



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十二五”江苏省高等学校重点教材

# 高分子材料 成形工艺学

第2版

应宗荣 编著

高等教育出版社



### 内容摘要

本书系统讲述高分子材料的成形原理及工艺。全书分为绪论、高分子成形基础理论、塑料成形、化学纤维成形、橡胶成形和其他材料成形六个部分。绪论简要介绍高分子材料的种类、应用、品质指标和成形形式及流程。高分子成形基础理论篇阐述高分子材料的成形品质、成形流变学基础和成形过程的结构变化。塑料成形篇从设备、原理和工艺角度详细讨论塑料成形原料及配制、挤出成形、注射成形、压延成形、压制成形和塑性成形，简要介绍塑料特殊成形工艺。化学纤维成形篇详细阐述化学纤维纺丝原理、拉伸原理和热定形原理，系统介绍熔纺代表品种聚酯纤维和溶液纺代表品种聚丙烯腈纤维及黏胶纤维的成形工艺，简要介绍特殊纺丝方法。橡胶成形篇简要介绍橡胶成形原料，从设备、原理和工艺角度详细讨论橡胶塑炼及混炼、橡胶制品成形和橡胶制品硫化。其他材料成形篇简要介绍复合材料、胶黏剂和涂料的原料、成形原理及工艺。

本书可作为高等院校高分子材料与工程专业本科生的专业教材，也可供从事高分子材料研究、开发和生产的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高分子材料成形工艺学 / 应宗荣编著. --2 版. --

北京: 高等教育出版社, 2019.11

ISBN 978-7-04-051999-0

I. ①高… II. ①应… III. ①高分子材料-成型-生产工艺-高等学校-教材 IV. ①TQ316

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 097562 号

策划编辑 沈志强  
插图绘制 于博

责任编辑 沈志强  
责任校对 马鑫蕊

封面设计 王洋  
责任印制 刘思涵

版式设计 童丹

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印刷 山东百润本色印刷有限公司  
开本 787mm×1092mm 1/16  
印张 31.25  
字数 780 千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2010 年 7 月第 1 版  
2019 年 11 月第 2 版  
印 次 2019 年 11 月第 1 次印刷  
定 价 61.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 51999-00

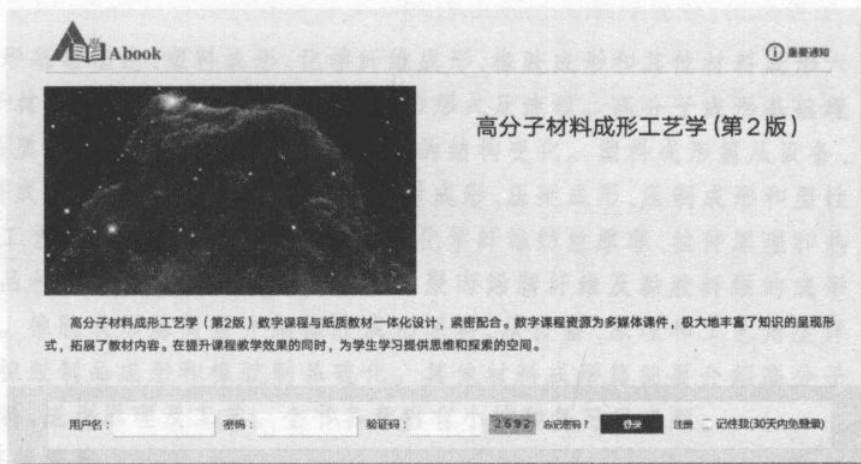


# 高分子材料 成形工艺学

(第2版)

应宗荣 编著

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/12280032>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号(20位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在  
手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至 [abook@hep.com.cn](mailto:abook@hep.com.cn)。



扫描二维码  
下载 Abook 应用

<http://abook.hep.com.cn/12280032>

## 第2版前言

《高分子材料成形工艺学》(第2版)是“十二五”江苏省高等学校重点教材。第2版保留第1版的整体知识构架,完善部分章节知识,更新高分子成形方面的近期发展。全书系统讲述高分子材料的成形原理及工艺,首先讨论高分子材料成形原理,随后重点以塑料、化学纤维和橡胶为主线讨论成形工艺。本书第1版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2011年被教育部评为“普通高等教育精品教材”。

全书分为绪论、高分子成形基础理论、塑料成形、化学纤维成形、橡胶成形和其他材料成形六个部分。绪论简要介绍高分子材料种类、应用、品质指标和成形形式及流程。高分子成形基础理论篇阐述高分子材料的成形品质、成形流变学基础和成形过程的结构变化。塑料成形篇从设备、原理和工艺角度详细讨论塑料成形原料及配制、挤出成形、注射成形、压延成形、压制成形和塑性成形,简要介绍塑料特殊成形工艺。化学纤维成形篇详细阐述化学纤维纺丝原理、拉伸原理和热定形原理,系统介绍熔纺代表品种聚酯纤维和溶液纺代表品种聚丙烯腈纤维及黏胶纤维的成形工艺,简要介绍特殊纺丝方法。橡胶成形篇简要介绍橡胶成形原料,从设备、原理和工艺角度详细讨论橡胶塑炼及混炼配制、橡胶制品成形和橡胶制品硫化。其他材料成形篇简要介绍高分子复合材料、胶黏剂和涂料的原料、成形原理及工艺。全书各章附有小结和复习思考题。

本书由南京理工大学应宗荣编著。

高分子材料成形知识内容庞杂,特别是编著者水平和时间所限,书中疏漏和谬误之处难免,恳望专家和读者指正。

全书分为绪论、高分子成形基础理论、塑料成形、化学纤维成形、橡胶成形和其他材料成形六个部分。绪论简要介绍高分子材料种类、应用、品质指标和成形形式及流程。高分子成形基础理论篇阐述高分子材料的成形品质、成形流变学基础和成形过程的结构变化。塑料成形篇从设备、原理和工艺角度详细讨论塑料成形原料及配制、挤出成形、注射成形、压延成形、压制成形和塑性成形,简要介绍塑料特殊成形工艺。化学纤维成形篇详细阐述化学纤维纺丝原理、拉伸原理和热定形原理,系统介绍熔纺代表品种聚酯纤维和溶液纺代表品种聚丙烯腈纤维及黏胶纤维的成形工艺,简要介绍特殊纺丝方法。橡胶成形篇简要介绍橡胶成形原料,从设备、原理和工艺角度详细讨论橡胶塑炼及混炼配制、橡胶制品成形和橡胶制品硫化。其他材料成形篇简要介绍高分子复合材料、胶黏剂和涂料的原料、成形原理及工艺。

本书由南京理工大学应宗荣编著。

在本书的编写过程中,研究生王婧和齐宇晨等参加了大量的资料收集、扫描、整理和校核工作,在此表示衷心的感谢。

高分子材料成形知识内容庞杂,特别是编著者水平和时间所限,书中疏漏和谬误之处难免,恳望专家和读者指正。

应宗荣

2009年10月

# 第1版前言

本书系统讲述高分子材料的成形原理及工艺,旨在帮助高分子材料专业本科生建立系统完整的高分子材料成形知识构架。本书具有以下特点:

(1) 将高分子材料成形涉及的材料特性原理与工艺过程原理分开讨论,有助于学生理清高分子材料成形知识脉络,深入理解和全面掌握高分子材料成形知识体系。

(2) 以高分子材料大类为主线,并根据各大类高分子材料成形工艺之间的相关性,依次讲述塑料成形、化学纤维成形、橡胶成形和其他材料成形的成形理论知识和工艺知识,既可以很好地系统反映各自的成形工艺个性,又保持高分子材料成形问题的连贯性和整体性,以便学生能够整体把握和融会贯通高分子材料成形问题。

(3) 从原料、设备、原理和过程及因素系统讨论高分子材料所涉及的主要成形工艺,同时尽量全面简要介绍高分子材料所涉及的各种特殊成形工艺,力求使成形工艺内容系统、深入、完整和全面,全面简要介绍特殊成形工艺是本教材的重要特色,旨在帮助学生全面了解和掌握高分子材料成形工艺方法,树立和启发学生的创新意识与思维。

(4) 根据高分子材料各类别的成形工艺个性,选择各自适当的工艺实例讨论工艺过程,塑料成形和橡胶成形选择工艺过程具有代表性的典型制品实例,而化学纤维成形则选择工艺过程具有代表性的典型纤维大品种实例,化学纤维成形内容设置是本书最突出的特色,全书的实例选择方式既避免实例过多的琐碎讨论,又利于引导学生通过举一反三从总体上把握高分子材料各类别及具体的成形工艺问题。

全书分为绪论、高分子成形基础理论、塑料成形、化学纤维成形、橡胶成形和其他材料成形六个部分。绪论简要介绍高分子材料种类、应用、品质指标和成形形式及流程。高分子成形基础理论篇阐述高分子材料的成形品质、成形流变学基础和成形过程的结构变化。塑料成形篇从设备、原理和工艺角度详细讨论塑料成形原料及配制、挤出成形、注射成形、压延成形、压制成形和塑性成形,简要介绍塑料特殊成形工艺。化学纤维成形篇详细阐述化学纤维纺丝原理、拉伸原理和热定形原理,系统地介绍熔纺代表品种聚酯纤维和溶液纺代表品种聚丙烯腈纤维及黏胶纤维的成形工艺,简要介绍特殊纺丝方法。橡胶成形篇简要介绍橡胶成形原料,从设备、原理和工艺角度详细讨论橡胶塑炼及混炼配制、橡胶制品成形和橡胶制品硫化。其他材料成形篇简要介绍高分子复合材料、胶黏剂和涂料的原料、成形原理及工艺。

本书由南京理工大学应宗荣编著。

在本书的编写过程中,研究生王娟和齐孝勇等参加了大量的资料收集、扫描、整理和校排工作,在此表示衷心的感谢。

高分子材料成形知识内容庞杂,特别是编著者水平和时间所限,书中疏漏和谬误之处难免,恳望专家和读者指正。

应宗荣

2009年10月

# 教学建议

《高分子材料成形工艺学》是高分子材料与工程专业本科教学必修课。课堂教学应重点讲述高分子材料成形所涉及的材料特性原理和所涉及的重要工艺相关的设备、原理和过程及因素，而高分子材料成形所涉及的原料、特殊工艺以及其他材料成形建议采用课堂概要讲述与课外学生自学相结合的方式，以保证课堂教学有足够的学时数系统、深入和完整地讲清高分子材料成形整体内容。本教材教学总学时以 48 学时为宜，教学学时数分配建议见下表（供参考）。

教学学时分配建议表

| 序号 | 篇名            | 篇学时 | 章名                  | 章学时 |
|----|---------------|-----|---------------------|-----|
| 1  | 绪论            | 2   | 绪论                  | 2   |
| 2  | 第一篇 高分子成形基础理论 | 8   | 第一章 高分子材料的成形品质      | 2   |
|    |               |     | 第二章 高分子成形流变学基础      | 2~3 |
|    |               |     | 第三章 高分子成形的结构变化      | 2~3 |
| 3  | 第二篇 塑料成形      | 15  | 第四章 塑料成形原料及配制       | 2   |
|    |               |     | 第五章 挤出成形            | 3~4 |
|    |               |     | 第六章 注射成形            | 3~4 |
|    |               |     | 第七章 压延及压制成形         | 3   |
|    |               |     | 第八章 塑性成形            | 1~2 |
|    |               |     | 第九章 塑料特殊成形          | 1~2 |
| 4  | 第三篇 化学纤维成形    | 13  | 第十章 化学纤维成形原理        | 6~7 |
|    |               |     | 第十一章 聚酯纤维熔纺成形       | 2   |
|    |               |     | 第十二章 聚丙烯腈及黏胶纤维溶液纺成形 | 3   |
|    |               |     | 第十三章 化学纤维特殊成形       | 1~2 |
| 5  | 第四篇 橡胶成形      | 8   | 第十四章 橡胶成形原料及配制      | 3~4 |
|    |               |     | 第十五章 橡胶制品成形         | 2   |
|    |               |     | 第十六章 橡胶制品硫化         | 2~3 |
| 6  | 第五篇 其他材料成形    | 2   | 第十七章 其他材料成形简介       | 2   |
| 7  | 总学时           | 48  |                     | 48  |



# 目 录

|                |   |
|----------------|---|
| 绪论             | 1 |
| 0.1 高分子材料及其应用  | 1 |
| 0.1.1 塑料       | 1 |
| 0.1.2 化学纤维     | 2 |
| 0.1.3 橡胶       | 5 |
| 0.1.4 胶黏剂      | 5 |
| 0.1.5 涂料       | 5 |
| 0.2 高分子材料品质指标  | 6 |
| 0.2.1 塑料品质指标   | 6 |
| 0.2.2 化学纤维品质指标 | 6 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 0.2.3 橡胶品质指标    | 8  |
| 0.2.4 胶黏剂品质指标   | 9  |
| 0.2.5 涂料品质指标    | 10 |
| 0.3 高分子材料成形概述   | 11 |
| 0.3.1 高分子材料成形形式 | 11 |
| 0.3.2 高分子材料成形流程 | 11 |
| 0.3.3 原料及工艺选择原则 | 13 |
| 小结              | 14 |
| 复习思考题           | 14 |
| 参考文献            | 14 |

## 第一篇 高分子成形基础理论

|                 |    |
|-----------------|----|
| 第一章 高分子材料的成形品质  | 15 |
| 1.1 高分子材料的可成形性  | 15 |
| 1.1.1 可挤出性      | 15 |
| 1.1.2 可纺性       | 16 |
| 1.1.3 可模塑性      | 19 |
| 1.1.4 可延性       | 21 |
| 1.2 高分子成形的形变学特性 | 23 |
| 1.2.1 黏弹特性      | 23 |
| 1.2.2 松弛特性      | 25 |
| 1.2.3 应力硬化特性    | 25 |
| 1.3 高分子成形的热学特性  | 26 |
| 1.3.1 热膨胀       | 26 |
| 1.3.2 热容        | 28 |
| 1.3.3 导热性       | 29 |
| 1.3.4 相变热焓      | 30 |
| 本章小结            | 31 |
| 复习思考题           | 33 |
| 第二章 高分子成形流变学基础  | 34 |
| 2.1 高分子成形的流动特征  | 34 |
| 2.2 高分子成形的剪切流动  | 35 |

|                 |    |
|-----------------|----|
| 2.2.1 牛顿流体及其流动  | 36 |
| 2.2.2 非牛顿流体及其流动 | 36 |
| 2.2.3 剪切流动的影响因素 | 40 |
| 2.3 高分子成形的拉伸流动  | 43 |
| 2.3.1 拉伸流动情形    | 43 |
| 2.3.2 拉伸流变特性    | 44 |
| 2.4 高分子成形的流动分析  | 46 |
| 2.4.1 基本方程的推导   | 46 |
| 2.4.2 基本方程的讨论   | 48 |
| 2.4.3 流动的非等温现象  | 49 |
| 2.5 高分子成形的流体弹性  | 50 |
| 2.5.1 端末效应      | 50 |
| 2.5.2 熔体破裂      | 53 |
| 2.6 高分子流变性能的测定  | 55 |
| 2.6.1 毛细管流变仪    | 56 |
| 2.6.2 旋转式流变仪    | 57 |
| 2.6.3 拉伸流变仪     | 58 |
| 本章小结            | 59 |
| 复习思考题           | 60 |
| 第三章 高分子成形的结构变化  | 62 |



|                            |     |                       |     |
|----------------------------|-----|-----------------------|-----|
| 3.1 高分子成形的固化 .....         | 62  | 3.4 高分子成形的降解 .....    | 76  |
| 3.1.1 冷却固化 .....           | 62  | 3.4.1 降解机理 .....      | 76  |
| 3.1.2 传质固化 .....           | 64  | 3.4.2 影响降解的成形因素 ..... | 77  |
| 3.1.3 反应固化 .....           | 66  | 3.4.3 降解的控制和利用 .....  | 79  |
| 3.2 高分子成形的结晶 .....         | 68  | 3.5 高分子成形的交联 .....    | 79  |
| 3.2.1 成形结晶过程及特点 .....      | 68  | 3.5.1 热固性高分子的交联 ..... | 79  |
| 3.2.2 影响结晶的成形因素 .....      | 69  | 3.5.2 热塑性高分子的交联 ..... | 82  |
| 3.3 高分子成形的取向 .....         | 70  | 本章小结 .....            | 86  |
| 3.3.1 取向方式与规律 .....        | 71  | 复习思考题 .....           | 87  |
| 3.3.2 影响取向的成形因素 .....      | 75  | 参考文献 .....            | 88  |
| <b>第二篇 塑料成形</b>            |     |                       |     |
| <b>第四章 塑料成形原料及配制</b> ..... | 89  | 5.2.2 熔融理论 .....      | 124 |
| 4.1 塑料成形原料 .....           | 89  | 5.2.3 熔体输送理论 .....    | 125 |
| 4.1.1 塑料树脂 .....           | 89  | 5.2.4 螺杆挤出机的生产率 ..... | 129 |
| 4.1.2 塑料添加剂 .....          | 91  | 5.3 挤出成形工艺 .....      | 130 |
| 4.2 成形原料预处理 .....          | 96  | 5.3.1 挤出工艺流程 .....    | 130 |
| 4.2.1 粉碎 .....             | 96  | 5.3.2 管材挤出工艺 .....    | 133 |
| 4.2.2 干燥 .....             | 97  | 5.4 挤出成形的发展 .....     | 136 |
| 4.2.3 预热 .....             | 97  | 5.4.1 热固性塑料挤出 .....   | 136 |
| 4.3 成形原料混合 .....           | 98  | 5.4.2 反应挤出 .....      | 137 |
| 4.3.1 混合类型 .....           | 98  | 5.4.3 固态挤出 .....      | 138 |
| 4.3.2 混合原理 .....           | 99  | 5.4.4 挤出工艺水平 .....    | 139 |
| 4.3.3 混合状态的评定 .....        | 102 | 本章小结 .....            | 140 |
| 4.4 成形物料配制 .....           | 103 | 复习思考题 .....           | 141 |
| 4.4.1 固体物料的配制 .....        | 103 | <b>第六章 注射成形</b> ..... | 142 |
| 4.4.2 聚合物溶胶的配制 .....       | 106 | 6.1 注射成形设备 .....      | 142 |
| 4.4.3 聚合物溶液的配制 .....       | 107 | 6.1.1 注射机 .....       | 142 |
| 本章小结 .....                 | 110 | 6.1.2 注射模具 .....      | 148 |
| 复习思考题 .....                | 111 | 6.1.3 注射机工作过程 .....   | 150 |
| <b>第五章 挤出成形</b> .....      | 112 | 6.2 注射成形原理 .....      | 152 |
| 5.1 挤出成形设备 .....           | 112 | 6.2.1 塑化过程 .....      | 152 |
| 5.1.1 挤出过程及功能 .....        | 113 | 6.2.2 注射充模过程 .....    | 153 |
| 5.1.2 单螺杆挤出机 .....         | 114 | 6.2.3 保压过程 .....      | 156 |
| 5.1.3 双螺杆挤出机 .....         | 120 | 6.2.4 冷却定形过程 .....    | 156 |
| 5.1.4 特殊辅助设备 .....         | 122 | 6.3 注射成形工艺 .....      | 157 |
| 5.2 挤出成形原理 .....           | 123 | 6.3.1 注射工艺流程 .....    | 157 |
| 5.2.1 固体输送理论 .....         | 123 | 6.3.2 注射工艺条件 .....    | 158 |

|                       |     |                     |     |
|-----------------------|-----|---------------------|-----|
| 6.4 注射成形的发展 .....     | 162 | 第九章 塑料特殊成形 .....    | 211 |
| 6.4.1 热固性塑料注射成形 ..... | 162 | 9.1 浇注成形 .....      | 211 |
| 6.4.2 注射成形新工艺 .....   | 164 | 9.1.1 静态浇注 .....    | 211 |
| 本章小结 .....            | 168 | 9.1.2 嵌注成形 .....    | 212 |
| 复习思考题 .....           | 169 | 9.1.3 离心浇注 .....    | 213 |
| 第七章 压延及压制成形 .....     | 171 | 9.1.4 流涎浇注 .....    | 213 |
| 7.1 压延成形 .....        | 171 | 9.1.5 搪塑及蘸浸成形 ..... | 214 |
| 7.1.1 压延成形设备 .....    | 171 | 9.1.6 滚塑成形 .....    | 216 |
| 7.1.2 压延成形原理 .....    | 174 | 9.2 粉末模压烧结成形 .....  | 217 |
| 7.1.3 压延成形工艺 .....    | 176 | 9.2.1 模压制坯 .....    | 217 |
| 7.2 压制成形 .....        | 181 | 9.2.2 坯件烧结 .....    | 218 |
| 7.2.1 压制成形设备 .....    | 181 | 9.2.3 烧结物冷却 .....   | 219 |
| 7.2.2 模压成形 .....      | 182 | 9.3 泡沫塑料成形 .....    | 219 |
| 7.2.3 层压成形 .....      | 192 | 9.3.1 发泡方法 .....    | 219 |
| 本章小结 .....            | 194 | 9.3.2 成形原理 .....    | 221 |
| 复习思考题 .....           | 196 | 9.3.3 成形工艺 .....    | 222 |
| 第八章 塑性成形 .....        | 197 | 9.4 涂覆成形 .....      | 223 |
| 8.1 热成形 .....         | 197 | 9.4.1 直接涂覆 .....    | 223 |
| 8.1.1 工艺方法 .....      | 197 | 9.4.2 间接涂覆 .....    | 225 |
| 8.1.2 工艺条件 .....      | 200 | 9.5 其他特殊成形 .....    | 225 |
| 8.2 中空吹塑成形 .....      | 201 | 9.5.1 固态成形 .....    | 225 |
| 8.2.1 工艺方法 .....      | 201 | 9.5.2 焊接成形 .....    | 227 |
| 8.2.2 工艺条件 .....      | 203 | 9.5.3 机械加工 .....    | 228 |
| 8.3 双向拉伸薄膜成形 .....    | 205 | 9.5.4 表面整饰 .....    | 230 |
| 8.3.1 平膜法 .....       | 205 | 本章小结 .....          | 233 |
| 8.3.2 管膜法 .....       | 207 | 复习思考题 .....         | 234 |
| 本章小结 .....            | 209 | 参考文献 .....          | 236 |
| 复习思考题 .....           | 210 |                     |     |

### 第三篇 化学纤维成形

|                      |     |                                  |     |
|----------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 第十章 化学纤维成形原理 .....   | 237 | 10.2.3 干法纺丝原理 .....              | 265 |
| 10.1 成形原料及工艺概述 ..... | 237 | 10.3 拉伸原理 .....                  | 268 |
| 10.1.1 成形原料 .....    | 237 | 10.3.1 拉伸概述 .....                | 269 |
| 10.1.2 纺丝工艺 .....    | 238 | 10.3.2 初生纤维的拉伸特性 .....           | 270 |
| 10.1.3 后加工工艺 .....   | 241 | 10.3.3 连续拉伸的运动学和<br>动力学 .....    | 273 |
| 10.2 纺丝原理 .....      | 242 | 10.3.4 拉伸过程中纤维结构和<br>性能的变化 ..... | 275 |
| 10.2.1 熔体纺丝原理 .....  | 242 |                                  |     |
| 10.2.2 湿法纺丝原理 .....  | 256 |                                  |     |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 10.4 热定形原理              | 278 |
| 10.4.1 热定形概述            | 278 |
| 10.4.2 热定形过程的物理原理       | 279 |
| 10.4.3 热定形过程中纤维结构和性能的变化 | 283 |
| 本章小结                    | 284 |
| 复习思考题                   | 287 |
| 第十一章 聚酯纤维熔纺成形           | 289 |
| 11.1 聚酯原料及纤维            | 289 |
| 11.1.1 聚酯原料             | 289 |
| 11.1.2 聚酯纤维             | 291 |
| 11.2 聚酯纤维纺丝             | 292 |
| 11.2.1 聚酯切片的干燥          | 293 |
| 11.2.2 聚酯纤维纺丝通论         | 295 |
| 11.2.3 聚酯纤维高速纺丝         | 303 |
| 11.3 聚酯纤维后加工            | 306 |
| 11.3.1 聚酯长丝后加工          | 306 |
| 11.3.2 聚酯短纤维后加工         | 311 |
| 本章小结                    | 313 |
| 复习思考题                   | 314 |
| 第十二章 聚丙烯腈及黏胶纤维溶液纺成形     | 315 |
| 12.1 聚丙烯腈纤维溶液纺成形        | 315 |
| 12.1.1 聚丙烯腈原料及纤维        | 315 |
| 12.1.2 聚丙烯腈纤维纺丝         | 317 |
| 12.1.3 聚丙烯腈纤维后加工        | 324 |
| 12.2 黏胶纤维湿纺成形           | 327 |
| 12.2.1 黏胶纤维及成形过程        | 327 |
| 12.2.2 黏胶的制备            | 328 |
| 12.2.3 黏胶纤维纺丝           | 335 |
| 12.2.4 黏胶纤维后处理          | 340 |
| 本章小结                    | 341 |
| 复习思考题                   | 342 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第十三章 化学纤维特殊成形         | 343 |
| 13.1 干湿法纺丝            | 343 |
| 13.1.1 干湿法纺丝原理        | 343 |
| 13.1.2 干湿法纺丝的特点与应用    | 344 |
| 13.1.3 聚丙烯腈长丝干湿法纺丝实例  | 345 |
| 13.2 凝胶纺丝             | 345 |
| 13.2.1 凝胶纺丝工艺流程       | 346 |
| 13.2.2 凝胶纺丝基本特征       | 347 |
| 13.2.3 凝胶纺丝的理论基础及应用   | 347 |
| 13.3 液晶纺丝             | 348 |
| 13.3.1 液晶纺丝类型与过程      | 348 |
| 13.3.2 刚性链聚合物纺丝溶液的特性  | 349 |
| 13.3.3 Kevlar 纤维的液晶纺丝 | 350 |
| 13.4 纺丝成网             | 351 |
| 13.4.1 纺黏法            | 351 |
| 13.4.2 熔喷法            | 353 |
| 13.4.3 闪蒸法            | 355 |
| 13.5 其他特殊纺丝           | 357 |
| 13.5.1 膜裂纺丝           | 357 |
| 13.5.2 静电纺丝           | 359 |
| 13.5.3 反应纺丝           | 360 |
| 13.5.4 相分离纺丝          | 361 |
| 13.5.5 分散液纺丝          | 362 |
| 13.5.6 无喷头纺丝          | 362 |
| 本章小结                  | 363 |
| 复习思考题                 | 364 |
| 参考文献                  | 365 |

## 第四篇 橡胶成形

|                |     |
|----------------|-----|
| 第十四章 橡胶成形原料及配制 | 366 |
| 14.1 橡胶成形原料    | 366 |

|             |     |
|-------------|-----|
| 14.1.1 橡胶   | 366 |
| 14.1.2 配合剂  | 372 |
| 14.1.3 骨架材料 | 377 |



|                       |     |                         |     |
|-----------------------|-----|-------------------------|-----|
| 14.2 橡胶胶料的配制 .....    | 378 | 复习思考题 .....             | 420 |
| 14.2.1 炼胶设备 .....     | 379 | 第十六章 橡胶制品硫化 .....       | 421 |
| 14.2.2 生胶的塑炼 .....    | 386 | 16.1 硫化特征及历程 .....      | 421 |
| 14.2.3 胶料的混炼 .....    | 393 | 16.1.1 硫化对橡胶性能的影响 ..... | 421 |
| 本章小结 .....            | 398 | 16.1.2 硫化过程阶段 .....     | 422 |
| 复习思考题 .....           | 400 | 16.1.3 硫化过程的测定和分析 ..... | 424 |
| 第十五章 橡胶制品成形 .....     | 401 | 16.2 硫化机理 .....         | 426 |
| 15.1 挤出成形 .....       | 401 | 16.2.1 硫磺硫化机理 .....     | 426 |
| 15.1.1 橡胶挤出机 .....    | 401 | 16.2.2 非硫磺硫化机理 .....    | 429 |
| 15.1.2 挤出工艺 .....     | 404 | 16.3 硫化工艺 .....         | 432 |
| 15.2 压延成形 .....       | 407 | 16.3.1 硫化条件 .....       | 432 |
| 15.2.1 压延前准备 .....    | 407 | 16.3.2 硫化介质 .....       | 436 |
| 15.2.2 压延工艺 .....     | 409 | 16.3.3 硫化工序 .....       | 437 |
| 15.3 注射成形 .....       | 413 | 16.4 硫化方法 .....         | 438 |
| 15.3.1 橡胶注射机 .....    | 413 | 16.4.1 硫化方法分类 .....     | 439 |
| 15.3.2 注射工艺 .....     | 414 | 16.4.2 间歇硫化法 .....      | 440 |
| 15.4 橡胶复合制品实例 .....   | 416 | 16.4.3 连续硫化法 .....      | 441 |
| 15.4.1 充气外胎结构 .....   | 416 | 本章小结 .....              | 443 |
| 15.4.2 充气外胎成形工艺 ..... | 416 | 复习思考题 .....             | 444 |
| 本章小结 .....            | 419 | 参考文献 .....              | 445 |

## 第五篇 其他材料成形

|                      |     |                    |     |
|----------------------|-----|--------------------|-----|
| 第十七章 其他材料成形简介 .....  | 446 | 17.3 高分子涂料涂装 ..... | 471 |
| 17.1 高分子复合材料成形 ..... | 446 | 17.3.1 高分子涂料 ..... | 471 |
| 17.1.1 高分子复合材料 ..... | 446 | 17.3.2 涂装原理 .....  | 473 |
| 17.1.2 特殊成形工艺 .....  | 451 | 17.3.3 涂装工艺 .....  | 475 |
| 17.2 高分子胶黏剂黏接 .....  | 460 | 本章小结 .....         | 481 |
| 17.2.1 高分子胶黏剂 .....  | 460 | 复习思考题 .....        | 482 |
| 17.2.2 黏接原理 .....    | 462 | 参考文献 .....         | 483 |
| 17.2.3 黏接工艺 .....    | 464 |                    |     |

按照用途,塑料可分为通用塑料和工程塑料,它们的部分品种见表 0.1。通用塑料是指生产量大、用途广、价格低廉且成形性能良好的一类塑料品种,它们约占塑料总产量的 80%。PE 和 PP 是产量最大的塑料品种,产量分别约占塑料总产量的 30% 和 20%,其次是 PVC、PS 和 ABS。通用塑料的综合力学性能和耐热性不强,通常不用作结构零件和耐热件。工程塑料是指那些拉伸强度大于 30 MPa、冲击强度大于 6 kJ/m<sup>2</sup>、长期耐热温度超过 100 ℃、耐腐蚀性及电绝缘性优良,可代替金属材料在工程环境中用作承载结构零件的塑料。

塑料可用做饮水杯、椅子、手提箱包、购物袋等日常用品,还可用于塑料门窗、给排水管道、农用薄膜、家用电器外壳、绝缘构件、开关、齿轮、轴承、电线电缆、仪表表盘等,特别是由于其质轻节

# 绪论

高分子材料通常需要经历成形过程变成特定形状的制品才能实际应用。成形过程不仅赋予制品所需要的形状,还直接影响制品的微观结构和宏观性能。因此,掌握制品成形原理与工艺方法、制品结构的形成过程与规律、制品结构与制品性能的关系、制品成形工艺条件对制品质量的影响规律等,对于制造高分子制品时材料及成形工艺的选择、成形工艺过程与条件的确定以及设备与模具的设计和选用等都具有重要的意义。本课程的基本任务就是阐明高分子材料成形的原理和工艺,为开展制品生产打下必要的理论基础。

## 0.1 高分子材料及其应用

高分子材料亦称聚合物或高聚物。按照来源,有机高分子材料分为有机天然高分子材料和有机合成高分子材料两大类。按照用途,有机高分子材料分为塑料、化学纤维、橡胶、胶黏剂和涂料等。有机合成高分子材料是 20 世纪才真正发展起来的材料,由于综合性能优越、成形工艺简单和成本低廉等优势,应用领域极其广泛,发展非常迅速。合成塑料、合成纤维和合成橡胶产量最大,品种最多,统称为三大合成材料。2015 年,全世界合成塑料产量达 2.69 亿吨,化学纤维产量为 6 849 万吨,合成橡胶产量为 2 665 万吨。目前,仅合成塑料的体积用量就已超过整个金属材料。中国的合成纤维年产量自 1997 年至今连续居世界第一位,2015 年占全世界合成纤维年产量的 68.4%;合成塑料和合成橡胶的年产量居世界第二位,2015 年产量分别为 7 500 万吨和 302 万吨。

### 0.1.1 塑料

按照分子结构,塑料可分为热塑性塑料和热固性塑料。热塑性塑料有聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、聚酰胺(PA)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)等。热固性塑料有环氧树脂(EP)、酚醛树脂(PF)、氨基树脂(UF)和不饱和聚酯(UP)等。

按照用途和性能,塑料可分为通用塑料和工程塑料,它们的部分品种见表 0.1。通用塑料是指生产量大、用途广、价格低廉且成形性能良好的一类塑料品种,它们约占塑料总产量的 80%。PE 和 PP 是产量最大的塑料品种,产量分别约占塑料总产量的 30%和 20%,其次是 PVC、PS 和 ABS。通用塑料的综合力学性能和耐热性不强,通常不用作结构零件和耐热件。工程塑料是指那些拉伸强度大于 50 MPa、冲击强度大于 6 kJ/m<sup>2</sup>、长期耐热温度超过 100 ℃、耐腐蚀性及电绝缘性优良、可代替金属材料在工程环境中用作承载结构零件的塑料。

塑料可用做饮水杯、椅子、手提箱包、购物袋等日常用品,还可用于塑料门窗、给排水管道、农用薄膜、家用电器外壳、绝缘构件、开关、齿轮、轴承、电线电缆、仪器表盘等,特别是由于其质轻节

能,现广泛用作汽车、火车、飞机、轮船、兵器、航空航天飞船等零部件,此外,还可作为军事上的防弹隐身材料等。据预测,在 21 世纪,塑料及其复合材料在航空航天和兵器工业等领域将成为主导材料。

表 0.1 常见塑料品种

| 类 型  | 部 分 品 种                                     |
|------|---------------------------------------------|
| 通用塑料 | PE、PP、PVC、PS、ABS、PF、UF、PMMA、EP、UP 等         |
| 工程塑料 | PA、PET、聚碳酸酯(PC)、聚甲醛(POM)、聚苯醚(PPO)、聚酰亚胺(PI)等 |

0.1.2 化学纤维

纺织纤维有天然纤维和化学纤维两大类。天然纤维包括棉、麻等植物纤维和羊毛、蚕丝等动物纤维两类。化学纤维是指采用天然的或合成的有机高聚物为原料纺丝而成的纤维。2015 年化学纤维产量占纺织纤维的 72.5%,合成纤维产量占化学纤维的 92.5%。

一、化学纤维分类及品种

按照分子结构不同,化学纤维分为热塑性纤维和热固性纤维两类。99%以上的化学纤维是热塑性纤维;热固性纤维产量很小,品种有酚醛纤维、氨基纤维(如三聚氰胺甲醛纤维)等,仅用于特殊领域。

按原料来源,化学纤维分为人造纤维和合成纤维两大类。人造纤维(或称再生纤维)是指采用天然有机原料(如天然纤维素和蛋白质等),经化学改性或处理后再纺丝而成的纤维。人造纤维的代表品种是黏胶纤维和醋酸纤维素酯纤维(简称醋酯纤维)。合成纤维是指采用化学合成的有机高分子材料通过纺丝而成的纤维。化学纤维分类及品种见图 0.1。

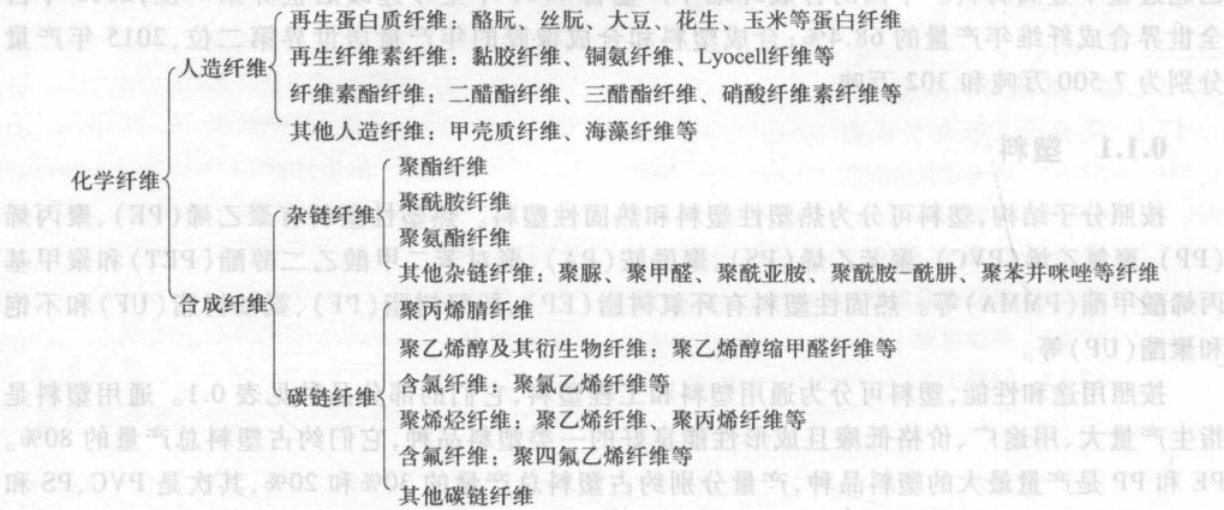


图 0.1 化学纤维分类及品种

涤纶(聚对苯二甲酸乙二醇酯纤维)和锦纶(聚酰胺纤维,或称尼龙)是化学纤维的两个大品种,2015 年产量分别约占整个化学纤维产量的 79.9%和 7.3%,其次是腈纶(聚丙烯腈纤维),2015



年产量约占整个化学纤维产量的 2.6%, 再次是丙纶(聚丙烯纤维)、黏胶纤维、维尼纶(聚乙烯醇缩甲醛纤维)、氯纶(聚氯乙烯纤维)和醋酯纤维等, Lyocell 纤维和氨纶(聚氨酯纤维)近年发展较迅速, 产量上升较快。另外, 特种纤维尽管产量不大, 但在高技术领域占有重要的地位, 如氟纶(聚四氟乙烯纤维)、芳纶(聚对苯二甲酰对苯二胺纤维)、聚苯并咪唑纤维和聚酰亚胺纤维等高性能纤维。

按纤维长度不同, 化学纤维可分为长丝和短纤维两大类。目前, 全世界化学纤维中长丝和短纤维的产量约各占一半。长丝是连续不断的很长纤维, 主要用于机织和针织。长丝包括单丝和复丝。单丝是指采用单孔喷丝头纺成的一根单纤维的连续丝条。复丝是指由数十根(一般 8 根以上)单纤维组成的丝条。用于制造轮胎帘子线的复丝俗称帘线丝, 帘线丝一般是一百多根到几百根单纤维组成的丝条。

短纤维是被切断成一定规格长度(如 25~150 mm)的纤维, 主要用于混纺。长度 25~38 mm、线密度 1.3~1.7 dtex、类似棉花的化学短纤维称为棉型纤维; 长度 70~150 mm、线密度 3.3~7.7 dtex、类似羊毛的化学短纤维称为毛型纤维; 长度 51~76 mm、线密度 2.1~3.3 dtex、介于棉型和毛型之间的化学短纤维称为中长纤维。此外, 也有根据用户要求切成不等长(如分布在 51~114 mm 范围)的短纤维, 或者直接生产长丝束再经牵切成条。

长丝经变形加工可制成变形纱。变形纱是具有(或潜在地具有)卷曲、螺旋、环圈等外观特性而呈现蓬松性、伸缩性的单根或多根长丝纱。变形纱的主要品种为弹力丝和膨体纱。弹力丝即变形长丝, 可分为高弹丝和低弹丝两种。弹力丝伸缩性、蓬松性好, 其织物在厚度、重量、不透明性、覆盖性和外观特征等方面接近毛织品、丝织品或棉织品。膨体纱是具有伸缩性和蓬松性、类似毛线的变形纱, 用于制作针织外衣、内衣、毛线、毛毯等。

不采用织造加工而利用纤维间的摩擦力、自身黏合力、外加黏合剂的黏着力或两种及以上的力将规则或杂乱的纤维网结合在一起而制造成的布状物称为非织造布(或称无纺布、土工布)。非织造布可以采用长丝和短纤维通过水刺法、气流法、热黏合法、化学黏合法、针刺法、湿法、缝编法等加工而制成, 也可以通过纺黏法、熔喷法等直接纺丝成网而制成。

## 二、化学纤维的部分术语

差别化纤维是最常见的化学纤维术语, 是指采用化学或物理手段使服用性能改善或被赋予某些特性的化学纤维, 比如, 通过分子结构的化学改性, 得到染色性、吸湿性、抗静电性、防污性、高收缩性或阻燃性等性能明显改善的纤维; 采用改变纤维形态结构的物理手段, 获得易染色、阻燃、高吸湿、抗静电(导电)或高卷曲性(类似羊毛)的化学纤维, 改善纤维的蜡状感、透气性、吸湿性、光泽; 等等。差别化纤维目前已成为服用化学纤维的重要组成部分, 许多品种已广泛应用, 如异形纤维、复合纤维和超细纤维等。

### 1. 异形纤维

异形纤维是指采用非圆形的特殊几何形状喷丝孔纺制的具有特殊横截面形状(如十字形、三叶瓣形、五叶瓣形、中空形等)的化学纤维。异形纤维具有特殊的光泽、蓬松性、耐污性和抗起球性好, 回弹性与覆盖性得到改善。比如, 五叶瓣形横截面的涤纶长丝具有类似真丝的光泽, 抗起球、手感和覆盖性良好。

### 2. 复合纤维

复合纤维是指在纤维横截面上存在两种及以上聚合物、按照特定方式排布的双(多)组分纤

纤维,亦称双组分纤维或多组分纤维。复合纤维是将两种及以上聚合物纺丝液按照特定组合方式从同一喷丝孔组合喷出形成一根纤维而纺制的纤维,这种纺丝方法称为复合纺丝。复合纤维品种很多,有并列型、皮芯型、裂离型和海岛型等。复合纤维典型横截面形状如图 0.2 所示。通过不同聚合物间的组合及其在纤维横截面上的不同组合方式,可以得到性质和用途不同的各种复合纤维。比如,并列型复合纤维和偏心皮芯型复合纤维,利用两种聚合物的热收缩差异,可以使纤维产生三维螺旋状卷曲,获得类似羊毛的弹性和蓬松性。

### 3. 超细纤维

超细纤维尚无统一的定义,一般把线密度在 0.55~1.11 dtex 的纤维称为微细纤维,线密度低于 0.55 dtex 的纤维称为超细纤维。目前,超细纤维以其独特的美学特性和服用卫生性而风靡国际市场。复合纺丝法是超细纤维的重要纺丝方法,通常采用复合裂离法和复合海岛法。复合裂离法纺制的复合纤维经化学或机械方法剥离后使一根复合纤维分裂成为独立的几十根而得到超细纤维。复合海岛法是将目标成纤聚合物作为岛组分、可溶性聚合物作为海组分进行复合纺丝制成海岛型复合纤维,然后用溶剂溶去海组分(可溶性聚合物)使一根复合纤维散开成为独立的几十根而得到超细纤维。图 0.3 所示为复合裂离法和复合海岛法纺制超细纤维的过程。目前,采用复合纺丝法纺制的超细纤维最细可达 0.05 dtex(截面直径约为 50 nm)。

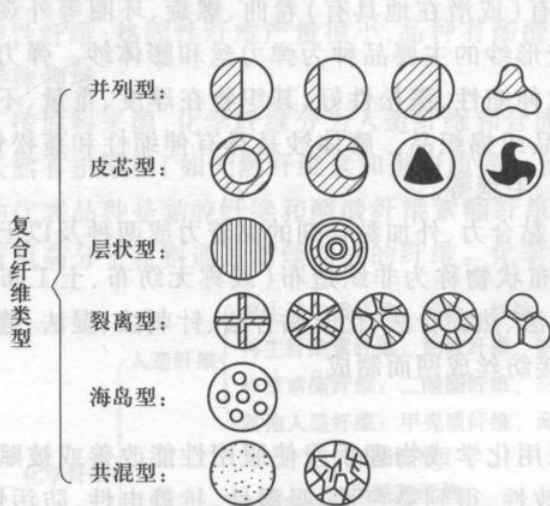


图 0.2 复合纤维典型横截面形状示意图



图 0.3 复合裂离法和复合海岛法纺制超细纤维

1—海岛型复合纤维；2—花卉型复合纤维；  
3—中空辐射型复合纤维；4—橘瓣形复合纤维

### 三、化学纤维的应用

化学纤维广泛用于替代棉、麻、蚕丝、羊毛等天然纤维制造各种织物,目前其产量已超过天然纤维。化学纤维除用于民用领域外,还广泛用于交通运输、建筑、道路、化工等工业领域,如作为绳索、轮胎帘子线、土工布、过滤材料等,而芳纶纤维等耐热高性能纤维还在航空航天、军事等领域获得应用,如各种零部件、防弹衣、防弹装甲等。

0.1.3 橡胶

橡胶是一类在较宽的温度范围(通常为-50~150 ℃)内表现出优异弹性的高分子材料的总称。按来源不同,橡胶可分为天然橡胶和合成橡胶两大类,天然橡胶是橡树上流出的胶乳经凝聚、干燥等工序制成的,合成橡胶是化学合成的高分子化合物。2015 年,全世界橡胶产量为3 792 万吨,其中天然橡胶产量为 1 127 万吨。

按用途和性能不同,合成橡胶可分为通用合成橡胶和特种合成橡胶,但两者并无严格的界限,它们的部分品种见表 0.2。力学性能与天然橡胶相近、成形性能较好、能广泛用于普通橡胶制品的橡胶称为通用合成橡胶,专用于耐热、耐寒、耐化学物质腐蚀、耐溶剂及耐辐射等特定场合的、具有特殊性能的橡胶称为特种合成橡胶。最大的合成橡胶品种依次是顺丁橡胶(BR)、丁苯橡胶(SBR)、丁基橡胶(IIR)和乙丙橡胶(EPR)。通用橡胶广泛用做轮胎、胶鞋、胶辊、胶管、输送带、减振部件等。特种橡胶主要用于制作油槽、输油管、耐高温电线电缆、化工设备、飞机和宇航用密封件等特殊条件下使用的橡胶制品。

表 0.2 常见合成橡胶品种

| 类 型    | 部 分 品 种                                                   |
|--------|-----------------------------------------------------------|
| 通用合成橡胶 | BR、SBR、IIR、EPR、异戊橡胶(IR)、氯丁橡胶(CR)等                         |
| 特种合成橡胶 | 丁腈橡胶(NBR)、硅橡胶、氟橡胶(FPM)、聚氨酯橡胶、聚丙烯酸酯橡胶、聚硫橡胶、醇橡胶、氯(磺)化聚乙烯橡胶等 |

0.1.4 胶黏剂

胶黏剂(或称黏结剂、黏合剂等)是指可以把同种或异种固体件黏合起来形成一体的高分子物质。按照黏合组分来源,胶黏剂可分为天然高分子胶黏剂和合成高分子胶黏剂。天然高分子胶黏剂包括动物胶黏剂(如皮胶、骨胶)、植物胶黏剂(如淀粉)和矿物胶黏剂(如沥青)。合成高分子胶黏剂分为热固性树脂胶黏剂、热塑性树脂胶黏剂和橡胶胶黏剂。按照黏接强度,高分子胶黏剂可分为非结构胶黏剂和结构胶黏剂。非结构胶黏剂的黏接强度较差,主要用于胶接不重要的非结构件或用于临时固定。结构胶黏剂用于结构件的黏接,黏接强度高,接头抗剪切强度可达 7 MPa,能长时间承受振动、疲劳和冲击等载荷,同时具有一定耐热性和耐候性。

胶黏剂主要用于木材加工、汽车及车辆制造、电子电气、航空、宇航、医学等领域。如用于胶合板、木屑板、装饰板、家具、办公用品、太阳能电池、印制电路板、磁带、箔式电容器、牙科修补、皮肤移植固定等。

0.1.5 涂料

涂料是指能在物体表面形成坚韧保护膜的高分子物质的总称。按照来源,涂料可分为天然涂料和合成涂料两类。天然涂料是指采用植物油和天然树脂熬炼而成的涂料,通常叫作油漆。按照涂膜分子结构,合成涂料可分为热塑性涂料和热固性涂料。热塑性涂料有聚丙烯酸树脂涂料、聚醋酸乙烯酯涂料、聚(过)氯乙烯涂料等。热固性涂料有环氧树脂涂料、酚醛树脂涂料、氨