



普通高等教育“十二五”规划教材

高分子材料加工工艺学

王慧敏 编著

GAOFENZI CAILIAO JIAGONG GONGYIXUE

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

高分子材料加工工艺学

王慧敏 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书共九章。前五章主要介绍高分子材料加工的基础理论,包括聚合物的熔融、溶解、混合、聚合物流体的流变性质以及加工过程中涉及的物理和化学变化。后四章首先从塑料加工的角度介绍了塑料成型前的的配制,重点讲述了挤出理论、塑料的挤出成型、注射成型、压延成型、二次成型的原理、成型方法的工艺和涉及的简单设备,并对塑料的其他成型方法做了简单概述。其次从橡胶的角度讲述生胶的配合以及配合体系,生胶的塑炼、混炼以及压延压出成型与硫化的基本原理和工艺。再从合成纤维的角度讲述了纤维成型的原理以及后处理中的拉伸和热定型,介绍了熔融纺丝和溶液纺丝的工艺。最后介绍了聚合物基复合材料及其不同的成型方法。

本书可作为高分子材料与工程本科专业的专业教材,也可供从事相关专业的人士参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高分子材料加工工艺学 / 王慧敏编著. —北京:
中国石化出版社, 2012. 2
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1346 - 8

I. ①高… II. ①王… III. ①高分子材料 - 加工 - 工
艺学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TB324

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 013745 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何
形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 24 75 印张 591 千字

2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

定价:56.00 元

前 言

《高分子材料加工工艺学》是中国石化出版社约稿编写的一本适合于高分子材料与工程本科生的专业教材。

以往该类的教材内容大多以某一类应用较多的高分子类别，或者塑料、或者纤维等为主，来讲述高分子材料工艺学的内容。然而高分子材料的涵盖面比较广，涉及的产品种类繁多，有些不同用途的产品其加工方法相差也比较大。并且随着时代的发展，社会对人才的通识性、复合性的要求更高，高校人才培养的目标也发生了很大的变化，专业口径已由狭窄的对口型专业教育向通识性教育基础上的宽口径适应型专业教育转变。因此以单一用途的高分子材料深层次的讲述已经不适合人才培养的需求，取而代之的是对涵盖不同用途的高分子材料，如塑料、橡胶、纤维以及复合材料等等几大类出发，分别讲述其特性，并对其共性的部分加以阐述。

本书就是基于以上原因来编写的。其出发点就是本着尽量拓宽专业口径，将高分子材料成型加工的基础理论、基本原理深入浅出，结合实际案例对高分子材料的成型工艺进行分析，力求做到工艺与工程相结合、理论与实践相结合。

此外根据目前本科生的知识状况以及社会对专业人才的需求与二十年前有所不同，因此该书的专业内容在编排上尽量浅显，便于教学工作。

本书在编写过程中，烟台大学化学化工学院的高分子材料专家韩冬冰老师对该书的体系以及内容编排上提出了宝贵的意见，并得到化学化工学院院长任万忠的支持以及同事的鼎力帮助，在此一并表示衷心的感谢。

虽然作者力求使该书能够满足目前高校高分子材料与工程教学的要求，但是由于编者水平有限，书中难免会有疏漏，敬请同行专家以及读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 高分子材料的发展简史	(1)
第二节 高分子材料的加工过程	(3)
第三节 配方设计	(5)
一、配方设计的基本原则	(5)
二、配方的表示方法	(5)
三、配方设计的程序及检验	(6)
四、配方中配比关系的确定	(7)
第二章 聚合物的熔融和溶解	(9)
第一节 聚合物的熔融	(9)
一、聚合物的熔融过程	(9)
二、影响熔融的因素	(10)
第二节 聚合物的溶解	(11)
一、聚合物溶解的过程	(11)
二、聚合物的溶解特性和溶液性质	(12)
三、影响溶解的因素	(12)
第三章 混合	(15)
第一节 混合的基本概念和混合理论	(15)
一、混合的基本概念	(15)
二、混合理论	(15)
第二节 混合分类	(17)
一、混合分类	(17)
二、混合要素	(19)
第三节 混合的表征	(21)
一、混合状态的直接描述	(21)
二、混合状态的间接描述	(22)
第四章 聚合物的流动和流变行为	(24)
第一节 聚合物材料黏流态特征及流动机理	(24)
第二节 聚合物流体的基本流动类型	(25)
一、层流流动和湍流流动	(25)
二、稳态流动和非稳态流动	(26)
三、等温流动和非等温流动	(26)
四、一维流动、二维流动和三维流动	(26)
五、拉伸流动和剪切流动	(27)

第三节 聚合物流体的流动曲线和流动规律	(27)
一、剪切黏度	(28)
二、非牛顿流体	(29)
三、影响聚合物流体的剪切黏度的因素	(31)
第四节 拉伸黏度	(35)
第五节 聚合物流体在导管中的流动	(36)
一、聚合物流体在圆形导管中的流动	(37)
二、聚合物流体在狭缝形导管中的流动	(40)
第六节 聚合物流体的弹性以及在流动中的弹性行为	(42)
一、聚合物流体的弹性	(42)
二、聚合物流体在流动过程中的弹性行为	(42)
第五章 聚合物加工中的物理化学变化	(48)
第一节 聚合物的结晶	(48)
一、成型条件下聚合物的结晶形态	(48)
二、聚合物的结晶能力和结晶过程	(48)
三、聚合物成型过程中影响结晶的因素	(51)
四、结晶对制品性能的影响	(54)
第二节 聚合物的取向	(55)
一、取向分类	(55)
二、成型过程中的流动取向	(56)
三、拉伸取向	(59)
四、取向对聚合物性能的影响	(63)
第三节 成型加工中聚合物的化学作用	(64)
一、降解	(64)
二、交联	(68)
第六章 塑料的成型	(69)
第一节 概述	(69)
一、塑料的发展简史	(69)
二、塑料工业生产过程	(69)
三、塑料成型加工技术分类	(70)
第二节 塑料成型用物料的工艺性能	(71)
一、塑料成型所用的物料	(71)
二、物料的工艺性能	(72)
第三节 塑料的配制和混合	(75)
一、塑料粉料的配制	(76)
二、塑料粒料的配制	(80)
三、塑料溶液的配制	(84)
四、塑料分散体的配制	(86)
第四节 塑料的挤出成型	(88)
一、概述	(88)

二、单螺杆挤出成型设备	(89)
三、挤出理论	(94)
四、常规螺杆	(110)
五、新型螺杆	(116)
六、双螺杆挤出机	(121)
七、几种制品挤出工艺	(126)
第五节 塑料的注射成型	(145)
一、概述	(145)
二、注射机及其性能参数	(145)
三、注射原理	(159)
四、热塑性塑料注射工艺及分析	(173)
五、热固性塑料注射工艺	(179)
六、注射成型新技术	(182)
第六节 塑料的压延成型	(185)
一、概述	(185)
二、压延设备	(186)
三、压延成型原理	(188)
四、压延工艺	(195)
第七节 塑料的二次成型	(204)
一、概述	(204)
二、二次成型原理	(204)
三、几种二次成型工艺	(207)
第八节 塑料成型的其他方法	(216)
一、模压成型	(216)
二、泡沫塑料的成型	(221)
三、浇铸成型	(229)
四、烧结成型	(233)
第七章 橡胶的成型	(235)
第一节 概述	(235)
一、橡胶的发展史	(235)
二、橡胶的成型加工	(236)
第二节 生胶	(237)
一、天然橡胶	(237)
二、合成橡胶	(238)
三、生胶的特性	(239)
第三节 橡胶配合体系	(242)
一、橡胶的硫化体系	(242)
二、橡胶的补强填充体系	(252)
三、橡胶的防老体系	(257)
第四节 生胶的塑炼	(260)

一、生胶的塑炼原理	(260)
二、可塑性的测定方法	(264)
三、塑炼方法及影响因素	(265)
四、常用橡胶的塑炼特性	(271)
第五节 胶料的混炼	(273)
一、混炼理论	(273)
二、胶料的混炼工艺	(278)
三、混炼胶后胶料的补充加工与处理	(285)
四、混炼胶的质量检验	(285)
五、几种常用橡胶的混炼特性	(287)
第六节 橡胶压延工艺	(288)
一、概述	(288)
二、橡胶压延成型设备	(289)
三、压延准备工艺	(298)
四、压延工艺	(301)
五、常用橡胶的压延特点	(307)
第七节 橡胶压出工艺	(307)
一、橡胶压出机	(308)
二、压出工艺	(311)
第八节 硫化工艺	(315)
一、硫化历程	(315)
二、正硫化点的测定	(317)
三、硫化	(320)
第八章 合成纤维的成型	(326)
第一节 概述	(326)
一、纤维的发展历史	(326)
二、纤维的几个概念	(328)
第二节 纺丝液的制备	(330)
一、纺丝熔体的制备	(330)
二、纺丝溶液的制备	(331)
第三节 合成纤维成型原理	(333)
一、纺丝细流的形成原理	(333)
二、纺丝细流的冷却及固化过程	(335)
三、纤维纺丝过程中纤维的力学行为	(338)
第四节 合成纤维的拉伸和热定型	(341)
一、纤维的拉伸	(341)
二、合成纤维的热定型	(350)
第五节 几种纤维的纺丝过程	(357)
一、聚酯纤维	(357)
二、聚丙烯腈	(364)

第九章 聚合物基复合材料的成型	(368)
第一节 概述	(368)
一、复合材料的特点	(368)
二、复合材料的组成	(368)
三、复合材料的发展历史	(369)
第二节 复合材料的分类及聚合物基复合材料	(370)
一、复合材料分类	(370)
二、聚合物基复合材料	(370)
第三节 聚合物基复合材料界面的形成及作用机理	(371)
一、界面层的形成	(372)
二、界面层的结构	(372)
三、界面的作用	(373)
四、界面作用理论	(373)
五、聚合物基复合材料界面的设计	(375)
第四节 聚合物基复合材料制备工艺	(375)
一、预浸料及预混料制造工艺	(375)
二、成型及固化工艺	(379)
参考文献	(386)

第一章 绪 论

第一节 高分子材料的发展简史

21 世纪科学技术的支柱产业有能源工程、信息工程、生物工程以及材料工程。其中材料工程主要包括金属材料(纯金属和合金)、无机非金属材料(玻璃、陶瓷和水泥)、高分子材料(塑料、橡胶、纤维、涂料以及黏合剂)和复合材料。

材料是人类社会进步的物质基础和先导,是人类进步的里程碑。综观人类发展的历史和材料发展的历史,可以清楚地看到,每一种重要材料的发现和利用都会把人类支配和改造自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产力和人类生活带来巨大的变化。材料的发展与人类进步和发展息息相关。从一万年前的旧石器时代,到 7000 年前的青铜器时代,再到 20 世纪的钢铁时代,直至 20 世纪中后期,高分子材料、陶瓷材料的崛起以及复合材料的发展,又给人类带来了新的材料和技术革命。从中也可以看到高分子材料在人类历史中的重要地位。

高分子材料,也称聚合物材料。如今许多传统的材料被高分子材料所取代,而且随着材料品种的不断扩大,许多新型的材料相继问世,为电子工业、宇航工业等领域提供了必要的材料,如分离材料、导电材料、智能材料、贮能材料、换能材料、纳米材料、生物活性材料、电子信息材料等。特别是多学科相互交叉渗透,大大加快了高分子材料的发展,例如与生物工程、医疗医药学科的交叉渗透中,高分子材料成为最有希望解决与活性体之间的生物相容性、组织相容性以及免疫反应的有效材料。

高分子材料的使用至今已有几千年的历史,但是真正作为材料使用以及高分子被人们所承认的历史并不是很长久。

橡胶是较早走入人类生活的一种高分子材料。15 世纪开始,美洲玛雅人就采用了天然橡胶做容器、雨具等生活用品,但是该产品在温度较高的时候会变黏,弹性也较差。直到 1839 年,美国人 Charles Goodyear 发现天然橡胶与硫磺共热后明显地改变了性能,使它从硬度较低、遇热发黏软化、遇冷发脆断裂的不实用的性质,变为富有弹性的材料,这就是橡胶的硫化,也是橡胶作为真正有价值的材料开始使用的一个里程碑。美国的一位印刷工人 John Wesley Hyatt 为了找出一种代替象牙的材料,进行了大量实验。在 1869 年,他以硝化纤维作原料,加入樟脑和乙醇的混合物,在高压下共热,制造出了第一种人工合成塑料“赛璐珞”(celluloid),至今该种材料还在使用。世界上第一根人造丝,是 1855 年,由法国化学家 Count Hilaire de Chardonnet 发明。他利用硝酸纤维素溶解在乙醚和乙醇的混合溶液中得到一种黏稠的溶液,再用一根玻璃细管把液体挤到空气中,溶剂挥发后得到光亮柔韧的细丝,这就是纤维的鼻祖。

1909 年,美国人 Leo Baekeland 用苯酚与甲醛反应制造出第一种完全人工合成的塑

料——酚醛树脂。酚醛树脂的出现标志着合成高分子材料时代的到来。1920 年，德国人 Hermann Staudinger 发表了“关于聚合反应”的论文，提出了高分子物质是由具有相同化学结构的单体经过化学反应(聚合)，通过化学键连接在一起的大分子化合物，高分子或聚合物一词即源于此，标志着高分子时代的开始。1926 年，瑞典化学家斯维德贝格等人设计出一种超离心机，用它测量出蛋白质的相对分子质量，证明高分子的相对分子质量的确是从几万到几百万。1930 年，聚苯乙烯(PS)在德国商业化生产。1932 年，Hermann Staudinger 总结了自己的大分子理论，出版了划时代的巨著《高分子有机化合物》，成为高分子化学作为一门新兴学科建立的标志。1935 年，杜邦公司基础化学研究所的 Wallace H. Carothers 合成出聚酰胺 66，即尼龙 66，并在 1938 年实现工业化生产。1930 年，德国人用金属钠作为催化剂，用丁二烯合成出丁钠橡胶和丁苯橡胶。1940 年，英国人 T. R. Whinfield 合成出聚酯纤维(PET)。1940 年，Peter Debye 发明了通过光散射测定高分子物质相对分子质量的方法，1948 年，Paul Flory 建立了高分子长链结构的数学理论。1953 年，德国人 Karl Ziegler 与意大利人 Giulio Natta 分别用金属络合催化剂合成了聚乙烯与聚丙烯。1955 年，美国人利用齐格勒-纳塔催化剂聚合异戊二烯，首次用人工方法合成了结构与天然橡胶基本一样的合成天然橡胶。1956 年，Szwarc 提出活性聚合概念，高分子进入分子设计时代。1971 年，S. L. Wolek 发明可耐 300℃ 高温的芳纶复合材料(Kevlar)。

1970 以后，高分子合成新技术不断涌现，高分子新材料层出不穷。1974 年，美国 Rockefeller 大学著名生物化学家 R. B. Merrifield 将功能化的聚苯乙烯(PS)用于多肽和蛋白质的合成，大大提高了涉及生命物质合成的效率并缩短了合成时间，在功能高分子材料应用于生命物质合成领域作出了突出贡献，1984 年度获得了诺贝尔化学奖。2000 年，日本人白川英树、美国人艾伦·黑格和艾伦·马克迪尔米德等有关导电高分子材料——掺杂聚乙炔的研究和应用成果突破了“合成聚合物都是绝缘体”的传统观念，开创了高分子功能化研究和应用的新领域。

从以上高分子材料发展的简史可以看到高分子发展的几个时期：一是 20 世纪 20 ~ 40 年代高分子科学建立和发展的时期；二是 30 ~ 50 年代高分子材料工业蓬勃发展的时期；三是 60 年代以来高分子材料大规模工业化、特种化、高性能化和功能化的时期。

当然作为新兴材料科学的一个分支，高分子材料目前已经渗透到工农业、建筑、航空航天、国防、商业、医药以及人们的衣、食、住、行的各个方面。在我们生活的环境中，无时无刻都同高分子材料打着交道。我们的生活离不开高分子材料。

由于历史的原因，1950 年以前我国的高分子科学和工业几乎是一片空白。当时国内没有一所高等学校设立高分子专业，更没有开设任何与高分子科学与工程相关的课程。除上海、天津等地有几家生产“电木”制品(酚醛树脂加木粉热压成型的电器元件等)和油漆的小型作坊以外，国内没有一家现代意义的高分子材料生产厂。直到 1954 ~ 1955 年，国内首批高分子理科专业和工科专业分别在北京大学和成都工学院相继创立。时至今日全国各层次的高等学校中设置高分子科学、材料与工程专业和开设高分子课程的学校在百所以上，近 50 年来为国家培养出了大批高分子专业人才。人才的出现也大大地促进了高分子工业的发展。从 20 世纪 50 年代开始，国内一批中小型塑料厂、合成橡胶厂、化学纤维和涂料工厂相继投入生产。20 世纪 60 ~ 80 年代是我国高分子材料工业飞速发展的时期。与此同时一大批万吨

乃至 10 万吨以上级别的大型聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、ABS、SBS 以及其他类别的高分子材料生产和加工的大型企业在全国各地相继建成投产。其中上海金山、南京扬子、江苏仪征、山东齐鲁、北京燕山、湖南岳阳以及天津、兰州、吉林等地已经成为我国重要的大型高分子材料生产基地。

今天,我国在分子科学基础研究、专业人才培养以及各种高分子材料的生产发展相对迅速。目前高分子材料科学发展主要朝着高性能化、高功能化、精细化、复合化、智能化等几个趋势进行发展。其中高性能化是高分子材料发展的主要方向,高功能化还处于一个发展的初期阶段,精细化主要应用于电子信息技术产业,复合化是材料的发展方向,而智能化尚属于挑战性的重大课题。

第二节 高分子材料的加工过程

高分子材料是以高分子化合物为基体,辅以改善材料加工性能和使用性能的各种添加剂,通过某些方法成型的具有一定使用价值的制品。不同类型的高分子材料需要不同类型的添加成分,比如塑料需要增塑剂、稳定剂、填料、润滑剂、增韧剂等添加成分,称为助剂;橡胶需要硫化剂、硫化促进剂、补强剂、软化剂、防老剂等添加成分,称为配合剂;涂料需要催干剂、悬浮剂、增塑剂、颜料等添加成分,也称为助剂。可见高分子材料是一个比较复杂的体系。

在众多的分子材料中,塑料、橡胶和合成纤维所占比重较大。

塑料是一种以高相对分子质量的有机物质为主要成分的材料,它在加工完成时呈现固态形状,在制造以及加工过程中,可以借助其流动来造型,这是美国材料试验协会对塑料的定义。

橡胶是具有可逆形变的高弹性的高分子材料,也称为弹性体。在室温下富有弹性,在很小的外力作用下能产生较大形变,除去外力后能恢复原状。橡胶属于完全无定形聚合物,它的玻璃化转变温度低,相对分子质量往往很大,一般大于几十万。

纤维是指纤细而柔软的丝状物,长度至少为直径的 100 倍,具有一定韧性的纤细物质。纤维具有分子间作用力大、弹性模量大、形变量小、强度高等特点,一般为具有晶相的聚合物。本书介绍的纤维,如果没有特殊的说明主要指合成纤维。

为了扩大高分子材料的用途,需要对高分子材料或体系进行操作,得到有实用价值的产品,这就是高分子材料的加工。

由于高分子材料的多样性,例如涂料和黏合剂可以采用预聚体或聚合物溶液,而塑料和橡胶采用树脂或生胶进行成型加工成制品才能得以应用。因为其种类不同,用途各异,成品的形状千千万万,因此高分子材料的加工方法五花八门。在本书中我们着重学习高分子材料制品,如塑料制品、橡胶制品以及纤维制品的加工方法。

如图 1-2-1 所示为高分子材料制品的加工过程。

从图中看到,高分子材料的成型加工大致分为三个阶段:

(1) 基础阶段

基础阶段主要是为成型做准备工作,不同用途的产品需要的准备工序不同,但大体可以

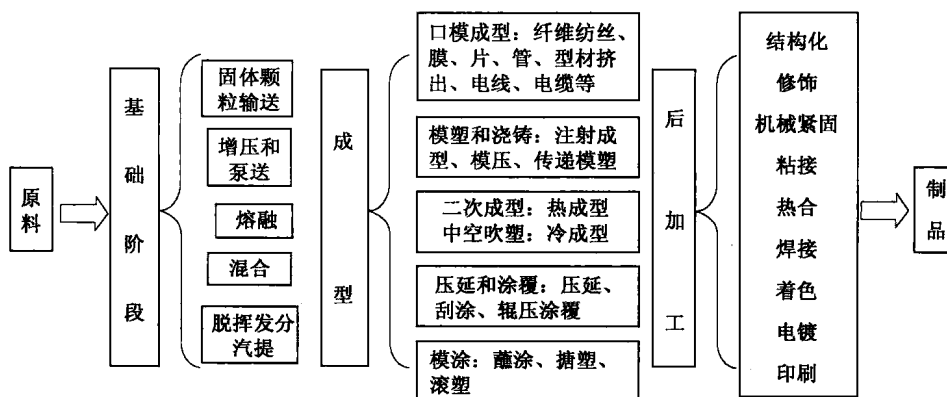


图 1-2-1 高分子材料的成型过程

分为粒状固体物料的输送、原料的熔融、液体物料的增压和泵送、物料的混合等。准备工序可以单独作为一个工段，也可以与成型过程连续完成。

(2) 成型

高分子材料的产品非常多，成型方法也有五花八门。不同用途的高分子材料成型有其共性，也有个性。成型可以归纳为以下几类：

① 口模成型 凡是成型时使聚物流体（包括熔体、溶液等）连续通过口模（机头）的成型均属于口模成型。例如：纤维的成型，称为纤维的纺丝；塑料薄膜、板材、片材、异型材、电线和电缆绝缘的成型，称为塑料的挤出成型；橡胶板材管材半成品的成型，称为橡胶的压出成型。

② 模塑和铸塑 模塑和铸塑是一类成型方法，包括热塑性和热固性聚合物为模具“供料”的所有方法。主要包括注射成型、传递模塑、模压成型，以及单体或低相对分子质量的聚合物的普通浇铸和“原位”聚合。其中注射成型应用比较广，包括塑料的注射成型和橡胶的注压成型。

③ 压延和涂覆 压延和涂覆是一种稳定的连续成型过程，在橡胶和塑料的生产中应用很多。一般采用辊筒做主要部件。可以进行橡胶压片、橡胶贴合半成品，以及塑料膜、塑料人造革、塑料壁纸等成品的成型。

④ 模涂 在模具的内表面或外表面敷上一层比较厚的涂层的操作成型方法称为模涂。例如蘸涂、搪塑、滚塑等加工方法。

⑤ 二次成型 二次成型指已经经过预成型的聚合物的进一步成型，一般是以一次成型的半成品作为原料，例如：纤维的拉伸、塑料的热成型、塑料的吹塑等属于二次成型。

(3) 后处理阶段

后处理是根据不同的成型制品的需要设定的，包括结构化、修饰、机械紧固、黏接、热合、焊接、着色、电镀、敷金、印刷、彩绘等。不同的高分子材料其后处理阶段差别较大。

三个阶段中以成型为主要阶段。高分子的加工成型方法非常多，这些方法中有的以物理变化为主，原料需要经过加热、流动成型、冷却定型，例如热塑性材料的挤出注射、纤维的纺丝；有的以化学变化为主，原料经过加热，发生化学反应固化成型，例如预聚体的浇注成型；有的既有物理变化又有化学变化，原料经过加热流动，在流动成型过程中发生化学反应、固化，例如橡胶和热固性塑料的注射、模压等。

高分子材料的加工过程是一个复杂的物理化学变化过程，任何一种高分子材料的加工技

术都是从流动变形出发的，因此高分子材料的成型流动性是必要条件。

第三节 配方设计

配方不是原材料之间简单的、经验性的组合，而是在对高分子材料结构与性能关系充分研究基础上综合设计的结果，是一个富于挑战性的、专业性很强、涉及面很广的技术设计工作。配方设计不仅要求了解所用原料、成型加工工艺和材料的使用条件，同时要对其中组分的配合方法、配方中各组分的优化都要做到详细的分析，以满足材料的加工和使用要求，以期得到最大的收益。它涉及到材料加工、应用、配合的各种理论，也涉及长期积累的实际生产经验，只有不断地进行摸索，不断地通过实验工作，才可能使一种配方日臻完善。

但是，一个好的制品，决不仅仅局限于配方设计，它还涉及成型加工工艺设计及成型设备的选型，制品的外观设计及结构设计、模具设计等。配方设计是保证产品质优的核心。

一、配方设计的基本原则

配方设计的关键在于要对现有的理论、资料进行充分的分析、消化，经过实验实践，一步步摸索、总结，从而得到符合制品使用要求的配方。

在配方的设计中通常要遵循以下几个原则：

- ① 查阅相关的资料，掌握原材料的基本性能以及各种组分之间的匹配性，了解原材料的成型加工性和价格因素。
- ② 根据资料上的数据初步设计配方的组分以及和配比。
- ③ 通过实验对上述的配方进行验证和调整，最终确定配方。

二、配方的表示方法

以橡胶为例，配方的表示方法主要有以下几种。如表 1-3-1 所示。

表 1-3-1 橡胶的配方组成

配合剂名称	质量/份	质量分数/%	体积分数/%	生产配方/kg
天然橡胶	100	62.2	76.7	50
硫磺	3	1.8	1.00	1.5
促进剂 M	1	0.6	0.50	0.5
氧化锌	5	3.1	0.60	2.5
硬脂酸	2	1.2	1.60	1
炭黑	50	31.1	19.60	2.5
合计	161	100	100	80.5

第一种是以质量份数来表示的配方，即以生胶的质量为 100 份，其他配合剂用量都相应的以质量份数来表示，常用于实验室使用。第二种是以质量分数来表示的配方，即以胶料的总质量为 100，生胶及配合剂用量都以质量分数来表示，常用于生产中计算材料的成本。第三种是以体积分数来表示的配方，即以胶料的总体积为 100，生胶及配合剂用量都以体积分数来表示，常用于生产中计算材料体积成本。第四种是按照炼胶机的容量来制定的配方，也

称为实际生产配方。
后三种配方都是从第一种配方算出。

三、配方设计的程序及检验

- 配方设计按照以下程序进行：
- ① 确定产品的技术要求，再根据要求制订产品的性能指标，作为配方设计依据。
 - ② 详细收集技术资料，了解同类或类似产品的配方情况做参考。
 - ③ 编制设计方案(包括基础试验和变量试验范围)。
 - ④ 进行试验和整理资料(实验室)。
 - ⑤ 复试和中试，确定生产配方。

生产配方内容应该包括配方选定的组分及组分用量、材料质量指标、工艺条件以及检验方法等整套技术资料。

配方设计的流程如图 1 - 3 - 1 所示。整个过程可以概括为配方拟定和实验筛选两个部分。

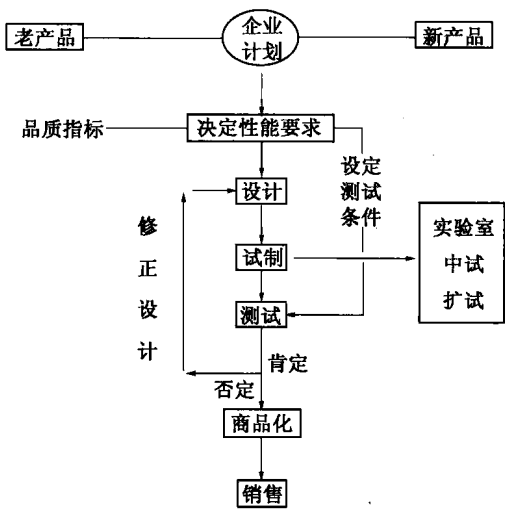


图 1 - 3 - 1 配方设计的流程

1. 配方拟定

首先根据制品性能要求、加工方法和成本等因素来选择原材料，并初步确定树脂与助剂、其他组分的比例关系，拟定出供实验用的配方。

例如聚氯乙烯(PVC)产品配方设计的时候，首先了解 PVC 树脂的类型、性能(包括基本性能，使用性能)、适合的加工方法，然后进行树脂和助剂的选择、树脂和其他组分的配比关系。其中树脂和其他组分的配比关系是关键环节，一般采用单因素法设计、多因素多水平的正交设计等。

2. 实验筛选

所设计的配方正确与否，需经过实践检验，即所设计的配方要用实验来筛选，而且实验要求具有重复性。

实验筛选的原则是根据需要测定不同的性能。原则上一種配方的筛选要首先考虑刚度、弯曲强度，其次考虑拉伸强度、伸长率，再者考虑冲击强度，耐热性、电绝缘性、化学稳定

性等。

四、配方中配比关系的确定

在配方设计中，往往要进行许多变量试验来优选其中组分的配比关系，以便确定最佳的配方，目前多采用数理统计的方法进行试验，例如正交试验设计法、回归分析试验设计法等等。

由于配方中的组成较多，每一种组分对于性能的影响都不相同。有时两种组分还会产生协同效果或排斥效应，因而长期以来采用了“炒菜式”的试验方法，即选择若干的试验点，一点点地进行实验。这种方法试验量大，也很难全面地反映材料性能的影响因素。因而要采用一种方法，在尽可能减少试验次数的基础上，得到性能良好的配方，就要利用数学的方法进行试验设计。目前常用的试验设计方法有正交试验设计和正交回归试验设计。

(一)正交试验设计

所谓正交试验法就是用一种排列整齐的规格化的表，即正交表来安排试验和分析试验结果。正交试验设计在生产和科研中已得到了广泛的应用。特别是当一个试验中所考察的因素很多时，正交设计的方法非常有效。

1. 制定因素水平表

制定因素的水平表时，首先要对各个因素进行分析，找出对性能有显著影响的因素，按照一定的顺序分别称为因素1、因素2、因素3。在选定因素后，就要对各个因素进行分析，以确定这些因素的水平。所谓水平就是各因素在其变化范围内所取的试验点。根据经验及专业知识，选择因素的三个水平A、B、C，相应的因素1的三个水平为 A_1 、 B_1 、 C_1 ，相应的因素2的三个水平为 A_2 、 B_2 、 C_2 ，相应的因素3的三个水平为 A_3 、 B_3 、 C_3 。

2. 设计实验方案

在因素以及因素的三个水平确定后，就要选择一张合适的正交表安排实验。正交实验表参考相应的正交设计书籍。例如三因素三水平的试验，可选的三水平正交表中试验次数最少的是正交表 $L_9(3^4)$ ，如表1-3-2所示。此时的试验次数为9次，可以代替全部的27次试验。

表1-3-2 正交设计表 $L_9(3^4)$

试验号	因素1	因素2	因素3
1	A_1	A_2	A_3
2	A_1	B_2	B_3
3	A_1	C_2	C_3
4	B_1	A_2	B_3
5	B_1	B_2	C_3
6	B_1	C_2	A_3
7	C_1	A_2	C_3
8	C_1	B_2	A_3
9	C_1	C_2	B_3

3. 进行实验

按照上述正交试验安排表，严格地进行试验，并记录各次试验的结果，保持实验的重复性。

4. 分析试验结果

按照正交表试验，记录实验数据，并列入表中性能一栏，如表 1-3-3 所示中的数据 D、E、F、G、H、I、J、K、L。然后计算相应因素中不同水平的实验结果。表中 I 为水平 A 的试验结果总和，II 为水平 B 的试验结果总和，III 为水平 C 的试验结果总和。最后对各因素分别计算极差 R ，也就是最大值与最小值之差。极差 R 大者表示该因素的波动对试验结果影响较大，极差 R 小者表示该因素的波动对试验结果的影响较小。

表 1-3-3 实验结果

试验号	因素 1	因素 2	因素 3	某性能数值
1	A_1	A_2	A_3	D
2	A_1	B_2	B_3	E
3	A_1	C_2	C_3	F
4	B_1	A_2	B_3	G
5	B_1	B_2	C_3	H
6	B_1	C_2	A_3	I
7	C_1	A_2	C_3	J
8	C_1	B_2	A_3	K
9	C_1	C_2	B_3	L
I	D + E + F	D + G + J	D + I + K	
II	G + H + I	E + H + K	E + G + L	
III	J + K + L	F + I + L	F + H + J	
极差 R	$R_{1\max} - R_{1\min}$	$R_{2\max} - R_{2\min}$	$R_{3\max} - R_{3\min}$	

正交试验对于各种配方都适用，它方便易行，可以帮助我们较快地筛选配方。但它也存在某些缺点，如在所设计水平外的数据无法得到，对于性能不能进行连续的预测。

(二) 正交回归设计

采用正交回归设计，可以同时估计几个变量的效应，通过对实验结果的分析，建立变量与性能之间的数学模型，并用最优化方法在配方体系的变量范围内寻找最佳解，从而得到最佳的配方。相对于一般的正交设计而言，它克服了因子变化不连续及不能对性能进行预测的缺点，并可以利用计算机对所得的结果进行分析处理，提高了工作效率，节省了人力物力。利用计算机对所建立的数学模型绘制性能的等高线图，可以较直观地观察各因素对性能的影响。

正交回归设计的方法是根据数理统计的原理，由经验设计变量因子和水平，对水平进行组合，根据结构矩阵安排实验，并用计算机对实验数据进行数值分析计算，用回归分析的方法建立变量因子与性能指标间的数学模型，运用最优化方法在配方体系的变量范围中寻求最优解，从而得出材料的最佳配方。其大致的步骤如图 1-3-2 所示。

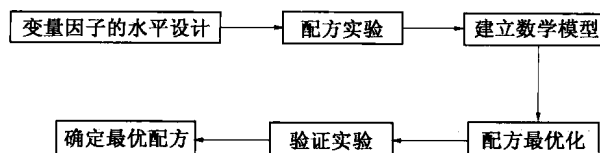


图 1-3-2 正交回归设计的步骤