

# 聚乳酸基复合材料的 结构与性能

夏学莲◇著

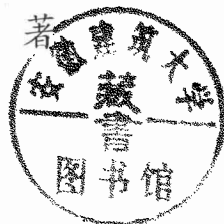


中国石化出版社

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

# 聚乳酸基复合材料的 结构与性能

夏学莲



中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书主要对聚乳酸的改性进行深入研究,包括物理改性和化学改性。详细介绍了四种纤维表面改性方法,从多个角度评价了纤维表面改性效果,系统研究了纤维表面改性对聚乳酸/亚麻纤维复合材料性能的影响,进一步探讨了各种纤维表面改性对复合材料增容的机理。

本书可供从事相关领域工作的工程技术人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

聚乳酸基复合材料的结构与性能 / 夏学莲著.  
—北京:中国石化出版社,2018.7  
ISBN 978-7-5114-4935-1

I. ①聚… II. ①复… III. ①高聚物-乳酸-复合材料-结构性能-研究 IV. ①TQ314

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 143010 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:北京市朝阳区吉市口路9号  
邮编:100020 电话:(010)59964500  
发行部电话:(010)59964526  
<http://www.sinopec-press.com>  
E-mail:press@sinopec.com  
北京柏力行彩印有限公司印刷  
全国各地新华书店经销

\*

850×1168 毫米 32 开本 4.75 印张 123 千字  
2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷  
定价:35.00 元

## 前 言

在煤、石油、天然气等不可再生资源日益匮乏，环境污染日趋严重的今天，可再生、可降解的高分子材料的研究开发备受关注。植物淀粉发酵制得的乳酸在适当的条件下聚合可合成聚乳酸，因此，聚乳酸又名“玉米塑料”。高分子量的聚乳酸具有强度高、模量高、透明性好、成膜性好、易于成型加工等优良特性，在农用薄膜、纺织、包装、日常生活用品等领域得到了大量应用。聚乳酸优良的生物相容性，使其作为骨折固定材料、手术缝合线、组织培养等在医药领域得以应用。此外，聚乳酸主链上的酯键赋予其另一个显著优势——可降解性；废弃后的聚乳酸经过水解、微生物降解最终生成二氧化碳和水。然而，兼具天然资源充分利用和“白色污染”治理双重意义的聚乳酸存在自身弊端：疏水性、结晶慢、结晶度低、耐热性差、冲击强度低，难以满足材料在实际应用中对性能多方面要求，其广泛应用受到制约。

对聚乳酸的改性研究工作深入开展，包括物理改性和化学改性。物理改性中的共混和复合主要是通过将聚乳酸与高聚物、无机填料或金属混合、掺混，改性填料与基质形成不同的空间构型，性能上取长补短，使复合材料达到单个组分没有的更强的综合特性，复合材料表现出新的性能。与聚乳酸共混、复合的材料很多，如高

聚物、小分子增塑剂、纳米材料、纤维等。传统填料，比如，玻璃纤维的加入对聚乳酸的低密度和可降解性有不良影响。

植物纤维以其低密度、高强度、高模量、低成本、来源广、可再生、可降解等优势，成为高聚物改性的热点。然而，植物纤维分子结构上富含羟基，分子内和分子间氢键作用较强，表现出极强的极性，与高聚物共混时，会因为化学异质而不相容。因此，采用植物纤维改性聚乳酸之前，首先必须对植物纤维表面进行改性。本书详细介绍了四种纤维表面改性方法，从多个角度评价了纤维表面改性效果，系统研究了纤维表面改性对聚乳酸/亚麻纤维复合材料性能的影响，进一步探讨了各种纤维表面改性对复合材料增容的机理。

除了两相界面相容性以外，填料的添加量会在很大程度上影响复合材料的性能。本书深入探讨了亚麻纤维含量对聚乳酸基复合材料各项性能的影响，系统分析了亚麻纤维增强、增韧聚乳酸的机理。本文对植物纤维增强、增韧、填充高聚物的理论研究有一定的指导意义和现实意义。

由于作者水平所限以及时间仓促，书中难免存在一些不足和疏漏之处，敬请广大读者和专家给予批评指正。

作者

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	( 1 )
1.1 引言 .....	( 1 )
1.2 聚乳酸简介 .....	( 2 )
1.2.1 聚乳酸的结构和性能 .....	( 2 )
1.2.2 聚乳酸的应用 .....	( 4 )
1.2.3 聚乳酸的改性 .....	( 5 )
1.3 植物纤维 .....	( 9 )
1.3.1 植物纤维的化学组成与结构 .....	( 10 )
1.3.2 植物纤维的分类与性能 .....	( 10 )
1.3.3 亚麻纤维 .....	( 11 )
1.4 聚乳酸/植物纤维复合材料 .....	( 12 )
1.4.1 聚乳酸/植物纤维复合材料的界面 .....	( 12 )
1.4.2 聚乳酸/植物纤维复合材料界面相容性 的评估 .....	( 19 )
1.4.3 聚乳酸/植物纤维复合材料的制备方法 .....	( 28 )
1.4.4 聚乳酸/植物纤维复合材料的应用 .....	( 38 )
1.5 聚乳酸基复合材料研究的意义 .....	( 42 )
1.6 聚乳酸基复合材料的研究思路 .....	( 43 )
第 2 章 表面改性亚麻纤维的结构与增容机理 .....	( 45 )
2.1 引言 .....	( 45 )
2.2 实验部分 .....	( 45 )
2.2.1 主要原料、试剂及仪器设备 .....	( 45 )
2.2.2 纤维的表面改性 .....	( 46 )
2.2.3 复合材料制备和成型加工 .....	( 47 )
2.2.4 结构表征和性能测试 .....	( 49 )



4.3 结果与讨论 .....	( 91 )
4.3.1 复合材料断面形貌 .....	( 91 )
4.3.2 动态力学性能 .....	( 93 )
4.3.3 结晶行为与结构 .....	(100)
4.3.4 拉伸过程中裂纹的扩展 .....	(113)
4.3.5 增韧机理 .....	(114)
4.4 本章小结 .....	(116)
参考文献 .....	(118)



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

自 1907 年“塑料之父”Bakeland 研制出高分子材料以来,无数科研工作者不断探索、创新,塑料已经渗透到国民经济各部门以及人民生活的各个领域。高分子材料以其密度小、强度大、耐磨、耐腐蚀、绝缘、隔热和隔音等优异特性,部分取代了木、棉、麻、毛、金属及陶瓷等材料,成为机械制造、造船、汽车、电子、化工、农业、医疗及日常生活中不可缺少的生产和生活资料,且使用量越来越大。在 高分子材料给人们生活带来便利、改善生活的同时,也给人类带来了不可忽视的负面影响,废弃高分子材料对环境的污染日益加剧<sup>[1]</sup>。由于塑料难以降解,且随着用量的与日俱增,废塑料所造成的白色污染已成为世界性的公害<sup>[2]</sup>,在所有废弃物中,塑料废弃物的比重已达到 10%左右,而体积比已达 30%左右。除了环境污染,不可再生资源(如煤、石油、天然气等)的日益匮乏制约着高分子材料长期、稳定发展,科学家们预计石油资源将在未来 40 年内耗尽<sup>[3]</sup>。每生产 1t 石油来源塑料需消耗 3t 左右石油,扩大石油来源塑料的生产无疑增加了石油压力。

由可再生资源合成的可降解塑料已成为高分子材料十分重要的发展方向之一。可再生、可降解高分子材料的广泛应用,可以从根本上解决由不可再生资源日益枯竭导致的原料不足和塑料废弃物造成白色污染的双重环境问题。聚乳酸就是可再生、可降解的高分子材料之一,是近十几年来绿色塑料的“明星”。2015 年,《中国科学报》报道我国已建成产量为 5000t/a 的聚乳酸树脂工业

示范线，成为世界上第二个聚乳酸树脂产业化规模达年产 5000t 以上的国家。聚乳酸产业不仅在数量上，在质量上也值得欣喜，聚乳酸的收率高达理论收率的 92% 以上，数均分子量超过 10 万，达世界先进水平，且部分指标已领先世界水平。聚乳酸产品的各项性能指标已全面达到并部分超过美国 Cargill Dow 公司的同类产品，远销西欧和日本等地。然而，聚乳酸应用领域的扩展仍受其性能制约，聚乳酸的改性迫在眉睫。

## 1.2 聚乳酸简介

聚乳酸 (Polylactic acid) 或聚丙交酯 (Polylactide)，缩写为 PLA，是一种典型的完全生物降解性高分子材料，聚乳酸及其共聚物在自然条件下可完全降解成水和二氧化碳，不会对环境造成污染，是一种绿色材料。此外，在石油资源日益减少的今天，以石油为原料产品的大量使用会进一步加剧不可再生资源的消耗，而聚乳酸可以从植物淀粉 (玉米、甜菜、土豆、山芋、玉米芯或其他农作物的根、茎、叶、皮等为原料) 发酵而制得，来源广阔，具有可再生性。

### 1.2.1 聚乳酸的结构和性能

#### 1.2.1.1 聚乳酸的结构

乳酸或丙交酯 (乳酸二聚体) 在一定条件下聚合，可得聚乳酸。聚乳酸分子量可达几千至百万，属于热塑性、线性脂肪族聚酯，其分子结构式如图 1.1 所示。而乳酸分子中含有手性碳原子，分左旋乳酸和右旋乳酸，其结构如图 1.2 所示。根据聚合单体旋光性的不同，聚乳酸可分为左旋聚乳酸 (PLLA)、右旋聚乳酸 (PDLA)、内消旋聚乳酸 (meso-PLA) 和外消旋聚乳酸 (PDLLA)。

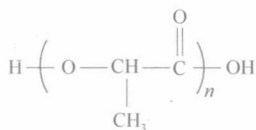


图 1.1 聚乳酸分子结构式

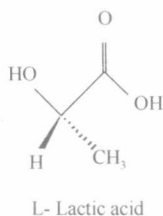
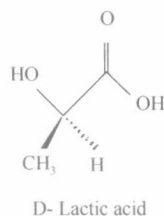


图 1.2 乳酸的对映异构体



PDLA 和 PLLA 为聚乳酸中立构规整性很好的两种聚合物，具有光学活性，分子链排列比较规整，因此结晶度较高，力学强度也较高。PDLLA 无光学活性，为非晶态聚合物，用作药物载体。而 meso-PLA 难结晶，难提纯，力学强度低，易水解，难保存，不作为目标产物，只是副产品。

### 1.2.1.2 聚乳酸的性能

#### (1) 降解性能

聚乳酸的分子主链上含有酯键使其具有良好的降解性能。在潮湿环境下，聚乳酸主链上的酯键首先水解，分子量降低，随着时间的延续低分子量的聚乳酸进一步降解，最终生成水和二氧化碳。若在潮湿的具有微生物的降解环境中，聚乳酸降解速度会更快，因为，水解后的低分子量聚乳酸在生物酶的作用下还可以发生生物降解。聚乳酸的分子量、分子量分布会影响降解速率。有无酶存在、湿度、环境的 pH 值、温度、聚乳酸产品的形状等也会对其降解速率产生巨大影响。总体来说，与绝大部分热塑性聚合物相比，聚乳酸具有更好的降解性能。

#### (2) 力学性能

聚乳酸的力学性能与其分子量、立构规整性、结晶度等因素有关。高分子量的聚乳酸具有较高的拉伸、弯曲强度和杨氏模量，退火处理能使材料的拉伸强度进一步提高<sup>[4]</sup>。然而，其韧性较差，在冲击测试中表现出较低的冲击强度，在拉伸测试中，断裂伸长率也较低。聚乳酸的脆性极大地阻碍了其广泛应用。

### (3) 热性能

聚乳酸的玻璃化转变温度( $T_g$ )范围为 50~80℃,大多数在 60℃左右,熔融温度在 130~180℃,热分解温度在 300℃左右,不能用于微波炉加热,耐热性较差。这使得聚乳酸的使用温度范围大大降低。

### (4) 良好的成型加工性

由于聚乳酸的熔融温度、熔体黏度适中,聚乳酸适用于多种成型加工方法,如注塑、挤出、吹膜等。聚乳酸还具有很好的溶液成膜性,可以采用流延制膜法制备出薄膜。另外,聚乳酸还能通过纤维成型法制备出聚乳酸纤维,这使得聚乳酸可作为保健织物、抹布、室外防紫外线织物、帐篷布、地垫等使用。

除了以上所述性能以外,还有光学性能、电性能、透气性能和表面性能等,但本文更为关注以上的四方面性能。

## 1.2.2 聚乳酸的应用

聚乳酸作为重要的环境友好高分子材料,其开发研究近十年来迅速发展,成为可再生资源的焦点之一。在涂料、薄膜、纺织、包装等领域有巨大的市场<sup>[5]</sup>。

### 1.2.2.1 医药

聚乳酸自开发研究以来,一直在医学、医药领域受到欢迎,科研工作者们发现聚乳酸植入体内,不发生显著的排斥、排异,降解后的产物能参与三羧酸循环,最终排出体外。聚乳酸主要用于手术缝合线<sup>[6]</sup>、骨科固定材料<sup>[8]</sup>、药物缓释<sup>[8,9]</sup>和组织培养<sup>[10]</sup>等。有关聚乳酸的研究一直是生物降解性高分子材料研究领域的热点。

### 1.2.2.2 农业

聚乳酸在农业领域的应用包括地膜<sup>[11]</sup>、肥料袋、育苗钵、杀虫剂缓释袋<sup>[12]</sup>、缓释系统、植被网、荒地和沙漠绿化保水膜等。

### 1.2.2.3 包装

在包装领域,聚乳酸用于蔬菜、水果和肉类包装容器及保护膜<sup>[13]</sup>,一次性使用的容器<sup>[14]</sup>和各种包装用膜<sup>[15]</sup>。采用聚乳酸替代不可降解的塑料可减少或降低“白色污染”。

### 1.2.2.4 其他

除以上三大应用领域外,聚乳酸还应用在土木建筑、林业和日常生活用品(卫生保健材料<sup>[16]</sup>,生理卫生用品、牙具)等领域。聚乳酸材料经耐热和增韧改性后,还可以应用在汽车<sup>[17,18]</sup>、IT等领域。

## 1.2.3 聚乳酸的改性

聚乳酸产品兼具天然再生资源充分利用和环境治理的双重意义,因而受到各国的重视。然而,随着研究的不断深入,聚乳酸逐渐暴露出了自身的弊端:疏水性强、结晶速度慢、结晶度低、热稳定性能较差、力学性能不够高(主要是冲击强度不能满足要求),难以满足实际应用中对材料性能多方面要求,成为制约其进一步发展的瓶颈,不能广泛应用。因此,科学家们就聚乳酸改性展开了大量研究<sup>[19-21]</sup>。

由于聚乳酸具有生物相容性和可降解性,是生物医用材料中的明星材料之一。然而聚乳酸疏水性强、力学强度不够、亲和性差等自身弊端,限制了其在医药材料中广泛应用。对此,科学家们针对医用聚乳酸改性展开了大量研究。

### 1.2.3.1 化学改性

聚乳酸的化学改性包括共聚改性和交联改性,其中共聚改性主要是通过聚乳酸的合成单体(乳酸、丙交酯)中加入其他共聚单体,并调节体系配比来调节聚乳酸共聚物的性能。蓖麻油<sup>[22]</sup>、己内酯<sup>[23]</sup>、聚(乙二醇-co-均苯四甲酸酐)<sup>[24]</sup>、甲基 MQ 硅树脂<sup>[25]</sup>、对苯二甲酸双羟乙酯<sup>[26]</sup>、乙交酯<sup>[27]</sup>、氨基酸<sup>[28]</sup>、乙二醇<sup>[29-31]</sup>、木糖醇<sup>[32]</sup>等都作为改性单体制备聚乳酸共聚物。

聚乳酸的交联改性也属于化学改性,是在交联剂或者辐射作

用下，聚乳酸大分子链之间产生化学反应，从而形成化学键的过程。

### 1.2.3.2 物理改性

聚乳酸的物理改性包括共混改性、增塑改性和复合改性。共混改性主要是指将一种或一种以上的聚合物与聚乳酸熔融共混，通过改变聚合物的种类和配比来达到改变共混物性能的目的。聚乳酸的共混改性研究已广泛开展，参与共混的聚合物有聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚对乙烯基苯酚、聚乙酸乙烯酯、聚甲基丙烯酸甲酯、聚丙烯酸甲酯、低密度聚乙烯、聚碳酸酯和超细全硫化粉末橡胶<sup>[33]</sup>等。

增塑改性是通过在聚乳酸基体中加入增塑剂，增塑剂主要有乙二醇、聚(乙二醇-戊二酸-对苯二甲酸)<sup>[34]</sup>、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二辛酯、柠檬酸酯系列、环氧大豆油<sup>[35]</sup>等。

复合改性是指将聚乳酸与一种或多种植物纤维、动物纤维、无机纤维、无机填料、金属填料等复合，制备出复合材料，复合方式包括混纺、熔融混合、溶液混合等多种方法。各组分在空间上形成不同的构型，在性能上互相取长补短，产生协同效应，所得复合材料具有单个组分所没有的综合性能，宏观上表现出新性能的材料，它是开发新材料的一个重要新领域。与聚乳酸复合的材料很多，如纳米材料(蒙脱土、蛭石、碳纳米管<sup>[36]</sup>、纳米丝、晶须、石墨<sup>[37]</sup>、石墨烯<sup>[38,39]</sup>、二氧化钛<sup>[40]</sup>、纳米羟基磷灰石<sup>[41]</sup>、银纳米粒子<sup>[42,43]</sup>、功能化磷酸锆<sup>[44]</sup>、有机黏土、硫酸钙<sup>[45,46]</sup>等)和纤维(玻璃纤维、涤纶纤维、聚乳酸纤维<sup>[47]</sup>、桑蚕丝<sup>[48]</sup>、植物纤维<sup>[49,50]</sup>等)等，其中植物纤维成为聚乳酸复合改性的热点。

### 1.2.3.3 生物医用聚乳酸改性

生物医用材料又称生物材料，主要指对生物体进行诊断、治疗、修补或置换坏损的组织器官、增进生物体功能的材料。高分子类生物材料大多是含容易水解的酯键或酰胺键的聚合物。聚乳酸是含酯键的广为人知的生物材料，它一直是可生物降解性高分

子材料领域的研究热点<sup>[51,52]</sup>。聚乳酸植入生物体内一段时间后,发生降解,降解产物能参与三羧酸循环,不产生明显排斥,为此,获得美国 FDA 认证<sup>[53]</sup>。聚乳酸在生物、医药、医学领域,如手术缝合线、眼科材料、骨折内固定材料、组织修复、药物控制释放等方面,得到广泛的研究和初步应用<sup>[54-56]</sup>。

聚乳酸作为植入材料使用时仍存在许多缺点和不足。

① 疏水性强,亲和性差。组织工程材料要求材料对细胞的亲和性良好,而聚乳酸分子链上含有酯键,疏水性强,造成它与组织的生物相容性降低。

② 力学强度不够高。作为支架或硬组织修复材料,需空间结构力学强度达到一定值,能保证细胞增殖并形成组织器官过程中承受正常应力。作为软组织修复材料,需在弹性、韧性方面满足要求。聚乳酸的脆性在强度方面尚且不能满足要求。

③ 聚乳酸降解后可能导致酸性积累。聚乳酸主链上酯键水解,生成大量羧端基的低聚物,深度水解成乳酸,导致酸性积累,导致生物体产生温和无菌性炎症<sup>[57]</sup>。

④ 修复、降解、吸收速度可控的系列产品。支架材料完成组织、器官的修复以后,随降解的发生从机体中消失,不会影响组织细胞的正常增殖。因此,材料在生物体内降解、吸收的速度必须与细胞增殖、组织修复速度匹配。由于器官或组织种类不同、损伤程度不同需要修复的时间也不同,需要降解速度可控的一系列材料满足医药市场需求。而降解速度、体内吸收速度系列化、可控的生物医用聚乳酸仍在研究、探索阶段。

⑤ 成本及工艺问题。用于医药领域的聚乳酸要求高,成型工艺复杂,因此价格极高。聚乳酸生物材料大量用于临床,必须改进制备工艺、降低价格。

⑥ 用于组织工程细胞支架,须具有三维多孔结构,利于细胞粘附、增殖和分化;孔隙间具有良好的连通性,营养物质可进入、细胞分泌物可排出;孔隙结构可满足细胞生长的需要。现有的多种制备工艺技术虽可调控支架的外形和多孔结构,但各有其

缺点,尚且没有一种完美的方法能满足支架所有要求。

针对以上聚乳酸的缺陷,广泛的研究工作深入开展。

① 疏水性和生物相容性方面的改性。通过在聚乳酸分子链上引入亲水基团,主要的方法有表面等离子体处理引入<sup>[58]</sup>,在材料表面涂覆生物相容的纤连蛋白、胶原蛋白等多肽<sup>[59]</sup>,采用水解、共聚在聚乳酸分子链上引入氨基以便固定多肽<sup>[60-62]</sup>。

② 力学强度的提高、韧性改善。常用提高聚乳酸力学性能的方法<sup>[63]</sup>有共聚、反应性共混<sup>[64]</sup>、共混等。陈炜<sup>[65]</sup>采用 PLCA、OH-PLLA、PEG 共缩聚合成了拉伸强度较高的 PLCA-OHPLLA-PEG 多嵌段共聚物,可用于组织工程支架、药物缓释。克莱姆森大学 Rasal R M 等<sup>[66]</sup>采用共混的方法制备聚羟基丁酸-羟基己酸(PHBHHx)/PLA 共混物薄膜,经测试薄膜的韧性从纯聚乳酸的(4±2)MPa 提高到了(175±35)MPa。孙梁等<sup>[67]</sup>将聚乳酸/磷酸三钙复合材料,应用于骨折修复方面,实验结果表明支架的成骨效果良好,可修复兔 15film 长骨。孟庆圆<sup>[68]</sup>在聚乳酸中混合卵磷脂制备血管组织工程支架,与纯聚乳酸电纺丝材料断裂伸长率的 46.88%相比,复合材料最高达到 135.79%。

③ 改善酸性累积,主要采用在聚乳酸中引入可调节酸性的成分或基团,如碱性高分子化合物壳聚糖、羟基磷灰石、碱性磷酸钙盐、氨基。涂浩<sup>[69]</sup>制备了聚乳酸/壳聚糖复合薄膜,体外降解实验中 pH 值接近中性。Wei Z 等<sup>[70]</sup>等表明采用 5% 赖氨酸与丙交酯-乙交酯共聚物复合能达到最佳的调节效果。Mike T 等<sup>[71]</sup>将聚乳酸与羟基磷灰石复合研制多孔复合材料,羟基磷灰石可中和酸性降解产物。贾舜宸<sup>[72]</sup>制备了聚乳酸/ $\beta$ -磷酸三钙复合骨修复材料,碱性磷酸钙盐可中和聚乳酸的降解酸性。于学丽<sup>[73]</sup>在聚乳酸分子链上引入活性伯胺基团,胺基的引入中和了因聚乳酸降解导致的酸性,还可抑制聚乳酸的酸性自加速降解。

④ 聚乳酸降解速度系列化改性,加入某种可增加或降低聚乳酸降解速度的物质,通过调节添加量来调节降解速度。张玉祥<sup>[74]</sup>利用己内酯(PCL)比聚乳酸降解速度慢的特点,将其与聚



乳酸共聚制备了 PLA-PCL-PLA 嵌段共聚物, 共聚物降解速度比聚乳酸慢。贾舜宸<sup>[51]</sup> 制备了聚乳酸/ $\beta$ -磷酸三钙复合骨修复材料, 通过磷酸钙和聚乳酸的比例及聚乳酸分子量的调整, 来调节复合骨修复材料的降解速度。

⑤ 降低聚乳酸的成本, 聚乳酸的合成规模化, 改善催化剂、优化催化反应过程可降低生产成本, 还要不断研发制备工艺技术。

⑥ 采用先进的细胞支架制备方法, 保证孔结构满足要求。常用的细胞支架制备方法有气体发泡<sup>[75]</sup>、纤维粘结<sup>[76]</sup>、相分离技术<sup>[77,78]</sup>、快速成型技术<sup>[79]</sup>、乳化/冷冻干燥技术<sup>[80]</sup>、溶剂浇注/粒子沥滤<sup>[81,82]</sup>、离心粘结法<sup>[83]</sup>等。

### 1.3 植物纤维

植物纤维来源于自然生长的植物, 属可再生资源, 可来自农产物或农作物的副产物(如小麦秸秆、玉米秸秆、菠萝纤维、甘蔗渣、椰子皮等), 原料供应充足。植物纤维作为增强材料, 可将农作物副产物作为工业原料, 促进农业发展, 实现废弃物再利用, 进一步推动工业、农业发展, 还可以在一定程度上解决全球能源危机和环境污染的问题。

目前, 植物纤维已被广泛应用于聚合物复合材料的制备。Henriksson M<sup>[84]</sup> 的研究表明三聚氰胺甲醛/微纤维素复合材料的杨氏模量为 16.6GPa, 拉伸强度为 142MPa, 具有较高的机械阻尼, 密度比用传统纸浆纤维制备的复合材料高, 可以用于制作喇叭膜。

Abe K 等<sup>[85]</sup> 等将纤维平均尺寸降低到约 15nm, 制备微纤维素纤维/丙烯酸树脂复合材料(MFC-acrylic), 在含量与厚度相同的条件下与细菌纤维素相比, MFC-acrylic 在可见光波长范围内具有更高的透明性。纳米纤维素复合材料还具有一个显著的特征——较低热膨胀系数<sup>[86]</sup>。