



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

纳米材料前沿 >

Electrospinning of Nanofibers

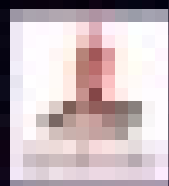
纳米纤维静电纺丝

杨卫民 李好义 阎华 吴昌政 编著



化学工业出版社

非外借

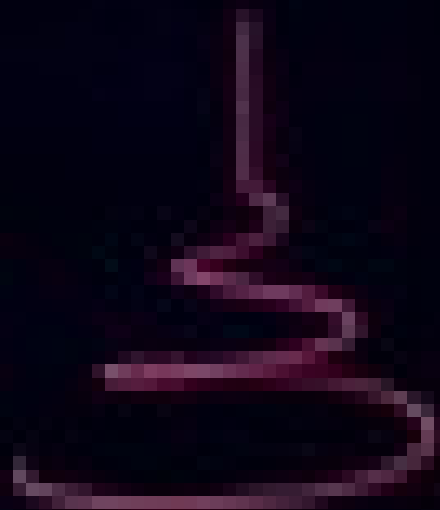


张梁斌
Zhang Liangbin

南京理工大学
Nanjing University of Science and Technology

纳米纤维静电纺丝

张梁斌 著
Zhang Liangbin



南京理工大学
Nanjing University of Science and Technology



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

纳米材料前沿 >

Electrospinning of Nanofibers

纳米纤维静电纺丝

杨卫民 李好义 阎华 吴昌政 编著



化学工业出版社

·北京·

本书依据作者研究团队首创的聚合物熔体微分静电纺丝技术以及国内外纳米纤维静电纺丝的最新研究进展,从工艺的角度出发,着重介绍了熔体静电纺丝技术的原理、模拟分析及工艺进展,并介绍了熔体静电纺丝的工业化技术及应用,最后对聚合物纳米静电纺丝技术的未来进行了展望。

本书可供从事纳米纤维静电纺丝及其相关领域研究的人员及高等院校相关专业学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

纳米纤维静电纺丝/杨卫民等编著. —北京:化学工业出版社, 2017.11

(纳米材料前沿)

ISBN 978-7-122-30469-8

I. ①纳… II. ①杨… III. ①纳米材料-静电-纺丝-研究 IV. ①TQ340.64

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第201323号

责任编辑:韩霄翠 仇志刚

文字编辑:陈雨

责任校对:边涛

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社

(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京瑞禾彩色印刷有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张14¹/₂ 字数235千字

2018年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

(传真:010-64519686)

售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:88.00元

版权所有 违者必究

NANOMATERIALS

纳米材料前沿

编委会

主 任 万立骏

副主任 (按姓氏汉语拼音排序)

包信和 陈小明 成会明

刘云圻 孙世刚 张洪杰

周伟斌

委 员 (按姓氏汉语拼音排序)

包信和 陈小明 成会明

顾忠泽 刘 畅 刘云圻

孙世刚 唐智勇 万立骏

王春儒 王 树 王 训

杨俊林 杨卫民 张洪杰

张立群 周伟斌

纳米材料是国家战略前沿重要研究领域。《中华人民共和国国民经济和社会发展规划第十三个五年规划纲要》中明确要求：“推动战略前沿领域创新突破，加快突破新一代信息通信、新能源、新材料、航空航天、生物医药、智能制造等领域核心技术”。发展纳米材料对上述领域具有重要推动作用。从“十五”期间开始，我国纳米材料研究呈现出快速发展的势头，尤其是近年来，我国对纳米材料的研究一直保持高速发展，应用研究屡见报道，基础研究成果精彩纷呈，其中若干成果处于国际领先水平。例如，作为基础研究成果的重要标志之一，我国自2013年开始，在纳米科技研究领域发表的SCI论文数量超过美国，跃居世界第一。

在此背景下，我受化学工业出版社的邀请，组织纳米材料研究领域的有关专家编写了“纳米材料前沿”丛书。编写此丛书的目的是为了及时总结纳米材料领域的最新研究工作，反映国内外学术界尤其是我国从事纳米材料研究的科学家们近年来有关纳米材料的最新研究进展，展示和传播重要研究成果，促进学术交流，推动基础研究和应用基础研究，为引导广大科技工作者开展纳米材料的创新性工作，起到一定的借鉴和参考作用。

类似有关纳米材料研究的丛书其他出版社也有出版发行，本丛书与其他丛书的不同之处是，选题尽量集中系统，内容偏重近年来有影响、有特色的新颖研究成果，聚焦在纳米材料研究的前沿和热点，同时关注纳米新材料的产业战略需求。丛书共计十二分册，每一分册均较全面、系统地介绍了相关纳米材料的研究现状和学科前沿，纳米材料制备的方法学，材料形貌、结构和性质的调控技术，常用研究特定纳米材料的结构和性质的手段与典型研究结果，以及结构和性质的优化策略等，并介绍了相关纳米材料在信息、生物医药、环境、能源等领域的前期探索性应用研究。

丛书的编写，得到化学及材料研究领域的多位著名学者的大力支持和积极响应，陈小明、成会明、刘云圻、孙世刚、张洪杰、顾忠泽、王训、杨卫民、张立群、唐智勇、王春儒、王树等专家欣然应允分别

担任分册组织人员，各位作者不懈努力、齐心协力，才使丛书得以问世。因此，丛书的出版是各分册作者辛勤劳动的结果，是大家智慧的结晶。另外，丛书的出版得益于化学工业出版社的支持，得益于国家出版基金对丛书出版的资助，在此一并致以谢意。

众所周知，纳米材料研究范围所涉甚广，精彩研究成果层出不穷。愿本丛书的出版，对纳米材料研究领域能够起到锦上添花的作用，并期待推进战略性新兴产业的发展。

万立骏

识于北京中关村

2017年7月18日

自然界的纳米纤维如蜘蛛丝和纳米纤维素等，以其优异的性能而广受关注，但由于天然资源匮乏和生产成本偏高等原因，限制了大规模产业化发展。如何实现纳米纤维的人工制备是人类的百年梦想。为此，全球范围的众多研究者开展了诸如直接拉伸法、相分离法、模板法、自组装法、气流纺丝法、离心纺丝法等多种途径的艰难探索，近年来，脱颖而出的静电纺丝技术已成为纳米纤维这一新材料领域的研究热点。

静电纺丝技术探索虽然起源于20世纪30年代，但直到90年代才真正被关注，近20年来得到了蓬勃发展。它在材料适用性、工艺可控性、形貌多样性等方面表现出了巨大的优势和广阔的应用前景，通过材料选择、形貌控制和多种功能化后处理等，利用静电纺丝技术制备的纳米纤维已经广泛用于能源、电子、生物医药、卫生防护、催化剂负载等领域。据统计，截至2017年3月，以“静电纺丝”为关键词检索的学术论文标题数就多达26万条。我国从事静电纺丝技术和应用研究者已达数万人。因此，很有必要对近期研究成果进行归纳总结，为推动纳米纤维的产业化发展提供理论支撑。

众所周知，静电纺丝技术与纳米纤维的著作已经有几本面世，但主要是围绕溶液静电纺丝技术的材料配方和纤维形貌展开，鲜见关于无溶剂绿色环保的熔体静电纺丝技术的详细描述，而且对于静电纺丝工艺及装置的创新成果的介绍也相对较少。因此，本书在简要介绍静电纺丝历史、纺丝原理及工艺的基础上，通过大量研究实例描述了熔体静电纺丝技术工艺特点和难点，装备进展与应用创新，特别是围绕本团队首创的聚合物熔体微分静电纺丝新原理、新方法、新技术和新装备进行了较为系统的介绍，充分展现出该创新方法相对于传统毛细管法的明显优势。最后，对聚合物静电纺丝技术的未来发展方向提出了一些看法。

本书著述的聚合物熔体微分静电纺丝原创成果，是团队广大师生近十年来接力研究成果的高度浓缩。除封面所列的编著者以外，还有谭晶、程礼盛、丁玉梅、何雪涛、刘勇等老师，邓荣坚、郝明凤、赵凤雯、王欣、陈宏波、钟祥烽、夏令涛、刘兆香、李小虎、吴卫逢、

马帅、张罗、马小路、马穆德、李轶、秦永新、张艳萍、陈晓青、杜琳等同学为本书所列创新成果做出了重要贡献。同时，我们由衷地感谢王德禧、王笃金、刘国民、刘东升、杨小平等老师对我们这项科研工作的开展给予的大力支持，以及姚穆、俞建勇、胡平、丁彬、李从举、刘太奇等老师对我们给予的热情指导；还要特别感谢国家重点研发计划（2016YFB0302000）、国家自然科学基金（51603009）和北京市自然科学基金（2141002）等为我们的研究工作提供了经费保障。

本书在万立骏院士领衔的编委会指导下确定篇章结构和内容取舍标准，撰写时间比较宽裕，历时三年数易其稿。但由于作者水平所限，书中难免有疏漏之处，希望广大读者批评指正，帮助我们不断完善，从而为促进纳米新材料领域的知识创新和技术进步贡献绵薄之力。

杨卫民
2017年6月



NANOMATERIALS

纳米纤维静电纺丝

1.1 聚合物纳米纤维与静电纺丝的发展	002
1.1.1 纳米纤维及其制备技术	003
1.1.2 静电纺丝技术发展简史	005
1.2 聚合物静电纺丝技术分类与特点	010
参考文献	013

2.1 聚合物溶液静电纺丝原理	018
2.1.1 泰勒锥	019
2.1.2 阈值（临界）电压	019
2.1.3 射流稳定运动段	020
2.1.4 射流不稳定运动段	021
2.1.5 射流直径的计算	022
2.1.6 电晕现象	024
2.2 聚合物溶液静电纺丝材料	025
2.3 聚合物溶液静电纺丝设备	027
2.4 聚合物溶液静电纺丝过程	032
2.4.1 溶液黏度	033
2.4.2 溶液表面张力和电导率	033
2.4.3 电场	034
2.4.4 收集距离	034
2.4.5 进料速率	035
2.4.6 环境参数	035
参考文献	036

Chapter 1

第1章

绪论

001

Chapter 2

第2章

聚合物溶液静电纺丝技术

017

Chapter 3

第3章

聚合物熔体静电纺丝技术

039

3.1 聚合物熔体静电纺丝装置	040
3.2 聚合物熔体微分静电纺丝的提出	045
3.3 聚合物熔体静电纺丝材料	049
3.4 聚合物熔体微分静电纺丝射流间距的理论分析	051
3.4.1 射流间距的定义	051
3.4.2 射流间距分析模型的建立	052
3.4.3 射流间距模型的数学分析	053
3.5 聚合物熔体微分静电纺丝射流间距的实验研究	058
3.5.1 匀强电场强度对射流间距的影响	060
3.5.2 最大电场强度对射流间距的影响	062
3.5.3 熔体黏度对射流间距的影响	065
3.5.4 进给流量对射流间距的影响	066
3.6 小结	067
参考文献	068

Chapter 4

第4章

聚合物静电纺丝的模拟分析

071

4.1 静电纺丝建模相关研究进展	072
4.2 熔体静电纺丝中电场分布规律	074
4.2.1 有限元模拟方法简介	074
4.2.2 电场模型建立与参数选择	075
4.2.3 纺丝喷头对电场分布规律的影响	084
4.2.4 不同接收电极的电场模拟和实验对比	090
4.2.5 辅助结构对纺丝电场的影响	094

4.3 拔河效应介观模拟分析	096
4.3.1 耗散粒子动力学简介	097
4.3.2 弹簧系数对拔河效应的影响	101
4.3.3 聚合物链长对拔河效应的影响	103
4.3.4 聚合物黏度对拔河效应的影响	104
4.4 射流细化的理论分析	106
4.4.1 模型的建立	106
4.4.2 理论分析	108
参考文献	112
5.1 电场	116
5.1.1 纺丝电压对纤维直径的影响	116
5.1.2 纺丝距离对纤维直径的影响	119
5.2 分子量与熔体黏度	121
5.2.1 纤维的制备	122
5.2.2 聚合物分子量对熔体微分电纺纤维的影响	123
5.3 进给流量	127
5.4 气流辅助工艺	130
5.4.1 气流辅助装置	130
5.4.2 气流速度与纤维直径的关系	132
5.5 小结	133
参考文献	134

Chapter 5

第5章

熔体微分静电纺丝工艺

115

Chapter 6

第6章

静电纺丝的工业化技术

137

6.1 溶液静电纺丝工业化技术	138
6.1.1 多针头静电纺丝设备	138
6.1.2 无针多射流静电纺丝设备	141
6.2 熔体静电纺丝工业化技术	150
6.2.1 熔体微分静电纺丝单喷头设备	151
6.2.2 熔体微分静电纺丝4喷头设备	156
6.2.3 熔体微分静电纺丝32喷头设备	158
6.2.4 设备设计流程与关键点	163
参考文献	164

Chapter 7

第7章

静电纺丝纳米纤维的应用研究进展

167

7.1 静电纺丝纳米纤维在环境污染治理中的应用	168
7.1.1 高效过滤	169
7.1.2 催化氧化	170
7.1.3 吸附	172
7.1.4 固定酶及其他	176
7.2 生物医药领域的应用	177
7.2.1 药物缓释	178
7.2.2 组织工程	180
7.2.3 伤口敷料	183
7.2.4 小结	184

7.3 静电纺丝纳米纤维在能源领域的应用	185
7.3.1 锂离子电池材料	185
7.3.2 燃料电池材料	188
7.3.3 超级电容器材料	189
参考文献	190
8.1 概述	200
8.2 纳米纤维捻线的制备方法	201
8.3 展望	208
参考文献	208

Chapter 8

第8章

静电纺丝纳米捻线

199

Chapter 9

第9章

聚合物纳米纤维 静电纺丝技术的 未来

211

Chapter 1

第1章 绪论

1.1 聚合物纳米纤维与静电纺丝的发展

1.2 聚合物静电纺丝技术分类与特点

1.1

聚合物纳米纤维与静电纺丝的发展

纳米技术 (nanotechnology) 是一种多学科交叉的综合技术, 主要研究结构尺寸分布在 $0.1 \sim 100\text{nm}$ 范围的材料性质、制备方法及其先进应用。纳米技术的实质是通过特定技术在纳米级微粒的表面让原子或者分子重新按照一定规律进行排列组合, 从而组成特殊结构, 使材料表现出一定的特性。1993年, 第一届国际纳米技术大会 (INTC) 对纳米技术进行了细化, 促进了纳米技术的飞速发展, 激发了世界各国诸多优秀科学工作者们探索和研究的热情。纳米技术开始不断在发展中前进, 在前进中走向成熟。

20世纪70年代, 科学家开始涉足纳米科技, 从不同角度提出构思。1974年, 日本科学家在描述精密机械加工时, 首次提出“纳米技术”一词, 将“纳米”与技术有机地结合在一起。根据纳米技术的开展, 1982年, 德国跨出了纳米第一步, 发明了扫描隧道显微镜, 使原子、分子世界呈现在人们面前, 让纳米技术的研究有了新的依托和衡量标准, 促进了纳米科技的发展。

随着德国对纳米技术的青睐, 美国开始拉开纳米序幕, 1990年, 美国加州IBM实验室操纵氩原子排成“IBM”字母。

1990年7月, 在美国成功举办了纳米科学技术第一届国际会议, 这标志着纳米科技时代的到来^[1], 引起了材料领域和物理领域的热潮, 形成了全面性“纳米热”。

1991年, 日本饭岛博士发现了碳纳米管, 这种物质在体积相同的情况下, 质量是钢的 $1/6$, 强度为钢的10倍, 并被认为是最佳纤维材料, 这推动了纳米技术研究和发展的高潮。

1993年, 中国科学院真空物理研究室将原子摆布“写”出“中国”字样, 将中国推向国际纳米科技领域的大军中。

1999年后, 纳米技术开始市场化, 基于纳米产品的经营额也很高, 全年营业额突破500亿美元, 可见纳米产品的未来市场非常广阔。