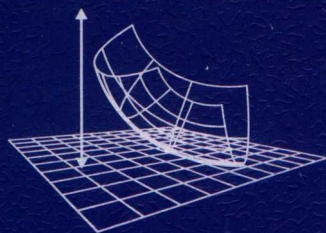




纤维尺寸及分布对WPCs力学性能的影响

曹岩◎著



西南交通大学出版社



贵州民族大学学术文库

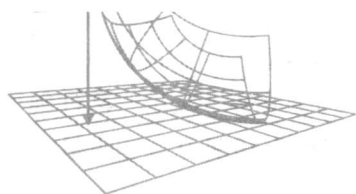
贵州民族大学学术著作出版基金资助

国家自然科学基金项目 (31460171)

贵州省科学技术基金项目 (黔科合J字 [2015] 2075号)

纤维尺寸及分布对 WPCs 力学性能的影响

曹 岩◎著



西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

纤维尺寸及分布对 WPCs 力学性能的影响 / 曹岩著.
—成都: 西南交通大学出版社, 2016.10
(贵州民族大学学术文库)
ISBN 978-7-5643-5084-0

I. ①纤… II. ①曹… III. ①木纤维—力学性能—研究 IV. ①TB332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 254709 号

贵州民族大学学术文库

**纤维尺寸及分布对 WPCs
力学性能的影响**

曹 岩 著

责任编辑 黄淑文
封面设计 墨创文化

印张 11 字数 175千
成品尺寸 170 mm × 230 mm

版次 2016年10月第1版

印次 2016年10月第1次

印刷 成都勤德印务有限公司

书号: ISBN 978-7-5643-5084-0

出版 发行 西南交通大学出版社

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

地址 四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

定价: 49.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

木塑复合材料, 简称木塑 (Wood-Plastic Composites, WPCs), 为生物-聚合物复合材料的俗称, 是一种由木质纤维材料与聚合物材料复合而制成的复合材料。它是新型的高性能、高附加值环保材料, 在环境保护和节约能源等方面发挥了重要的作用。然而, 抗蠕变性能差严重影响和制约了 WPCs 的拓展应用。本书以杨木纤维增强高密度聚乙烯 (HDPE) 复合材料为研究对象, 重点分析了纤维尺寸及其分布对 WPCs 的力学性质和抗蠕变性能的影响。

采用 10~20 目、20~40 目、40~80 目和 80~120 目 4 种木纤维及它们的混合纤维制备了 7 种木纤维增强 HDPE 复合材料, 对其弯曲性能、冲击强度、流变性能、动态热机械性能、24 h 蠕变-24 h 回复性能和 1 000 h 蠕变性能等进行分析, 并引入数学模型拟合 WPCs 的蠕变-回复过程, 得到如下研究结果:

(1) 纤维的尺寸过大或者过小都不利于 WPCs 的弯曲强度和模量的提高, 增强效果以 20~40 目纤维为佳, 而 80~120 目木纤维增强 HDPE 复合材料的弯曲强度和弹性模量均是最小值。4 种目数木纤维混合增强 HDPE 复合材料的抗弯性能较好。长短不同、粗细不均的纤维搭配起来增强 HDPE, 既能填补纤维之间的间隙, 又能扩大与基质的接触面积, 有助于提高材料界面的结合强度, 增强力学性能。

(2) 引入成分对弯曲力学性能的贡献因子 λ 作为参数修正 ROM 模型, 通过方差分析和配对样本 T 检验证明, 该模型预测木纤维增强 HDPE 复合材料的弯曲性能优于 3 个传统 ROM 模型, 通过材料的断裂强度验证了该模型。

(3) 单一目数木纤维增强 HDPE 复合材料中抗蠕变性能最差的是 80~120 目木纤维增强 HDPE 复合材料, 该材料蠕变实验后弯曲性能值下降最大, 不适合长期在负载的条件下工作。增加纤维长度有利于蠕变后弯曲性能的保留。在较小应力水平下, 40~80 目木纤维增强 HDPE 复合材料的抗

蠕变性能最好；当载荷超过材料弯曲极限载荷的 30% 时，20~40 目木纤维增强 HDPE 复合材料的抗蠕变性能最好。

(4) 混合目数木纤维增强 HDPE 复合材料的抗蠕变性能优于单一目数木纤维增强 HDPE 复合材料，抗蠕变性能最好的是 20~80 目木纤维增强 HDPE 复合材料，最差的是 80~120 目和 10~20 目混合木纤维增强 HDPE 复合材料。材料在不同载荷水平蠕变后，回复率的变化不大（回复率范围 81.81%~85.58%）。

(5) 上层 40~80 目、下层 20~40 目木纤维增强 HDPE 复合材料的弯曲性能值最大，其次是 4 种目数纤维混合均匀分布增强 HDPE 复合材料，而上层 80~120 目、下层 10~20 目木纤维增强 HDPE 复合材料的弯曲性能最差。长度相差大的纤维无论是分层分布还是均匀分布，用其增强 HDPE 复合材料的弯曲性能值都小于长度相近的木纤维增强 HDPE 复合材料，后者弹性应变最小，蠕变速度较慢，24 h 应变最小，蠕变后剩余弯曲性能值均最大。

(6) 上层 40~80 目、下层 20~40 目木纤维增强 HDPE 复合材料最适合长期在载荷作用下工作。而含有短纤维（80~120 目）的 WPCs 不适合长期在载荷作用下工作，短纤维含量越高，其抗蠕变性能越差。不同目数纤维均匀混合分布的 WPCs 抗蠕变性能均优于纤维分层分布的 WPCs，且 24 h 回复率也大于纤维分层分布的 WPCs；不同目数纤维均匀混合分布的 WPCs 弹性应变和 24 h 应变受加载力增加的影响较纤维分层分布的 WPCs 更敏感。

(7) 分别利用 Findley 指数模型、两参数指数模型和四元件 Burgers 模型来拟合单层和叠层材料的 24 h 蠕变曲线，并求出参数，经过模型检验和参数检验，四元件 Burgers 模型拟合效果最好，可以应用于叠层 WPCs 的蠕变性能的预测中。建立四元模型来模拟叠层 WPCs 的回复过程，该回复模型模拟效果较好，可以应用于叠层 WPCs 的蠕变回复性能的预测中。

编者

2016 年 5 月

目 录

1 绪 论 - 1 -

1.1 引 言 - 1 -

1.2 WPCs 的力学研究现状 - 2 -

1.2.1 WPCs 弯曲性能的研究 - 2 -

1.2.2 WPCs 拉伸性能的研究 - 4 -

1.2.3 WPCs 冲击性能的研究 - 6 -

1.3 WPCs 的力学模型研究进展 - 7 -

1.3.1 混合法则 - 8 -

1.3.2 Halpin-Tsai 模型 - 10 -

1.3.3 Cox 模型 - 12 -

1.3.4 Kelly-Tyson 模型 - 14 -

1.4 WPCs 的蠕变现象、机理和研究进展 - 16 -

1.4.1 蠕变性能研究意义 - 16 -

1.4.2 蠕变产生机理 - 17 -

1.4.3 WPCs 蠕变实验研究进展 - 18 -

1.5 蠕变的影响因素及蠕变模型 - 21 -

1.5.1 蠕变的影响因素 - 21 -

1.5.2 蠕变模型 - 22 -

1.5.3 模型应用 - 23 -

1.6 纤维尺寸和分布对 WPCs 力学性能和蠕变性能的影响研究 - 26 -

1.7 本书的主要研究内容 - 29 -

2 纤维尺寸对热压成型 WPCs 力学性能的影响 - 31 -

2.1 实验部分 - 31 -

2.1.1 主要原料及试剂 - 31 -

2.1.2	主要仪器及设备	- 31 -
2.1.3	WPCs 的热压成型制备	- 32 -
2.1.4	性能测试	- 35 -
2.2	结果与讨论	- 37 -
2.2.1	纤维尺寸对 WPCs 弯曲性能的影响	- 37 -
2.2.2	单一目数木纤维增强 HDPE 复合材料的抗弯性能	- 38 -
2.2.3	混合目数木纤维增强 HDPE 复合材料的抗弯性能	- 38 -
2.2.4	弯曲力学模型的建立及分析	- 39 -
2.2.5	纤维尺寸对 WPCs 的抗冲击性能的影响	- 45 -
2.2.6	纤维尺寸对 WPCs 的流变行为的影响	- 46 -
2.2.7	纤维尺寸对 WPCs 的动态热机械性能的影响	- 50 -
2.3	本章小结	- 53 -
3	纤维尺寸对热压成型 WPCs 蠕变性能的影响	- 54 -
3.1	实验部分	- 54 -
3.1.1	实验材料	- 54 -
3.1.2	实验仪器	- 54 -
3.1.3	实验方法	- 55 -
3.2	结果与讨论	- 57 -
3.2.1	应力水平的确定	- 57 -
3.2.2	纤维尺寸对 WPCs 24 h 蠕变-24 h 回复性能的影响	- 58 -
3.2.3	短期蠕变-回复模型的建立与分析	- 68 -
3.2.4	纤维尺寸对 WPCs 1 000 h 蠕变性能的影响	- 77 -
3.2.5	纤维尺寸对 WPCs 剩余力学性能值的影响	- 78 -
3.3	本章小结	- 80 -
4	纤维分布对热压成型 WPCs 力学性能的影响	- 82 -
4.1	引言	- 82 -
4.2	实验部分	- 82 -
4.2.1	主要原料及试剂	- 82 -

4.2.2	主要仪器及设备	- 82 -
4.2.3	叠层 WPCs 制备方法	- 83 -
4.2.4	抗弯性能测试	- 84 -
4.3	结果与讨论	- 84 -
4.3.1	纤维分布对 WPCs 的抗弯性能的影响	- 84 -
4.3.2	纤维分布对 WPCs 极限载荷和形变的影响	- 86 -
4.4	本章小结	- 87 -
5	纤维分布对热压成型 WPCs 蠕变性能的影响	- 88 -
5.1	实验部分	- 88 -
5.1.1	实验材料	- 88 -
5.1.2	实验仪器	- 88 -
5.1.3	实验方法	- 88 -
5.2	结果与讨论	- 90 -
5.2.1	叠层 WPCs 的蠕变-回复性能	- 90 -
5.2.2	纤维分布对 WPCs 蠕变-回复性能的影响	- 92 -
5.2.3	纤维分布对 WPCs 剩余力学性能值的影响	- 96 -
5.2.4	蠕变模型的建立及分析	- 98 -
5.3	本章小结	- 106 -
6	纤维尺寸对挤出成型的 WPCs 性能的影响	- 108 -
6.1	实验部分	- 108 -
6.1.1	主要原料及试剂	- 108 -
6.1.2	主要仪器及设备	- 108 -
6.1.3	WPCs 的挤出成型制备	- 109 -
6.1.4	性能测试	- 111 -
6.2	结果与讨论	- 112 -
6.2.1	纤维尺寸对挤出成型 WPCs 弯曲性能的影响	- 112 -
6.2.2	纤维尺寸对挤出成型 WPCs 抗冲击性能的影响	- 113 -
6.2.3	纤维尺寸对挤出成型 WPCs 流变性能的影响	- 114 -

6.2.4 纤维尺寸对挤出成型 WPCs 动态机械能的影响 - 117 -

6.2.5 纤维尺寸对挤出成型 WPCs 24 h 蠕变-24 h

回复的影响 - 120 -

6.2.6 纤维尺寸对挤出成型 WPCs 1000 h 蠕变性能的影响 - 125 -

6.2.7 挤出成型 WPCs 的安全系数 - 128 -

6.3 本章小结 - 131 -

7 纤维分布对挤出成型 WPCs 性能的影响 - 133 -

7.1 实验部分 - 133 -

7.1.1 主要原料及试剂 - 133 -

7.1.2 主要仪器及设备 - 133 -

7.1.3 不同纤维分布 WPCs 的制备 - 134 -

7.1.4 性能测试 - 135 -

7.2 结果与讨论 - 136 -

7.2.1 纤维分布对挤出成型 WPCs 弯曲性能的影响 - 136 -

7.2.2 应力水平的确定 - 138 -

7.2.3 纤维分布对 WPCs 粘板 24 h 蠕变性能的影响 - 139 -

7.3 本章小结 - 145 -

结 论 - 147 -

参考文献 - 150 -

1 绪 论

1.1 引 言

目前,由于全球森林资源日益枯竭,人们保护环境和节约能源的意识不断高涨,各国都在大力提倡“发挥资源优势,发展绿色产业”,木塑复合材料应运而生。因此,木塑复合材料的兴起绝不是偶然的,它有着深刻的时代背景和一系列的主、客观原因。

木塑复合材料,简称木塑 (Wood-Plastic Composites, WPCs),为生物-聚合物复合材料的俗称,是一种由木质纤维材料与聚合物材料复合而制成的复合材料。20 世纪 60 年代以来, WPCs 被日益广泛地应用到生产生活的各个领域^[1],如托盘、包装箱等包装制品,铺板、铺梁等仓储制品,室外栈道、凉亭、座椅等城建用品,房屋、地板、建筑模板等建材制品以及汽车内装饰、管材等其他产品^[2]。WPCs 不但兼有木材和塑料的优异物理化学性能,如密度小、不易磨损、可生物降解、防腐防潮防虫蛀、绿色无害、尺寸稳定性和力学性能好等,而且具有原料来源广泛、成本低、易于加工和可重复使用等性能,因此,现代生活中人们对 WPCs 越来越重视, WPCs 的使用也越来越广泛。近年来 WPCs 不断扩大应用领域并逐步替代了一些传统材料。此外, WPCs 为废旧塑料的循环利用和提高木材工业利用效率两方面开辟了一条新途径^[2],可以说, WPCs 在环境保护和节约能源等方面发挥了很大的作用。

木塑产品性能良好,是我国大力支持和提倡的科技项目。近 10 年来木塑产业的发展迅猛。WPCs 在作为结构材料使用时,要求其有足够的承载能力,主要包括三个方面:首先是要有足够的强度,这是对材料最基本的要求;其次,要求材料有一定的刚度,这是其作为结构材料的必要条件;最后,还对材料的稳定性有一定的要求。然而, WPCs 在使用中常常受到长期的持续恒定或者循环载荷的作用而提前失稳,导致承载能力下降甚至破坏。因此,研究 WPCs 的力学性质和提高其抗蠕变性

能是十分有必要的。研究蠕变不仅可以揭示聚合物的粘弹性机理,还能预测 WPCs 在使用中的稳定性和长期承载能力。

1.2 WPCs 的力学研究现状

WPCs 不但在很多领域可以代替天然木材,而且能为废弃塑料找到处理的新途径,因此受到人们的日益关注^[3]。它在继承了木材良好的加工性和塑料的易成型性的同时,扩大了木材应用范围并克服了聚合物力学上的缺点,节省了成本,提高了材料的附加值^[4-10]。与天然木质材料相比,木塑制品的耐用性和硬度都得到了大幅度的提高。

一般地,植物纤维用来增强塑料是因为它有相对高的强度和刚度以及较低的密度,对于 WPCs 性能的研究重点之一就是围绕它的物理力学性能(包括弯曲性能、拉伸性能、抗冲击性能、动态热机械能和抗蠕变性能)而展开的。

1.2.1 WPCs 弯曲性能的研究

弯曲强度表征材料在进行弯曲试验时在力的作用下抵抗变形的能力,而弯曲模量表示材料在弯曲弹性区间内应力与应变的比值,也是弯曲强度测试中加载力和形变的曲线中直线部分的斜率。

查阅 2000—2010 年的相关文献发现,研究 WPCs 的学者们先后研究了椰子壳和油棕榈纤维增强聚酯复合材料^[11],马尼拉纤维增强苯酚甲醛树脂复合材料^[12],大麻、苕麻和亚麻纤维增强热塑性树脂^[13],黄麻和亚麻纤维增强聚丙烯(PP)复合材料^[14],大麻、洋麻、亚麻和剑麻纤维增强聚合物^[15],甘蔗渣纤维增强聚酯复合材料^[16],椰子壳增强环氧树脂^[17],大麻和洋麻纤维^[18]增强聚酯复合材料,Curaua 纤维增强 PP 和高密度聚乙烯(HDPE)复合材料的弯曲性能^[19]。

2002 年,Joseph 等学者制备了马尼拉纤维增强苯酚甲醛树脂复合材料。通过改变纤维的长度和含量考察复合材料弯曲性能的变化,研究马尼拉纤维的长度对复合材料弯曲性能的影响,再通过分析优化出利于提高复合材料的强度的最佳纤维长度和含量。复合材料的弯曲强度和模量值随着纤维长度的增加而增加,40 mm 马尼拉纤维增强复合材料的弯曲断裂强度和模量值达到最大值。纤维含量增加到 45%,材料的弯曲模量

大约提高了 25%，随着纤维含量的提高，材料的弯曲强度也显著提高^[12]。

2004 年，Keener 等人^[14]通过调整马来酸酐偶联剂的含量，提高黄麻和亚麻纤维增强 PP 复合材料的弯曲性质（最大可以提高 60%）。同年，Mohanty 等学者^[20]通过热压成型法和挤出成型法，分别制备了大麻纤维增强可降解塑料。研究发现，利用挤出工艺制备的质量分数为 30%的大麻纤维增强塑料复合材料的弯曲性能值更高，弯曲强度和弹性模量分别达到 78 MPa 和 5.6 GPa，而含量相同的大麻长纤维增强复合材料的弯曲强度和弹性模量远高于短纤维增强复合材料。

2007 年，Zampaloni 等人^[21]根据 PP 材料的热塑性质，利用模具通过热压成型法制备了洋麻纤维增强 PP 的片材，研究发现洋麻纤维质量分数从 30%提高到 40%，复合材料的弯曲强度得到了显著的提高。并且发现，30%的洋麻纤维增强 PP 复合材料的弯曲强度和 40%的大麻纤维增强 PP 复合材料相等，并且比椰子壳纤维增强 PP 和剑麻增强 PP 复合材料大；40%的洋麻纤维增强 PP 复合材料的弯曲强度和亚麻增强 PP 材料的相等，比 40%大麻增强 PP 复合材料大，是椰子壳增强 PP 和剑麻增强 PP 材料的 2 倍左右。

2008 年，Monteiro 等学者^[22]利用热压成型法制备了不同质量分数的椰子壳纤维增强聚酯复合材料，研究了纤维的含量对复合材料的弯曲性能的影响，研究发现，当纤维的质量分数为 50%时，复合材料的弯曲性能最好。同年，Luz 等人^[23]研究了乙酰化作用对降低甘蔗渣增强 PP 复合材料的弯曲性能的影响。

2009 年，Ibrahim 等学者^[24]将油棕榈纤维和 PCL 通过熔融共混技术制备了可降解复合材料，因为油棕榈纤维和 PCL 的不相容性，利用乙烯-吡咯烷酮聚合物（polyvinyl pyrrolidone）做胶黏剂改善 PCL 和纤维之间的界面的黏合性，用电子束照射木塑产品提高复合材料的力学性能，加入质量分数为 1%的聚酯纤维材料，利用 10 kGy 的电子束照射，材料的弯曲强度和模量均得到提高。

2010 年，Mano 等人^[19]利用挤出成型法制备了质量分数为 20%的 Curaua 纤维增强 PP 和 HDPE 复合材料，研究了挤出过程中螺杆的转度对复合材料的弯曲性能的影响。随着螺杆的转速增加，材料弯曲屈服应力减小，以 HDPE 为基质的复合材料比以 PP 为基质的复合材料的弯曲屈服应力下降得快；但复合材料弯曲模量并不受螺杆转速的影响。对于

HDPE 基复合材料, 螺杆转速在 300 r/min 时, 材料的弯曲强度最好; 而对于 PP 基复合材料, 螺杆转速在 350 r/min 时弯曲强度较好。

1.2.2 WPCs 拉伸性能的研究

影响 WPCs 拉伸性能的因素很多, 纤维的强度很重要, 在特定的应用中选择适合的纤维是提高复合材料强度的最主要的因素, 因此, 关于纤维含量、纤维尺寸、纤维改性以及纤维混合处理对复合材料拉伸性能的影响的研究不少, 另外, 也不乏热塑性基体的结构和偶联剂种类、含量以及环境温度等对复合材料拉伸性能影响的研究。

2004 年, Baiardo 等学者^[25]经过混合处理法制备了亚麻纤维增强脂肪酸聚酯 (Bionolle) 的复合材料, 研究了处理方式以及纤维长度和分布对复合材料的拉伸性质的影响。而后根据修正的混合法则 (rule-of-mixture equation, ROM), 建立了 WPCs 拉伸力学模型, 随着纤维含量的提高, 纤维和基体间的结合力下降, 复合材料的拉伸强度降低。用乙酰胺对亚麻增强纤维表面进行乙酰化改性, 在亚麻纤维体积含量为 25% 时, 拉伸强度提高了 30%; 用单甲基化聚乙烯乙二醇在纤维表面的接枝, 复合材料的拉伸强度没有发生显著变化。同年, Yang 等学者^[26]在不同的温度下 ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$), 测试 10%、20%、30% 和 40% 质量分数的稻壳增强 PP 复合材料的拉伸强度, 并且设置了 2 mm/min、10 mm/min、100 mm/min、500 mm/min 和 1 500 mm/min 的测试速度。复合材料的拉伸强度随着纤维含量的增加而稍微减小, 而拉伸模量却得到提高。随着测试速度的提高, 复合材料变得越来越脆。在低温下复合材料显示出像玻璃一样硬而脆的性质, 但是由于温度从 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 到达了聚合物基体 (PP) 的玻璃转变温度, 拉伸强度和模量均降低。Jacob 等学者们^[27]将油棕榈和剑麻纤维混合并进行化学改性, 研究了这种化学改性对于增强天然橡胶基体复合材料的拉伸性能的影响。Nakamura 等学者^[28]研究了可降解基体 (PLA、PHBV 聚羟基丁酸戊酯、PBS) 的尺寸对于可再生纤维素增强该基体复合材料的拉伸性能的影响。

2005 年, Herrera-Franco 等学者^[29, 30]研究了麻纤维增强 HDPE 复合材料的拉伸性能, 发现纤维的硅烷处理和树脂基体预浸对复合材料拉伸强度的提高起到了很大的作用, 但拉伸模量不受影响。处理后纵向拉伸

强度从 71.8 MPa 增加到 79.3 MPa, 提高了 10%; 横向拉伸强度从 2.75 MPa 提高到 3.95 MPa, 提高了 43%。纤维表面的改性对于 WPCs 的拉伸性能也起到了作用, 同时发现, 纤维和基体之间的结合度的提高对于复合材料的拉伸性能发挥了更大的作用。

2006 年, Demir 等学者^[31]研究了丝瓜纤维的表面处理对于增强 PP 复合材料的拉伸性能的影响; 学者 Lee 和 Wang^[32]研究了生物质偶联剂对于竹纤维增强 PLA 和 PBS 基复合材料拉伸性能的影响; Sapuan 等学者^[33]研究了马尼拉麻的尺寸对其增强环氧树脂复合材料的拉伸性能的影响。

2007 年, Rao 等人^[34]研究了竹、棕榈、马尼拉麻、油棕榈、剑麻和椰子壳等纤维在不同的纤维横截面积、不同的含水率和不同密度下增强聚合物复合材料的拉伸性能; Ben Brahim 和 Ben Cheikh^[35]研究了 alfa 纤维的指向性和体积分数对于纤维增强聚合物复合材料拉伸性能的影响; 同年, Liu 等学者^[36]研究了甜菜根纸浆的结构和力学性能对其增强 PLA 基复合材料拉伸性质的影响; Kaci 等学者^[37]研究了表面改性对橄榄壳增强 PP 复合材料拉伸性质的影响; Chow 等人^[38]研究了剑麻纤维增强 PP 复合材料的吸水性能和拉伸性质。

2008 年, Bachtar 等学者^[39]用不同浓度的氢氧化钠 (NaOH) 溶液对棕榈纤维进行处理, 研究了这种碱处理对于棕榈纤维增强环氧树脂复合材料拉伸强度的影响。发现, 随着碱浓度的增加和浸润周期的增长, 复合材料的拉伸强度降低, 而拉伸模量要略高于未处理纤维增强复合材料的样品。John 等人^[40]将油棕榈和剑麻纤维混合并进行化学改性, 研究了这种改性对于增强天然橡胶基体复合材料拉伸性能的影响; Pasquini 等学者^[41]研究了甘蔗渣表面酯化处理对于其增强低密度聚乙烯 (LDPE) 复合材料拉伸性能的影响。

2009 年, Gu H 学者^[42]研究了氢氧化钠溶液的处理对于棕纤维增强 PP 复合材料拉伸性能的影响; Seki Y 学者^[43]做了硅氧烷处理黄麻纤维对于其增强热塑性树脂拉伸性能的影响的研究; Nakamura 等学者^[44]研究了温度对于苧麻增强可降解聚酯复合材料拉伸性能的影响; Xue 等学者^[45]也研究了温度对于洋麻增强环氧树脂复合材料拉伸强度的影响, 并分析了和麻纤维的含量对复合材料拉伸强度的影响; 另外, Chen 等人^[46]研究了竹纤维增强乙烯复合材料的吸水率和拉伸性能。

2010 年, Hassan 等学者^[47]研究了黄麻和葵叶的混合纤维增强 PP 复合材料的拉伸性能; 学者 Yousif B F^[48]研究了油棕榈纤维的体积分数对其增强聚合物复合材料拉伸性能的影响; Singh 等人^[49]研究了黄麻增强聚合物夹层复合材料板材的拉伸性能。

1.2.3 WPCs 冲击性能的研究

冲击强度用于表征在高速的应力作用下材料的抗断裂能力。抗冲击性能差是 WPCs 的一个力学性能缺陷, WPCs 的冲击性能与玻璃纤维增强热塑性塑料复合材料相似。因此, 近几年, 学者们也致力于发展纤维制造技术和改进复合材料生产工艺, 以期提高纤维和基质的结合度。

2003 年, Bakar A A 和 Hassan A^[50]制备了油棕榈填充聚氯乙烯(PVC)复合材料, 研究了纤维和丙烯酸塑料含量以及抗冲击改性剂丙烯酸和氯化聚乙烯(CPE)的含量对复合材料冲击性能的影响。冲击试验的结果显示, 无填充的 PVC 样品是脆性材料, 随着冲击改性剂含量的增加, 材料变成韧性。纤维的填入导致复合材料冲击性能降低, 随着纤维含量的增加, 冲击性能显著降低, 纤维的含量从 10 phr 上升到 40 phr, 丙烯酸改性 PVC 和 CPE 改性 PVC 的冲击强度分别下降了 40% 和 30%。另外, 冲击改性剂使得纤维增强 PVC 复合材料的抗冲击强度得到提高, 纤维含量在 20 phr 或者更高, CPE 改性 PVC 的冲击强度较丙烯酸改性 PVC 的冲击强度高。同年, Nechwata 等学者^[51]研究了加工方式对纤维增强 PP 复合材料的冲击性能的影响。

2007 年, Lei 等学者^[52]用甘蔗渣增强回收 HDPE 复合材料, 并研究了偶联剂的种类和添加量对复合材料冲击性能的影响, 马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)、羧酸盐聚乙烯(carboxylated polyethylene, CAPE)、混合钛(titanium-derived mixture, TDM)的添加改善了复合材料中纤维和基质的结合度, 提高了冲击强度, 并以此对比了纯 HDPE 复合材料的冲击性质, 当 MAPE 含量增加时, 冲击性能有所提高。Yuanjian T、Isaac D H^[53]和 Dhakal 等学者^[54]为了研究无纺麻纤维对增强材料冲击性能的影响, 对大麻纤维增强不饱和聚酯复合材料进行低速冲击试验, 他们制备了不同体积分数(0%、6%、10%、15%、21%和 26%)的纤维增强复合材料, 将它们的冲击性能和等量纤维短切原丝薄毡 E-玻璃纤维增强材料相比, 作为增强剂大麻纤维显著提高了复合材料弯曲所能承受的

最大载荷（极限载荷）和材料所吸收的冲击能量。另外，纤维体积分数影响了复合材料的硬度、冲击载荷和总吸收能量，与大麻纤维增强不饱和聚酯复合材料相比，未增强的不饱和聚酯样本在较小的力和较低的冲击能量的作用下发生断裂并显示出脆性断裂行为，冲击试验的结果显示，21%体积分数的纤维增强材料试样总吸收能量和等量短切原丝薄毡 E-玻璃纤维增强不饱和聚酯的试件的吸收能量相等。

2008 年，Huda 等学者研究了竹纤维含量对于增强聚乳酸（PLA）复合材料的冲击强度的影响，发现随着纤维含量的增加，冲击强度减弱；在冲击试验中，增强纤维和基体之间结合度能有效地提高材料的抗断裂和抗裂纹扩大的能力；质量分数为 31% 的竹纤维经过硅烷处理可使其增强 PLA 复合材料的冲击强度提高 33%^[55]。Yao 等学者通过熔融共混和模压技术，用 4 种稻纤维（稻皮、稻叶、稻管和稻杆）填充纯的 HDPE 和回收的 HDPE 制备复合材料，稻皮纤维增强的复合材料片材的冲击强度好于其他形式的稻纤维增强材料；另外，稻叶、稻管和稻杆纤维增强复合材料冲击性能之间略有差异，对比于纯 HDPE，回收的 HDPE 和复合材料的冲击性能有显著的提高^[56]。

2009 年，Oksman^[57]、De Farias M A^[58]和 Ruksakulpiwat^[59]等学者先后研究了剑麻、马尼拉麻、黄麻和亚麻纤维的微结构，桃棕榈的叶柄纤维（桃棕榈粉末和编织物）的指向性，冲击改性剂（天然橡胶、乙烯丙烯炔），对于 WPCs 冲击性能的影响。

2010 年，Alamgir Kabir M 等学者将质量分数不同（20%、25%、30% 和 35%）的黄麻纤维经过碱处理（o-HBDS: o-hydroxybenzenediazonium salt），并对比了处理前后的黄麻增强 PP 复合材料的冲击强度以及前人的实验研究，发现冲击强度最多提高了 1 倍^[60]。

1.3 WPCs 的力学模型研究进展

在 WPCs 的研究开发以及生产过程中，较多地采用了多种力学性能检测设备和表面分析仪器，使我们对 WPCs 的各种力学性能、吸水性能、耐用性能等有了全面了解^[61, 62]。然而，与其他复合材料相比，在 WPCs 研究中数理分析手段的运用还极其有限。分析模型是研究和预测复合材料力学行为的简单而实用的方法^[63, 64]，对材料性能设计和预测起到重要

作用,为制造工艺调整和构件组成施工提供了参考依据。

研究者通常利用复合材料组成成分特性的函数关系,建立模型来描述复合材料相应的特性。描述短纤维增强聚合物的有效的力学模型(包括宏观、微观、细观力学模型)有多种类型,最常用的有 ROM、Cox 模型、Boryer-Bader 模型、Halpin-Tsai 模型和 Kelly-Tyson 模型等^[63, 64]。近几年来,有少数学者的研究也涉及了 WPCs 性能预测的数学模型。本节对数学手段在 WPCs 的力学性能研究领域的应用情况和可能应用于 WPCs 的数学手段进行介绍,并评述各种方法的优缺点,对其在 WPCs 中的应用进行展望。

对于复合材料力学性质的描述,通常是通过引入一些参量来研究其对复合材料力学性能的影响程度,常用的参量有:纤维长度,纤维指向因子,纤维分散度,纤维的几何形状,纤维和基体的界面黏合度等。描述 WPCs 力学性能的模型主要有 ROM、Cox 模型、Halpin-Tsai 模型、Boryer-Bader 模型和 Kelly-Tyson 模型等。

1.3.1 混合法则

混合法则(The Rule of Mixtures, ROM)的基本公式为:

$$P = \sum P_i v_i \quad (1-1)$$

应用到 WPCs 上,ROM 可以解释成一种利用纤维和基体体积的加权特性和预测复合材料性质的常用的简单方法^[64]。此模型还被用在分析金属及其化合物纤维复合材料、陶瓷基复合物的拉伸研究中。该分析模型规定,复合材料的性质就是它的组成物质的体积加权平均性质,即:

$$P_c = CP_f v_f + P_m v_m \quad (1-2)$$

式中, v_f 是纤维的体积分数, v_m 是基体的体积分数, P 是材料的任意性质。下标 f 、 m 和 c 分别表示纤维、基体和复合材料^[64]。纤维取向因子 C 在其中也发挥了很大的作用。对于三维随机排列的纤维, C 取值为 $1/5$; 而对于二维平面随机分布的纤维, C 取值为 $3/8$; 另外,对于轴向负载的纤维, C 的值为 1 ^[64]。近年来,人们研究天然纤维材料时,将 C 取值为 $3/8$ ^[65]。还有些学者尝试利用纤维长度 l 和 C 等因素来调整加权系数,从而改进混合法则^[66]。