

电源系列

WILEY

燃料电池基础

Fuel Cell Fundamentals

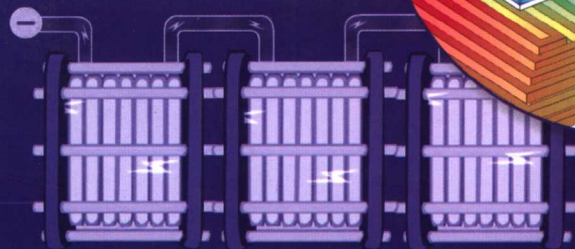
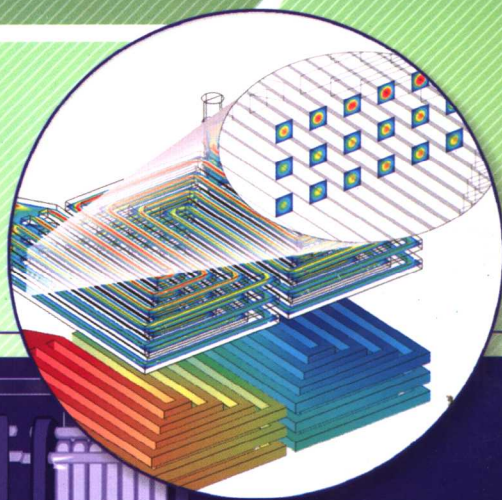
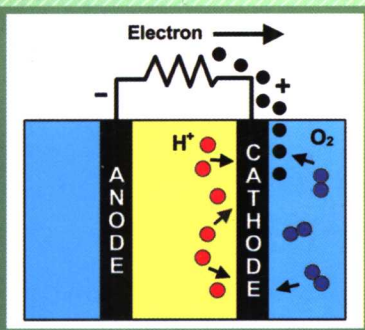
[美] Ryan O'Hayre

[韩] 车硕源

[美] Whitney Colella

[美] Fritz B. Prinz

著 ◎ 王晓红 黄 宏 等译 ◎



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

《燃料电池基础》是一本易于理解的教科书和专业入门用书，全书涵盖了关于燃料电池技术的基础科学和工程学。本书重点强调了控制燃料电池运行的基本科学原理，简单明了地阐述了燃料电池是如何工作的、为什么能产生如此高效的潜能，以及如何充分地利用其独特的优势等问题。本书分为两部分：

第一部分：燃料电池原理——重点聚焦在燃料电池基本物理学，包括利于理解燃料电池的一些图示、例题、原文和复习题；

第二部分：燃料电池技术——主要讨论了燃料电池技术的实际应用，包括对于一个特定的应用如何选择最合适的燃料电池，以及如何设计一套完整的系统。

作为燃料电池方面的第一本教科书，本书提供了大量的例题、习题与思考题以供教学使用，非常适合于任何具有微积分、基础物理和基本热动力学背景的燃料电池初学者，可作为相关专业高年级本科生和研究生的教材，也可供从事燃料电池方面工作的工程技术人员参考。



责任编辑：谭海平 段丹辉

封面设计：孙焱津

本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

Copies of this book sold without
a Wiley sticker on the cover are
unauthorized and illegal.

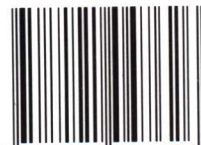


WILEY

www.wiley.com



ISBN 978-7-121-04762-6



9 787121 047626 >

定价：38.00 元

电源系列

燃料电池基础

Fuel Cell Fundamentals

[美] Ryan O'Hayre
[韩] 车硕源
[美] Whitney Colella
[美] Fritz B. Prinz

著

王晓红 黄 宏 等译

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

燃料电池是 21 世纪最有希望的新一代绿色能源动力系统,有助于解决能源危机和环境污染等问题。本书是一本浅显易懂的教材和专业入门书籍,涵盖了关于燃料电池的基础科学与工程学。本书侧重于基本原理,简单明了地描述了燃料电池是如何工作的、为什么它可以产生如此高效的潜能以及如何最佳地利用其独特的优势等。本书分成两部分:第一部分集中阐述燃料电池物理学,第二部分对燃料电池实际应用进行简单讨论。为便于教学使用,本书提供了大量的例题与习题。

本书重点强调控制燃料电池工作的科学原理,对于燃料电池的初学者,如高年级本科生或低年级研究生,无需具备燃料电池或电化学知识背景,只要具有微积分基础、基础物理和基本热动力学背景均适合阅读,也可供从事燃料电池方面工作的工程技术人员参考。

Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz: **Fuel Cell Fundamentals**.

ISBN 978-471-74148-5, Copyright © 2006, John Wiley & Sons, Ltd. All Rights Reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Ltd.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Ltd. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons Ltd. 授权电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2006-7347

图书在版编目(CIP)数据

燃料电池基础/(美)奥海尔(O'Hayre, R.)等著;王晓红等译.

北京:电子工业出版社,2007.10

(电源系列)

书名原文:Fuel Cell Fundamentals

ISBN 978-7-121-04762-6

I. 燃… II. ①奥…②王…③黄… III. 燃料电池 IV. TM911.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 112627 号

责任编辑:谭海平 段丹辉

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市金马印装有限公司

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

开 本:787×980 1/16 印张:21.75 字数:447.9 千字

印 次:2007 年 10 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：（010）88254396；（010）88258888

传 真：（010）88254397

E-mail : dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

译者序

燃料电池是将燃料的化学能直接转换成电能的装置。燃料电池由于具有效率高、无污染、重量轻等优点,可作为便携式电子产品的小型电池,也可应用于小型集中供电或分散式供电系统,被称为 21 世纪的绿色环保能源,极具发展潜力和应用前景,目前受到世界各国的重视,被列入未来世界十大科技之首。

我们在诸多有关燃料电池的专著中选择了《燃料电池基础》这本书,希望把此书介绍给中国的高等院校以及研究机构,与更多的读者分享。这是一本易于理解、基础性很强的书,也是一本理论知识与实际应用相结合的书。本书前半部分涵盖了燃料电池技术所需要的基础科学,从燃料电池的基本物理学入手,生动地阐述了燃料电池的基本工作原理、模型建立及电化学特性等内容。通过这些理论和原理的学习,读者可以从根本上理解燃料电池如何工作及为什么会如此高效等问题。本书后半部分讨论了燃料电池技术的实际应用,包括对于特定的应用如何选择最合适的燃料电池,以及如何设计一套完整的系统,等等。这是致力于燃料电池方面的第一本教科书,书中提供了大量的图示、参考文本、例题、习题与思考题以供教学使用。本书非常适合作为相关专业高年级本科生和研究生教材,也可供从事燃料电池方面工作的工程技术人员参考。本书不仅有助于高等院校通过教学培养出具有燃料电池专业知识的研究技术人才,也有助于提高和丰富相关研究人员和工程师的理论背景和研究水平。

原书作者之一 Fritz B. Prinz 博士,现任美国斯坦福大学(Stanford University)工程学院教授(Rodney H. Adams Professor),兼任机械工程系系主任。Prinz 教授在燃料电池方面具有丰富的知识,他所领导的 RPL(Rapid Prototyping Laboratory)实验室在燃料电池,尤其是超薄微型固体氧化物燃料电池的研究成果居国际领先地位。2005 年底,正值 *Fuel Cell Fundamentals* 出版之际,清华大学微电子所副教授王晓红博士在 RPL 实验室做访问研究,在此期间斯坦福大学高级研究员黄宏博士在 RPL 实验室从事并协调超薄微型固体氧化物燃料电池项目的研究。在 Prinz 教授的鼓励和支持下,我们欣然开始了此书的翻译工作。

本书由王晓红博士组织翻译,并翻译了前言、第 1 章、第 2 章和部分附录等内容,还完成了全书的最后校订。黄宏博士对各章节的翻译做了专业方面的指导和订正,以及全书译稿的初校。本书的翻译出版是集体智慧与贡献的结晶,清华大学的几位研究生为此做了大量的初译工作,付出了许多宝贵的时间,对此,我们致以诚挚的感谢。其中,姜英琪翻译了

第3章、第4章和附录D;钟凌燕翻译了第5章、第6章、第10章和附录E;王温静翻译了第7章、第8章、第9章和第11章;张谦和鲍华也参与了部分翻译工作。

电子工业出版社的编辑们为本书的出版做了大量艰苦、细致、耐心的工作,使得本书得以顺利出版,在此我们表示衷心感谢。

在本书的翻译出版过程中,我们还得到了许多朋友、同事多方面的帮助以及家人对我们辛勤工作的理解、支持和关怀,谢谢!

由于译者水平有限,书中涉及的概念和名词较多,难免有翻译不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作者简介

Ryan O'Hayre: 博士,现任美国科罗拉多矿业学院(Colorado School of Mines)金属材料工程系助理教授。他曾受聘为美国科学基金会的国际研究员在荷兰代尔夫特工业大学(Technical University of Delft)工作,并曾任美国斯坦福大学(Stanford University)机械工程系代理助教。

车硕源: 博士,现任韩国首尔国立大学(Seoul National University)机械与航空工程学院助理教授。

Whitney Colella: 博士,现为美国斯坦福大学(Stanford University)土木与环境工程系博士后研究员。

Fritz B. Prinz: 博士,现为美国斯坦福大学(Stanford University)工程学院教授(Rodney H. Adams Professor),兼任机械工程系系主任。

译者简介

王晓红: 博士,现任清华大学微电子学研究所副研究员,曾在美国斯坦福大学(Stanford University)机械工程系做访问研究员。

黄宏: 博士,现任美国斯坦福大学(Stanford University)机械工程系高级研究员,之前曾为荷兰代尔夫特工业大学(Technical University of Delft)化学工程系副研究员。

前言

设想开着一辆燃料电池小汽车回家,一路上排气管只有纯净水滴下;设想便携式电脑一次充电即可运行 30 小时;设想你在小汽车里就可以开启你房屋内的电源,而电力线已成为遥远的回忆。正是这些梦想驱使着今天对燃料电池的研究。一些梦想(比如通过燃料电池汽车给房屋提供电力)可能很遥远,但有些梦想(像可运行 30 小时的便携式电脑)可能已经接近你的想象。

本书将通过聚焦“如何”和“为什么”等问题来讲解燃料电池技术背后的科学,把燃料电池从梦想世界带回到现实世界。对于燃料电池是如何工作的,为什么它可以产生如此高效的潜能,以及如何最佳地利用其独特的优势等问题,读者都可以在本书中找到浅显易懂的描述。它重点强调控制燃料电池运行的基本科学原理,因为这些原理是不变而且普遍适用的,无论燃料电池的类型或技术如何。

遵循这样的原则,本书第一部分——燃料电池原理,致力于讲解燃料电池的基本物理学。我们设计了图解、例题、文字框和课后练习题等,以便读者对燃料电池有一个统一直观的理解。当然,如果不对燃料电池技术的实际情形做简要的介绍,就不能称为全面的燃料电池知识。这就是本书第二部分的目的——燃料电池技术。我们通过相关的信息图、表和实例综述了主要的燃料电池技术。在本书的这后半部分,读者将可以学会如何为特定的应用选择适宜的燃料电池,以及如何设计一套完整的燃料电池系统。最后,读者将学会如何评估燃料电池技术对环境的潜在影响。

如果读者有任何疑问、意见和完善本书的建议,那么可以通过电子邮件方式发送到我们的邮箱 fcf3@yahoogroups.com,我们将在下一版的编写中郑重地考虑读者的意见和建议。我们也会在网站 <http://groups.yahoo.com/group/fcf3/> 上公布这些讨论和额外的教育资料^①。

① 有关教学资料的索取见本书后所附的“教学支持说明”——编者注。

致 谢

作者们特别感谢斯坦福大学及其快速成型实验室(RPL, Rapid Prototyping Laboratory)的朋友和同事们的支持、批评、建议及热情。没有你们,这本书的编写就无法完成。

我们衷心地感谢工学院院长 Jim Plummer 和 Channing Robertson, 以及副院长 John Bravman, 他们的支持使本书的出版成为可能。同时我们也感谢 Honda 研发中心及其代表 J. Arai, T. Kawanabe, Y. Fujisawa, Y. Kawaguchi, Y. Higuchi, T. Kubota, N. Kuriyama, Y. Saito, J. Sasahara 和 H. Tsuru。感谢 Lynn Orr 和 Chris Edwards 领导下的 GCEP 委员会所创造的新能源技术的学习与研究环境。感谢 RPL 所有成员的有益讨论, 尤其感谢 Tim Holme 在本书的仔细检查与综合和术语、公式与附录的汇总方面所做的大量工作。同时感谢 Rojana Pornprasertsuk 提供了第 3 章和附录 D 的优质的量子计算模拟图。感谢 Juliet Risner 的编辑工作和黄宏对于电解质部分内容的贡献。同样也要感谢 Jeremy Cheng, Kevin Crabb, Turgut Gur, Shannon Miller, Massafumi Nakamura 和 A. J. Simon 在编辑方面的建设性意见。我们还要对 Steven Schneider, Mark Jacobson, Mark Delucchi (University of California at Davis), Michael Mastrandrea 和 Gerard Ketafani 表示感谢, 感谢他们在燃料电池的环境影响方面的深刻见解。另外, 对 Richard Stone (Oxford University), Colin Snowden (Oxford University), Ali Mani 和 Lee Shunn 在燃料电池系统设计和集成方面的有益建议表示感谢。

Fritz B. Prinz 要感谢他的妻子 Gertrud, 女儿 Marie-Helene 和儿子 Benedikt, 谢谢他们的爱、支持和耐心。

Whitney Colella 要感谢她的家人, Caterina Qualtieri, Eulalia Pandolfi, Tom Judge 和 Emily Zedler。

车硕源(Suk-Won Cha)要感谢朋友和家人们给予他的鼓励 and 热情, 尤其是 Unjung 的支持。

Ryan O'Hayre 要感谢 Lisa 给予他的友谊、鼓励、信心、支持和爱。同时感谢 Kendra, Arthur 和 Morgan。Ryan 一直想写一本书——可能是关于龙和历险的故事。结果却是以一种可笑的方式实现, 他首先完成了一本关于燃料电池的书, 而只好把龙的故事置于别处……

术 语

符号	意义	常用单位
A	面积, Area	cm^2
A_c	催化面积系数, Catalyst area coefficient	无量纲
a	活性, Activity	无量纲
ASR	面积比电阻, Area specific resistance	$\Omega \cdot \text{cm}^2$
C	电容, Capacitance	F
C_{dl}	双层电容, Double-layer capacitance	F
c^*	反应表面的浓度, Concentration at reaction surface	mol/cm^2
c	浓度, Concentration	mol/m^3
c	描述质量传输影响浓度损耗的常数, Constant describing how mass transport affects concentration losses	V
c_p	热容, Heat capacity	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
D	扩散率, Diffusivity	cm^2/s
E	电场, Electric field	V/cm
E	热力学理想电压, Thermodynamic ideal voltage	V
E_{thermo}	热力学理想电压, Thermodynamic ideal voltage	V
E_T	参考浓度下温度相关的热力学电压, Temperature-dependent thermodynamic voltage at reference concentration	V
F	亥姆霍兹自由能, Helmholtz free energy	J, J/mol
F	法拉第常数, Faraday constant	96 485 C/mol
F_k	一般力, Generalized force	N
f	反应率常数, Reaction rate constant	Hz, s^{-1}
F	摩擦因素, Friction factor	无量纲
G, g	吉布斯自由能, Gibbs free energy	J/mol, J
g	重力加速度, Acceleration due to gravity	m/s^2
$\Delta G^\ddagger$	活化能垒, Activation energy barrier	J/mol, J
ΔG_{act}	活化能垒, Activation energy barrier	J/mol, J
H	热量, Heat	J

(续)

符号	意义	常用单位
H, h	焓, Enthalpy	J/mol, J
H_C	气体沟道厚度, Gas channel thickness	cm
H_E	扩散层厚度, Diffusion layer thickness	cm
h	普朗克常数, Planck's constant	6.63×10^{-34} J/s
$\hbar$	简化的普朗克常数, Reduced Planck constant, $h/2\pi$	1.05×10^{-34} J/s
h_m	质量传输对流系数, Mass transfer convection coefficient	m/s
i	电流, Current	A
J	摩尔流量, Molar flux	mol/(cm ² ·s)
$\hat{j}$	质量流量, Mass flux	g/(cm ² ·s), kg/(m ² ·s)
J_C	对流质量流量, Convective mass flux	kg/(cm ² ·s)
j	电流密度, Current density	A/cm ²
j_0	交换电流密度, Exchange current density	A/cm ²
j_0^0	参考浓度下交换电流密度, Exchange current density at reference concentration	A/cm ²
j_L	极限电流密度, Limiting current density	A/cm ²
j_{leak}	燃料泄漏电流密度, Fuel leakage current density	A/cm ²
k	玻耳兹曼常数, Boltzmann's constant	1.38×10^{-23} J/K
L	长度, Length	cm
M	摩尔质量, Molar mass	g/mol, kg/mol
$\dot{M}$	质量流率, Mass flow rate	kg/s
M_{ik}	力和流量之间的广义耦合系数, Generalized coupling coefficient between force and flux	多样的
m	质量, Mass	kg
mc_p	热容流率, Heat capacity flow rate	kW/(kg·K)
N	摩尔数, Number of moles	无量纲
N_A	阿伏加德罗数, Avogadro's number	6.02×10^{23} mol ⁻¹
n	反应中传输的电子数, Number of electrons transferred in the reaction	无量纲
n_g	气体的摩尔数, Number of moles of gas	无量纲
P	功率或功率密度, Power or Power density	W 或 W/cm ²
p	压强, Pressure	bar, atm, Pa

(续)

符号	意义	常用单位
Q	热量, Heat	J, J/mol
Q	电荷, Charge	C
Q_h	吸收电荷, Adsorption charge	C/cm ²
Q_m	光滑的催化剂表面的吸收电荷, Adsorption charge for smooth catalyst surface	C/cm ²
q	基本电荷, Fundamental charge	1.60×10^{-19} C
R	理想气体常数, Ideal gas constant	8.314 J/(mol·K)
R	电阻, Resistance	Ω
R_f	感应电阻, Faradic resistance	Ω
Re	雷诺数, Reynolds number	无量纲
S, s	熵, Entropy	J/K, J/(mol·K)
S/C	水-碳比, Steam-to-carbon ratio	无量纲
Sh	Sherwood 数, Sherwood number	无量纲
T	温度, Temperature	K, $^{\circ}\text{C}$
t	厚度, Thickness	cm
U	内能, Internal Energy	J, J/mol
u	迁移率, Mobility	cm ² /(V·s)
$\bar{u}$	平均流速, Mean flow velocity	cm/s, m/s
V	电压, Voltage	V
V	体积, Volume	L, cm ³
v	单位面积的反应速率, Reaction rate per unit area	mol/(cm ² ·s)
v	速度, Velocity	cm/s
v	跳跃速率, Hopping rate	s ⁻¹ , Hz
W	功, Work	J, J/mol
X	寄生功率负载, Parasitic Power Load	W
x	摩尔分数, mole fraction	无量纲
x_v	空位分数, Vacancy fraction	mol, V/mol
y_x	元件 x 的场, Yield of element x	无量纲
Z	阻抗, Impedance	Ω
z	高度, Height	m

希腊符号

符号	意义	常用单位
α	电荷传输系数, Charge transfer coefficient	无量纲
α	CO ₂ 等价量的系数, Coefficient for CO ₂ equivalent	无量纲
α^*	沟道深宽比, Channel aspect ratio	无量纲
β	CO ₂ 等价量的系数, Coefficient for CO ₂ equivalent	无量纲
γ	活性系数, Activity coefficient	无量纲
Δ	表示量的变化, Denotes change in quantity	无量纲
δ	扩散层厚度, Diffusion layer thickness	m, cm
ϵ	效率, Efficiency	无量纲
ϵ_{FP}	燃料处理器效率, Efficiency of fuel processor	无量纲
ϵ_{FR}	燃料重整器效率, Efficiency of fuel reformer	无量纲
ϵ_H	热回收效率, Efficiency of heat recovery	无量纲
ϵ_O	总效率, Efficiency overall	无量纲
ϵ_R	电效率, Efficiency, electrical	无量纲
ϵ	多孔性, Porosity	无量纲
$\dot{\epsilon}$	应变率, Strain rate	s ⁻¹
η	过电压, Overvoltage	V
η_{act}	活化过电压, Activation overvoltage	V
η_{conc}	浓度过电压, Concentration overvoltage	V
η_{ohmic}	欧姆过电压, Ohmic overvoltage	V
λ	化学当量系数, Stoichiometric coefficient	无量纲
λ	水含量, Water content	无量纲
μ	黏度, Viscosity	kg·m/s
μ	化学势, Chemical potential	J, J/mol
$\tilde{\mu}$	电化学势, Electrochemical potential	J, J/mol
ρ	电阻率, Resistivity	$\Omega \text{ cm}$
ρ	密度, Density	kg/cm ³ , kg/m ³
σ	传导率, Conductivity	S/cm, ($\Omega \cdot \text{cm}$) ⁻¹
σ	Warburg 系数, Warburg coefficient	$\Omega/\text{s}^{0.5}$
τ	平均自由时间, Mean free time	s
τ	剪切力, Shear stress	Pa
ϕ	电势, Electrical potential	V
ϕ	相位因素, Phase factor	无量纲
ω	角频率, Angular frequency ($\omega = 2\pi f$)	rad/s

上标

符号	意义
0	表示标准或参考状态, Denotes standard or reference state
eff	有效特性, Effective property

下标

符号	意义
diff	扩散, Diffusion
E, e, elec	电的(如 P_e, W_{elec}) Electrical (e.g. P_e, W_{elec})
f (HHV)	生成的量(如 Δ_{Hf}), Quantity of formation (e.g. Δ_{Hf}) 高热值, Higher Heating Value
i	表示种类 i , Denotes species i
P	生成物, Product
P	寄生的, Parasitic
R	反应物, Reactant
rxn	反应中的变化(如 ΔH_{rxn}) Denotes change in a reaction (e.g. ΔH_{rxn})
SK	堆, Stack
SYS	系统, System

Nafion: 杜邦公司的注册商标

PureCell: UTC 燃料电池公司的注册商标

Honda FCX: 本田汽车有限公司的注册商标

Home Energy System: 本田汽车有限公司的注册商标

Gaussian: Gaussian 公司的注册商标

目 录

第一部分 燃料电池原理

第 1 章 燃料电池简介	2
1.1 什么是燃料电池	2
1.2 一个简单的燃料电池	4
1.3 燃料电池的优点	6
1.4 燃料电池的不足	6
1.5 燃料电池的类型	8
1.6 燃料电池的基本工作过程	9
1.7 燃料电池性能	12
1.8 特性与建模	14
1.9 燃料电池技术	15
1.10 燃料电池与环境	15
1.11 本章摘要	16
习题	17
第 2 章 燃料电池热力学	19
2.1 热力学回顾	19
2.2 燃料的热潜能:反应焓	26
2.3 燃料的做功潜能:吉布斯自由能	28
2.4 非标准状态条件下燃料电池可逆电压的预测	35
2.5 燃料电池效率	43
2.6 本章摘要	47
习题	48
第 3 章 燃料电池反应动力学	50
3.1 电极动力学的介绍	50
3.2 为何电荷传输过程会有一个活化能	54
3.3 活化能决定反应速率	56
3.4 反应净速率的计算	57

3.5	平衡态下的反应速率:交换电流密度	58
3.6	平衡条件下的反应电势:伽伐尼电势	58
3.7	电势和速率:Butler-Volmer 方程	60
3.8	交换电流和电催化:如何改善动力学性能	65
3.9	简化的活化动力学:泰菲尔等式	67
3.10	不同燃料电池反应产生不同动力学	69
3.11	催化剂 - 电极设计	72
3.12	量子力学:理解燃料电池催化剂的体系	73
3.13	本章摘要	76
	习题	77
第 4 章	燃料电池电荷传输	80
4.1	响应力的电荷移动	80
4.2	电荷传输导致电压损失	83
4.3	燃料电池电荷传输电阻的特性	85
4.4	电导率的物理意义	89
4.5	燃料电池电解质种类综述	92
4.6	关于扩散率和电导率的更多内容(选读)	107
4.7	为何电驱动力决定电荷传输(选读)	112
4.8	本章摘要	113
	习题	114
第 5 章	燃料电池质量传输	117
5.1	电极与流场结构中的传输	117
5.2	电极内的传输:扩散传输	120
5.3	流场结构中的传输:对流传输	128
5.4	本章摘要	143
	习题	144
第 6 章	燃料电池模型	146
6.1	把它们组合起来:一个基本的燃料电池模型	146
6.2	一维燃料电池模型	150
6.3	基于计算流体动力学的燃料电池模型(选读)	166
6.4	本章摘要	168
	习题	169