CeO_2)电解质	234
8.2.3	氧化铋基(Bi_2O_3)电解质	236
8.2.4	钙钛矿基($LaGaO_3$)电解质	239

8.2.5	六方磷灰石基 $[M_{10}(TO_4)_6O_2]$ 电解质	241
8.2.6	钙铁石结构 $(A_2B_2O_5)$ 电解质	244
8.2.7	质子传导电解质	247
8.3	固体氧化物燃料电池的电极材料	250
8.3.1	阳极材料	250
8.3.2	阴极材料	254
8.4	连接材料和密封材料	259
8.4.1	连接材料	259
8.4.2	密封材料	260
8.5	固体氧化物燃料电池的结构与组成	261
8.5.1	管式结构 SOFC	262
8.5.2	平板式结构 SOFC	263
8.6	单室固体氧化物燃料电池	264
8.6.1	单室固体氧化物燃料电池的特点	265
8.6.2	单室固体氧化物燃料电池的结构与组成	265
8.6.3	单室固体氧化物燃料电池的工作原理	265
8.6.4	单室固体氧化物燃料电池的研究现状	266
8.7	固体氧化物燃料电池的发展现状与应用	270
8.7.1	固体氧化物燃料电池的发展现状	270
8.7.2	固体氧化物燃料电池的应用	272
	问题与讨论	273
第 9 章	金属半燃料电池	274
9.1	概 述	274
9.1.1	金属半燃料电池的工作原理	274
9.1.2	金属半燃料电池的特点	275
9.1.3	金属半燃料电池的分类	276
9.1.4	金属半燃料电池的应用	277
9.2	金属半燃料电池阳极材料	278
9.2.1	锌阳极	278
9.2.2	铝阳极	281
9.2.3	镁阳极	284
9.3	金属半燃料电池的结构与性能	287
9.3.1	金属-空气半燃料电池	287

9.3.2	金属-过氧化氢半燃料电池	293
9.3.3	金属-海水中溶解氧半燃料电池	301
	问题与讨论	304
第 10 章	直接碳燃料电池	305
10.1	直接碳燃料电池的工作原理与电池结构	305
10.2	直接碳燃料电池的特点	306
10.3	碳的直接电化学氧化反应	308
10.3.1	碳电化学氧化反应机理	308
10.3.2	碳电化学氧化产物	309
10.4	直接碳燃料电池的历史沿革	313
10.5	直接碳燃料电池的研究现状	314
10.5.1	以熔融碳酸盐为电解质直接碳燃料电池	314
10.5.2	以熔融碱金属氢氧化物为电解质的直接碳燃料电池	316
10.5.3	以固体氧化物为电解质的直接碳燃料电池	318
10.5.4	采用固体氧化物和熔融碳酸盐双重电解质的杂化型直接碳燃料电池	320
10.6	直接碳燃料电池的问题与展望	321
	问题与讨论	323
第 11 章	直接硼氢化物燃料电池	324
11.1	直接硼氢化物燃料电池的原理	325
11.2	直接硼氢化物燃料电池的阳极催化剂	328
11.2.1	硼氢化物的电氧化与水解	328
11.2.2	金属催化剂	330
11.2.3	储氢合金催化剂	331
11.3	直接硼氢化物燃料电池的阴极催化剂	332
11.4	直接硼氢化物燃料电池的结构	333
11.5	直接硼氢化物燃料电池的应用与发展现状	336
11.5.1	直接硼氢化物燃料电池的应用	336
11.5.2	直接硼氢化物燃料电池与其他直接液体燃料电池的比较	337
11.5.3	直接硼氢化物燃料电池的发展现状	338
11.5.4	直接硼氢化物燃料电池面临的问题	342
	问题与讨论	342

第 12 章 生物燃料电池	343
12.1 生物燃料电池的概述	343
12.1.1 生物燃料电池的工作原理	343
12.1.2 生物燃料电池的特点	343
12.1.3 生物燃料电池的分类	344
12.2 微生物燃料电池	345
12.2.1 微生物燃料电池的工作原理	345
12.2.2 电子的传递方式	346
12.2.3 产电微生物	348
12.2.4 微生物燃料电池的电极	349
12.2.5 阴极电子受体和催化剂	350
12.2.6 隔膜和阳极燃料	351
12.2.7 微生物燃料电池的结构	352
12.2.8 影响微生物燃料电池性能的因素	353
12.3 酶生物燃料电池	355
12.3.1 酶的类型和电子传递方式	355
12.3.2 酶生物燃料电池的类型	355
12.4 生物燃料电池的发展与应用	359
12.4.1 生物燃料电池的发展	359
12.4.2 生物燃料电池的应用前景	359
问题与讨论	362
第 13 章 氢气的制备及储存	363
13.1 氢气的制备	363
13.1.1 水蒸气重整制氢	363
13.1.2 不完全氧化制氢	365
13.1.3 等离子体热裂解制氢	366
13.1.4 煤气化制氢	367
13.1.5 甲醇制氢	368
13.1.6 电解水制氢	369
13.1.7 热化学循环分解水制氢	370
13.1.8 光催化分解水制氢	371
13.1.9 生物制氢	372

13.1.10 氢气的提纯	373
13.2 氢气的储存	374
13.2.1 气态存储	375
13.2.2 液态存储	376
13.2.3 可逆金属氢化物存储	377
13.2.4 物理吸附储氢	385
13.2.5 化合物存储	386
问题与讨论	388
参考文献	390

第 1 章 燃料电池概述

能源短缺以及大量化石能源的利用导致环境严重恶化已成为目前全人类所面对的重大问题。寻求洁净高效的能量转换技术已经成为各国政府、企业界、科研院所和高等院校等共同关注的问题。在这样的背景下,燃料电池(fuel cell)这一古老的发明又重新成为人们关注的热点。燃料电池技术被认为是 21 世纪首选的洁净高效的发电技术,美国把燃料电池列为仅次于基因组计划和超级材料之后的第三项尖端技术。因此,燃料电池技术承载着人类实现高效率 and 零排放发电的梦想。那么,什么是燃料电池?它是怎样来发电的?它有什么样的优点以至于被给予如此高度的重视和评价?目前都有哪些类型的燃料电池?它们能在哪些方面发挥作用?本章将回答这些关于燃料电池的基本问题,为读者学习后续章节奠定基础。

1.1 燃料电池的历史回顾

1.1.1 燃料电池的定义

燃料电池是一种能量转换装置,它将存储在燃料中的化学能通过电化学反应直接转换成电能。燃料电池的工作原理与一般传统电池(battery)类似,但其工作方式则不同于电池。电池是集能量存储和转换一体的装置,即电活性物质通常作为电极材料的一部分存储在电池壳体中,在电池工作(放电)时,其不断被消耗掉,待这些携带化学能的电活性物质消耗到一定程度后,电池就不能继续工作。因此,电池的特征是一次只能输出有限的电能,并且电极在电池工作过程中会不断变化。而燃料电池本身仅仅是一种能量转换装置,并不存储能量。携带能量的燃料和氧化剂被源源不断地输入到燃料电池中,经电化学反应转换为电能,并不断排出产物。此过程中燃料电池的电极并不发生变化,只是提供电化学反应发生的场所。因此,燃料电池的特征是只要能够连续地供应燃料和氧化剂,燃料电池就能连续发电,并且电极并不消耗。这种工作方式与汽油和柴油发电机比较接近,即不断的从外部获得燃料,不断输出电能,并不断排放反应产物。但是,燃料电池和汽、柴油发电机的发电过程是完全不同的。传统的热机发电要经过几个步骤,首先,必须通过燃烧将燃料的化学能转变成热能;然后,利用热机(内燃机或蒸汽机)将热能转化成机械能;最后,再通过发电机将机械能转换为电能。在这一系列的转换步骤中,燃烧过程产生污染,热机转换过程产生噪声,每一步转换都会造成能量损失,尤其热能转化为机械能时,由于热机效率受卡诺循环的限制,导致发电效率的极大损失。相比之下,燃料电池则是通过其阴、阳两电极上发生的电化学反应,直接将化学能转换为电能。转换过程中没有

燃烧,不使用热机。因此,燃料电池具有效率高、污染少、噪声低的突出优点。

1.1.2 燃料电池的诞生及发展历程简介

燃料电池早在 19 世纪初就已发明了,迄今为止已经有 170 多年的历史,但直到 20 世纪 60 年代才第一次真正应用在航天航空上,这期间经历了 120 多年的时间。

燃料电池的发明要首先归功于瑞士教授 Christian Friedrich Schönbein。他在 1838 年首先发现了燃料电池效应,即在铂电极上的氢和氧的反应会产生电流。在随后的 1839 年,英国的物理学家兼法官 William Robert Grove 爵士报道了世界上第一个燃料电池的雏形,当时 Grove 称之为气体电池(gas battery)。Grove 气体电池的发明是受到水电解实验的启发。Grove 认为既然通入电流可以将水在两个电极上分解为氢气和氧气,那么反过来,氢气和氧气在电极上反应生成水的过程就有可能产生电。为了验证这一设想,Grove 将两条铂片分别放入两个密封的玻璃瓶中,一个瓶内充满氢气,另一个瓶内充满氧气,当将这两个玻璃瓶一起浸入到稀硫酸溶液里面时,两个电极之间就开始有电流流过,同时在装有氧气的瓶内有水生成。Grove 同时指出反应应该仅发生在气体、液体和铂电极的接触处。为了提高电压,Grove 将 4 组这样的装置串联起来,就构成他称之为的气体电池,如图 1-1 所示。这个装置后来被公认为是世界上第一个燃料电池。现在,每年在瑞士卢塞恩市举办的欧洲燃料电池论坛上都设有以 Christian Friedrich Schönbein 命名的奖牌,在英国每两年召开一次以 Grove 命名的燃料电池国际会议,以纪念这两位燃料电池的奠基人和发明人。

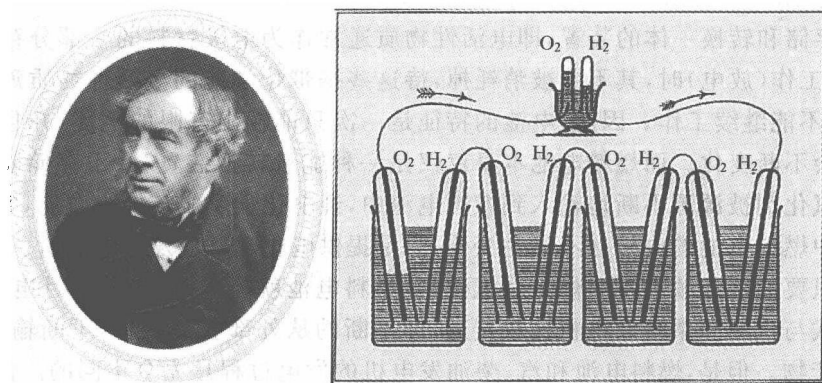


图 1-1 William R. Grove 爵士及其的气体电池示意图

“燃料电池”(fuelcell)这一名词是直到 1889 年才由化学家 L. Mond 及其助手 C. Langer 提出。两位科学家认识到 Grove 气体电池这种装置需要大的反应面积才能产生大的电能,因此,他们在电池的结构设计上进行了大幅度改进。首先,他们将一种不导电的多孔隔膜材料用

稀硫酸浸泡;然后,在隔膜的两侧各放上一片多孔的铂片,铂片上覆盖有一层铂黑,铂黑充当电极反应催化剂;最后,将它们一组一组的叠加在一起,中间用纸板、木头、橡胶等绝缘材料做成框架,形成气室,使得膜的一侧与氢气接触,另一侧与氧气接触。这种电池在工作电压为 0.73 V 时输出 $3.5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的电流密度。但是他们发现电压每小时下降 10%,并且电解质不稳定。现在看来,当年他们的电极结构和设计思路已经非常接近现代燃料电池的结构和设计思路。

此后,Friedrich Wilhelm Ostwald(1909 年诺贝尔化学奖获得者)建立了燃料电池工作原理的基本理论,并在 1893 年从实验上测定了燃料电池各个组成部分之间的相互关系及作用,如电极、电解质、氧化剂和还原剂、阴离子和阳离子等。Ostwald 关于燃料电池的理论为后来的燃料电池研究者奠定了基础。

19 世纪是诸多科学原理和科学技术诞生的世纪,燃料电池就是其一。但是当时的科技水平还不足以将燃料电池这种技术发明转化成为商品。到了 19 世纪末期,内燃机技术崛起并迅速发展,与其配套的化石燃料(煤、石油等)的开发与使用也大规模的展开,因此,基于内燃机技术的交通运输工具开始普及。以氢气为燃料的燃料电池的研发失去了需求的推动,被人们逐渐淡忘了,燃料电池的发展基本进入了停顿期。这期间燃料电池发展的几个主要事件是,1902 年,Reid 提出了碱性燃料电池(alkaline fuel cell)的概念,增加了燃料电池的种类;1923 年,A. Schmid 提出了气体扩散电极(gas diffusion electrode)的概念,这种电极概念一直沿用到今天;1932 年,G. W. Heise 以蜡为防水剂制备出了憎水电极,这是现在气体扩散电极的雏形;20 世纪 50 年代,美国通用电气公司 GE(General Electric Co.)和联合碳化物公司(Union Carbide Co.)分别制备出了以聚四氟乙烯为防水剂的多孔气体扩散憎水电极,已经很接近目前氢氧燃料电池常用的电极。

1959 年,英国剑桥大学的培根(F. T. Bacon)博士经过 27 年的研究,向世界展示了第一个真正能够工作的燃料电池,即一个 5 kW 的燃料电池堆,可以驱动一部电焊机工作。Bacon 博士根据 A. Schmid 所提出的气体扩散电极的概念研制出了双孔结构电极,并对 L. Mond 和 C. Langer 所发明的燃料电池加以改进,即用比较廉价的镍网来替代铂黑电极,用不易腐蚀镍电极的 KOH 碱性电解质代替硫酸电解质。这种装置也称为培根电池(Bacon Cell)。培根电池实际上就是第一个碱性燃料电池。培根电池的成功开发为现代燃料电池的商业化奠定了基础。图 1-2 为培根博士及其 5 kW 燃料电池。

20 世纪 60 年代,在燃料电池的发展史上是不平凡的年代。这一时期,太空科技迅速发展,为了找到合适太空飞船的动力电源,美国航空航天管理局(NASA)对各种电源系统进行了系统的分析和对比,包括电池、燃料电池、太阳能电池、核电系统等。燃料电池由于其具有潜在的高能量密度和高功率密度的特性,成为 NASA 太空飞船电源的首选。在 NASA 的大力资助下,燃料电池技术得到了长足的进步。首先,是磺化聚苯乙烯阳离子交换膜这种聚合物电解质膜(polymer electrolyte membrane)的研制成功;然后,是在这种膜上附着高分散铂黑方法的