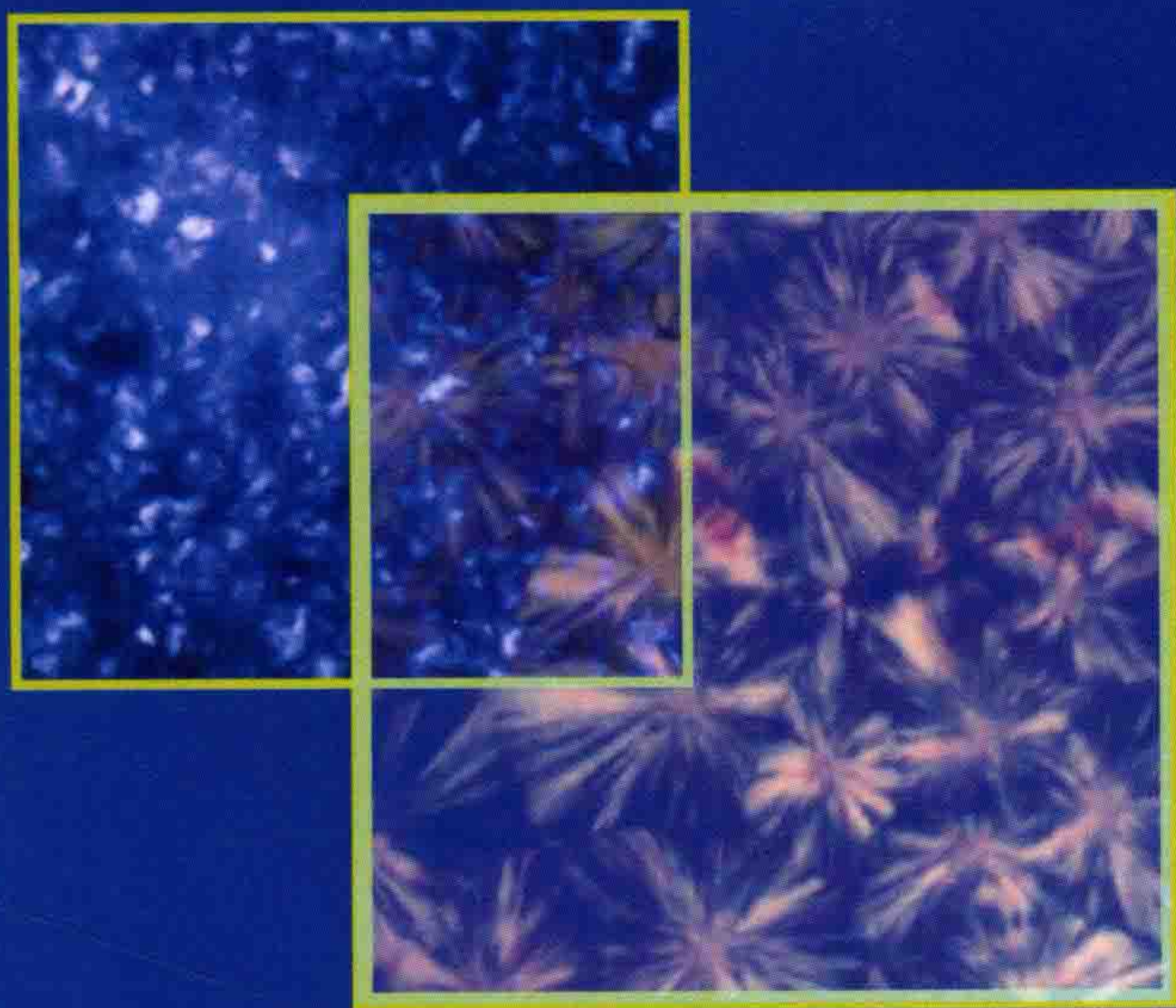


热塑性聚合物/ 多壁碳纳米管复合材料

郑玉婴 林锦贤 著



科学出版社

热塑性聚合物/多壁碳纳米管复合材料

郑玉婴 林锦贤 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书对碳纳米管的结构、性质、制备、功能化及其应用,碳纳米管复合材料的制备、性能及研究进展,计算机模拟在聚合物结晶中的应用等方面的知识进行概述。详细介绍了碳纳米管增强浇铸尼龙6复合材料的制备、性能、反应动力学、界面结构、非等温结晶动力学研究,聚丙烯/碳纳米管复合材料的制备、性能、结晶动力学及碳纳米管的成核效率,等规聚丙烯非等温结晶动力学参数的预测,聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的动态流变性能。本书致力于研究和开发具有牢固结合力的新型热塑性聚合物/多壁碳纳米管复合材料,并为其制备和应用提供新的思路和方法,为实现工业化应用提供实践基础和理论指导。

本书可供材料科学研究人员、工程技术人员和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

热塑性聚合物/多壁碳纳米管复合材料 / 郑玉婴, 林锦贤著. —北京: 科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053585-6

I. ①热… II. ①郑… ②林… III. ①热塑性复合材料
②炭素材料—纳米材料—复合材料 IV. ①TB33 ②TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 132115 号

责任编辑: 贾 超 宁 倩 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 华路天然

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 5 3/4

字数: 145 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

浇铸(MC)尼龙6具有质量轻、力学性能好、自润滑、耐磨、耐弱酸弱碱及一些有机溶剂、抗震吸声等优点,是一种性能优良的工程塑料,并且具有生产工艺简单、成本低、可以直接浇铸成型等特点。因此其在工业中大量替代钢、铝以及铜等金属材料,用于制作轴瓦、齿轮、滑轮、螺旋桨等机械零部件。然而普通MC尼龙6存在低温韧性差、尺寸稳定性欠佳和吸水率大等缺点;对于在高负荷条件下使用的零件,其耐磨性、自润滑性仍有不足;在要求高冲击性或抗静电或阻燃等的场合,MC尼龙6的使用也会受到限制。因此为进一步扩大MC尼龙6的应用范围,有必要对其进行改性。

聚丙烯(PP)是一种广泛用于注射成型制品、薄膜、纤维、挤出成型制品等的热塑性塑料,由于PP原料易得、价格低廉、耐腐蚀、拉伸强度和刚性较高以及无毒、无味等,已经成为五大通用塑料中需求增长最快的品种。但是,耐低温冲击性差、易老化和热变形温度低等缺点限制了PP在高附加值产品领域中的应用。因此对PP进行改性,扩大它的应用范围受到学术界以及产业界的持续关注。

利用无机纳米粒子改性聚合物是近几年的研究热点,添加少量纳米粒子就可显著提高聚合物的性能。由于碳纳米管具有诸多优异的特性,将其运用于聚合物树脂改性中,可以提高聚合物树脂的应用范围,是聚合物材料的增强及功能化填料,具有广阔的应用前景。本课题通过原位聚合法制备MC尼龙6/碳纳米管纳米复合材料,通过熔融挤出法制备聚丙烯/碳纳米管纳米复合材料,以期改进这两种热塑性聚合物材料,并赋予它们新的特性,扩大材料的应用领域;系统研究复合材料结构与性能的变化,为材料的加工与应用提供理论依据。因此,本课题的研究具有重要的实际应用和理论价值。

本书即是对课题所开展部分研究工作和取得成果的详细介绍和总结。全书共分 9 章。第 1 章主要介绍碳纳米管的结构、性质、制备、功能化、应用以及碳纳米管复合材料的研究进展；第 2 章介绍碳纳米管增强 MC 尼龙 6 复合材料制备及其表征；第 3 章介绍尼龙 6/碳纳米管复合材料浇铸成型反应动力学及其界面结构；第 4 章介绍 MC 尼龙 6/改性碳纳米管复合材料非等温结晶动力学研究；第 5 章介绍聚丙烯/碳纳米管复合材料的制备以及性能研究；第 6 章叙述聚丙烯/碳纳米管纳米复合材料的结晶动力学及碳纳米管的成核效率；第 7 章叙述等规聚丙烯非等温结晶动力学参数的预测；第 8 章叙述聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的动态流变性能；第 9 章为本书的一些结论。

在编写过程中，博士研究生邱尚长提供研究内容，对本书的内容和研究成果付出了努力，做出了贡献，在此表示由衷的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请读者批评指正。

著 者

2017 年 2 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 碳纳米管的研究进展	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 碳纳米管的结构	1
1.1.3 碳纳米管的性质及其应用	2
1.1.4 碳纳米管的制备	4
1.1.5 碳纳米管的纯化	6
1.1.6 碳纳米管的功能化及其应用	7
1.2 碳纳米管复合材料的研究进展	9
1.2.1 概述	9
1.2.2 碳纳米管复合材料的制备	9
1.2.3 碳纳米管复合材料的性能	12
1.3 浇铸尼龙的改性研究	13
1.3.1 概述	13
1.3.2 MC 尼龙的聚合	14
1.3.3 MC 尼龙的改性	17
1.4 聚丙烯的改性研究	18
1.4.1 聚丙烯简介	18
1.4.2 聚丙烯的改性技术	19
1.5 碳纳米管在聚合物改性中的应用	21
1.6 计算机模拟在聚合物结晶中的应用	22
1.7 智能微粒群算法	23

第 2 章	碳纳米管增强 MC 尼龙 6 复合材料	25
2.1	引言	25
2.2	碳纳米管增强 MC 尼龙 6 复合材料的制备	26
2.2.1	实验原料预处理	26
2.2.2	复合材料的制备	26
2.3	碳纳米管增强 MC 尼龙 6 复合材料的表征	27
2.3.1	羟基多壁碳纳米管的改性	27
2.3.2	聚合条件对 ϵ -己内酰胺阴离子聚合单体 转化率的影响	32
2.3.3	聚合条件对复合材料特性黏度的影响	35
2.3.4	碳纳米管含量对复合材料吸湿率的影响	38
2.3.5	MC 尼龙 6/碳纳米管纳米复合材料的热失重 分析(TG)	39
2.3.6	碳纳米管增强 MC 尼龙 6 复合材料的力学 性能分析	41
2.4	本章小结	44
第 3 章	尼龙 6/碳纳米管复合材料浇铸成型反应动力学及其 界面结构研究	45
3.1	引言	45
3.2	聚合机理	46
3.2.1	绝热法的基本原理	48
3.2.2	单体转化率的求解	48
3.2.3	非等温反应动力学	52
3.3	MC 尼龙 6/碳纳米管复合材料表征	54
3.3.1	MC 尼龙 6 及其复合材料反应动力学分析	54
3.3.2	X 射线衍射(XRD)表征分析	58
3.3.3	偏光显微镜(POM)观察	59

3.3.4	场发射扫描电子显微镜表征复合材料断面形貌	61
3.3.5	MC 尼龙 6/碳纳米管复合材料的 Molau 实验	61
3.3.6	MC 尼龙 6/碳纳米管复合材料的非等温结晶下的 熔融行为	62
3.4	本章小结	64
第 4 章	MC 尼龙 6/改性碳纳米管复合材料非等温结晶 动力学研究	65
4.1	引言	65
4.2	MC 尼龙 6/改性碳纳米管复合材料非等温结晶动力学	66
4.2.1	MC 尼龙 6/改性碳纳米管复合材料非等温 结晶行为	66
4.2.2	MC 尼龙 6/改性碳纳米管复合材料非等温 结晶动力学模型研究	68
4.2.3	MC 尼龙 6/改性碳纳米管复合材料非等温 结晶活化能	74
4.3	本章小结	77
第 5 章	聚丙烯/碳纳米管复合材料的制备及性能研究	79
5.1	引言	79
5.2	聚丙烯/碳纳米管复合材料的制备	80
5.3	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的性能表征	80
5.3.1	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的拉伸强度	80
5.3.2	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的热变形温度	82
5.3.3	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的熔体流动速率	83
5.3.4	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的电性能	84
5.3.5	复合材料的结晶形态	85
5.3.6	复合材料的 XRD 测试分析	86
5.3.7	复合材料在不同温度下结晶后的熔融行为	87
5.3.8	复合材料的热稳定性	89

5.4	本章小结	90
第 6 章	聚丙烯/碳纳米管复合材料的结晶动力学及碳纳米管的成核效率	91
6.1	引言	91
6.2	聚丙烯/碳纳米管复合材料结晶动力学	92
6.2.1	聚丙烯/碳纳米管复合材料等温结晶动力学	92
6.2.2	聚丙烯/碳纳米管复合材料非等温结晶动力学	99
6.2.3	成核效率	104
6.2.4	非等温结晶的结晶活化能	106
6.3	本章小结	106
第 7 章	等规聚丙烯非等温结晶动力学参数的预测	108
7.1	引言	108
7.2	理论部分	109
7.3	模拟方法	113
7.4	结晶动力学参数	115
7.4.1	非等温结晶动力学参数	116
7.4.2	结晶活化能	119
7.4.3	球晶尺寸	119
7.4.4	晶核密度	120
7.5	本章小结	121
第 8 章	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的动态流变性能	123
8.1	引言	123
8.2	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的性能表征	124
8.2.1	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的动态流变性能表征	124
8.2.2	聚丙烯/多壁碳纳米管复合材料的松弛时间谱	131
8.3	本章小结	143
第 9 章	结论	144
	参考文献	148
	索引	174

第1章 概述

1.1 碳纳米管的研究进展

1.1.1 概述

自 1991 年碳纳米管(carbon nanotube, CNT)被发现^[1]以来,就以其独特的结构和性质成为科学研究的热点之一。碳纳米管是由单层或多层碳原子形成的类石墨结构的六边形网络卷成的无缝、同轴中空的纳米级管体。其中,由多层碳原子构成的同轴圆管称为多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotube, MWNTs),只由一层碳原子构成的同轴圆管称为单壁碳纳米管(single-walled carbon nanotube, SWNTs)。由于碳纳米管的直径很小,有很大的长径比,可视为准一维纳米材料。碳纳米管具有 sp^2 杂化碳原子结构,形成很大的共轭 π 体系。这种独特的纳米结构使得碳纳米管拥有许多独特的性质^[2,3],如具有巨大的拉伸强度和很高的长径比,以及优良的导电和导热性能^[4-7]。碳纳米管在电子、材料科学、储氢等领域都得到了很好的应用^[5,8-18]。

1.1.2 碳纳米管的结构

碳纳米管可以看作是由圆柱体的杂化碳原子石墨片卷曲而成的,其直径范围为 0.7~10nm,而长度可达数十微米。多壁碳纳米管的管壁层间距约为 0.34nm。单壁碳纳米管可以看成是由石墨平面卷曲并在其两端罩上碳原子端帽的封闭结构,多壁碳纳米管是若干个单层管同心套叠而成,端帽结构在碳纳米管的应用中起重要作用。

用^[19-21]。一般情况下，把金刚石、石墨和 C_{60} 分别看成是三维、二维和零维材料，而将碳纳米管看成是一维材料。碳纳米管中石墨平面的卷曲方式决定着碳纳米管的直径、螺旋性及其晶格常数，也决定其物理性质。根据德雷斯尔豪斯(Dresselhaus)理论，碳纳米管的手性决定其电学性能，即碳纳米管可以是金属性的，也可以是半导体性的。不同手性的碳纳米管模型如图 1-1 所示。

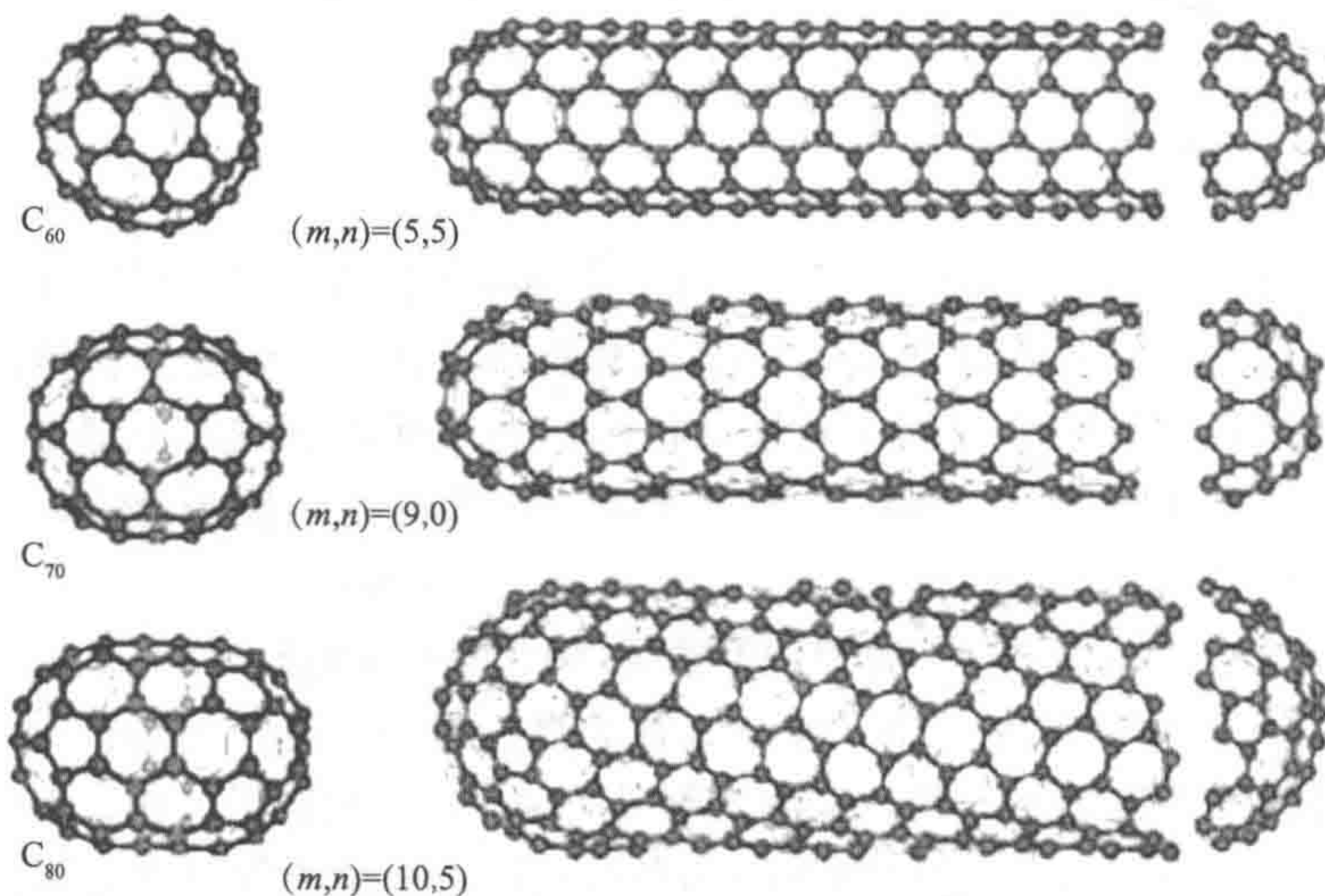


图 1-1 C_{60} 、 C_{70} 、 C_{80} 与各种不同手性的碳纳米管之间的关系(从上到下依次为锯齿形的碳纳米管、扶手椅形的碳纳米管和有一定角度的碳纳米管)

1.1.3 碳纳米管的性质及其应用

1. 电磁性能

共轭的 π 体系使碳纳米管中的电子能在共轭的碳原子之间自由运动，使碳纳米管具有良好的导电性能^[22-24]。可以通过改变碳纳米管的手性来调节碳纳米管的导电特性，使碳纳米管具有半导体性能。碳纳米管的一维电子结构具有量子效应，以及独特的电子传输

性能,使制备单分子晶体管成为可能。另外,碳纳米管具有电磁屏蔽特性。在超大规模集成电流中,由于器件尺寸的减小,导线之间的电磁干扰严重,利用碳纳米管的电磁屏蔽性质可以有效地减少和防止导线之间的电磁干扰,提高器件的可靠性。此外,碳纳米管比表面积大、结晶度高、导电性好,微孔大小可通过合成工艺加以控制,将其用作电双层电容器电极材料,具有高功率、长周期和结构完整的特点^[25-27],是一种理想的双电层电容器电极材料。

碳纳米管在磁学方面有两个显著的特性,即各向异性和较大的抗磁化率。碳纳米管是一维纳米材料,相应磁特性的各向异性表现明显。将碳纳米管的这一特性应用于航天器和卫星的电磁开关,是目前碳纳米管应用研究的一个热点。

2. 场发射性能

碳纳米管纳米级尺寸决定了其较低的阈值电压,即在较低的工作电压下即可产生较大的局部场强,从而发射电子,并且由于较强的碳碳结合键,使碳纳米管可以长时间工作而不受损害,具有良好的场致电子发射性能。另外,碳纳米管具有很高的场发射电流密度,载流能力很大,能够承受较大的场发射电流,在普通高真空度下长期稳定地工作^[28-31]。另外,碳纳米管顶端形成的电场使电子较易发射,是一种低逸出功材料,无需对其电子施加额外的能量,可以形成冷场致发射。利用这一特性,碳纳米管不仅可以提高场发射平面显示器的性能,而且能够降低能耗,有着广阔的应用前景。

3. 热传导性能

碳纳米管具有高热导率和单向导热的热学性能^[32,33],是已知的最好的导热材料。碳纳米管凭借超声波在其一维方向传递热能。以 sp^3 杂化形成结合的碳碳键具有较高的热导率,而碳纳米管的碳碳键以更强的 sp^2 杂化态存在,并且小的径向尺寸降低了声子的维数,更有利于声子的传导。碳纳米管的热导率和碳纳米管的长度有一定的关系。

碳纳米管优异的导热性能将使它成为今后计算机芯片的导热板,也可用于发动机等各种高温部件的散热部件。

4. 储氢材料

碳纳米管是极具潜力的储氢材料^[34-38],其表面和内部都具有分子级细孔,比表面积大,气体可以在管中凝聚,从而吸附大量气体。从现有的实验结果和理论计算来看,碳纳米管储氢能力达到 DOE 标准,即 6.5%(质量分数)和 62kg/m^3 ,在储氢应用方面具有很大的发展潜力。碳纳米管吸附的氢气量和碳纳米管的表面积、直径、表面活化和掺杂有很大关系。将碳纳米管应用在燃料电池系统中用于氢气存储,对电动汽车的发展具有非常重要的意义。

5. 碳纳米管复合材料

由于碳纳米管的碳原子之间通过强共价键结合,其结构是比较完整的碳网格,缺陷很少,其强度接近于碳碳键的强度。而且,碳纳米管是中空的笼状物并具有封闭的拓扑构型,能通过体积变化来呈现弹性,具有优异的力学性能^[39,40]。碳纳米管的强度和韧性极高,弹性模量也极高。单壁碳纳米管的拉伸强度是钢的 100 倍,而质量只有钢的 1/6,可将其用作复合材料的增强体用于高技术领域。另外,碳纳米管还具有优良的热、电和光学性能^[41-44],在提高材料力学性能的同时,还能提高材料在热、电和光学方面的性能。碳纳米管聚合物复合材料是第一个得到工业应用的碳纳米管复合材料。由于较低的加入量和纳米级尺寸,在提高复合材料光电性能时不会降低其力学及其他性能,适用于塑料件的成型加工。

1.1.4 碳纳米管的制备

1. 石墨电弧法

石墨电弧法是最早用于制备碳纳米管的工艺方法^[45],与制备富

勒烯类的方法相似。在惰性气体气氛中,在两个相距很近的石墨电极间加上高电压至放电,在电弧放电的过程中,阳极石墨棒上的碳物质迅速蒸发,随后蒸发的碳原子团簇形成多种碳物质形态,沉积于阴极石墨棒上,其中便包括碳纳米管^[46-54]。电弧法生成的碳纳米管结晶性高、尺寸单一,是目前合成高质量碳纳米管主要采用的方法,但制备过程通常十分剧烈,难以控制进程和产物,对分离和提纯有很多不利的影响。为了提高产物中碳纳米管的含量,可以在阴极中加入催化剂。采用过渡金属(镍或铁)、双金属(稀土金属和过渡金属)催化剂制备高产量的单壁碳纳米管有很好的效果^[55-57]。

2. 激光蒸发法

激光蒸发法是指采用激光束刻蚀高温炉中的石墨靶,惰性气体带动石墨蒸发产物沉积在水冷铜柱上,碳纳米管就存在于该产物中。Smalley 等首次使用激光蒸发法实现了单壁碳纳米管的批量制备,并用类似的设备制备出多壁碳纳米管^[58-61]。在激光蒸发环境中,多壁碳纳米管是纯碳蒸气的固有产物。在多壁碳纳米管的生长过程中,端部层与层的边缘碳原子可以成键,从而避免端部的封口,促进多壁碳纳米管生长。激光蒸发法的主要缺点是碳纳米管的纯度较低,且需要昂贵的激光器,成本高,难以推广应用。

3. 化学气相沉积法

化学气相沉积法(chemical vapor deposition, CVD)的基本原理为含有碳源的气体 C_6H_6 、 C_2H_2 、 C_4H_4 等流经催化剂表面时分解,沉积生成碳纳米管。这种方法具有生长条件可控、易于批量生产等优点,且得到的碳纳米管强度高,是合成碳纳米管的主要方法之一。Yacaman 等^[62]最早采用铁和石墨颗粒作催化剂,在 700°C 常压条件下分解乙炔获得碳纳米管。还有研究分解其他气体(如乙烯^[63-75]等)也成功地获得了碳纳米管。催化剂由金属催化剂和载体组成,一般为过渡金属、镧系元素或其混合物。含有过渡金属的催化剂催化效果

较好,原因在于金属颗粒中碳原子的扩散能小、扩散系数大,有利于碳原子在金属中的扩散,从而保证所需的碳浓度,并能提高碳原子的活性。碳纳米管的直径也在很大程度上受催化剂颗粒尺寸的影响。由于金属原子吸附能随吸附簇尺寸的减小而增加,易吸附碳原子,同时金属簇愈合缺陷的能力也随尺寸的减小而增强。另外,催化剂的载体、金属催化剂与载体的配比、反应工艺条件对碳纳米管的制备都有着很大的影响。通过选择催化剂种类与粒径及控制工艺条件,可获得纯度较高、尺寸分布较均一的碳纳米管^[76]。

4. 催化热解法

催化热解法是在高温及催化剂的作用下,热解易分解的有机物碳源产生碳原子,在催化剂颗粒上被催化,重新排布生成碳纳米管。采用不同的原料气制得的碳纳米管的量、形貌、性能等各不相同。400~1000℃的温度范围内,甲烷、一氧化碳、乙炔、苯等均可作为碳源。催化剂一般使用过渡金属元素及其组合^[77]。另外,将有机金属二茂铁、二茂镍和二茂钴^[68, 78-81]在高温氩气和氢气中热解也可以得到碳纳米管。这些金属化合物热解后不仅提供了碳源,同时也提供了催化剂粒子,其生长机制与催化热解法相似。

5. 其他方法

除了对传统制备方法的改进,全新制备技术的研究也取得了很多成果。制备碳纳米管的其他方法还有模板法^[82]、固相复分解反应制备法^[83]、水热法^[84]、超临界流体技术^[85]、水中电弧法^[86]等。

1.1.5 碳纳米管的纯化

无论用上述何种方法制备的碳纳米管都会有杂质存在,这些杂质与碳纳米管混杂在一起,限制了碳纳米管的研究和应用,需要对碳纳米管进行纯化。碳纳米管的纯化有三方面的意义:一是除去催

化剂颗粒，二是除去杂质碳，三是消除碳纳米管生长过程中的结构缺陷。提高碳纳米管纯度的方法主要是利用杂质和碳纳米管间的物理和化学性质不同，使用特殊的物理和化学方法分离出碳纳米管。

物理方法是根据碳纳米管与杂质在粒径、形状、密度和电性能等方面的差异进行分离，包括离心分离法、电泳纯化法、过滤纯化法和空间排斥色谱法等。其机理通常为通过超声分散，使黏附在碳纳米管上的杂质脱落，通过各种分离手段进行纯化。物理方法不会破坏碳纳米管的结构，但分离效果不佳^[87]。

化学方法是根据无定形碳、碳纳米颗粒和碳纳米管等杂质沉积碳之间氧化速率的不同来实现分离的。其中无定形碳为多层状结构，边缘存在较多悬挂键，能量较高，最容易被氧化；碳纳米颗粒为多面体结构，有较多的五元环存在，有较高的反应活性，易与新生的氧原子反应；碳纳米管结构稳定，反应活性较低，能够稳定存在^[88]。基本方法包括液相腐蚀法^[89]、气体氧化法^[90-92]等。此外，还有高温退火^[93]和化学改性^[94]等其他纯化方法。

1.1.6 碳纳米管的功能化及其应用

为了进一步发挥和改善碳纳米管的性能，碳纳米管的功能化处理已经成为目前研究的重要领域。对碳纳米管进行功能化修饰的方法包括物理法和化学法等多种方法，可得到不同性能的碳纳米管衍生物。

1. 掺杂

掺杂是改变碳纳米管电性能的方便有效的方法，化学掺杂可增加自由电荷载流子的密度从而增强其导电性能。掺杂碳纳米管可被视为一种新的合成导体，其电学性能取决于其组分。

2. 表面覆层

碳纳米管经表面活性剂或化学预处理后，通过表面化学电镀、

气相沉积、高能束流辐照等方法,使其表面可以被一些金属离子或金属团簇所修饰^[95, 96]。例如, Satishkumar 等^[97]制备了 Au、Pt 和 Ag 纳米颗粒修饰的经酸处理的碳纳米管; Chen 等^[98]也制备了表面镀钴的碳纳米管,得到了质量非常好的镀层。

3. 填充

碳纳米管由于具有管状结构,可作为模板来制备其他的一维纳米材料,即在碳纳米管中填充金属或氧化物^[99-103],或包覆不同的材料制得各种纳米金属导线。金属引入碳纳米管很大程度地改变了它们的传导性能、电性能、磁性能和力学性能,在基础理论和潜在应用方面有相当大的意义。

4. 表面化学修饰

π 键使其表面既不亲水也不亲油,在各种溶剂中均难以分散和溶解^[104, 105],限制了碳纳米管的应用^[106]。采用表面化学修饰的手段对碳纳米管进行改性,不但可以提高碳纳米管在水中和有机溶剂中的溶解性,还可以增加碳纳米管与基体的相容性。碳纳米管的管壁是由碳的六元环构成的,不同种类的化合物与碳纳米管之间相互作用,通过化学反应增加碳纳米管在不同溶剂中的溶解性能,从而将碳纳米管引入有机、无机和生物体系等^[107-110]。

利用氧化剂对碳纳米管进行氧化,是碳纳米管在结构缺陷处被打断,并接上一些官能团,如羧基、羟基、羰基等,在此基础上进行下一步化学反应。目前采用的氧化剂主要为硝酸、混酸(浓硫酸/硝酸)、中性双氧水、氢氧化钾、高锰酸钾等。其中,强酸处理碳纳米管得到了广泛应用^[111-113]。Liu 等^[111]就利用强酸超声氧化的方法首次合成了可溶性的单壁碳纳米管,这种碳纳米管在通常的有机溶剂中有较好的溶解性。利用氧化碳管上的官能团进行进一步的改性,如通过酯化^[114]、酰胺反应^[115, 116],各种有机分子或高聚物就能连接到碳纳米管上。