

清华大学优秀博士学位论文丛书

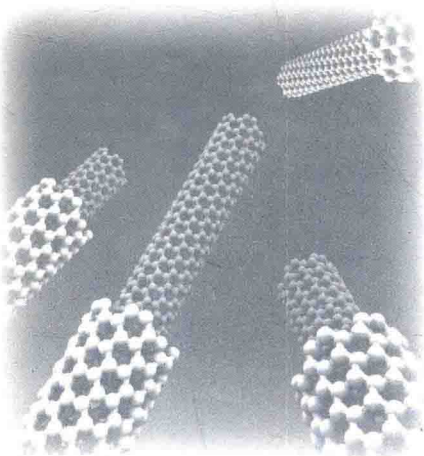


tsinghua
theses

宏观长度结构完美的 超长碳纳米管的可控制备 与性质研究

张如范 著 Zhang Rufan

Controlled Synthesis and Property Study of
Macroscale Ultralong Carbon Nanotubes with Perfect Structures



清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

宏观长度结构完美的 超长碳纳米管的可控制备 与性质研究

张如范 著 Zhang Rufan

Controlled Synthesis and Property Study of
Macroscale Ultralong Carbon Nanotube with Perfect Structures



清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书对超长碳纳米管的生长机理进行了研究,探究了实现宏观长度、结构完美的超长碳纳米管可控制备的方法,并通过一系列结构和性能表征来验证其结构和性能。同时,为方便对所制备的超长碳纳米管进行结构和性能方面的表征,发展出一套超长碳纳米管的有效标记和可控操纵技术。针对超长碳纳米管受限生长的特点,对其可控转移和后续应用开展了探索。本书为碳纳米管的制备、标记和应用的发展提供思路,可供碳纳米管相关领域的研究者参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

宏观长度结构完美的超长碳纳米管的可控制备与性质研究/张如范著. —北京:清华大学出版社,2018

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-46220-0

I. ①宏… II. ①张… III. ①碳—纳米材料—研究 IV. ①TB383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 020052 号

责任编辑:魏贺佳

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:11.75

字数:196 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版

印次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:89.00 元

产品编号:071106-01

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际、通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权利和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生指导教师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12000多场,参与博士生达38000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生们,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。



清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

Supervisor's Foreword

Carbon nanotubes (CNTs) have drawn intensive research interest during past 25 years for their unique Dirac cone structure which can be refer to as Dirac carbon materials. CNTs are typical one-dimensional single-crystal nanomaterials, they have excellent mechanical, thermal and electrical properties and wide applications. Ultralong CNTs refers to the horizontally aligned CNT arrays which are usually grown on flat substrates, parallel with each other with large intertube distances. They usually have perfect structures, and lengths up to centimeters, even decimeters. Ultralong CNTs are promising candidates as building blocks for next generation high speed chips and sensors, transparent displays, optical-electronic device, superstrong tethers, aeronautics and aerospace materials, etc. The controlled synthesis of ultralong CNTs with perfect structures is the key to fully exploit the extraordinary properties of CNTs. It has always been a great challenge how to grow macroscale single-crystals with no defects or monothematic colored. Thus, the synthesis of ultralong CNTs with monothematic colored is of significant importance from both fundamental and industrial aspects.

The main aim of this Ph. D. thesis is to develop an innovative CNTs growth and visualization method that can control synthesis of ultralong CNTs with perfect structures and explore their excellent properties. A deep understanding of the CNT growth mechanism is the first step for the controlled synthesis of ultralong CNTs with high quality. The equal deactivation mechanism of Schulz-Flory distribution is found can describe the growth mechanism for ultralong CNTs very well, which provide with a theoretical tool to control the defects in the as-grown ultralong CNTs. With these approaches, ultralong high-quality CNTs with different

structures can be obtained. By completely eliminating the factors which may induce defects in the CNT walls, ultralong CNTs with perfect structures can be obtained. Their chiral indices keep unchanged for several centimeters long along the axial direction of the CNTs.

Direct visualization and manipulation of individual carbon nanotubes in ambient conditions is of great significance for their characterizations and applications. With the assistance of TiO_2 nanoparticles, individual carbon nanotubes can be easily manipulated under an optical microscope at macroscopic scale and in ambient conditions. With the help of this technology, the as-grown ultralong CNTs exhibit superhigh mechanical strength (>100 GPa) and their breaking strain ($>17.5\%$) reach the theoretical limits. Superlubricity is realized in centimetres-long double-walled carbon nanotubes (DWCNTs) under ambient conditions by pulling out inner shells of multiwalled carbon nanotubes.

We hope that this Ph. D. thesis will shed light on the controlled synthesis of ultralong CNTs with perfect structures and excellent properties. Moreover, the growth mechanism and controlled synthesis of ultralong CNTs with perfect structures as well as the optical visualization, manipulation tool also offers a good model for other one-dimensional nanomaterials.

Wei Fei

Department of Chemical Engineering, Tsinghua University

December 2016

摘 要

超长水平阵列状碳纳米管(简称超长碳纳米管)是指利用化学气相沉积法在平整基底上制备的沿气流向、平行排列、能够达到厘米级以上长度的碳纳米管。超长碳纳米管遵循顶端生长模式,具有很低的缺陷密度,能够体现出碳纳米管本征的优异性能,是透明显示、微电子、超强纤维以及航空航天等领域的尖端基础材料。实现超长碳纳米管的大规模应用,其前提是大批量且可控地制备出宏观长度结构完美的超长碳纳米管,在宏观尺度下发挥其优良特性。

本论文深入研究了超长碳纳米管的生长机理,发现超长碳纳米管的顶端漂浮生长过程存在催化剂颗粒等概率失活的特点,其生长服从 Schulz-Flory 分布机理,催化剂的活性概率在其中起到了关键作用。在此基础上提出了基于 Schulz-Flory 分布机理的碳纳米管长度调控的概念,通过优化工艺条件和设备,使碳纳米管生长过程中每增加一对碳原子其催化剂发生失活的概率降低至 $1/(1.2 \times 10^{10})$ 以下,制备出了单根长度达 55 cm 的超长碳纳米管,同时,这些碳纳米管具有完美的结构和优异的性能。通过对超长碳纳米管密度过低的机理的研究发现,其主要原因在于催化剂颗粒在高温下发生聚并,因此制备高密度超长碳纳米管的关键在于阻止催化剂颗粒在高温下的聚并。

为了方便对单根碳纳米管进行表征,本论文探索了一种在悬空碳纳米管上通过化学气相沉积方式自组装无机纳米颗粒以实现单根碳纳米管光学可视化的方法。在此基础上,发展出一系列宏观尺度及大气环境下单根碳纳米管的可控操纵技术,为碳纳米管的结构表征、性能测试以及应用研究提供了便捷的手段。

通过对超长碳纳米管结构和性能的测量,发现所制备的超长碳纳米管具有近似理论预测值的超高强度、韧性、疲劳寿命及机械能储存能力;半导体型碳纳米管比例高达 92%,开关比高达 1.0×10^7 ;超长碳纳米管在空气中的热传导系数高达 $8.9 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,接近理论极限。以上结果说

明所制备的超长碳纳米管具有完美的结构。

本文还首次发现了厘米级长度结构完美的超长碳纳米管层之间存在非公度接触带来的宏观尺度超润滑现象；实现了厘米级以上长度碳纳米管内层的超润滑抽出，比现有超润滑尺度提高 3 个数量级；所测得摩擦剪切强度只有 2~3 Pa，比现有报道的最小数值降低 4 个数量级。这种厘米级尺度的超润滑性能验证了所制备的超长碳纳米管在宏观长度上具有原子级完美结构。利用这种超润滑性能，还发展出一套超长碳纳米管内层的可控抽出技术，这就为更大尺度的超润滑研究、高品质碳纳米管的制备以及纳米器件研究提供了一个全新的思路。

关键词：超长碳纳米管；可控制备；性能；光学可视化；超润滑

Abstract

Ultralong carbon nanotubes (CNTs) usually refer to the horizontally aligned CNT arrays, with lengths up to centimeters or even decimeters, grown on flat substrates by chemical vapor deposition. Ultralong CNTs follow tip-growth mode and have large intertube distances, resulting in a low defect density. Due to their perfect structures and extraordinary thermal, electrical and mechanical properties, they show great potential as building blocks for transparent displays, nano electronics, quantum lines, field emission transistors, superstrong fibers, aeronautics & astronautics materials, and even space elevators. For the practical application of ultralong CNTs, the key is to realize the bulk production of ultralong CNTs with controlled structures and extraordinary properties.

Based on the systematic investigation of the growth mechanism of ultralong CNTs, we proposed that the Schulz-Flory distribution can be applied to interpret the growth of ultralong CNTs and describe the relative ratios of CNTs with different length, and found that the catalyst activity probability played a key role in the growth of ultralong CNTs. We developed systematic methods to improve the catalyst activity and lifetime. With the optimized processing parameters, the catalyst deactivation probability during adding one carbon dimer was reduced to be lower than $1/(1.2 \times 10^{10})$. We successfully synthesized 55cm-long CNTs with perfect structures, which were the longest CNTs in the world, 2.75 times higher than the previous reported value. We found that the main reason for the low areal density of ultralong CNTs was that small catalyst nanoparticles tended to merge into large ones due to the high processing temperature. The key for synthesizing ultralong CNTs with high density is to block the agglomeration of small catalyst nanoparticles into larger ones. This study shed new light on the understanding and rational design

of growth process of ultralong CNTs.

For the direct characterization and study of individual CNTs, we realized the optical visualization of individual ultralong CNTs in ambient conditions by chemical vapor deposition of inorganic nanoparticles on CNTs. With the assistance of inorganic nanoparticles, individual CNTs could be easily manipulated under an optical microscope in ambient conditions. The optical visualization of individual CNTs has great potential to open opportunities to characterize, manipulate and explore macro-scale properties of individual CNTs.

Basic properties of ultralong CNTs were investigated. The as-grown ultralong CNTs have theoretically high tensile strength, Young modulus, breaking strain and mechanical energy storage capacity. Among the as-grown ultralong CNTs, the ratio of semiconducting ones is higher than 92%, with on/off ratio of 1.0×10^7 . The heat transfer coefficients of ultralong CNTs in air reach $8.9 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, which is near the theoretical limit. The above properties illustrate the perfect structures of as-grown ultralong CNTs.

We demonstrated for the first time that superlubricity could exist in centimeter-long double-walled CNTs under ambient conditions due to the incommensurate contact between CNT walls. The superlubricity scale was three orders higher than the values reported before while the shear strength was four orders lower than that reported before. We found that the intershell interaction is independent of the DWCNT length and the inner shell could be continuously pulled out from DWCNTs even with infinite lengths. The macroscale superlubricity roots in the perfect structure of the as-grown ultralong CNTs. Based on the superlubricity of ultralong CNTs, we developed a controllable inner-shell-pull-out technique, which opens a new way to the studies and control of friction, and will stimulate further experimental works and technological applications of superlubricity.

Key Words: Ultralong Carbon Nanotubes; Synthesis; Property; Optical Visualization; Superlubricity

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 超长碳纳米管的结构与性能	4
1.2.1 超长碳纳米管的结构	5
1.2.2 超长碳纳米管的性能	6
1.3 超长碳纳米管的生长机理及可控制备	10
1.3.1 碳纳米管的生长机理	10
1.3.2 超长碳纳米管的生长模式	13
1.3.3 超长碳纳米管的制备方法	15
1.3.4 超长碳纳米管的结构与形貌调控	18
1.4 碳纳米管的标记及可视化观测技术	22
1.4.1 单根碳纳米管的直接观测技术	22
1.4.2 通过包覆对荧光响应物质实现的碳纳米管标记和 可视化技术	23
1.4.3 通过包覆无机纳米颗粒实现的碳纳米管的标记及 可视化技术	24
1.5 碳纳米管的可控操纵技术	26
1.5.1 基于原子力显微镜的操纵技术	26
1.5.2 基于透射电子显微镜的操纵技术	26
1.5.3 基于扫描电子显微镜的操纵技术	27
1.5.4 其他操纵技术	28
1.6 碳纳米管管层间相互滑动行为的研究	29
1.7 论文的研究思路与内容安排	31
第 2 章 超长碳纳米管的生长机理及宏观长度碳纳米管的制备	33
2.1 超长碳纳米管的制备及相关设备	33

2.1.1	实验装置	34
2.1.2	制备条件	35
2.1.3	超长碳纳米管的形貌	36
2.2	超长碳纳米管的 Schulz-Flory 分布生长机理	38
2.2.1	Scholz-Flory 分布理论	39
2.2.2	超长碳纳米管生长过程的特点	40
2.2.3	超长碳纳米管生长过程的 Scholz-Flory 分布描述	41
2.2.4	Scholz-Flory 分布规律对超长碳纳米管制备的启示	47
2.3	宏观长度结构完美的超长碳纳米管的制备	48
2.3.1	影响催化剂活性概率的因素分析	49
2.3.2	“移动恒温区”法实现宏观长度碳纳米管的制备	51
2.4	超长碳纳米管水平阵列密度过低的机理分析	54
2.4.1	催化剂区短碳纳米管与超长碳纳米管的形貌比较	54
2.4.2	催化剂区短碳纳米管长度短且取向杂乱的原因	54
2.4.3	超长碳纳米管密度很低的原因	59
2.5	提高超长碳纳米管水平阵列密度的措施	61
2.5.1	利用 SiO_2 纳米球来阻止催化剂颗粒的聚并	61
2.5.2	利用石墨烯膜阻止催化剂颗粒的聚并	62
2.6	本章小结	64

第3章 超长碳纳米管的光学可视化及可控操纵

3.1	单根悬空碳纳米管上自组装无机纳米颗粒	65
3.1.1	悬空碳纳米管的制备	65
3.1.2	悬空碳纳米管上通过化学气相沉积法自组装无机 纳米颗粒	68
3.1.3	碳纳米管上无机纳米颗粒的去除	72
3.2	单根碳纳米管自组装无机纳米颗粒后的光学可视化	73
3.3	碳纳米管上负载无机纳米颗粒对其性能的影响	74
3.4	宏观尺度下单根碳纳米管的可控操纵技术	76
3.4.1	单根碳纳米管可控操纵的设备	77
3.4.2	单根碳纳米管的拉伸操纵	79
3.4.3	单根碳纳米管的切断和转移	81
3.4.4	构建碳纳米管多级结构	83