

质子交换膜燃料电池

模拟与优化

ZHIZI JIAOHUANMO
RANLIAO DIANCHI
MONI YU YOUHUA

徐腊梅 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

质子交换膜燃料电池 模拟与优化

徐腊梅 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书紧密结合当前质子交换膜燃料电池的研究热点,对质子交换膜燃料电池的数学模型、水、热、气及动态特性模拟,基于集总参数模型、分布参数模型、神经网络模型的模拟与优化进行了详尽的分析与总结。全书共分为 10 章,主要内容包括:绪论、燃料电池概述、质子交换膜燃料电池的计算机模拟、质子交换膜燃料电池的数学模型、操作参数对电池性能的影响、质子交换膜燃料电池的水传输模拟、质子交换膜燃料电池的热模拟、质子交换膜燃料电池的气模拟、基于分布参数模型的燃料电池动态特性仿真、基于集总参数模型的燃料电池动态特性仿真、基于 BP 神经网络的燃料电池动态特性仿真。

本书可供从事电气、自动化、能源、材料、环保、船舶、汽车领域的科技工作者和工程技术人员使用,也可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

质子交换膜燃料电池模拟与优化/徐腊梅著. —北京:
国防工业出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-118-08211-1

I. ①质... II. ①徐... III. ①离子交换膜燃料电
池—研究 IV. ①TM911.48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 171259 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 12½ 字数 218 千字

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membranes Fuel Cell, PEMFC)作为燃料电池的一种,是新型的能源处理方式,具有工作温度低、无污染、无腐蚀、比功率大、启动迅速等优点,已经成为能源领域研究的热点之一。质子交换膜燃料电池对解决能源短缺和环境污染两大世界难题具有重要意义。

本书紧密结合当前质子交换膜燃料电池的研究热点,对质子交换膜燃料电池的数学模型、水、热、气及动态特性模拟,基于集总参数模型、分布参数模型、神经网络模型的模拟与优化进行了详尽的分析与总结。

全书共分为 10 章,第 1 章是绪论,介绍了燃料电池的原理及分类,质子交换膜燃料电池的工作原理及组成,质子交换膜燃料电池单电池、电堆及系统。第 2 章介绍了质子交换膜燃料电池的计算机模拟研究,介绍了基于集总与分布参数模型、动态模型、神经网络模型的建模方法,介绍了水、热、气模拟方法及质子交换膜燃料电池的模拟平台。第 3 章介绍了燃料电池的数学模型,包括质量守恒方程、动量守恒方程、电流守恒方程等基本方程,水传输及相变模型,质子交换膜燃料电池物性参数模型,为后续章节的模拟打下基础。第 4 章通过 Fluent 软件模拟了一单流道单电池,分析工作压力、空气流量、工作温度、气体增湿等操作参数对电池性能的影响,对电池动态特征研究有一定的指导意义。第 5 章介绍了质子交换膜燃料电池的水传输模拟,对流道(直道和弯道)的水传输进行了模拟,并且对质子交换膜中的水分布进行了模拟,分析电流密度、气体加湿温度、燃料电池温度、气体扩散层孔隙率等对膜中水分布的影响,这章内容对燃料电池水管理的研究提供一定指导。第 6 章介绍了质子交换膜燃料电池的热模拟,分析了燃料电池的运行条件对燃料电池温度的影响,包括电流密度、气体湿度、气体压力及气体过量系数等运行条件;分析了冷却水状态对质子交换膜燃料电池温度的影响,包括冷却流道位置、冷却水流速及冷却流道截面尺寸对燃料电池性能的影响。第 7 章介绍了质子交换膜燃料电池的气传输模拟,模拟流道深度、流道宽度和岸的宽度、流道截面形状对电池性能的影响,包括对氢气、氧气浓度分布

的影响。第8章主要讲述了基于分布参数模型的质子交换膜燃料电池动态特性仿真,紧密围绕质子交换膜燃料电池动态特性,基于分布参数模型,运用计算流体力学软件 Fluent 来模拟分析供给气体湿度、空气流量和负载改变情况下,电池的动态响应能力和动态性能。第9章主要讲述了基于集总参数模型的质子交换膜燃料电池动态特性仿真,基于集总参数模型,采用 MATLAB 的 Simulink 仿真工具对质子交换膜燃料电池进行动态建模与仿真。分析当负载变化时,电池电压、温度、输出功率、消耗功率、效率、非线性内阻的动态响应,并与实验对比。此研究有利于质子交换膜燃料电池的性能优化和控制。第10章介绍了基于 BP 神经网络的燃料电池动态特性仿真,本章视燃料电池为“黑箱”,采用 BP 神经网络的动态建模方法,建立质子交换膜燃料电池的神经网络模型,模型输出与实验数据基本吻合,并且具有一定的泛化能力。此模型的建立为后续燃料电池的控制优化提供模型基础。

本书是作者及其所在课题组多年研究的成果,作者在此特别感谢武汉理工大学肖金生教授把作者带入了质子交换膜燃料电池模拟研究领域,并在本书成稿过程中给予细致指导,在此也要感谢课题组已毕业研究生蔡永华、李湘华、涂曙光、余江洪、朱蓉文、熊济时、范朝兵,他们也给予作者很大的支持,本书也引用了他们的部分研究成果。

由于作者水平有限,书中难免存在一些错误和不足之处,恳请广大同行、读者批评指正。

作者

2012年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 燃料电池概述	1
1.2 PEM 燃料电池	3
1.2.1 PEM 燃料电池的发展历史	3
1.2.2 PEM 燃料电池的原理	4
1.2.3 PEM 燃料电池的组成	5
1.2.4 PEM 燃料电池电堆	6
1.2.5 PEM 燃料电池系统	7
1.2.6 PEM 燃料电池的特点	9
第 2 章 PEM 燃料电池的计算机模拟	10
2.1 PEM 燃料电池的模型研究	10
2.1.1 PEM 燃料电池的集总与分布参数模型	10
2.1.2 PEM 燃料电池动态模型	13
2.1.3 PEM 燃料电池神经网络模型	14
2.2 PEM 燃料电池的水、热、气模拟研究	15
2.2.1 PEM 燃料电池的水管理	15
2.2.2 PEM 燃料电池的热管理	17
2.2.3 PEM 燃料电池的气管理	19
2.3 PEM 燃料电池的模拟平台	19
2.3.1 CFD 技术	19
2.3.2 MATLAB/Simulink	20
第 3 章 PEM 燃料电池的数学模型	23
3.1 燃料电池的基本方程	23
3.1.1 质量守恒方程	23
3.1.2 动量守恒方程	24
3.1.3 能量守恒方程	24

3.1.4	组分守恒方程	25
3.2	多孔介质中的扩散模型	25
3.3	水的相变模型	26
3.4	质子交换膜中水的传递模型	26
3.4.1	电迁移	27
3.4.2	压力迁移	27
3.4.3	浓差扩散	28
3.5	催化层中的电化学反应模型	28
3.5.1	Butler-Volmer 方程	29
3.5.2	电流守恒方程	29
3.5.3	开路电压控制方程	29
3.5.4	活化极化的控制方程	30
3.5.5	反应物消耗和水生成	30
3.6	PEM 燃料电池物性参数模型	30
3.6.1	密度	31
3.6.2	黏度	32
3.6.3	比热容	32
3.6.4	热导率	32
3.6.5	扩散系数	32
3.7	小结	33
第 4 章	操作参数对电池性能的影响	34
4.1	计算模型分析	34
4.1.1	几何模型、网格划分	34
4.1.2	物性参数	35
4.2	结果及讨论	36
4.2.1	操作压力对电池性能的影响	36
4.2.2	空气流速对电池性能的影响	36
4.2.3	温度对电池性能的影响	37
4.2.4	气体增湿度对电池性能的影响	38
4.3	小结	40
第 5 章	PEM 燃料电池的水传输模拟	41
5.1	流道中的水传输模拟	41

5.1.1	直道中的水传输模拟	41
5.1.2	弯道中的水传输模拟	49
5.1.3	小结	53
5.2	质子交换膜中的水分布	54
5.2.1	几何模型及边界条件	54
5.2.2	计算结果及讨论	57
5.2.3	小结	67
第 6 章	PEM 燃料电池的热模拟	68
6.1	燃料电池运行条件对温度分布的影响	68
6.1.1	几何模型及参数	68
6.1.2	工作电流密度对温度分布的影响	70
6.1.3	气体加湿对温度分布的影响	71
6.1.4	气体压力对温度分布的影响	75
6.1.5	气体过量系数的影响	75
6.1.6	扩散层热导率对温度分布的影响	77
6.1.7	小结	78
6.2	冷却水状态对温度分布的影响	79
6.2.1	冷却流道位置对膜中温度分布的影响	79
6.2.2	冷却水流速对冷却效果的影响	87
6.2.3	冷却流道截面尺寸对冷却效果的影响	90
6.2.4	小结	91
第 7 章	PEM 燃料电池气传输模拟	92
7.1	流道深度对电池性能的影响	92
7.1.1	计算模型	92
7.1.2	结果及分析	93
7.1.3	小结	97
7.2	流道宽度和岸的宽度比对电池性能的影响	97
7.2.1	计算模型	97
7.2.2	结果及分析	98
7.2.3	小结	107
7.3	流道截面形状对电池性能的影响	107
7.3.1	计算模型	108

7.3.2	结果和分析	109
7.3.3	小结	112
第 8 章	基于分布参数模型的 PEM 燃料电池动态特性仿真	113
8.1	不同气体湿度下电池动态特征的研究	113
8.1.1	模型分析	113
8.1.2	结果与分析	116
8.1.3	小结	123
8.2	气体传输时电池的动态特征研究	124
8.2.1	模型分析	124
8.2.2	结果与分析	125
8.2.3	小结	130
第 9 章	基于集总参数模型的 PEM 燃料电池的动态特性仿真	131
9.1	PEM 燃料电池的集总参数模型	131
9.1.1	电化学模型	131
9.1.2	热模型	135
9.2	单电池的建模与仿真	136
9.2.1	电流阶跃变化时电池的动态特性	138
9.2.2	仿真结果与实验数据对比	138
9.2.3	与基于分布参数模型的动态仿真结果对比	143
9.3	电堆的建模与仿真	148
9.3.1	电堆的 Simulink 模型	148
9.3.2	电堆的动态特性	148
9.4	小结	153
第 10 章	基于 BP 神经网络的 PEM 燃料电池的动态特性仿真	154
10.1	BP 神经网络	154
10.1.1	BP 神经网络的拓扑结构	154
10.1.2	BP 神经网络学习算法	155
10.1.3	BP 神经网络学习算法的改进	159
10.2	神经网络的系统辨识	160
10.2.1	神经网络的系统辨识原理及特点	160
10.2.2	神经网络系统辨识模型的结构	162
10.3	非线性动态系统的神经网络辨识	162

10.4	基于 BP 神经网络的 PEM 燃料电池系统辨识	164
10.4.1	学习样本的确定及归一化	164
10.4.2	BP 神经网络模型的确定	165
10.4.3	BP 神经网络的构建、训练和仿真	167
10.4.4	仿真结果分析	168
10.5	小结	178
附录	主要符号表	179
参考文献	181

第 1 章 绪 论

1.1 燃料电池概述

能源是经济发展的基础，没有能源工业的发展就没有现代文明。随着现代文明的发展，人们逐渐认识到传统的能源利用方式有两大弊病。一是储存于燃料中的化学能必需首先转变成热能后才能被转变成机械能或电能，受卡诺循环及现代材料的限制，能量转换效率只有 33%~35%，一半以上的能量白白地损失掉了；二是传统的能源利用方式给今天人类的生活环境造成了大量的废水、废气、废渣、废热和噪声的污染。多年来人们一直在努力寻找既有较高的能源利用率又不污染环境的能源利用方式。

国外能源机构预测随着石油、煤炭等自然资源的日趋枯竭，21 世纪将成为氢能的时代。作为燃料电池，燃料的氢气除了能从煤炭、天然气和石油中提取外，还可以从植物、生物排放物、工业废料等物质中提取，所以只要能够解决提取方法的问题，它就有着无穷无尽的供应源。从广泛的意义上讲，它是一种真正的再生能源，可以彻底解决人类的能源危机问题^[1,2]。

同其他的发电形式不同，燃料电池是一种不经过燃烧而通过电化学反应直接把燃料中的化学能转换为电能的装置。与传统的火力发电相比它具有以下优点^[3,4]：①不受热机卡诺循环的限制，能量转换效率高，一般在 45%左右，火力发电仅为 30%左右，如果在技术加以完善或综合利用其效率可望达到 60%以上。②洁净、无污染、噪声低。③模块结构，可搭建性强，适用于各种功率的要求。④体积小，机动性强，维护方便，生产周期短。⑤电站建设不需要大量的水，尤其适用于缺水地区。⑥不需要并网发电，分布性强，适用于边远交通不便地区的供电。

可见，燃料电池被认为是继火力发电、水力发电、核能发电之后的第四大能量转化发电方式，是 21 世纪全新、高效、节能、清洁的发电方式之一，它将在燃料电池电站、电动汽车、移动式电源、潜艇、航空航天技术等方面有着广阔的应用前景。

目前，世界各国开发的燃料电池种类很多，根据所使用的电解质不同可分

为碱性燃料电池(AFC)、磷酸型燃料电池(PAFC)、熔融碳酸盐型燃料电池(MCFC)、质子交换膜燃料电池(PEMFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)和直接甲醇燃料电池(DMFC)等几种。若依照工作温度范围的不同,磷酸型燃料电池为中温型燃料电池,工作温度 $160^{\circ}\text{C}\sim 220^{\circ}\text{C}$,以重整气为燃料,以空气为氧化剂,可以实现热电联供。但是由于效率低和启动慢的特点,不宜作为移动电源使用。熔融碳酸盐型燃料电池与固体氧化物燃料电池属于高温型燃料电池,工作温度 $600^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$,主要用于联合循环热电厂、住宅电源等。碱性燃料电池、质子交换膜(Proton Exchange Membranes, PEM)燃料电池(以下称 PEM 燃料电池)和直接甲醇燃料电池归类为低温型燃料电池。都有启动快的特点,碱性燃料电池效率高,但是由于电解质会和空气中的二氧化碳发生反应,降低了电极活性,故而只能用纯氧作氧化剂,造成成本高,可靠性差,主要应用于航空航天技术。PEM 燃料电池和直接甲醇燃料电池都以全氟磺酸膜为电解质,所不同的是直接甲醇燃料电池以甲醇为燃料,PEM 燃料电池以纯氢或净化重整气为燃料,PEM 燃料电池和 DMFC 除了启动快,可以工作在常温常压外,还有功率密度高,固体膜为电解质,容易密封等特点,但是和 PEM 燃料电池相比,DMFC 由于阳极甲醇容易透过膜迁移到阴极,造成阳极甲醇反应更慢、功率密度下降,故 PEM 燃料电池有着极大的优越性和市场潜力。

PEM 燃料电池是继磷酸盐燃料电池后的第二代燃料电池,在 20 世纪 60 年代美国首先将 PEM 燃料电池用于航天飞行,但由于当时采用的质子膜存在问题,在电池工作过程中,膜发生了溶解,膜的溶解不但导致电池的寿命缩短,还污染了生成水,使宇航员无法饮用。这次事故造成了 PEM 燃料电池的研究长期处于低谷。1983 年,加拿大国防部资助巴拉德动力公司进行 PEM 燃料电池的研究,在加拿大、美国等国科学家的共同努力下电池的研究取得了突破性的进展,首先采用薄的高导电率的 Nafion 膜使电池性能提高数倍,接着又采用铂/碳催化剂代替了纯铂黑,并在电极催化剂层加入了全氟磺酸树脂,实现了电极的立体化。这种将阴极、阳极和膜热压在一起的工艺减少了膜与电极之间的接触电阻,在电极内建立起质子通道,扩展了电极反应的三相界面,增加了铂的利用率。这样电池的性能就得到极大的提高,同时成本也大幅度地降低,从此 PEM 燃料电池的优越性能越来越受到人们的关注。

自 20 世纪 90 年代以来,世界各国特别是美国、日本、加拿大和欧洲每年都投入数百万美元、大量的人力、物力开展燃料电池相关技术的基础研究,以期延长电池的使用寿命,降低电池的制造成本,提高电池的输出性能,简化电池的系统结构,提高发电系统的运行可靠性。1995 年,美国总统办公厅科技政策办公室公布了第三个双年度美国国家关键技术报告,此报告列举了对美国经

济发展和国家安全至为重要的七大类技术，其中共包括 27 个关键技术领域，燃料电池是其中之一。加拿大政府已决定将燃料电池产业作为国家知识经济的支柱产业之一加以发展巴拉德公司，生产电动车用 PEM 燃料电池组的工厂已经开始运营。

企业界尤其是各大汽车公司看到燃料电池巨大的市场潜力，纷纷投巨资组成联盟进行燃料电池的研究试验与生产。如德国的戴姆勒克莱斯勒公司、美国的福特公司和加拿大的巴拉德公司组成联盟投资 10 亿加元成立分别控股的巴拉德动力公司 DBB 公司和伊考斯达公司，分别负责开发燃料电池电动车用燃料电池组电池系统与电推进分系统。日本的本田与德国大众联手参加美国加利福尼亚州开展的燃料电池电动车(FCEV)商业化团体(California Fuel Cell Partnership)并制定使燃料电池电动车商业化的计划。

世界各大石油公司如美国 Arco 公司、壳牌公司、Texaco 公司均已投资开发汽油甚至柴油的车载制氢装置，参与燃料电池电动车的开发，各大电力公司也纷纷投资开发家用电源和分散电源的燃料电池系统，可见燃料电池进入家庭汽车和其他领域的步伐将比人们想象的要快得多。

1.2 PEM 燃料电池

PEM 燃料电池作为燃料电池的一种，是新型的能源处理方式，具有工作温度低、无污染、无腐蚀、比功率大、启动迅速等优点，已经成为能源领域研究的热点之一。PEM 燃料电池对解决能源短缺和环境污染两大世界难题具有重要意义。

1.2.1 PEM 燃料电池的发展历史

20 世纪 60 年代初，美国首次将 PEM 燃料电池用于“双子星座” Gemini 飞船飞行。当时，由于电解质膜稳定性较差、电池堆寿命短、贵金属 Pt 用量太高，致使 PEM 燃料电池在空间的应用搁置了近 20 年。到 1984 年以前，除了美国洛斯·阿莫斯国家实验室的少量工作，PEM 燃料电池的研究基本处于停滞状态。

20 世纪 80 年代，加拿大电力公司在政府的支持下开展的研究，使 PEM 燃料电池的性能价格比大大提高。此后，从 80 年代末一直到现在，美国、加拿大、德国、意大利、日本等发达国家争相开展 PEM 燃料电池的研究工作，竞争十分激烈。这期间的研究主要集中在基础性研究和实用性产品的开发。近五年来，由于可望成为未来理想的移动电源，尤其适合作为清洁汽车动力，各大汽车公司纷纷联合开发车用 PEM 燃料电池，并在各自政府的支持下积极开展各种试

验。另外，由于军用潜艇和军用移动电源隐蔽性的需要，各发达国家国防部门及军方均加紧高性能 PEM 燃料电池技术的研究。

国内 PEM 燃料电池的研究热潮兴起于 20 世纪 90 年代，当时主要有中国科学院长春应用化学研究所和中国科学院大连化学物理研究所，他们都着重于 PEM 燃料电池的高分子薄膜、催化剂制备、电极加工工艺等基础研究。随着 PEM 燃料电池的不断发展及广阔的应用前景，关于 PEM 燃料电池的研究单位日益增多，除了清华大学、同济大学、武汉理工大学等院校单位外，还出现了如北京富源、上海神力为代表的公司。同时，由 PEM 燃料电池电堆用作汽车发动机的研究也取得了不小的成就，比较突出的有同济的“超越”一号、“超越”二号燃料电池混合动力轿车，武汉理工大学的“楚天”一号燃料电池电动汽车，清华大学的“清能”一号、“清能”三号燃料电池大巴等。PEM 燃料电池的基础研究及其应用已成百花齐放的势头，在 PEM 燃料电池方面，我国总体水平已接近世界先进发达国家。

1.2.2 PEM 燃料电池的原理

文献[2]概述了燃料电池及 PEM 燃料电池的概念、原理、特点、关键技术等。PEM 燃料电池工作原理，如图 1.1 所示。

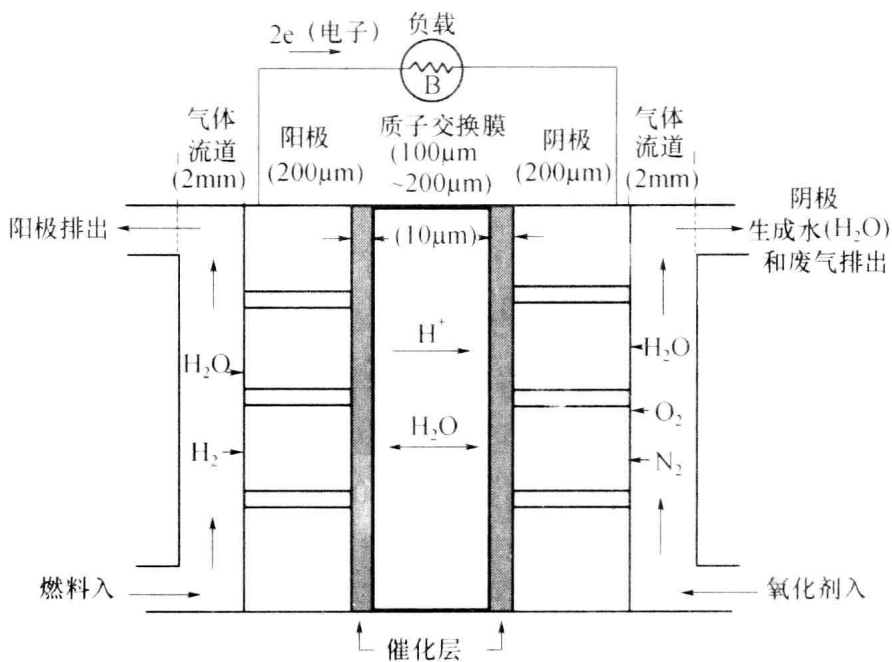


图 1.1 PEM 燃料电池工作原理图^[4]

(1) 首先，氢气和氧气通过气体分配器，分别到达阳极和阴极，并透过电极的扩散层到达催化层。

(2) 在阳极催化剂的作用下，氢气解析为氢离子和电子。氢离子以水合质子 $H^+(xH_2O)$ 的形式，在质子交换膜中从一个磺酸基(-SO₃H)转移到另一个磺酸基，最后到达阴极，实现质子的传递。质子的这种转移导致阳极出现带负电的电子积累，形成电池的负极。同时，电子通过外电路到达阴极。反应式为



(3)在阴极催化剂的作用下，氧气与氢离子、电子反应生成水。反应式为



(4)电极反应生成的水大部分由尾气排出，一部分在压力差的作用下通过膜向阳极扩散。

总的电池反应为



可见，PEM 燃料电池内进行的是燃料和氧化剂在隔膜的两侧分别完成半个反应的氧化还原反应。从本质上说它是一种按照电化学原理，将储存在燃料和氧化剂中的化学能直接转化成电能能量转化装置。

1.2.3 PEM 燃料电池的组成

构成 PEM 燃料电池的关键部件是电极、质子交换膜与集流板(双极板)，如图 1.2 所示。

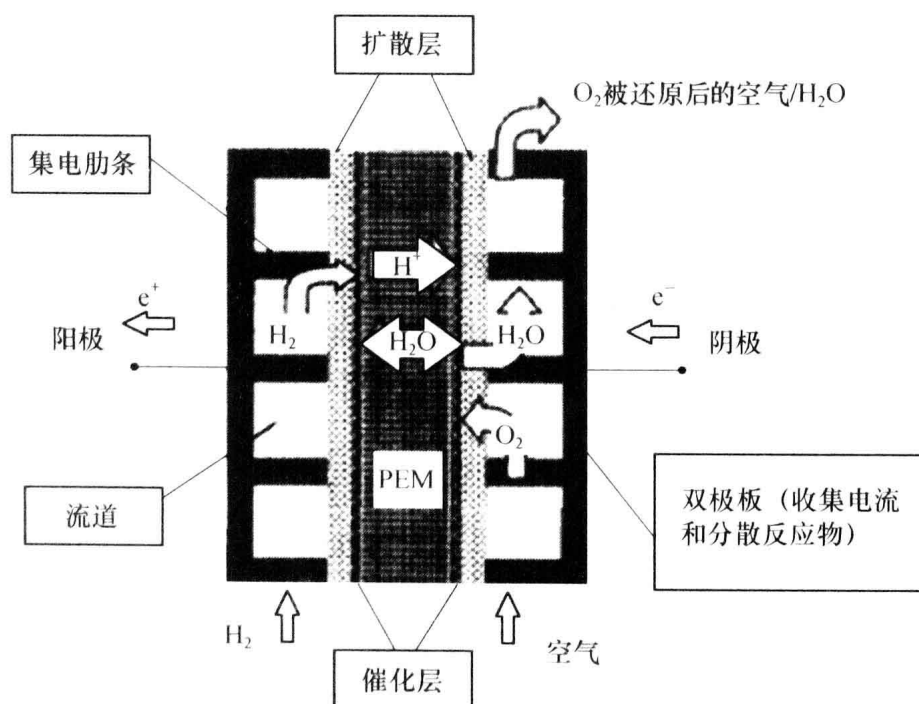


图 1.2 PEM 燃料电池的结构示意图

(1) 电极通常由两部分组成，扩散层和催化剂层。扩散层由导电多孔材料组成，作用在于支撑催化剂层、收集电流，并为电化学反应提供电子通道、气体通道和排水通道。催化剂层是发生电化学反应的场所，其内部结构粗糙多孔，因而有足够的比表面积以促进氢气和氧气的电化学反应。在电极的热压过程中，催化剂层和膜的重叠部分称为活性催化剂层，如图 1.2 所示。

(2) 质子交换膜是一种电解质，其作用是分隔氧化剂与还原剂、传导质子。氢氧混合极易发生爆炸，其隔膜作用就是阻止阴阳两极气体之间相通；其电解质的作用仅使质子通过，而使电子受阻。

通常将质子交换膜和电极制成 MEA(Membrance Electrade Assembly)。MEA 是 PEM 燃料电池的核心部件之一，对 PEM 燃料电池的输出功率、能量密度分布及工作寿命有着决定性的影响。

(3) 集流板(双极板)的作用是分隔氧化剂和还原剂，收集电流，引导反应气体均匀分布。目前广泛采用的集流板材料是无孔石墨板、表面改性的金属板等。在电堆中，阳极集流板与阴极集流板背对背制作在一起，即为双极板。

双极板的作用：①收集电流。②分隔氧化剂与还原剂，将反应物均匀分配到电极各处，再传送到电极催化剂层进行电化学反应。③热管理，以确保电池在工作时温度分布均匀，并使电池的废热顺利排出。极板的表面刻有许多的流道，以实现其传递气体、冷却水和反应物的功能，而流道的边缘部分(岸)则与电极的扩散基底紧密结合，形成电子通道。

1.2.4 PEM 燃料电池电堆

PEM 燃料电池单电池的理想电压为 1.229V，但是由于实际使用过程中存在各种极化，所以电压较低，一般为 0.7V 左右。实际使用的 PEM 燃料电池多为 PEM 燃料电池堆，如图 1.3 所示，即由多个单电池在电流上为串联，在气路上并联的电池堆，此时，阴极流场板和阳极流场板“背对背”合二为一，成为双极板，双极板的一侧流氧气(空气)，另一侧流氢气，双极板兼有导流和导电作用。根据实际电流、电压和功率需要，实施多个电池组电路上的串、并组合。

电堆中的过程包括：①燃料气体、氧化气体分别进入电堆的阳极歧管和阴极歧管，从入口歧管，气体沿电堆方向传输，然后分别进入单电池阴极、阳极气道内，沿单电池方向传输，并扩散进入电极，最后从出口歧管沿电堆方向排出。②热传递。在进入电堆之前反应气体被加湿、预热，电堆中热传递形式主要是单电池与单电池之间的热传递。

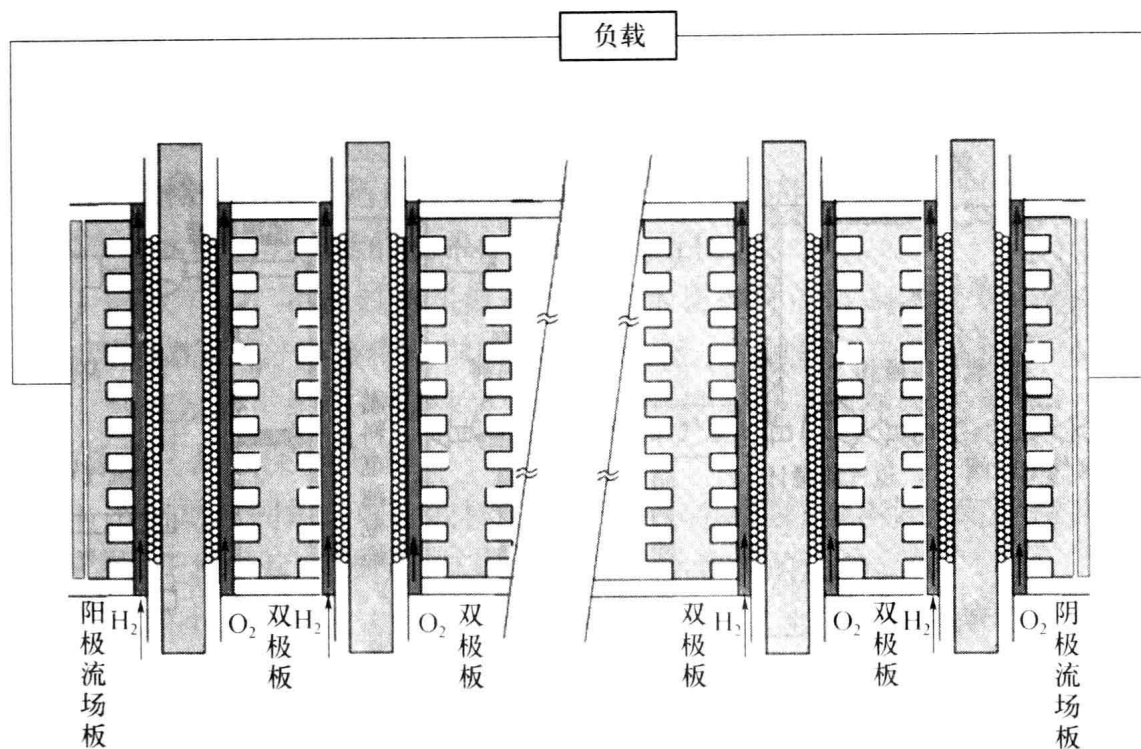


图 1.3 PEM 燃料电池堆组成

1.2.5 PEM 燃料电池系统

要使燃料电池系统能独立、稳定的工作，只有一个燃料电池堆是远远不够的，还必须有相应的支持系统，主要包括：供气系统、增湿系统、冷却系统、燃料气体(主要是氢气)循环系统、尾气排放系统、控制系统^[5]。如图 1.4 所示^[6]。

供气系统：包括氢源和空气供应系统。系统氢源采用高压气体容器储氢,如铝内胆碳纤维缠绕、环氧树脂浸渍增强的高压容器，目前所知的压力容器的最高压力为700bar,当然,也可用金属材料如Fe-Ti-Ni 等合金粉储氢,或氢化钙固体储氢等方法。空气供应系统主要包括空气泵和空气过滤器，空气泵消耗的能量由燃料电池本身提供，空气在进入电池堆之前先经过一个空气过滤器,除去灰尘等杂质。供气系统还包括氢气和空气的流量控制器，以满足燃料电池不同工作状态对流量的要求^[7]。

增湿系统包括氢气增湿器、空气增湿器、增湿水系统。空气和氢气经增湿后进入电堆，保证燃料电池的性能。对于电堆特别是大功率电堆，增湿的水量是比较大的，增湿水系统是有必要的，它可以是独立的系统，也可以利用水冷却系统的水，既能降低系统的复杂性又能利用电池生成的热量。