



北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Polymer Synthesis Technology

# 高分子合成工艺学

柴春鹏 李向梅 李国平 © 编著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Polymer Synthesis Technology  
**高分子合成工艺学**

柴春鹏 李向梅 李国平 © 编著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目 (CIP) 数据

高分子合成工艺学 / 柴春鹏, 李向梅, 李国平编著

—北京: 北京理工大学出版社, 2022. 3

ISBN 978 - 7 - 5763 - 1175 - 4

I. ①高… II. ①柴… ②李… ③李… III. ①高分子材料—合成材料—生产工艺—教材 IV. ①TQ316

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 050002 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 24.5

字 数 / 544 千字

版 次 / 2022 年 3 月第 1 版 2022 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 110.00 元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 辛丽莉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

“高分子合成工艺学”是高分子材料与工程专业的必修课之一，是高分子合成基础理论和专业实践之间的重要桥梁和纽带课程，承担着培养学生如何将高分子合成理论应用到生产实践中的任务，同时结合高分子材料合成的新技术、新装备、新工艺研究，进一步提高学生的实际应用能力和创新能力。随着高分子材料工业的深度发展，结合我国先进制造工业大国发展的目标，对专业人才的要求不仅应具有较高的理论水平，而且应具有较宽的知识面和实践能力，因此专业教学必须与目前生产科研的发展相适应，教材内容必须更新和适应高分子合成新技术的发展。为了培养和造就一批符合新工科要求的高素质专业人才，进一步提升学生的工程意识和工业绿色环保理念，使其熟悉工业合成高分子材料的一般过程，掌握工业生产高分子材料的技能技巧，具备从事高分子材料工业化生产和开发新型高分子材料的能力，我们编著了本教材。同时，为了让读者和学生能更好地理解知识点，本教材配有相关内容的授课视频，形成一本新型的“人机一体教材”，即在看教材时可以用手机扫描二维码，观看视频讲解。

本教材以高分子的合成反应机理为主线，突出高分子合成工艺基本概念和基本理论，紧密结合工业上的典型案例，着重阐述高分子合成的具体工艺实施方法和工艺技术，包括配方原理、工艺流程、聚合反应的基本化工单元、典型生产设备等。同时，本教材剖析高分子合成工艺的一般路线和不同合成工艺路线的特殊性，展示高分子合成工艺的特征，并强调理论联系实际，使学习者掌握各种高分子化合物的合成工艺路线，为深入理解高分子专业课程的知识及将来从事相关工作奠定基础。

为了保证教材的质量，在编写过程中，作者认真研读了国内高分子合成工艺学的有关教材，并查阅了大量国外高分子合成工艺实践的著作和论文，同时详细分析了国内相关专业本科课程体系，吸取国内相关院校教学改革和课程建设的成果，并结合作者多年的教学实践体会和教学经验组织编写本教材。在此作者对参考的各类著作及论文的作者致以诚挚的谢意。

本教材内容共7章，包括绪论、高分子合成的原料、高分子合成

工艺设备、自由基聚合工艺、离子聚合和配位聚合工艺、逐步聚合工艺、绿色高分子合成工艺，其中第1、2、4章由柴春鹏编著，第3、7章由李国平编著，第5、6章由李向梅编著，尹绚参与本书的部分内容编著及格式校订。本书编著过程中还得到研究生姚艳青、赵佳、王姗、韩旭辉、岑卓芪、刘家冉等的帮助；全书由柴春鹏统稿及审定。本书的出版得到北京理工大学2020年“特立”系列教材项目资助，在此深表谢意。

本书涉及的知识面较广，作者深感水平有限，疏漏或不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

## CONTENTS

---

---

---

第1章 绪论 .....	001
1.1 高分子合成材料概述 .....	001
1.1.1 高分子合成材料的特性 .....	001
1.1.2 高分子合成材料的应用 .....	003
1.1.3 高分子合成材料的工业生产 .....	005
1.1.4 高分子合成材料的工业发展简史 .....	007
1.2 高分子合成工艺特征 .....	009
1.2.1 高分子合成反应特征 .....	010
1.2.2 高分子合成实施方法特征 .....	013
1.2.3 高分子合成操作方式特征 .....	016
1.2.4 高分子合成设备的特征 .....	017
1.3 高分子合成工艺过程 .....	018
1.3.1 原料准备与精制 .....	018
1.3.2 引发剂(或催化剂)配制 .....	020
1.3.3 聚合过程 .....	021
1.3.4 分离过程 .....	022
1.3.5 聚合物后处理过程 .....	023
1.3.6 回收过程 .....	024
1.4 高分子合成工艺的评价和改革创新 .....	025
1.4.1 生产工艺流程的评价 .....	025
1.4.2 生产工艺安全性评价 .....	026
1.4.3 生产工艺经济性评价 .....	028
1.4.4 高分子合成工艺的改革创新 .....	029

<b>第2章 高分子合成的原料</b>	032
2.1 原料的生产	032
2.1.1 石油化工生产原料	032
2.1.2 煤炭化工生产原料	042
2.1.3 生物质化工生产原料	050
2.2 原料的选择和精制	053
2.2.1 原料的选择	053
2.2.2 原料的精制方法	053
2.2.3 常用溶剂的精制	056
2.2.4 常用引发剂的精制	059
2.3 原料的质量	060
2.3.1 原料的质量管理	061
2.3.2 原料的质量检验	061
2.3.3 原料的质量控制	062
<b>第3章 高分子合成工艺设备</b>	064
3.1 高分子合成反应设备	064
3.1.1 釜式聚合反应器	066
3.1.2 管式聚合反应器	081
3.1.3 塔式聚合反应器	084
3.1.4 流化床聚合反应器	087
3.2 高分子化合物分离设备	089
3.2.1 脱挥发分分离设备	090
3.2.2 凝聚分离设备	094
3.2.3 离心分离设备	096
3.3 高分子化合物干燥设备	097
3.3.1 干燥要求	098
3.3.2 箱式干燥器	099
3.3.3 气流干燥器	100
3.3.4 流化床干燥器	103
3.3.5 喷雾干燥器	108
<b>第4章 自由基聚合工艺</b>	112
4.1 自由基聚合工艺基础	112
4.1.1 自由基聚合的机理	112
4.1.2 自由基聚合的单体	117
4.1.3 自由基聚合的引发	119
4.1.4 自由基聚合产物的分子量及控制	127

4.2 自由基本体聚合工艺 .....	129
4.2.1 自由基本体聚合工艺的特点 .....	129
4.2.2 自由基本体聚合的反应器 .....	130
4.2.3 自由基本体聚合的工艺过程 .....	131
4.2.4 自由基本体聚合工艺实例 .....	132
4.3 自由基溶液聚合工艺 .....	148
4.3.1 自由基溶液聚合的特点 .....	148
4.3.2 溶剂对溶液聚合反应的影响 .....	149
4.3.3 工业上溶液聚合反应选择溶剂的原则 .....	150
4.3.4 自由基溶液聚合的工艺流程 .....	151
4.3.5 自由基溶液聚合工艺实例 .....	151
4.4 自由基悬浮聚合工艺 .....	162
4.4.1 自由基悬浮聚合的特点 .....	162
4.4.2 悬浮剂及其作用 .....	163
4.4.3 自由基悬浮聚合的物系组成 .....	165
4.4.4 自由基悬浮聚合的成粒过程 .....	166
4.4.5 自由基悬浮聚合的生产过程 .....	168
4.4.6 自由基悬浮聚合工艺实例 .....	169
4.5 自由基乳液聚合工艺 .....	180
4.5.1 自由基乳液聚合的特点及乳化剂 .....	181
4.5.2 自由基乳液聚合体系的组成 .....	183
4.5.3 自由基乳液聚合的体系变化 .....	185
4.5.4 乳状液的稳定 .....	188
4.5.5 自由基乳液聚合的影响因素 .....	189
4.5.6 自由基乳液聚合工艺实例 .....	190
<b>第5章 离子聚合和配位聚合工艺 .....</b>	<b>207</b>
5.1 阳离子聚合原理及合成工艺 .....	207
5.1.1 阳离子聚合原理 .....	207
5.1.2 阳离子聚合的单体 .....	209
5.1.3 阳离子聚合的引发剂 .....	210
5.1.4 阳离子聚合的工艺及影响因素 .....	212
5.1.5 阳离子聚合的工业应用 .....	213
5.1.6 阳离子聚合工艺实例 .....	214
5.2 阴离子聚合原理及合成工艺 .....	221
5.2.1 阴离子聚合原理 .....	222
5.2.2 阴离子聚合的单体 .....	225
5.2.3 阴离子聚合的引发剂 .....	225
5.2.4 阴离子聚合的工艺及影响因素 .....	226

5.2.5	阴离子聚合的工业应用 .....	229
5.2.6	阴离子聚合工艺实例 .....	229
5.3	配位聚合原理及合成工艺 .....	242
5.3.1	配位聚合原理 .....	242
5.3.2	配位聚合的单体 .....	243
5.3.3	配位聚合的催化剂 .....	243
5.3.4	配位聚合的工艺影响因素 .....	244
5.3.5	配位聚合的工业应用 .....	245
5.3.6	配位聚合工艺实例 .....	245
<b>第6章</b>	<b>逐步聚合工艺 .....</b>	<b>267</b>
6.1	线型缩聚原理及合成工艺 .....	267
6.1.1	线型缩聚反应原理 .....	267
6.1.2	线型缩聚单体及缩聚物 .....	268
6.1.3	线型缩聚物的合成工艺 .....	269
6.1.4	线型缩聚工艺的关键问题 .....	271
6.1.5	线型缩聚工艺实例 .....	273
6.2	体型缩聚原理及合成工艺 .....	288
6.2.1	体型缩聚反应原理 .....	288
6.2.2	体型缩聚过程 .....	289
6.2.3	体型缩聚的工艺控制 .....	289
6.2.4	体型缩聚的应用特点 .....	290
6.2.5	体型缩聚工艺实例 .....	291
6.3	逐步加成聚合原理及合成工艺 .....	304
6.3.1	逐步加成聚合反应原理 .....	304
6.3.2	聚氨酯及其化学反应 .....	305
6.3.3	合成聚氨酯的主要原材料 .....	307
6.3.4	聚氨酯的合成原理 .....	314
6.3.5	逐步加成聚合工艺实例 .....	316
<b>第7章</b>	<b>绿色高分子合成工艺 .....</b>	<b>331</b>
7.1	概述 .....	331
7.1.1	绿色化学 .....	331
7.1.2	绿色高分子合成工艺的意义和要求 .....	333
7.2	绿色高分子合成工艺的设计思路 .....	336
7.2.1	绿色溶剂和助剂 .....	336
7.2.2	环境友好催化剂 .....	341
7.3	高分子绿色合成工艺方法 .....	343
7.3.1	水介质的高分子合成工艺 .....	343

7.3.2 离子液体介质的高分子合成工艺 .....	352
7.3.3 超临界流体介质的高分子合成工艺 .....	357
7.3.4 辐射条件下的高分子合成工艺 .....	361
7.3.5 等离子体高分子合成工艺 .....	370
7.3.6 酶催化高分子合成工艺 .....	371
<b>参考文献</b> .....	<b>378</b>

# 第1章

## 绪论



高分子合成材料概述

### 1.1 高分子合成材料概述

高分子合成材料是分子量为一万至百万甚至更高的一类人工合成材料，分子量分布具有多分散性。它们通常由一种或多种单体以共价键重复连接而成，包括塑料、橡胶、纤维、胶黏剂和涂料等种类，具有原料丰富、质量小、加工方便、性能可调范围大、价格便宜、用途广泛等优势，其发展现已超越钢铁、水泥和木材三大传统的基本材料，成为20世纪以来不可缺少的重要材料之一。

合成的高分子化合物通常是用结构和相对分子质量已知的单体为原料，经过一定的聚合反应得到的聚合物。合成高分子采用的化学合成（即聚合反应）机理包括自由基聚合、离子型聚合（阴离子聚合、阳离子聚合）、配位聚合、缩合聚合、逐步加成聚合等。对于一个聚合反应，又可根据其聚合反应机理、所需求产品不同的性能采用不同的聚合实施方法。以聚合体系的相容性为标准，可分为均相聚合和非均相聚合。均相聚合的实施方法有本体聚合、溶液聚合、熔融缩聚等，非均相聚合有悬浮聚合、乳液聚合、界面缩聚等。对于同一种合成高分子材料来说，尽管采用的单体和聚合反应机理相同，但采用不同的聚合实施方法所合成高分子化合物的分子结构、相对分子质量往往会有很大差别，进而影响到产物最终的性能。在工业生产中，为满足不同的制品性能，一种单体常需要采用不同的聚合实施方法进行生产，如对于常用的聚苯乙烯产品，用于挤塑或注塑成型的通用型聚苯乙烯多采用本体聚合，可发性聚苯乙烯主要采用悬浮聚合，而高抗冲聚苯乙烯则是溶液聚合-本体聚合的联合使用。

#### 1.1.1 高分子合成材料的特性

高分子合成材料与小分子物质相比具有多方面的独特性能，这源自高分子化合物结构的特殊性和复杂性。高分子化合物的结构通常包括链结构和聚集态结构两个部分。链结构是指单个高分子化合物分子链的结构和形态，链结构又可分为近程结构和远程结构。近程结构属于化学结构，也称一级结构，包括链中原子的种类和排列、取代基和端基的种类、结构单元的排列顺序、支链类型和长度等。远程结构是指分子的链尺寸、形态、链的柔顺性以及分子链在环境中的构象，也称二级结构。聚集态结构是指高聚物材料整体的内部结构，包括晶态结构、非晶态结构、取向态结构、液晶态结构等有关高分子材料中分子的堆积情况，统称为三级结构。高分子合成材料的结构决定其性能，通过对结构的控制和改性，可获得不同特性的高分子合成材料。

合成高分子的主链主要是碳原子以共价键结合起来的碳链，由于单键可以自由旋转，线型长链高分子在旋转的影响下，整个分子保持直线状态的概率甚微。事实上，线型长链高分子处于自然蜷曲的状态，分子纠缠在一起，因而具有柔顺性的特点。当有外力作用在分子上时，蜷曲的分子可以被拉直，但外力一旦除去，分子又恢复到原来的蜷曲状态，因此合成线型高分子都有一定的弹性。

由于合成高分子都是长链大分子，又处于自然的蜷曲状态，所以不容易排列整齐成为周期性的晶态结构。与小分子不同，合成高分子不容易形成完整的晶体。然而在局部范围内，分子链有可能排列整齐，形成结晶态，即所谓短程有序。因此，在分子晶体中往往含有晶态部分和非晶态部分，故常用结晶度来衡量整个高分子中晶态部分所占的比例。晶态高分子的耐热性和机械强度一般要比非晶态高分子高，而且还有一定的熔点，所以要提升高分子的力学和耐热等性质，就要设法提升高分子的结晶度。

高分子结构具有不均一性，或称多分散性，这一点与小分子结构是截然不同的。小分子的结构是确定的，分子量也是确定的。但对合成高分子来说，每个独立的高分子只要聚合度确定了，分子量也就确定了。但在聚合反应中，得到的聚合物不是均一的，而是不同聚合度的高分子的混合物，任何高分子材料都是由组成相同而分子量不同的化合物构成的。通常所说的分子量大小是指平均分子量。分子量分布这一专用术语是用来表示该聚合物中各种分子量大小的跨度。分子量分布越窄即跨度越小，平均分子量大的高分子材料的耐低温脆折性和韧性越好，而耐长期负荷变形和耐环境应力开裂性能下降。

长链线型高分子被加热时，分子受热不均匀，有的部分受热多，有的部分受热少，甚至还有一部分没有受热。因此高分子加热后不是马上熔化变成液体，而是先经历一个软化过程再变为液体。液体冷却后，变硬成为固体，再次加热，它又能软化、流动。线型高分子的这种性质称为热塑性，它不但使高分子材料便于加工，而且可以多次重复操作。线型高分子通常具有热塑性，加热软化后可以加工成各种形状的塑料制品，也可制成纤维，加工非常方便。

单体进行聚合反应时，在某种条件下分子链之间发生交联形成体型高分子。体型高分子加热后不会熔化、流动，但当加热到一定温度时其结构遭到破坏，这种性质称为热固性。因此，体型高分子一旦加工成型，不能通过加热重新回到原来的状态。

合成的高分子化合物中主要含 C、H、O、N、S 及卤素等元素，因此比金属材料轻得多。一般高分子化合物相对密度都小于 2，聚丙烯塑料的相对密度为 0.91。泡沫塑料的相对密度只有 0.01，是水的 1/100，是非常好的救生材料。

高分子的分子链缠绕在一起，许多分子链上的基团被包在里面，当有其他试剂分子加入时，只有露在外面的基团容易与试剂分子作用，而被包在里面的基团不易反应，所以高分子化合物的化学反应性能较差。高分子具有耐酸、耐腐蚀等特性，如著名的“塑料王”聚四氟乙烯，即使把它放在王水中煮也不会变质，其耐酸程度远超过金。聚四氟乙烯是优异的耐酸、耐腐蚀材料。

高分子中的分子链是原子以共价键结合起来的，分子既不能电离，也不能在结构中传递电子，所以高分子大部分都具有绝缘性，故电线的包皮、电插座等都是用塑料制成的。此外，高分子对多种射线如  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  和 X 射线有一定的抵抗能力，可以抗辐射。

联系高分子合成材料微观结构和宏观性质的桥梁是材料内部分子运动的状态。一种

结构确定的材料，当分子运动形式确定时，其性能也就确定了。当改变外部环境使分子运动状态变化时，其物理性能也将随之改变。这种从一种分子运动模式到另一种模式的改变，按照热力学的观点称作转变，而按照动力学的观点称作松弛。例如，异戊橡胶在常温下是良好的弹性体，在低温时（ $< -100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）失去弹性变成玻璃态（转变）。在短时间内拉伸，形变可以恢复；而在长时间外力作用下，就会产生永久的残余形变（松弛）。聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）在常温下是模量高、硬而脆的固体，但当温度高于玻璃化温度（约 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）后，大分子链运动能力增强而变得如橡胶般柔软，当温度进一步升高，分子链重心能发生位移，则变成具有良好可塑性的流体。

总之，高分子合成材料具有诸多优异的特性：在物理性能方面，高分子合成材料具有相对密度小、比强度高、耐磨性好等特点；在化学性能方面，高分子合成材料具有化学性质稳定、耐腐蚀性能优异等特点。“多功能、轻而强”的高分子材料一直是高分子合成的重要发展方向之一。

### 1.1.2 高分子合成材料的应用

合成的高分子化合物可以挤塑或模压成各种形状的构件，可以压延成膜，可以纺制成纤维，可以产生强大的黏结能力，可以产生巨大的弹性形变，并具有质轻、绝缘、耐腐蚀、自润滑等许多独特的性能。用其制成的塑料、橡胶、纤维、胶黏剂、涂料等丰富多彩的制品，已经成为工农业生产各部门、科学研究各领域、人类衣食住行各环节不可缺少、无法替代的重要材料。

#### （1）高分子合成材料在机械工业中的应用。

高分子合成材料不但能够实现传统材料的功能，而且具有传统材料不能比拟的优势。例如，在建筑物建造之前，原来经常用大口径的重型钢管来制造下水道。现在，这些大口径重型钢管已经被高分子合成材料所代替，这就是我们所说的在机械工业领域中材料的“以塑代钢”和“以塑代铁”。高分子合成材料彻底改变了以往机械工业产品的笨重和高消耗等缺点，取而代之的是更加经济耐用和安全轻便。如在工业中聚氨酯弹性体的使用有助于提高产品的耐磨性，加入后其磨损远低于其他材料，故主要应用于磨粒磨损的机械。聚甲醛材料的突出特点是具有耐磨性，经机油、四氟乙烯、二硫化物等改性后，其磨损系数和摩擦系数减小，因此被大量应用于各种螺母、齿轮、凸轮、轴承、导轨、泵体等机械零件的制造中，并可替代昂贵的有色金属如锌、铜、铝等，大大降低了成本。

#### （2）高分子合成材料在现代农业中的应用。

在农业生产中，大部分地区最常用的地膜就是采用高分子合成材料制作的塑料。在我国广大的农村地区，地膜和温室的使用已经相当普遍，早已成为提高农村经济发展的一个重要方面，这就大幅增加了高分子材料的使用量。通过膜覆盖能够提供给植物很多有益的帮助，如增加农业设施的保暖性能，提高保湿效果，防止病虫害，促进植物生长等多种功能，为农业增产提供优良的条件，为农民增收提供基础。在农业上还会将高分子合成材料制成干型或者湿型成膜剂，用于包裹种子，不仅可以将农药和其他物质固定在种子表面，还可以改变种子的形状，以便于机械播种，节省人力、物力。

### (3) 高分子合成材料在电气工业中的应用。

在电气和电子行业中，高分子合成材料主要被用于对绝缘性、屏蔽性、导电性、导磁性要求很高的领域，而在信息通信行业里，随着科学技术的发展，高分子合成材料不仅被广泛应用于各类终端设备，而且还被应用在光纤、CD等产品中替代传统的玻璃、金属等原材料。作为电子产品生产大国，我国对高分子材料的需求日益增长。高分子合成材料所具有的质轻、易成型、绝缘、耐腐蚀等优点，已使其成为生产各种家用电器的最佳材料。

### (4) 高分子合成材料在医学中的应用。

高分子合成材料具有很强的生物活性和良好的物理化学性能，被人们广泛应用到医学领域，成为现代医疗材料的重要构件。在医学上，合成高分子材料被用来制造控制药物、人体移植器官、诊疗设备等，对保障人类健康起到很大作用。硅橡胶和某些空心人造纤维在人体中具有很好的生物相容性，是制造人体器官比较理想的材料，已经应用于人体内的有人造血管、人造心脏瓣膜、人造心脏等。在体外应用的有人工肺机、人造肾脏、输血导管。除此以外，还用于人造皮肤、牙齿等。另外，高分子合成技术还被人们应用到医疗器械领域，为医疗检查提供了重要设备支持，提升了医疗发展水平。

### (5) 高分子合成材料在建筑工程中的应用。

建筑领域的发展与材料技术的发展是分不开的，可以认为，建筑业的发展史就是材料的发展史。材料领域内每一次技术的革新都会给建筑业的发展带来极大的促进作用。而高分子合成材料在建筑领域内的发展与应用更是重中之重。高分子合成材料在建筑领域内较多应用于室内，如室内装修所用到的涂料、黏合剂等。一方面高分子材料具有优异的耐磨性能以及“轻而强”性能，可提高材料的使用寿命，降低材料的成本；另一方面，可以极大地提高了室内装修的美感，提高室内环境的居住质量。在建筑中，大量使用了不同档次的高分子合成材料，如由酚醛或脲醛树脂压制成板材而便于拆装运输的活动房、以充气顶棚构成的整体式展览馆、由玻璃纤维增强树脂制成的整体模塑住房等。这些轻巧实用，便于快速拆装的房屋，为搭制临时展览场馆、施工现场用房、救灾及野外考察用房等提供了极大的便利。

### (6) 高分子合成材料在军工领域的应用。

鉴于高分子合成材料具有耐腐蚀和高比强度等特点，在军工领域内广泛应用于防弹衣、耐腐蚀保护罩等方面，也是军事装备、军用交通、军事工程等重大领域内不可或缺的基础材料。随着特殊性能高分子合成材料的研究，高分子合成材料在应用方面已经开始部分替代金属材料，发挥其更佳的“轻而强”优势。军事工业领域内，材料的服役环境经常是比较恶劣的，包括极高温、极高受力等，故对材料的性能提出了非常苛刻的要求。高分子合成材料性能的可设计性为其在军工领域内的应用提供了技术支撑。

### (7) 高分子合成材料在航空航天领域的应用。

在航空航天领域应用的高分子合成材料主要包括橡胶、工程塑料、合成树脂、胶黏剂、密封剂、涂料、纤维、合成油脂、感光材料等。其特点是多品种、小批量、技术难度大等。氯丁橡胶、丁苯橡胶、丁腈橡胶、乙丙橡胶、硅橡胶、氟硅橡胶等是主要用作密封和阻尼的航空航天材料。聚芳醚酮作为最早在航空航天领域获得应用的热塑性材料，现在已成为航空航天材料中不可缺少的一部分，常被用来制造飞机的内部零件等，

还可用来制造火箭的电池槽、螺栓、螺母和火箭发动机的内部零件。使用纳米磁粉改性的聚苯硫醚(PPS)可以制作具有抗辐射、电磁屏蔽、吸波、隐身、抗静电等特种功能的结构件。航空航天产品广泛采用轻合金、蜂窝结构和复合材料,因此,胶黏剂及胶接技术应用普遍,但航天产品使用环境苛刻,要承受高温、烧蚀、温度交变、高真空、超低温、热循环、紫外线、带电粒子、微陨石、原子氧等环境的考验。航天材料及工艺研究所研制了百余种特种胶黏剂及密封剂,主要包括聚氨酯类、酚醛树脂类、环氧树脂类、有机硅类、丙烯酸酯类、有机硼类胶黏剂等,其中绝大多数已应用于我国运载火箭、卫星、飞船等航天产品。

#### (8) 高分子合成材料在日常生活中的应用。

高分子合成材料的发展极大地方便了人们的生活,它在日常生活中无处不在,如各种各样的塑料制品,包括容器、薄膜以及泡沫塑料等,方便了物品的保存和运输;多样化的橡胶制品,包括轮胎、传送带、电线的绝缘保护套以及生活中的雨衣、胶鞋等;丰富的纤维制品,包括涤纶、腈纶等,广泛应用于衣物制造,产生了许多物美价廉的服装供人们选择。同时,高分子合成材料的低成本优势使其在人们的日常生活领域中备受青睐,一直具有较高的关注热度。

面对高分子合成材料应用过程中不断提高的性能需求,高分子研究的科学家制造出了更多样的高分子合成材料产品。高分子合成材料在未来主要向绿色化、高性能、多功能化和智能化方向发展。高分子合成材料的不可降解性会对生态环境造成极大的破坏,发展绿色环保的高分子材料刻不容缓。高分子合成技术的发展必须以保护生态环境为重要前提。一方面需要提升高分子合成材料的可重复利用性,提高可降解性,从源头上杜绝环境污染问题;另一方面,要降低高分子材料对矿石燃料的依赖性,矿石燃料属于不可再生资源,高分子合成材料对于矿石燃料的依赖性会使地球的自然资源不断减少,不能实现可持续发展。高性能化是指通过改善材料合成工艺以及材料加工等来进一步提升高分子合成材料的性能,如高力学强度、高耐腐蚀性以及高耐磨性等,实现高分子合成材料在更高性能要求的环境中的应用。多功能化是指不断发展具有多种复合功能的高分子合成材料,实现功能的多样化、一体化和复合化,做到“一材多用”。智能化高分子合成材料是目前材料领域内一个比较新颖的发展方向。智能化是指实现高分子合成材料的生命功能,即具有可随环境变化的功能,如具有记忆功能的高分子合成材料,其形状可以根据外界条件的变化而变化,甚至可以感知周围环境温度和亮度的变化,并随之进行调整;水溶性高分子材料,可以实现在水溶液中的自我溶解,具有较好的黏合性和润滑性。总之,只有针对不同的应用需求,发展具有特殊性能的高分子合成材料,才能不断提升高分子合成材料的技术水平,进一步拓宽其应用领域。

### 1.1.3 高分子合成材料的工业生产

高分子科学与材料科学的学科交叉,建立了以塑料、橡胶和纤维三大高分子合成材料为代表的传统高分子工业,这三大高分子合成材料在生产能力、产量和技术开发水平等方面始终名列前茅。随着科技的进步,人们对高分子合成材料工业生产的产品提出了更多、更高的要求,如在产品强度、质量、耐酸碱、耐疲劳、耐高温等方面的要求不断提高,这就使高分子合成工业必须优化工艺过程,调节产业结构,促进高分子工业产业

不断升级，向高性能、高质量、精细化等方面进一步发展。

高分子合成材料工业生产的任务是将基本有机合成生产的单体、溶剂、助剂等原料，经过聚合反应合成高分子化合物，从而为高分子合成材料的成型加工提供基本原料。高分子合成材料的工业生产包括高分子合成工业和高分子成型加工两部分，它们与基本有机合成工业的关系如图 1-1 所示。

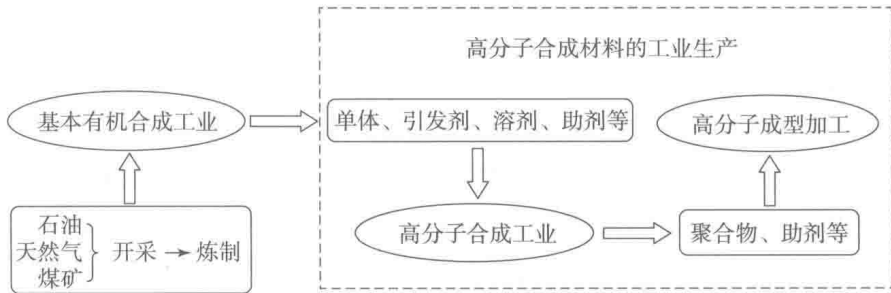


图 1-1 高分子合成材料的工业生产结构示意图

高分子合成材料工业具有量大、面广的特点。量大是指全世界合成高分子材料工业的年产量，按体积计算已经超过钢铁材料工业的产量。美国高分子合成材料的年消费总量以质量计接近钢铁材料，消费量的递增速度超过了 GDP 的递增速度。面广是指合成高分子材料的种类和品种繁多，即使是同一种化学组成的合成高分子化合物，也往往因其结构的细微差别而成为不同的专用品种，以满足特定的使用需要。

过去对高分子合成材料工业的研究，着重于全新品种的发掘、单体的新合成路线和新的聚合技术的探索。目前，以节能为目标，采用高效催化剂开发新工艺，同时从生产过程中工程因素考虑，围绕强化生产工艺（装置的大型化，工序的高速化、连续化）、产品的薄型化和轻型化以及对成型加工技术的革新等方面进行工作。高分子合成材料的工业生产既是国民经济的重要基础性产业，也是一个国家先导性的产业；既属石化行业内的战略新兴产业，也是电子信息、航空航天、国防军工、新能源等战略新兴产业的重要配套材料；不仅自身技术含量高、附加值高，而且是石化产业转型升级的重要方向。

高分子合成材料的工业生产一直是发达国家和跨国公司十分重视发展的工业领域，美国、德国、日本等发达国家一直是全球高分子合成材料工业生产的领先者，我们熟悉的巴斯夫、杜邦、陶氏、拜耳、三菱、LG、SK 等跨国公司，一直都是高分子合成材料工业生产领域的领航者。

中国在高分子合成材料的工业生产方面虽起步较晚，但发展较快。自改革开放以来，中国十分重视高分子合成材料的创新与发展，呈现专业化、规模化快速发展的态势，技术型工业企业不断出现。近年来，在石油和化学工业发展规划指南中，高分子合成材料工业作为战略新兴产业被列为优先发展的领域，对高性能树脂、高性能橡胶、高性能纤维、功能性膜材料等高分子合成材料的创新与发展都提出了明确的要求；另外，在合成树脂行业的发展规划中，明确了高分子合成材料发展的指导思想是以调整优化产业结构为重点，全面实施科技创新、结构调整、节能减排，加快推进产业转型升级，积极发展高端树脂、生物基树脂和专用料等新型材料，大力推进科技含量高、市场前景广、带动作用强的新产品规模化发展，为战略新兴产业发展、国家重大工程建设和

国防科技工业提供支撑和保障。我国一直在努力开发一批具有自主知识产权并占据行业制高点的关键技术和引领技术,培育一批具有国际竞争优势的大中型企业和企业集团,积极推进行业有序发展,目前已初步形成资源节约型、环境友好型、本质安全型发展模式。中石化、中石油、中国化工等一批央企,始终把高分子合成材料领域的创新、产品结构调整作为发展和培育企业核心竞争力的重点;烟台万华、上海华谊、浙江华峰、新和成等一批新材料领域的领军企业也正在成长;浙江石化、大连恒力、江苏盛虹等一批市场打拼能力很强的企业以及中煤能源等煤化工企业,也在重点培育高分子材料产业;湛江、大亚湾、宁波、南京、长兴岛等一批新材料产业基地也都在快速推进中。

### 1.1.4 高分子合成材料的工业发展简史

高分子合成材料工业诞生于20世纪30年代初,在赫尔曼·施陶丁格(Hermann Staudinger)确立高分子概念之前,呈现出先有材料和应用,然后有科学研究并推进工业化的发展过程。高分子合成材料工业经历了酚醛树脂、合成橡胶、聚氯乙烯等合成高分子工业化生产的初期阶段,然后利用煤和石油化工原料实现了合成高分子工业的快速发展,近年来高分子合成工业在不断地改进和创新。

#### (1) 高分子合成材料工业的初期。

合成高分子的诞生和发展是从酚醛树脂开始的,在20世纪初期,1907年美国化学家贝克兰(Leo Hendrik Baekeland, 1863—1944)研究了苯酚和甲醛的反应,发现在不同的反应条件下可以得到两类树脂:一类是在酸催化下生成的可熔化、可溶解的线型酚醛树脂,另一类是在碱催化下生成的不溶解、不熔化的体型酚醛树脂。这两种酚醛树脂完全由人工合成,是人类历史上第一次通过化学合成方法生产的合成树脂,拉开了人类应用合成高分子材料的序幕,合成并工业化生产高分子材料得到迅速发展。

1915年,为了摆脱对天然橡胶的依赖,德国使用二甲基丁二烯制造合成橡胶,在世界上首先实现了合成橡胶的工业化产生。

1926年美国化学家Waldo Semon合成聚氯乙烯,并于1927年实现了工业化生产。

自1929年开始,美国杜邦公司(Du Pont)的科学家卡罗瑟斯(Wallace Hume Carothers, 1896—1937)研究了一系列的缩合反应,验证并发展了大分子理论,合成出聚酰胺66,即尼龙66。尼龙66在1938年实现工业化生产。随后,聚甲基丙烯酸甲酯、聚苯乙烯、脲醛树脂、聚硫橡胶、氯丁橡胶等众多合成高分子材料相继问世,高分子合成材料迎来蓬勃发展时期。

1935年,英国帝国化学公司(ICI)开发出高压聚乙烯,因其极低的介电常数而在第二次世界大战期间用作雷达电缆和潜水艇电缆的绝缘材料,并在此后得到广泛的应用。

1940年,美国杜邦公司推出尼龙纺织品(如尼龙丝袜),因其经久耐用在当时的美国和欧洲风靡一时,尼龙66纤维制造的降落伞更是大大提高了美国军队在第二次世界大战中的作战能力。

#### (2) 高分子合成材料工业的快速发展期。

20世纪50年代,随着石油化工的发展,高分子合成材料工业的原料获得丰富和廉价的来源,当时除乙烯、丙烯外,几乎所有的通用单体都实现了工业化生产。