

爱思唯尔

Advances in Battery Technologies for
Electric Vehicles

电动汽车用 先进电池技术

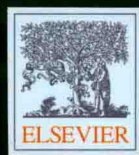
[意] 布鲁诺·斯科罗沙廷 (Bruno Scrosati)

[德] 约尔根·加尔谢 (Jürgen Garche)

著

[德] 韦尔奈·德尔梅兹 (Werner Tillmetz)

胡信国 等译



化学工业出版社

Advances in Battery Technologies for
Electric Vehicles

电动汽车用 先进电池技术

[意] 布鲁诺·斯科罗沙廷 (Bruno Scrosati)

[德] 约尔根·加尔谢 (Jürgen Garche) 著

[德] 韦尔奈·德尔梅兹 (Werner Tillmetz)

胡信国 等译



化学工业出版社

· 北京 ·

本书详细论述了电动汽车与传统车辆相比的优劣势和市场前景，同时对用在电动汽车上的电池类型和下一代电池类型进行了详细阐述，对提高现有电池的性能，尤其是提高锂离子电池性能进行了着重介绍，同时系统介绍了车用高压电池系统的设计、精确估算电池状态的电池管理系统、电池组热管理设计、电池寿命的仿真模拟、电池的梯次利用和电池回收等内容。还对电动汽车用电池的测试标准和法律法规等内容进行了综述。通过本书可以系统了解电动汽车用电池系统的发展现状和趋势，以及电动汽车用电池系统的最先进技术。本书可作为高等院校、科研人员，特别是企业技术人员的重要参考书。

Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles, 1st edition
Bruno Scrosati, Jürgen Garche, Werner Tillmetz
ISBN: 978-1-78242-377-5
Copyright © 2015 by Elsevier Ltd. All rights reserved.

电动汽车用先进电池技术（胡信国 等译）
ISBN: 978-7-122-32124-4
Copyright © Elsevier Ltd. and Chemical Industry Press.
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Ltd. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: www.elsevier.com/permissions.
This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier Ltd. and Chemical Industry Press (other than as may be noted herein).
Online resources are not available with this reprint.

This edition of Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles is published by Chemical Industry Press under arrangement with ELSEVIER LTD.
This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本版由 ELSEVIER LTD. 授权化学工业出版社在中国大陆地区（不包括香港、澳门以及台湾地区）出版发行。本版仅限在中国大陆地区（不包括香港、澳门以及台湾地区）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反《世界版权公约》，将受民事及刑事法律之制裁。
本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2016-5815

注 意

本书涉及领域的知识和实践标准在不断变化。新的研究和经验拓展我们的理解，因此须对研究方法、专业实践或医疗方法作出调整。从业者和研究人员必须始终依靠自身经验和知识来评估和使用本书中提到的所有信息、方法、化合物或本书中描述的实验。在使用这些信息或方法时，他们应注意自身和他人的安全，包括注意他们负有专业责任的当事人的安全。在法律允许的最大范围内，爱思唯尔、译文的原文作者、原文编辑及原文内容提供者均不对因产品责任、疏忽或其他人身或财产伤害及/或损失承担责任，亦不对由于使用或操作文中提到的方法、产品、说明或思想而导致的人身或财产伤害及/或损失承担责任。

图书在版编目 (CIP) 数据

电动汽车用先进电池技术 / (意) 布鲁诺·斯科罗沙廷 (Bruno Scrosati), (德) 约尔根·加尔谢, (德) 韦尔奈·德尔梅兹著; 胡信国等译. —北京: 化学工业出版社, 2018. 8
书名原文: Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles
ISBN 978-7-122-32124-4

I. ①电… II. ①布… ②约… ③韦… ④胡… III. ①电动汽车-蓄电池-研究 IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 096817 号

责任编辑: 成荣霞
责任校对: 王素芹

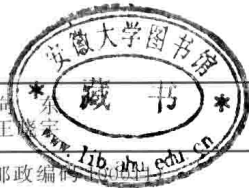
文字编辑: 向小华
装帧设计: 王露露

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100045)
印 装: 三河市航远印刷有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张 29 彩插 3 字数 576 千字
2018 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 188.00 元

版权所有 违者必究



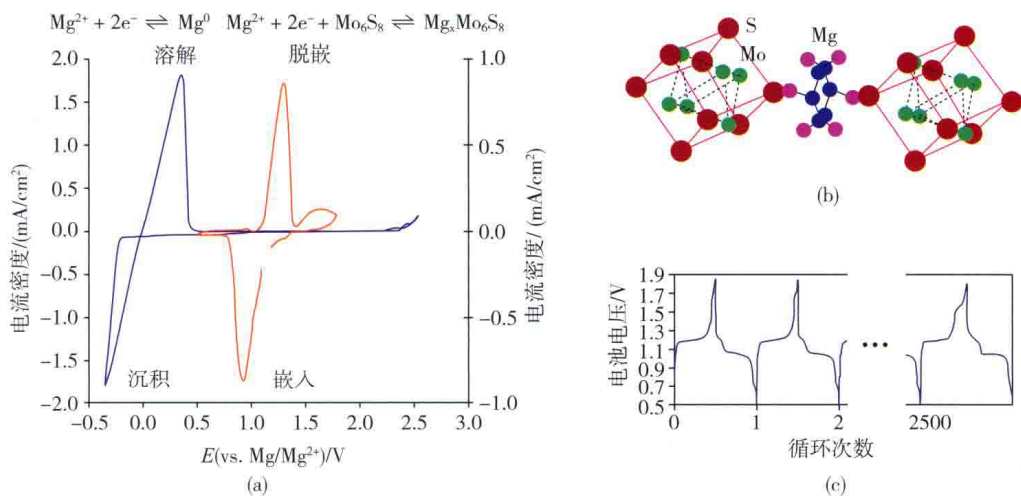


图 7.9 镁电池：(a) 蓝线：电解质溶液 $[0.25\text{mol/L Mg}(\text{AlCl}_2\text{BuEt})_2 \text{ 溶于 THF}]$ 的稳定性，Pt 电极， 20mV/s ；红线：可逆的镁沉积与溶解， 0.005mV/s ；
 (b) 谢弗雷尔相 $\text{Mg}_x\text{Mo}_6\text{S}_8$ （正极）的晶体结构中具有 12 个镁嵌入的位置；
 (c) 可充 $\text{Mg}/\text{Mo}_6\text{S}_8$ 电池恒电流 ($C/8$) 循环稳定性

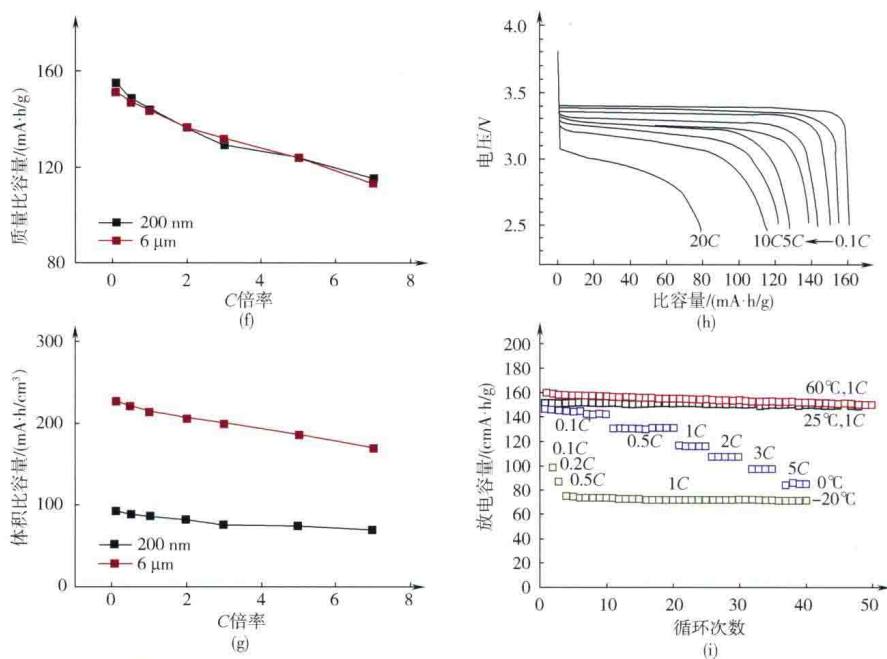
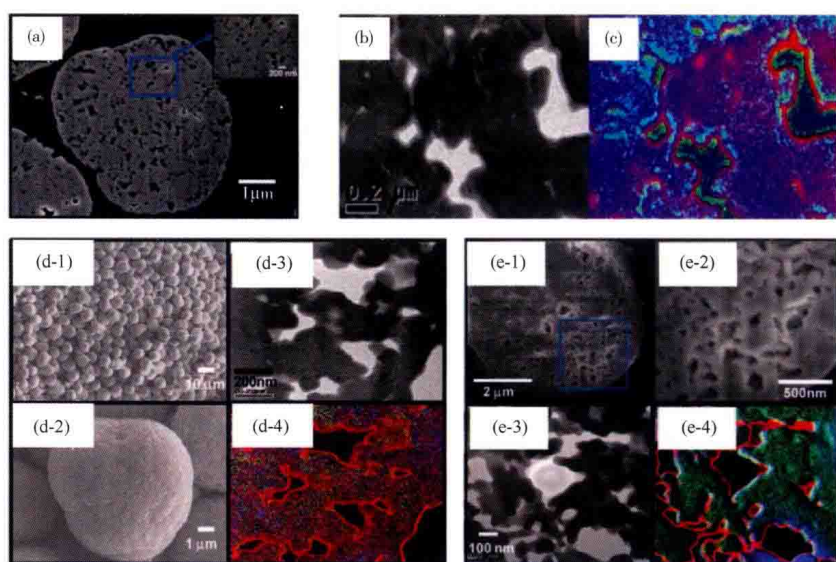


图 9.13 (a) 在 800°C 下煅烧得到的 C-LiFePO₄ 的聚焦离子束显微镜 (FIB-SEM) 图 (碳源: 沥青); 浸碳、纳米多孔的微米 LiFePO₄ 横截面的 (b) TEM 图和 (c) 对应的 EELS 元素分布图; 脱水的 FePO₄ 在 (d-1) 低和 (d-2) 高放大倍数下的 SEM 图。(a) ~ (c) 转载自 Oh 等 (2009), 2009 年由 The Electrochemical Society 授权。脱水的 FePO₄ 横截面的 (d-3) TEM 图和 (d-4) 对应的 EELS 图 (其中, 红: C, 蓝: Fe, 绿: P); LiFePO₄ 在 (e-1) 低和 (e-2) 高放大倍数下的 SEM 图; LiFePO₄ 横截面的 (e-3) TEM 图和 (e-4) 对应的 EELS 图 (其中, 红: C, 蓝: Fe, 绿: P) (d)、(e) 转载自 Oh 等 (2010a), 2010 年由 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 授权。纳米 LiFePO₄ (200nm) 和纳米多孔的微米 LiFePO₄ (6μm) 的 (f) 质量比容量和 (g) 体积比容量的比较。(f)、(g) 转载自 Oh 等 (2009), 2009 年由 The Electrochemical Society 授权。(h) Li/C-LiFePO₄ 电池的倍率能力: 不同倍率下的电压曲线; (i) 不同温度下循环的容量输出。电流密度是 17mA/g (0.1C 倍率), 电压上下限为 2.5~4.3V。0°C 下的循环性能是在每个循环的充电倍率都是 0.1C 下测得的。(h)、(i) 转载自 Oh 等 (2010a), 2010 年由 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 授权

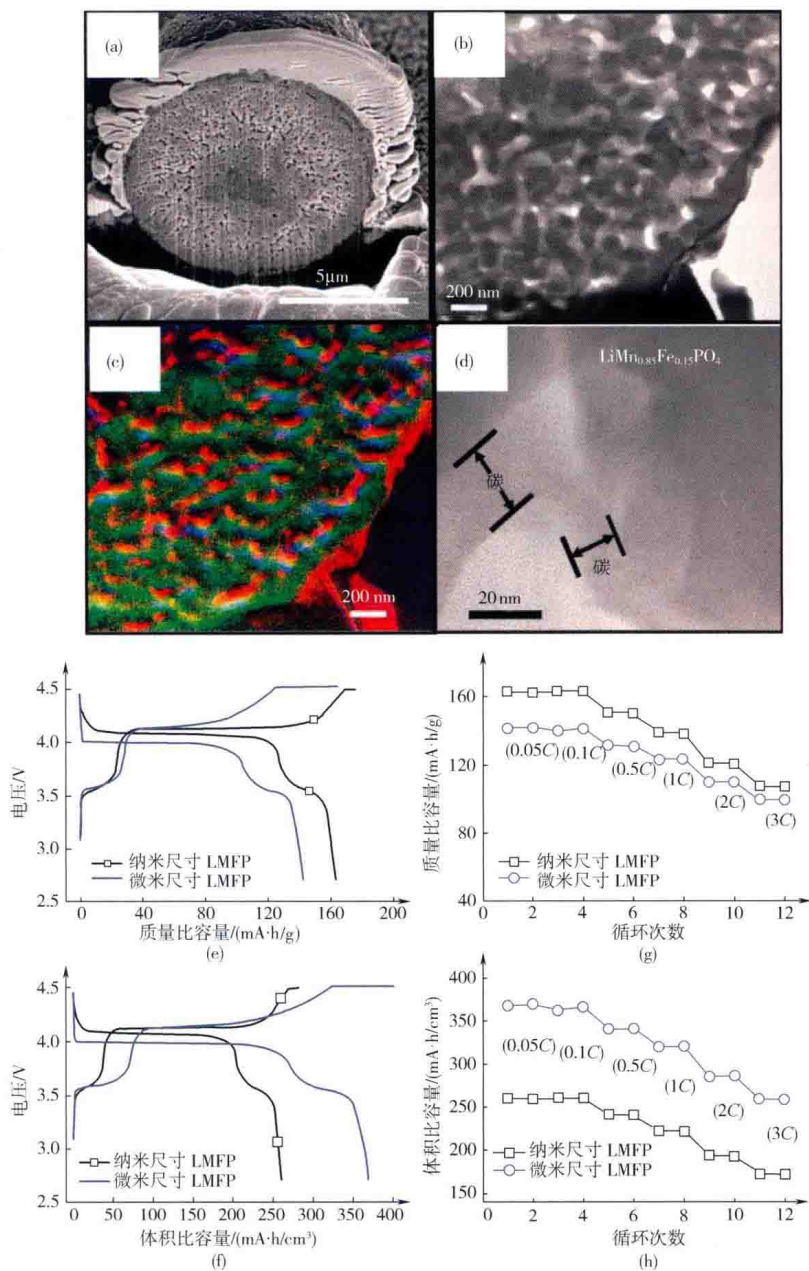
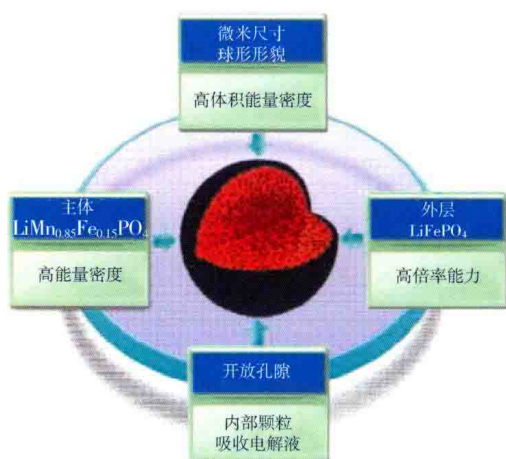
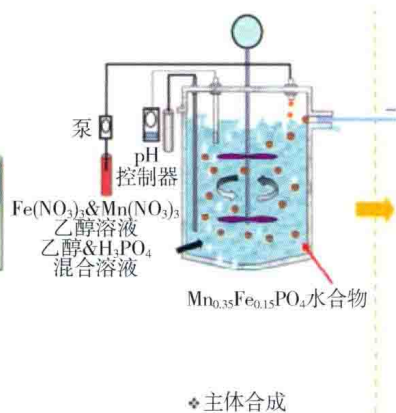


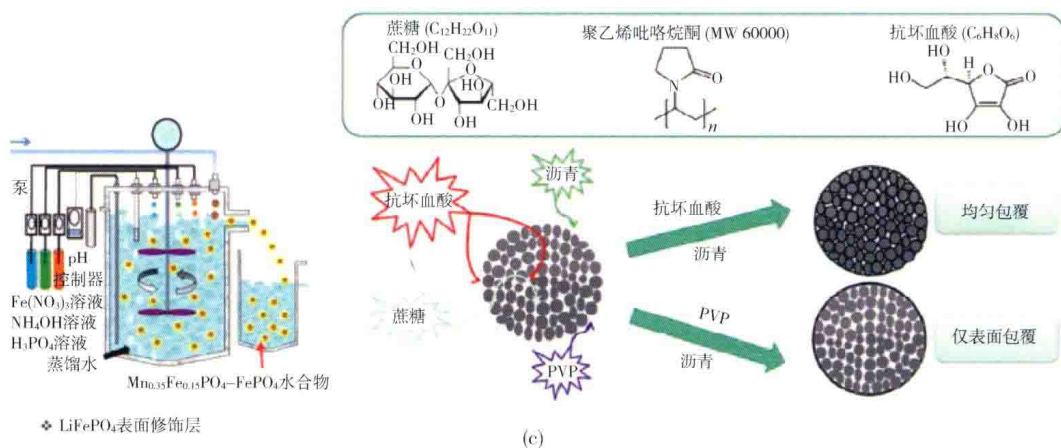
图 9.15 微米 $\text{LiMn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{PO}_4$ 颗粒的 (a) 横截面 SEM 图, (b) 横截面 TEM 图, (c) 对应的 EELS 图 (其中, 红: C, 蓝: Fe, 绿: P) 和 (d) 高分辨 TEM 图 (显示了表面碳层); 纳米 $\text{LiMn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{PO}_4$ 和微米 $\text{LiMn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{PO}_4$ 的 (e) 质量比容量和 (f) 体积比容量的初始充放电曲线的比较, 每个电池在 $C/20$ 的恒定电流下充电到 4.5V, 然后恒定在 4.5V 下直到电流下降到 $C/100$, 再在 $C/20$ 下放电到 2.7V; 纳米 $\text{LiMn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{PO}_4$ 和微米 $\text{LiMn}_{0.85}\text{Fe}_{0.15}\text{PO}_4$ 的 (g) 质量比容量和 (h) 体积比容量的倍率能力的比较, 每个电池在 $C/20$ 的恒定电流下充电到 4.5V, 然后恒定在 4.5V 下直到电流下降到 $C/100$, 再在从 $C/20$ 到 3C 的倍率下放电到 2.7V。 (a) ~ (h) 转载自 Sun 等, 2011 年由 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 授权



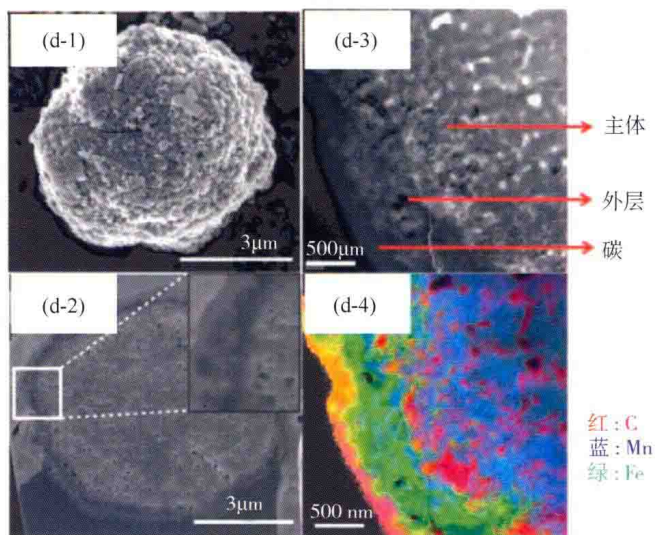
(a)



(b)



(c)



(d)

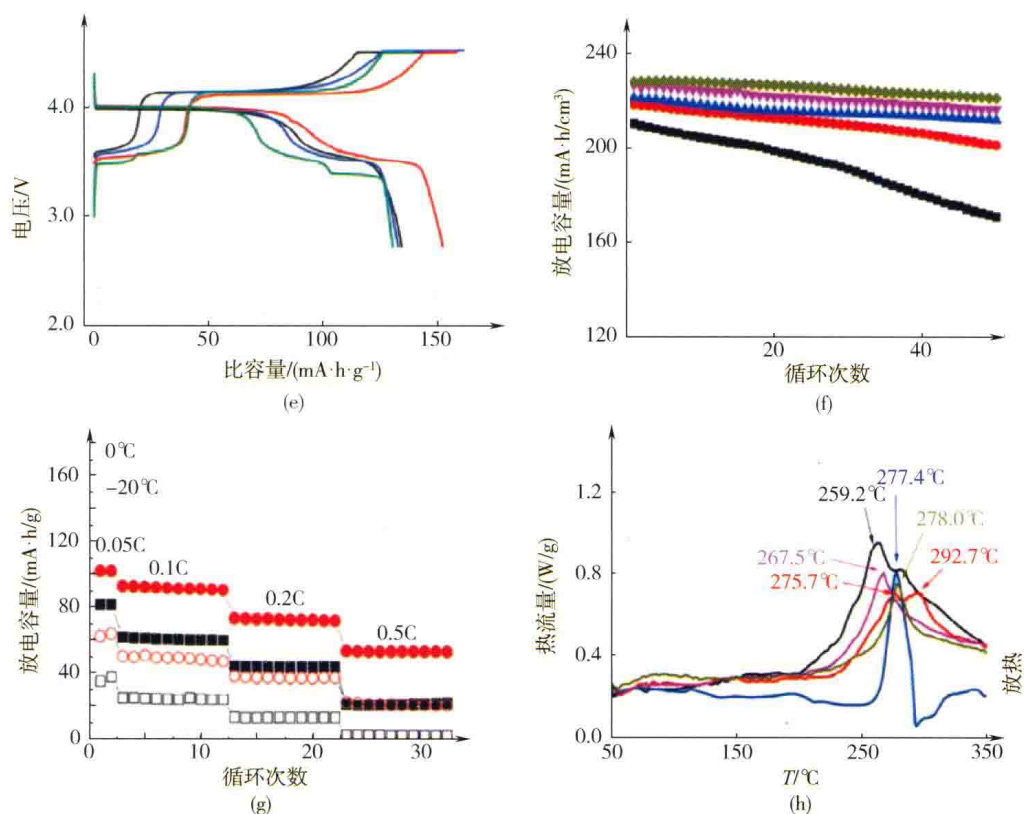


图 9.16 (a) LiFePO₄ 修饰的核-壳结构、微米尺寸的 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄ 及其各个部分的作用；(b) 用于 LiFePO₄ 修饰的双结构、微米尺寸的 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄ 的共沉淀反应器的示意图。(a)，(b) 转载自 Oh 等 (2012)，2012 年由 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 授权。(c) 不同分子量碳源的覆碳作用示意图；核-壳 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄-LiFePO₄ (外层厚度 0.5 μm) 的 (d-1) SEM 图，(c) 转载自 Oh 和 Sun (2013)，2013 年由 Elsevier 授权。(d-2) 由聚集离子束得到的横截面 SEM 图，(d-3) 横截面 TEM 图和 (d-4) 对应的 EELS 图；(e) 本体 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄ (黑线)、LiMn_{0.67}Fe_{0.33}PO₄ (蓝线)、双结构 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄-LiFePO₄ (红线；外层厚度 0.5 μm；LiMn_{0.65}Fe_{0.35}PO₄ 是双结构 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄-LiFePO₄ 的平均组成) 和 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄-LiFePO₄ 混合物 (绿线；质量比 76 : 24) 在 25°C 下的首次充放电曲线；(f) 本体材料和双结构 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄-LiFePO₄ 在 60°C 下的循环稳定性与壳层厚度 (本体：黑，0.2 μm；红，0.3 μm；蓝，0.5 μm；紫，0.8 μm；棕) 之间的关系，电流密度为 85 mA/g (0.5C 倍率)，电压范围为 2.7~4.5 V；(g) 本体 (黑色实心：0°C，黑色空心：-20°C) 和双结构 (红色实心：0°C，红色空心：-20°C) 电池在低温下循环稳定性的比较，充电电流密度为 8.5 mA/g (0.05C 倍率)；(h) 微分扫描量热法 (DSC) 曲线，显示了电解液同完全充电的本体 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄ (黑)、具有不同外层厚度 (0.2 μm：紫，0.5 μm：红，0.8 μm：棕) 的双结构 LiMn_{0.85}Fe_{0.15}PO₄-LiFePO₄ 和 LiFePO₄ (蓝) 反应的热量。(d) ~ (h) 转载自 Oh 等 (2012)，2012 年由 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 授权

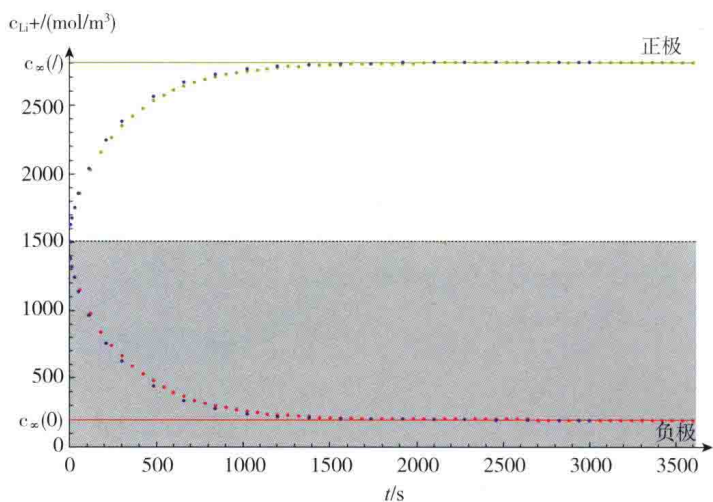


图 16.2 负极（灰色背景上的红点）和正极的离子浓度分布图以及
 负极 $[c_{\infty}(0)]$ 和正极 $[c_{\infty}(L)]$ 的稳态解
 （两者都是近似解。蓝点是参考 Danilov 和 Notten（2008）提供的解决方案）

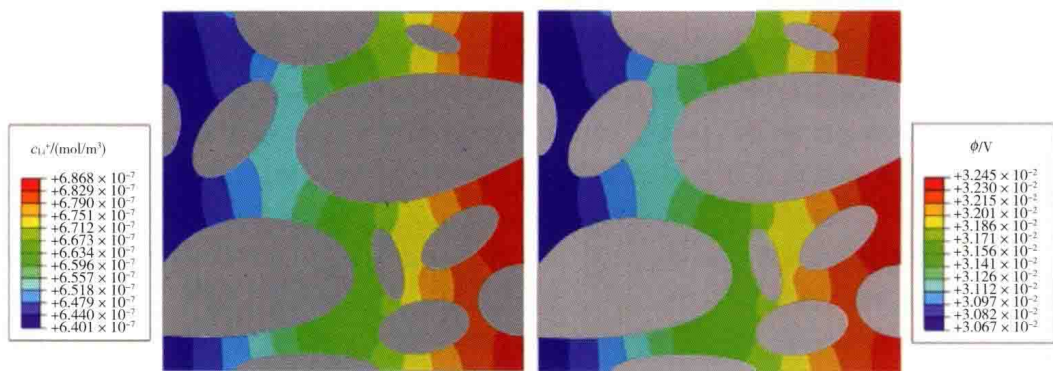


图 16.7 电解质溶液中稳态（ $t = 3600s$ ）条件下，微尺度离子浓度 c_{Li+} 和电势 ϕ 的分布

著译者名单

The list of translators

一、著者名单

- C. Arbizzani 意大利博洛尼亚大学
- E. Cabrera Castillo TUM-CREATE 研究中心, 新加坡
- M. A. Danzer 德国 ZSW 公司, 斯图加特, 德国
- F. De Giorgio 意大利博洛尼亚大学
- M. Fetcenko 巴斯夫电池材料-奥瓦尼科公司, 美国
- J. Garche FCBAT 乌尔姆, 德国
- T. Goldbach Auf den Elfmorgen 达尔海姆, 德国
- D. Grazioli 意大利布雷西亚大学
- A. Hauser TUM-CREATE 研究中心, 新加坡
- H. Helms IFEU 海德堡能源与环境研究所有限公司, 海德堡, 德国
- F. Herrmann 弗劳恩霍夫 IAO 工业工程学院, 斯图加特, 德国
- C. Huber 电能存储技术研究所, 慕尼黑, 德国
- C. Kämper IFEU 海德堡能源与环境研究所有限公司, 海德堡, 德国
- E. Karden 福特研究与先进工程欧洲部, 亚琛, 德国
- H. Kim 汉阳大学, 首尔, 韩国
- M. C. Kintner-Meyer 美国太平洋西北国家实验室, 华盛顿, 美国
- J. Koch 巴斯夫电池材料-奥瓦尼科公司, 美国
- R. Kuhn TUM-CREATE 研究中心, 新加坡
- P. Kurzweil 德国应用科学大学
- U. Lambrecht IFEU 海德堡能源与环境研究所有限公司, 海德堡, 德国
- V. Liebau BMW 集团, 慕尼黑, 德国

- C. Linse TUM-CREATE 研究中心, 新加坡
- B. Lunz 电力电子与电力传动学院 (ISEA), 亚琛工业大学, 亚琛, 德国
- F. Maglia BMW 集团, 慕尼黑, 德国
- M. Mastragostino 意大利博洛尼亚大学
- P. T. Moseley ILZRO, 奇尔顿, 英国
- M. Müller 乌尔姆大学, 乌尔姆, 德国
- S. M. Oh 汉阳大学, 首尔, 韩国
- A. Perner BMW 集团, 慕尼黑, 德国
- A. Püttner 德国 ZSW 公司, 斯图加特, 德国
- F. Rothfuss 弗劳恩霍夫 IAO 工业工程学院, 斯图加特, 德国
- A. Salvadori 布雷西亚大学, 布雷西亚, 意大利
- D. U. Sauer 电力电子与电力传动学院 (ISEA), 亚琛工业大学, 亚琛, 德国;
发电和存储系统研究所 (PGS), 亚琛工业大学, 亚琛, 德国
- B. Schott 德国 ZSW 公司, 斯图加特, 德国
- B. Scrosati 意大利技术学院, 热那亚, 意大利
- Y. K. Sun 汉阳大学, 首尔, 韩国
- J. Vetter BMW 集团, 慕尼黑, 德国
- V. V. Viswanathan 美国太平洋西北国家实验室, 华盛顿, 美国
- M. Zelinsky 巴斯夫电池材料-奥瓦尼科公司, 美国

二、译者名单

胡信国 戴长松 程新群 张勇 丁飞 张亮 田爽 王秀利 马玉林
霍华 李秉文 贾铮

译者的话

The translator's words

受到高度关注的新能源汽车，作为汽车制造业创新发展的必然产物，已经得到广泛共识，且初具规模。在经历了十几年的技术探索和市场检验后，得出的一致结论就是，动力电池是新能源汽车的核心部件。2016年6月30日，中国国家动力电池创新中心在北京成立，作为《中国制造2025》五大工程之首，制造业创新中心建设将第一站选在动力电池领域，可见，开发能够更全面满足新能源汽车应用需求、具有先进技术水平的动力电池，意义重大。

目前，可应用在电动汽车上的电池类型有铅酸电池、镍-金属氢化物电池和锂离子电池等，这些技术种类的电池各具特点又各存问题，还不能满足电动汽车对电池的性能需求，锂离子电池是目前应用比较广泛的电池类型，进一步提高性能和下一代电池的研究是重点方向，目前的研究已经在能量密度提升、快充和安全性等方面取得了长足的进展。

编写原书的作者是世界知名研究机构 and 企业的 39 位行业专家，全书涵盖了近年来电动汽车用电池组系统、电池和电池管理系统的最新研究成果和进展、世界最新研究文献的概括和综述。全书详细论述了电动汽车与传统车辆相比的优劣势和市场前景，同时对应用在电动汽车上的电池类型和下一代电池类型进行了详细阐述，对提高现有电池的性能，尤其是提高锂离子电池性能进行了着重介绍，同时还系统介绍了车用高压电池系统的设计、精确估算电池状态的电池管理系统、电池组热管理设计、电池寿命的仿真模拟、电池的梯次利用和电池回收等内容。同时对电动汽车用电池的测试标准和法律法规等内容进行了综述。通过此书可以系统了解电动汽车用电池系统的发展现状、趋势和最先进技术。此书是高等院校、科研人员，特别是企业技术人员的重要参考书。

本书由哈尔滨工业大学胡信国教授负责组织翻译，由胡信国、杨春巍负责全书核校。

感谢原书作者同意并促成我们组织翻译此书，感谢化学工业出版社对本书的出版给予了大力的支持和帮助。

由于译者的水平和能力所限，同时译者基于忠于原文又能使读者易理解的原则翻译，不足之处也在所难免，恳请读者批评指正。

译者

2018年5月 于哈尔滨

第 1 篇 绪论

1 混合电动车辆、纯电动车辆和越野电动车介绍 / 001

- 1.1 电移动：未来的移动 / 001
- 1.2 不同电动驱动动力系统概述 / 003
- 1.3 电动汽车的优势和劣势 / 005
- 1.4 在电动公路车和电动非公路车范围内的应用 / 007
- 1.5 结论 / 010
- 1.6 信息来源 / 010

参考文献 / 011

2 通过电动汽车减少二氧化碳的排放及能量消耗 / 013

- 2.1 引言 / 013
- 2.2 汽车制造过程中的能量消耗和 CO₂排放量 / 016
- 2.3 电动车的能量消耗 / 018
- 2.4 生命周期能源消耗和 CO₂排放对比 / 021
- 2.5 具有高能的电动汽车一代的潜力：来自德国的一则研究案例 / 022
- 2.6 展望 / 026

参考文献 / 027

3 电动汽车电池市场 / 029

- 3.1 引言 / 029

- 3.2 当前市场的形势 / 031
- 3.3 市场推动力和电池 / 034
- 3.4 市场潜力 / 038
- 3.5 经济影响 / 040
- 参考文献 / 044

4 混合动力电动汽车电池参数 / 048

- 4.1 引言 / 048
- 4.2 混合动力电动车的电池参数 / 049
- 4.3 锂离子电池和超级电容器的 HEV 应用展望 / 056
- 4.4 锂离子电池和超级电容器未来的发展前景与局限性 / 059
- 4.5 未来的道路交通 / 060
- 参考文献 / 061

第 2 篇 电动汽车用电池的类型

5 混合动力汽车和纯电动汽车用铅酸蓄电池 / 064

- 5.1 引言 / 064
- 5.2 铅酸电池的技术描述 / 065
- 5.3 铅酸电池的环境和安全问题 / 073
- 5.4 动力铅酸电池的种类 / 074
- 5.5 在混合动力汽车中应用铅酸电池的优缺点 / 077
- 5.6 铅酸电池和混合动力汽车的发展前景 / 081

5.7 市场预测 / 083

5.8 信息来源 / 085

参考文献 / 085

6

混合动力电动汽车与纯电动汽车用镍-金属氢化物电池和镍-锌电池 / 087

6.1 引言 / 087

6.2 NiMH 和 NiZn 电池的技术描述 / 087

6.3 NiMH 与 NiZn 电池的电性能、寿命和成本 / 091

6.4 NiMH 电池和 NiZn 电池在混合动力电动汽车和纯电动汽车中的优点和缺点 / 097

6.5 混合动力电动汽车和纯电动汽车用 NiMH 与 NiZn 电池的设计 / 098

6.6 NiMH 和 NiZn 电池主要应用 / 102

6.7 NiMH 与 NiZn 电池的环境与安全问题 / 103

6.8 NiMH 和 NiZn 电池在混合动力电动汽车和纯电动汽车中的未来发展潜力 / 103

6.9 市场和未来趋势 / 105

参考文献 / 106

7

用于混合动力电动汽车和纯电动汽车的后锂离子电池 / 107

7.1 继锂离子电池之后的电池 / 107

7.2 锂-硫电池 / 113

7.3 锂-空气电池 / 119

7.4 全固态电池 / 127

7.5 转换反应材料 / 130

7.6 钠离子电池和钠空气电池 / 132

7.7 多化合价金属：镁电池 / 136

7.8 卤化物电池 / 140

- 7.9 铁酸盐电池 / 142
- 7.10 氧化还原液流电池 / 143
- 7.11 质子交换膜燃料电池 / 143
- 参考文献 / 144

8 混合动力电动汽车和电动汽车用锂离子电池 / 150

- 8.1 混合动力电动汽车、插电式混合动力电动汽车和电动汽车用锂离子电池简介和要求 / 150
- 8.2 电芯设计 / 151
- 8.3 电池组设计 / 156
- 8.4 环境问题 / 158
- 8.5 安全性要求 / 159
- 8.6 化学电池的未来发展 / 160
- 8.7 锂离子电池组的未来发展趋势 / 161
- 8.8 市场导向和未来趋势 / 162
- 8.9 结论 / 163
- 参考文献 / 163

9 电动汽车用锂离子电池高性能电极材料 / 165

- 9.1 引言 / 165
- 9.2 正极 / 166
- 9.3 负极（锂离子车用电池高性能负极材料） / 190
- 9.4 结论 / 203
- 参考文献 / 204