

高效 环保的

燃料电池发电系统
及其应用

刘凤君 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高效环保的 燃料电池发电系统 及其应用

刘凤君 编著



机械工业出版社

燃料电池是一种用途多、燃料广、噪声低、污染小的高效率发电装置，可用于1kW~1000MW的静置式发电站、电动车辆（电动汽车、电动摩托车、电动自行车）的动力电源、航天飞行器主电源、军用潜艇与水下机器人动力电源，便携式电子产品（笔记本电脑、手机等）电源等，被誉为是21世纪改变人类生活的十大实用技术之一。本书介绍了燃料电池的发展史及其分类，并介绍了碱性燃料电池、质子交换膜燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固态氧化物燃料电池、直接甲醇燃料电池的工作原理、特点、结构与性能等并阐明了不同燃料电池的技术研制方向。本书最后两章还根据作者40多年从事电源研究的经验，介绍了燃料电池在静置式交流发电站系统以及在电动车辆、太空飞行、军用潜艇动力及可携式电源中的应用。

本书可供科研单位及高等院校从事电源研究与开发的科研人员，本科生、研究生和有关教师参考，对从事化学电源生产与设计及发电系统开发的工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

高效环保的燃料电池发电系统及其应用/刘凤君编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.10

ISBN 7-111-17541-7

I. 高... II. 刘... III. 燃料电池 IV. TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 116793 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王 玫 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文

封面设计: 马精明 责任印制: 石 冉

北京中兴印刷有限公司印刷

2006年1月第1版第1次印刷

890mm×1240mm A5·15.125 印张·448千字

0 001—4 000 册

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换。

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

能源是人类文明发展的动力，能源也是衡量一个国家的经济发展与人民生活的重要指标。历史告诉我们，每一次能源技术的突破与创新，都会促成社会的跃进与经济的繁荣。

21世纪将是能源与环保的世纪。能源的开发、资源的利用与环境保护相互协调的发展，将是21世纪世界经济发展的基础，能源的优化利用与清洁能源的开发，是能源资源与环境的可持续发展战略的重要组成部分。在这个世纪，有世界上三大能源之称的石油、天然气和煤等化石燃料即将被耗尽，同时由于这些燃料的低效“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21世纪里，节省能源与开发新能源，提高燃料的利用率与减少燃料燃烧产生的污染，已成为必须解决的重要课题。燃料电池因其是一种不经过燃烧过程的低污染、高效的发电装置，是一种可以利用氢这种新型能源作燃料的一种清洁发电装置，所以已成为21世纪未来的第四代主要发电技术。高温燃料电池〔包括熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)和固态氧化物燃料电池(SOFC)〕可以采用脱硫煤气作燃料，将它与煤制气技术相结合而建成大型电站，将为我国清洁煤高效发电提供一条重要途径，具有重要的社会效益和经济效益。

近些年来，电动汽车的发展呼声很高，主要原因是电动汽车采用铅酸蓄电池作为动力，噪声低，且没有排气污染，能有效地减少城市汽车尾气的污染。但由于铅酸蓄电池的重量能量密度较低（仅有 $30\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ），不能很好地满足电动汽车的要求，同时充电时间也较长，从而阻碍了电动汽车的推广。而发展燃料电池来解决电动汽车的动力电源，已成为一个重要的发展途径，并已被世界各大汽车厂商所接受，投入巨资进行开发。

其次，燃料电池作为潜艇动力电源、太空飞行主动力电源，微型燃料电池作为计算机通信与消费类(3C)电子产品便携式电源，也

都表现出了优良的性能。所以近些年来，燃料电池技术的发展倍受各国政府与企业的重视，被誉为是 21 世纪改变人类生活的十大实用技术的第六位。燃料电池技术无论是学术上的基础研究，还是商品化的应用开发，都有了长足的进步。目前，国内也有越来越多的研究单位、大专院校和有关厂商公司等进行燃料电池的研究开发工作，并将开始形成高潮。

1994 年 3 月，国务院通过了《中国 21 世纪议程——中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书》，其中提到了能源资源与环境的可持续发展战略。使用清洁能源与开发洁净化能源利用技术，是能源持续发展工程中的重要内容。燃料电池发电系统正是洁净燃料发电技术之一。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研讨会”。与会代表一致认为，我国应大力发展燃料电池技术，并将燃料电池作为一项系统工程，集中力量攻坚。2004 年 5 月，由科学技术部、中国科学技术协会和国际氢能协会主办的第二届国际氢能论坛在北京人民大会堂隆重开幕，显示了中国政府对该领域的重视和支持。参加会议的人员也都渴望燃料电池能尽早地成为人类新的清洁能源，为改善人类的生存环境作出贡献。

在上述情况下，希望了解燃料电池发电系统的人日益增多，然而国内至今还没有一本燃料电池发电系统及其应用的全面专业书籍，这本书就是在这种情况下，根据作者 40 多年从事电源研究的经验，配合当前我国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工作原理、关键技术以及商品化发展与应用的过程，进行了详细的分析与探讨，内容则是根据国内外学术界与各大厂商的最新研究成果、生产工艺与产品性能以及最新的电力电子逆变技术编写而成的，与国外同类书的不同之处是增加了国内燃料电池的研究开发情况及一些应用的电力电子技术。

本书共分 10 章。第 1 章是燃料电池的综合概述，第 2 章介绍了电极热力学、动力学、发电效率与电催化，第 3 章介绍了碱性燃料电池，第 4 章介绍了质子交换膜燃料电池，第 5 章介绍了磷酸燃料电池，第 6 章介绍了熔融碳酸盐燃料电池，第 7 章介绍了固态氧化物燃料电池，第 8 章介绍了直接甲醇燃料电池，第 9 章介绍了静置式交流

发电站系统，第10章介绍了燃料电池在电动汽车、太空飞行、潜艇动力及可携式电源中的应用。最后在附录中还提供了一些简单的燃料电池的计算实例，让读者能够从整理数据的过程中加深对燃料电池工作原理的了解。

值得指出的一点是，燃料电池发电系统虽然是继水力发电、火力发电和核能发电之后的第四代发电装置，具有高效、低污染的优点，已成为当今世界能源开发的热点；虽然由于石油短缺和汽车尾气污染等问题日益严重，几乎所有的大规模汽车制造厂商都在研发燃料电池电动汽车；虽然应用于便携式电子装置（如笔记本电脑、掌上电脑和手机等）的微型燃料电池的研发也在激烈地竞争等，但由于燃料电池的成本居高不下，目前仍处于研发和示范应用阶段，到商品化还需要几年或十几年的时间。

燃料电池发电系统的研发是一个很大的系统工程，它涉及到材料、元器件、开发、制造、集成应用、电力电子技术、分销和终端用户等等各个方面，因此，“官、产、研”相结合是燃料电池发电系统发展的一个显著特征，也是必由之路。同时也必须充分意识到，燃料电池这个属于能源基础行业中的高新技术，其产业化是有一定难度的。这个过程将会经历三个阶段，即注重技术水平的成果阶段、注重实用化的产品阶段和注重销售价格/生产成本的商品化阶段。目前燃料电池发电系统已经走出了注重实用化的产品阶段，预计再过几年或十几年的时间，燃料电池发电系统将会走出注重销售价格/生产成本的商品化阶段，达到普遍应用的水平，以改善人们的生活。

由于编著者学识有限，同时，燃料电池发电系统尚处于发展阶段，新技术、新工艺在不断地出现，再者，由于资料的收集面因时间的限制尚不够广泛全面，因此难免有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正，编著者表示衷心的感谢。

作者的通信处：北京海淀区永定路85号405楼4单元1号，邮编为100039，联系电话：010-68764462。

作者 刘凤君

2005年2月

符号说明

- a activity, 活性度
- B Tafel parameter, $B = RT/nF$, V
- b Tafel slope, $b = 2.3RT/nF$, V
- c_B bulk concentration, [体积] 浓度, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
- C_o oxidant concentration, 氧化剂体积浓度, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
- C_R reductive concentration, 还原剂体积浓度, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
- c_p specific heat capacity, 比热容, $\text{kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$
- C_s surface concentration, 表面浓度, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
- D diffusion coefficient or diameter, 扩散系数或孔径, m
- E_{cell} cell voltage, 电池电压, V
- E_n null or reversible potential, 无效电位或可逆电位, V
- E_n° standard potential, 标准电位, V
- e^- electron, 电子电荷, $1.602 \times 10^{-19}\text{C}$
- F Faraday's constant, 法拉第常数, 96484.56C/mol
- g gibbs free energy, 自由能, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- h enthalpy, 焓, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- I current, 电流, A
- i current density, 电流密度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$
- i_L limiting current density, 极限电流密度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$
- i_o exchange current density, 交换电流密度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$
- J volumetric current density, 体积电流密度, $\text{A}\cdot\text{m}^{-3}$
- K equilibrium constant, 平衡常数
- K_o standard rate constant, 标准速率常数, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- K_{ox} oxidative rate constant, 氧化反应速率常数, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- K_{rd} reductive rate constant, 还原反应速率常数, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- \dot{m} mass dissipation rate, 质量消耗率, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
- N amount of mole, 摩尔量

- n number of electrons participating in a reaction, 参与反应的电子数
 n_a number of pores in the anode matrix, 阳极内的孔数
 n_c number of pores in the cathode matrix, 阴极内的空孔数
 n_e number of pores in matrix of electrolyte, 电解质载体内的空孔数
 n_A, n_B, n_C, n_D Coefficients, 反应方程式系数
 \dot{n} mole dissipation rate, 摩尔消耗率, $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
 p pressure, 压力, Pa
 P_W power, 功率, W
 O oxidant, 氧化剂
 Q quantity of electricity, 电量, C
 q reaction heat, 反应热, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
 R reductant, 还原剂
 R universal gas constant, 气体常数, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 R_Ω cell ohmic resistance, 电池欧姆电阻, Ω
 S entropy, 熵, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 t time, 时间, s
 T temperature, 温度, K
 U_f fuel utilization, 燃料利用率, %
 V cell voltage, 电池电压, V
 v rate of reaction, 反应速率, $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
 \dot{v} volumetric dissipation rate, 体积消耗率, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
 W_R maximum (reversible) work, 最大(可逆)电功, $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
 W_t Weight, 重量

希腊字母

- α symmetric factor of transfer coefficient, 对称因子或转移常数
 β hydrogen utilization, 氢气利用率, %
 δ diffusion layer thickness, 扩散层厚度, m
 η efficiency, 效率
 η_{CHP} Combined heat and power efficiency, 热电合并效率
 η_c electrochemical efficiency, 电化学效率
 η_n thermodynamic efficiency, 热力学效率
 η_{sys} System efficiency, 系统效率
 γ interfacial surface tension, 表面张力, $\text{nt}\cdot\text{m}^{-1}$

- ϵ_{act} activation polarization, 活化极化, V
 ϵ_{conc} Concentration polarization, 浓度极化, V
 ϵ_{ohm} ohmic polarization, 欧姆极化, V
 θ electrolyte contact angle, 电解质接触角
 θ_{CO} CO coverage, 一氧化碳涵盖率

上标

- b bulk, 容积环境
 O standard conditions, 标准状态
 S surface, 表面

下标

- a anode, 阳极
 act activation, 活化
 ads adsorption, 吸附
 C cold, 低温
 c cathode, 阴极
 conc concentration, 浓度
 e electrolyte, 电解质
 f fuel, 燃料
 H hot, 高温
 i species, 成分
 in cell, inlet, 燃料电池进口
 O oxidant, 氧化剂
 ohm ohmic resistance, 欧姆阻抗
 out cell outlet, 燃料电池出口
 ox oxygen or oxidant, 氧气或氧化剂
 P pressure, 压力
 R reductant, 还原剂
 T, t temperature, 温度

缩 略 语

- AC alternating current, 交流电
- ADG anaerobic digester gas, 厌氧消化气 (一种沼气)
- AES air electrode supported (tube), 空气电极支撑 (管)
- AFC alkaline fuel cell, 碱性燃料电池
- AIP air independent propulsion (system), (潜艇) 闭气推进动力系统
- ARL (USA) army research lab, (美国) 陆军研究实验室
- BMC bulk molding compounds, 空积模造复合材料
- CaFCP California Fuel Cell Partnership, 加州燃料电池伙伴联盟
- CHF clean hydrocarbon fuel, 洁净碳氢化合物燃料
- CHP combined heat and power (efficient), 热电联产 (效率)
- CGH2 compressed gas hydrogen, 压缩氢气
- CV cyclic voltammetry, 循环伏安法
- DC direct current, 直流电
- DFC[®] direct fuel cell, Fuel Cell Energy MCFC 的注册商标
- DIR direct internal reforming, 直接内重整技术
- DMFC direct methanol fuel cell, 直接甲醇燃料电池
- DOE Department of Energy (USA), 美国能源部
- EMF electromotive force, 电动势
- EVD electrochemical vapor deposition, 电化学蒸气沉积法
- ERC Energy Research Council, 能源研究所 (FCE 的前身)
- EV equivalent weight, 当量
- FCE Fuel Cell Energy, 美国一家制造 MCFC 的公司
- FETC (USA) Federal Energy Technology Center, 美国联邦能源技术中心
- Freedom CAR “(USA) freedom cooperative automotive research” project, (美国) “自由车” 燃料电池电动车发展计划
- Freedom Fuel (USA) hydrogen fuel initiative project, (美国) “自由燃料” 氢能推动计划
- GE General Electrical, 通用电气 (奇异) 公司

- GDE gas diffusion electrode, 气体扩散电极
- GDL gas diffusion layer, 气体扩散层
- GRI Gas Research Institute (USA), (美国) 燃气研究所
- GT gas turbine, 燃气轮机
- HDSTM hydrogen on demand system, 氢气即付系统 (一种化学储氢-供氢技术)
- HEXIS heat exchange integrated stack, 一体成形热交换 (SOFC) 燃料电池组
- HHV higher heating value, 高热值
- HPD SOFC high power density SOFC, 高功率密度 (扁平管) SOFC
- IFC International Fuel Cell, UTC 的前身
- IIR indirect internal reforming, 间接内重整
- J-M Johnson Matthey Catalysts, 英国的一家生产触媒的公司
- LANL Los Alamos National Laboratory, 美国落萨摩斯国家实验室
- LCC Ca-doped LaCrO₃, 掺入钙的铬酸镧
- LHV lower heating value, 低热值
- LHZ liquid (cryogenic) hydrogen, (低温) 液氢
- LPG liquid petroleum gas, 液态石油气
- LPM liter per minimum, 流量单位, L/m³
- LSM Sr-doped LaMnO₃, 掺入锶的锰酸镧
- MCFC molten carbonate fuel cell, 熔融碳酸盐燃料电池
- MEA membrane-electrolyte assembly, 膜电极组
- MOLB monoblock layer built (SOFC), 单块叠层结构 (SOFC) 电池组
- NASA National Aeronautics and Space Administration, 美国航空航天管理局
- NECAR non-emission car, 戴姆勒克莱斯勒的燃料电池车
- NETL National Energy Technology Laboratory (USA), 美国国家能源技术实验室
- OCV open-circuit voltage, 开路电压
- P&W Pratt & Whitney, 普惠公司, UTC 集团下的一家公司
- PAFC phosphoric acid fuel cell, 磷酸燃料电池
- PBI acid-doped polybenzimidazole, 掺入酸的聚苯并咪唑
- PBPSH poly biphenyl sulfone: H form, 质子型聚双苯基磺酸
- PEFC polymer electrolyte fuel cell, 高分子电解质燃料电池 (= PEMFC)
- PEMFC proton exchange membrane fuel cell, 质子交换膜燃料电池

- PEN positive electrode-electrolyte-negative electrode (SOFC), (SOFC) 结合电解质与正负极的三合一结构
- PFSA polymerized perfluorosulfonic acid, 聚合全氟磺酸 (Nafion® 的原料)
- ppm part per million, 百万分之一
- PTFE polytetrafluoroethylene, 聚四氟乙烯, 俗称铁氟龙 (一种疏水剂)
- RH relative humidity, 相对湿度
- RHE reference hydrogen electrode, 参考氢电极
- SAXS small angle X-ray scattering, 小角度 X 光散射技术
- sccm standard cubic centimeter per minimum, 标准状态下流量单位, cm^3/min
- SCG simulated coal gas, 模拟煤气
- SEM scanning electronic microscope, 扫描式电子显微镜
- SMR steam/methanol reformer, 蒸气/甲烷重整器
- SOFC Solid oxide fuel cell, 固态氧化物燃料电池
- SOFC/GT SOFC/gas turbine hybrid, 固态氧化物燃料电池/燃气轮机联合发电系统
- SPFC solid polymer fuel cell, 固态高分子燃料电池 (= PEMFC)
- STP standard temperature and pressure, 标准状态
- TARGET team to advance research for gas energy transformation, 普惠公司 (P & W) 为首的 PAFC 发展计划
- TM trade mark, 商标
- UPS uninterrupted power supply, 不间断电源
- UTC United Technologies, Corp, (美国) 联合技术集团 (美国一家科技集团公司)
- XRD X-ray diffraction, X 光绕射仪
- YSZ yttria stabilized zirconia, 掺入三氧化二钇的氧化锆, SOFC 电解质材料

目 录

前言

符号说明

缩略语

第 1 章 燃料电池的综述	1
1.1 燃料电池的定义、诞生与开发史	1
1.1.1 燃料电池的诞生与开发史	1
1.1.2 燃料电池的应用与商业化的发展史	4
1.2 燃料电池的发电原理、特点及种类	6
1.2.1 燃料电池的发电原理	6
1.2.2 燃料电池的特点	8
1.2.3 燃料电池的种类	11
1.3 燃料电池的关键材料与元件	17
1.3.1 触媒与多孔气体扩散电极	18
1.3.2 电解质隔膜	20
1.3.3 双极板	22
1.4 燃料电池组	23
1.5 燃料电池的交流发电系统	25
1.6 燃料电池与再生能源	26
1.6.1 太阳能与燃料电池	27
1.6.2 温室气体与燃料电池	29
1.6.3 再生式燃料电池	29
1.6.4 生质能与燃料电池	31
1.7 促使能源变迁与氢能经济的发展	32
1.7.1 人类使用能源的变迁	33
1.7.2 氢能经济的发展	36
1.8 燃料电池的发展方向	38
1.8.1 燃料电池的商业化发展	38
1.8.2 燃料电池的相关技术与材料研究	40

1.8.3 新型燃料电池的研究	41
1.9 我国燃料电池发展的基本情况	45
第2章 电极热力学、动力学、发电效率与电催化	49
2.1 电极热力学	49
2.1.1 自由能与理想电位	50
2.1.2 理想电位与温度的关系	52
2.1.3 理想电位与压力的关系	54
2.2 电极反应动力学	58
2.2.1 Butler-Volmer 方程式	59
2.2.2 极化	62
2.2.3 活化过电位	63
2.2.4 浓度过电位	68
2.2.5 欧姆过电位	72
2.2.6 极化曲线	72
2.3 燃料电池的效率	73
2.3.1 燃料电池的理想效率	74
2.3.2 燃料电池的实际效率	76
2.3.3 燃料电池系统的效率	77
2.4 燃料电池中的催化作用	79
2.4.1 电催化原理	79
2.4.2 电催化剂(触媒)的作用	81
2.4.3 燃料电池电催化剂(触媒)的选择与设计	82
2.4.4 电催化剂(触媒)材料的开发	85
第3章 碱性燃料电池(AFC)	87
3.1 概述	87
3.2 工作原理	90
3.3 电池的结构	91
3.4 碱性燃料电池的关键元件	93
3.4.1 触媒与电极结构	93
3.4.2 电解质载体隔膜	96
3.4.3 双极板与流场	96
3.4.4 电池组的结构	97
3.4.5 电解质的管理	99
3.5 AFC 的运行特性	102

3.5.1	氧化剂对 AFC 运行特性的影响	102
3.5.2	工作温度对 AFC 运行特性的影响	103
3.5.3	工作压力对 AFC 运行特性的影响	103
3.6	运行实例	104
3.7	AFC 的开发应用	106
3.7.1	培根碱性燃料电池的开发	107
3.7.2	阿波罗登月太空飞船用 AFC	107
3.7.3	航天飞机用 AFC	109
3.8	各国的研究开发情况	111
3.8.1	美国的研究开发情况	112
3.8.2	欧洲的研究开发情况	113
3.8.3	日本的研究开发情况	115
3.8.4	我国的研究开发情况	118
3.9	技术开发课题	119
3.9.1	提高 AFC 的性能	119
3.9.2	降低 AFC 的造价	119
第 4 章	质子交换膜燃料电池 (PEMFC)	121
4.1	概述	121
4.2	工作原理	123
4.3	电池的结构	126
4.4	质子交换膜燃料电池的关键元件	126
4.4.1	质子交换膜	126
4.4.2	触媒与电催化反应	131
4.4.3	电极	135
4.4.4	膜电极组	138
4.4.5	双极板与流场	140
4.5	PEMFC 性能的实验测试	144
4.5.1	单体电池的结构	144
4.5.2	单体电池的性能	145
4.6	电池组的各项技术	150
4.6.1	电池组的密封技术	151
4.6.2	电池组的水管理与增湿技术	151
4.6.3	电池组的散热技术	156
4.7	PEMFC 的研究开发现状	157

4.8 PEMFC 的适用范围	159
4.8.1 航天与军事动力电源	159
4.8.2 车辆用动力电源	161
4.8.3 固定式电源	163
4.8.4 可携式电子产品小电源	164
4.8.5 PEMFC 商品化所面临的挑战	165
4.8.6 我国当前 PEMFC 研究的应用目标	169
第 5 章 磷酸燃料电池 (PAFC)	170
5.1 概述	170
5.2 工作原理	171
5.3 PAFC 的工作条件	175
5.4 磷酸燃料电池的关键元件与材料	176
5.4.1 电解质与载体	176
5.4.2 电极	177
5.4.3 双极板	178
5.4.4 单体电池、电池组与系统	180
5.5 磷酸燃料电池的性能分析	185
5.5.1 温度效应	185
5.5.2 压力效应	186
5.5.3 反应气体的组成与利用率效应	188
5.5.4 杂质效应	190
5.5.5 磷酸的浓度效应	193
5.5.6 电池的内阻	194
5.6 磷酸燃料电池在静置型发电站中的应用与发展现状	194
5.7 磷酸燃料电池在电动汽车中的应用情况	199
5.8 各国对 PAFC 的研究开发情况	200
5.8.1 美国的研究开发情况	200
5.8.2 日本的研究开发情况	202
5.8.3 欧洲及其他国家和地区的研究开发情况	205
5.9 技术开发课题	207
5.9.1 提高 PAFC 的性能与可靠性	207
5.9.2 降低电池的制造成本 (经济性)	210
第 6 章 熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC)	214
6.1 概述	214

6.2 发电原理及特性	215
6.2.1 发电原理	215
6.2.2 电池系统的特性	217
6.3 熔融碳酸盐燃料电池的关键元件与结构	220
6.3.1 电解质载体隔膜	221
6.3.2 阳极	222
6.3.3 阴极	223
6.3.4 电解质与电解质的管理	226
6.3.5 双极板与电池组的结构	229
6.4 影响 MCFC 性能的因素分析	231
6.4.1 压力的影响	231
6.4.2 温度的影响	234
6.4.3 反应气体的组成与利用率的影响	236
6.4.4 杂质的影响	239
6.4.5 燃料利用率与内重整反应	243
6.5 MCFC 的发展情况与发展现状	244
6.5.1 20 世纪 80 年代前的发展情况	244
6.5.2 当前的发展现状	245
6.6 发电厂系统的运行技术要点和构成	252
6.6.1 MCFC 系统的运行技术要点	252
6.6.2 发电厂系统的构成	254
6.7 MCFC 的技术开发课题	258
6.7.1 阴极材料的选择及电化学反应的研究	258
6.7.2 阳极材料的选择及电化学性能的研究	260
6.7.3 电解质组分的选择与添加剂的研究	260
6.7.4 电池耐腐蚀性能的研究	261
6.7.5 电池本体需要解决的问题	262
第 7 章 固态氧化物燃料电池 (SOFC)	263
7.1 概述	263
7.2 SOFC 的工作原理与特点	264
7.3 固态电解质与固态氧化物电解质	270
7.3.1 固态电解质	270
7.3.2 固态氧化物电解质	273
7.3.3 固态氧化物电解质的导电机制	274