

〔美〕Z.K. 瓦尔察克 著

刘双成 古大治等 译



合成纤维成形

纺织工业出版社

合成纤维成形

〔美〕 Z.K. 瓦尔察克 著

刘双成 濮德林

吴大诚 译

古大治 杨忠和

纺织工业出版社

责任编辑：蔡秀卿

**FORMATION OF
SYNTHETIC FIBERS**
Z.K. Walczak

合成纤维成形

〔美〕 Z.K. 瓦尔察克 著

刘双成 濮德林 吴大诚 译
古大治 杨忠和

纺织工业出版社出版

(北京东长安街12号)

北京纺织印刷厂印刷

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：12 字数：266千字

1984年6月 第一版第一次印刷

印数：1—6,000 定价：1.50 元

统一书号：15041·1291

内 容 简 介

本书以工程与理论结合的方法讨论了合成纤维成形。全书分为十章，对熔体纺丝成形的整个过程进行了全面分析，且对其他专著中忽视的工程问题、过程变数分析、过程放大等各设一章专门讨论。在问题的讨论中涉及了溶液纺丝，并对合成纤维原料、纤维结构、纤维性质和基本理论的实际应用也进行了简要的论述。

本书可供化学纤维生产部门的工程技术人员、科学研究人员阅读，亦可供高等院校化学纤维专业学生和教师参考。

译 序

近年来，国内陆续出版了一些合成纤维成形工艺的专著和教科书，并已经翻译出版或正在翻译出版国外几本合成纤维成形理论基础的论著。在后一类书籍中，特别应提到的有：马克(H.F.Mark)等编《化学纤维结构及纺丝原理》，彼列彼尔金(К.Е.Перепелкин)著《化学纤维成形过程的物理化学基础》及查比斯基(A.Ziabicki)著《纤维成形原理》。尽管如此，译者认为瓦尔察克(Z.K.Walczak)著《合成纤维成形》一书仍有翻译出版的必要，其原因在于：本书强调工程问题与理论的结合，而不是泛泛罗列物理化学及高分子物理学的一般观点，尤其深入讨论了其他论著中忽视的合成纤维成形过程中的工程问题、过程变数分析和过程放大。在论及成形问题时，原作者将问题提炼后，提出了解决这些问题在理论上应循的思路，概念清楚，论述颇具特色。

首先感谢中国科学院化学研究所所长钱人元教授热情向我们介绍了这本别具一格的专著，并感谢上海石油化工总厂研究院叶润秋副总工程师和纺织工业部王季明工程师等校阅本书初稿。

本书翻译分工如下：序、第三、七、十章为刘双成译，第一章为吴大诚译，第二、六、八章为濮德林译，第四章为杨忠和译，第五、九章为古大治译；最后由刘双成、古大治定稿。原文中一些显而易见的错误在翻译过程中已经更正，不再一一注出。译稿虽经多次校阅，误译之处仍然难免，望读者批评指正。

译者

序

有关纤维制造专题的出版物已问世者不少，但所有这类著作都用唯象的方法论述问题，通常仅涉及用一种高聚物制造纤维的一个方面。研究纤维成形原理的工作，近十余年来在数量上有了增长，到目前为止，理论的推测与现象的观测之间还未能建立足够的联系。本书试图对合成纤维工艺方面已完成的全部工作作一评论性介绍，并将其归纳整理为一个合乎逻辑的连贯体系。根据我个人的经验，现有的资料足够创立一个具有实用性的体系。然而，本书同时暴露了纤维成形过程这一难题中还存在着许多空白区域，揭示并正确认识这些陌生的领域，显然是本书比较重要的两个目的。经过上述的认识鉴别之后，才有可能早日填补存在的空白。

鉴于实际原因，原拟将本书篇幅保持在最小限度以内，这一意图与本书论题的多学科性质几乎是相抵触的。作为一种折衷的办法，参考文献未完全列出，只引用主要论著和最主要的初次发表的论文。对于不大适合高分子科学一般原理的以及与其他有关科学领域不十分协调的那些已发表结果，只进行了必要的最低限度的讨论。

本书包含的主要论题是熔体纺丝，因为这一方法最简单，工艺上最简练。溶液纺丝方法单列一章论述。本书内容按如此方式安排，其目的是强调各种纤维成形方法之间的相似性。

读者将会发现全书内有许多相互重复之处，这种重复一部分是特意的，是为了从不同观点对某些现象进行考察，另一部分则是由于过程之间相互关联程度密切而产生的不可避免

免的结果。这些出乎本意之外的重复也能起强调所涉及的各种问题之间存在相互联系的作用。

我在此谨向将我正确地引进本学科之门的罗兹工学院已故诺瓦科夫斯基 (Alexander Nowakowski) 教授致以深切的谢忱, 若没有他在基本问题上对我的基础知识教育, 本书的写作几乎是不可能的。我还向提供给我良好学习机会的母校罗兹工学院致以谢忱。

并谨向阿诺德工程开发中心冯·卡尔曼气体动力学研究室和渥太华卡尔顿大学教授小芦卡谢维茨 (Juliusz Lukasi-ewicz, Jr.) 致以谢忱, 感谢他在空气动力学方面提供的咨询和意见。

我还应当向允许本书复制某些图表的有关作者和出版者表示谢意。

兹比格涅夫·K. 瓦尔察克

目 录

第一章 绪论	(1)
一、过程概述.....	(1)
二、纤维成形的特种方法.....	(5)
三、对过程的传统理解.....	(6)
四、较新的理论处理方法.....	(8)
五、参考文献.....	(11)
第二章 原料——高聚物	(14)
一、高聚物结构及一般特征.....	(14)
二、结晶.....	(21)
三、热性质.....	(34)
四、熔体流变学.....	(41)
五、高聚物溶液.....	(63)
(一)高聚物的溶解性.....	(63)
(二)高聚物溶液的性质.....	(70)
六、参考文献.....	(77)
第三章 纺丝过程中的高聚物	(94)
一、高聚物的熔化.....	(94)
二、喷丝板的作用.....	(97)
三、熔体拉伸.....	(98)
四、应变下的结晶作用.....	(117)
五、细颈拉伸.....	(125)
六、热处理.....	(136)

七、对聚合物性质的要求	(138)
八、参考文献	(138)
第四章 纤维结构	(150)
一、初生纤维	(153)
二、细颈拉伸机理	(159)
三、纤维性质	(171)
四、参考文献	(174)
第五章 工程问题	(184)
一、冷却介质的流动	(184)
(一)冷却体系和装置	(184)
(二)流体力学	(187)
二、热交换	(199)
(一)理论考虑	(199)
(二)冷却	(214)
(三)细颈拉伸	(216)
(四)热处理	(220)
三、物料输送	(221)
(一)高聚物的输送	(221)
(二)喷丝板设计	(225)
(三)丝条的输送	(228)
四、机器几何学	(234)
五、参考文献	(236)
第六章 过程变数分析	(241)
一、纤维成形中的理论变数	(242)
(一)数均分子量	(242)
(二)高聚物的切变历史	(243)
(三)毛细孔道中的切变	(243)

(四)特鲁顿粘度.....	(244)
(五)拉伸度.....	(245)
(六)有效结晶时间.....	(245)
(七)结晶速率.....	(246)
(八)有效结晶温度.....	(246)
(九)拉伸比.....	(246)
(十)拉伸速率.....	(247)
(十一)实际拉伸温度.....	(247)
二、纤维成形中的工艺变数.....	(248)
(一)由高聚物性质产生的重要工艺变数.....	(248)
(二)高聚物挤出的基本变数.....	(251)
(三)与冷却过程有关的变数.....	(255)
(四)控制细颈拉伸的参数.....	(261)
三、冷却区分析.....	(267)
四、参考文献.....	(273)
第七章 溶液纺丝.....	(274)
一、原理.....	(274)
二、纤维成形中的扩散.....	(277)
三、干法纺丝.....	(285)
四、湿法纺丝.....	(292)
五、参考文献.....	(297)
第八章 纤维的性质.....	(301)
一、由高聚物决定的纤维性质.....	(301)
(一)高聚物的特性和结构.....	(301)
(二)分子量的影响.....	(310)
(三)热性质.....	(313)
二、通过加工而改进的纤维性质.....	(317)

(一)抗拉性质的调节·····	(317)
(二)热性质·····	(323)
(三)纤维的均匀性·····	(327)
(四)与吸附有关的性质·····	(330)
三、参考文献·····	(333)
第九章 过程放大 ·····	(341)
一、增加喷丝板孔数·····	(341)
二、高聚物流动的强化·····	(344)
三、纤维纤度的改变·····	(348)
四、参考文献·····	(350)
第十章 实际应用 ·····	(351)
一、研究方法·····	(351)
(一)总论·····	(351)
(二)新成纤高聚物·····	(354)
(三)工艺和产品的改进·····	(358)
二、特殊课题·····	(359)
(一)高聚物共混体·····	(359)
(二)卷曲·····	(360)
(三)双组分纤维·····	(362)
(四)异形截面纤维·····	(364)
(五)纺粘工艺·····	(366)
三、参考文献·····	(369)

第一章 绪 论

一、过程概述

制造化学纤维的初期工作，都试图利用天然高聚物——纤维素和酪素作为原料，虽然合成高聚物当时已为人所共知，但只是被人们当作没有利用价值的稀奇之物^[1~3]。高分子化学作为一门科学而诞生要晚得多^[4,5]，所以，当时认为与熟悉的天然纤维类似的天然产物要可靠得多。制造第一批人造纤维所用的天然高聚物原料在高温分解之前不熔化，这就决定了纤维制造的第一种工艺方法，即为了改变原料的物理形状，首先必须把它溶解，配成溶液，以后再除去溶剂。这样，开始勾画出了溶液纺丝成形方法的轮廓^[6~9]。剩下的问题是如何溶解高聚物，以及在获得所需形状后又如何使高聚物恢复为固态。

由于纤维素不易溶解，最初提出了三种不同的处理方法：

- (1) 将纤维素溶解于铜铵溶液；
- (2) 使纤维素化学变性为硝酸纤维素使之可溶；
- (3) 使纤维素化学变性以保证物料的可溶性，但在成形后立即使过渡化合物（即黄酸纤维素）分解，重新回复为纤维素。

每种方法都在某种程度上预先确定了可能的固化方法，在第(1)和第(2)种方法中，溶剂可以蒸发或萃取出来，第(3)种方法需要有化学反应发生，所以与包括萃取的方法相似，

必须是一种湿法过程。

很久以后才认识到全合成高聚物可作为制造纤维的原料^[5]。这类高聚物具有热塑性，这种有利的性质可以省去溶剂一类的加工助剂，因此出现了由高聚物熔体直接成形为纤维的方法。

按照传统，纤维成形的三种方法相互之间只有极少的共同点，是作为完全不同的过程处理的。从操作观点来看，这种意见只是在某种程度上是正确的，从理论的和一般工艺的观点来看，所有这些过程都非常相似。

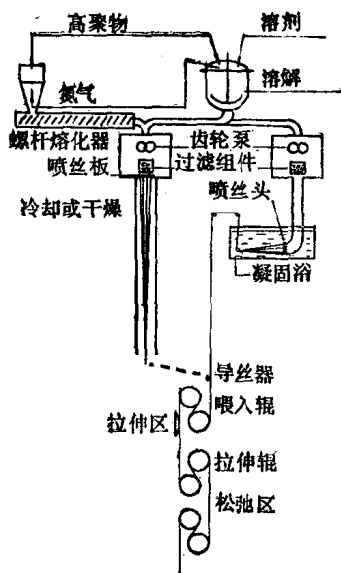


图1-1 各种纺丝体系的简单示意图

所有三种主要体系的纺丝过程示于图1-1。纺丝过程的第一个工序是高聚物的溶解或熔融，溶解大都分批进行，而在大多数现代化生产中，熔融则是在螺杆熔化机中连续进行的，偶尔还会遇到采用其他供料体系的熔体纺丝过程，包括在惰性气体压力下由聚合釜间歇式供给熔体，或使高聚物切片先在炉栅加热器上熔融，然后再进入纺丝组件。在这两种情况下，高聚物溶液或熔体在压力下输入纺丝组件，在此过程中经由一个精密计量系，例如齿轮泵，保持高聚物流量的高度

均衡。通过计量泵之后，高聚物熔体或溶液被强制通过最后的过滤装置，即通常所称的滤层。滤层除了单纯滤去机械杂

质外，还有更多的作用，这将在本书以后的章节中进行叙述。最后，液体原料被强制通过带毛细孔的薄板即喷丝板，这样就形成了无尽头的液体细流。熔纺和干纺的纺丝组件设计原理相似，只是熔体粘度更高，要求组件有更高的强度和更坚固的结构。湿纺的喷丝板通常并不直接安装在纺丝组件上，而安装在与组件相接的专用输送管末端，因为喷丝板必须浸没在液体中，与熔纺和干纺相比，设计上的这种改变会更加方便。

到此为止，所有这三种纺丝体系的全部功能和方法都非常相似，但是每一种体系又各具特征。对挤出液流进行处理的目的同是使高聚物固化，但每种体系中所采取的手段各异。当高聚物熔体通过喷丝板挤出时，需要进行冷却使之固化，通常的办法是向丝条吹冷空气或其他气体，偶尔也可采用液体冷却介质^[10]，但在这种情况下不能像湿纺体系那样将喷丝板浸没在液体中。在干纺中，挤出的高聚物溶液因溶剂蒸发而固化，这时同样要吹空气或惰性气体以便带走溶剂蒸汽，吹向挤出的高聚物的气体必须加热以供给溶剂蒸发所需的能量。在湿纺体系中，粘性丝状液流被直接挤入液体中，在这里，或者是液体将溶剂从丝条中萃取出来，或者是发生一种化学反应，使原来的高聚再生出来。再生的高聚物不溶于纺丝时所用的溶剂，而使高聚物凝聚出来。湿法纺丝浴应当保持恒定的温度，当纤维成形中最重要的一步是萃取时，不会发生显著的热效应，保持恒定的温度也比较简便。当成形过程伴有化学反应时，大多数情况下反应是放热的，所以不仅必须带走溶剂，而且还须带走热量，有时热量是相当大的。由于经济和安全这两方面的原因，溶剂必须回收。

此后，很多工业生产采用间歇式操作，这样做可能有一定的原因，但往往只不过是太合理的传统习惯。十分自然，湿法纺丝所得的初生纤维是湿态的。有时，尤其是固化过程中有化学变化发生时，还需要增设水洗和干燥工序。视过程的特性而异，干纺初生纤维通常含有部分剩余溶剂。纤维的水洗和干燥比其他工序缓慢，所以若安排到连续的生产线上是有困难的，然而也并非不可能。

固化过程是非常复杂的。绝大多数成纤高聚物都能够结晶，不论是在冷却、干燥或湿纺凝固阶段，结晶作用在某种程度上都是会发生的。容易想象得到，随温度的变化或溶剂是否存在，结晶过程的进行必定有所差别。除去相组成和温度变化之外，通常丝条正好在同一区域内受到拉伸而直径减小。拉伸是很重要的，因为很难把粘性非常高的液体通过如此小的毛细孔道挤出并直接成为纤维，实际上是使挤出的丝条直径小到适当的程度，然后再通过拉伸得到所要求的丝条直径。由于在相对较小的空间和短时间内同时进行的过程为数甚多，这使得纤维成形的整个问题变得极其复杂。纤维在冷却、干燥或凝固区中发生的作用的复杂性，给各种现象的解释和对整个过程的足够精确的完整的理论描述，造成了难以克服的障碍。

初生纤维（必要时应经水洗和干燥）通常都不具有很好的物理性能，尤其是抗拉性能。在纤维制造史上很早就已经发现，初生纤维在受到某种程度拉伸时，其长度增加且可能发生永久形变；经过这样拉伸，纤维的抗拉性能得到了改进。所以，几乎所有的纤维（熔纺、干纺和湿纺纤维）都要经过这种处理。拉伸操作通常是使纤维通过以不同的表面速度转动的辊筒进行的，在图1-1中标出了喂入辊和拉伸辊。拉

伸（以后将称为细颈拉伸）通常是在提高温度的条件下完成的，纤维经过拉伸操作之后，具有少许回复倾向，最好增设一组松弛辊筒，使纤维在受控制的条件下松弛。

随高聚物和加工方法的不同，也随着预定的产品类型和质量的不同，拉伸后的纤维需经过不同的整理操作，如水洗、热定型、络筒或切断为短纤维。

还有一种整理作业，不过它不一定放在生产线的最后进行，这就是纤维上油。上油有各种不同的目的，如减少拉伸的困难，防止静电，但改善纤维成品的纺织加工性能几乎总是它的目的之一。根据处理的类型和目的，可以在生产线上不同的阶段进行上油。

以上对纤维制造的描述是扼要的并经过了高度的简化，对于过程中各个重要阶段和现象的详细讨论，这仅作为一个起点。上面的概述只涉及常规类型纤维的制造，未考虑到如高聚物共混体、双组分纤维、变形纤维等较新的产品。这些新增加的产品在开始时之所以略去不讲，是因为它们只不过是基本原理和现象的变异，因此将放到第十章再行讨论。

二、纤维成形的特种方法

如上所述，纤维成形是一种复杂的过程，所以生产成本也较高。这些简单事实产生了相当强大的推动力，促使人们尽量努力简化工艺。主要的改进方向是取消辊筒式输送纤维的方式和取消喷丝头这种昂贵的高精度元件。

在高聚物溶液受压通过毛细孔道的情况下，取消辊筒这一纤维输送方式的最早尝试可追溯至1934年。用来代替毛细孔道和某种收集装置之间的辊筒的是静电场（电压50至300千伏）〔28~31〕。通常这种工艺称为静电纺丝。

相似的另一方法是利用高压高速空气将高聚物溶液和熔体喷射出来^[32~34]。有时也可通过长缝式模头将高聚物熔体挤出，然后采用文丘里型高速气流装置使挤出物受到拉伸，这种装置可提供必要的拉伸力^[35]，代表这种方法的常用术语是喷射纺丝。

为了省去喷丝头，还发展了一种方法。此法是将高聚物溶液或熔体由轴向引进旋转锥形体或钟形体的中心，离心力使流体散布在锥形体表面上，成为愈来愈薄的薄膜。薄膜离开锥形体边缘之后便分裂为纤维，并因干燥或冷却而固化，这种离心力甚至大到足以将纤维拉伸到非常低的旦数^[36]。这种方法通常称为离心纺丝。

也有离心纺丝和静电纺丝组合的方法^[37, 38]。

所有这些方法与常规纺丝方法均服从相同的规律和原则。同样，所有这些方法看来也有相同的常见缺点，首先是纤维直径不匀，这包括纤维与纤维之间的不匀和同一纤维纵向的不匀；其次是纺出来的丝条不能承受细颈拉伸。由于这些缺点，只有一些不需要拉伸的高聚物才是实际上可用的原材料，例如弹性纤维的生产。由于特种纺丝方法存在上述缺点，以致所得的产品不能用作传统的纺织纤维，而只能用于制造具有特殊性质的纺粘材料〔见第十章、二、(五)节〕。

三、对过程的传统理解

在发展初期，确定某一体系是否可行或能否加以改进，完全依照尝试误差法这一古老的原则行事。虽然这样一种方法通常会产生较大的误差，但是在发展初期，每一种归纳科学（工艺也属于归纳科学）在初期是难以有任何其他的发展方式的。纤维成形技术至少已有七十五年的历史了，在这期