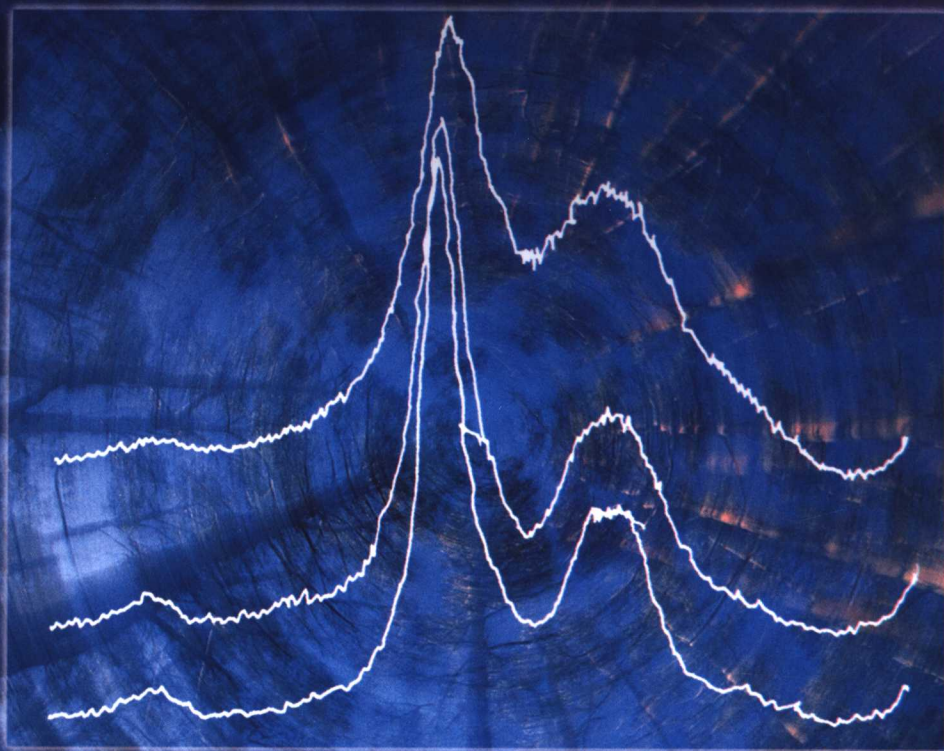


许民 编著  
李坚 主审



# 生物质-塑料复合工学



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 生物质-塑料复合工学

许 民 编著  
李 坚 主审

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

利用生物质材料与塑料复合制造生物质-塑料复合材料是一项对国民经济和社会的可持续发展均具有重要意义的工程技术,其技术关键在于生物质材料与塑料之间的界面相容性与复合工艺。本书在总结近年来有关生物质-塑料复合材料的最新研究成果的基础上,重点论述了以木材纤维、木材碎料、农作物秸秆等与回收塑料为原料,采取熔融挤出、混炼模压、热压复合和塑化浸注等方式制造生物质-塑料复合材料的工艺和技术;研究和分析了复合材料的界面形成及作用机理,并进行了复合材料的性能评价。

本书可供生物质复合材料、木材科学与技术、高分子材料与工程等专业的高等院校师生阅读,也可供相关领域研究院所和生产企业的工程技术人员和管理人员学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

生物质-塑料复合工学/许民编著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-017267-1

I. 生… II. 许… III. 热塑性塑料-生物材料:复合材料 IV. TQ325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 051131 号

责任编辑:周巧龙 吴伶伶 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 6 月第一次印刷 印张: 19 3/4

印数: 1—2 000 字数: 372 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

21 世纪以来,在世界范围内,生物质的研究与应用已引起了科学研究和技术开发人员的特别关注。我国人均森林面积不足世界平均水平的四分之一,人均木材消费量仅为  $0.19\text{m}^3$  (世界平均  $0.55\text{m}^3$ ),其林木资源非常短缺,而我国农作物秸秆年产量却为 7 亿 t,列世界第一位,此外还有储量丰富的竹材及野生植物资源等,但是其工业利用率低下。因此,将开发利用的物质资源由木材扩展到农作物秸秆、竹材、野生植物茎秆等生物质的再加工和循环利用是缓解木材供需矛盾行之有效的途径。

现在,人们越来越注意到生物质复合材料的研究和工业利用,即以生物质为原料,采用科学的加工和复合方法,将获得一系列高性能、多功能和高附加值的新复合材料,以便应用于人们的生活和国民经济建设领域,从而实现生物质的高效利用。

本书是为了顺应生物质复合材料的科学理论和工程技术的发展,在总结了东北林业大学生物质材料科学与技术教育部重点实验室近年来所从事的科学实验与科学研究成果的基础上编著而成的。本书重点论述了以木材纤维、木材碎料、农作物秸秆等生物质和回收塑料、合成聚合物为原料,采取熔融挤出、混炼模压、热压复合、塑化浸注等复合方式试制生物质-塑料复合材料的主要科学问题和新工艺、新技术。

本书适用于高等学校相关专业的师生阅读,也可供科研院所相关研究领域及生产企业的研究和管理人员学习参考。

本书由教育部高等学校农林业工程教学指导委员会副主任暨林业工程分会主任李坚教授主审,在此致以衷心的感谢!

鉴于水平有限,书中欠妥和疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教。

编著者

2006 年 4 月

# 目 录

## 前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 0 绪论 .....                   | 1  |
| 0.1 生物质复合材料概述 .....          | 2  |
| 0.1.1 生物质复合材料的定义 .....       | 3  |
| 0.1.2 生物质复合材料的特点 .....       | 4  |
| 0.1.3 复合效应 .....             | 5  |
| 0.1.4 复合原理 .....             | 7  |
| 0.2 木-塑复合材料的发展历史和研究现状 .....  | 10 |
| 0.2.1 发展历史 .....             | 11 |
| 0.2.2 研究现状 .....             | 12 |
| 0.2.3 研究的意义 .....            | 13 |
| 0.3 木-塑复合材料的分类和特点 .....      | 13 |
| 0.3.1 木-塑复合材料的分类 .....       | 13 |
| 0.3.2 木-塑复合材料的特点 .....       | 18 |
| 0.4 “绿色”复合材料 .....           | 18 |
| 1 原材料与仪器设备 .....             | 20 |
| 1.1 概述 .....                 | 20 |
| 1.1.1 植物纤维复合材料的组成 .....      | 20 |
| 1.1.2 植物纤维复合材料的分类 .....      | 21 |
| 1.2 植物的种类及其基本构造 .....        | 21 |
| 1.2.1 植物的种类 .....            | 21 |
| 1.2.2 纤维形态对复合材料主要性能的影响 ..... | 27 |
| 1.2.3 增强材料的选择原则 .....        | 27 |
| 1.3 植物纤维复合材料常用的胶黏剂 .....     | 28 |
| 1.3.1 合成高分子材料基体 .....        | 28 |
| 1.3.2 橡胶类基体 .....            | 36 |
| 1.3.3 天然胶黏剂基体 .....          | 37 |
| 1.3.4 无机胶黏剂基体 .....          | 38 |
| 1.4 辅助材料 .....               | 39 |
| 1.4.1 偶联剂 .....              | 39 |

---

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 1.4.2 | 引发剂                     | 42 |
| 1.4.3 | 增韧剂                     | 42 |
| 1.5   | 仪器设备                    | 43 |
| 1.5.1 | 分析方法                    | 44 |
| 1.5.2 | 仪器设备简介                  | 44 |
| 2     | 聚合物基复合成型                | 53 |
| 2.1   | 复合成型的目的                 | 53 |
| 2.2   | 聚合物的形态                  | 54 |
| 2.2.1 | 基本类型                    | 54 |
| 2.2.2 | 研究方法                    | 54 |
| 2.2.3 | 分散相的分散状况及表征             | 55 |
| 2.2.4 | 影响形态的因素                 | 56 |
| 2.3   | 复合成型的方法                 | 59 |
| 2.3.1 | 物理共混法                   | 59 |
| 2.3.2 | 共聚共混法                   | 61 |
| 2.3.3 | 互穿网络高聚物共混法              | 61 |
| 2.3.4 | 增容与原位反应                 | 61 |
| 2.3.5 | 动态硫化                    | 64 |
| 2.4   | 聚合物的相容性与相分离             | 65 |
| 2.4.1 | 相容性                     | 65 |
| 2.4.2 | 完全相容、部分相容与不相容           | 65 |
| 2.4.3 | 相容性、互溶性与混溶性             | 66 |
| 2.4.4 | 影响相容性的因素                | 67 |
| 2.4.5 | 聚合物相容性的判断               | 68 |
| 2.5   | 反应挤出共混                  | 69 |
| 2.5.1 | 共混设备                    | 70 |
| 2.5.2 | 配料技术                    | 70 |
| 2.5.3 | 反应挤出工艺参数对共混物性能的影响       | 71 |
| 2.5.4 | 共混组分对聚合物性能的影响           | 72 |
| 2.5.5 | 反应型增容剂及交联剂性能、用量对共混效果的影响 | 72 |
| 2.5.6 | 进料方式对反应挤出共混效果的影响        | 73 |
| 2.6   | 聚合物的共混改性试验              | 74 |
| 2.6.1 | 试验材料和方法                 | 75 |
| 2.6.2 | PP/HDPE 试验              | 75 |
| 2.6.3 | PP/PS/HDPE 试验           | 76 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 2.6.4 弹性体复合 .....                 | 79  |
| 2.7 废塑料基复合材料 .....                | 81  |
| 2.7.1 废旧塑料的危害 .....               | 81  |
| 2.7.2 废旧塑料回收利用的现状 .....           | 81  |
| 2.7.3 废旧塑料的回收利用技术及废旧塑料基复合材料 ..... | 83  |
| 2.7.4 聚烯烃的产量与用途 .....             | 84  |
| 2.7.5 废旧聚乙烯和聚丙烯的直接利用 .....        | 87  |
| 2.7.6 再生聚烯烃的性能 .....              | 88  |
| 2.7.7 回收聚烯烃的应用 .....              | 89  |
| 2.7.8 废旧聚烯烃的共混利用 .....            | 92  |
| 2.7.9 回收聚烯烃的改性利用 .....            | 94  |
| 2.8 小结 .....                      | 96  |
| 3 挤出复合工艺 .....                    | 97  |
| 3.1 与挤出成型有关的聚合物基本性能 .....         | 97  |
| 3.1.1 松散物料性能 .....                | 97  |
| 3.1.2 聚合物材料的力学性能 .....            | 102 |
| 3.1.3 聚合物材料的热性能 .....             | 104 |
| 3.2 挤出成型技术 .....                  | 107 |
| 3.2.1 挤出成型技术的发展 .....             | 107 |
| 3.2.2 挤出成型技术在聚合物加工中的地位与作用 .....   | 107 |
| 3.3 纤维增强热塑性塑料 .....               | 108 |
| 3.3.1 纤维增强热塑性塑料的挤出造粒方法 .....      | 108 |
| 3.3.2 纤维增强热塑性塑料的原理 .....          | 109 |
| 3.4 木-塑复合材料的挤出成型方法 .....          | 109 |
| 3.4.1 需要解决的关键问题 .....             | 110 |
| 3.4.2 挤出成型工艺 .....                | 110 |
| 3.4.3 主要挤出成型设备 .....              | 113 |
| 3.4.4 挤出成型设备中需要注意解决的问题 .....      | 115 |
| 3.5 挤出成型原理 .....                  | 117 |
| 3.5.1 加料段 .....                   | 117 |
| 3.5.2 压缩段 .....                   | 118 |
| 3.5.3 均化段 .....                   | 119 |
| 3.6 本试验所用挤出成型设备 .....             | 119 |
| 3.7 试验研究 .....                    | 120 |
| 3.7.1 桦木-聚丙烯复合 .....              | 120 |

|          |                           |            |
|----------|---------------------------|------------|
| 3.7.2    | 桦木-共混塑料复合 .....           | 124        |
| 3.7.3    | 木材纤维-聚丙烯复合 .....          | 128        |
| 3.7.4    | 木材纤维-聚苯乙烯复合 .....         | 132        |
| 3.8      | 小结 .....                  | 133        |
| <b>4</b> | <b>混炼模压成型工艺 .....</b>     | <b>134</b> |
| 4.1      | 混炼目的 .....                | 134        |
| 4.2      | 混炼原理 .....                | 134        |
| 4.3      | 混炼设备 .....                | 134        |
| 4.3.1    | 混合机 .....                 | 135        |
| 4.3.2    | 混炼机 .....                 | 135        |
| 4.4      | 混炼试验 .....                | 139        |
| 4.4.1    | 材料与方法 .....               | 139        |
| 4.4.2    | 结果与讨论 .....               | 140        |
| 4.5      | 小结 .....                  | 144        |
| <b>5</b> | <b>热压复合制板工艺 .....</b>     | <b>146</b> |
| 5.1      | 植物纤维(碎料)复合板材的分类 .....     | 146        |
| 5.1.1    | 按增强材料分类 .....             | 146        |
| 5.1.2    | 按基体材料分类 .....             | 146        |
| 5.1.3    | 按成型方法分类 .....             | 147        |
| 5.1.4    | 按成型介质分类 .....             | 147        |
| 5.2      | 植物纤维和碎料的制备 .....          | 148        |
| 5.2.1    | 麦秸碎料 .....                | 149        |
| 5.2.2    | 稻草秆碎料 .....               | 149        |
| 5.2.3    | 稻壳碎料 .....                | 150        |
| 5.2.4    | 玉米秆碎料 .....               | 151        |
| 5.3      | 植物纤维(碎料)的形态与板材性能的关系 ..... | 151        |
| 5.3.1    | 纤维对复合板性能的影响 .....         | 152        |
| 5.3.2    | 碎料对复合板性能的影响 .....         | 154        |
| 5.4      | 基料和增强材料的粘接原理及条件 .....     | 155        |
| 5.4.1    | 采用纤维状增强材料时基料的作用 .....     | 156        |
| 5.4.2    | 采用碎粒状增强材料时基料的作用 .....     | 156        |
| 5.4.3    | 对基体材料的要求 .....            | 157        |
| 5.4.4    | 树脂基体和增强纤维(碎料)的黏合原理 .....  | 157        |
| 5.5      | 热固性树脂与热塑性树脂基体 .....       | 158        |
| 5.5.1    | 热固性树脂 .....               | 158        |



|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 5.5.2 热塑性树脂 .....                    | 160        |
| 5.5.3 热固性树脂和热塑性树脂的比较 .....           | 161        |
| 5.6 间歇式平压法植物纤维复合板的制板工艺 .....         | 162        |
| 5.7 木材纤维与热塑性树脂的制板研究 .....            | 164        |
| 5.7.1 木材纤维与不同聚合物的制板工艺 .....          | 164        |
| 5.7.2 木材纤维与回收聚合物的制板工艺 .....          | 167        |
| 5.7.3 偶联剂对复合材料性能的影响 .....            | 181        |
| 5.8 麦秸与热塑性树脂的制板研究 .....              | 182        |
| 5.8.1 麦秸-聚苯乙烯 .....                  | 183        |
| 5.8.2 麦秸-聚乙烯 .....                   | 188        |
| 5.8.3 麦秸-聚丙烯 .....                   | 190        |
| 5.9 小结 .....                         | 195        |
| <b>6 塑合木 .....</b>                   | <b>197</b> |
| 6.1 WPC 的研究动态及生产概况 .....             | 197        |
| 6.1.1 WPC 的研究历史 .....                | 197        |
| 6.1.2 WPC 的研究状况 .....                | 198        |
| 6.1.3 WPC 的研究方法 .....                | 200        |
| 6.1.4 WPC 存在的问题和展望 .....             | 201        |
| 6.2 WPC 的性能 .....                    | 203        |
| 6.2.1 力学强度高 .....                    | 203        |
| 6.2.2 尺寸稳定性好 .....                   | 203        |
| 6.2.3 提高了耐热性 .....                   | 203        |
| 6.2.4 提高了表面性能 .....                  | 203        |
| 6.2.5 提高了耐腐蚀性 .....                  | 204        |
| 6.2.6 提高了耐候性 .....                   | 204        |
| 6.2.7 保持了加工性能 .....                  | 204        |
| 6.3 单体与其他添加剂 .....                   | 204        |
| 6.3.1 单体 .....                       | 204        |
| 6.3.2 引发剂 .....                      | 205        |
| 6.3.3 膨胀剂 .....                      | 206        |
| 6.3.4 缓聚剂 .....                      | 206        |
| 6.4 聚合处理方法 .....                     | 206        |
| 6.4.1 辐射法 .....                      | 207        |
| 6.4.2 触媒法 .....                      | 207        |
| 6.4.3 我国一些研制或生产单位制造木-塑复合材的方法示例 ..... | 208        |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.5 WPC 的检验              | 212 |
| 6.5.1 处理液注入深度            | 212 |
| 6.5.2 接枝率测定              | 212 |
| 6.5.3 缩胀率                | 213 |
| 6.5.4 抗缩胀率               | 213 |
| 6.6 WPC 反应机理             | 213 |
| 6.7 WPC 的新探索             | 214 |
| 6.7.1 以降低成本为目的的新技术新工艺    | 214 |
| 6.7.2 产生的实际问题及解决办法       | 215 |
| 7 木-塑复合材料的润湿性能           | 218 |
| 7.1 界面层设计与控制             | 218 |
| 7.1.1 界面设计的基本要求          | 218 |
| 7.1.2 不同复合材料体系对界面性能的设计   | 219 |
| 7.2 表面改性及其控制             | 220 |
| 7.2.1 润湿性的意义             | 221 |
| 7.2.2 黏合的最佳润湿条件          | 221 |
| 7.2.3 表面改性方法评述           | 222 |
| 7.3 界面的润湿                | 222 |
| 7.3.1 润湿的过程              | 223 |
| 7.3.2 润湿过程的比较            | 225 |
| 7.3.3 杨氏方程               | 226 |
| 7.3.4 接触角                | 227 |
| 7.3.5 铺展压和铺展系数           | 233 |
| 7.3.6 固体表面能与表面润湿性的关系     | 233 |
| 7.4 润湿作用对界面黏合的影响         | 234 |
| 7.4.1 表面润湿与黏合            | 235 |
| 7.4.2 扩散与黏合              | 236 |
| 7.4.3 界面反应与黏合            | 237 |
| 7.4.4 表面粗糙性与黏合           | 240 |
| 7.5 液体在固体表面的流展和渗透随时间的变化率 | 240 |
| 7.6 木-塑复合材料的表面润湿性        | 241 |
| 7.6.1 试验材料与方法            | 241 |
| 7.6.2 试验结果与分析            | 241 |
| 7.7 小结                   | 245 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 8 木-塑复合界面的形成及作用机理         | 246 |
| 8.1 界面的意义及其主要研究内容         | 246 |
| 8.1.1 相与界面                | 246 |
| 8.1.2 界面类型及其特性            | 246 |
| 8.1.3 界面上分子间的相互作用力        | 247 |
| 8.1.4 复合材料界面研究的主要内容       | 248 |
| 8.2 复合材料界面研究展望            | 249 |
| 8.3 界面的形成                 | 249 |
| 8.4 界面作用机理                | 250 |
| 8.4.1 化学键理论               | 250 |
| 8.4.2 弱边界层理论              | 251 |
| 8.4.3 物理(浸润)吸附理论          | 251 |
| 8.4.4 机械黏结理论              | 252 |
| 8.5 高聚物共混体系的界面研究          | 252 |
| 8.5.1 聚合物共混物的界面层热力学理论     | 252 |
| 8.5.2 高聚物共混体系界面上的扩散现象     | 253 |
| 8.5.3 扫描电子显微镜分析           | 254 |
| 8.5.4 动态热机械性能分析           | 258 |
| 8.6 木-塑复合材料的界面研究          | 260 |
| 8.6.1 扫描电子显微镜分析           | 260 |
| 8.6.2 动态热机械性能分析           | 266 |
| 8.6.3 傅里叶变换红外光谱分析         | 269 |
| 8.6.4 化学分析光电子能谱分析         | 271 |
| 8.7 植物纤维塑料复合材料的界面研究       | 273 |
| 8.7.1 动态热机械性能分析           | 274 |
| 8.7.2 扫描电子显微镜分析           | 275 |
| 8.8 小结                    | 277 |
| 9 复合材料的性能评价               | 278 |
| 9.1 复合材料的力学性能             | 278 |
| 9.1.1 短纤维增强复合材料的力学特性      | 278 |
| 9.1.2 颗粒增强复合材料的力学特性       | 282 |
| 9.2 复合材料物理性能              | 282 |
| 9.2.1 纤维增强复合材料树脂不可溶分含量测定  | 282 |
| 9.2.2 纤维增强复合材料树脂含量的测定     | 283 |
| 9.2.3 纤维增强复合材料平均线膨胀系数测定方法 | 284 |

---

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 9.3 复合材料无损检测 .....           | 285 |
| 9.3.1 光学无损检测 .....           | 285 |
| 9.3.2 超声无损检测 .....           | 285 |
| 9.3.3 声振检测 .....             | 285 |
| 9.3.4 X射线检测 .....            | 286 |
| 9.3.5 声发射检测 .....            | 286 |
| 9.3.6 电性能检测 .....            | 287 |
| 9.3.7 微波检测 .....             | 287 |
| 9.4 复合材料黏弹性力学 .....          | 288 |
| 9.4.1 塑料基体的黏弹性 .....         | 288 |
| 9.4.2 复合材料的黏弹性 .....         | 291 |
| 9.5 复合材料疲劳 .....             | 292 |
| 9.5.1 疲劳损伤机理 .....           | 292 |
| 9.5.2 疲劳特性 .....             | 294 |
| 9.6 高聚物熔体的流变性 .....          | 295 |
| 9.6.1 流变学的基本概念 .....         | 296 |
| 9.6.2 高聚物熔体剪切流动的非牛顿性特征 ..... | 299 |
| 参考文献 .....                   | 300 |

## 0 绪 论

在众多材料领域中,生物质材料具有诱人的发展前景。国际上对生物质材料的研究兴起于20世纪60年代,在80年代得到高速发展。人们采用物理的、化学的或机械的诸多方法加工和处理材料,从而赋予材料某些新的性能或改良其功能,由此创造了许多新型生物质材料,如塑合木、重组木、层积木、金属木、竹材胶合板、稻草板、秸秆板、亚麻屑板等。塑合木是1961年问世的一种新型木材,由于该技术得到来自各种原子能机构的支持,有关塑合木的研制在美国、加拿大、芬兰、原苏联、瑞典和南美一些国家均取得了进展。在过去的几十年里,世界上许多国家对塑合木的单体选择、聚合物接枝木材、生产方法、工艺流程、物理力学性质和加工性能等方面进行了实验研究,取得了较大的技术进展。重组木的设想起源于1973年的澳大利亚联邦科学院林业与林产品研究所(CSIRO)科学家 John Douglas Coleman 的设想,澳大利亚科学部长 Barry Jones 于1985年6月27日在 Repco 有限公司新闻会议上宣布重组木是木材利用上最令人振奋的突破,同时宣布重组木由 CSIRO 发明,并和 Repco 合作开发,其产品将由南澳大利亚木材公司(SATCo)制造。由美国兴起的单板层积材也引起了世人的关注,加拿大的 Macmillan 有限公司,经过20年的不懈努力研发了纵向定向板,从1985年开始在北美的建筑上使用。生物质复合材料也是一类新型的多功能材料,不但具有生物质材料和合成高聚物的双重优点,而且还被赋予新的功能,树脂基、金属基、陶瓷基及C/C基复合材料被称为先进的复合材料。目前,以优质实体生物材料和热固性聚合物单体或低聚物为原料制作的塑合木(wood plastic composite, WPC)产品和以熔化的合金或金属元素注入生物质材料方式制得的金属木及陶瓷木已经出现。除此之外,国际上其他形式的生物质材料也得到了不同程度的开发与利用(李坚等,1993)。

在木质与植物生物质材料的生产领域中,新型人造板产品、模压制品得到了很大的发展,华夫板、定向刨花板、复合胶合板代替结构胶合板广泛应用于建筑行业。随着经济、社会的发展,许多国家还把废弃物的回收利用作为充分利用自然资源、保护环境的重要措施,一些地方开始研究以废弃木质托盘、旧建筑物木质材料和废旧家具材料生产再生人造板材。进入21世纪后,随着人类对自身赖以生存环境的更加重视,绿色环保型、智能型生物质材料和制品的设计制作已渐渐成为本行业研究的主题。对上述产品的制造工艺过程、生产参数、原料选择、成品质量检验的研究正在不断深化。以加拿大、芬兰、瑞典和美国为代表的发达国家相继开发和应用

计算机软件控制生产,这样不仅确保了人造板生产的优质高产,而且提高了人造板厂的经济效益,同时也为人造板企业提高管理水平创造了条件。

现代社会在满足工业飞速发展的同时,又要满足持续膨胀人口的生活需求,因此面临着资源逐步枯竭和环境日趋污染的严重形势,这些问题将是人类发展的最大障碍。人类一方面在创造物质文明,从地球上提取资源制造材料,再把材料加工成生产和生活用的各种物件,以推动社会的高速进步;随之而来的另一方面是将地球上的各种资源以能量和材料的形式不断地、无节制地消耗,以至于出现资源日益短缺的局面;还把大量的废弃物排放到环境中造成环境污染,形成恶性循环。因此,从可持续发展的理念出发,从材料的设计和制造开始就应该考虑如何使材料充分发挥潜力,提高其使用寿命和价值,充分利用废弃物,以节约资源和减少污染,为建立节约型社会,实现协调、全面和可持续发展做贡献。

经济的发展、社会的进步,不仅依赖于 GDP 的增长,还依赖于自然资源环境的和谐、统一,即绿色 GDP。绿色 GDP 是一个国家或地区在考虑了自然资源与环境因素之后的经济活动的最终成果,是按照可持续发展的要求,在当前的生产力和社会发展水平条件下,扣除了环境成本和资源成本后的 GDP 总量、速度及其构成。通俗地讲,就是在 GDP 的基础上扣除对资源(主要包括土地、森林、矿产、水)、环境(包括生态环境、自然环境、人文环境等)的破坏性影响后的余额(是在 GDP 的基础上进行扣减而来的,有人也这么比喻:灰色 GDP - 黑色 GDP = 绿色 GDP),是经济“净”增长的概念,能更好地体现国民经济的可持续发展。绿色 GDP 占 GDP 的比重越高,表明国民经济增长的正面效应越高,负面效应越低;反之亦然。应该说,绿色 GDP 是 GDP 的补充和完善,体现了经济与自然的可持续发展程度。

森林资源作为全球变化最有影响的陆地生态系统的组成部分,具有涵养水源、保持水土、防风固沙、改良土壤、调节气候和净化空气等多种功能,同时为人类提供不可替代的木材及生物资源。因此,森林的可持续发展对人类的可持续发展有着重大的意义。要保护森林,又要保证经济的发展,即做到社会的可持续发展,需要寻找各种各样的代木材料。在诸多代木材料中,最受人们欢迎同时又与木材性能极为相近的材料是农作物秸秆,还包括野生植物资源。野生植物中可利用的纤维植物种类多、分布广,天然储备极为丰富,目前还没有被开发利用。

## 0.1 生物质复合材料概述

复合方式创生新的材料是 21 世纪的重大科学问题之一。目前,关于塑料、金属等组成和结构相对简单的均质材料与非生物材料的复合已形成初步产品,高分子、碳、陶瓷或金属纤维强化复合材料技术基本成熟。然而,我国在生物质-非生物复合材料领域的研究刚刚起步,技术水平和基础还比较落后,采用可再生资

源——生物质(木材、竹材、农作物剩余物等)与非生物质(高分子聚合物、金属等)复合,创生新的复合材料,实现生物质材料的高性能化、多功能化和环境友好特性,可以获得高附加值产品。

### 0.1.1 生物质复合材料的定义

在生物质复合材料的大家族中,木材-聚合物复合材料最具发展潜力,是一类新型的绿色复合材料。与过去的木-塑复合材(WPC,以优质实体木材和热固性聚合物单体或低聚物为原料)不同,它是以生物质(木材、竹材、农作物秸秆等)的纤维、粉末、碎料或细小刨花等形态的能保持细胞结构特征的生物质材料为增强体或填料,以热塑性聚合物(主要为高密度聚乙烯、低密度聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯和聚苯乙烯以及它们的回收再生料等)为基体,并加上各类添加剂经过熔融(挤出、混炼、注塑和热压)加工成型,是提高低质木材、木材加工剩余物、竹材和农作物秸秆等的利用率的有效途径(Balatinecz et al., 1993)。此外,传统的加工废弃塑料可回收量巨大,若将其用于生物质-聚合物复合材料,实现废弃合成聚合物的再利用,其资源环境效益巨大。生物质-聚合物复合材料在我国会有巨大的市场,将成为国民经济新的重要增长点。

天然生物质资源在蓄积量和生产量上是一切物质资源中最巨大、最恒久的,千万年来它一直是维持人类生存和发展的主要物质基础之一。木材、竹材、农作物秸秆等是我国分布广、蓄积量大的天然资源。我国的木材蓄积量约 130 亿  $\text{m}^3$ ,但天然的大径级优质木材资源已濒临枯竭,速生丰产人工林等低品质木材是商用木材的主要来源,对木材加工剩余物的利用率不足 20%;我国是世界上主要的产竹国,每年可砍伐毛竹约 5 亿根,各类杂竹 300 多万吨(相当于 1000 万  $\text{m}^3$  以上的木材资源量);我国是农业大国,农作物秸秆资源十分丰富,每年可作为生物质复合材料的秸秆资源高达 3.52 亿 t,再加上野生植物茎秆资源,可以说这些资源几乎是取之不尽的。由此可见,低质木材及其加工剩余物与竹材、秸秆等农业剩余物是我国极为丰富的重要天然生物质资源材料,亟待进行科学经营和高效利用。

目前,天然优质林木资源已被过度采伐,剩余的资源用于保护水土流失和维持生态平衡的意义远重于利用的意义,今后加工利用的重点是对低质木材、人工速生林和加工剩余物的高技术深度开发及高附加值利用;我国的竹材产量巨大,可以作为木材的替代原料,但还无法直接应用到人们的生活中,面临着如何利用的问题;农作物秸秆等农业剩余物的大部分没有得到合理加工、利用,每年有大量的秸秆在田间被焚烧,严重地污染了环境,甚至影响到高速公路和机场的安全。可以预见,间伐材和速生材等劣质材、竹材和农作物秸秆等将是今后相当长时期内生物质资源供应的主要来源,这决定了以它们为基础的新型材料的出现依然是复合与功能性改良,而原料的形态与特性又决定了复合是主要的利用方法。因此,采用生物质

资源与非生物资源的复合,创造出新的、能满足人们需求的高性能生物型高分子复合材料是一个主要研究发展方向。

生物质-塑料复合材料的基础研究,需要木材科学、高分子科学、材料科学、界面科学、高分子加工、化学、现代分析技术等多学科相互交叉、渗透与融合。然而,正是由于多学科交叉的特点,国内外对这一领域的基础研究显得很落后,甚至滞后于加工技术。虽然目前市场上已经有少量木-塑复合材产品(基本上是木粉或稻壳粉填充的热塑性塑料)出现,但是其性能还不能满足日益提高的市场要求。因此,研究以生物质为核心的新型多功能生物质-塑料复合材料的关键基础科学问题——界面问题具有十分重要的科学意义,是形成新的界面理论的突破口。对生物质-塑料复合材原材料的界面结构、性质及其调控原理的深入研究和调控技术的创新,是建立新型生物质复合材料制造理论与技术的根本基础。

### 0.1.2 生物质复合材料的特点

生物质纤维与聚合物复合材料的生产方法通常是将纤维与聚合物混合,或者将纤维作为填料加入到聚合物基体中,在高温高压下压制、挤出或模压。然而,大多数热塑性塑料是非极性(憎水性)的物质,与极性(亲水性)的纤维不相容,因而在复合材料中纤维与聚合物之间的结合性差。在生产中,为了提高纤维与热塑性聚合物基质之间的亲和力及黏结作用,人们通常采用化学偶联剂。偶联剂是一类用量较少、用于处理一种材料表面并使其与其他材料表面之间(如木材纤维与热塑性塑料)产生结合作用的物质。

迄今为止,我国农作物秸秆资源的综合利用主要是以造纸、饲料为主,而且每年所消耗的农作物秸秆的数量相对于其产量来说要少得多。剩余的大量农作物秸秆资源由于缺乏科学、合理的应用,造成了资源的浪费和环境污染。秸秆纤维与不同基体的聚合物复合可以制成用途不同的复合材料,用于不同的场合。以秸秆纤维为增强体制成的复合材料完全符合现代复合材料的发展方向——环境友好复合材料。环境友好复合材料具有的特点是:充分利用污染环境的废品为资源,制成具有某些功能的复合材料,这样既减少了对地球的压力,同时又充分利用了资源。在森林、土地均较为富有的发达国家,利用农作物秸秆制成各种板材及性能各异的复合材料在不同的场合已有应用。在森林覆盖率低、耕地逐年减少的我国,用农作物秸秆代替木材生产人造板的研究与技术正在发展之中;对于利用秸秆纤维与热塑性聚合物复合,制成高性能复合材料的研究仅处于起始阶段。随着天然林资源保护工程的实施和一系列环境保护政策法规的制定,开发农作物秸秆与不同聚合物基体复合制成具有使用性能的复合材料,必将成为高效利用农作物资源、缓解木材供需矛盾的一条有效途径。

在以农作物秸秆植物纤维为原料的高技术新材料研究方面,秸秆纤维与废旧



热塑性塑料的复合材料是具有很大潜力的一种新型材料。这种新型的、可循环使用的耐久性材料,既能克服秸秆纤维本身强度低和变异性大的使用局限性,又具有比单一高分子聚合物材料更好的综合性能。但是,在进行秸秆纤维-废旧热塑性塑料复合材料的研制过程中,需要解决的最大问题是如何使亲水的极性秸秆纤维表面与疏水的非极性热塑性塑料基材界面之间具有良好的相容性,从而使秸秆纤维材料的表面层与热塑性塑料的表面层之间达到分子间的融合,在分子水平上研究把两种不同性质的材料充分地复合在一起、产生比原来单一材料性能更加优良的新材料的结合机理。

目前,关于塑料、金属等的组成和结构相对简单的均质材料的界面性质已经初步形成理论体系,对于生物质材料界面性质的认识主要来自于对宏观性质的测定和采用已有理论所进行的判定。生物质材料是由聚糖结构的纤维素、半纤维素和具有芳香族环结构的木质素为主要化学成分组成的高分子复合体,除此之外还有硅质、蜡质等众多种类的抽提物,包含细胞、纤丝、微纤丝、基本纤丝等不同结构层次,组成和结构极其复杂,具有高度的异向性和变异性,仅靠现有的宏观实验方法和简单移植均质材料的界面理论,难以深入认识生物质材料及其复杂的界面结构和性质。界面结构和性质是关系生物质材料的复合方式和高效利用的决定性因素,是最基本、最关键的基础理论问题,要想解决生物质材料的高效利用问题必须首先以界面研究为切入点。

生产生物质-塑料复合材料使用的原料属于农作物剩余物和废弃塑料,生产出的复合材料的性价比具有很强的优势,符合国家的环保政策。如果解决了一直困扰的界面问题,掌握了复合材料的结合机理,就可以根据使用要求对复合材料工艺进行设计,这样既可以代替传统的“三板”,又可以开拓复合材料新的应用领域(如交通工具的内装修、墙体及地板用材料),该材料的发展空间很大。这对于实施天然林资源保护工程,充分开发、合理利用天然资源和再生资源,彻底解决人造板甲醛释放问题,加强环境保护,提高生物质材料工业的经济效益,促进林业产业的健康发展,具有一定的生态效益、经济效益和社会效益。

### 0.1.3 复合效应

复合材料的整体性能并不是其组分材料性能的简单叠加或平均,这其中涉及一个复合效应问题。

复合效应实质上是原相材料及其所形成的界面相互作用、相互依存、相互补充的结果。它表现为复合材料的性能在其组分材料的基础上的线性和非线性的综合。复合效应有正有负。性能的提高总是人们所期望的,但有时材料在复合之后某些方面的性能会出现抵消甚至降低的现象也是不可避免的。

由于复合材料在结构上和复合机理上非常复杂,复合效应的表现形式又多种