



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

超级电容器： 材料、系统及应用

Supercapacitors:

Materials, Systems, and Applications

(法国)

François Béguin

(波兰)

Elzbieta Frackowiak

等著

张治安 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于作者

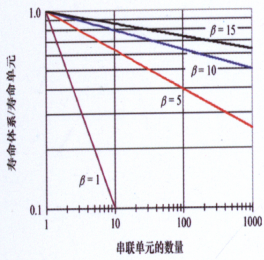


François Béguin教授
波兹南工业大学化学工程系(波兰)

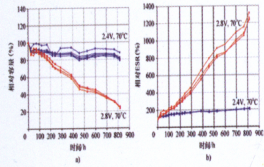


Elżbieta Frąckowiak教授
波兹南工业大学化学工程系(波兰)

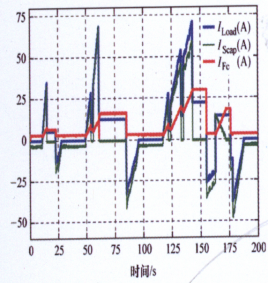




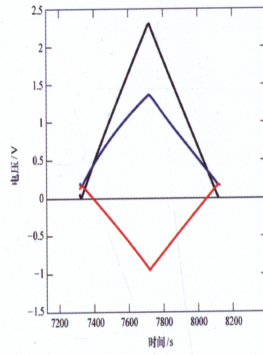
13-8



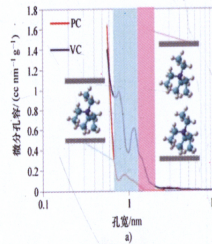
13-11



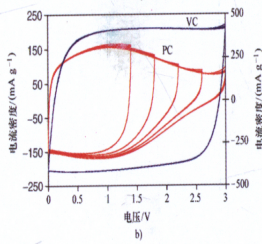
11-46



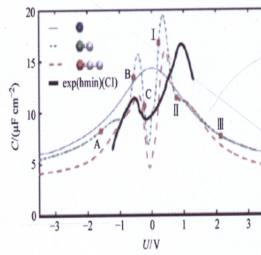
4-13



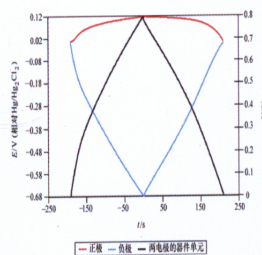
4-18



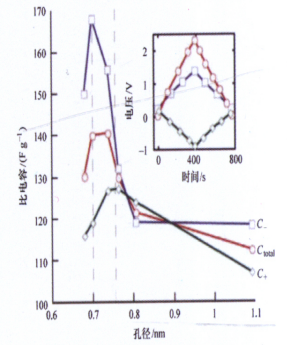
5-19



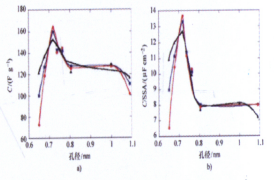
6-15



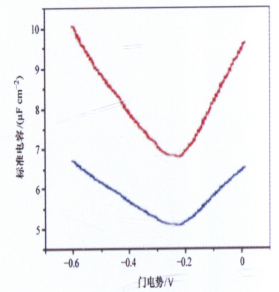
6-17



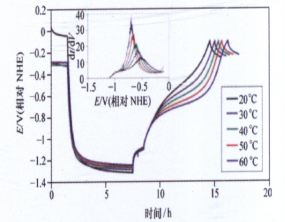
4-14



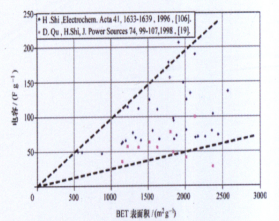
4-20



5-14



10-7



国际电气工程先进技术译丛

超级电容器：材料、 系统及应用

(法国) François Béguin

(波兰) Elżbieta Frąckowiak

等著

张治安 等译



机械工业出版社

超级电容器是介于电解电容器和电池之间的一种新型储能器件,具有循环寿命长、可大电流充放电等特点,其应用市场广阔,是新能源领域的研究热点。本书共 14 章,第 1~3 章分别介绍电化学的基础知识、超级电容器概述以及电化学表征技术;第 4~6 章分别介绍了双电层电容器及其电极材料、双电层的电化学理论以及赝电容及其电极材料;第 7、8 章介绍了水系介质和有机介质中的混合电容器及非对称电容器;第 9 章介绍了离子液体型超级电容器;第 10~13 章分别介绍了超级电容器的产业化制造、模型、测试以及可靠性分析;第 14 章介绍了超级电容器的应用。各章节之间力求既相对独立,又相互联系,在内容上是一个整体。

本书可供超级电容器研究人员和技术人员,以及高等院校新能源材料与器件、化学电源等相关专业教师和本科生及研究生学习参考。

Copyright © 2013 Wiley – VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Supercapacitors >, ISBN < 978 – 3 – 527 – 32883 – 3 >, by < François Béguin, Elżbieta Frąckowiak >, Published by John Wiley & Sons, Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字:01-2013-5765 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

超级电容器:材料、系统及应用/(法) 弗朗索瓦等著;张治安等译. —北京:机械工业出版社,2014.7

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Supercapacitors: materials, systems, and applications

ISBN 978-7-111-47360-2

I. ①超… II. ①弗…②张… III. ①电容器 – 研究
IV. ①TM53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 155283 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:刘星宁 责任编辑:郑 彤

版式设计:赵颖喆 责任校对:张晓蓉 肖 琳

封面设计:马精明 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2016 年 1 月第 1 版第 2 次印刷

169mm × 239mm · 28.25 印张·595 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-47360-2

定价:118.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

石油资源日渐紧张，环境污染日趋严重，迫使各国努力寻找可持续发展的新能源以及先进的储能技术。其中，新能源、新材料和新能源汽车被列为我国七大战略性新兴产业。超级电容器是介于电解电容器和电池之间的一种新型储能器件。与传统电容器相比，超级电容器具有更大的比容量和更高的能量密度；与充电电池相比，超级电容器具有更高的功率密度和更长的循环寿命，可大电流快速充放电，在国防军工、航空航天、交通运输、电子信息和仪器仪表等领域具有广阔的应用前景，是新能源领域的研究热点。

我们在科研过程中，得知《超级电容器：材料、系统及应用》一书是 Max Lu 教授组织出版的可持续能源发展中的新材料系列图书中的一卷，是由国际顶级研究人员通力合作完成的一本全面介绍超级电容器基础知识、最新研究成果和发展趋势的著作，具有较高的学术水平和较强的应用价值。翻译本书有助于我们进一步加深对超级电容器的理解，中译本的出版可为从事超级电容器研究的技术人员提供指导，同时本书对高等院校相关专业的师生是一本有价值的教学参考书。

本书主要由中南大学张治安翻译完成。另外，包维斋、王习文、章智勇、李强、屈耀辉、蒋绍峰、周成坤、陈巍也参与了部分内容的翻译工作。

在此，特别感谢对本书翻译出版给予帮助的众多朋友。感谢机械工业出版社的刘星宁先生为本书的出版做了大量工作，使得本书得以顺利出版。我们也感谢机械工业出版社的相关编辑对本书的关心和在本书编辑出版过程中付出的辛勤劳动！

诚然，由于译者水平有限，书中难免有不足之处，希望广大专家和读者批评指正。

张治安
2014 年 8 月

丛书编者序

Wiley 可持续能源发展中的新材料系列图书

可持续能源发展正不断地吸引着科研机构 and 产业界的眼球，它们就像参加一场国际赛跑，竞相开发出各种技术，以用于清洁化石能源、氢能源、可再生能源，以及水资源的再利用和循环使用。据 REN21 报道（全球可再生资源状况报告 2012，第 17 页），2011 年全球在可再生能源领域的投资达到了 2570 亿美元，而 2010 年则为 2110 亿美元。2011 年在该领域投资排在前几位的国家分别是中国、德国、美国、意大利和巴西。为应对当前能源安全、油价上涨以及气候变化等挑战，新材料的开发是关键。

在这样的背景下，就需要这样一个权威机构，以一种系统的方式来梳理有关能源和环境相关的材料科学和工程的最新科学知识进展和技术突破。“Wiley 可持续能源发展中的新材料系列图书”的目标正是如此。要出版一系列应用于能源领域的材料科学的书籍，的确是一项巨大的工程。本系列图书中的每一卷，都包含来自国际顶级研究人员的高水平著作，即使在未来很多年，这些著作也有望成为该领域权威的参考书籍。

本系列图书涵盖的内容为以下各领域的材料科学及其创新性的研究进展：可再生能源、化石能源的清洁利用、温室气体的减排以及相关的环境技术。该系列图书中本卷的书籍如下：

《Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications》（超级电容器：材料、系统及应用）；《Functional Nanostructured Materials and Membranes for Water Treatment》（水处理的功能纳米材料与膜）；《Materials for High – Temperature Fuel Cells》（高温燃料电池材料）；《Materials for Low – Temperature Fuel Cells》（低温燃料电池材料）；《Advanced Thermoelectric Materials: Fundamentals and Applications》（先进的热电材料：原理及应用）；《Advanced Lithium – Ion Batteries: Recent Trends and Perspectives》（先进锂离子电池：趋势与展望）；《Photocatalysis and Water Purification: From Fundamentals to Recent Applications》（光催化与水净化：从基本原理到最新应用）。

介绍这本有关超级电容器的重要书籍时，要特别感谢本书的作者和编辑，他们为此书的出版倾注了大量的努力和辛苦，以便使它能及时与读者见面。正是由于他们的付出，才使得本书有了这样高的质量和水平，毫无疑问，本书也将得到读者的肯定和重视。

最后，要感谢编辑部的成员。感谢他们在内容选择以及评估书籍的意见方面给

予很好的建议和帮助。

还要特别感谢来自 Wiley – VCH 出版社的编辑们。我们从 2008 年开始一直共事到现在，他们分别是 Esther Levy 博士、Gudrum Walter 博士和 Bente Flier 博士，非常感谢他们在整个项目过程中给予的专业援助和强有力的支持。

同时，我也希望，在你们将本书作为工作的参考材料时，能发现它所富有的趣味性、信息性和价值性。未来，我们也将竭力出版更多该系列的书籍，不断更新你们在这个领域内的书籍需求计划，以更好地为大家服务。

澳大利亚 布里斯班 **G. Q. Max Lu**
2012 年 7 月 31 日

前 言

当前，我们地球面临巨大的能源挑战。如何减少二氧化碳的排放并降低化石燃料的消耗？如何将可持续能源接入到混合能源体系中？当然，这些并不是什么新的问题，但直到 20 世纪末为止，还没有人担心矿物燃料的缺乏问题，即使连续的石油危机已经给我们发出了好几次警告。

要解决以上这些问题，关键在于能量储存与能源管理。确切地说，就是电化学电容器即超级电容器所发挥的作用，其原因在于，超级电容器所储存的能量远远超过了传统的电解电容器。超级电容器所具有的这些特性，源于其基于极化电极材料以及其表面吸附的离子层构筑的纳米级电容器。电极-电解液界面的厚度，直接受离子的尺寸大小控制。超级电容器能够在极短的时间内（小于 1min）进行能量收集，然后再在需要的时候释放能量。目前，超级电容器在市场上已经应用，主要是用于汽车和一些静态的系统中，能节省 10% ~40% 的能量。在将间歇可再生能源接入到混合能源系统领域中时，它们在稳定电流方面也发挥了重要作用。

当前，尽管超级电容器已经投入商业化使用，但是，它们还需要不断改进，特别是在提高其能量密度方面上。这就需要对超级电容器的性能及其确切的工作原理有基本的了解，此外，还要知道如何改进其电极材料、电解液以及整个系统的集成。所有这些问题，在这 10 年中，成为学术界和产业界继续深入研究该领域的强大动力。

当 Max Lu 邀请我们推荐一本可持续能源发展中的新材料系列图书时，我们立即想到了超级电容器。的确，自从 1999 年 B. E. Conway 出版的《Electrochemical supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications》（电化学超级电容器：科学原理及技术应用）这本具有开拓性的图书以来，还没有一本其他图书可以广泛地涉及超级电容器。而且，直到现在，在几乎所有涉及超级电容器的科学出版物中，这本图书都可以作为参考书。在过去的 10 年里，出现了一些新的思想，比如电容器中什么是真正的双电层以及混合型电容器和非对称电容器等，这需要全面地评述该领域以更好地描述这些新的概念。

本书取名为《超级电容器：材料、系统及应用》，其目的并不是要取代 Conway 那本书，而是作为该书的补充，这充分考虑了过去 10 年来超级电容器的发展状况。本书可供那些从事超级电容器科学研究，以及其开发与应用的工程技术人员使用，也适合想要特别了解储能系统的研究生和本科生使用。

出于此目的，本书的编写是与来自世界各地从事超级电容器科研和产业界的知名科学家们共同完成的。本书一共包括 14 章，其中 3 章介绍电化学电容器的基本原

理、电化学表征技术以及超级电容器概述，因而，读者不需要任何预备性知识就可以读懂该书；3 章介绍双电层电容器和赝电容器的基本原理、一般特性和模型；3 章介绍非对称电容器和混合电容器以及离子液体电解液的新的发展趋势；2 章介绍超级电容器的制造和建模；3 章介绍超级电容器的测试、可靠性以及应用。每一章都采用惯用的术语，对相关的问题给出了最详细的信息。

在这本书的编写过程中，我们非常高兴，也很自豪，能够聚集这么一批从事超级电容器科学和技术研究的大师们。他们或者是我们参加国际会议时遇见的，抑或是我们能有此荣幸与之合作的同行和朋友。他们都很友善地接受我们的邀请，献出了自己宝贵的时间，用于编写相应的章节，对他们的帮助，我们致以诚挚而热切的感谢。我们也要特别感谢我们的朋友 Max Lu，感谢他给了我们这次宝贵的机会，也要感谢 Wiley 工作人员给予我们的耐心。最后，本书还要归功于我们深爱的父母，如果他们看到我们能为解决人类的问题而做出了自己的一点贡献，他们一定会为之自豪的！

Poznan (波兹南) François Béguin 和 Elżbieta Fraćkowiak

2012 年 11 月

丛书主编简介

Max Lu (逯高清) 教授

“可持续能源发展中的新材料系列图书”主编

Lu 教授的研究领域为材料化学和纳米技术。他因从事清洁能源和环境技术领域的纳米颗粒及纳米多孔材料的相关研究工作，而广为人知。他发表了超过 500 篇高影响力的论文，这其中，包括在《自然》(Nature)、《美国化学学会期刊》(Journal of the American Chemical Society)、Angewandte Chemie 和《先进材料》(Advanced Materials) 等高水平期刊上发表的文章，还获得了 20 项国际专利。Lu 教授是一位在科学信息研究所 (Institute for Scientific Information, ISI) 材料科学方面被引用次数很高的一位作者，其引用次数超过 17500 次 (h 因子为 63)。他获得过大量国际国内的著名奖项，包括中国科学院国际合作奖 (2011 年)，Orica 奖，RK Murphy Medal 奖，Le Fevre Prize 奖，Exxon Mobil 奖，Chemeca 奖章，最有影响的 100 位澳大利亚杰出工程师之一 (2004 年、2010 年和 2012 年)，世界上最有影响力的 50 强华人榜 (2006 年)。他曾两次荣获得澳大利亚研究理事会资助 (2003 年和 2008 年)。他也被选为澳大利亚技术科学与工程院 (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, ATSE) 院士和化学工程师协会 (Institution of Chemical Engineers IChemE) 会士成员。同时，他还是 12 个主要国际期刊的主编和编委，其中，包括《Journal of Colloid and Interface Science and Carbon》。



自 2009 年起，Lu 教授便担任昆士兰大学副校长和副主席 (分管科研) 职务。他还担任过常务副校长职务 (2012 年)，从 2008 年 8 月到 2009 年 6 月，他先后担任过代理副校长 (分管科研) 和副校长 (分管科研联络) 职务。在 2003 ~ 2009 年期间，他还担任澳大利亚研究理事会 (ARC) 中心功能纳米材料杰出人才基金会的主任。

Lu 教授曾在很多政府委员会和咨询机构供职，包括澳大利亚总理科学工程创新理事会 (2004 年、2005 年和 2009 年)，ARC 专家学会 (2002 ~ 2004 年) 等。他也曾是 IChemE 澳大利亚委员会的主席，以及 ATSE 的前任主任。之前的其他工作单位还包括 Uniseed Pty 有限公司、ARC 纳米技术网络、昆士兰中国理事会。目前，他还是澳大利亚同步加速器中心、澳大利亚国家电子研究合作工具和资源、研究数据存储设施等机构的理事会成员。作为国家新技术论坛的成员，他还可以约见澳大利亚部长一级的人物。

原书编者简介



François Béguin 教授

波兹南工业大学化学工程系

Piotrowo 3, 60 - 965 Poznan, Poland

francois.beguin@put.poznan.pl

电话: + +48 61 665 3632

传真: + +48 61 665 2571

François Béguin 是波兹南工业大学 (Poznan University of Technology) (波兰) 的一名教授。就在最近, 他还获得了波兰科学基金会授予的 WELCOME 奖金。他的研究主要在碳材料的化学和电化学应用方面, 特别是用于能量转换/储存和环境保护的纳米碳的开发, 该纳米碳具有孔度可控和表面功能化的特点。主要的研究课题包括锂电池、超级电容器、电化学储氢, 以及水污染物的可逆电吸附。他在国际高水平期刊上所发表的文章超过 250 多篇, 其文章被 8300 篇的文章所引用, Hirsch 因子为 46。他参与了多本涉及碳材料和能量储存书籍的编写。同时, 他还是国际碳会议咨询理事会的成员, 曾发起了用于能量储存与环境保护的碳国际会议 (CESEP)。他也是《Carbon》期刊的编委, 曾经是 Orléans 大学 (法国) 材料科学的教授, 一直工作到 2012 年。他还担任过法国研究所 (ANR) 国家能量储存 (Stock - E)、氢和燃料电池 (H - PAC) 和电管理 (PROGELEC) 项目的主任。



Elżbieta Frackowiak 教授

波兹南工业大学 化学和工业电化学研究所

Piotrowo 3, 60 - 965 Poznan, Poland

Elzbieta.Frackowiak@put.poznan.pl

电话: + +48 61 665 3632

传真: + +48 61 665 2571

Elżbieta Frackowiak 是波兹南工业大学化学和工业电化学研究所的全职教授。她研究的课题涉及储能领域, 包括电化学电容器、锂离子电池和氢电吸附, 尤其是超级电容器用的电极材料(纳米孔碳、模板碳、碳纳米管和石墨烯等)、导电聚合物复合电极、掺杂碳和过渡金属氧化物等材料的开发, 以及基于碳/氧化还原耦合界面一些新概念。

她是国际电化学学会(2009 ~ 2014 年) 电化学能源转换与储存分部的主席。她从 2011 年来是 *Electrochimica Acta* 国际咨询委员会的成员, 从 2008 年来是 *Energy & Environmental Science* 国际咨询委员会的成员。她也是多个国际会议的主席或者联合主席 [12th International Symposium on Intercalation Compounds (ISIC12) Poznań, Poland, 2003 年 6 月 1 日 ~ 5 日; 2nd International Symposium on Enhanced Electrochemical Capacitors (ISEECap' 11), Poznań, Poland, 2011 年 6 月 12 日 ~ 16 日; the World CARBON conference in Krakow, 2012 年 6 月 17 日 ~ 22 日]。她是波兰科技奖基金的获得者, 也即波兰的诺贝尔奖(2011 年 12 月), 她也获得了 Order of Polonia Restituta (2011 年 12 月) 和 Order Sapientia (2012 年 10 月)。

她发表了 150 篇论文, 撰写了多本书的部分章节, 申请了数十项专利。引用他的论文次数达 6000 次, Hirsch 因子为 36。

贡献者列表

Catia Arbizzani

Alma Mater Studiorum
Università di Bologna
Dipartimento di Scienza
dei Metalli
Elettrochimica e Tecniche
Chimiche
Via San Donato 15
40127 Bologna
意大利

Philippe Azaïs

Batscap 超级电容器公司
事业部
Odet, Ergue – Gaberic
29556 Quimper Cedex 9
法国
和
Commissariat à l'Énergie
Atomique (CEA)
LITEN (Laboratoire d' Innovation
pour les Technologies des
Énergies Nouvelles)
17 rue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9
法国

Scott W. Donne

纽卡斯尔大学
环境与生命科学学院
Office C325, Chemistry
Callaghan
New South Wales 2308
澳大利亚

Daniel Bélanger

Université du Québec à Montréal
Département de Chimie
case postale 8888
succursale centre – ville
Montréal
Québec H3C 3P8
加拿大

François Béguin

波兹南工业大学
化学工程系
ul. Piotrowo 3
60 – 965 Poznan
波兰

Thierry Brousse

Université de Nantes
Institut des Matériaux Jean
Rouxel (IMN)
CNRS/Université de Nantes
Polytech Nantes
BP50609
44306 Nantes Cedex 3
法国

Andrew Burke

加州大学戴维斯分校
交通运输研究所
Studies
One Shields Avenue
Davis, CA 95616
美国

Guang Feng

克莱姆森大学
机械工程系
Clemson, SC 29634 – 0921
美国

Elżbieta Frackowiak

波兹南工业大学
化学工程系
化学和工业电化学研究所
ul. Piotrowo 3
60 – 965 Poznan
波兰

Roland Gallay

Garmanage
Clos – Besson 6
CH – 1726
Farvagny – le – Petit
瑞士

Hamid Gualous

Université de Caen Basse
Normandie
Esplanade de la Paix
BP 5186
14032, Caen Cedex 5
法国

Vincent Meunier

纳米材料中心
科学、计算机和数学分部
橡树岭国家实验室
Bethel Valley Road
Oak Ridge, TN 37831 – 6367
美国

Daniel Guay

INRS – Énergie
Matériaux et
Télécommunications
1650 Boulevard Lionel Boulet
case postale 1020
Varenes
Québec J3X 1 S2
加拿大

Jingsong Huang

纳米材料中心
科学、计算机和数学分部
橡树岭国家实验室
Bethel Valley Road
Oak Ridge, TN 37831 – 6367
美国

Mariachiara Lazzari

Alma Mater Studiorum
Università di Bologna
Dipartimento di Scienza dei Metalli
Elettrochimica e Tecniche Chimiche
Via San Donato 15
40127 Bologna
意大利

Marina Mastragostino

Alma Mater Studiorum
Università di Bologna
Dipartimento di Scienza dei
Metalli
Elettrochimica e Tecniche
Chimiche
Via San Donato 15
40127 Bologna
意大利

John R. Miller

JME 公司
23500 Mercantile Road, Suite L
Beachwood, OH 44122
美国
和
凯斯西储大学
大湖能源研究所
电气工程与计算机科学
10900 Euclid Avenue
Cleveland, OH 44106
美国

Yuki Nagano

东京农工大学
工程学院, 应用化学分部
2-24-16 Naka-cho
Koganei
Tokyo 184-8558
日本

Vanessa Ruiz

CSIRO 能源技术公司
Normanby Rd
Clayton South
Victoria 3169
澳大利亚

Katsuhiko Naoi

东京农工大学
工程学院, 应用化学分部
2-24-16 Naka-cho
Koganei
Tokyo 184-8558
日本

Jawahr Nerkar

CSIRO 能源技术公司
Normanby Rd
Clayton South
Victoria 3169
澳大利亚

Tony Pandolfo

CSIRO 能源技术公司
Normanby Rd
Clayton South
Victoria 3169
美国

Rui Qiao

克莱姆森大学
机械工程系
Clemson, SC 29634-0921
美国

Seepalakottai Sivakkumar

CSIRO 能源技术公司
Normanby Rd
Clayton South
Victoria 3169
澳大利亚

Patrice Simon

Univèrsitè Toulouse III
Institut Carnot CIRIMAT – UMR
CNRS 5085
118 route de Narbonne
31062 Toulouse
法国

Bobby G. Sumpter

纳米材料中心
科学、计算机和数学分部
橡树岭国家实验室
Bethel Valley Road
Oak Ridge, TN 37831 – 6367
美国

Francesca Soavi

Alma Mater Studiorum
Università di Bologna
Dipartimento di Scienza dei
Metalli
Elettrochimica e Tecniche
Chimiche
Via San Donato 15
40127 Bologna
意大利

Pierre – Louis Taberna

Univèrsitè Toulouse III
Institut Carnot CIRIMAT – UMR
CNRS 5085
118 route de Narbonne
31062 Toulouse
法国