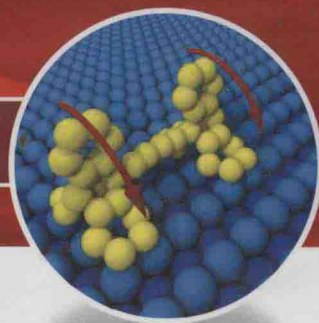


· 导读版 ·

材料科学与应用进展



Polymer Nanocomposites Handbook

# 聚合物纳米复合材料手册

Rakesh K. Gupta  
Elliot Kennel  
Kwang-Jea Kim

 CRC Press  
Taylor & Francis Group  
原版引进

 科学出版社

# Polymer Nanocomposites Handbook

## 聚合物纳米复合材料手册

Rakesh K. Gupta

Elliot Kennel

Kwang - Jea Kim

科学出版社

北京

图字：01-2011-5022 号

This is an annotated version of

**Polymer Nanocomposites Handbook**

by Rakesh K. Gupta, Elliot Kennel, Kwang - Jea Kim

ISBN: 978-0-8493-9777-6

Copyright © 2010 by CRC Press

All rights reserved. Authorized Licensed Edition from English language edition published by CRC Press, Part of Taylor and Francis Group LLC.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Licensed for sale in the Mainland of China only, booksellers found selling this title outside the Mainland of China will be liable to prosecution

本授权版本图书仅可在中国大陆范围内销售，中国大陆范围以外销售者将受到法律起诉

Copies of this book sold without a Taylor and Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal

本书封面贴有 Taylor and Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售

#### 图书在版编目(CIP)数据

聚合物纳米复合材料手册 = Polymer Nanocomposites Handbook: 英文/ (美) 古普塔 (Gupta, R. K.) 等编著. —北京: 科学出版社, 2011  
ISBN 978-7-03-032137-4

I. ①聚… II. ①古… III. ①高分子材料: 纳米材料-技术手册-英文  
IV. ①TB383-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 170450 号

责任编辑: 霍志国/责任印制: 钱玉芬/封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2011 年 9 月第一次印刷 印张: 38 1/2

印数: 1—1 800 字数: 880 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



## 导 读

我国著名科学家钱学森院士预言：“纳米和纳米以下的结构是下一阶段科学技术发展的一个重点，会是一次技术革命，从而将是二十一世纪又一次产业革命。”纳米科学与技术自从诞生以来，迅速崛起成为当今世界上科学家广泛研究的高科技领域。它的研究内容是人类过去从未涉及的非宏观、非微观的中间领域，使人们改造自然的能力直接延伸到分子、原子水平，标志着人类的科学技术进入了一个新的时代。其中，作为主要研究对象之一的纳米材料尤其是聚合物复合材料，更是被誉为“二十一世纪最有前途的材料之一”。

众所周知，Roy 和 Komarneni 提出“纳米复合材料”（Nanocomposites）的概念与单一相组成的纳米结晶材料和纳米相材料不同，纳米复合材料是由两种或两种以上的吉布斯固相至少在一个方向上以纳米级尺寸（1~100 nm）复合而成的复合材料。聚合物纳米复合材料是纳米复合材料家族的一个分支，它为改善高分子材料的性能提供了一个新途径。

实际上，正如本书的主编 Rakesh K. Gupta 教授所说，聚合物纳米复合材料综合了纳米材料和基体等多种材料特性的优势而成为当前科学界的研究“热点”。这种材料的制备主要是将纳米尺度的无机相分散于聚合物基体，由于分散相是纳米尺寸材料，使最终得到的复合材料能将无机材料的刚性、强度、硬度、耐磨性等优点与有机相的韧性、易加工成型和质轻等长处相结合。由于无机相和聚合物之间界面面积非常大，界面之间具有很强的相互作用，以至于聚合物基体纳米复合材料不仅具有纳米材料的表面效应、量子尺寸效应、小尺寸效应、宏观量子隧道效应和介电限域效应等基本的物理特性，还会具有新的光、电、磁等特性，在光学、电子学、机械和生物学等许多领域具有广阔的应用前景。然而，纳米化实施是以能否赋予材料力学增强及其他需要的性能为理念。如果纳米复合材料与相应宏观复合材料具有相同的性能，那么发展纳米复合材料完全失去意义。因此，如何通过宏观特性的削减或原子工程化创造结构来赋予材料或器件具有显著的力学、化学、电学、磁学或光学性能成为当前的重要挑战。《聚合物纳米复合材料手册》正是在这种情况下及时出版的，它对聚合物纳米复合材料的性能及应用进行了系统的阐述和总结，为聚合物纳米复合材料的应用指明了方向。

本书全面综述了聚合物纳米复合材料的纳米材料及聚合物基体的合成。此外，进一步着重介绍了聚合物纳米复合材料的发展史、新技术及其应用等领域。通过当前特征鲜明的科学或工业事例，阐述了聚合物纳米复合材料中的科学、加工和技术的问题。该体系有两个优点：一是不同功能的材料在合成和表征过程中存在各自的特殊性，不便合并为单独的一章进行笼统的概述；二是每一章节都可由各领域内的专家供稿。

通过阅读本书的目录，读者可以发现各章节间的内在联系。本书一共包括 18 章，被划分为五个部分。

第一部分：总览。主要包括前两章，第 1 章主要对聚合物纳米复合材料发展的挑战

和机遇进行综述。第 2 章涉及了不同类型碳纤维的发展史及其在聚合物纳米复合材料中的应用。

第二部分：纳米材料及其表面处理。包括第 3~5 章，主要介绍一系列纳米材料如无机纳米颗粒及碳纤维等表面处理。第 3 章主要阐述了纳米材料在聚合物基体中的混入和分散过程中出现的一系列的问题，着重介绍了聚合物纳米复合材料的不同制备方法及最可能商业化的纳米复合材料。第 4 章探讨了纳米颗粒的团聚和分散，尤其是有机硅烷改性二氧化硅纳米颗粒的分散及其表面改性与其力学性能橡胶中的增强关系。第 5 章阐述了碳纤维的表面改性。由于表面积或表面能的影响，如何解决纤维-基体之间的附着等问题。此外，详细讨论了如何通过 CNF 表面功能化可以获得更多活性表面的方法。最后，针对石墨化程度对 CNFs 用于增强的影响做了相关的讨论。

第三部分：加工。包括第 6~11 章，主要涉及了加工过程中如何解决纳米添加剂与聚合物熔体之间相容性等一系列问题。第 6 章主要阐述了通过双螺杆挤出机解决层状硅酸盐-热塑性塑料基纳米复合材料加工过程中的实际问题。特别值得注意的是，目前此类相关文献主要集中在最终产品性能。因此，对于希望进入纳米复合材料领域的公司或相关学者来说，本章着重涉及了加工设备的安装及其工艺，能给予很好的建议和启迪。第 7 章着重阐述了通过不同的加工设备加工纳米尺度颗粒，如炭黑、二氧化硅、氧化锌等弹性体基纳米复合材料过程中可能存在的问题，如团聚分散、加工和挤出条件、力学性能等及其相应的解决方法。第 8 章探讨了聚合物基纳米复合材料的流变学，着重阐述了流变学的基础知识及其测试技术。在此基础上，进一步介绍了几种聚合物纳米复合材料的流变类型，从而给予读者更多聚合物基纳米复合材料加工过程中的理论指导。此外，第 9~11 章通过相关的几个实例，如炭基纳米复合材料体系、磁或电场下聚合物基体中碳纤维的有序排列及聚酯基液晶聚合物的纳米复合材料体系等介绍了聚合物基纳米复合材料加工过程中加工的重要性。

第四部分：结构表征。包括第 12 章。随着纳米科技的发展及其在生物和材料科学领域的应用，科学家和工程师越来越依赖于设备来帮助他们理解材料的纳米尺度的行为及其结构与性能的关系。因此，适当的表征手段也就变得日益重要。本部分着重介绍了透射电镜 (TEM) 的基本原理。尤其值得关注是本章详细介绍了透射电镜的样品制备方法及其操作过程。

第五部分：性能。包括第 13~18 章，主要涉及了层基和炭基纳米复合材料的具体性能。第 13~17 章分别阐述了聚合物基纳米复合材料的力学性能、质量传输、阻燃性能、电学性能以及热导性能等几个方面，便于读者更加清晰地了解聚合物纳米复合材料在人类日常生活中的重要性，进一步理解目前聚合物纳米复合材料的应用领域。此外，随着石油、煤炭等不可再生能源日渐耗尽，寻找并开发易于使用、成本较低的可再生资源成为了今后全球可持续发展的重中之重。基于上述理念，第 18 章着重阐述了功能化植物油的生物基纳米复合材料的制备、结构表征及其力学、热学等相关性能。此外，通过植物油树脂/纳米角蛋白纤维可用作低介电常数材料的实例，探讨了功能化植物油的生物基纳米复合材料的工业化应用前景。

本手册是由 Rakesh K. Gupta 教授、Elliot B. Kennel 教授及 Kwang-Jea Kim 研究员共同主编的。其中，Rakesh K. Gupta 教授 1980 年毕业于美国特拉华大学，1992 年开

始一直在西维吉尼亚大学工作，目前担任该校工程和矿物资源学院的院长。Gupta 教授曾先后在 Monsanto 和 Dupont 公司工作并担任西维吉尼亚区的聚合物联盟的技术顾问。Gupta 教授是活跃在聚物流变、聚合物加工及聚合物复合材料等领域的国际知名专家，已经出版了《聚合物复合材料流变学》和《聚合物工程基本原理》两部专业书籍。Kennel 教授 2002 年开始在西维吉尼亚大学工作，是 Nanographite Materials, Inc. 和 Pyrograf Products, Inc. 公司的创始人之一。此外，还曾担任 Applied Science, Inc. 的副总裁和研究发展主任，美国空军研究所的主管及航天材料和能量转换领域的国内顾问。20 世纪 80 年代早期，提出 P-Type 掺杂碳纳米管及其纳米复合材料用作高温电导体的理念。目前，Kennel 教授提倡使用煤炭基原料作为低成本纳米复合材料和其他炭产品，如沥青、焦炭。

此外，本书各章节的作者大多是各自领域全球知名的专家。尤其值得注意的是，各章节的作者如 Paul Andersen、Henry C. Ashton、D. J. Burton、D. Gerald Glasgow、Max L. Lake 及 Chang H. Song 等分别来自全球知名的聚合物纳米复合材料领域的公司，可以为读者提供更好的工业化的指导。

本书注重基础和前沿的结合，强调科研与实践，各章节都基本遵循由浅入深的写作思路，先从基本理论或概念出发，循序渐进地过渡到学科的前沿进展。因此，本书受众是广泛的。对于初涉聚合物纳米复合材料的读者而言，可以了解聚合物纳米复合材料科学中的基本概念和基本思路，而且通过阅读可以对聚合物纳米复合材料科学有一个感性的认识。此外，本书尤其着重于聚合物纳米复合材料工业化过程中存在的问题，有针对性地加以解决。对于从事聚合物纳米复合材料研究的读者而言，通过阅读本书可以准确把握相关领域的研究热点，发现重要的问题。相信读者会从本书中得到帮助和启示。

陈爱华

北京航空航天大学材料科学与工程学院

赵永彬

北京低碳清洁能源研究所



## 关于编者

### **Rakesh K. Gupta**

从 1992 年起一直在西维吉尼亚大学从事教学工作。Gupta 教授先后在印度理工学院坎普尔校区和美国特拉华大学获得工学学士和化学工程专业博士学位。此前，在纽约州立大学从事教学工作长达 11 年。此外，他曾短暂在 Monsanto 和 Dupont 公司工作及担任西维吉尼亚区的聚合物联盟的技术顾问。他的研究领域主要集中在聚物流变、聚合物加工及聚合物复合材料等方面。已经出版了《聚合物复合材料流变学》和《聚合物工程基本原理》两部专业书籍。

### **Elliot B. Kennel**

Kennel 教授先后在迈阿密大学和俄亥俄州立大学获得物理学专业理学学士和核工业理学硕士学位。此外，他是 Nanographite Materials, Inc. 和 Pyrograf Products, Inc. 公司的创始人之一。20 世纪 80 年代早期，在美国空军研究所工作期间，作为早期发起人，他提出 P-Type 掺杂碳纳米管及其纳米复合材料用作高温电导体。目前，提倡使用煤炭基原料作为低成本纳米复合材料和其他炭产品，如沥青、焦炭。

Kennel 教授还曾担任 Applied Science, Inc. 的副总裁和研究发展主任、美国空军研究所的主管及航天材料和能量转换领域的国内顾问。

### **Kwang-Jea Kim**

Kwang-Jea Kim 目前是美国阿克伦大学的研究员，先后在韩国仁荷大学和阿克伦大学获得表面活性剂合成专业理学硕士和聚合物工程专业理学博士学位，在美国 Struktol 公司作为研究科学家和项目经理工作五年以上。然后，他在西维吉尼亚大学化学工程系作为讲师从事教学工作一年。其研究领域主要集中在聚合物复合材料、界面科学、流变学、反应加工、化学添加剂、纳米材料、有机-无机杂化材料、橡胶及塑料等方面。Kwang-Jea Kim 作为共同作者出版《热塑和橡胶复合物：技术与物理化学》。目前，作为《纤维素聚合物复合材料界面》的特邀编辑编写了复合材料界面的部分，该书主要涉及木材-塑料复合材料领域。



---

## About the Editors

---



**Rakesh K. Gupta** has been teaching at West Virginia University (WVU) since 1992. He holds B.Tech. and Ph.D. degrees in chemical engineering from the Indian Institute of Technology, Kanpur, and the University of Delaware, respectively. Before coming to WVU, he taught at the State University of New York at Buffalo for 11 years. He has also worked briefly for the Monsanto and DuPont Companies, and he serves as technical advisor to the Polymers Alliance Zone of West Virginia. His research focuses on polymer rheology, polymer processing, and polymer composites. He is the author of *Polymer and Composite Rheology* and the co-author of *Fundamentals of Polymer Engineering*.

**Elliot B. Kennel** holds an M.S. degree in nuclear engineering from The Ohio State University and a B.S. in physics from Miami University (Ohio). He is a co-founder of Nanographite Materials, Inc., and Pyrograf Products, Inc. While working for the U.S. Air Force Research Laboratory in the early 1980s, he helped sponsor some of the early work in the creation of p-type doped carbon nanotubes and nanocomposites as a means of achieving high-temperature electrical conductors. Currently, Kennel is developing coal-based feedstocks for low-cost nanomaterials and other carbon products such as pitches and cokes.

Previously, Kennel served as vice president and director of research and development at Applied Sciences, Inc. (Cedarville, Ohio), and prior to that he served in the U.S. Air Force Research Laboratory as an officer and then civil servant in the area of aerospace materials and energy conversion.



**Kwang-Jea Kim** is currently at the University of Akron as a research faculty member. He obtained a Ph.D. degree in polymer engineering from the University of Akron after receiving an M.S. degree in surfactant synthesis at Inha University in South Korea where he continued his research work as a postdoctoral fellow. He worked for Struktol Company of America as a research scientist and project manager for more than five years and later at the chemical engineering department of West Virginia University as a research assistant professor for one year. His research focuses on polymer composites, interfacial science, rheology, reactive processing, chemical additives,

nanomaterials, organic and inorganic hybrid materials, and rubbers and plastics. He is the co-author of *Thermoplastic and Rubber Compounds: Technology and Physical Chemistry*. He is currently serving as a guest editor of *Interfaces of Cellulose Polymer Composites*, which specializes in the wood-plastic composite area, and represents special issues of *Composite Interfaces*.

---

## **Contributors**

---

**Sushant Agarwal**  
Department of Chemical Engineering  
West Virginia University  
Morgantown, West Virginia

**Paul Andersen**  
Coperion Corporation  
Ramsey, New Jersey

**Henry C. Ashton**  
Schneller Corporation  
Kent, Ohio

**Enrique V. Barrera**  
Department of Mechanical  
Engineering and Materials Science  
Rice University  
Houston, Texas

**Vinod K. Berry**  
Department of Chemical Engineering  
West Virginia University  
Morgantown, West Virginia

**Sati Bhattacharya**  
The Rheology and Materials  
Processing Centre  
School of Civil, Environmental and  
Chemical Engineering  
RMIT University, Melbourne  
Victoria, Australia

**Subhendu Bhattacharya**  
The Rheology and Materials  
Processing Centre  
School of Civil, Environmental and  
Chemical Engineering  
RMIT University, Melbourne  
Victoria, Australia

**D.J. Burton**  
Applied Sciences, Inc.  
Cedarville, Ohio

**Erica Corral**  
Sandia National Laboratories  
Albuquerque, New Mexico

**Daniel De Kee**  
Department of Chemical and  
Biomolecular Engineering  
Tulane Institute for Macromolecular  
Engineering and Science  
Tulane University  
New Orleans, Louisiana

**Kyle J. Frederic**  
Department of Chemical and  
Biomolecular Engineering  
Tulane Institute for Macromolecular  
Engineering and Science  
Tulane University  
New Orleans, Louisiana

**D. Gerald Glasgow**  
Applied Sciences, Inc.  
Cedarville, Ohio

**Rahul K. Gupta**  
The Rheology and Materials  
Processing Centre  
School of Civil, Environmental and  
Chemical Engineering  
RMIT University, Melbourne  
Victoria, Australia

**Rakesh K. Gupta**  
Department of Chemical Engineering  
West Virginia University  
Morgantown, West Virginia

**Chang Kook Hong**

Center for Functional Nano Fine Chemicals  
Chonnam National University  
Gwangju, South Korea

**Avraam I. Isayev**

Institute of Polymer Engineering  
The University of Akron  
Akron, Ohio

**Elliot B. Kennel**

Chemical Engineering Department  
West Virginia University  
Morgantown, West Virginia

**Kwang-Jea Kim**

Chemical Engineering Department  
West Virginia University  
Morgantown, West Virginia

**Max L. Lake**

Applied Sciences, Inc.  
Cedarville, Ohio

**Jue Lu**

Department of Chemical Engineering  
and Center for Composite Materials  
University of Delaware  
Newark, Delaware

**Meisha Shofner**

School of Polymer, Textile & Fiber  
Engineering  
Georgia Institute of Technology  
Atlanta, Georgia

**Daneesh Simien**

National Institute of Standards and  
Technology  
Gaithersburg, Maryland

**Chang H. Song**

Colortech, Inc.  
Morristown, Tennessee

**Tatsuhiko Takahashi**

Department of Polymer Science and  
Engineering  
Yamagata University  
Yonezawa, Japan

**Gary G. Tibbetts**

Applied Sciences, Inc.  
Cedarville, Ohio

**Leszek A. Utracki**

Industrial Materials Institute  
National Research Council Canada  
Boucherville, Canada

**James L. White**

Institute of Polymer Engineering  
The University of Akron  
Akron, Ohio

**Charles A. Wilkie**

Department of Chemistry  
Marquette University  
Milwaukee, Wisconsin

**Richard P. Wool**

Department of Chemical  
Engineering and Center for  
Composite Materials  
University of Delaware  
Newark, Delaware

**Koichiro Yonetake**

Department of Polymer Science and  
Engineering  
Yamagata University  
Yonezawa, Japan

**Jin Zhu**

YTC America, Inc.  
Camarillo, California

# 1 挑战与机遇的综述

Rakesh K. Gupta, Elliot B. Kennel, and Kwang-Jea Kim

## 目录

1.1 本书简介 .....	1
1.2 本书结构 .....	4
1.2.1 第1节：概述 .....	4
1.2.2 第2节：纳米材料和表面处理 .....	4
1.2.3 第3节：加工过程 .....	4
1.2.4 第4节：结构表征 .....	5
1.2.5 第5节：性能 .....	5
1.3 挑战 .....	6
参考文献 .....	6

## 1.1 本书简介

纳米材料尤其是聚合物复合材料的纳米增强近年来已成为研究、发展及商业化的一个重要的研究方向。1959年，诺贝尔奖获得者 Richard Feynman 在美国物理协会所做的重要报告被许多科学历史学家认为是纳米科技史上重要的事件。<sup>1</sup> 在他的报告中，Feynman 首次预言了纳米材料、纳米印刷技术、纳米规模信息存储、分子电子学及纳米加工技术的发展。此外，Feynman 提议在几年内设定两个奖项（每人 1000 美元）：一是工作马达小于 1 立方英寸的 1/64；另一个是减小字的尺寸只能在电子显微镜下阅读（如电子印刷技术）。

纳米材料是纳米技术中非常重要的方向之一。Feynman 不仅对可能创造的小尺寸，而且对材料厚度上被控制在几个原子层所带来的特殊特性表现出浓厚兴趣。这些特性有助于更加精确地给出纳米材料的定义，即纳米材料不仅有小的物理尺度，还展现出由小尺寸带来的不寻常的性质；此外，这些材料的制备商还应该控制材料尺寸，从而提高最终性能。

在此基础上，通过共混炭黑和橡胶制得轮胎被认为是最早的纳米复合材料产品之一。早在 19 世纪 60 年代，研究人员在尝试添加不同的材料到橡胶的过程中已经认识到炭黑能够增强硫化橡胶的力学性能。炭黑具有高的比表面积、表面能及力学性能，从而显著增强橡胶性能。此外，20 世纪早期，其他纳米规模增强材料如二氧化硅和碳酸钙也被广泛认识。

目前，纳米材料已经在各种各样的工业领域中得到广泛应用。大部分读者可能熟悉

纳米材料在电子学和健康保健领域的应用。然后,这并不是其全部应用,如合成织物中引入纳米粉末可以赋予其抗菌、阻燃、不润湿或自清洁性能。包含纳米金属氧化物粒子的浓的涂层可以用作憎水喷墨媒质,而稀的涂层可以用在光电二极管的光学放大系统。纳米粒子的热喷涂层可以用于飞机或陆地上的涡轮上的防腐。此外,在其他领域如建筑、汽车和航天零件、环境保护以及能量存储技术中也被广泛应用。美国十年前即在全国范围内致力于发展纳米技术。

顾名思义,聚合物纳米复合材料是包含至少一维尺寸小于 100 nm 的材料的聚合物基体的复合材料,其中小尺寸效应赋予材料不同于宏观世界的可控性能。纳米化实施是以能否赋予材料力学增强及其他需要的性能为理念。如果纳米复合材料(如聚丙烯基碳纳米管复合材料)与相应宏观复合材料(如来源于聚丙烯腈前躯体的商用碳纤维增强的聚丙烯)具有相同的性能,那么发展纳米复合材料完全失去意义。因此,如何通过宏观特性的削减或原子工程化创造结构来赋予材料或器件具有显著的力学、化学、电学、磁学或光学性能成为当前的重要挑战。

1950年,National Lead Co.公司的专利中介绍首个纳米粘土复合材料,即使用纳米粘土增强弹性体。<sup>2</sup>然而,该专利并没有任何商业化前景。1988年,日本 Toyoda (Okada et al.)公司的专利中报道了聚酰胺-纳米粘土复合材料,首次提出具有分子层结构的硅酸盐是赋予宏观复合材料纳米性能的关键因素。<sup>3</sup>因此,这是一个真正意义的纳米复合材料并成为现在纳米复合材料时代的一个里程碑。1993年,日本 Toyoda 公司率先推出第一个商业化尼龙-6基纳米粘土复合材料用于汽车的保险盖。<sup>4-6</sup>2001年,日本 Toyoda 公司进一步开发了包含纳米粘土的汽车主体面板和保险杠。2002年,General Motors 也开始在 GM Safari 和 Chevrolet Astro 模型中使用纳米粘土复合材料。

特别需要提到的是炭基纳米材料。20世纪80年代,炭的同素异形体只包括两种:(1)金刚石;(2)石墨。石墨烯是由六方密排结构的  $sp^2$  型碳原子组成的单一片层,而石墨是由多层石墨烯组成。一直到1996年,诺贝尔化学奖得主 Robert F. Curl Jr.、Sir Harold W. Kroto 和 Richard E. Smalley,首次证实了存在第三种同素异形体——巴基球或碳 60。这个名字来源于建筑师 Buckminster Fuller 设计的碳 60 网格球顶结构。这次发现也被认为是纳米材料史上的分水岭,进而加速了纳米材料和纳米技术的研究。然后,其他的碳分子也被相继发现,如 C-72、C-76、C-84 甚至更大的 C-100。<sup>7</sup>单壁碳纳米管(SWNTs 或 SWCNTs)是由单层的石墨烯形成管状,甚至一定意义上也被认为是一种被拉长的富勒烯。<sup>8</sup>但是,由于这种纳米材料通常需要金属催化剂颗粒辅助生长而成,所以纳米纤维状富勒烯分子也只是存在理论的可能。

多壁碳纳米管(MWNTs 或 MWCNTs)是由多层石墨烯卷曲而成。碳纳米纤维(CNFs)包含缩短的圆锥部分或堆叠杯状石墨烯层。<sup>9</sup>根据其结构不同,使得这类纳米碳材料具有半导体特性或金属特性,并广泛应用于纳米电子器件、医药品及催化剂载体等领域。不考虑碳纳米材料在实际应用中的成本(早期价格 1 000 000 美元/磅,而且没有人可以大规模生产),已经报道的力学性能使材料科学家想知道其如何实现复合材料的纳米增强。此外,单个碳纳米管被报道其强度、模量及张力值高于钢数倍。

因而,从聚合物纳米复合材料的观点看,丝状碳混合有效改善了其力学性能。然而,最初制备的聚合物纳米复合材料并没有形成高的性能,实际上与纯的聚合物相比其

性能较差。因此，导致材料科学家再次查阅教科书并探讨材料的纳米规模界面以及纳米规模添加剂的团聚和分散等问题。例如，由于碳纳米管表面能（类似于 Teflon<sup>®</sup>）非常小，聚合物基材料必须与纳米管填料表面的石墨烯层形成化学键。虽然功能化基团破坏了石墨烯晶格，但是表面功能化为改善键接碳纳米管表面提供了可能。结果，到 21 世纪的第一个十年里，碳纳米复合材料被证明没有特殊的力学性能，因而其他性能变得越来越重要。

电导和热导聚合物复合材料也有很多应用。例如，即使只有较弱电导率的聚合物也适合于静电喷涂，由于减少浪费涂层和不需要底漆，从而有利于节约成本和环保。由于纤维表面抛光效应，商用微米纤维复合材料有很大困难。然而，表面抛光对其在汽车上应用非常重要。Hyperion Catalysis 公司是第一个将多壁碳纳米管引入纳米复合材料并在静电喷涂的基础上实现商业化的生产商。Ford Motor 公司将 MWNT 纳米复合材料用作 1998 ford Taurus 的 mirror housing。<sup>10</sup>因此，纳米粘土系列和碳纳米管复合材料已经广泛应用于汽车工业。在那时，由于 Hyperion Catalysis 公司采用无关的商业化产品名称（Fibril<sup>™</sup>），造成许多学术研究者并没有意识到其已经被商业化。

