

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 纤维化学与物理

詹怀宇 主编

李志强 蔡再生 副主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书围绕轻化工(造纸、制革、染整)过程所需的纤维原料,从纤维分子结构、形态结构、聚集态结构及纤维的物理、机械性能和化学性质的角度,详细介绍了植物纤维(纤维素、半纤维素和木素)、动物纤维(胶原蛋白纤维、角蛋白纤维和蚕丝蛋白纤维)、合成纤维(聚酯纤维、聚酰胺纤维、聚丙烯纤维和其他新型纤维)的结构、性能及应用。

本书除可作为轻化工程专业的核心参考教材外,还可作为纺织服装、林产化工、资源科学与工程等相关专业的教学参考书,并可供相关行业从事生产、管理、研究开发的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

纤维化学与物理/詹怀宇主编.—北京:科学出版社,2005

(普通高等教育“十五”国家级规划教材)

ISBN 7-03-015081-3

I. 纤… II. 詹… III. ①纤维化学-高等学校-教材 ②纤维-物理性能-高等学校-教材 IV. TS102.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 031933 号

---

责任编辑:刘俊来 王志欣 吴伶伶 王国华 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:安春生 / 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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005 年 7 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 7 月 第一次印刷 印张: 36 1/2

印数: 1—3 500 字数: 690 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

# 前 言

轻化工程专业是 1998 年教育部本科专业目录调整时整合而成的高等学校工科本科专业,涵盖原有的制浆造纸工程、皮革工程和染整工程三个工科专业。轻化工程专业涉及的造纸、皮革、纺织服装等工业领域与人民生活息息相关,在我国国民经济中占据重要的地位。近 20 年来,我国的造纸工业、皮革工业和纺织工业迅速发展,逐渐成为世界纸和纸板、纺织服装、皮革和革制品的生产大国,也是世界最大的纺织服装、皮革和革制品出口国。行业的迅速发展要求我国高等教育培养更多的基础扎实、知识面广、能力强、素质高的轻化工程专业人才。

“纤维化学与物理”是轻化工程专业一门重要的专业基础课程。目前,轻化工程专业涵盖的原有三个专业分别使用各自的有关“纤维化学与物理”的教材,如制浆造纸工程专业使用《植物纤维化学》,主要阐述植物纤维原料的生物结构及其主要组分——纤维素、半纤维素和木素的化学组成、化学结构、物理性能和化学性质;皮革工程专业则使用《胶原纤维》,主要介绍动物纤维的结构和物理化学性能;染整工程专业以往采用《高分子化学与物理》和《纺织物理》等,主要阐述高分子化学基础与物理基础,纺织纤维的化学组成、分子结构及其主要物理机械性能。这些教材既有一定的差异,也有较大的共性,因此,将其整合为轻化工专业(含造纸、皮革、染整)通用的《纤维化学与物理》,既非常必要,也完全可能。事实上,现代造纸工业既以植物纤维为主要原料,也采用一定量的动物纤维和合成纤维,以提高某些纸张的品质或生产某些特殊用途的纸张;纺织工业既用天然纤维,也用合成纤维;制革和革制品工业以动物纤维(胶原蛋白纤维、角蛋白纤维)为主要原料,也结合使用植物纤维和合成纤维。因此,《纤维化学与物理》教材中涉及的纤维包括植物纤维、动物纤维和合成纤维,以拓宽知识面,增强适应性。

2001 年 11 月在青岛召开的教育部轻工食品教学指导委员会第一次会议上,轻化工程专业教学指导分委员会讨论决定编写制浆造纸工程、皮革工程和染整工程三个专业方向通用的专业基础课教材《纤维化学与物理》。2002 年 5 月,本教材被教育部批准为普通高等教育“十五”国家级规划教材。2003 年 7 月在大连召开的轻化工程专业教学指导分委员会会议上,审查通过了编写组提出的《纤维化学与物理》编写大纲,要求于“十五”期间,完成本教材的编写和出版工作。

本教材结构和内容安排如下:

第一章绪论,主要讨论纤维学中的一些共性问题。在介绍纤维的来源与分类后,重点阐述纤维的基本结构和基本性质,包括纤维的分子结构、聚集态结构和形

态结构及纤维的吸湿、溶胀和溶解,纤维的力学性能、光学性能、热学性能、电学性能、燃烧性能和染色性能,还综述了纤维材料在造纸、制革、纺织和其他工业方面的应用,并概述了纤维的鉴别方法。

第二章至第五章属植物纤维部分。第二章植物纤维原料的化学成分及生物结构,首先介绍了植物原料的分类与命名,进而重点阐述植物纤维原料的化学成分、生物结构和细胞结构。第三章纤维素,重点阐述纤维素的分子结构、聚集态结构以及纤维素的物理和化学性质,还结合国内外的技术进展,专门介绍了黏胶纤维、Lyocell 和 Modal 等再生纤维素纤维和功能化纤维素材料。第四章半纤维素,首先介绍了半纤维素的分布、分离与提取,接着重点阐述半纤维素的物理和化学性质,并就半纤维素在造纸、纺织、化工、生物医药等方面的利用做了专门介绍。第五章木素,在叙述木素在植物体内的分布与生物合成机理的基础上,介绍了木素的分离、提取与检测,继而重点阐述了木素的化学结构、物理性质和化学性质。该章对木素-碳水化合物复合体(LCC)的存在与分离做了专门介绍,对蒸煮漂白过程中木素的亲核反应、亲电取代反应、氧化反应和呈色反应做了系统的阐述。

第六章至第八章属动物纤维部分。第六章蛋白质纤维原料的化学成分和生物结构,系统地介绍了蛋白质纤维的基础知识,包括氨基酸及其性质,蛋白质的结构、构象及物理化学性质,蛋白质纤维原料的生物结构与细胞形态。第七章胶原蛋白纤维,首先介绍胶原的分类、分离与制备,继而重点阐述胶原的氨基酸组成与序列、胶原纤维的化学结构、物理性质和化学性质,分析了胶原蛋白纤维的特点。第八章角蛋白和蚕丝蛋白纤维,就这两种蛋白纤维的化学组成、蛋白构象、聚集态结构、物理机械性能和化学性质做了系统的阐述。

第九章至第十二章(第十二章少数内容除外)属合成纤维部分。第九章聚酯纤维,首先介绍了合成纤维的基础知识,包括合成纤维的一般理化性能、常用术语、合成纤维与纺织品及合成纤维的一般生产方法;然后以涤纶为主线,阐述了聚酯纤维的结构与物理、化学性能,对其生产过程也做了概述,并介绍了几种新型聚酯纤维。第十章聚酰胺纤维——锦纶,介绍了锦纶的基本组成物质和生产过程,进而系统地阐述锦纶的结构、物理机械性能、化学性能和染色性能。第十一章聚丙烯腈纤维和其他合成纤维,重点阐述聚丙烯腈纤维(腈纶)的组成、结构与性能,对聚氨酯弹性纤维(氨纶)、聚丙烯纤维(丙纶)、聚乙烯醇纤维(维纶)、聚氯乙烯纤维(氯纶)和聚乙烯纤维也做了概述。第十二章新型纤维,根据国内外发展动态和科技成果,阐述了各种新型纤维,包括差别化纤维(超细纤维、异形纤维、复合纤维等)、高性能纤维(碳纤维、芳纶、PBI、PBO 等)和功能性纤维(传导性纤维、医疗卫生保健用纤维、阻燃纤维、防护功能纤维等)。对新型再生纤维素纤维和再生蛋白质纤维以及聚乳酸纤维也做了简要的介绍。

本书的特点如下:

1) 系统性强。本书从纤维分子结构、形态结构、聚集态结构到纤维的物理机械性能和化学性质,系统地阐述纤维化学与物理的基本概念、基本理论和专门知识。

2) 适应性广。围绕轻化工(造纸、制革、染整)过程所需的纤维原料,详细地介绍植物纤维、动物纤维和合成纤维的结构、性能及其应用,内容丰富,适应性广。除供轻化工程专业作为核心课程的教材外,也可作为纺织服装、林产化工、资源科学与工程等相关专业的教学参考书,并可供相关行业从事生产、管理、研究开发的工程技术人员参考。

3) 先进性好。在强调基本概念、基本理论的基础上,尽可能反映本课程领域国内外的最新进展和本学科及其与相关学科交叉的科技成果,介绍各种纤维新材料、新工艺和新技术。

4) 对重要的术语或名词在开始出现的地方加注英文,为高校学生双语教学提供帮助,也便于其他读者掌握专业英语词汇。

5) 每章均附有习题与思考题,便于读者理解和掌握所学内容,也便于自学。

本教材的编写参考了国内外大量的文献资料、教材和专著,若将其全部列出,将占很大篇幅。因此,只是在每章后列出了主要参考文献。

本教材涉及的纤维种类多,内容有较大的专业覆盖面,但是编者无意让各专业方向的学生在课堂上无遗漏地学习所有的章节,而是提供给各专业方向可以从其中挑选适合于自己的最需要的内容,以便有针对性地进行教学,而其他内容则可作为进一步拓展知识的参考。

参加本书编写的人员有:华南理工大学詹怀宇、唐爱民(前言,第一、三章),天津科技大学李群(第二章),陕西科技大学李新平(第四章),山东轻工业学院谢益民、陈嘉川(第五章),四川大学李志强(第六至八章),东华大学蔡再生(第九至十一章),北京服装学院黄关葆(第十二章)。全书由詹怀宇任主编,李志强、蔡再生任副主编。

本书编写过程中,得到高等学校轻化工程专业教学指导分委员会的支持和鼓励,也得到许多前辈和同仁的指导和帮助,担任相关课程教学的老师们根据多年的教学实践,提出了许多宝贵的意见,在此一并表示感谢!

本书的编写是轻化工程专业教学改革的一项举措,编者当然希望能反映时代的特征并受到读者的欢迎。但是,由于编者学识水平所限,错误和不当之处在所难免,恳望读者批评指正!

编 者

2005年3月

# 目 录

## 前言

第一章 绪论	1
第一节 纤维的来源与分类	1
一、天然纤维	1
二、化学纤维	2
第二节 纤维的基本结构	3
一、纤维的分子结构	3
二、纤维的聚集态结构	7
三、纤维的形态结构	12
第三节 纤维的基本性质	13
一、纤维的长度、宽度与密度	13
二、纤维的吸湿、溶胀和溶解	15
三、纤维的力学性能	17
四、纤维的光学性质	21
五、纤维的热性能	25
六、纤维的燃烧性能	27
七、纤维的电学性能	28
八、纤维的染色性能	30
第四节 纤维材料的工业应用	31
一、纤维原料用于造纸工业	31
二、纤维材料用于制革工业	32
三、纤维材料用于纺织工业	33
四、纤维材料用于其他工业	33
第五节 纤维鉴别概述	34
一、显微镜法	34
二、燃烧法	35
三、溶解法	36
四、着色性	36
习题与思考题	37
主要参考文献	38

<b>第二章 植物纤维原料的化学成分及生物结构</b> .....	39
<b>第一节 植物原料的分类与命名</b> .....	39
一、植物原料的分类原则 .....	39
二、植物的拉丁学名 .....	39
三、造纸植物纤维原料分类 .....	40
<b>第二节 植物纤维原料的化学成分</b> .....	40
一、主要成分 .....	41
二、次要成分 .....	45
三、植物纤维原料化学组成比较 .....	47
<b>第三节 植物纤维原料的生物结构与细胞形态</b> .....	49
一、植物纤维细胞构造 .....	49
二、木材纤维原料的生物结构与细胞形态 .....	55
三、竹子和草类纤维原料的生物结构与细胞形态 .....	67
四、棉花和韧皮纤维原料的生物结构与细胞形态 .....	73
习题与思考题 .....	80
主要参考文献 .....	81
<b>第三章 纤维素</b> .....	82
<b>第一节 纤维素的分子结构</b> .....	82
一、纤维素的化学结构 .....	82
二、纤维素链的构象 .....	85
三、纤维素的相对分子质量和聚合度 .....	88
<b>第二节 纤维素的聚集态结构</b> .....	96
一、纤维素单元晶胞的结晶变体 .....	97
二、纤维素结晶变体的相互转化 .....	103
三、纤维素的聚集态结构模型、结晶度、取向度 .....	105
<b>第三节 纤维素的物理与物理化学性质</b> .....	111
一、纤维素纤维的吸湿与解吸 .....	111
二、纤维素的润胀与溶解 .....	113
三、纤维素纤维的表面电化学性质 .....	120
四、纤维素的热降解 .....	120
五、纤维素的光降解 .....	123
六、纤维素的机械降解 .....	125
七、纤维素的离子辐射降解 .....	126
<b>第四节 纤维素的化学性质</b> .....	127
一、纤维素的可及度与反应性 .....	128

---

二、纤维素的多相反应与均相反应 .....	129
三、纤维素的酸水解降解 .....	131
四、纤维素的碱性降解 .....	132
五、纤维素的氧化降解 .....	134
六、纤维素的酶水解降解 .....	137
七、纤维素的酯化反应 .....	138
八、纤维素的醚化反应 .....	142
九、纤维素的接枝与交联 .....	145
第五节 再生纤维素纤维 .....	149
一、黏胶纤维 .....	149
二、新型溶剂法纤维素纤维——Lyocell 纤维 .....	159
三、其他再生纤维素纤维 .....	162
第六节 功能化纤维素材料 .....	164
一、吸附分离纤维素材料 .....	164
二、膜分离纤维素材料 .....	165
三、高吸水性纤维素材料 .....	166
四、微晶纤维素材料 .....	167
五、液晶纤维素材料 .....	167
六、医用纤维素材料 .....	168
习题与思考题 .....	169
主要参考文献 .....	170
第四章 半纤维素 .....	172
第一节 半纤维素的分布与命名 .....	172
一、半纤维素的分布 .....	172
二、半纤维素的命名 .....	175
第二节 半纤维素的结构 .....	176
一、半纤维素的分离与提取 .....	176
二、半纤维素聚糖的类型及化学结构式 .....	182
三、半纤维素与植物细胞壁中其他组分之间的连接 .....	189
第三节 半纤维素的物理性质 .....	192
一、溶解度 .....	192
二、分支度 .....	193
三、相对分子质量 .....	194
第四节 半纤维素的化学性质 .....	196
一、半纤维素的酸性水解 .....	196



二、半纤维素的碱性降解 .....	198
三、半纤维素的酶降解 .....	200
四、半纤维素在化学制浆中的变化 .....	202
五、半纤维素的化学改性 .....	208
第五节 半纤维素的利用 .....	209
一、半纤维素作为纸浆组分对纸浆及纸张性质的影响 .....	209
二、半纤维素对纺织用纤维的影响 .....	215
三、己糖的利用 .....	216
四、戊糖的利用 .....	216
习题与思考题 .....	222
主要参考文献 .....	222
<b>第五章 木素</b> .....	<b>226</b>
第一节 木素在植物体内的分布及生物合成机理 .....	226
一、木素的存在 .....	226
二、木素的分类及其分布和组成的不均一性 .....	227
三、木素的生物合成途径 .....	229
第二节 木素的分离和精制 .....	232
一、天然木素的提取 .....	232
二、从浆中分离木素 .....	235
三、从制浆废液中提取木素 .....	237
四、木素-碳水化合物复合体的分离 .....	238
第三节 木素的定量法 .....	239
一、Klason 木素和酸溶木素的测定 .....	239
二、溶液中木素的测定 .....	241
三、基于氧化剂消耗量的木素定量方法 .....	243
第四节 木素的化学结构 .....	244
一、主要木素结构的连接方式 .....	244
二、官能团分析 .....	247
三、化学分解法研究木素的化学结构 .....	251
四、分光法研究木素的基本结构 .....	261
五、木素结构的模型图 .....	270
第五节 木素的物理性质 .....	275
一、一般物理性质 .....	275
二、木素的相对分子质量及木素分子的存在状态 .....	276
三、木素的溶解性 .....	279

四、木素的热性质 .....	280
第六节 木素的化学性质 .....	280
一、木素结构单元的化学反应性质 .....	280
二、木素的亲核反应 .....	282
三、木素的亲电取代反应 .....	296
四、木素的氧化反应 .....	300
五、木素的呈色反应 .....	309
习题与思考题 .....	314
主要参考文献 .....	315
<b>第六章 蛋白质纤维原料的化学成分和生物结构</b> .....	<b>317</b>
第一节 氨基酸及其性质 .....	317
一、主要氨基酸及其分类 .....	320
二、氨基酸的物理化学性质 .....	322
三、氨基酸的化学反应 .....	328
第二节 蛋白质的结构和构象 .....	330
一、肽键和肽 .....	330
二、蛋白质分子的构象 .....	332
三、蛋白质和多肽的类型 .....	350
第三节 蛋白质的物理化学性质 .....	352
一、两性电解质和等电点 .....	352
二、蛋白质的溶解性 .....	352
三、蛋白质的渗透压和透析 .....	353
四、蛋白质的变性及复性 .....	353
第四节 蛋白质纤维原料的生物结构与细胞形态 .....	356
一、动物皮组织学及胶原纤维 .....	356
二、毛的结构与细胞形态 .....	359
三、蚕丝的形成及蚕的生物结构 .....	365
习题与思考题 .....	367
主要参考文献 .....	368
<b>第七章 胶原蛋白纤维</b> .....	<b>369</b>
第一节 胶原的分类 .....	369
一、胶原类型 .....	369
二、几种常见的胶原 .....	370
三、胶原的分离与制备 .....	372
第二节 胶原的化学结构 .....	374

一、胶原的氨基酸组成和序列 .....	375
二、胶原的二级结构和分子间交联 .....	377
三、胶原的超分子聚集 .....	380
四、胶原纤维的形成和结构特征 .....	387
第三节 胶原的物理性质 .....	388
一、胶原基本物理常数 .....	388
二、胶原的湿热稳定性和收缩温度 .....	389
三、溶胀 .....	389
四、旋光性 .....	390
五、表面电性质 .....	390
六、胶原的应力-应变模型 .....	390
第四节 胶原的化学性质 .....	391
一、酸、碱对胶原的作用 .....	391
二、盐类对胶原的作用 .....	391
三、酶对胶原的作用 .....	392
四、胶原的交联改性 .....	393
第五节 胶原纤维的应用 .....	395
一、皮革和毛皮制造 .....	395
二、明胶制造 .....	395
三、生物医学应用 .....	395
习题与思考题 .....	396
主要参考文献 .....	396
<b>第八章 角蛋白和蚕丝蛋白纤维 .....</b>	<b>399</b>
第一节 角蛋白和蚕丝蛋白的化学组成和分子结构 .....	399
一、角蛋白的化学组成和分子结构 .....	399
二、丝蛋白的化学组成和结构 .....	412
第二节 角蛋白中间纤丝和蚕丝芯蛋白的聚集态结构 .....	422
一、角蛋白中间纤丝的聚集状态 .....	422
二、蚕丝芯蛋白的聚集态结构 .....	429
第三节 毛和蚕丝的物理机械性能 .....	433
一、毛的物理机械性能 .....	433
二、丝的物理机械性能 .....	435
第四节 毛和蚕丝的化学性质 .....	436
一、毛的化学性质 .....	436
二、丝的化学性质 .....	446

---

习题与思考题	447
主要参考文献	448
<b>第九章 聚酯纤维</b>	<b>451</b>
<b>第一节 合成纤维的概述</b>	<b>451</b>
一、合成纤维的一般理化性能	451
二、常见术语	453
三、合成纤维与纺织品	460
四、合成纤维的生产方法简述	461
<b>第二节 聚酯纤维概述</b>	<b>462</b>
<b>第三节 涤纶的基本组成物质及其生产概述</b>	<b>463</b>
一、聚对苯二甲酸乙二酯的制备	464
二、涤纶的生产过程	464
<b>第四节 涤纶的结构</b>	<b>465</b>
一、涤纶的分子结构	465
二、涤纶的形态结构	466
三、涤纶的聚集态结构	467
<b>第五节 涤纶的物理性能</b>	<b>468</b>
一、涤纶的热性能	468
二、涤纶的玻璃化温度	468
三、涤纶的物理机械性能	469
四、涤纶的吸湿性	470
五、涤纶的静电现象	470
六、涤纶的起毛起球现象	471
<b>第六节 涤纶的化学性能</b>	<b>472</b>
一、酸对涤纶的作用	472
二、碱对涤纶的作用	472
三、氧化剂和还原剂对涤纶的作用	473
四、溶剂对涤纶的作用	473
五、染色性能	474
六、低聚物及其对染色性能的影响	474
七、其他理化性能	475
<b>第七节 其他聚酯纤维</b>	<b>475</b>
一、阳离子染料可染聚酯纤维	475
二、常温常压可染聚酯纤维	476
三、PPT 纤维	476

四、PBT 纤维 .....	477
五、PEN 纤维 .....	477
习题与思考题 .....	478
主要参考文献 .....	478
<b>第十章 聚酰胺纤维——锦纶</b> .....	<b>480</b>
<b>第一节 锦纶的基本组成物质及其生产概述</b> .....	<b>481</b>
一、锦纶 66 的合成 .....	482
二、锦纶 6 的合成 .....	482
三、锦纶的生产过程 .....	483
<b>第二节 锦纶的结构</b> .....	<b>485</b>
一、锦纶的分子结构 .....	485
二、形态结构 .....	485
三、聚集态结构 .....	486
<b>第三节 锦纶的物理机械性能</b> .....	<b>486</b>
一、锦纶的吸湿 .....	486
二、锦纶的热转变点 .....	486
三、锦纶的耐热性 .....	488
四、锦纶的机械性能 .....	488
五、锦纶的耐光性 .....	489
<b>第四节 锦纶的化学性能</b> .....	<b>489</b>
<b>第五节 锦纶的染色性能</b> .....	<b>489</b>
习题与思考题 .....	490
主要参考文献 .....	490
<b>第十一章 聚丙烯腈纤维和其他合成纤维</b> .....	<b>492</b>
<b>第一节 腈纶的基本组成物质及其生产概述</b> .....	<b>492</b>
一、腈纶的分子结构 .....	492
二、丙烯腈三元共聚物的合成 .....	494
三、腈纶的生产过程 .....	494
<b>第二节 腈纶的结构</b> .....	<b>496</b>
一、腈纶的形态结构 .....	496
二、腈纶的聚集态结构 .....	496
<b>第三节 腈纶的性能</b> .....	<b>497</b>
一、腈纶的吸湿性 .....	497
二、腈纶的机械性能 .....	497
三、腈纶的玻璃化温度 .....	498

---

四、腈纶的热弹性 .....	498
五、腈纶的热稳定性 .....	499
六、腈纶的燃烧性 .....	499
七、腈纶的化学性能 .....	499
八、腈纶的染色性 .....	500
九、耐光、耐晒和耐气候性 .....	500
十、腈纶的其他性能 .....	500
<b>第四节 其他合成纤维</b> .....	<b>500</b>
一、聚氨酯弹性纤维 .....	500
二、聚丙烯纤维 .....	504
三、聚乙烯醇纤维 .....	508
四、聚氯乙烯纤维 .....	512
五、聚乙烯纤维 .....	514
习题与思考题 .....	515
主要参考文献 .....	515
<b>第十二章 新型纤维</b> .....	<b>517</b>
<b>第一节 差别化纤维</b> .....	<b>517</b>
一、超细纤维 .....	517
二、异形纤维 .....	521
三、复合纤维 .....	524
四、染色改性纤维 .....	525
五、高收缩纤维 .....	527
六、低熔点纤维 .....	528
<b>第二节 高性能纤维</b> .....	<b>529</b>
一、碳纤维 .....	529
二、芳香族聚酰胺纤维 .....	533
三、超高相对分子质量聚乙烯纤维 .....	536
四、聚四氟乙烯纤维 .....	537
五、聚苯并咪唑纤维 .....	538
六、聚苯并双噁唑纤维 .....	539
<b>第三节 功能性纤维</b> .....	<b>540</b>
一、传导性纤维 .....	540
二、医疗卫生保健用纤维 .....	541
三、阻燃纤维 .....	550
四、防护功能纤维 .....	551

五、水溶性纤维 .....	555
六、变色纤维 .....	556
第四节 其他新型纤维 .....	558
一、聚乳酸纤维 .....	558
二、大豆蛋白改性纤维 .....	559
三、竹纤维 .....	560
四、新型纤维素纤维及其他再生纤维素类纤维 .....	561
五、其他再生蛋白质纤维 .....	561
习题与思考题 .....	563
主要参考文献 .....	563

# 第一章 绪 论

## 第一节 纤维的来源与分类

纤维(fiber)是形态学上的概念,是指一种长度与截面直径之比较大、具有一定柔性和强度的细长物体。由于新型纤维材料的不断出现,要给纤维一个确切的定义很困难。本书涉及的纤维是指造纸、制革、纺织染整等行业所用的纤维。

按原料进行分类,纤维通常可分为天然纤维(包含植物纤维和动物纤维)和化学纤维(包括人造纤维和合成纤维)。现分述如下。

### 一、天然纤维

#### 1. 植物纤维

自然界中的植物原料年复一年地不断生长和更新,因此,植物纤维是自然界中最丰富的可再生资源。在生物界中,结合于有机体中的碳高达  $27 \times 10^{10}$  t,其中99%以上的碳来自植物,约40%的植物中的碳是结合在纤维素中的,这意味着植物界中纤维素总量为  $26.5 \times 10^{10}$  t。

植物纤维原料品种繁多,大体上可分为两类:木材纤维原料(针叶木、阔叶木)和非木材纤维原料(竹类、禾草类、韧皮类、籽毛类等)。

植物纤维是造纸工业的主要原料,许多植物纤维(如棉、麻类)也是纺织工业的重要原料,革制品工业也离不开植物纤维。

#### 2. 动物纤维

动物纤维包括胶原纤维、角蛋白纤维和蚕丝蛋白纤维。

胶原纤维是动物皮板的主要成分,具有良好的亲和性和穿着舒适性,其强度高,并具有抑菌作用。胶原纤维是皮革工业的重要原料,制革的全过程是将胶原纤维处理加工成妮适应人们需要的产品的过程。胶原蛋白是制造明胶的原料,在生物医学上也有广泛的应用。

角蛋白纤维(毛纤维)主要是羊毛。羊毛是最早利用的纺织纤维之一,至今仍是纺织工业的重要原料。羊毛纤维制品具有许多优良特性,如光泽柔和、手感丰富、弹性和悬垂性良好、不易沾污、吸湿性强、保暖性好、抗皱性较好、耐磨性优良等。因此,羊毛是最高档的纺织纤维之一。除羊毛纤维外,还有骆驼毛、兔毛、马海毛、山羊绒、牦牛绒等。



我国是世界上最早种桑、养蚕、缫丝、织绸的国家,迄今已有 6000 多年的历史。蚕丝蛋白纤维具有柔和悦目的光泽、柔软平滑的手感、轻盈美丽的外观以及吸湿性好、穿着滑爽舒适等优良性能,因此是高档纺织原料之一。蚕有家蚕和野蚕两类。家蚕在室内饲养,以桑树叶为饲料,吐出的丝称为桑蚕丝或家蚕丝(俗称真丝)。野蚕有柞蚕、蓖麻蚕、木薯蚕等,从野蚕蚕茧中只能获取少量的纤维作丝使用。

## 二、化学纤维

### 1. 人造纤维

人造纤维包括人造纤维素纤维和人造蛋白质纤维。

人造纤维素纤维主要为再生纤维素纤维,如黏胶纤维、铜氨纤维、醋(酸)酯纤维等。

人造蛋白质纤维有酪素纤维、玉米蛋白纤维、花生蛋白纤维、大豆蛋白纤维等,属于再生植物蛋白质纤维类。如大豆蛋白纤维,是以天然食用蛋白质为原料,采用化学、生物的方法从榨取油脂(大豆中约含 20% 油脂)的大豆豆渣(含 35% 蛋白质)中提取球状蛋白质,通过添加功能性助剂,与含腈基、羟基等的高聚物接枝、共聚、共混,制成一定浓度的蛋白质纺丝溶液,改变蛋白质空间结构,经湿法纺丝而成的人造纤维。其生产过程对环境、空气、人体、土壤、水质等无污染,纤维本身易生物降解,主要成分是大豆蛋白质(23%~55%)和高分子聚乙烯醇(45%~77%)。大豆蛋白纤维密度小,单丝线密度低,强度与伸长率较高,耐酸、耐碱性较好,具有羊绒般的手感、蚕丝般的光泽、棉纤维的吸湿和导湿性及穿着舒适性和羊毛的保暖性。

### 2. 合成纤维

合成纤维是低分子化合物聚合而成高分子化合物经成形加工而得到的纤维。并不是从任何高分子化合物都能得到有机高分子纤维。定性地说,大分子互相缠结,整体看形成线状,并且各处具有一定的结晶,能防止大分子间滑移,使纤维赋有力学性能。因此,成纤高分子化合物应具备以下条件:尽可能是线性;具有一定的链长(相对分子质量  $10^4 \sim 10^6$ );具有结晶性;含极性基团。

合成纤维又分为碳链类合成纤维和杂链类合成纤维。

碳链类合成纤维有聚丙烯腈纤维(腈纶)、聚丙烯纤维(丙纶)、聚乙烯醇缩醛纤维(维纶)、聚氯乙烯纤维(氯纶)、聚四氟乙烯纤维(氟纶)等。

杂链类合成纤维有聚酯纤维(涤纶)、聚酰胺纤维(锦纶、芳纶)、聚氨酯弹性纤维(氨纶)、聚酰亚胺纤维(PI 纤维)、聚苯并咪唑纤维(PBI 纤维)、聚苯撑三叠氮纤维(PTA 纤维)等。

## 第二节 纤维的基本结构

所谓纤维的结构,是指构成纤维不同层次的结构单元,当它们处于平衡态时所具有的空间排列特征。首先是构成纤维的高分子化合物的长链分子的原子或原子团组成及其在空间的排列位置,这是纤维的一次结构特征,也称纤维的链结构或分子结构。纤维的二次结构特征,则指处于平衡态时组成该纤维的高聚物长链分子相互间的几何排列特征,也称纤维的聚集态结构或超分子结构。纤维的三次结构特征,指纤维中尺度比超分子结构更大一些单元的特征。例如,纤维中多重原纤的排列,纤维断面的结构、组成和形状,以及可能存在于纤维中的空洞、裂隙、微孔的大小和分布等,也称纤维的形态结构。通常所谓纤维的结构,就是指纤维这三个层次的结构特征。

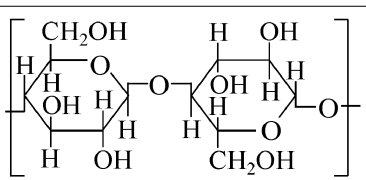
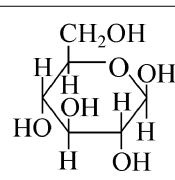
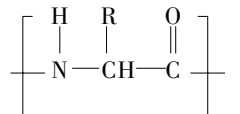
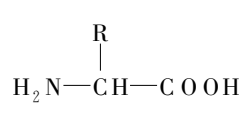
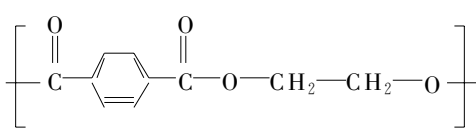
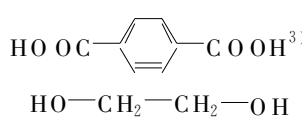
纤维的结构特征,相应决定了纤维所具有的某些性能。纤维的性质受一次至三次结构的影响。化学性质(包括染色性)只与一次结构有关,物理性能则由二次和三次结构所决定。

### 一、纤维的分子结构

#### 1. 链的化学结构

成纤高聚物一般都为线形结构,其长链高分子链节的化学构成,是该高聚物长链化学结构的主要表征。造纸、皮革、染整工业所用的纤维大多数是杂链类或碳链类的高聚物,它们的化学结构如表 1-1 所示。

表 1-1 常见各种典型成纤高聚物的链节结构

纤维	链节结构	生成用单体
棉花 <sup>1)</sup>		
羊毛 <sup>2)</sup>		
涤纶		

续表

纤维	链节结构	生成用单体
锦纶	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{N} - (\text{CH}_2)_5 - \text{C} \\    \\ \text{O} \end{array} \right]$	$\text{HN} - (\text{CH}_2)_5 - \text{CO}$
腈纶 <sup>4)</sup>	$\left[ \begin{array}{c} \text{CN} \\   \\ \text{CH}_2 - \text{CH} \end{array} \right]$	$\begin{array}{c} \text{CN} \\   \\ \text{CH}_2 = \text{CH} \end{array}$
维纶 <sup>5)</sup>	$\sim \text{CH}_2 - \underset{\text{O}-\text{CH}_2-\text{O}}{\text{CH}} - \text{CH}_2 - \underset{\text{OH}}{\text{CH}} - \text{CH}_2 - \text{CH} \sim$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 = \text{CH} \\   \\ \text{O} \text{ C O } \text{CH}_3 \end{array}$
丙纶	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_2 - \text{CH} \end{array} \right]$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_2 = \text{CH} \end{array}$
氯纶	$\left[ \begin{array}{c} \text{Cl} \\   \\ \text{CH}_2 - \text{CH} \end{array} \right]$	$\begin{array}{c} \text{Cl} \\   \\ \text{CH}_2 = \text{CH} \end{array}$

1) 也是天然纤维麻类和化学纤维中黏胶纤维、铜氨纤维等的链节结构。

2) 也是蚕丝等天然蛋白质纤维的链节结构。

3) 也可取用  $\text{H}_3\text{COOC} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{COOCH}_3$  (DMT) 为生成用单体。

4) 长链分子中还含有少量(7%~9%)第二单体和第三单体的构成单元。

5) 长链分子中约有 30% 的羟基与甲醛缩合成六元环,其余约 70% 羟基被保留。

成纤高聚物链节的化学构成,对所得纤维的化学反应性、染色性、热稳定性、对日光-大气的稳定性等有重要影响。一般来说,主链中只含 C—C 键的碳链类成纤高聚物耐化学试剂的稳定性较好;杂链类成纤高聚物中的酯键、酰胺键,对水解反应比较敏感,水解能使它们发生降解。但是,如果在这类键的附近引入苯环,会对其水解起抑制作用;如果主链中引进众多的苯环,则有助于提高所得纤维的热稳定性。

此外,成纤高聚物化学结构中的侧取代基的性质,对所得纤维的各种物理、化学性质有明显的影响。例如,羟基等亲水性基团的存在,有助于提高纤维的吸湿性;氰基的存在,有助于提高所得纤维的耐日光-大气稳定性;卤素取代基的存在,有助于提高纤维的难燃性。

## 2. 链的化学异构和立体异构

具有相同的分子式而性质不完全相同的化学物叫异构体。常见高聚物的异构有链的支化异构、顺序异构、结构异构、旋光异构和几何异构。前三者并称为链的化学异构,后两者并称为链的立体异构。

链的化学异构和立体异构对纤维的性质有重要的影响,将在后续有关章节中针对不同的纤维加以分述。

## 3. 链的长度——相对分子质量及其分布

成纤高聚物的相对分子质量及其分布,对该高聚物的加工性能及所得纤维的性能有重要的影响。如某一种性能,只要它与整个分子运动或相互间作用力有关,就必然与其相对分子质量和相对分子质量分布有关。

成纤高聚物的相对分子质量是指按某种统计方法计算得到的平均相对分子质量。根据所用统计计算方法的不同,相应产生多种不同的平均相对分子质量。

(1) 数均相对分子质量( $\bar{M}_n$ )

$$\bar{M}_n = \sum_i \frac{n_i M_i}{n_i}$$

式中:  $n_i$ —— $i$ 级分的分子数;

$M_i$ —— $i$ 级分的相对分子质量。

(2) 重均相对分子质量( $\bar{M}_w$ )

$$\bar{M}_w = \frac{\sum_i m_i M_i}{\sum_i m_i}$$

式中:  $m_i$ —— $i$ 级分分子的质量。

因为

$$m_i = n_i M_i$$

所以

$$\bar{M}_w = \frac{\sum_i n_i M_i^2}{\sum_i n_i M_i}$$

(3)  $z$  均相对分子质量( $\bar{M}_z$ )

$$\bar{M}_z = \frac{\sum_i n_i M_i^3}{\sum_i n_i M_i^2}$$

(4) 黏均相对分子质量( $\bar{M}_\eta$ )

$$\bar{M}_\eta = \left( \frac{\sum_i n_i M_i^{\alpha+1}}{\sum_i n_i M_i} \right)^{1/\alpha}$$

式中:  $\alpha$ —— $[\eta] = K M^\alpha$  关系式中的幂指数,一般为  $0.65 \sim 0.85$ 。

对一般的高聚物样品来说

$$\bar{M}_z > \bar{M}_w > \bar{M}_\eta > \bar{M}_n$$

当已知测试的样品为单分散性试样时

$$\overline{M}_z = \overline{M}_w = \overline{M}_\eta = \overline{M}_n$$

相对分子质量分布表示相对分子质量的多分散性。传统测定相对分子质量分布曲线的方法有分级沉淀法和分级溶解法,测定过程费时长、操作繁琐。目前都已采用凝胶渗透色谱(GPC)进行测定。

一般来说,成纤高聚物的平均相对分子质量越高,相应开始出现非牛顿流动的临界切变速率值越小。在一定范围内,随着成纤高聚物平均相对分子质量的提高,所得纤维的强度提高,纤维的疲劳性能得到改善。成纤高聚物的相对分子质量分布越窄,所得纤维的结构均一性越好。

#### 4. 链的柔顺性

高聚物长链分子能不同程度发生卷曲的特性叫做链的柔顺性。它是决定链分子形状的主要因素,对高聚物的物理机械性能具有很大的影响。链的柔顺性主要是由于长链的内旋转所产生,它可由以下几种参数给予表征。

##### (1) 内旋转活化能

由 $\sigma$ 电子构成的单键,由于其电子云分布是轴向对称的,所以能环绕轴线相对地自由旋转,即产生内旋转。长链分子单键内旋转时所产生的种种空间排布方式叫做构象。分子从势能最小旋转到势能最大时需要克服的势垒,称为内旋转的活化能。

高聚物长链分子的柔顺性,与长链分子所含单键的内旋转难易有关,也即与个别单键的内旋转活化能有关。内旋转活化能特别大,该成纤高聚物的长链分子比较刚;内旋转活化能特别小,则此长链分子比较柔。

##### (2) 均方末端距

高聚物的柔顺性取决于其长链分子卷曲的程度,因此,可借用长链分子两 endpoint 间的直线距离——末端距来量度。末端距是一个统计平均值,在统计过程中,它被看成是一个向量,所以取其值平方的平均,叫均方末端距。

一个长链分子的末端距,与其链的柔顺性密切相关。完全伸展的长链分子的末端距最大,构象数最少,构象熵趋于零;处于卷曲状态的长链分子,末端距变短,构象数增多,构象熵增大。孤立的长链分子,在没有外力的作用下,总是自发地采取卷曲状态,使构象熵趋于最大,这就是高聚物长链分子具有柔顺性的实质。

##### (3) 均方回转半径

均方回转半径是一个与均方末端距相似的、能用以表征长链分子构象和柔顺性的参数。其定义是由质心到各回转单元的矢量距的平方的平均值。均方回转半径越小,说明该高聚物的长链越柔顺。

##### (4) 链段长度

链段是长链分子中可独立发生运动的单元,由运动中受到牵制的若干个链节组成。链段短,说明该高聚物中能独立运动的单元多,该高聚物的长链比较柔顺;

相反,若链段很长,甚至长到与一个分子链一样长,它就很难运动,显现出很大的刚性。所以链段长度也是表征长链分子柔顺性的一个参数。

综上所述,高聚物的分子结构对长链分子柔顺性的影响可归纳为:

1) 高聚物的链越长,平均相对分子质量越高,内旋转可能获得的构象数越多,长链分子就越柔顺。

2) 在主链结构中引进杂原子,由于碳-杂原子单键的内旋转活化能比 C—C 单键的小,其长链分子柔顺性改善;在主链中引进共轭双键,由于形成所谓的  $\Pi$  键,整个共轭双键都不能发生内旋转,长链分子的柔顺性下降,刚性增大。

3) 取代基的空间位阻增加、极性增大和取代密度增大,都使长链分子的柔顺性下降,刚性增大。但当取代基在长链上呈轴向对称时则有助于长链的内旋转,使链的柔顺性增大。

4) 一般来说,分子间的交联能导致长链的柔性下降。

## 二、纤维的聚集态结构

纤维的聚集态结构又称超分子结构,指的是构成该纤维成纤高聚物本体的内部结构,即长链分子的堆砌和排列、晶态结构、非晶态结构和取向结构。

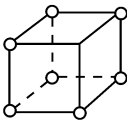
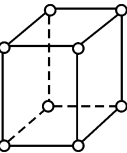
### 1. 纤维的晶态结构

#### (1) 结晶学的基本概念

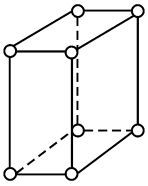
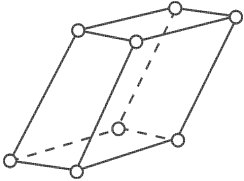
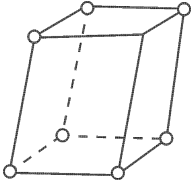
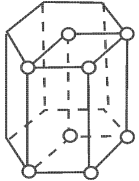
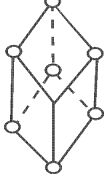
1) 晶胞和晶胞参数。任何一种晶体都有一定的几何形状,组成晶体的质点在空间做有序的周期性排列,即形成所谓的空间点阵。这些点阵排列所具有的几何形状叫结晶格子,简称晶格。晶胞是结晶体中具有周期性排列的最小单元。

为了完整地描述晶胞的结构,采用 6 个晶胞参数来表示其大小和形状。它们是平行六面体三晶轴的长度  $a$ 、 $b$ 、 $c$  及其相互间的夹角  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。尽管晶体有千百万种,但组成它们的晶胞只有 7 种,如表 1-2 所示。

表 1-2 晶体的七种晶系及参数

图形	晶系名称	晶胞参数
	立方	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
	四方	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

续表

图形	晶系名称	晶胞参数
	斜方 (正交)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
	单斜	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$
	三斜	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
	六方	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
	三方 (菱形)	$a = b = c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

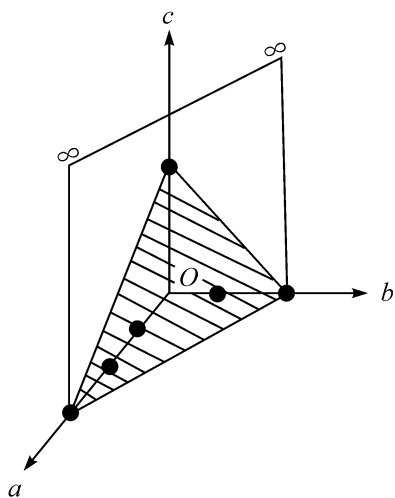


图 1-1 标记晶面指数的示意图

2) 晶面和晶面指数。结晶格子内所有的格子点全部集中在相互平行的等距离的平面群上, 这些平面叫做晶面, 晶面的间距为  $d$ 。同一晶体从不同角度去分割可得到不同的晶面。标记这些晶面的参数叫做晶面指数。由于它是密勒 (Miller) 首先提出来的, 所以也叫密勒指数。

按密勒的建议, 所示晶面可用该晶面在三晶轴  $a$ 、 $b$ 、 $c$  上截距的倒数来表征, 如图 1-1 所示。图中划线的面, 它在  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三晶轴上的截距分别为  $3a$ 、 $2b$ 、 $1c$ , 取各自的倒数得  $1/3$ 、 $1/2$ 、 $1/1$ , 通分得  $2/6$ 、 $3/6$ 、 $6/6$ , 弃去公分母, 添加圆括弧以表示一组晶面, 所以该组晶面的晶面指数为  $(236)$ 。图中未划线的晶面指数应为  $(230)$ 。其他晶面的表示可见图 1-2。

其他晶面的表示可见图 1-2。

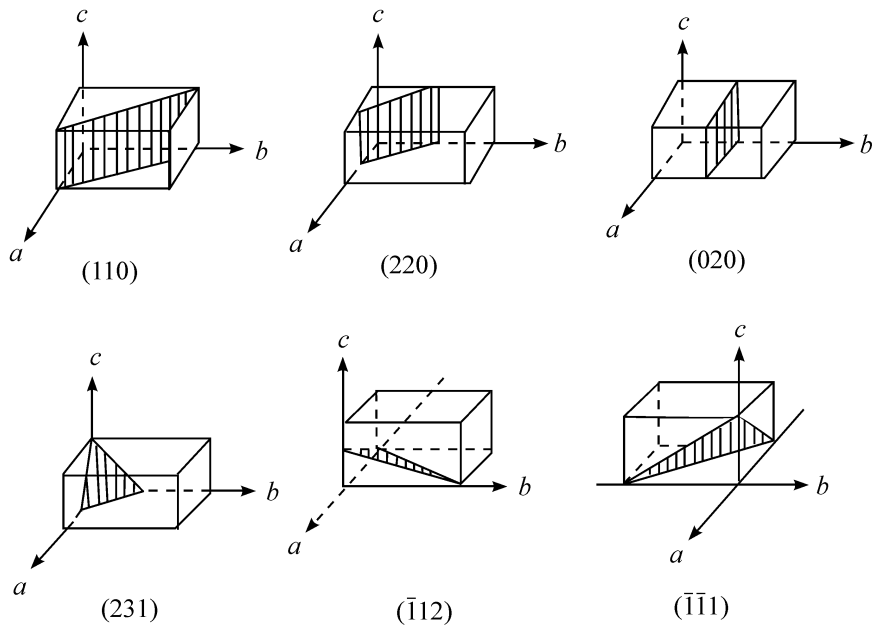


图 1-2 不同晶面的晶面指数

(2) 成纤高聚物的结晶结构

1) 高聚物的构象。结晶性高聚物的长链分子,在其砌入晶格时需有一定的构象,通常有两种:一种为锯齿形构象[图 1-3(a)];另一种为螺旋形构象[图 1-3(b)]。常见的几种结晶性成纤高聚物,多数为锯齿形构象,如纤维素、聚酰胺、聚对苯二甲酸乙二酯、聚乙烯醇等,少数具螺旋形构象,如等规聚丙烯。

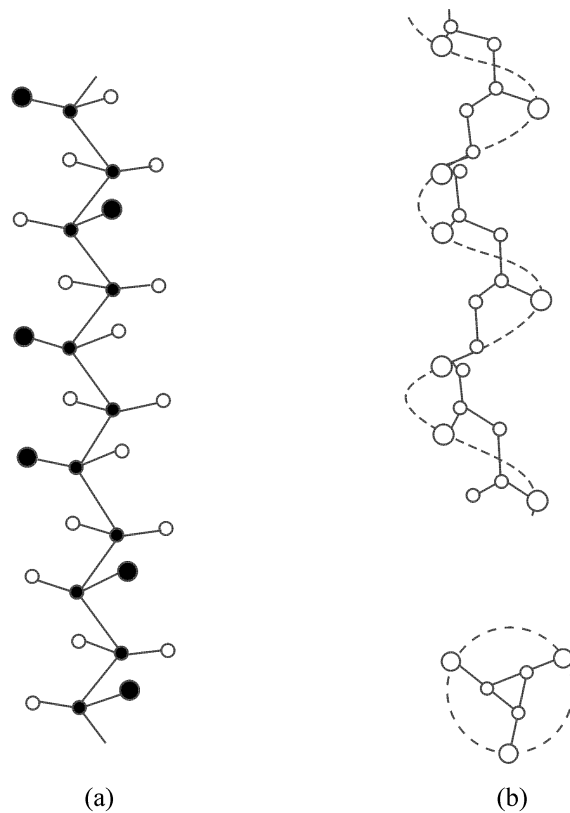


图 1-3 晶格中长链分子的两构象



2) 高聚物的结晶变体。结晶变体是指同一高聚物在不同外部条件下所得到的不同结晶结构。如纤维素的结晶变体有纤维素 I、纤维素 II、纤维素 III、纤维素 IV 和纤维素 X。

在同一种结晶性高聚物的众多变体中,有些变体事实上已不再是完整的、典型的结晶体,它们在空间的排列是有序的,但又不完全严格有序,将这些晶体称为介晶体(mesomorphic state),意即介于真正的晶相与非晶相之间。在固态中,按其长链分子排列的序态完好程度的顺序又可分为准晶态(paracrystal state)、近晶态(smectic state)和向列晶态(nematic state)。

常见的结晶性成纤高聚物的晶胞结构将在以后相关章节中分述。

### (3) 成纤高聚物的结晶过程

不是所有的高聚物都能结晶,只有长链分子规整的、对称性好或没有太大侧取代基的高聚物才能产生结晶;此外,还需要合适的外部条件,如合适的温度和时间,才能使一个能够结晶的高聚物真正获得结晶。

凡结晶性的高聚物,当它的熔体温度被缓慢地冷却下来并达到其熔点( $T_m$ )和玻璃化温度( $T_g$ )间任一温度时,都可能产生结晶,但其结晶速度可能不同。

成纤高聚物的链结构对结晶能力有重要的影响。化学结构和立体结构规则 and 对称的高聚物易于结晶;侧取代基小的高聚物易于结晶;刚性链不利于链段的活动,其结晶速度比柔性链的低;主链结构中有对称中心的结晶速度高。

### (4) 晶态结构对纤维性能的影响

一般来说,纤维随着其结晶度的增大、长链分子间的敛集密度随之增大,纤维的相对密度、断裂强度、初始模量、尺寸稳定性等都有所提高,而纤维的染色性能有所下降,纤维的疲劳强度、断裂伸长率也有所下降。

在纤维的聚集态中,晶粒的尺寸宜小不宜大。晶粒尺寸比较小,纤维聚集态结构细密而均匀;结晶粒子过大,纤维聚集态结构的均匀性下降,导致纤维的耐磨性和疲劳强度变差。所以,为了改善纤维性能而适当提高结晶度的同时,务必注意勿使晶粒的尺寸明显增大。

## 2. 纤维的非晶态结构

由非结晶性成纤高聚物所得的纤维呈现非晶态。由结晶性成纤高聚物所得的纤维,结晶态和非晶态共存于一体,其结晶态部分称为结晶区,非晶态部分称为非晶区或无定形区。所谓纤维结构中的非晶区,指其长链分子的排列无序,对应 X 射线衍射无清晰图像可得的部分。

在纤维中,长链分子排列的序态是连续的,在结晶态和非晶态之间,存在着许多过渡状态,可用侧序分布曲线来表征纤维聚集态结构中从完全晶态到完全无序态之间的变化。侧向有序程度较高时,长链分子间的作用力也较强,聚集能大,熵

值较小,可及度也相对较小;对于低序区,分子间的聚集能相应减小,熵值增大,可及度也相应增大。

在具有结晶态的纤维中,与结晶态共存的非晶态部分,赋予纤维形变性能、吸湿性、透气性和染色性等,当然这些性能也还和处于非晶态的长链分子的序态有关。

非晶态部分的结构比较松散,分子间作用力相对较小,链段发生运动的自由度相应较大,所以,在应力作用下纤维发生的形变主要是非晶态部分链段发生形变。纤维发生形变后的弹性回复能力,既与纤维结构中晶区的多少、大小及分布有关,也与非晶态部分链段活动的能力和自由度有关。非晶态部分的结构比较松散,密度较小,所以染料分子等较易在这些区间内扩散、渗透,适当增大纤维结构中的非晶态部分,有助于增强纤维的染色性、吸湿性和透气性等。

### 3. 纤维的取向结构

#### (1) 拉伸过程中纤维取向结构的变化

拉伸和取向是指构成纤维的分子长链或其链段以及结晶性高聚物的片晶,在外力的作用下,顺着外力作用的方向做有序的排列,其中拉伸是手段、取向则是获得的结果。非晶区长链分子的拉伸取向过程可分为分子取向(构成纤维的整个长链分子获得取向)和链段取向(长链分子的链段获得取向)。

#### (2) 取向结构对纤维性能的影响

纤维取向结构对纤维性能最直接的影响是纤维的强度和延伸度。通过拉伸,可使连接晶片与晶片之间的缚结分子数增加,构象熵减小,晶体和分子链的取向度

表 1-3 拉伸过程中纤维结构和性能的变化

纤维	拉伸 倍数	强度 /(cN/tex)	延伸度 /%	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	结晶度 /%	双折射 ( $\Delta n \times 10^3$ )	取向因子 $f_b$
聚酰胺 6	1.15	12.70	269	1.1327	20.5	11.9	0.163
	1.5	14.09	259	1.1331	20.9	21.0	0.438
	2.0	19.03	133	1.1337	21.4	42.5	0.582
	2.5	24.70	75	1.1342	21.8	43.2	0.591
	3.0	31.84	67	1.1347	22.3	43.8	0.599
	3.5	37.04	48	1.1385	25.6	46.0	0.630
	4.0	41.90	24	1.1445	30.9	53.3	0.730
聚酯	1.1	12.88	325	1.3436	7.77	17.6	0.067
	1.5	15.79	226	1.3449	8.94	43.8	0.168
	2.0	22.67	123	1.3503	13.7	106.0	0.407
	2.5	28.84	84	1.3541	17.0	120.0	0.461
	3.0	35.46	53	1.3679	29.1	164.0	0.630
	3.3	37.57	35	1.3717	32.5	166.0	0.638

注:拉伸为一段常温拉伸,拉伸速度为 500m/min。

增大,导致纤维的强度增加、延伸度下降、初始模量增大、疲劳强度降低。表 1-3 列举了聚酰胺 6 和聚酯纤维在拉伸过程中结构和性能的变化。

### 三、纤维的形态结构

所谓形态结构,是指纤维中尺寸比超分子结构更大一些单元的敛集特征。它们在光学显微镜或电子显微镜下能被直接观察到,诸如纤维的多重原纤结构,纤维断面的形状、结构和组成,以及存在于纤维中的各种裂隙、空洞等。

#### 1. 纤维的多重原纤结构

从比聚集态结构尺寸更大一些的单元来分析,纤维是由多重原纤组成,包括以下层次:

1) 基原纤(protofibril 或 elementary fibril)。也称基微纤维,是原纤中最小的结构单元。一般地说,它是由几根以至十几根长链分子,互相平行地、按一定距离和一定相位、比较稳定地结合在一起的大分子束,直径为  $10 \times 10^{-10} \sim 30 \times 10^{-10} \text{ m}$ ,并且有一定的柔曲性。

2) 微原纤(microfibril)。是由若干根基原纤平行排列组合在一起的大分子束。微原纤的形成,一是靠基原纤间分子间力的作用,二是借助于贯穿两个以上基原纤的大分子链的纵向连接。在微原纤内,基原纤与基原纤之间存在缝隙和空洞,天然纤维中,其间还可能掺填一些其他成分的化合物。微原纤的直径为  $100 \times 10^{-10} \sim 500 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。

3) 原纤(fibril)。是由若干根微原纤基本上平行地组合在一起的、更为粗大一些的大分子束。它也是依赖分子间力和大分子链的纵向连接,将多个微原纤排列组合在一起而形成的。原纤中存在着比微原纤更大的缝隙和空洞,还有序态比较差的非晶态部分。对于天然纤维,还可能夹杂一些其他成分的化合物。原纤的直径通常为  $1000 \times 10^{-10} \sim 5000 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。

4) 大原纤(macrofibril)。是由多个原纤堆砌在一起组成的大分子束。对多细胞的天然纤维,大原纤组成该纤维的一个细胞。大原纤的横向尺寸一般可达  $15\ 000 \times 10^{-10} \text{ m}$ (即  $1.5 \mu\text{m}$ )。

5) 纤维(fiber)。大原纤堆砌在一起便成纤维。因此,在每根纤维中,存在着多重微丝状的结构单元,它们不仅尺寸不同,排列状态也不尽相同,此外,还包含许多大小不一的缝隙和空洞。

有关纤维中原纤的形成和排列的特征,目前尚未完全清楚。各级原纤的断面,可能呈现为圆柱形、圆环形、六角形或长方形等多种形状,从纵向排列看,有成螺旋形扭曲排列的(如天然棉纤维中的原纤),也有成简单的棒状排列的(如羊毛角朊中的原纤)。各类纤维的多重原纤结构特征将在以后的相关章节中具体介绍。

## 2. 纤维断面的形状

不同的纤维有不同的断面形状。天然纤维棉花的断面呈腰圆形,断面中心有一干涸了的空腔(细胞腔)。羊毛断面呈不很规整的圆形,外层覆有鱼鳞般的鳞片。蚕丝的断面呈三角形,每一根蚕丝中含有两根平行着的由丝朊组成的丝缕。至于常见的各种化学纤维,断面形状更是多种多样,诸如不规则的锯齿形(黏胶纤维)、扁平的马蹄形(维纶)、犬骨形(腈纶)、豆形(氯纶)和圆形(涤纶、锦纶、丙纶)等。

随着异形纺丝技术的推广和应用,化学纤维断面形状几乎已到随心所欲的地步,如三角形、三叶形、十字形、T形、H形,使所得纤维制品的风格和性能发生许多新的变化。与圆形断面相比,异形断面纤维会产生不同的光泽效应,改善织物的蜡状感,提高纤维的染色速率和得色的鲜艳度。

## 3. 纤维结构中的空洞

纤维结构中在一定数量的空洞,对于改善纤维的吸湿性、染色性等有一定的帮助,但是空洞的存在,对纤维的力学性能、光学性能的改善是不利的。所以,一般情况下,必须控制纤维结构中的空洞含量。纤维断面结构中一般不允许存在直径1mm的微孔。

# 第三节 纤维的基本性质

## 一、纤维的长度、宽度与密度

植物纤维的长度和宽度一般是指其平均值,即平均纤维长度和平均纤维宽度,单位一般用毫米和微米。纤维宽度也可用粗度表示。纤维粗度是纤维每单位长度的质量,用mg/100m纤维表示。

纤维原料不同或生长地区不同的植物纤维的长宽度均有差异。总的来说,针叶木纤维较长,宽度也较粗些。草类纤维与阔叶木纤维的长度比较接近,宽度比较小,竹子、龙须草纤维较阔叶木纤维长。在考虑纤维长度的影响时,只看纤维平均长度或长宽比值是不够全面的,还必须注意纤维长、宽度的不均一性。通常用频率分布表、图或曲线表示纤维长度或宽度的不均一性。

测量纤维长度(或宽度)时,将纤维按不同长度(或宽度) $N_i$ 的大小分级,计算每级测量的根数,并按下式计算

$$D = \frac{N_i}{\sum N_i} \times 100\%$$

将此值绘图,即为分布频率图。

化学纤维的特点是长度和粗细可任意地改变,以适合不同产品的要求。最细

的用于人造皮革的纤维,是 0.0011tex 的聚酯和尼龙。

在法定计量单位中,表示化学纤维粗细程度的量称为“线密度”(表 1-4)。在我国化学纤维工业中,旧称“纤度”。线密度的单位为特(tex),其 1/10 称为分特(dtex)。在公定回潮率下,1000m 长的纤维质量的克数即为该纤维的特数。因此

$$1\text{tex} = 10^{-6} \text{ kg/m} = 1 \text{ mg/m}$$

$$1\text{dtex} = 10^{-7} \text{ kg/m} = 0.1 \text{ mg/m}$$

表 1-4 几种天然纤维的相对密度、长度和线密度(细度)

纤维	棉花	亚麻	苧麻	羊毛	蚕丝
相对密度	1.54~1.56	~1.50	1.50	1.32	1.33~1.45
长度/mm	13~70	4~70	60~250	40~70	—
细度/tex	0.11~0.22	~0.19	0.69	0.33~0.83	0.12~0.19

旦[尼尔](den,简称旦)是指 9000m 长的纤维具有的质量(g),故

$$1\text{tex} = 9\text{den}$$

$$1\text{den} = 1/9\text{tex}$$

公制支数(简称公支)是指在公定回潮率下 1g 纤维所具有的长度(m),为纤维线密度的倒数。如 1g 纤维具有 300m 长,即 300 公支。

旦和公支为非法定计量单位,今后不单独使用。

特数(或旦数)越小,单纤维越细,手感越柔松,光泽柔和且易变形加工。

纤维的长度是外部形态的主要特征之一,天然纤维的长度随纤维种类的不同而不同,而且每种纤维的长度又有一定的分布宽度。化学纤维一般是模仿天然纤维各种平均长度等长切断的,现在开始有模仿天然纤维而制备的异长度纤维(如芳纶纤维的浆粕化)。化纤长丝则不进行切断。

纤维的细度(fineness)不仅影响纤维强度、伸度、刚性、弹性和形变的均一性,而且极大地影响织物的手感、风格以及纤维和织物的制造过程。例如,采用细的棉纤维且其细度均匀时,则可制得柔软且不易起皱的高级织物。纤维的细度对其性能的影响见表 1-5。

表 1-5 纤维细度与功能的关系

纤维种类	线密度/dtex	直径/ $\mu\text{m}$	功能或特性
细旦(丝型)	1.1~2.8	4~10	柔软,滑爽
超细	0.11~1.1	0.4~4	吸湿,导湿
特细(皮纤维)	<0.11	<0.4	鹿皮的异向光泽
微纤	<0.011~0.11	<0.02~0.4	吸附,超滤
原纤	0.0011	0.006	吸附,超滤
线形分子链	0.000 11	0.0004	极性基吸色,固色

## 二、纤维的吸湿、溶胀和溶解

纤维的吸湿、溶胀和溶解对纤维的性质和加工性能有重要的影响。本节阐述纤维的吸湿、溶胀和溶解。有关纤维素纤维的吸湿、溶胀和溶解,还将在第三章中专门讨论。

### 1. 纤维的吸湿

纤维从大气中吸水或纤维中的水逸散到大气中的综合现象称为纤维的吸湿性。

纤维的吸湿是比较复杂的物理化学现象。纤维大分子上的极性基团依靠氢键与水分子缔合形成水合物,这是纤维具有吸湿性的主要原因。纤维素分子的每个葡萄糖单元含有三个羟基,易与水分子形成氢键,因此,纤维素纤维的吸湿性强。合成纤维的吸湿基团较少,故其吸湿性较差。纤维的聚集态结构对吸湿性有相当大的影响。吸湿主要是发生在纤维的无定形区,水分子一般是不能进入结晶区的。纤维分子中存在较强的极性基能导致高的吸湿能力,纤维聚集态结构中的结晶度、水与极性基团的结合强度也影响纤维的吸湿性。

纤维的吸湿性可用回潮率或含水率来表示

$$\text{回潮率 } R = \frac{m}{D} \times 100\%$$

$$\text{含水率 } M = \frac{m}{D + m} \times 100\%$$

式中:  $m$ ——试样所含水分的质量, g;

$D$ ——干燥试样质量, g。

$R$  和  $M$  的关系为

$$R = \frac{100 m}{D}$$

$$M = \frac{100 m}{D + m} = \frac{100 m / D}{1 + m / D} = \frac{R}{1 + R / 100} = \frac{100 R}{100 + R}$$

纤维的回潮率随温度、湿度而变化。为了比较不同纤维的吸湿能力,往往将样品放在统一的标准条件下,经一定时间后,使其回潮率达到稳定,这时候的回潮率叫做标准状态下的回潮率。我国规定的标准中温度为  $20^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度为  $65\%$ 。表 1-6 为部分纤维在  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $65\%$  相对湿度下的回潮率。从此表中看出,天然纤维和再生纤维的回潮率较高,合成纤维的回潮率较低,其中丙纶和氯纶的回潮率为零。