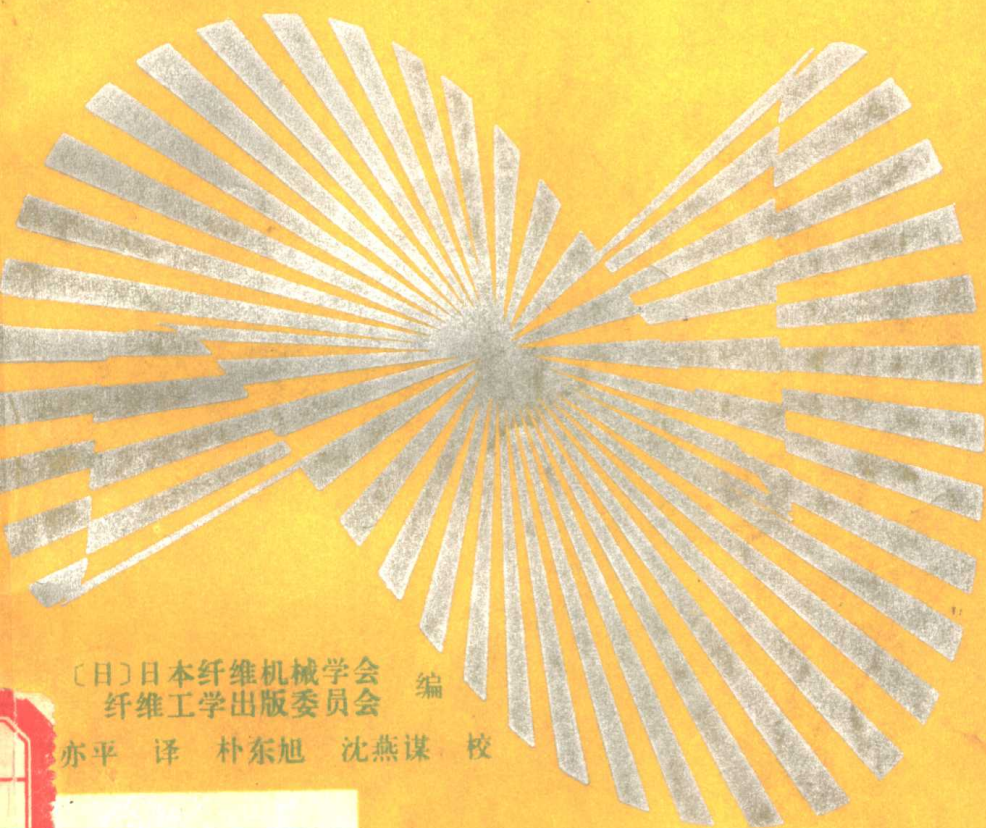


# 纤维的形成 结构及性能



〔日〕日本纤维机械学会 编  
纤维工学出版委员会

亦平 译 朴东旭 沈燕谋 校

纺织工业出版社

# 纤维的形成、结构及性能

〔日〕 日本纤维机械学会纤维工学出版委员会 编

丁亦平 译

朴东旭 沈燕谋 校

纺织工业出版社

## 内 容 提 要

本书从基础理论角度出发,系统地介绍各类成纤高分子的分子结构、合成和纺丝、纤维高分子的微细结构及物理性质,并将与合成、纺丝有关的已工业化生产的新技术和技术管理,编入有关章节。

本书内容较系统完整,取材新颖,结合实际。有助于开阔从事纤维开发研究人员知识视野。可作为纤维高分子材料、纤维高分子工学专业的教学和研究生的参考书,亦可供从事纤维研究开发而又非纤维专业的技术人员自学参考。

责任编辑:周峻林

## 纤维的形成、结构及性能

〔日〕日本纤维机械学会纤维工学出版委员会 编

丁亦平 译

朴东旭 沈燕谋 校

纺织工业出版社出版

(北京东长安街12号)

纺织工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

787×1092毫米 1/32 印张: 15 28/32 字数: 352千字

1988年10月 第一版第一次印刷

印数: 1—3,000 定价: 4.60元

ISBN 7-5064-0003-0/TS·0004

# 前 言

本书是新纤维工学丛书的第二分册。其内容由(1)成纤线型高分子的合成(包括天然高分子)，(2)成纤线型高分子的分子结构、分子量及分子链的柔曲性，(3)高分子溶液、熔体的单轴取向物——纤维的形成(纺丝)，(4)纤维的微细结构及其物理性质。以前，将(1)~(3)划为纤维工学，(4)划为纤维物理学。但为了更迅速地发展纤维科学和技术，从基础理论角度出发，对起始原料低分子化合物直到纤维全面地理解是有必要的，将有助于培养知识面较宽的研究技术人员。本书可作为高分子材料专业、纤维专业的大专院校学生的教科书和参考书。最近在工厂企业中，新从事于纤维研究开发的技术人员中，除了纤维工学专业外，大多是化学、物理、机械等其它学科的专业人员。因此，本书也可作为这些人员的自学书和讲义。

在编著本书时，特别注意了下述各点：

(1) 所取的内容，基本上只限于较重要的项目，所下的定义也是根据已确立的理论和公认的事实。

(2) 从整体而言，设法从分子水平来理解纤维。

(3) 重视基础知识的同时，又果断地删除了各论中的繁琐叙述。

(4) 除原文以外，还简单地介绍了工业上感兴趣的内容。

(5) 各项内容均委托专家承担执笔，共65人。编委委员负责原稿内容的增删、校核，同时又注意保持前后的一致性。这虽使执笔者因内容被更改而不悦，但编委委员的编著方案很快被执笔者采纳。在此，向各位共同协力的执笔者和编委委员致以深切的谢意。

编辑委员会委员长 上出健二

## 译 序

《纤维工学》丛书第二册——《纤维的形成、结构及性能》是由日本纤维机械学会纤维工学出版委员会组织65位专家、教授分别编写与各自从事领域和专业有关的章节，最后由编委会统编定稿成册。

该书的特点是从分子设计角度出发，将高分子科学与纤维材料学有机地结合起来，较系统、全面地阐述纤维材料高分子的合成、加工工艺、结构和性能；各章节均较多地引用了有关专利、有关学者和专家研究工作中的图、表、数据，取材较新（涉及了非常规的液晶纺丝、共混、复合、高速纺丝等新技术）；既注重基础理论，又联系实际。所以，自1983年出版以来，受到日本从事纤维教学和科研工作者的好评。

当前，材料科学已成为发展科学技术的三大要素之一。由于各学科的互相交叉和渗透，可以说任何科学领域的现代化都与纤维材料高分子有关。为促进我国纤维材料高分子工业高技术地发展，将本书译出，以供从事纤维开发研究和大专院校的科研人员参考、借鉴。

本书原附有执笔者名单和日语索引，译文中未列出，特此说明。在翻译本书时，译者尽力地改正原文中的错印和失误之处，限于水平，难免还有疏漏，恳请读者指正。

本书第1~5章由朴东旭校阅，第六章由沈燕谋校阅，

### 编辑委员会委员

委员长 上出健二

旭化成工业

副委员长 松尾達樹

东洋纺织

委员 清造 剛

京都工艺纤维大学

真鍋征一

旭化成工业

物延一男

冈山大学

# 目 录

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 第一章 绪论.....           | (1)   |
| 第二章 成纤高分子的合成.....     | (14)  |
| 第一节 天然高分子及其衍生物.....   | (14)  |
| 一、纤维素.....            | (14)  |
| 二、蛋白质.....            | (25)  |
| 三、纤维素衍生物.....         | (39)  |
| 第二节 合成高分子.....        | (44)  |
| 一、缩聚类.....            | (44)  |
| 二、加聚类.....            | (58)  |
| 三、共聚类.....            | (73)  |
| 第三章 高分子的特性.....       | (77)  |
| 一、化学结构.....           | (77)  |
| 二、分子量及其分子量分布.....     | (91)  |
| 三、分子链的固有特性.....       | (117) |
| 第四章 高分子的成纤.....       | (143) |
| 第一节 成纤原理.....         | (143) |
| 一、化学纤维成纤原理及其特征.....   | (143) |
| 二、熔融、干法、湿法纺丝.....     | (144) |
| 三、纤维的基本形状与纤维制造概要..... | (146) |
| 四、从成纤物质来看成纤的基本原理..... | (147) |
| 第二节 熔融纺丝.....         | (148) |
| 一、制造工艺概述.....         | (148) |
| 二、纺丝工艺原理.....         | (153) |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| 三、拉伸过程中的现象及其特征  | (160) |
| 第三节 干法纺丝        | (162) |
| 一、溶剂选择及干法纺丝工艺概述 | (162) |
| 二、纺丝机理          | (167) |
| 第四节 湿法纺丝        | (171) |
| 一、概述            | (171) |
| 二、可纺性           | (172) |
| 三、凝固现象          | (173) |
| 四、纤维的结构、性能及纺丝条件 | (178) |
| 五、溶剂的选择及回收      | (180) |
| 第五节 液晶纺丝        | (181) |
| 一、液晶纺丝          | (181) |
| 二、刚性高分子及其液晶     | (181) |
| 三、液晶纺丝实例        | (183) |
| 四、合成聚肽          | (188) |
| 五、全芳香族聚酰胺       | (188) |
| 六、全芳香族聚酯        | (190) |
| 第六节 共混、复合纺丝     | (192) |
| 一、不相溶共混纺丝       | (192) |
| 二、复合纺丝          | (196) |
| 三、混纤纺丝          | (200) |
| 第七节 高速纺丝        | (205) |
| 一、高速纺丝技术的发展     | (205) |
| 二、高速纺纤维概述       | (206) |
| 三、高速纺丝与POY      | (207) |
| 四、高速纺丝与FOY      | (211) |
| 五、高速纺纤维的宏观结构    | (214) |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 第八节 成纤工艺的管理技术.....  | (215) |
| 一、纺丝工艺的管理内容.....    | (215) |
| 二、拉伸工艺的管理内容.....    | (218) |
| 三、丝质量的管理及其测试.....   | (219) |
| 第五章 纤维的结构.....      | (222) |
| 第一节 纤维的形态.....      | (222) |
| 一、纤维的长度、粗细和截面.....  | (222) |
| 二、卷曲、捻度.....        | (230) |
| 第二节 纤维的结构.....      | (239) |
| 一、纤维内部结构因素的分类.....  | (239) |
| 二、纤维的高次结构.....      | (241) |
| 三、合成纤维.....         | (276) |
| 四、纤维的结晶区.....       | (285) |
| 五、纤维的非晶区.....       | (301) |
| 六、纤维的皮-芯结构与空穴.....  | (311) |
| 第三节 高分子构象.....      | (316) |
| 一、纤维结晶区中分子链的构象..... | (316) |
| 二、结晶模量.....         | (321) |
| 三、非晶区分子链的构象.....    | (322) |
| 第六章 纤维的性质.....      | (327) |
| 第一节 力学性质.....       | (327) |
| 一、在小形变下的力学性质.....   | (327) |
| 二、在大形变下的力学性质.....   | (359) |
| 三、纤维结构与力学性质的关系..... | (391) |
| 第二节 热性能.....        | (406) |
| 一、固体高聚物的转变现象.....   | (406) |
| 二、温度变化引起的纤维形变.....  | (410) |

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 三、纤维的导热系数和比热.....     | (416) |
| 四、纤维的结构与热性能的关系.....   | (419) |
| 五、耐热性.....            | (424) |
| 第三节 吸湿、吸水性.....       | (429) |
| 一、水的吸附现象.....         | (429) |
| 二、纤维内的物质迁移.....       | (437) |
| 三、水与纤维.....           | (442) |
| 第四节 电性能.....          | (444) |
| 一、纤维的电导率和介电性.....     | (444) |
| 二、带电性及抗静电性.....       | (453) |
| 三、压电性.....            | (458) |
| 四、纤维结构与电性能的关系.....    | (459) |
| 第五节 光学性能.....         | (462) |
| 一、纤维的折射率和双折射.....     | (462) |
| 二、光的吸收及二向色性.....      | (470) |
| 三、耐光性、耐气候性.....       | (473) |
| 四、纤维的结构与透光性.....      | (476) |
| 第六节 膨润、溶解性.....       | (479) |
| 一、膨润、溶解热力学.....       | (479) |
| 二、在水和非水溶剂中的膨润.....    | (488) |
| 三、纤维结构与膨润、溶解性的关系..... | (491) |
| 附表 单位换算表.....         | (494) |
| 参考文献.....             | (495) |

# 第一章 绪 论

所谓纤维乃是一种长度与截面直径比大于100倍，富于柔曲性，具有一定强度的物体。但要给纤维下个确切的定义很困难。特别是近来，用于新领域的新型材料往往以纤维来命名，长度与直径比及柔曲性就不能再作为纤维的基本特性。

本书所涉及的纤维，是以纺织纤维（用于纺纱和织布的纤维）的制备及其结构、性能为对象。

纤维按各种基准可作如下分类。

## 1. 按组成分类

|    |   |                |
|----|---|----------------|
| 纤维 | { | 有机高分子化合物（有机纤维） |
|    |   | 无机化合物（无机纤维）    |

有机高分子化合物（高分子化合物亦称高分子或大分子）或无机化合物（金属、碳）构成纤维的主成分，仅是这些主成分亦具有充分的成纤能力，但为了使纤维和丝条的制造容易进行，提高纤维的加工性能，尽可能减少使用时的缺点（如：过分透明、易带静电、易沾污、手感硬等），还需添加助剂。如二氧化钛、油剂、染料、抗氧剂等，其量往往占纤维量的百分之几。天然纤维，除主成分外也含有不纯物质（纤维素纤维中的半纤维素），故纤维乃是一种复合材料。本书只涉及有机高分子纤维。

## 2. 按原料分类 如表1-1所示。

表1-1 按原料进行纤维的分类

|      |                |                    |                                                                    |
|------|----------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 有机纤维 | 天然纤维           | 植物纤维 (纤维素纤维)       | —棉、麻                                                               |
|      |                | 动物纤维 (蛋白质纤维)       | —毛、丝                                                               |
|      | 再生纤维<br>(纤维素类) | —再生纤维              | —粘胶纤维 (人造丝)                                                        |
|      |                |                    | —铜氨纤维                                                              |
|      | 合成纤维           | —半合成纤维<br>(纤维素衍生物) | —二醋酸纤维素<br>—三醋酸纤维素                                                 |
|      |                | —合成纤维              | —聚酯类—聚酯<br>—聚酰胺类—尼龙6、尼龙66<br>(总称尼龙)<br>—聚丙烯腈类—丙烯腈<br>—其它—聚乙烯醇、聚氯乙烯 |

天然纤维是将纤维状的天然物质直接分离、精制而制成的纤维。再生纤维是将天然高分子化合物分散成原始大分子，再使其生成纤维状物质（称纺丝）。合成纤维是低分子化合物聚合而成的高分子化合物，经成形加工而得到的纤维。纺织纤维可分为合成、再生、天然三大类（图1-1），

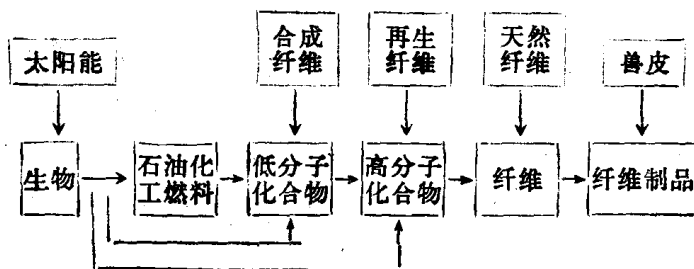
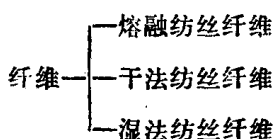


图1-1 纤维制造过程

它们的制造原理完全相同。另外，天然高分子化合物通过化学反应衍生得到其它高分子化合物，再将这种化合物成纤，

得到的纤维，称为半合成纤维。而构成合成纤维的高分子化合物，迄今在自然界中不存在。本书对天然、再生、合成纤维将不加以区别，因这种区别今后将愈来愈模糊。这是因为，随着未来遗传工程的进展，组成丝和羊毛角蛋白的氨基酸种类和排列如被探明，在反应器中，借助加入到细菌细胞内的遗传因子也能合成丝和羊毛角蛋白。这样制得的纤维就已经不是天然纤维。

### 3. 按纤维制造方法（纺丝方法）分类



将从高分子化合物到纤维成形的全过程概括于图1-2。

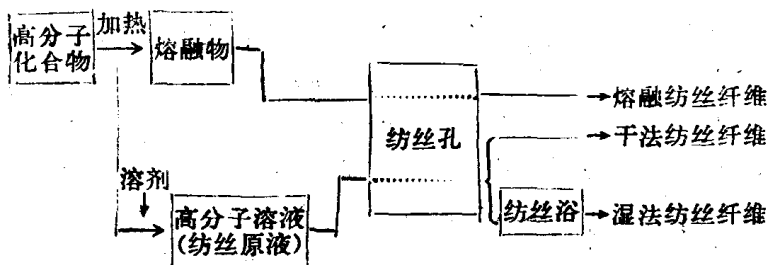


图1-2 纤维的纺丝工艺过程

熔融纺丝是高分子化合物加热熔融后的纺丝方法，聚酯和尼龙就是采用该法制造的。干法纺丝是高分子浓溶液从喷丝孔挤出，进入气体中，并使溶剂蒸发的纺丝方法，聚丙烯腈和纤维素衍生物系用该法制造。高分子浓溶液由喷丝孔直接挤出，进入纺丝浴而成纤的方法为湿法纺丝，用于聚丙烯腈和再生纤维素纤维的制造。纺丝原液从喷丝孔挤出后，进行拉伸、热处理可提高纤维的力学性能。

近来人们在探索崭新的纺丝方法，如加入少量溶剂使高分子材料熔点降低到分解温度以下，然后进行纺丝，使纺丝原液从喷丝孔挤出，进入气体甬道中形成丝条之后，再浸入纺丝浴（空气层挤出纺丝法）等。

棉花是由植物细胞内的生物合成制得的。即细胞质内的核酸与葡萄糖经酶的作用，生成带有活性的葡萄糖，经脂肪族二磷酸纤维二糖（纤维素前驱体）聚合成纤维素。纤维素沉淀于细胞质膜，生成细胞膜（一种湿法纺丝）。一根棉纤维就是一个细胞。

蚕丝是绢丝腺内丝蛋白的水凝胶受到力的作用，从绢丝腺向吐丝管移动，使丝纤胚分子变形（ $\alpha \rightarrow \beta$ 转移），凝胶因水离浆而脱溶剂，凝胶又因受蚕头部的牵引作用而成纤。这是一种干法纺丝。

纤维具有悠久的历史。400万年前，在南非出现古人类（脊椎动物、哺乳纲、灵长目的人类科）。在人类整个历史进程中，大部分是过着全裸体的生活。随着体毛的退化，对保温的需要（特别是几次大冰河时期的袭击），开始了用兽皮、树皮和草叶遮体（毛皮衣料时代）的衣料时代。5~10万年前，洪积世人为了防御第四冰河时期的严寒用兽皮作衣料的事实已被证实。兽皮和树叶也是一种纤维群体，也可称为天然衣料。在此之后，人类又掌握了把植物纤维进行某种程度的分离精制技术。冰河时期人类过着捕获野生动物的生活。到了中石器时代，气候转暖，森林茂盛，人类从狩猎生活方式向农耕、放牧的生活方式转换。人的衣类也发生变化。一万年前，人类就开始了牧羊业。那时，只能把羊的绒毛当作羊毛使用。直到公元前，因改良了羊种才有了细长的羊毛。现在作为天然纤维广泛使用的麻、丝、羊毛、棉等，

在公元前，作为原料使用虽受地区所限（例：丝产于中国，棉产地是印度、美洲大陆，毛产地中亚细亚），但可认为在世界范围内得到了应用（纤维衣料时代）。

古代，有关纤维制造技术的情报是各国重要的机密。如：在中国，养蚕和制丝技术是严守不外漏的，只将丝织物通过丝绸之路输往欧洲。据说两位中国和尚东渡到日本时，携带放有蚕卵的竹制手杖传入丝的生产技术，又从日本向欧洲传授。西班牙规定不许羊种输出的“国禁”，而法国路易14世置之不顾，输入了羊种，培育了法国美利奴羊。

丝织物过去都是被贵族与财主所独占。18世纪，产业革命前，法国和德国农民穿着身不御寒的麻织物渡日，欧洲的平民百姓连简陋不洁的外衣都穿不上。产业革命的到来，纤维（棉、毛）产量急剧上升，致使纤维价格下降（革命后，棉纱价格下降到1/20）。新颖的（棉印染布）和绅士穿（棉制细夏布）的服装也都大众化了，其结果普及了内衣。关于这些，详载于兰迪斯的“开普勒”著书中。

日本自古以来一直仅穿用麻类，公元前300年已经有了机织物。那时日本衣料是麻的平织物。这种织物虽吸水性差，但因富于透气性，被用于制工作服。二、三世纪时期，丝从中国传入，主要是贵族阶层穿着。明治、大正时代，日本的总输出量为5亿日元，其中仅丝绸一项就占1亿日元，成为明治以后重要外汇收入的工业。16世纪，日本开始种植棉花，作为平民服装来源。明治后，因军服制造的需要，输入了羊毛。对平民而言，服装是贵重物品，几件衣服要穿很久（有些地区还要传几代）。

在Hook著（1664年）的“Micrographia”一书中最早记有化学纤维的构想。据说中国人在2000年前也有过同样的

想法。实际上再生纤维是19世纪后半期才发明的。至于合成纤维的普及只有20~30年历史。尽管如此,合成纤维还是占衣着用纤维总数的大部分。为便于参考,把1890~1979年90年内世界主要纤维产量变迁归纳示于图1-3。世界纤维总产量约为3000t,相当于每人年平均消费量7~8kg,棉和化学纤维量几乎相等,二者约占总量的93%。

表1-2为化学纤维发明、工业化的年份和发明者。如前所述,再生纤维是19世纪后半期发明,20世纪前半期工业

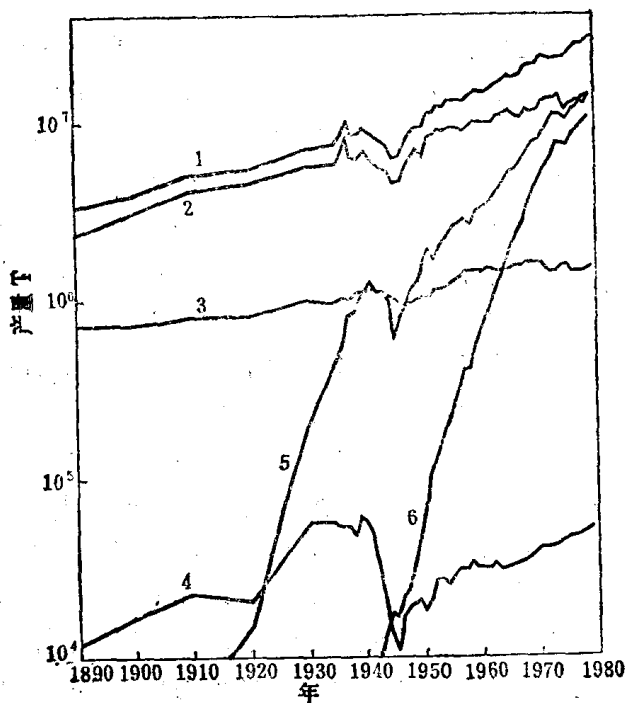


图1-3 世界纤维产量的变化

1—总纤维 2—棉 3—羊毛 4—丝  
5—化学纤维 6—合成纤维

化。但因当时的纤维基础科学还不发达，前人全凭经验的积累经长时期的努力才成功地实现了工业化。早期的化学纤维是硝化人造丝（将硝化纤维素溶液经喷丝孔挤出成纤维状，然后使其<sup>碱</sup>化回复到纤维素物质），是一位有名的细菌学家 Pasteur 的学生——蚕病理研究者 Chardonnet 发明的。当时（1910 年左右），该纤维在法国、瑞士、德国、比利时、意大利等国已有制造，但不久，被铜氨法人造丝和粘胶法人造丝取代。粘胶原先应用于造纸、上胶、印染、人造皮革，其后才开辟了它在纤维方面的途径。19 世纪末到 20 世纪初期的照明灯，是当时的最先进技术。此灯的碳化纤维材料就是再生纤维素纤维。由于质量的改进，又用于衣料，再生纤维素纤维替代了天然纤维中价格最昂贵的丝。再生纤维工业化过程中，还有很多技术问题，由于这些技术问题的解决使人造丝飞快地得以普及。如铜氨丝的紧张纺丝法（提高纤维的力学性质）、粘胶丝的离心罐式纺丝法、碱纤维素的老成、粘胶的熟成（提高纺丝液的稳定性）、丙酮的加水分解法（丙酮可溶性化）等。第一次世界大战（1914~1918 年）时期，醋酸纤维素的丙酮溶液大量地用作飞机机翼（当时用织物）的涂料。用醋酸纤维素皮膜做飞机机翼的表面，由于不透气，起到了增加飞行速度的作用。战后，因该用途被淘汰，塞拉尼斯（Celanese）公司（英国）的前身将醋酸纤维素开发为衣用纤维。与此同时，美国杜邦公司在第一次世界大战期间，把硝化纤维素用作火药原料，但战后很快就不用了。于是，杜邦公司致力于硝化纤维素的新用途开发——油漆、涂料。同时，在战后的不景气（1929 年）中，杜邦公司为了提高利益，采用了起死回生的措施，致力于合成高分子的研究，其中进行新技术、新产品试验的品种之一就是成功地工