

低维材料与器件丛书

成会明 总主编

POLYMER NANOFIBERS AND THEIR
DERIVATIVES: PREPARATION, STRUCTURE
AND NEW ENERGY APPLICATIONS

高分子纳米纤维及其衍生物： 制备、结构与新能源应用

刘天西 著



科学出版社

低维材料与器件丛书

成会明 总主编

高分子纳米纤维及其衍生物： 制备、结构与新能源应用

刘天西 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为“低维材料与器件丛书”之一。全书以高分子纳米纤维为基础,系统介绍了高分子纳米纤维及其衍生物的种类与制备、结构与形态、表征方法及其在新能源领域的应用。内容涉及高分子纳米纤维及其衍生物的特性、应用前景及发展方向;高分子纳米纤维及其衍生物的种类与制备、结构与形态、表征方法;高分子纳米纤维及其衍生物在光电催化、燃料电池、太阳能电池、超级电容器、锂二次电池、其他二次电池等能源转换与存储领域,以及传感、智能响应、发光、热电等功能与智能材料方面的应用研究。

本书可供从事高分子纳米纤维材料领域的研究人员阅读,也可供高等院校高分子相关专业的师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

高分子纳米纤维及其衍生物:制备、结构与新能源应用/刘天西著.
—北京:科学出版社,2019.1

(低维材料与器件丛书/成会明总主编)

ISBN 978-7-03-059234-7

I. ①高… II. ①刘… III. ①高分子材料-纳米材料-复合纤维-研究②高分子材料-纳米材料-衍生物-研究 IV. ①TB383②TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 242005 号

责任编辑:翁靖一/责任校对:杜子昂

责任印制:肖 兴/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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张:17 1/4

字数:328 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

低维材料与器件丛书

编委会

总主编：成会明

常务副总主编：俞书宏

副总主编：李玉良 谢毅 康飞宇 谢素原 张跃

编委(按姓氏汉语拼音排序)：

胡文平	康振辉	李勇军	廖庆亮	刘碧录	刘畅
刘岗	刘天西	刘庄	马仁敏	潘安练	彭海琳
任文才	沈洋	孙东明	汤代明	王荣明	伍晖
杨柏	杨全红	杨上峰	杨震	张锦	张立
张强	张莹莹	张跃钢	张忠	朱嘉琦	邹小龙

总 序

人类社会的发展水平，多以材料作为主要标志。在我国近年来颁发的《国家创新驱动发展战略纲要》、《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》、《“十三五”国家科技创新规划》和《中国制造2025》中，材料都是重点发展的领域之一。

随着科学技术的不断进步和发展，人们对信息、显示和传感等各类器件的要求越来越高，包括高性能化、小型化、多功能、智能化、节能环保，甚至自驱动、柔性可穿戴、健康全时监/检测等。这些要求对材料和器件提出了巨大的挑战，各种新材料、新器件应运而生。特别是自20世纪80年代以来，科学家们发现和制备出一系列低维材料(如零维的量子点、一维的纳米管和纳米线、二维的石墨烯和石墨炔等新材料)，它们具有独特的结构和优异的性质，有望满足未来社会对材料和器件多功能化的要求，因而相关基础研究和应用技术的发展受到了全世界各国政府、学术界、工业界的高度重视。其中富勒烯和石墨烯这两种低维碳材料的发现者还分别获得了1996年诺贝尔化学奖和2010年诺贝尔物理学奖。由此可见，在新材料中，低维材料占据了非常重要的地位，是当前材料科学的研究前沿，也是材料科学、软物质科学、物理、化学、工程等领域的重要交叉，其覆盖面广，包含了很多基础科学问题和关键技术问题，尤其在结构上的多样性、加工上的多尺度性、应用上的广泛性等使该领域具有很强的生命力，其研究和应用前景极为广阔。

我国是富勒烯、量子点、碳纳米管、石墨烯、纳米线、二维原子晶体等低维材料研究、生产和应用开发的大国，科研工作者众多，每年在这些领域发表的学术论文和授权专利的数量已经位居世界第一，相关器件应用的研究与开发也方兴未艾。在这种大背景和环境，及时总结并编撰出版一套高水平、全面、系统地反映低维材料与器件这一国际学科前沿领域的基础科学原理、最新研究进展及未来发展和应用趋势的系列学术著作，对于形成新的完整知识体系，推动我国低维材料与器件的发展，实现优秀科技成果的传承与传播，推动其在新能源、信息、光电、生命健康、环保、航空航天等战略新兴领域的应用开发具有划时代的意义。

为此，我接受科学出版社的邀请，组织活跃在科研第一线的三十多位优秀科学家积极撰写“低维材料与器件丛书”，内容涵盖了量子点、纳米管、纳米线、石墨烯、石墨炔、二维原子晶体、拓扑绝缘体等低维材料的结构、物性及其制备方

法，并全面探讨了低维材料在信息、光电、传感、生物医用、健康、新能源、环境保护等领域的应用，具有学术水平高、系统性强、涵盖面广、时效性高和引领性强等特点。本套丛书特色鲜明，不仅全面、系统地总结和归纳了国内外在低维材料与器件领域的优秀科研成果，展示了该领域研究的主流和发展趋势，而且反映了编著者在各自研究领域多年形成的大量原始创新研究成果，将有利于提升我国在这一前沿领域的学术水平和国际地位、创造战略新兴产业，并为我国产业升级、提升国家核心竞争力提供学科基础。同时，这套丛书的成功出版将使更多的年轻研究人员和研究生获取更为系统、更前沿的知识，有利于低维材料与器件领域青年人才的培养。

历经一年半的时间，这套“低维材料与器件丛书”即将问世。在此，我衷心感谢李玉良院士、谢毅院士、俞书宏教授、谢素原教授、张跃教授、康飞宇教授、张锦教授等诸位专家学者积极热心的参与，正是在大家认真负责、无私奉献、齐心协力下才顺利完成了丛书各分册的撰写工作。最后，也要感谢科学出版社各级领导和编辑，特别是翁靖一编辑，为这套丛书的策划和出版所做出的一切努力。

材料科学创造了众多奇迹，并仍然在创造奇迹。相比于常见的基础材料，低维材料是高新技术产业和先进制造业的基础。我衷心地希望更多的科学家、工程师、企业家、研究生投身于低维材料与器件的研究、开发及应用行列，共同推动人类科技文明的进步！



中国科学院院士，发展中国家科学院院士

清华大学，清华-伯克利深圳学院，低维材料与器件实验室主任

中国科学院金属研究所，沈阳材料科学国家研究中心先进炭材料研究部主任

Energy Storage Materials 主编

SCIENCE CHINA Materials 副主编

前言

能源问题在工业社会中一直是困扰经济发展的重要问题，能源利用带来的经济利益与人居环境之间的矛盾日益突出。新型能量转换与存储装置作为人类赖以生存的重要组成部分，与经济、社会和环境的发展密不可分。太阳能、风能等清洁能源的开发利用需要能量存储装置，未来的电动汽车或者混合动力汽车等需要大功率的动力装置，高效率的电池和电容器则是实现上述应用的核心器件。因此，与之直接相关的新能源材料的设计和开发是近年来迅速崛起和飞速发展的研究领域，已成为化学、材料、物理、能源等学科交叉研究的前沿热点之一。

高分子纳米纤维及其衍生物具有孔隙率高、比表面积和长径比大、表面能和活性高、纤维精细程度和均一性高等特点，而且纳米材料的一些特殊性质（如量子尺寸效应和宏观量子隧道效应等）也给纳米纤维带来了特殊的电学、磁学和光学性质，因而这些结构优势也使其在许多新兴的高科技领域显示出了巨大的应用前景。例如，将其置于太阳能电池中，纳米纤维可以最大限度地暴露在太阳光下；作为燃料电池电极材料时，碳纳米纤维直径小、比表面积大、导电性好等特点使其 sp^2 杂化的碳纳米结构表面可以发生尽可能多的催化反应；作为新型二次电池或超级电容器电极材料使用时，一维碳纳米纤维材料可以提供高效的离子和电子传输路径，使更多的活性位点参与到高效的氧化还原反应中。此外，电子设备正向着轻薄化、柔性化和可穿戴的方向发展，因而与之相适应的轻薄且柔性的电化学储能器件亟待开发。然而传统的锂离子电池、超级电容器等产品是刚性的，在弯曲、折叠时，容易造成电极材料和集流体分离，影响电化学性能，甚至导致短路，发生严重的安全问题。因此，为适应下一代柔性电子设备的发展，柔性储能器件已成为近年来的研究热点。而纳米纤维材料具有柔性、易编织等优点，易被集成到各种光伏设备、电子设备中。不仅如此，当前纳米纤维材料的发展已由单一组成向多组分复合材料、简单的一维实心结构向多级结构构筑以及单一功能性的向多功能性的方向发展，其低成本、高效、循环性能稳定等综合优势必将在未来显示出巨大的市场竞争力。

作者及其团队长期以来一直从事高分子纳米纤维及其衍生物材料的基础与应用研究工作，并仔细调研了高分子纳米纤维及其衍生物材料在新能源领域的发展与应用情况。鉴于高分子纳米纤维及其衍生物材料在新能源领域的高速发展势头及其商品化的潜在应用价值，我们组织编写了此书，旨在详细介绍和推动高分子

纳米纤维及其衍生物在新能源领域的国内外学术界的发展和工业界的应用。本书第 1~4 章先后介绍了高分子纳米纤维及其衍生物的特性、发展,种类与制备,结构与形态,表征方法等;第 5 章、第 6 章介绍了高分子纳米纤维及其衍生物在光电催化、燃料电池、太阳能电池、超级电容器、锂二次电池、其他二次电池等能源转换与存储领域的应用研究;第 7 章介绍了高分子纳米纤维及其衍生物在传感、智能响应、发光、热电等功能与智能材料方面的应用研究。希望本书能对高分子纳米纤维及其衍生物在新能源领域的发展起到抛砖引玉的作用。

本书主要素材来自作者课题组十多年来的理论及应用研究成果,特别感谢团队中缪月娥、赖飞立、黄云鹏、樊玮、张超、王丽娜等人的科研贡献和在本书撰写、修改过程中给予的大力支持。诚挚感谢成会明院士和“低维材料与器件丛书”编委会专家为本书所提出的宝贵意见。此外,感谢国家杰出青年科学基金项目(高分子纳米复合材料,资助号:51125011);国家自然科学基金重点项目(纳米碳基高分子复合材料的可控制备及其在新能源领域的应用基础研究,资助号:51433001);国家自然科学基金面上项目(静电纺聚酰亚胺纳米纤维复合膜的多级结构可控构筑及其性能研究,资助号:51373037)及青年科学基金项目(锂硫电池用新型聚合物纳米复合纤维 Janus 隔膜的可控制备及其性能研究,资助号:21604010)对本书出版的支持。

由于本书成稿时间较为仓促,加之作者的水平有限,且基于高分子纳米纤维及其衍生物的新能源材料发展速度很快,书中难免会有疏漏或不尽人意之处,恳请同行专家和广大读者批评指正!

刘天西

2018 年 9 月于上海

目 录

总序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 一维纳米材料	1
1.2 高分子纳米纤维及其衍生物的特性	3
1.3 高分子纳米纤维及其衍生物的应用前景及发展方向	5
1.3.1 高分子纳米纤维及其衍生物的应用前景	5
1.3.2 高分子纳米纤维及其衍生物的发展方向	7
参考文献	8
第 2 章 高分子纳米纤维及其衍生物的种类与制备	9
2.1 高分子纳米纤维及其衍生物的种类	9
2.1.1 高分子纳米纤维	9
2.1.2 无机纳米纤维	18
2.1.3 有机/无机复合纳米纤维	20
2.2 高分子纳米纤维及其衍生物的制备	27
2.2.1 静电纺丝技术	27
2.2.2 模板合成法	29
2.2.3 自组装技术	30
2.2.4 水热碳化法	31
2.2.5 化学气相沉积法	32
参考文献	34
第 3 章 高分子纳米纤维及其衍生物的结构与形态	40
3.1 单根纤维的结构与形态	40
3.1.1 多孔结构纳米纤维	40
3.1.2 核壳结构纳米纤维	45
3.1.3 中空结构纳米纤维	49
3.1.4 树枝状结构纳米纤维	53

3.1.5	项链结构纳米纤维	55
3.1.6	螺旋结构纳米纤维	57
3.2	纳米纤维集合体的结构与形态	63
3.2.1	无规堆积的纳米纤维	63
3.2.2	取向结构纳米纤维阵列	63
3.2.3	纳米纤维气凝胶	66
3.2.4	图案化纳米纤维	69
3.2.5	纳米蛛网结构	72
	参考文献	75
第4章	高分子纳米纤维及其衍生物的特征方法	82
4.1	组成表征方法	82
4.1.1	红外光谱	82
4.1.2	拉曼光谱	85
4.1.3	紫外-可见吸收光谱	87
4.1.4	X射线光电子能谱	88
4.1.5	能量色散X射线谱	90
4.2	结构表征方法	91
4.2.1	BET氮吸附法	91
4.2.2	X射线衍射	94
4.3	形貌表征方法	96
4.3.1	扫描电子显微镜	96
4.3.2	透射电子显微镜	99
4.3.3	原子力显微镜	100
4.3.4	荧光显微镜	100
4.4	热学表征方法	102
4.4.1	热重分析	102
4.4.2	差热分析和差示扫描量热法	103
4.5	力学表征方法	105
4.6	电学表征方法	106
4.6.1	电阻与电阻率测试	106
4.6.2	介电特性测试	107
	参考文献	107
第5章	高分子纳米纤维及其衍生物在能源转换领域的应用	110
5.1	高分子纳米纤维及其衍生物在光电催化领域的应用	110

5.1.1	析氢反应催化剂	110
5.1.2	析氧反应催化剂	113
5.1.3	二氧化碳还原反应催化剂	116
5.2	高分子纳米纤维及其衍生物在燃料电池领域的应用	118
5.2.1	燃料电池概述	118
5.2.2	高分子纳米纤维及其衍生物在燃料电池交换膜上的应用	118
5.2.3	高分子纳米纤维及其衍生物在燃料电池电极材料中的应用	127
5.2.4	高分子纳米纤维及其衍生物在锌空气电池中的应用	133
5.3	高分子纳米纤维及其衍生物在太阳能电池领域的应用	142
5.3.1	太阳能电池概述	142
5.3.2	高分子纳米纤维及其衍生物在染料敏化太阳能电池中的应用及研究进展	147
5.3.3	高分子纳米纤维及其衍生物在聚合物太阳能电池中的应用及研究进展	152
5.3.4	展望	153
	参考文献	154
第 6 章	高分子纳米纤维及其衍生物在能源存储领域的应用	162
6.1	高分子纳米纤维及其衍生物在超级电容器领域的应用	162
6.1.1	超级电容器简介	162
6.1.2	双电层电容特性电极材料	165
6.1.3	赝电容特性电极材料	173
6.1.4	混合电容特性电极材料	177
6.2	高分子纳米纤维及其衍生物在锂二次电池领域的应用	180
6.2.1	锂离子电池电极材料	180
6.2.2	锂硫电池电极材料	186
6.2.3	锂-空气电池电极材料	197
6.2.4	锂二次电池隔膜材料	205
6.3	高分子纳米纤维及其衍生物在其他二次电池领域的应用	213
6.3.1	钠离子电池	213
6.3.2	铝离子电池	220
	参考文献	224
第 7 章	基于高分子纳米纤维的功能与智能材料	234
7.1	传感纤维材料	234
7.1.1	传感纤维材料概述	234

7.1.2	光电式传感器	236
7.1.3	电阻式传感器	239
7.1.4	压力传感器	243
7.1.5	光学传感器	245
7.2	智能响应性纤维材料	246
7.2.1	智能响应纤维材料概述	246
7.2.2	温度响应性纳米纤维	246
7.2.3	磁场响应性纳米纤维	247
7.2.4	光响应性纳米纤维	247
7.3	发光纤维材料	249
7.4	热电纤维材料	251
	参考文献	253
	关键词索引	257



1.1 一维纳米材料

随着纳米科技的飞速发展,纳米材料已成为推动当代科学技术进步的重要支柱之一。广义上,纳米材料是指微观结构上至少在一维方向上受纳米尺度(1~100 nm)调制的各种固体超细材料。因此,纳米材料的基本单元分为三类:零维(如纳米颗粒、原子团簇)、一维(如纳米棒、纳米线、纳米管、纳米纤维)和二维(如纳米片、超薄膜)。由于纳米尺度形成特殊量子尺寸效应、体积效应、宏观量子隧道效应以及介电限域效应等,纳米材料在力学、电学、磁学、热学、光学和催化等方面都表现出特殊的性能,从而在电子、冶金、航天、化工、生物和医学等领域都显示了广阔的应用前景。在过去的几十年中,纳米材料科学已经得到了飞跃式发展,新的理论和实验技术方兴未艾,并且在现代材料科学发展中起到越来越重要的作用。

一维纳米材料是指在空间上有两维处于纳米尺度,而长度方向为宏观尺度的一类新型纳米材料^[1]。它作为纳米材料的一个重要分支,不但具有传统纳米材料所具有的纳米尺度效应,而且其特有的长径比和维度限域效应使其成为研究电子传输行为、光学特性及力学性能等性质的理想体系,因而在纳米电子学与光学器件、传感器等方面显示出了重要的应用价值^[2,3]。与零维、二维纳米材料相比,一维纳米结构为研究电/热传递以及力学性质等与尺寸/维数之间的关系问题(量子效应)提供了更合适的研究模型^[3]。

按照纳米材料的形貌划分,一维纳米材料可分为纳米管、纳米纤维、纳米棒、纳米线、纳米带及纳米电缆等^[4],如图 1-1 所示。通常纳米管是指纵向形态较长的具有空心结构的一维管状材料[图 1-2(a)];纳米纤维是指直径为纳米级、长度为微米级的一维纳米材料[图 1-2(b)];纳米棒与纳米线的区别不明显,纳米棒通常指长度较短的具有柱状结构的一维实心材料[图 1-2(c)],而纳米线则指长度较长、形态表现为竖直或弯曲实心结构的一维纳米材料[图 1-2(d)],它们的横断面

皆为圆形；纳米带与以上两种结构的差别较大，其带状的纵向长度较长，横截面则呈现四边形[图 1-2(e)]；纳米电缆则是指直径为纳米级的电缆，其芯部通常为半导体或导体的纳米丝，外面包敷异质纳米壳体(导体、半导体或绝缘体)，外部的壳体和芯部的丝是共轴的[图 1-2(f)]。此外，基于一维纳米材料的结构构筑，还实现了很多三维结构复合材料的可控制备，如核壳结构纳米复合材料、树枝状纳米复合材料，以及与其他维数材料组成的复合材料等。根据组成的不同，可以将一维纳米材料分为以下几大类^[5]：①高分子基一维纳米材料；②碳基一维纳米材料；③金属基一维纳米材料；④无机非金属基一维纳米材料。可见，随着研究的不断深入，一维纳米材料的开发已经取得了较大进展，但材料的纯度、均匀度、直径分布、产量等的调控问题也是研究中迫切需要解决的重要课题。

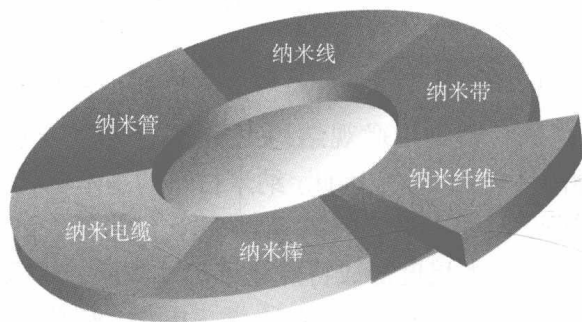


图 1-1 一维纳米材料按形貌分类

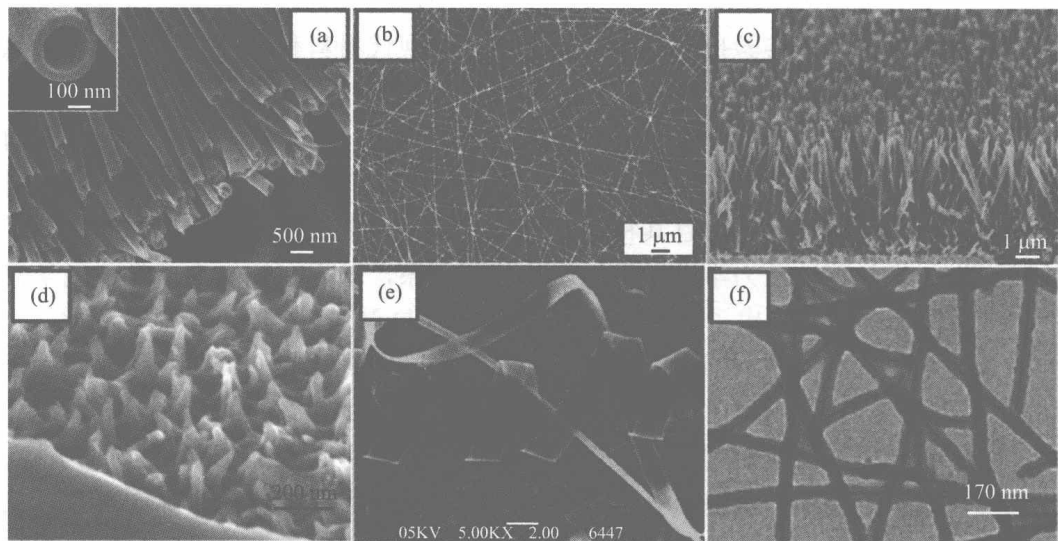


图 1-2 不同一维纳米材料的典型形貌照片

(a) 纳米管^[2]；(b) 纳米纤维^[1]；(c) 纳米棒^[6]；(d) 纳米线^[4]；(e) 纳米带^[3]；(f) 纳米电缆^[7]

1.2 高分子纳米纤维及其衍生物的特性

纳米纤维是一维纳米材料的典型代表之一(图 1-1), 它的两个重要特征是: 大长径比($\alpha > 1000$)和较小的纤维直径。狭义上, 纳米纤维是指直径在 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 范围内的纤维, 而广义上 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 以下的纤维均可称作纳米纤维; 而较细的纤维直径是保证材料表现出一定柔韧性的前提, 因此纤维超细化是纤维科学发展中的一个重要方向。此外, 纳米纤维具有孔隙率高、比表面积大、长径比大、表面能和活性高、纤维精细程度和均一性高等特点, 而且纳米材料的一些特殊性质(如量子尺寸效应和宏观量子隧道效应等)也给纳米纤维带来了特殊的电学、磁学和光学性质。因而纳米纤维在聚合物增强、分离和过滤、生物及医学治疗、电池材料、电子和光学设备等许多领域都具有广阔的应用前景。

根据其组成, 纳米纤维可分为高分子纳米纤维、无机纳米纤维及有机/无机复合纳米纤维^[8,9]。由于高分子结构不同, 高分子纳米纤维具有聚合物分子量可调、质轻、密度小, 以及优异的力学性能、绝热性能、隔热性能等特点, 因而在机械工程、建筑业、包装行业、交通运输等工农业生产和人们的衣食住行中起到了不可替代的作用。无机纳米纤维一般是由高分子纳米纤维及其复合材料前驱体经过高温煅烧、高温还原等后处理工艺获得的衍生纳米纤维材料, 包括碳纳米纤维、金属纳米纤维和氧化物纳米纤维等。无机纳米纤维(如碳纳米纤维)通常具有高强度、高模量、低密度和高导电性等优点, 因而在催化剂及其载体、高效吸附剂、结构增强、超级电容器和锂离子电池等众多领域都具有重要的应用价值。但是, 无机纳米纤维脆性较大的问题也极大地限制了其应用性能和范围, 因此柔性无机纳米纤维的开发是亟待解决的一个重要课题。而且, 随着科学技术的发展, 纳米材料的高性能化和多功能化已成为材料研究领域的重要课题, 而单一组分有机或无机纳米纤维的性能还不能完全满足某些特定的需求, 因此复合纳米纤维的设计和开发成为当前研究的一大热点和前沿领域。例如, 将无机纳米材料(如金属或金属氧化物, 碳纳米管、石墨烯等碳纳米粒子)分散在高分子纤维基体中, 借助静电纺丝技术、表面修饰后处理等方法即可获得具有特殊功能的纳米纤维复合材料, 如碳纳米材料/高分子复合纳米纤维、氧化物/高分子复合纳米纤维、金属/高分子复合纳米纤维等, 将其进一步高温碳化或热处理还能得到碳纳米纤维复合材料。这种复合技术不仅能充分发挥高分子基体可纺性好、力学性能优异、具有高柔性和可折叠性等优点, 而且还能有效克服低维功能纳米粒子易团聚、成膜性差等缺点, 进而充分发挥其因小尺寸效应和表面效应等所特有的光、电、磁等特性, 从而拓宽其在高效催化、高温过滤、光电器件等诸多领域的潜在应用。

随着纳米纤维材料在各领域应用技术的不断发展, 纳米纤维的制备技术也得

到了进一步的开发与创新。目前，纳米纤维的制备方法主要包括模板法、相分离法、自组装法、水热碳化和纺丝加工法等^[9, 10]。其中，纺丝加工法被认为是规模化制备高分子纤维最有前景的方法之一，主要包括熔融纺丝法、溶液纺丝法、液晶纺丝法、胶体纺丝法和静电纺丝技术等，然而传统纺丝加工法如熔融纺丝法、溶液纺丝法、液晶纺丝法和胶体纺丝法等得到的纤维直径一般在 5~500 μm ，无法实现直径小于 100 nm 的纤维的制备。因此，综合考虑设备复杂性、工艺可控性、适纺范围以及纤维尺度可控性等因素，静电纺丝技术被视为一种能够直接、连续制备高分子纳米纤维的方法，并且具备可纺物质种类多、成本低廉、工艺和纤维尺度可控性强等多方面的综合优势，近年来已成为有效制备纳米纤维材料的主要途径之一。而且由静电纺丝技术制备的高分子纳米纤维具有直径分布可调控范围宽(从纳米级到微米级)的特点，图 1-3 (a) 为由静电纺丝技术获得的聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 纳米纤维与人体一根头发丝的微观形貌比较照片，可见静电纺高分子纳米纤维的直径非常小；因而由这种纳米纤维形成的膜材料具有比表面积大、孔径小、孔隙率高(通常>80%)和连续性好等特性^[11]。此外，结合高速滚筒接收、辅助电极法等纺丝收集装置，还可实现纳米纤维在较长距离范围内沿着某一特定方向的定向排列，图 1-3 (b) 为静电纺聚酰亚胺 (polyimide, PI) 取向纳米纤维的扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 照片^[12]。研究表明，高度取向的排列方式可以赋予高分子纳米纤维膜在某特定方向上独特的光学、电学和磁学等特性^[13]。当然，每种方法都有其各自的优点和不足，随着纳米纤维技术的进步和商业化发展的加快，越来越多的厂家将投向纳米纤维的应用研究和市场开发，功能化纳米纤维的发展必将引起人们的日益关注。

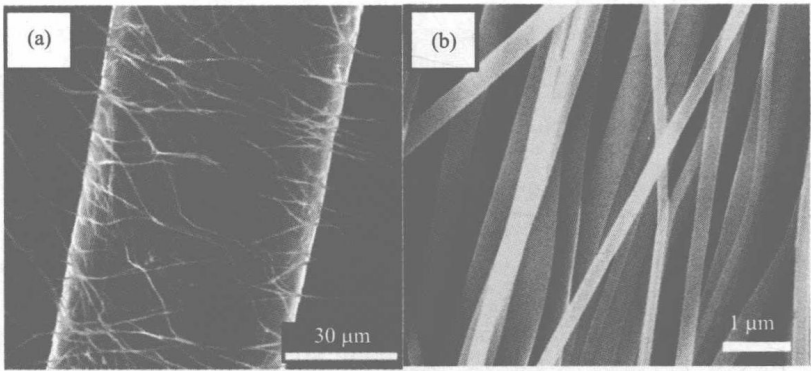


图 1-3 静电纺高分子纳米纤维的扫描电子显微镜照片

(a) 无规堆叠的 PVA 纳米纤维与一根头发丝比较^[11]；(b) PI 取向纳米纤维^[12]

1.3 高分子纳米纤维及其衍生物的应用前景及发展方向

1.3.1 高分子纳米纤维及其衍生物的应用前景

1. 组织工程

组织工程支架具有多孔结构,特别是细胞基质,它能支撑和引导细胞组织生长,并呈现三维空间结构来帮助细胞再生。采用纳米纤维制成的纺织制品支架已成功应用于组织工程中,如皮肤养护多孔膜、血管与中枢神经再生的管状纳米纤维制品、骨骼和软组织再生的三维空间组织支架等^[14]。目前使用的纳米纤维多采用静电纺丝技术与相分离法制得,直径范围在 100~900 nm。

2. 药物控释系统

对于临床患者来说,药物控释系统是生理上最可接受的方法,也是医学领域十分关注的课题。一般情况下,药剂粉粒尺寸相对较小,需要人工包敷材料予以封装,以更利于人体吸收。通过高分子纳米纤维进行药物控释的基本原理为:药物粉粒的溶解度是基于药剂和载体比表面积的变化而变化的^[15]。一般在纳米纤维药物控释系统中药剂与载体的混合方式主要有以下几种:①在纳米纤维成形过程中,将药剂负载于纤维载体表面;②将药剂与载体分别进行静电纺丝,并将两种纳米纤维交混并合;③将药剂与载体混合,通过静电纺丝制成复合纳米纤维;④使用的载体材料经静电纺丝后形成管状纳米纤维,再进行药剂封装。因此,对于药剂组分来说,纳米纤维可以改变药剂的溶解度,即可使药剂呈持续或脉冲方式输送。

3. 创伤敷料

高分子纳米纤维材料还可作为止血材料用于人体皮肤创伤和烧伤处理。采用静电纺丝方式将生物可降解高分子直接喷纺于人体皮肤的损伤部位,形成纤维网状包扎层,可促进皮肤组织生长从而促进伤口愈合,同时可减轻或消除传统创伤处理方式造成的疤痕^[16]。创伤用非织造布高分子纳米纤维膜具有的孔隙尺寸通常为 500~1000 nm,足以防止细菌通过气溶胶颗粒形式渗透。而且纳米纤维材料具有高比表面积,一般为 5~100 m²/g,这对于液体吸收和表面输送也是非常有利的。

4. 高效过滤材料

高效过滤技术主要表现在提高过滤介质的比表面积和减小介质材料的孔径尺寸方面。纳米纤维过滤介质主要用于气体、液体和分子过滤中,且其组成决定着