

纳米科学与技术



# 纳米复合纤维材料

朱美芳 等 著

 科学出版社

014032898

TB383  
208



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

介 简 容 内

纳米科学与技术

# 纳米复合纤维材料

朱美芳 等 著



TB383  
208

科学出版社

北京



北航

C1721130

808380410

## 内 容 简 介

纳米复合纤维材料是纳米科技应用于纺织化纤领域的一个成功范例,其特有的性质与功能使之成为科学研究和产业开发的热点。本书在总结近年来国内外研究与应用成果的基础上,介绍了纳米复合纤维材料的基本概念、研究进展和发展趋势,用于纳米复合纤维的功能纳米材料的制备与改性,纳米复合纤维材料的加工方法、基本结构与性能,并就通用纤维、高性能纤维、生物质纤维的纳米复合,静电纺纳米复合纤维,以及纤维和织物表面的纳米功能化,分别介绍了不同类型的纳米复合纤维材料的研究进展,同时介绍了纳米复合纤维材料的相关应用领域。

本书可作为高等院校高分子材料与工程及相关专业的本科生和研究生的教学参考书,也可供从事纤维材料等相关行业的研究、开发、生产、管理和应用的技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

纳米复合纤维材料 / 朱美芳等著. —北京:科学出版社,2014

(纳米科学与技术/白春礼主编)

ISBN 978-7-03-040070-3

I. 纳… II. 朱… III. 纳米材料-复合纤维-研究 IV. ①TB383 ②TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 043113 号

责任编辑:张淑晓 刘志巧 张力群 / 责任校对:韩 杨

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

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

\*

2014 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 3 月第一次印刷 印张:27 1/4

字数:530 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明 封松林 傅小锋 顾 宁 汲培文 李述汤

李亚栋 梁 伟 梁文平 刘 明 卢秉恒 强伯勤

任咏华 万立骏 王 琛 王中林 薛其坤 薛增泉

姚建年 张先恩 张幼怡 赵宇亮 郑厚植 郑兰荪

周兆英 朱 星

## 《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析,使之形成体系并付诸实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国,都将发展纳米科技作为国家战略。

兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去,为我国

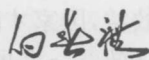


纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养作出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

## 前 言

随着科学技术的进步,纤维材料作为一种重要的基本材料和工程材料,朝着技术含量更高、受资源或环境影响更小的差别化、高性能、功能性、生物质等高新技术纤维材料的研发和产业化方向发展,在低碳经济、环境保护、社会安全和人类健康等社会生活的各个领域发挥着越来越重要的作用。因此,纤维材料的研究与开发也已发展为化学、材料、物理、生物、信息等多学科、多领域技术的交叉和融合,而纳米科学技术的出现与不断突破为纤维产业在新层次上的可持续发展提供了重要的物质和科技支撑。

纳米复合纤维材料正是纳米科技与纤维材料的成功结合,通过在纤维材料加工过程中以物理、化学方法引入纳米材料或纳米结构,制备具有特殊性能(或性能提升)和特定功能的纤维材料,从而改进和提高传统纤维的性能或赋予其特殊功能,提供更多更有效的高性能结构材料、高功能材料以及满足各种特殊用途的专用材料,为下游的开发应用创新提供了“无限可能”。纳米复合纤维材料已成为化纤产业中发展领域最宽、用途甚广的重要材料,其发展代表着全球化纤工业技术发展、市场需求的最新动向。

本书结合作者课题组多年来在纳米复合纤维材料方面的科研成果,并在总结近年来国内外相关研究与应用成果的基础上,系统阐述了纳米复合纤维材料的基本概念、研究进展和发展趋势,用于纳米复合纤维的功能纳米材料的制备与改性,纳米复合纤维材料的加工方法、结构与性能,并分别介绍了通用纤维、高性能纤维、生物质纤维及静电纺纤维的纳米复合,纤维和织物表面的纳米功能化,以及纳米复合纤维材料的相关应用领域。全书共分10章:第1章由朱美芳和周哲撰写;第2章由江晓泽、麻伍军和王仁林撰写;第3章由陈少华、胡泽旭、孟思和朱树琦撰写;第4章由夏梦阁、李莉莉和张思灯撰写;第5章由孙宾、毛宇辰、李莉莉、张思灯、陈少华、刘丰维和余淼淼撰写;第6章由陈少华、胡泽旭和孟思撰写;第7章由相恒学和王世超撰写;第8章由俞昊、朱树琦和黄涛撰写;第9章由范青青、李莉莉和孟周琪撰写;第10章由李莉莉、张思灯、刘晟、潘莹颖、范青青、陈少华、胡泽旭、孟思、李文姣和孟周琪撰写;全书由朱美芳主持撰写,朱美芳和周哲负责全书的修改与统稿。





## 目 录

## 《纳米科学与技术》丛书序

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 纳米复合纤维材料的基本概念	1
1.1.1 纳米科学与技术	1
1.1.2 纳米材料与纳米复合材料	2
1.1.3 纤维材料	3
1.1.4 纳米复合纤维材料	7
1.2 纳米复合纤维材料的研究进展	10
1.2.1 物理机械性能提高的纳米复合纤维	10
1.2.2 功能性纳米复合纤维材料	12
1.2.3 国内外纳米复合功能纤维产业现状	13
1.3 纳米复合纤维材料的发展趋势	14
1.3.1 全球化纤工业的发展趋势	14
1.3.2 纳米复合纤维材料发展前景	15
参考文献	17
第 2 章 成纤用纳米材料的制备与改性	19
2.1 成纤用纳米材料的种类	19
2.2 成纤用纳米材料的制备	20
2.2.1 物理法	20
2.2.2 化学法	23
2.3 成纤用纳米材料的表面改性	36
2.3.1 物理修饰	38
2.3.2 化学接枝改性	42
参考文献	54
第 3 章 纳米复合纤维材料的加工成型	59
3.1 纳米材料与成纤聚合物的复合	59
3.1.1 共混复合法	60
3.1.2 原位复合法	69
3.2 纳米复合纤维的纺丝过程	76

3.2.1	溶液纺丝	76
3.2.2	熔融纺丝	86
	参考文献	88
<b>第4章</b>	<b>纳米复合纤维材料的结构与性能</b>	<b>93</b>
4.1	纳米复合纤维的结构	93
4.1.1	复合纤维的结构表征	93
4.1.2	纳米复合纤维的相结构及其调控	94
4.2	纳米复合纤维的基本性能	106
4.2.1	力学性能	106
4.2.2	热学性能	113
4.3	纳米复合纤维的功能特性	119
4.3.1	抗紫外线纳米复合纤维	119
4.3.2	远红外发射纳米复合纤维	123
4.3.3	负离子发射纳米复合纤维	126
4.3.4	磁性纳米复合纤维	129
4.3.5	抗菌纳米复合纤维	135
4.3.6	抗静电纳米复合纤维	140
	参考文献	143
<b>第5章</b>	<b>通用纤维的纳米复合</b>	<b>151</b>
5.1	纳米复合芳香族聚酯纤维	151
5.1.1	高性能纳米复合聚酯纤维	152
5.1.2	导电功能纳米复合聚酯纤维	157
5.1.3	阻燃功能纳米复合聚酯纤维	159
5.1.4	抗紫外线功能纳米复合聚酯纤维	160
5.1.5	易染色纳米复合聚酯纤维	162
5.2	纳米复合脂肪族聚酰胺纤维	163
5.2.1	纳米金属、金属氧化物或金属盐复合脂肪族聚酰胺纤维	164
5.2.2	碳纳米材料复合脂肪族聚酰胺纤维	167
5.2.3	纳米黏土复合脂肪族聚酰胺纤维	171
5.2.4	其他纳米材料复合脂肪族聚酰胺纤维	173
5.3	纳米复合聚丙烯纤维	176
5.3.1	碳纳米材料复合聚丙烯纤维	176
5.3.2	纳米金属氧化物复合聚丙烯纤维	180
5.3.3	纳米黏土复合聚丙烯纤维	183
5.3.4	其他纳米材料复合聚丙烯纤维	186

5.4	纳米复合聚乙烯醇纤维	186
5.4.1	高性能纳米复合聚乙烯醇纤维	187
5.4.2	导电性纳米复合聚乙烯醇纤维	193
5.4.3	光敏性纳米复合聚乙烯醇纤维	198
5.4.4	磁性纳米复合聚乙烯醇纤维	199
5.4.5	气敏性纳米复合聚乙烯醇纤维	201
5.5	纳米复合聚丙烯腈纤维	203
5.5.1	碳纳米管复合聚丙烯腈纤维	203
5.5.2	纳米二氧化硅、纳米蒙脱土复合聚丙烯腈纤维	211
5.5.3	其他纳米材料复合聚丙烯腈纤维	213
5.6	纳米复合纤维素纤维	215
5.6.1	抗菌功能纳米复合纤维素纤维	217
5.6.2	磁性功能纳米复合纤维素纤维	219
5.6.3	碳纳米材料复合纤维素纤维	221
5.6.4	荧光功能纳米复合纤维素纤维	224
5.6.5	光催化功能纳米复合纤维素纤维	224
5.6.6	其他纳米复合纤维素纤维	226
	参考文献	228
<b>第6章</b>	<b>高性能纤维的纳米复合</b>	<b>238</b>
6.1	纳米复合高强高模聚乙烯纤维	238
6.1.1	碳纳米管复合高强高模聚乙烯纤维	239
6.1.2	其他纳米材料复合高强高模聚乙烯纤维	244
6.1.3	小结	247
6.2	纳米复合聚苯硫醚纤维	248
6.2.1	碳纳米材料复合聚苯硫醚纤维	249
6.2.2	纳米化合物复合聚苯硫醚纤维	254
6.2.3	小结	259
6.3	纳米复合聚对苯撑苯并二噁唑纤维	259
6.3.1	碳纳米管复合聚对苯撑苯并二噁唑纤维	261
6.3.2	纳米氧化物复合聚对苯撑苯并二噁唑纤维	267
6.3.3	小结	270
6.4	其他纳米复合高性能纤维	270
6.4.1	纳米复合芳香族聚酰胺纤维	271
6.4.2	纳米复合聚醚醚酮纤维	273
6.4.3	纳米复合聚酰亚胺纤维	276

6.4.4	小结	276
	参考文献	277
<b>第7章</b>	<b>生物质纤维的纳米复合</b>	<b>282</b>
7.1	生物质纤维	282
7.1.1	再生纤维素纤维	283
7.1.2	海洋生物质纤维(再生多糖纤维)	283
7.1.3	再生蛋白质纤维	283
7.1.4	生物质聚酯纤维	283
7.2	聚羟基脂肪酸酯(PHA)纤维的纳米复合	284
7.2.1	聚羟基脂肪酸酯简介	285
7.2.2	聚羟基脂肪酸酯的合成	286
7.2.3	聚羟基脂肪酸酯的分类	288
7.2.4	聚羟基脂肪酸酯的基本性质	289
7.2.5	聚羟基脂肪酸酯的纳米复合	291
7.2.6	小结	297
7.3	聚丁二酸丁二醇酯(PBS)纤维的纳米复合	298
7.3.1	聚丁二酸丁二醇酯简介	298
7.3.2	聚丁二酸丁二醇酯的结晶性质	299
7.3.3	聚丁二酸丁二醇酯的纳米复合	301
7.4	聚乳酸(PLA)纤维的纳米复合	302
7.4.1	聚乳酸简介	302
7.4.2	聚乳酸的合成	302
7.4.3	聚乳酸的基本性质	304
7.4.4	PLA纤维	305
7.4.5	聚乳酸的纳米复合	307
	参考文献	312
<b>第8章</b>	<b>静电纺纳米复合纤维</b>	<b>321</b>
8.1	静电纺丝原理	321
8.1.1	静电纺丝的历史	321
8.1.2	静电纺丝的定义	321
8.1.3	静电纺丝的装置	322
8.2	静电纺纳米复合纤维的制备方法	329
8.2.1	共混法	329
8.2.2	原位合成法	334
8.2.3	表面负载法	336

---

8.3 无机/聚合物复合纳米纤维的功能·····	338
8.3.1 抗菌功能·····	339
8.3.2 催化功能·····	343
8.3.3 导电功能·····	345
8.3.4 光电功能·····	347
8.3.5 磁性功能·····	348
参考文献·····	351
<b>第9章 纤维和织物表面的纳米功能化</b> ·····	<b>356</b>
9.1 纤维和纱线表面的纳米功能化·····	356
9.2 织物表面的纳米功能化·····	368
9.2.1 抗菌功能整理·····	368
9.2.2 抗紫外线功能整理·····	371
9.2.3 阻燃功能整理·····	374
9.2.4 电磁屏蔽功能整理·····	377
9.2.5 表面纳米化疏水整理·····	379
参考文献·····	382
<b>第10章 纳米复合纤维材料的应用前景</b> ·····	<b>389</b>
10.1 电子信息领域·····	389
10.1.1 传感器·····	389
10.1.2 执行器·····	395
10.2 土木建筑领域·····	397
10.3 交通运输领域·····	400
10.3.1 汽车工业·····	400
10.3.2 物流行业·····	401
10.3.3 高速交通工具·····	403
10.4 国防安全领域·····	403
10.4.1 防护装备·····	404
10.4.2 武器装备·····	406
10.4.3 隐身装备·····	406
参考文献·····	411
索引·····	416

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 纳米复合纤维材料的基本概念

### 1.1.1 纳米科学与技术

纳米科学与技术是在 20 世纪 80 年代末开始逐步发展起来的交叉、前沿学科, 纳米尺度上的多学科交叉以及由此产生的科学技术问题极大地拓展和深化了人们对客观世界的认识, 使人们能够在原子、分子水平上制造材料及器件, 导致信息、材料、能源、环境、医疗与卫生、生物与农业、纺织与轻工等领域的技术革命。因此, 纳米科技引起了全球的高度重视, 迅速发展成为一个具有广泛学科内容和巨大应用前景的研究领域, 并对人类的生产和生活方式产生了重大影响。

经过多年发展, 纳米科技领域大量原创性成果不断涌现, 在纳米材料、纳米加工观测手段、纳米器件研究与商业化的过程中取得了长足发展, 表现为纳米科技与传统产业结合的渐进性创新, 而破坏性创新则带来了一批新产品和新产业, 两者都创造和预示了纳米科技巨大的市场空间和发展前景<sup>[1]</sup>。据美国市场研究人员预测, 到 2014 年全世界纳米技术产业市场规模将达到 2.6 万亿美元<sup>[2]</sup>。因此, 21 世纪的纳米科技正在成为推动世界各国经济发展的主要驱动力之一, 与诸多产业领域的结合引发了产业的深度变革。未来二三十年, 纳米科学技术有望广泛应用于信息、能源、环保、生物医学、制造、国防等领域, 产生新技术变革, 促进传统产业的改造和升级, 并形成基于纳米技术的新兴产业。这也是驱动各国政府对纳米技术不断增加投入的主要原因。

纳米是一个长度计量单位, 1 纳米相当于十亿分之一米, 大约是 10 个原子并列的宽度。英国皇家学会和英国皇家工程院的研究报告 *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties*<sup>[3]</sup> 将纳米科学定义为: “关于在原子、分子和巨分子尺度上, 研究材料的现象和改造的科学。在该尺度范畴, 物质性质与更大尺度时相比有很大不同。”而将纳米技术定义为: “与在纳米尺度上的设计、表征、结构的制造和应用, 可控制形状和尺寸的装置和系统相关的研究。”纳米尺度(通常定义为 1~100 nm)材料的特性与大尺度的相比会发生很大变化, 这主要由于: 第一, 纳米材料较大的比表面积能使它的化学反应更容易进行, 并能影响它的力学和电特性; 第二, 量子效应在纳米尺度上开始对物质的性质起支配作用, 将影响材料的光、电和磁性质。纳米科技的最终目标是直接以原子、分子及物质在纳米



尺度上表现出来的新颖的物理、化学和生物学特性制造出具有特定功能的产品<sup>[4]</sup>。

纳米科学与技术的研究内容涉及领域广泛,主要包括<sup>[5]</sup>:纳米体系物理学、纳米化学、纳米材料学、纳米生物学、纳米电子学、纳米加工学、纳米力学七个相对独立又相互渗透的学科,以及纳米材料、纳米器件、纳米尺度的检测与表征三个研究领域。

### 1.1.2 纳米材料与纳米复合材料

#### 1. 纳米材料

纳米材料的制备和研究是整个纳米科技的基础。纳米材料广义上是三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围或者由该尺度范围的物质为基本结构单元所构成的材料的总称<sup>[6]</sup>。欧盟委员会在2011年10月将纳米材料定义为:一种由基本颗粒组成的粉状或团块状天然或人工材料,这一基本颗粒的一个或多个三维尺寸为1~100nm,并且这一基本颗粒的总数量在整个材料的所有颗粒总数中占50%以上<sup>[7]</sup>。由于纳米尺度的物质具有与宏观物质所迥异的表面效应、小尺寸效应、宏观量子隧道效应和量子限域效应,所以纳米材料是具有与普通材料截然不同的光、电、磁、热、化学或力学性能的一类材料体系。

纳米材料的分类有多种方式:

按维度可分为零维、一维、二维和三维纳米材料。如果材料的尺度在三维空间受限,即在空间三维尺度均为纳米尺度,则称为零维纳米材料,如纳米颗粒和原子团簇等;如果材料只在两个空间方向上受限,即在空间中有两维处于纳米尺度,则称为一维纳米材料,如纳米纤维(纳米线、纳米棒、纳米管)等;如果是在一个空间方向上受限,即有一维处于纳米尺度,则称为二维纳米材料,如纳米膜(片、层)等;如果在X、Y和Z三个方向上都不受限,但材料的组成部分是纳米孔、纳米粒子或纳米线,就称为三维纳米结构材料(纳米块体材料)。

此外,按化学组成可分为纳米金属、纳米晶体、纳米陶瓷、纳米玻璃、纳米高分子、纳米复合材料等。按材料物性可分为纳米半导体、纳米磁性材料、纳米非线性材料、纳米铁电体、纳米超导材料、纳米热电材料等。按材料用途可分为纳米电子材料、纳米生物医用材料、纳米敏感材料、纳米光电子材料、纳米储能材料等。

#### 2. 纳米复合材料

复合材料,按照国际标准化组织的定义为:由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而得到的一种多相固体材料<sup>[8]</sup>。多相体系和复合效果使复合材料区别于其他材料。在复合材料中,通常一相为连续相,称为基体,另一相为分散相,称为增强体。分散相可以是颗粒状、纤维状或弥散的填料,其以独立的相态分布在

整个连续相中,两相间存在相界面。复合材料各组分在保持各自某些特性的基础上,互相取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料而满足各种不同需求<sup>[9]</sup>。

因此,纳米复合材料就是指其中的分散相尺寸至少有一维为纳米尺度的复合材料<sup>[10]</sup>,即以树脂、橡胶、陶瓷和金属等基体为连续相,以纳米尺度的金属、半导体、刚性粒子和其他无机粒子、纤维、碳纳米管等为分散相,通过适当的制备方法将纳米分散相均匀性地分散于基体材料中,形成一相含有纳米尺度材料的复合体系。纳米复合材料包括无机-有机复合、无机-无机复合、金属-陶瓷复合,以及聚合物-聚合物复合等多种形式。

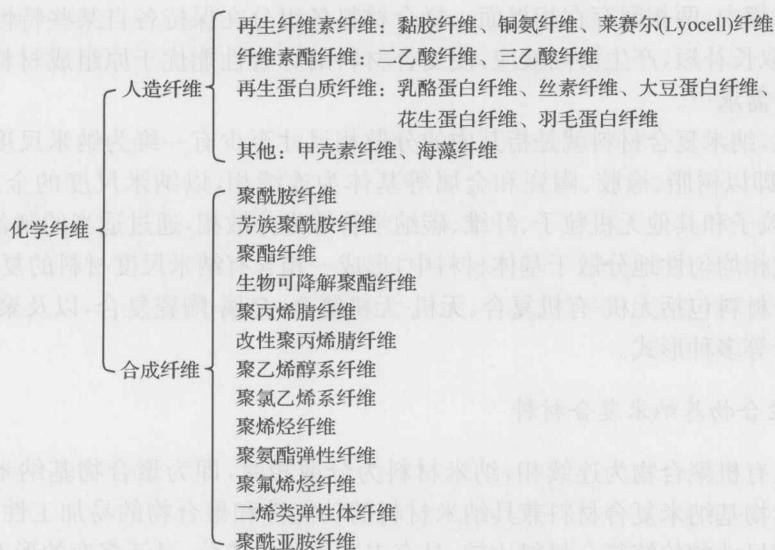
### 3. 聚合物基纳米复合材料

当以有机聚合物为连续相,纳米材料为分散相时,即为聚合物基纳米复合材料。聚合物基纳米复合材料兼具纳米材料的功能性和聚合物的易加工性,与具有较大微相尺寸的传统复合材料比较,具有丰富可调的成分、灵活多变的形态和可精确设计与调控的微结构,通过发挥其各组分形态、结构单元的小尺寸效应和界面间的协同效应,实现对材料功能的“剪裁”、“组装”和“复合”,赋予通用材料(如纤维)特殊功能性和性能的提升。聚合物纳米复合材料的常用制备方法包括溶胶-凝胶法、插层法、共混法、原位聚合法等。

聚合物基纳米复合材料的种类很多<sup>[11]</sup>。如果以零维的纳米颗粒作为结构单元,可以构成 0-0 复合型、0-2 复合型和 0-3 复合型三种,分别指纳米颗粒与聚合物颗粒复合、与聚合物膜材料复合和与聚合物块体材料复合。如果以一维的纳米管、纳米线等作为结构单元,可以构成 1-2 复合型和 1-3 复合型两种结构类型,分别指聚合物纳米纤维增强薄膜材料和聚合物纳米纤维增强块体材料。如果以二维纳米膜材料作为结构单元,可以构成 2-3 复合型纳米复合材料。此外,还有多层纳米复合材料、介孔纳米复合材料等结构形式。

#### 1.1.3 纤维材料

高分子材料,也称为聚合物,主要包括纤维、塑料、橡胶、胶黏剂和涂料等几大类。纤维通常是指长度与直径比在  $10^3$  以上(直径为几微米到几十微米)且具有一定柔曲性、强度、模量、伸长和弹性的细长形状的物体<sup>[12,13]</sup>。纤维按原料来源可分为天然纤维和化学纤维两类。天然纤维来自于自然界,分成植物纤维、动物纤维和矿物纤维三类,如棉、麻、羊毛、蚕丝、石棉等。化学纤维则是以天然的或合成的高聚物为原料,经过人工加工制成的纤维,可分成人造纤维(再生纤维)和合成纤维,如图 1-1 所示。

图 1-1 化学纤维按原料分类<sup>[14]</sup>

化学纤维的发展经历了人造纤维工业化、合成纤维工业化和化学纤维高速发展三个阶段。自 20 世纪 90 年代末,化学纤维工业生产技术进入成熟期,许多常规产品的市场竞争日益激烈,而随着材料科学和化纤产业的发展,传统的纤维材料性能不断改进和提高,新型纤维不断出现,扩大了其应用领域。这使得人们对纤维材料的认识不再限于服饰及流行产品,而是把纤维材料定义为重要基础材料,并且作为一种重要的工程材料,纤维材料也向着技术含量更高、受资源或环境影响更小的差别化、高性能、功能性、生物质等高新技术纤维材料的研发和产业化方向发展。

### 1. 差别化纤维材料

差别化纤维材料:指通过化学改性或物理变形,使常规纤维的形态结构、组织结构发生变化,提高或改变纤维的物理、化学性能,使常规化纤维材料具有某种特定性能和风格。加工方法包括在聚合及纺丝工序中进行改性,在纺丝、拉伸及变形工序中进行变形加工,以及采用高能射线( $\gamma$ 射线、 $\beta$ 射线),强紫外线辐射和低温等离子体对纤维进行表面蚀刻、活化、接枝、交联、涂覆等改性处理。

差别化纤维以改进织物服用性能为主,品种包括:多组分,复合,混纤,细旦,超细旦,四异(纤度、收缩、截面、材质),中空,易染等。

### 2. 高性能纤维材料

高性能纤维材料是指对来自外界的力、热、光、电等物理作用和酸、碱、氧化剂等化学作用有超常抵抗能力的一类纤维材料,按性能可划分为高强高模纤维、耐高