



中国石油大学(北京)学术专著系列

聚合物纳米复合材料

柯扬船 编著



科学出版社

www.sciencep.com

中国石油大学(北京)学术专著系列

聚合物纳米复合材料

柯扬船 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书基于作者十多年的研究工作,融合了作者及其合作者的研究成果和国内外前沿概况,系统阐述纳米材料与纳米复合材料的定义、分类,纳米结构与纳米分散原创理论及科学技术体系。以胶体化学、溶胶-凝胶及插层化学原理为基础,提出纳米前驱物分散及分子自组织或自组装方法,阐述纳米复合材料的多功能性、纳米效应、多级纳米结构与性能之间的关系及其在化工、石油工程、阻燃、阻隔及催化领域的应用。

本书可作为材料学、化学、化工、石油工程、高分子科学、涂料等领域科研工作者的参考书及高等院校相关专业研究生的教材或参考书,也可作为企业技术工作者及其他相关人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

聚合物纳米复合材料/柯扬船编著. —北京:科学出版社,2009

(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-024222-8

I. 聚… II. 柯… III. 高聚物-纳米材料:复合材料 IV. TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 033338 号

责任编辑:杨 震 周 强 张淑晓 / 责任校对:曾 茹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 3 月第一次印刷 印张:29

印数:1—2 500 字数:562 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

丛 书 序

大学是以追求和传播真理为目的,并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织。1953年,为适应国民经济和石油工业发展需求,北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立,成为新中国第一所石油高等院校。1960年成为全国重点大学。历经1969年迁校山东改称华东石油学院,1981年又在北京办学,数次搬迁,几易其名。在半个多世纪的历史征程中,几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神,在曲折中奋进,在奋进中实现了一次次跨越。目前,学校已成为石油特色鲜明,以工为主、多学科协调发展的“211工程”建设的全国重点大学。2006年12月,学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列。

学校在发展历程中,有着深厚的学术记忆。学术记忆是一种历史的责任,也是人类科学技术发展的坐标。许多专家学者把智慧的涓涓细流,汇聚到人类学术发展的历史长河之中。据学校的史料记载:1953年建校之初,在专业课中有90%的课程采用前苏联等国的教材和学术研究成果。广大教师不断消化吸收国外先进技术,并深入石油厂矿进行学术探索。到1956年,编辑整理出学术研究成果和教学用书65种。1956年4月,北京石油学院第一次科学报告会成功召开,活跃了全院的学术气氛。1957~1966年,由于受到全国形势的影响,学校的学术研究在曲折中前进。然而许多教师继续深入石油生产第一线,进行技术革新和科学研究。到1964年,学院的科研物质条件逐渐改善,学术研究成果以及译著得到出版。党的十一届三中全会之后,科学研究被提到应有的中心位置,学术交流活动的日趋活跃,同时社会科学研究成果也在逐年增多。1986年起,学校设立科研基金,学术探索的氛围更加浓厚。学校始终以国家战略需求为使命,进入“十一五”之后,学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路,尤其重视基础和应用基础研究。“十五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高,成为石油与石化工业的应用基础理论研究和超前储备技术研究以及科技信息和学术交流的主要基地。

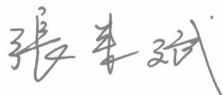
在追溯学校学术记忆的过程中,我们感受到了石大学者的学术风采。石大学者不但传道授业解惑,而且以人类进步和民族复兴为己任,做经世济时、关乎国家发展的大学问,写心存天下、裨益民生的大文章。在半个世纪的发展历程中,石大学者历经磨难、不言放弃,发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风,创造了不凡的学术成就。

学术事业的发展有如长江大河,前浪后浪,滔滔不绝,又如薪火传承,代代相继,火焰愈盛。后人做学问,总要了解前人已经做过的工作,继承前人的成就和经验,在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平,凸显石油科技特色,弘扬科学精神,积淀学术财富,学校从2007年开始,建立“中国石油大学(北京)学术专著出版基金”,专款资助教师们以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版,形成《中国石油大学(北京)学术专著系列》丛书。受学校资助出版的每一部专著,均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序,确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术专著的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说,学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发现的平台,也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者,在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标,并且在不断产生着引领学术前沿的新军,他们形成了一道道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚,为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作,在园丁们灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生,展现在我们眼前的一定是石大寥廓辽远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步,不断迈向新的高度!

中国石油大学(北京)校长



2008年3月31日

自序

纳米科技的关键特征之一是技术性,它的应用效果决定其生命力。在人口急速增长而资源相对匮乏的今天,开发新材料、开辟新应用、节省能源、保护生态环境以及在不可再生资源基础上实施新能源的技术创新,将带来一场真正意义的技术革命。纳米科技的出现可谓正当其时,它对传统产业的渗透、改造与挑战是科学发展的必然,在此过程中纳米科技得以飞速发展。

聚合物是传统产业——石油工业的下游产品,全世界的年产量已突破 2.01 亿吨,是全球经济与基础材料的最重要组成部分之一,涉及人类生活的方方面面。聚合物的可加工性、可塑性、再生性、多功能性与资源的多样性,使之成为纳米复合的首选体系。聚合物与无机纳米复合是制备高性能材料的重要方法之一,是构成纳米科技的重要组成部分。

在纳米复合材料的制备中,如何实现纳米颗粒的均匀分散一直是各类研究和应用中备受关注的技术难题,纳米颗粒的均匀分散是纳米结构的基础,也是复合材料性能优劣的核心因素;纳米复合材料的稳定性是尚未被关注或未被充分关注的问题;纳米复合材料的使用环境与纳米结构的变化行为,是有关安全性与高效性的重大问题;纳米材料的应用产生我们所期望的纳米效应及纳米复合效应,有赖于各种标准的建立;纳米复合材料中,还必然产生团聚效应;纳米复合材料效应的系统、准确甄别,为纳米科学与科技发展提出巨大挑战。

本书的出版将在较大程度上满足不同读者对纳米复合材料技术的深入理解的需要。书中在纳米组装、插层复合、纳米制备工艺及纳米结构与性能关系方面进行了详细论述。纳米分散、成核与结晶行为是探究纳米复合多相作用的窗口,书中用许多实例说明,简单掺混的纳米复合体系与微米复合体系性能存在极大的局限性,突出了纳米材料与高聚物复合的分散形态与界面匹配的意义。

本书特点之一是书中主要内容基于作者的研究积累,适当结合了合作者的研究成果,并涉及部分国内外的有关前沿与经典理论报道;本书特点之二是结合国内外的不同观点,对同一个问题提供不同观点的阐释并提出纳米科技方案,融合在本书的部分实例中;本书特点之三是征得作者旧著——《聚合物-无机纳米复合材料》出版商的同意,采纳成熟连贯的内容,从新的视角与我们最新成果和进展进行结合与阐述,向读者提供最新技术状态及新观点。

本书共 7 章,书中的许多内容涉及作者实际工作历程,所用资料及收录的合作者的观点都尽可能接近原始状态。

读者在参阅本书时,宜依据各自经验,获取所需知识与技术,提出各自独到的见解。

作 者

2008 年秋于北京

前 言

纳米技术于 20 世纪 80 年代产生,在概念、基础研究、试验和应用等诸多方面已经历 20 多年的发展,积累了大量的成功经验。纳米技术在电子、计算机芯片、航空材料、军事、印刷等各个领域已取得世人瞩目的巨大成就。然而纳米技术在材料、化工、石油与煤炭能源等领域的应用,并未取得像人们所期待那样的显著成就,也未形成完整的权威体系。

当前纳米科技的发展呈现多样化局面,这种发展不同于 20 世纪 40~80 年代时权威辈出,新概念和新技术往往出自几个大家学说的状况。当前纳米科技发展以知识爆炸、技术多样化和信息不对称为特点,形态万象,原创性理论和技术日益翻新。即使是同一纳米科技新概念、理论或技术,也会由众多学者衍生出多样化的内涵和解释。

纳米技术及其发展正是同一概念由众多科学家提出不同内涵和解释的新科技。化学学科强调合成纳米结构在 100 nm 或几百纳米尺度的物质;物理学科强调限定 100 nm 以内的纳米效应;化工学科强调几纳米至几十纳米的多孔材料;而应用科学提出纳米团聚体结构的 100 nm 尺度概念。纳米概念向化学、化工特别是石油化工与工程领域渗透过程中,不仅没有统一,反而有更加分化的趋势。每一领域的科学家都提出了相应的纳米技术概念。目前,这一局面在我国正在改变。

我国在纳米技术领域的部分论文和科研成果代表了国际最高水平,我国重视纳米技术基础研究,纳米芯片和纳米太阳能电池领域的成就举世瞩目。我国纳米技术向能源领域的深化顺应了国内外政治、经济发展的潮流,必将提供丰富的纳米效应实例,将在崭新的纳米效应基础上,提出普遍可接受的纳米技术新概念。

聚合物纳米复合材料是指以聚合物为有机相,与无机相或有机相纳米颗粒或纳米前驱体进行复合组装而得到的材料。由于聚合物的可加工性、可塑性与多功能性,使之成为纳米复合的主要载体之一。聚合物与无机纳米复合是纳米科学与技术的重要组成部分,也是制备高性能聚合物材料的重要方法之一。

在纳米复合材料中,纳米颗粒的均匀有效分散问题一直备受关注,也是纳米复合技术的关键内容。20 世纪 60 年代中期,利用“溶胶-凝胶”方法制备大量有机物-层状硅酸盐复合材料过程中,形成了胶体化学交叉学科——插层化学,为无机颗粒在有机物中的分散打下基础。利用这种插层技术,进行聚合或熔体复合插层反应,将纳米颗粒的分散与复合材料的制备完美地结合起来。实践证明,简单掺混的纳米复合体系与微米复合体系相比,在性能上没有太大区别。这可能正是纳米

技术在高聚物领域发展相对迟缓的主要原因。

本书奉献给读者的内容之一是基于纳米复合体系的多相性,将纳米复合材料多相体系之间的相互作用作为其性能与稳定性的关键。本书为此探讨了纳米组装与成核研究,以初步研究多相相互作用。其次,纳米技术在向各行业渗透,并在与这些行业结合中促进自身发展。本书据此提供了许多参考实例及作者原创的研究成果,在成书过程中邀请国内外知名专家,就同一个问题提供各自不同观点的纳米科技素材,由作者融合在一部分实例中。本书基于作者的研究积累,合理吸收国内外研究者的工作,结合有关的纳米材料前沿理论,也成为本书特点之一。由此,本书及时给读者提供了新技术与新观点。此外,纳米技术也在快速更新,向更高层次发展。存储单元的纳米化将计算机技术大大向前推进,突破理论预测极限;在微观与宏观之间的纳米尺度上对物质进行组装、排列与制备,实现了按照人的意志对材料进行裁剪的愿望。本书也包括与此相关的研究与展望。

本书由柯扬船撰写,采纳柯扬船等前期有关著作中的内容;采纳漆宗能、张立德、鄢捷年提供的部分章节的资料,由这些资料撰写成第2章综合性的内容;采纳本组承担的CNPC重点项目的资料、国家自然科学基金的部分成果、苏长明提供的纳米材料钻井液资料等,撰写成第7章的综合性内容。美国加利福尼亚大学P. Stroeve、Ahmet Palazouglu提供的英文资料与稿件主要由柯扬船翻译、审核,并补充于相关章节。

本书作者郑重感谢:

- 国家科学技术部、国家自然科学基金委员会的资助,特别感谢国家自然科学基金(20776157)项目资助;

- 中国石油大学(北京)学术专著出版基金的支持;

- 德国BASF公司的资助,该公司资助的研究内容因合同到期,部分内容已在本书中公布;

- 中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司资助,这些公司资助的内容因合同到期,部分内容已在本书中公布;

- 化学工业出版社,允许使用作者有关旧著中的文字和图表,已在文中相应位置标注;

- 科学出版社,允许使用有关原著中的部分图表,已在文中相应位置标注;

- 美国加利福尼亚大学P. Stroeve和Ahmet Palazouglu教授,允许使用他们提供的材料和图表并标注;

- 对与我们合作的其他有关公司深表谢意,与这些公司合作的文献与成果,已在书中相应位置标注;

- 为本书提供个别图表的组织和个人,采纳他们的图表已在文中相应位置标注;

- 张立德提供部分资料、图表及与作者交流资料,并在文中相应位置标注;
- 苏长明提供部分研究成果资料、应用报告、部分图表及与作者交流的资料,并在文中相应位置标注;

- 本组研究生校对和绘图,本组研究生吴天斌对论文图片整理编辑,研究生王玉国、夏岩峰、王英年、范颜晓、杨莉、魏光耀、肖海斌对著作进行详细校对、复印与制图工作;

对给予本书支持的其他单位或个人,也一并深表谢忱!

最后,由于编者学识水平所限,书中难免出现错误和不当之处,敬请读者批评指正。

目 录

丛书序

自序

前言

第1章 高聚物-纳米复合材料概论	1
1.1 导言	1
1.1.1 背景	1
1.1.2 自然界及人造纳米结构	2
1.1.3 纳米科学概念及简史	2
1.2 纳米材料与纳米复合技术	4
1.2.1 纳米材料概念	4
1.2.2 纳米复合与纳米效应	5
1.3 高聚物纳米复合体系	9
1.3.1 高聚物体系多级结构	9
1.3.2 高聚物体系分类	10
1.3.3 高聚物纳米复合体系分类	12
1.3.4 纳米复合材料制备方法	13
1.3.5 纳米材料及纳米复合材料前驱体	18
1.4 层状硅酸盐黏土材料	20
1.4.1 层状黏土材料分类	20
1.4.2 蒙脱土矿石性质	21
1.4.3 我国蒙脱土资源及分布概况	22
1.5 高聚物-黏土纳米复合材料	25
1.5.1 高聚物-层状硅酸盐纳米复合材料	25
1.5.2 高聚物-层状硅酸盐复合物材料分类	31
1.5.3 纳米复合材料加工成型方法	33
1.5.4 插层化学与层间膨胀热力学	33
1.6 高聚物-无机纳米复合材料	34
1.6.1 无机纳米复合材料概述	34
1.6.2 形态可控的有机-无机纳米复合材料	36
1.6.3 高聚物功能纳米复合材料	36

1.6.4	生物有机-无机纳米复合材料	39
1.6.5	纳米复合材料优异性和缺点及问题总结	41
1.7	纳米复合材料应用展望	44
1.7.1	纳米复合材料性能与应用前景	44
1.7.2	高聚物多尺度晶体	45
1.7.3	组装与自组装纳米载体及纳米催化剂	45
1.7.4	通用纳米添加剂	47
1.7.5	多功能性纳米涂料	47
1.7.6	纳米机械与纳米技术发展	48
	参考文献	49
第2章	高聚物无机纳米复合材料的凝聚态与分散性能	52
2.1	聚合物凝聚态与纳米结构	52
2.1.1	聚合物晶态与非晶态	52
2.1.2	聚合物纳米复合凝聚态	57
2.1.3	高分子非晶与液晶态	58
2.1.4	高分子聚集态结构性能关系	62
2.2	有机-无机纳米复合材料设计与制备	65
2.2.1	纳米复合材料的功能性	65
2.2.2	纳米复合材料的功能设计	65
2.2.3	纳米复合材料的合成设计	66
2.2.4	纳米复合材料的稳定化设计	66
2.3	聚合物纳米复合材料应用性能设计	67
2.3.1	热性能	67
2.3.2	热分解动力学研究	69
2.4	聚合物复合改性方法	71
2.4.1	聚合物改性方法	71
2.4.2	高聚物分散方法	73
2.5	“核-壳”颗粒分散	76
2.5.1	单分散 SiO ₂ 颗粒制备与改性	76
2.5.2	“核-壳”结构设计	80
2.5.3	“核-壳”颗粒聚合物分散方法	83
2.5.4	单分散颗粒复合分散	90
2.5.5	纳米复合材料的结晶与熔融行为	92
2.5.6	G-NPET 合成	97
2.5.7	红外光谱分析	98

2.5.8 纳米 SiO_2 在乙二醇中的分散行为	99
2.5.9 纳米 SiO_2 在 G-NPET 中的分散行为	99
2.5.10 结晶动力学分析	103
参考文献	115
第3章 无机与黏土纳米结构及纳米复合方法	118
3.1 黏土矿物晶体结构	118
3.1.1 黏土矿物分类与组成	118
3.1.2 主要黏土矿物晶体与纳米结构	119
3.2 黏土矿物特性及胶体化学原理	129
3.2.1 黏土矿物的电性	129
3.2.2 主要黏土矿物的水化作用	134
3.2.3 黏土矿物的吸附特性	136
3.2.4 黏土阳离子固定作用	139
3.2.5 黏土与有机物作用体系	139
3.2.6 黏土胶体化学基本原理	141
3.3 黏土矿物及纳米复合溶胶-凝胶体系	145
3.3.1 黏土水胶体的分散稳定与聚结性	146
3.3.2 金属及稀土纳米溶胶-凝胶	151
3.3.3 有机-无机纳米复合溶胶-凝胶	152
3.4 插层反应过程与方法	154
3.4.1 插层剂在片层间的运移行为	154
3.4.2 插层反应分类说明	155
3.4.3 插层体系标准与指标	157
3.5 插层纳米复合方法	161
3.5.1 层间插入法的技术要素	161
3.5.2 纳米复合材料与相容剂	162
3.5.3 层状化合物插层复合方法	163
3.5.4 纳米前驱体负载催化剂	166
3.5.5 纳米前驱体负载聚烯烃催化剂	169
3.6 纳米复合材料分散与加工成型	172
3.6.1 挤出分散	172
3.6.2 注塑成型	173
参考文献	173
第4章 聚合物-无机纳米复合材料制备与性能	176
4.1 聚酰胺-黏土纳米复合材料	177

4.1.1	简介	177
4.1.2	聚酰胺的单体	177
4.1.3	聚酰胺的催化剂	178
4.1.4	聚酰胺的聚合	180
4.1.5	聚酰胺-黏土纳米复合材料物化性能	182
4.1.6	碱催化及铸型尼龙黏土纳米复合材料	186
4.1.7	熔体插层尼龙 6-黏土纳米复合材料	187
4.1.8	尼龙纳米复合材料结构性能关系	189
4.1.9	尼龙 66/黏土纳米复合材料合成	190
4.1.10	尼龙纳米复合材料性能及应用	194
4.2	环氧树脂-黏土纳米复合材料	195
4.2.1	环氧树脂制备方法	195
4.2.2	环氧树脂层状硅酸盐纳米复合材料	200
4.2.3	环氧树脂-黏土纳米复合材料制备与剥离行为	201
4.2.4	环氧树脂-黏土纳米复合材料性能	210
4.2.5	环氧树脂-高岭土纳米复合材料	217
4.2.6	应用前景展望	218
4.3	聚酯-蒙脱土纳米复合材料	218
4.3.1	聚酯 PET-蒙脱土纳米复合材料	218
4.3.2	聚酯 PBT-蒙脱土纳米复合材料	232
4.3.3	聚酯无机纳米复合材料应用展望	238
4.4	聚烯烃-黏土纳米复合材料	239
4.4.1	概论	239
4.4.2	聚烯烃催化剂	239
4.4.3	聚烯烃的聚合工艺	242
4.4.4	聚烯烃纳米复合材料工艺方法	244
4.4.5	纳米前驱体负载负茂金属聚乙烯催化剂	251
4.5	其他高聚物纳米复合材料	254
	参考文献	254
第 5 章	纳米结构、纳米复合与组装效应	258
5.1	纳米结构与分子自组装	258
5.1.1	自组装与纳米结构	258
5.1.2	分子自组织或自组装	259
5.1.3	自组装技术应用	259
5.2	宏观尺度模板合成纳米阵列	263

5.2.1 主要模板制备与分类	263
5.2.2 模板合成纳米结构的方法	265
5.3 介孔固体和介孔复合体	269
5.3.1 介孔固体及复合体荧光增强效应	269
5.3.2 介孔固体及高聚物复合体阻隔效应	273
5.3.3 介孔复合体与层板纳米结构复合体环境敏感效应	275
5.4 有机-无机自组装纳米复合材料的功能性	276
5.4.1 分子自组装	276
5.4.2 微型功能新器件的纳米技术	280
5.5 表面活性剂-金属纳米自组装与复合材料	288
5.5.1 银金属纳米粒子制备方法	288
5.5.2 银金属纳米与有机体组装	289
5.5.3 聚电解质金属纳米复合的成核与组装	289
5.6 高聚物纳米复合材料相分离结构	296
5.6.1 聚酯层状硅酸盐纳米复合材料层状相分离	296
5.6.2 聚酯无机纳米颗粒相分离结构	297
5.7 高聚物有序相分离结构	301
5.7.1 高分子共混体系的相分离结构	301
5.7.2 嵌段共聚物共混形成超晶格有序结构	302
5.7.3 高分子相分离结构的形成	304
5.7.4 高分子溶液自组装体系	308
5.8 单分散颗粒聚合物组装复合体系	309
5.8.1 单分散二氧化硅颗粒及自组装	309
5.8.2 单分散颗粒制备过程与方法	310
5.8.3 单分散纳米颗粒复合与应用基础	312
5.8.4 分离催化与光学应用	313
参考文献	315
第6章 纳米复合材料的理论与表征方法	320
6.1 纳米微粒及纳米复合材料与纳米效应理论	320
6.1.1 超微粒理论	320
6.1.2 胶体稳定性理论	323
6.1.3 超微粒光散射理论	328
6.1.4 纳米效应形式	331
6.2 纳米复合材料界面理论方法	335
6.2.1 黏土与高聚物界面	335

6.2.2	纳米颗粒表面测试方法	337
6.2.3	纳米颗粒表面润湿性转化	339
6.3	黏土纳米结构与物性测试	342
6.3.1	黏土组成与结构	342
6.3.2	蒙脱石纳米结构性能	344
6.3.3	凹凸棒黏土纳米结构	346
6.4	纳米复合材料结构性能表征	353
6.4.1	纳米粒子成核效应	353
6.4.2	纳米粒子团聚效应	359
6.4.3	纳米粒子组装形态	360
6.5	介孔固体与纳米复合多级结构	365
6.5.1	介孔固体合成与表征	365
6.5.2	黏土纳米复合材料的多级结构	368
6.6	纳米结构与形态表征方法	371
6.6.1	X射线衍射方法	372
6.6.2	激光光散射方法	372
6.6.3	透射电镜方法	375
6.6.4	原子力显微镜方法	376
6.6.5	扫描电镜与图像分析方法	379
6.6.6	微粒粒度仪	380
	参考文献	380
第7章	聚合物-无机纳米复合材料的应用	384
7.1	无机纳米材料与应用方法	384
7.1.1	甄选无机原材料	384
7.1.2	纳米前驱体材料	386
7.1.3	纳米材料规模化制备工艺	388
7.1.4	纳米粉体与纳米复合材料生产工艺	389
7.1.5	纳米复合材料制备技术	393
7.2	载体与催化剂	394
7.2.1	催化剂载体	394
7.2.2	载负金属催化剂及加氢转化	396
7.2.3	黏土柱层模板及多孔非均匀结构	399
7.2.4	纳米催化剂	403
7.3	纳米复合涂料	407
7.3.1	概况	407

7.3.2	涂料纳米粒子的基本物性	407
7.3.3	环保与仿磁及粉末涂料	409
7.3.4	特殊功能涂料	410
7.3.5	纳米涂料应用的相关标准	411
7.4	纳米复合膜材料	413
7.4.1	高聚物纳米复合膜材料	413
7.4.2	纳米镀膜与纳米复合辐射防护	413
7.4.3	纳米复合材料光学应用特性	414
7.5	阻隔材料	416
7.5.1	聚丙烯纳米复合阻隔膜	416
7.5.2	尼龙纳米复合阻隔膜	417
7.5.3	阻隔包装容器	417
7.5.4	传统阻隔包装的替代	419
7.6	阻燃材料	421
7.6.1	阻燃增强纳米 PET 复合材料	421
7.6.2	水滑石阻燃纳米复合材料	422
7.6.3	阻燃材料的应用	422
7.7	纳米复合工程塑料	423
7.7.1	纳米复合工程塑料性能	423
7.7.2	纳米复合抗菌塑料	424
7.7.3	聚丙烯纳米复合管材料	425
7.7.4	汽车纺织用纳米复合零部件	426
7.8	纳米复合材料建材与纤维应用	427
7.8.1	橡胶复合制品	427
7.8.2	不饱和聚酯胶衣	427
7.8.3	纳米复合材料建材的性能	428
7.8.4	多维纳米相复合塑料	428
7.9	纳米复合材料石油与化工应用	429
7.9.1	多相微乳液与钻井储层保护	429
7.9.2	凹凸棒土纳米前驱体的应用	434
7.9.3	层状硅酸盐有序结构的应用	436
7.10	纳米复合材料应用展望	436
7.10.1	纳米材料技术与传统产业	437
7.10.2	纳米技术变革传统产业	439
7.10.3	应用风险	439